



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: variazione della riflettanza a seguito di invecchiamento naturale

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/2012/113

VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI DI COOL MATERIALS ESPOSTI ALL'AMBIENTE URBANO: VARIAZIONE DELLA RIFLETTANZA A SEGUITO DI INVECCHIAMENTO NATURALE

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 Anna Laura Pisello (Università di Perugia) per le tegole testate durante questo programma sperimentale.

Indice

Sommario	4
<i>Introduzione</i>	5
<i>Oggetto della ricerca</i>	5
<i>Motivazione della ricerca</i>	5
<i>Descrizione delle attività</i>	5
<i>Obiettivi</i>	6
<i>Analisi della letteratura e dati disponibili sull'influenza della deposizione di sporco sulla riflettanza solare dei materiali per l'involucro edilizio</i>	7
Analisi della normativa tecnica: procedure di esposizione naturale	11
Materiali testati	12
Esposizione naturale in ambiente urbano	13
Risultati e discussione	16
<i>Analisi del comportamento complessivo dei materiali esposti</i>	16
Conclusioni	43
Riferimenti bibliografici	44
Riferimenti normativi	45
Abbreviazioni ed acronimi	46
Allegato A - Risultati per tutti i campioni	47
Allegato B - Curriculum scientifico del gruppo di lavoro	52

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 sporramento, e processi di invecchiamento dei materiali. Tutto ciò determina l'alterazione dell'aspetto e il decadimento nel tempo della riflettanza, aumentando la radiazione solare assorbita e la temperatura superficiale, e quindi il fabbisogno energetico per la climatizzazione estiva; si ha, in aggiunta, una minore durabilità dei materiali (maggiormente soggetti a shock termici e dilatazioni differenziali). In particolare, per materiali porosi, già il solo assorbimento d'acqua riduce la riflettanza e causa una maggiore predisposizione allo sporramento.

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 granigliate oppure rivestite in opera con un coating elastomerico e tegole in laterizio.

Al tempo zero e ogni tre mesi viene misurata la riflettanza spettrale (fra 300 e 2500 nm) valutando l'effetto della deposizione di sporco e dell'invecchiamento sulle proprietà ottiche. Già dopo tre mesi di esposizione i materiali più riflettenti presentano un decremento di riflettanza solare compreso fra il 10 e il 15%, mentre i materiali meno riflettenti mantengono inalterata la propria riflettanza solare (perché lo strato di sporco depositato ha una riflettanza dello stesso ordine di grandezza del campione).

Introduzione

Oggetto della ricerca

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 sporcamento, e processi di invecchiamento dei materiali, con conseguente alterazione dell'aspetto e variazione nel tempo della riflettanza. La ricerca prevede lo studio dell'andamento nel tempo della riflettanza solare di prodotti per coperture di edifici sottoposti a invecchiamento naturale.

Motivazione della ricerca

In area urbana le temperature medie dell'aria sono più alte che in area non urbana, specialmente in condizioni estive, anche durante la notte [14]. Questo fenomeno, noto come isola di calore urbana, é causato da carenza di vegetazione e ventilazione, dal calore prodotto dalle attività umane, dall'assorbimento della radiazione solare, oltre che dall'inerzia termica della città [16]. A Milano, le temperature medie mensili sono maggiori di quelle misurate all'aeroporto di Linate di oltre 4°C in inverno, e di oltre 3°C in estate [15]. Di conseguenza, per un edificio ad uso terziario, ad esempio, il fabbisogno è dal 30 al 60% inferiore per il riscaldamento, e dal 15 al 70% maggiore per il raffrescamento in area urbana invece che in zona extra-urbana [15; 18]. Akbari [1] calcola che con coperture ad alta albedo e coperture a verde a Los Angeles si possa ridurre di 3-4°C la temperatura in regime estivo, riducendo il fabbisogno per la climatizzazione dal 20 al 40%. Infine, Akbari et al. [3] stimano che passando da albedo 0.05 a 0.80 per 100 m² di copertura si riducano le emissioni di CO₂ di 10 t/anno.

Le superfici ad alta riflettanza sono indicate come una delle tecniche principali per mitigare il clima urbano e contenere il fabbisogno per la climatizzazione estiva [9]. Tuttavia, l'efficacia di tali tecniche dipende dal mantenimento nel tempo delle prestazioni: se si accumula sporco e le caratteristiche superficiali vengono alterate per effetto dell'invecchiamento dei materiali, si ha un sensibile aumento dell'assorbanza solare [13; 17]. Inoltre, bagnabilità e riflettanza sono strettamente connesse fra di loro e alla natura della superficie stessa, e, per superfici porose, il solo assorbimento d'acqua comporta una riduzione della riflettanza (Figura 1).

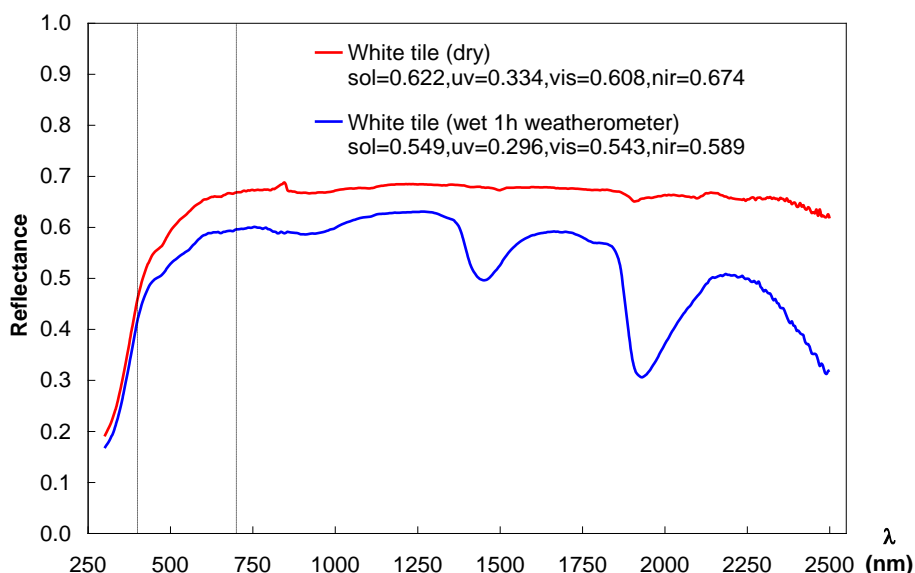


Figura 1. Riflettanza di una tegola asciutta (linea rossa) e dopo un'ora di pioggia (linea blu), riprodotta in camera climatica (misure effettuate da R. Paolini e M. Sleiman, LBNL, Luglio 2011).

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:

- 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 solare ogni 3 mesi.

Il campo di esposizione sarà implementato conformemente alle indicazioni del Cool Roofing Rating Council (USA) e dell'EU-Cool Roofing Council.

Obiettivi

Gli obiettivi di questo studio includono:

- La messa a punto di una procedura per l'esposizione in esterno e la caratterizzazione del comportamento radiativo nel tempo di materiali per l'involucro edilizio;
- La valutazione della variazione nel tempo della riflettanza solare di materiali per l'involucro edilizio.

Analisi della letteratura e dati disponibili sull'influenza della deposizione di sporco sulla riflettanza solare dei materiali per l'involucro edilizio

In letteratura sono presenti diversi lavori che valutano la variazione della riflettanza nel tempo dei materiali per l'involucro edilizio [2; 4; 6; 7; 10; 12; 13; 17]. Bretz e Akbari [7], sulla base del monitoraggio del fabbisogno energetico di edifici, calcolano, per gli anni successivi al primo (dal secondo al decimo anno) una riduzione addirittura del 20% rispetto al risparmio energetico ottenuto durante il primo anno di vita utile di una copertura ad alta riflettanza. Calcolano inoltre che, anche se esistono dei metodi di pulizia che efficacemente riportano una superficie edilizia alla riflettanza iniziale, degli interventi di pulizia della copertura non sono economicamente sostenibili al solo fine del risparmio energetico.

Berdahl et al. [4] analizzano misure di riflettanza spettrale di campioni di cool materials per coperture e individuano nei depositi carboniosi dovuti a prodotti della combustione presenti nel particolato atmosferico la componente principale che causa l'aumento dell'assorbanza solare; notano anche che questi depositi assorbono maggiormente a basse lunghezze d'onda che nel NIR (o nell'intorno delle lunghezze d'onda del rosso), determinando un viraggio verso il giallo delle superfici ricoperte da questi depositi.

Tuttavia, anche se in letteratura sono disponibili molte informazioni - anche spettrali - relative all'influenza dello sporco sulla riflettanza dei materiali per le costruzioni (specie per coperture) e all'efficacia di tecniche di pulizia e manutenzione per recuperare il valore di riflettanza iniziale [2; 13], questi dati riguardano principalmente il contesto del Nord America. Per quanto riguarda le membrane impermeabilizzanti (specialmente quelle sintetiche) i prodotti utilizzati sul mercato americano non sono drasticamente diversi da quelli impiegati in Europa (in molti casi i produttori sono i medesimi), mentre per altri prodotti ci sono differenze maggiori (soprattutto per quanto concerne i rivestimenti per facciate, non trattati in questo studio). Alcuni prodotti per coperture, come le tegole in cotto, sebbene meno impiegati negli Stati Uniti che nell'Europa Mediterranea, sono comunque valutate e oggetto di studio anche negli USA. Soprattutto, le informazioni spettrali sul decadimento della riflettanza valutata su tutto lo spettro solare (quindi misurate con uno spettroflettometro UV-VIS-NIR) sono relative a programmi sperimentali, con condizioni e siti di esposizione naturale diversi e non ancora normalizzati (trattandosi di ricerca di base o applicata), e in pochi casi relative a contesti europei.

Oltre alle informazioni in letteratura scientifica, sono anche disponibili dei database di prodotti soggetti a esposizione naturale in ambiente esterno dei quali è stata valutata la riflettanza solare ogni tre mesi per un periodo non inferiore a tre anni, cioè il database dell'US EPA [19] e il database del CRRC [8], che riportano informazioni relative rispettivamente a 5397 prodotti (a marzo 2011) e a 1357 prodotti (ad aprile 2011). Tuttavia, come notato da Sleiman et al. [17], questi due database non comprendono informazioni spettrali, utili per identificare gli agenti che comportano lo sporco. Inoltre, sono relativi a siti di esposizione nei soli Stati Uniti d'America, e le informazioni non sono disponibili in maniera disaggregata per i diversi siti (cioè la riflettanza solare dopo tre anni di esposizione è la media delle riflettanze solari dei campioni esposti presso i diversi siti). Più nel dettaglio, i dati forniti dal database del CRRC (sviluppato a partire dal 2005) sono relativi a campioni esposti presso tre campi di esposizione: uno in clima temperato e ambiente inquinato sub-urbano (in Ohio), uno in ambiente caldo secco extra-urbano (in Arizona), uno in ambiente caldo umido extra-urbano (in Florida). E' interessante notare come nessuno dei campi di esposizione si trovi all'interno di un'area urbana (naturalmente per motivi di spazio richiesto per le strutture per l'invecchiamento naturale).

Nel database dell'EPA (sviluppato a partire dal 2002), invece, la riflettanza solare invecchiata è fornita dal produttore e può essere una media di misure in situ effettuate su tre edifici, una media di misure effettuate su campioni prelevati da tre edifici, oppure può essere ottenuta dal CRRC. L'EPA non standardizza i siti di esposizione e richiede che almeno un edificio sia in una delle principali aree metropolitane degli Stati Uniti. Sleiman et al. [17] hanno analizzato i dati presenti nei database dell'EPA e del CRRC, eliminando i dati ripetuti e le misure mancanti, e recuperando i valori di riflettanza solare relativi ai campioni esposti presso ciascuno dei tre siti del CRRC. In questo modo hanno visto che, eccetto che per i prodotti con riflettanza solare più bassa (R_{SOL} iniziale minore di 0.20), tutti i prodotti con riflettanza solare iniziale maggiore presentano i maggiori decrementi di riflettanza solare. Inoltre, per i campioni con R_{SOL} iniziale maggiore di

0.40 i decrementi assoluti sono fra due e tre volte maggiori in un sito caldo umido (Florida) che in un sito caldo secco (Arizona), e intermedie in un sito temperato e inquinato (Ohio), ma sempre con differenze relative, fra un sito e l'altro, comprese in un intervallo del 15%. Concentrandosi sui risultati ottenuti con l'esposizione in Ohio (il sito che potrebbe essere più simile alle condizioni riscontrabili nelle principali aree urbane italiane), si vede che i decrementi assoluti rispetto al valore iniziale sono pari a: 0.002 ± 0.023 per $R_{SOL,i}$ fra 0.00 e 0.20; 0.009 ± 0.015 per $R_{SOL,i}$ fra 0.20 e 0.40; 0.037 ± 0.040 per $R_{SOL,i}$ fra 0.40 e 0.60; 0.101 ± 0.075 per $R_{SOL,i}$ fra 0.60 e 0.80; e 0.173 ± 0.092 per $R_{SOL,i}$ fra 0.80 e 1.00 (dati da Tab. 3 [17]).

Per alcuni prodotti come le membrane granigliate, con bassa $R_{SOL,i}$, vi è una tendenza all'aumento della riflettanza: la deposizione può infatti avere una riflettanza maggiore del substrato e può esservi un'evaporazione di oli dalla membrana, che lascia maggiormente scoperti i grani più chiari [5; 6].

In generale, per tutti i prodotti per copertura testati dal CRRC, si vede che i prodotti aventi $R_{SOL,i}$ minore di circa 0.20 tendono ad aumentare la propria riflettanza nel tempo, mentre, oltre $R_{SOL,i}$ pari a circa 0.50, maggiore è $R_{SOL,i}$, maggiore è il decremento dopo tre anni di esposizione, con una maggiore dispersione dei risultati (Figura 2); ciò significa che l'influenza delle caratteristiche del prodotto (es.: rugosità superficiale, porosità aperta, proprietà elettriche che influenzano l'adesione di particolato, etc.) cresce al crescere di $R_{SOL,i}$, quando questa è superiore a circa 0.50.

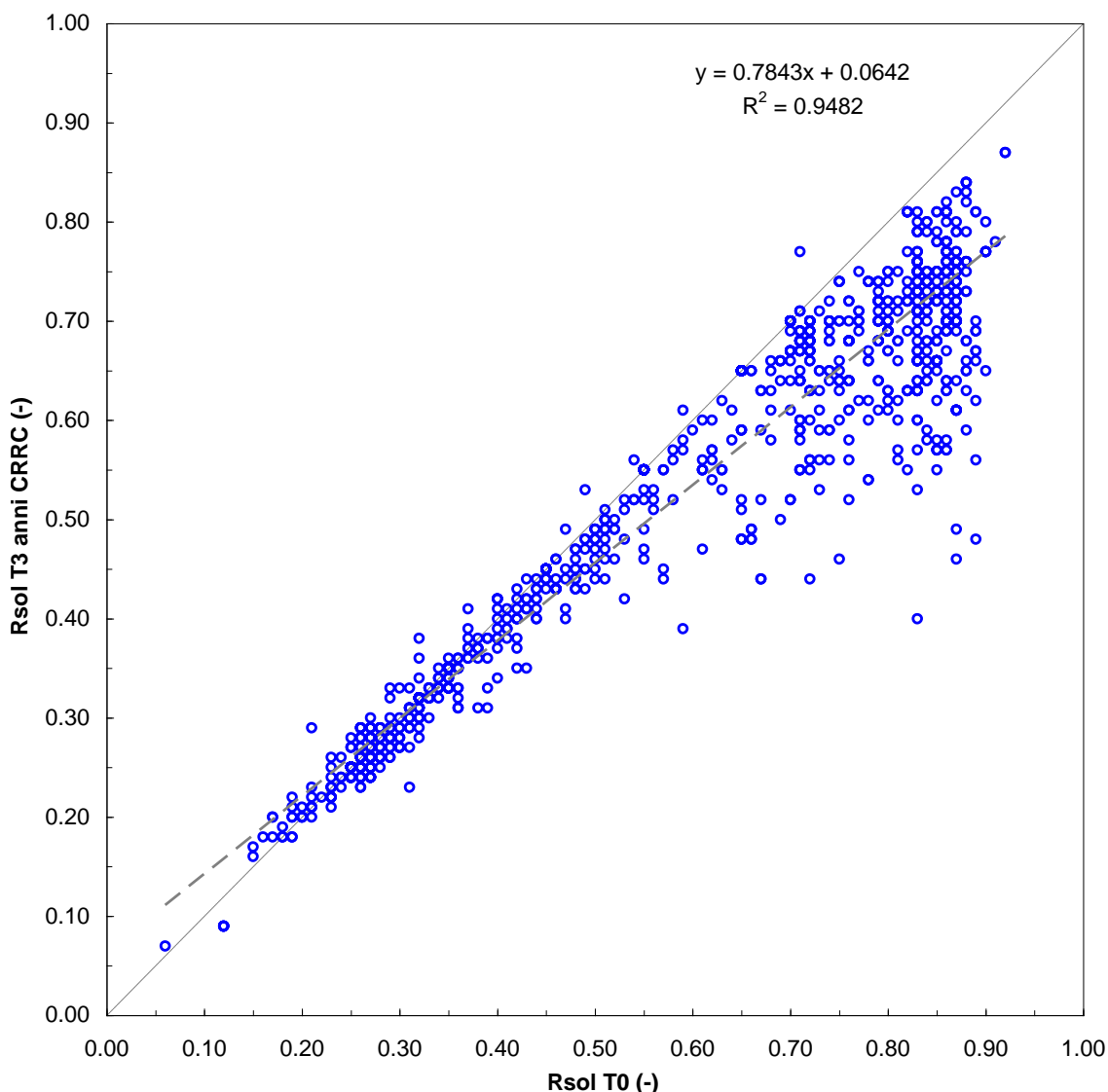


Figura 2. Media della riflettanza solare dei prodotti esposti presso i tre siti del CRRC dopo tre anni di invecchiamento naturale, rispetto alla riflettanza solare iniziale (dati di 1705 prodotti elaborati dal database del CRRC, a settembre 2012. Fonte: CRRC).

È inoltre interessante notare come per le sole tegole la riflettanza solare abbia un deprezzamento meno pronunciato che per altri prodotti (Figura 3). In particolare, per le tegole aventi riflettanza iniziale maggiore o uguale a 0.50, la mediana del decadimento relativo al valore iniziale è del 7.8% (mentre la mediana per tutte le tegole presenti nel database è del 4.4%), e solo un decimo di tutte le tegole testate mostra un deprezzamento superiore al 12%.

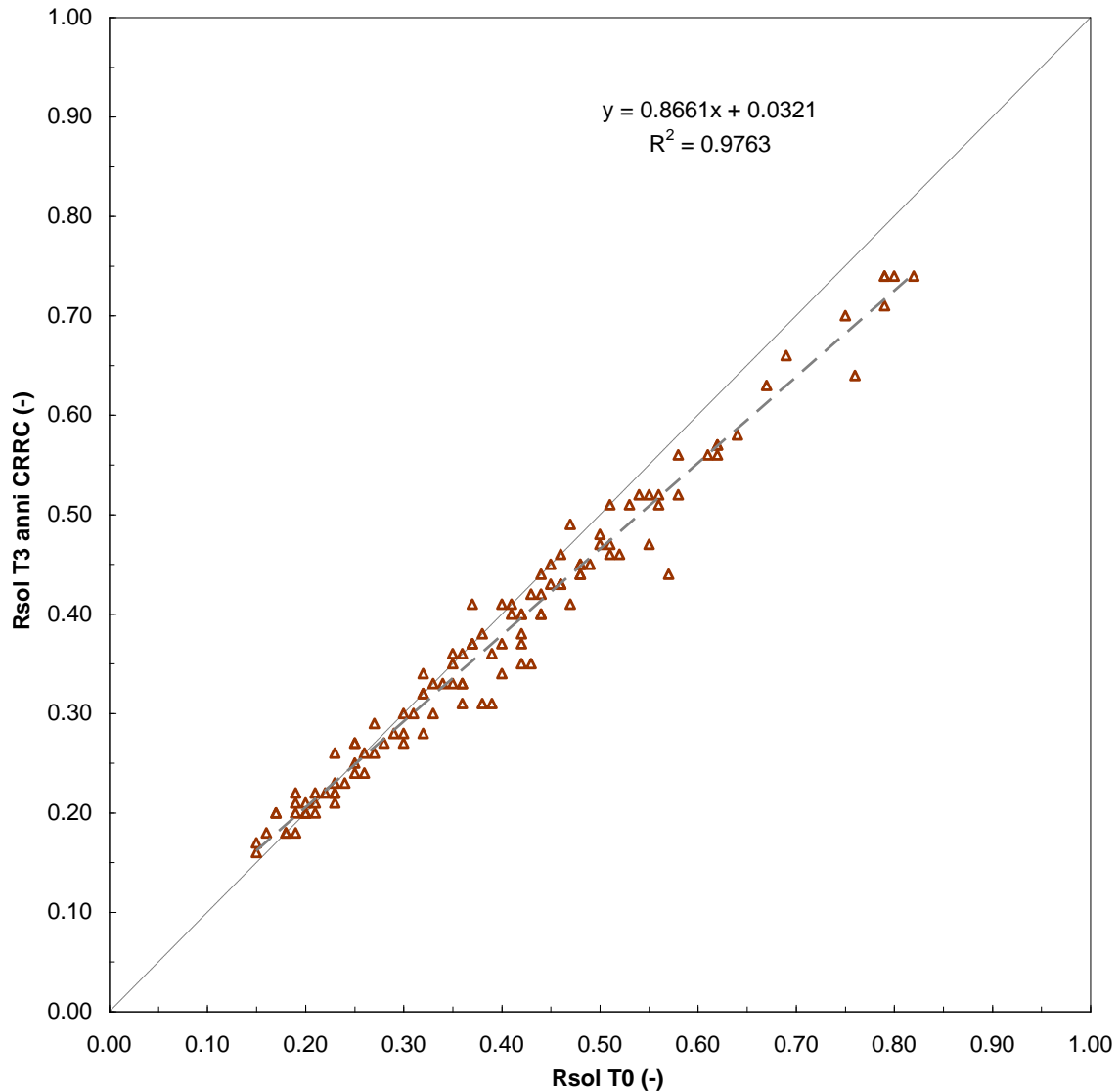


Figura 3. Media della riflettanza solare delle tegole esposte presso i tre siti del CRRC dopo tre anni di invecchiamento naturale, rispetto alla riflettanza solare iniziale (dati di 119 tegole elaborati dal database del CRRC, a settembre 2012. Fonte: CRRC).

Per quanto concerne l'emissività termica, sempre nel database del CRRC (Figura 4) si osservano variazioni inferiori al 10% su di un periodo di tre anni rispetto al valore iniziale, e che per circa il 90% dei prodotti la variazione rispetto al valore iniziale è inferiore del 5%, con una mediana del 1.15%.

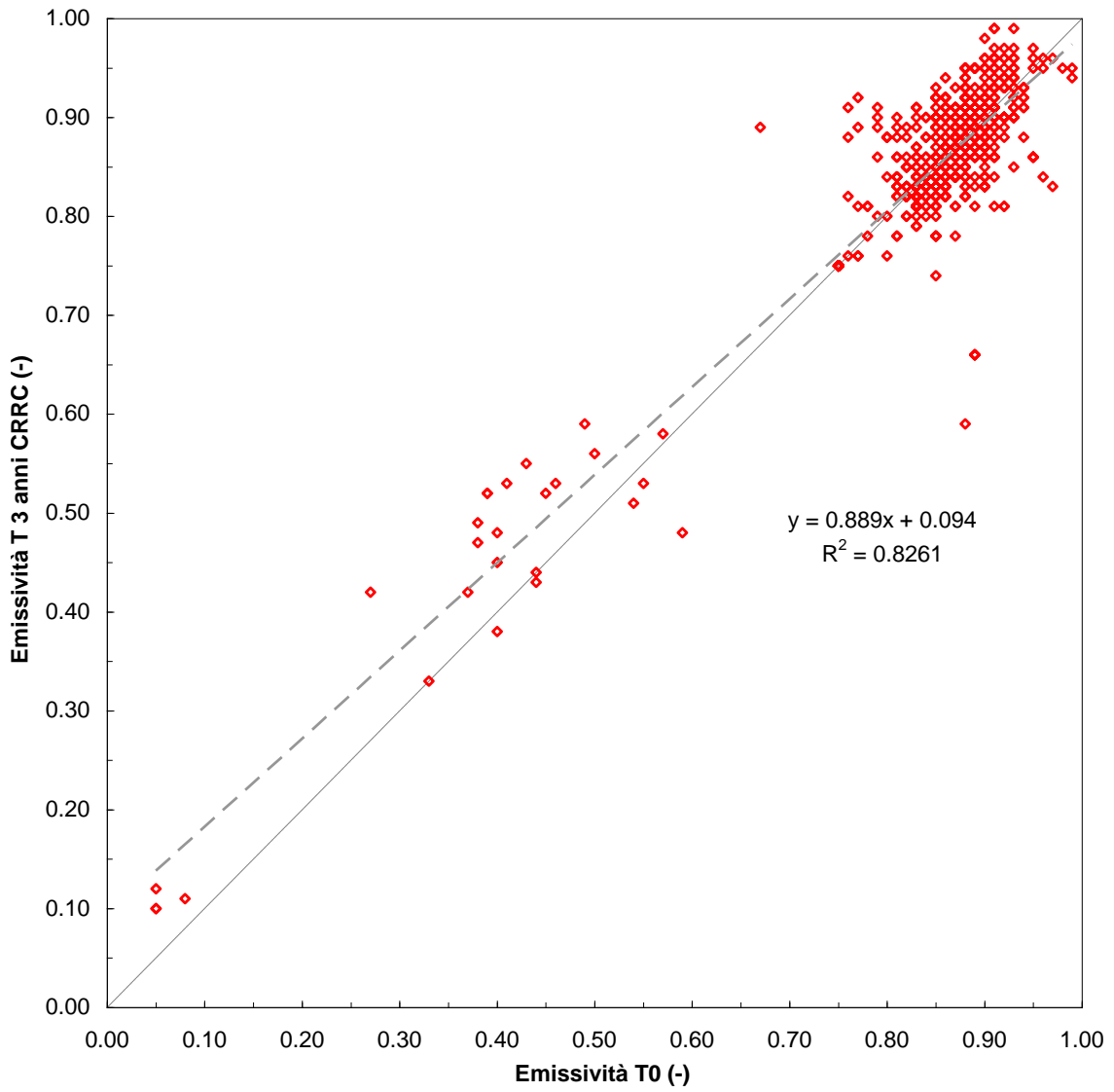


Figura 4. Media dell'emissività termica dei prodotti esposti presso i tre siti del CRRC dopo tre anni di invecchiamento naturale, rispetto all'emissività termica iniziale (dati di 1705 prodotti elaborati dal database del CRRC, a settembre 2012. Fonte: CRRC).

Analisi della normativa tecnica: procedure di esposizione naturale

L'esposizione naturale in ambiente esterno di materiali e componenti al fine di valutarne la durabilità o le prestazioni nel tempo è una pratica consolidata e diffusa in quasi ogni ambito (ad esempio nell'industria automobilistica, nel settore delle costruzioni, e per il fotovoltaico e i collettori solari). A questo fine, negli anni, sono state sviluppate e revisionate diverse normative per condurre programmi di esposizione in ambiente esterno. Data la grande diversità degli ambiti di impiego, sono state sviluppate diverse normative, e anche per i materiali, componenti, e prodotti da impiegare nel settore delle costruzioni sono state sviluppate normative per l'esposizione di prodotti, più che normative generali. A questo scopo sono state valutate diverse normative, confrontandone i diversi aspetti.

Ragionevolmente, per minimizzare i limiti di applicazione della stessa normativa per l'esposizione di prodotti meno convenzionali o per scopi speciali, tutte le normative forniscono delle indicazioni prestazionali in merito alle strutture per l'esposizione, alla dimensione dei provini da esporre, al sistema di fissaggio, alle caratteristiche del sito di esposizione e ai dati climatici da registrare. Alcuni aspetti, tuttavia, appaiono non completamente armonizzati (quindi irrisolti) ed è interessante analizzarli nel dettaglio. In tutte le norme nazionali o internazionali analizzate [20; 22; 25; 26; 29; 30] viene chiaramente indicato che:

- la selezione del sito di esposizione sia fondamentale, e che campi di esposizioni in ambienti molto più (o molto meno) inquinati del normale dovrebbero essere evitati;
- il tipo e l'albedo del terreno (es.: erba, calcestruzzo, ghiaia, etc.) su cui sono posizionati i telai per l'esposizione influisce in maniera rilevante sulle condizioni di esposizione;
- i risultati dell'esposizione naturale possono variare a seconda del periodo dell'anno in cui vengono esposti i campioni e di anno in anno;
- le condizioni climatiche dovrebbero essere monitorate e registrate, assieme alle altre condizioni di esposizione.

Tuttavia queste indicazioni spesso non sono osservate (in particolare in molti siti per l'esposizione non sono registrati i dati climatici). La norma ISO 2810 [29] indica un'altezza minima di 45 cm da terra per l'esposizione naturale dei campioni, ma non fornisce un'altezza da terra definita per i telai per l'esposizione, mentre le norme ASTM (la norma ASTM G 7 [20] è richiamata dalle altre) e la ISO 877-2 [22] forniscono uno schema tipo per i telai d'esposizione e un'altezza minima dei campioni da terra pari a 50 cm (la JTSM J 7601 [30] prescrive invece un'altezza minima di 30 cm). La norma ISO 2810 [29] suggerisce che il campo di esposizione sorga sul un terreno avente bassa riflettanza solare (per limitare la riflessione dal terreno della radiazione solare), ma ciò comporta delle maggiori temperature dell'aria rispetto, ad esempio, a un prato in erba, a causa del maggiore flusso turbolento di calore sensibile. La norma ASTM G 7 [20] suggerisce invece che il tipo di terreno su cui si sviluppa il campo di invecchiamento sia quello tipico dell'area climatica in cui è condotta l'esposizione. Se normalizzando il terreno può essere che si esponano dei materiali in condizioni non tipiche dell'effettivo contesto di utilizzo, avendo terreni diversi risulta meno semplice il confronto fra diversi campi di prova.

In tutte le normative analizzate, le inclinazioni suggerite per l'esposizione sono pari a 5°, 45°, e 90° rivolti verso l'equatore. Si sottolinea, però, che per molti prodotti da costruzione, l'inclinazione d'impiego è molto differente dalle condizioni di esposizione indicate in normativa. Ad esempio, per le coperture piane in Italia, la pendenza minima raccomandata - quindi spesso anche la massima realizzata - è dell'1.5% [11; 21], cioè circa 0° 52'; mentre per le coperture in tegole la pendenza minima raccomandata è del 30%, pari a 16° 42').

Una norma specifica per l'esposizione naturale di prodotti per coperture e la valutazione della loro riflettanza solare nel tempo è la norma ANSI/CRRC-1 [34], che, per quanto concerne le procedure di esposizione richiama la ASTM G 7 [20], e si concentra sulla preparazione dei campioni e loro caratterizzazione al tempo zero, e sui metodi di misura delle proprietà ottico radiative, ammettendo come metodi di misura della riflettanza solare uno fra i metodi di prova descritti in ASTM E 903 (misura con uno spettroflettometro [24] e calcolo della riflettanza solare utilizzando lo spettro solare in ASTM E 891 [23]), ASTM E 1918 (misura non spettrale, con un albedometro o un piranometro [28]), oppure ASTM C 1549 (misura non spettrale, con un riflettometro solare portatile [27]). È da notare come, in molti casi (ad esempio per i siti di esposizione utilizzati dal CRRC), materiali per coperture siano esposti a poco più di 0.50 m da terra, quindi soggetti a un'anomala esposizione alle polveri sollevate dal vento.

Materiali testati

Sono stati selezionati 16 prodotti per coperture di cui 14 membrane impermeabilizzanti e 2 tegole tipo olandese. Per ogni materiale è stato selezionato un prodotto avente proprietà "standard", ossia rappresentativo delle proprietà dei prodotti già presenti in commercio, e una o più alternative aventi prestazioni ottimizzate, cioè ad alta riflettanza (cool materials) o con proprietà fotocatalitiche. Fra le membrane sono state selezionate membrane sintetiche poliolefiniche (TPO e TPO/FPA), in polivinilcloruro (PVC), bituminose con armatura polimerica e rivestite con un coating elastomerico da applicarsi in opera, bituminose con armatura polimerica e rivestite con graniglia. I prodotti sono stati selezionati cercando di includere nel programma di esposizione materiali aventi diverse finiture superficiali (più o meno rugosi) e soprattutto diverse riflettanze solari al tempo zero (Tabella 1), comprese fra 0.237 e 0.868.

Tabella 1. Materiali selezionati, condizioni di esposizione, e riflettanza solare iniziale, secondo ISO 9050 [31].

#	Num.	Cod.	Descrizione	Milano	Roma	Rsol @T0
1	x01	R/M-mg-	Membrana sintetica grigia in TPO/FPA	Hor (2°) + 45° Sud	Hor (2°)	0.259
2	x02	R/M-mp-	Membrana sintetica grigia in TPO/FPA con coating elastomerico bianco			0.852
3	x03	R/M-mb-	Membrana sintetica bianca in TPO/FPA			0.774
4	x04	R/M-m4-	Membrana sintetica bianca in TPO			0.838
5	x05	R/M-m5-	Membrana sintetica grigia in PVC			0.471
6	x06	R/M-m6-	Membrana sintetica bianca in PVC			0.868
7	x07	R/M-m7-	Membrana sintetica beige in TPO			0.609
8	x08	R/M-m8-	Membrana bitume-polimero con rivestimento elastomerico (tipo +)			0.818
9	x09	R/M-m9-	Membrana bitume-polimero con rivestimento elastomerico (tipo A)			0.742
10	x81	R/M-m10-	Membrana bitume-polimero con rivestimento elastomerico fotocatalitico			0.780
11	x82	R/M-m11-	Membrana bitume-polimero con rivestimento elastomerico (tipo B)			0.730
12	x83	R/M-m12-	Membrana bitume-polimero con rivestimento elastomerico colorato			0.398
13	x84	R/M-m13-	Membrana bitume-polimero granigliata fotocatalitica			0.285
14	x85	R/M-m14-	Membrana bitume-polimero granigliata (standard)			0.237
15	x10	R/M-Tm-	Tegola olandese in laterizio color testa di moro	30% Nord & 30% Sud	30% Nord & 30% Sud	0.485
16	x11	R/M-Tb-	Tegola olandese in laterizio color testa di moro rivestita di bianco			0.737

Esposizione naturale in ambiente urbano

Al fine di valutare l'andamento nel tempo della riflettanza solare di cool materials, sono stati selezionati due siti di esposizione in Italia, rappresentativi di diverse condizioni climatiche, ma accomunati dalla posizione all'interno di aree urbane: a Roma, presso la sede dell'ENEA (situata nella parte Nord della città, Figura 5), e a Milano, presso la sede di Piazza Leonardo da Vinci del Politecnico di Milano (situata nella parte Est della città, Figura 6).



Figura 5. Localizzazione del sito di esposizione naturale di Roma, presso la sede centrale dell'ENEA, sul Lungo Tevere Thaon Di Revel.

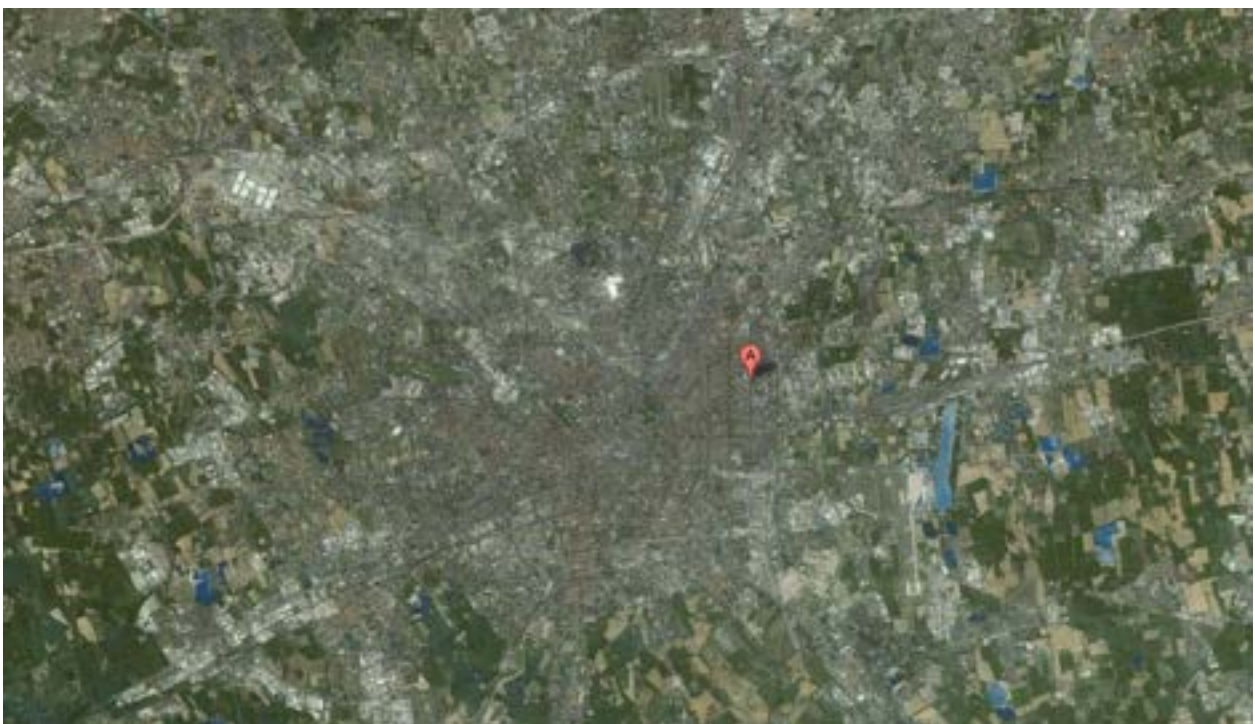


Figura 6. Localizzazione del sito di esposizione naturale di Milano, presso il Politecnico di Milano.

Sono stati scelti due siti urbani proprio perché l'impiego di materiali ad alta riflettanza per le coperture è proposto dalla letteratura scientifica internazionale come una tecnica di mitigazione dell'effetto isola di calore urbana; in particolare, i siti di esposizione sono collocati nella prima periferia urbana, e possono essere ritenuti rappresentativi del contesto in cui è collocato il patrimonio edilizio realizzato dopo il 1960 circa.

In entrambi i casi i campioni sono stati esposti sulla copertura di edifici non interessati da ombre portate e non in prossimità di sorgenti localizzate di inquinanti (quali inceneritori o centrali termiche di dimensione rilevante); i campioni sono quindi esposti in condizioni di inquinamento medio urbano ad un'altezza pari a quella degli edifici al contorno (Figura 7). Presso il sito di esposizione di Milano è presente anche una stazione meteo (rilevamento di temperatura e umidità relativa dell'aria, velocità e direzione vento, precipitazioni, e radiazione globale) e una stazione di rilevamento dell'ARPA Lombardia a circa 100 metri di distanza.



Figura 7. Campo di esposizione a Milano.

Per quanto concerne le membrane impermeabilizzanti, sono stati esposti campioni di 10 cm x 10 cm, mentre per le tegole sono stati esposti sia piccoli campioni (di circa 5 cm x 5 cm) sia tegole intere.

I campioni sono stati posizionati su delle strutture di esposizione metalliche ad un'altezza di 80 cm dal piano della copertura e vincolati in modo isostatico ai telai con delle fascette in plastica (Figura 8), mentre le sole tegole intere sono state posizionate secondo la comune disposizione per la realizzazione di coperture a falda (Figura 9). Tutte le membrane impermeabilizzanti sono state esposte debolmente inclinate (con pendenza pari a circa 2°) sia a Milano che a Roma, mentre solo a Milano sono state in aggiunta esposte inclinate di 45° rivolte a Sud. Le tegole invece sono state esposte sia a Milano che a Roma inclinate del 30% rivolte a Nord e a Sud.

Per ogni prodotto, sito e condizione di esposizione, sono stati esposti tre campioni, dei quali è stata caratterizzata la riflettanza spettrale con uno spettroflettometro UV-VIS-NIR Perkin Elmer con sfera integratrice da 150 mm e sono stati calcolati i valori di riflettanza solare, nel campo UV, visibile e del vicino infrarosso secondo la norma ISO 9050 [31]. L'esposizione ha avuto inizio contemporaneo a Roma e Milano il 18 aprile 2012.



Figura 8. Strutture per l'esposizione naturale, presso il Politecnico di Milano.



Figura 9. Tegole intere esposte a Milano, presso il Politecnico di Milano.

Risultati e discussione

Dopo tre mesi di esposizione naturale - il 18 luglio 2012 - i campioni sono stati rimossi dai telai, ne è stata misurata la riflettanza spettrale, e sono stati quindi montati nuovamente sui telai per proseguire l'esposizione naturale.

Come detto, per ogni prodotto e condizione di esposizione (sito, orientamento e inclinazione) sono stati esposti tre campioni. I risultati vengono presentati dapprima relativamente al valore medio delle tre misure, considerando i valori di riflettanza solare, nel campo UV, visibile e del vicino infrarosso (calcolati secondo la norma ISO 9050 [31]) confrontando la deposizione dello sporco sulle diverse superfici e tenendo in considerazione le differenti riflettanze iniziali, rugosità e finitura superficiale. Sono quindi presentati i risultati delle misure spettrali per ogni prodotto, mostrando la curva della riflettanza al tempo zero e, per ogni condizione di esposizione, la curva che maggiormente si avvicina alla curva media delle tre misure. Si è scelto di non confrontare le curve medie al fine di mostrare direttamente le misure e poiché effettuando una media si otterrebbe, in alcuni casi, uno spettro non reale.

Analisi del comportamento complessivo dei materiali esposti

Dei sedici prodotti esposti - la cui riflettanza solare iniziale è compresa fra 0.237 e 0.868 - sono stati calcolati i valori medi (su tre misure) di riflettanza solare, nel campo della radiazione UV, visibile e del vicino infrarosso per la condizione iniziale (prodotti non esposti) e dopo tre mesi di esposizione a Roma (membrane debolmente inclinate e tegole inclinate del 30% rivolte a Nord e a Sud) e a Milano (membrane debolmente inclinate e inclinate di 45° rivolte a Sud, e tegole inclinate del 30% rivolte a Nord e a Sud). Per quanto concerne la riflettanza solare (Figura 10) si osservano decrementi marcati già dopo i primi tre mesi di esposizione per i prodotti maggiormente riflettenti, ad esempio una membrana bianca in TPO (prodotto n° 4) ha una riflettanza iniziale pari a 0.838 e dopo tre mesi ha una riflettanza pari a 0.711 esposta a Roma, e pari a circa 0.700 per i campioni esposti a Milano.

Per alcuni materiali la riflettanza dopo i primi mesi di esposizione è maggiore a Roma che a Milano (prodotti n° 1, 2, 4, 5, 6, e 15), mentre in altri casi accade l'opposto (prodotti n° 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, e 16). Si nota, in particolare, che tutte le membrane bituminose rivestite in opera con un coating elastomerico (5 prodotti, dal n° 8 al n° 12) presentano, dopo tre mesi di esposizione, una riflettanza maggiore a Milano rispetto a Roma, indicatore, forse, della predisposizione a raccogliere diversi tipi di particolato, o con diverse modalità. Gli altri prodotti esposti non presentano sistematicamente una riflettanza maggiore in uno dei due siti (o anche se ciò avviene si dispone di solo una coppia di prodotti dello stesso materiale, come per le membrane in PVC, per cui non si possono trarre conclusioni). Si registra che fra tutti i materiali ad alta riflettanza esposti le sole tegole rivestite di bianco non presentano una riduzione significativa di riflettanza solare, oltre alle membrane bituminose rivestite in opera con un coating fotocatalitico.

Per quanto concerne il comportamento nel campo della radiazione UV (Figura 11) non si osservano variazioni significative (in valore assoluto) rispetto a prima dell'esposizione. I valori di riflettanza nel campo della radiazione UV (misura effettuata fra 300 e 380 nm), infatti, dopo tre mesi di esposizione oscillano attorno al valore iniziale. È certamente da tenere presente che nel campo della radiazione UV la misura è soggetta a un maggiore errore di misura dato il basso valore della riflettanza UV dei campioni misurati (come per la maggior parte dei materiali da costruzioni) e considerata anche la minore potenza della lampada al deuterio utilizzata nella misura della regione ultravioletta; tuttavia, le diverse misure appaiono consistenti fra di loro, cioè se un campione presenta riflettanza iniziale minore (prodotti n° 2 e 10) o maggiore (prodotti n° 1, 3, 15, e 16) di quella dopo tre mesi ciò è vero per tutte le condizioni di esposizione, anche se nella maggior parte dei casi le differenze rispetto alla condizione iniziale sono trascurabili.

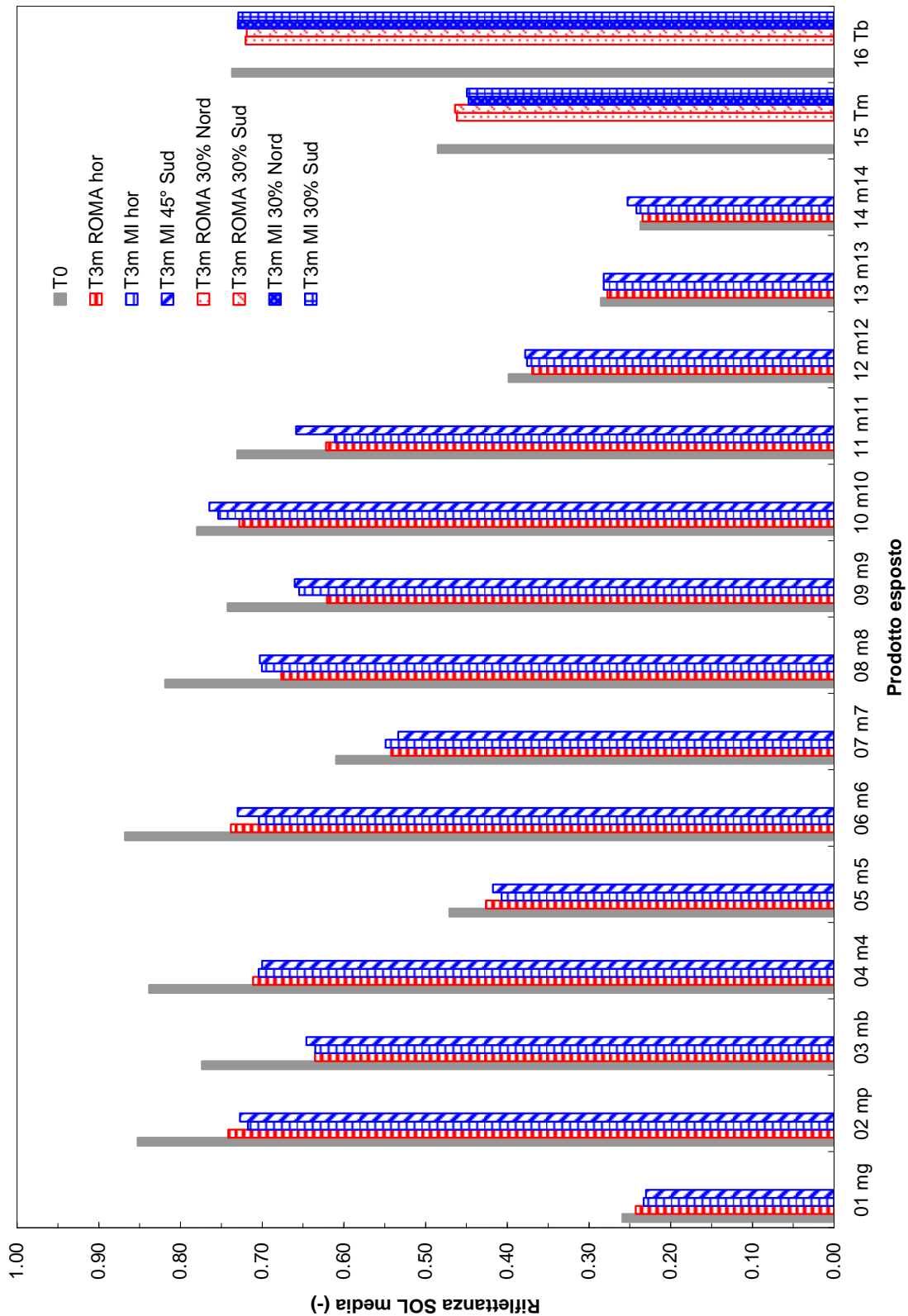


Figura 10. Valori di riflettanza solare media (su tre misure) per tutti i prodotti al tempo zero e dopo tre mesi di esposizione naturale a Roma e Milano. I prodotti da 1 a 14 sono membrane impermeabilizzanti (esposte con pendenza di 2° a Roma e Milano, e, a Milano, inclinate di 45° rivolte a Sud), mentre i prodotti 15 e 16 sono tegole per coperture discontinue (esposte con pendenza del 30% rivolte a Nord e a Sud, sia a Roma che a Milano).

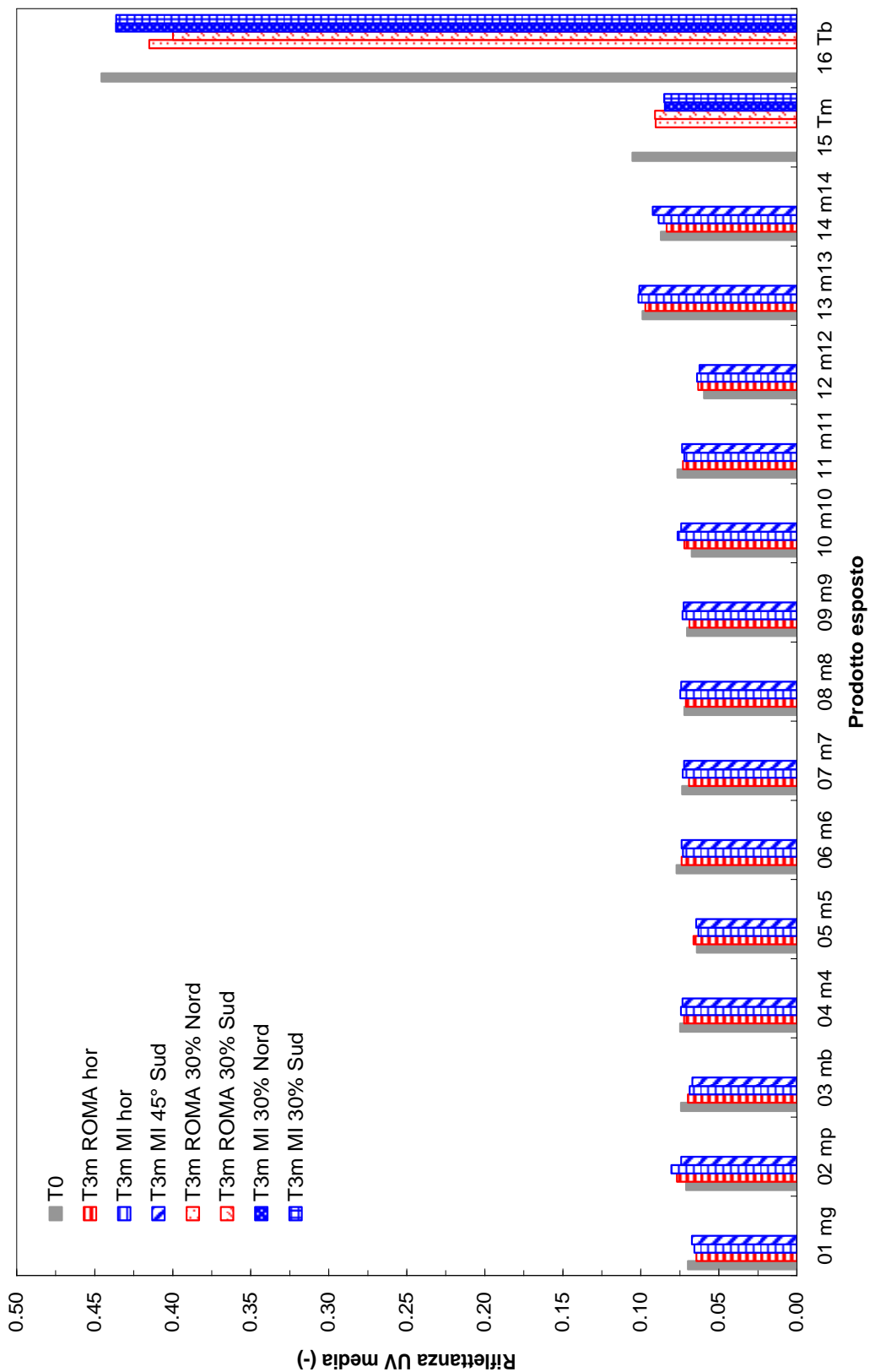


Figura 11. Valori di riflettanza nel campo della radiazione UV (300-380 nm) media (su tre misure) per tutti i prodotti al tempo zero e dopo tre mesi di esposizione naturale a Roma e Milano. I prodotti da 1 a 14 sono membrane impermeabilizzanti (esposte con pendenza di 2° a Roma e Milano, e, a Milano, inclinate di 45° rivolte a Sud), mentre i prodotti 15 e 16 sono tegole per coperture discontinue (esposte con pendenza del 30% rivolte a Nord e a Sud, sia a Roma che a Milano).

Per tutti i prodotti esposti, si osservano i maggiori decrementi di riflettanza nel campo della radiazione visibile (Figura 12). Ad esempio, sempre per una membrana bianca in TPO (prodotto n°4) la riflettanza iniziale nel visibile è pari a 0.897, mentre dopo tre mesi è compresa fra 0.719 (campioni esposti a Milano, inclinata di 45° rivolti a Sud) e 0.730 (campioni esposti a Roma debolmente inclinati), per un decremento medio (per tutte le condizioni di esposizione) pari a 0.173.

Nel campo del vicino infrarosso (fra 780 e 2500 nm) si osservano variazioni - rispetto ai valori iniziali - significative, anche se meno pronunciate che nel visibile. Prendendo come esempio sempre la stessa membrana bianca in TPO, si ha un valore iniziale medio pari a 0.820 nel NIR, mentre dopo tre mesi di esposizione la riflettanza nel NIR è compresa fra 0.733 (per campioni esposti a Roma debolmente inclinati) e 0.720 (per campioni esposti a Milano, inclinati di 45° e rivolti a Sud), con un decremento medio (per tutte le condizioni di esposizione) pari a 0.093. In alcuni casi, nel NIR, le differenze rispetto ai valori iniziali sono molto modeste, come per le membrane bituminose con coating fotocatalitico (prodotto n° 10).

In diversi casi si osserva che la riflettanza visibile di campioni ad alta riflettanza iniziale esposti a Milano inclinati di 45° e rivolti a Sud è maggiore di quelli esposti, sempre a Milano, debolmente inclinati (prodotti n° 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11). Ciò dovrebbe verificarsi in maniera sistematica per tutti i prodotti, poiché un'inclinazione di 45° consente un migliore deflusso dell'acqua piovana; tuttavia non è chiaro perché per alcuni prodotti ciò non avviene. Inoltre, nel vicino infrarosso, non si osserva la medesima sistematicità. Durante la maggior parte dell'anno a Milano, il vento ha direzione Sud-Ovest, per cui la maggior quantità di pioggia battente incide su superfici esposte a Nord-Est; tuttavia si osserva che durante il periodo di esposizione si sono verificati eventi temporaleschi accompagnati da vento di Scirocco, con trasporto di polvere e sabbia.

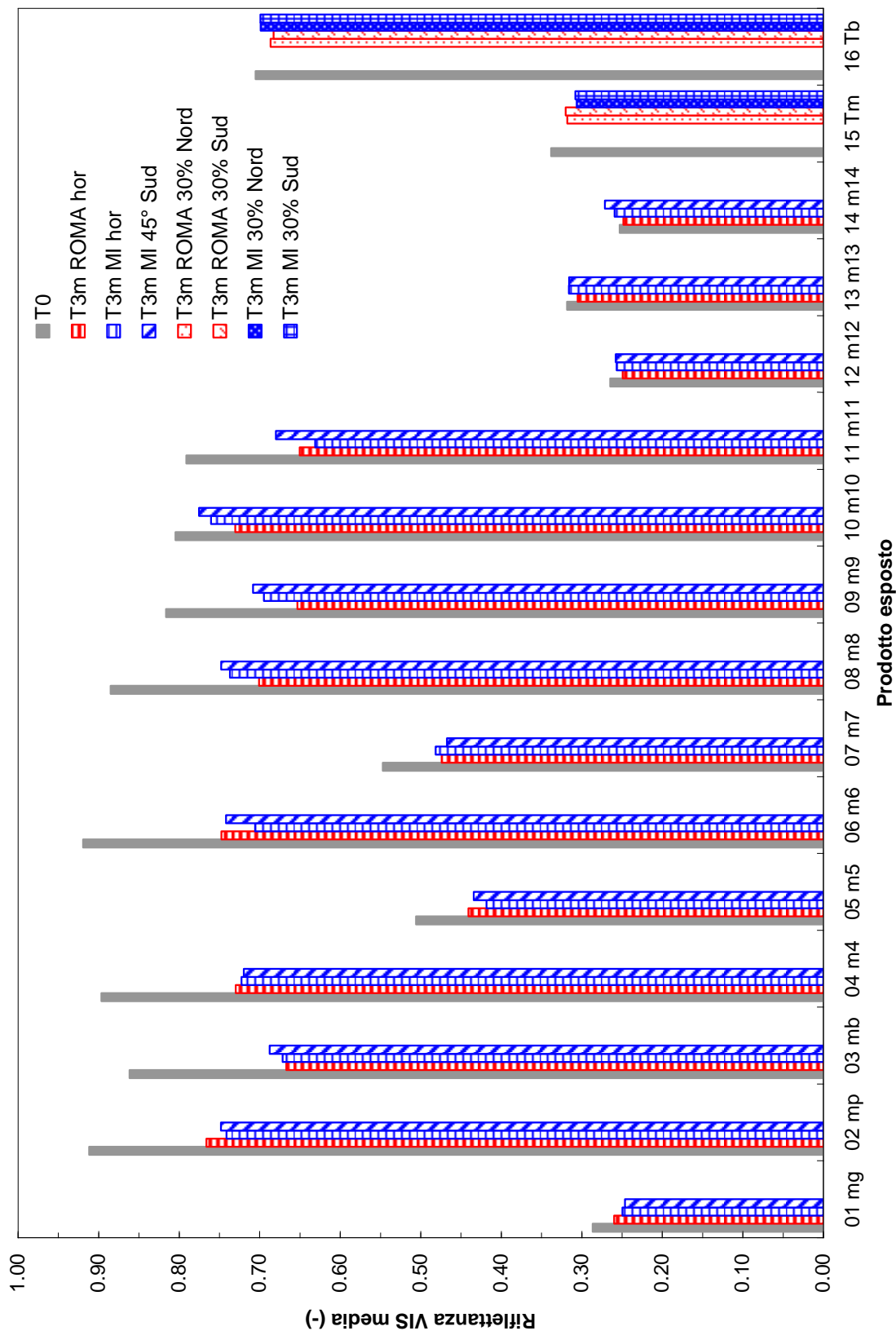


Figura 12. Valori di riflettanza nel campo della radiazione visibile (380-780 nm) media (su tre misure) per tutti i prodotti al tempo zero e dopo tre mesi di esposizione naturale a Roma e Milano. I prodotti da 1 a 14 sono membrane impermeabilizzanti (esposte con pendenza di 2° a Roma e Milano, e, a Milano, inclinate di 45° rivolte a Sud), mentre i prodotti 15 e 16 sono tegole per coperture discontinue (esposte con pendenza del 30% rivolte a Nord e a Sud, sia a Roma che a Milano).

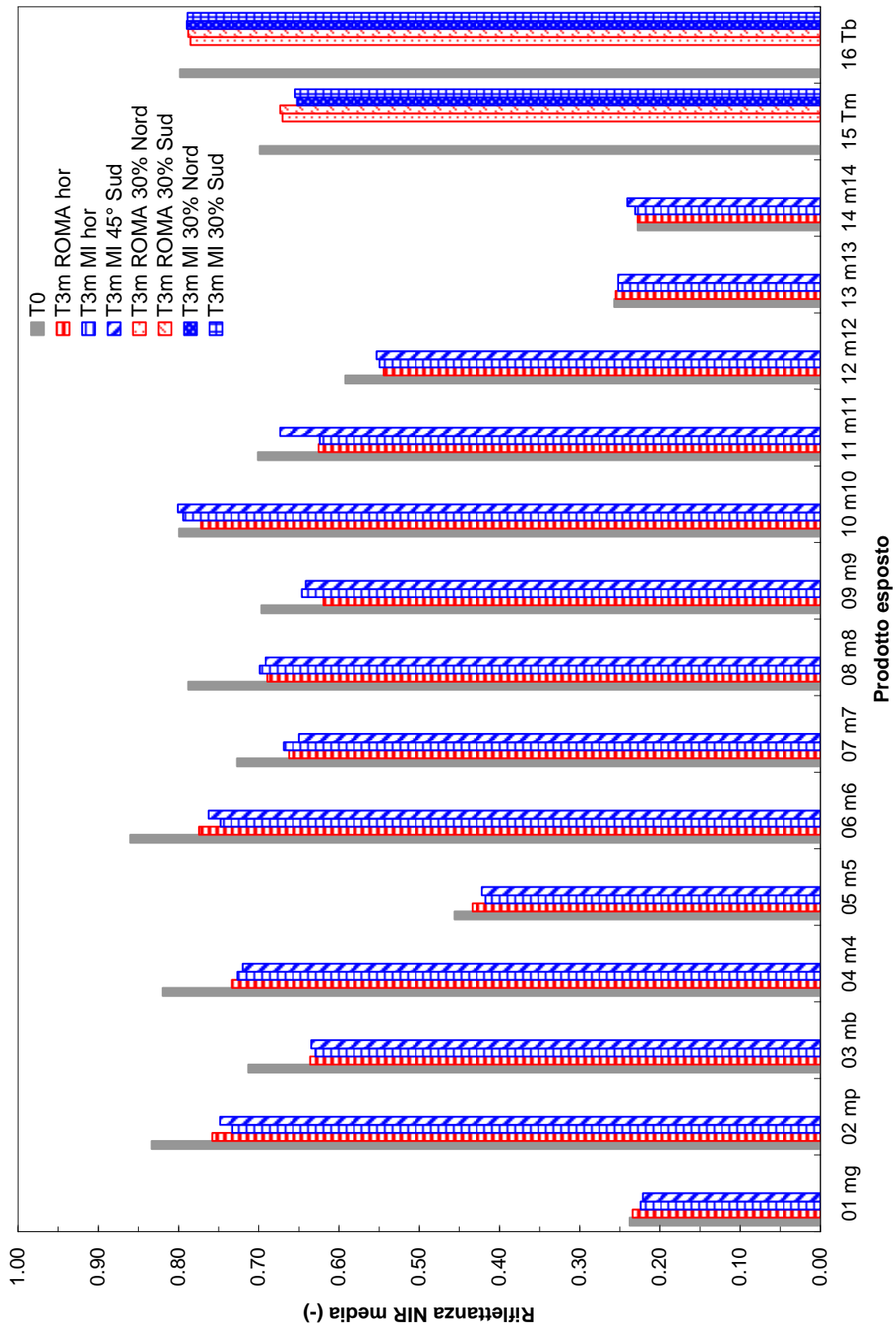


Figura 13. Valori di riflettanza nel campo del vicino infrarosso (780-2500 nm) media (su tre misure) per tutti i prodotti al tempo zero e dopo tre mesi di esposizione naturale a Roma e Milano. I prodotti da 1 a 14 sono membrane impermeabilizzanti (esposte con pendenza di 2° a Roma e Milano, e, a Milano, inclinate di 45° rivolte a Sud), mentre i prodotti 15 e 16 sono tegole per coperture discontinue (esposte con pendenza del 30% rivolte a Nord e a Sud, sia a Roma che a Milano).

Valutando i decrementi percentuali (Figura 14) si può notare come per la maggior parte dei prodotti presi in considerazione si abbia un decremento, rispetto alla riflettanza iniziale, maggiore del 5%, e per i prodotti aventi maggiore riflettanza iniziale (ad esempio i prodotti avente riflettanza solare iniziale maggiore di 0.70, cioè i prodotti n° 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, e 16), il decremento nei primi tre mesi di esposizione, supera nettamente il 10% (la mediana è il 14.1%, con un massimo del 18.9%), tranne che per la membrana bituminosa con coating fotocatalitico (prodotto 10) e la tegola rivestita di bianco (prodotto 16) per cui il decremento relativo alla riflettanza solare è dell'ordine di grandezza rispettivamente del 4% e del 2%. Escludendo questi due outliers, la mediana del decremento di riflettanza solare rispetto al valore iniziale è pari al 15.1% (la media è del 15.3%).

Per quanto concerne la riflettanza nel campo UV (Figura 15) le variazioni rispetto ai valori iniziali sono di segno diverso, ma bisogna tenere in considerazione i bassi valori iniziali, per cui la deposizione di particolato atmosferico comporta variazioni relative rilevanti, anche se le variazioni assolute sono modeste.

Le variazioni relative principali rispetto alla condizione iniziale si osservano nel campo del visibile (Figura 16) dove la mediana dei decrementi dei prodotti avente riflettanza iniziale maggiore di 0.70 è pari al 18.3%, mentre nel campo del vicino infrarosso (Figura 17) la mediana della perdita prestazionale, per il medesimo gruppo di prodotti, è dell'ordine di grandezza del 10%.

In generale, si osserva come i prodotti avente maggiore riflettanza solare iniziale sono quelli che presentano i maggiori decrementi di riflettanza solare dopo tre mesi di esposizione (Figura 18), in modo quasi lineare, anche se con una pendenza diversa da 45°.

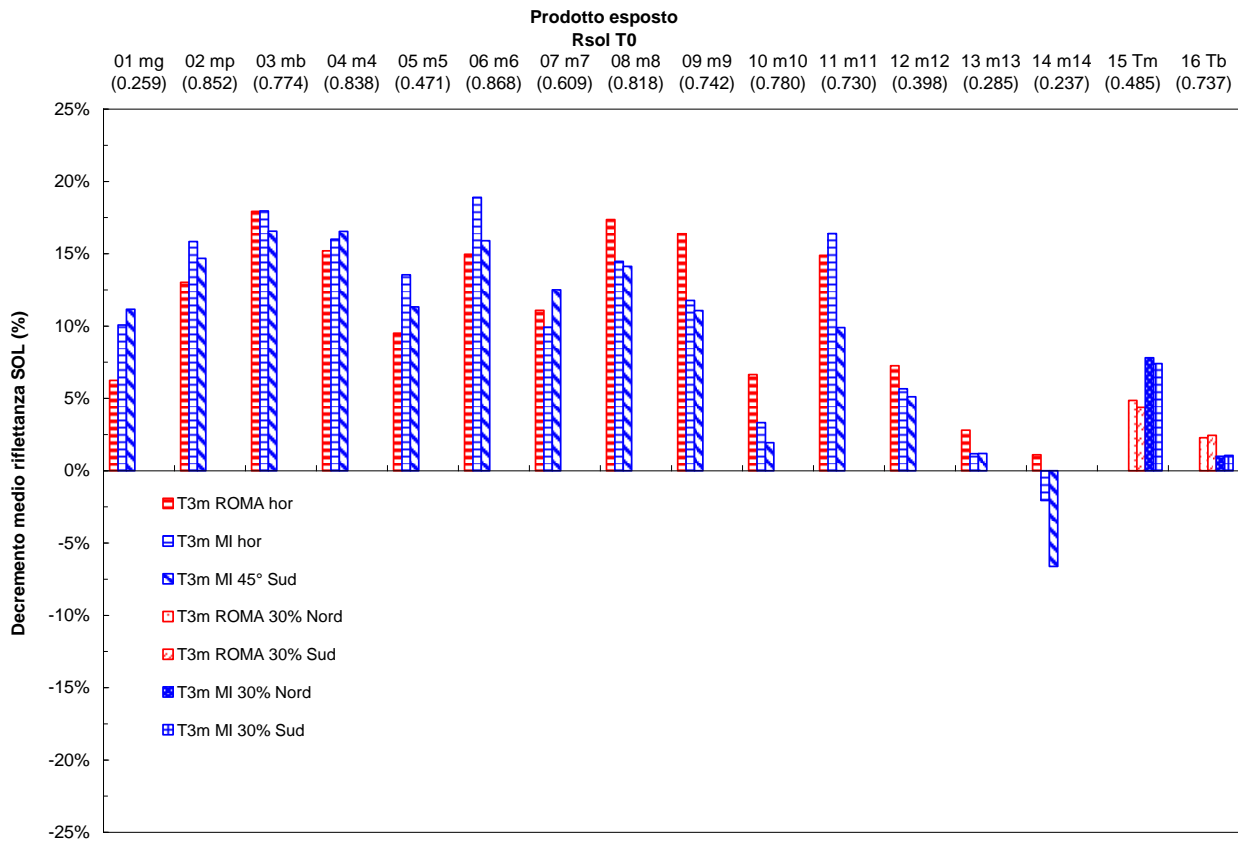


Figura 14. Decrementi percentuali medi di riflettanza solare per tutti i prodotti (da 1 a 14 membrane, 15 e 16 tegole) al tempo zero e dopo tre mesi di esposizione naturale a Roma e Milano.

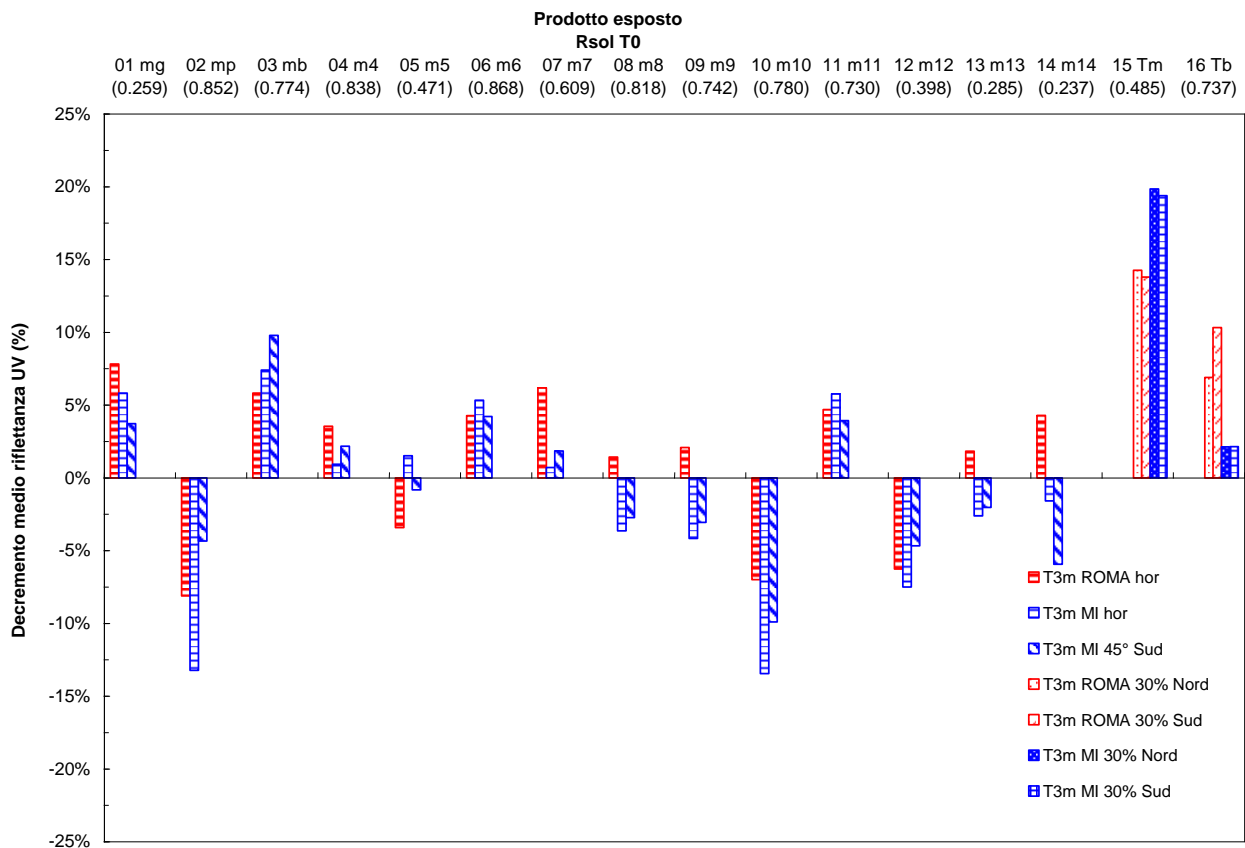


Figura 15. Decrementi percentuali medi di riflettanza nel campo UV (300-380 nm) per tutti i prodotti (da 1 a 14 membrane, 15 e 16 tegole) al tempo zero e dopo tre mesi di esposizione naturale a Roma e Milano.

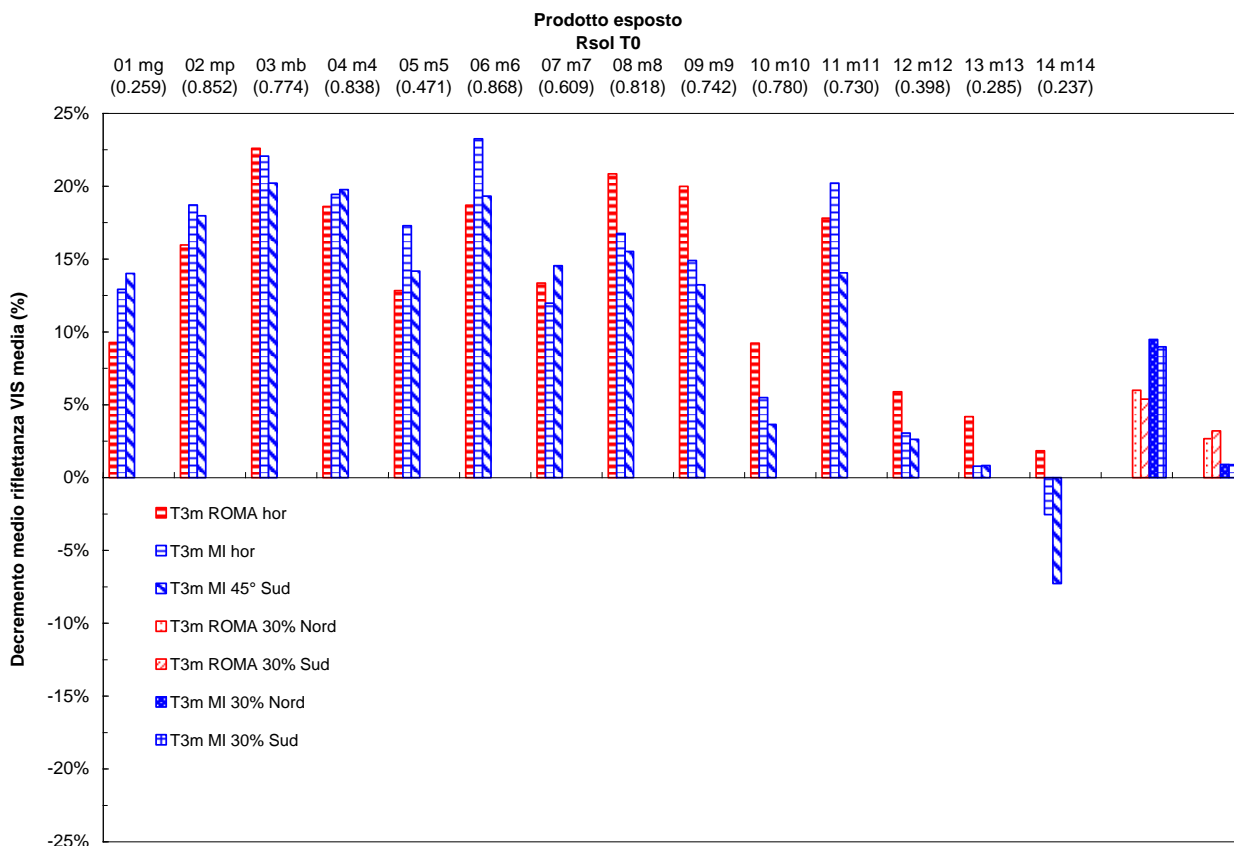


Figura 16. Decrementi percentuali medi di riflettanza nel campo visibile (380-780 nm) per tutti i prodotti (da 1 a 14 membrane, 15 e 16 tegole) al tempo zero e dopo tre mesi di esposizione naturale a Roma e Milano.

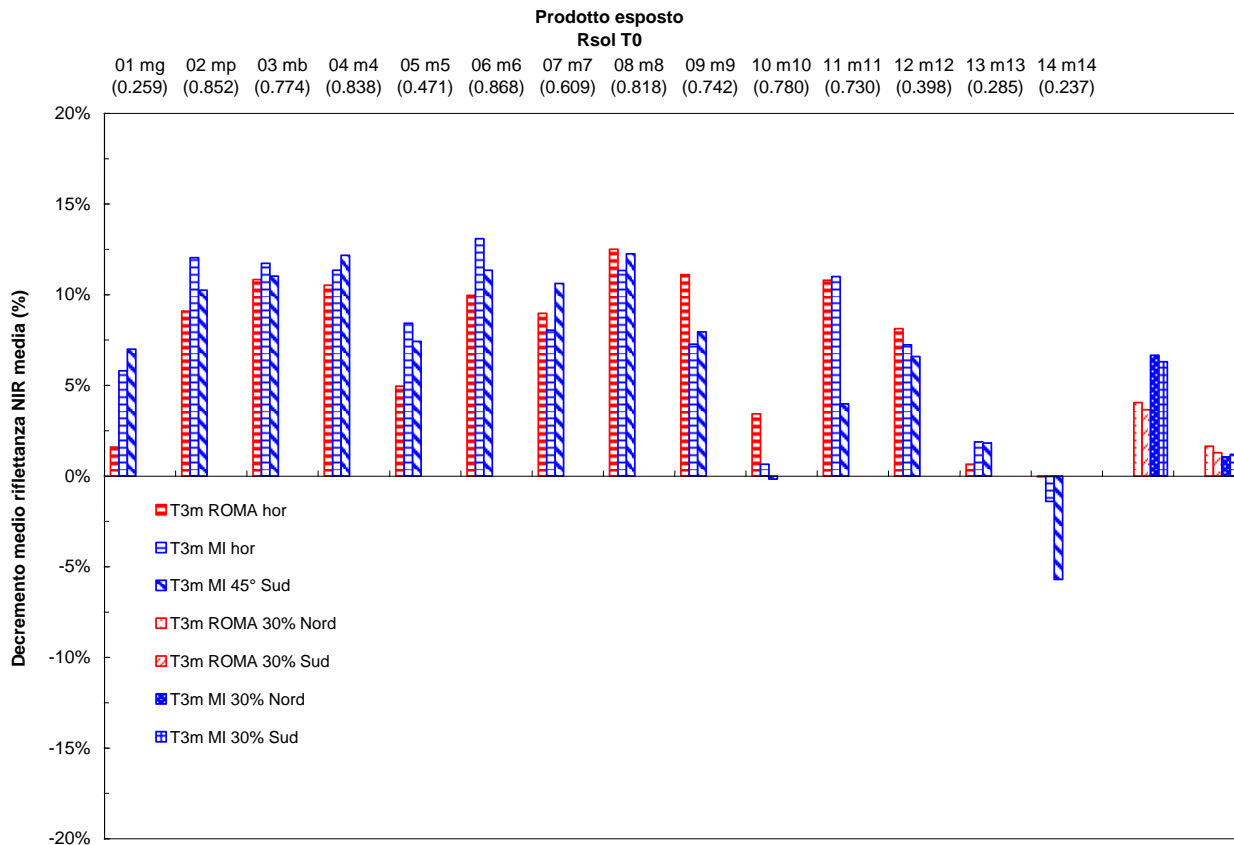


Figura 17. Decrementi percentuali medi di riflettanza nel campo del NIR (780-2500 nm) per tutti i prodotti (da 1 a 14 membrane, 15 e 16 tegole) al tempo zero e dopo tre mesi di esposizione naturale a Roma e Milano.

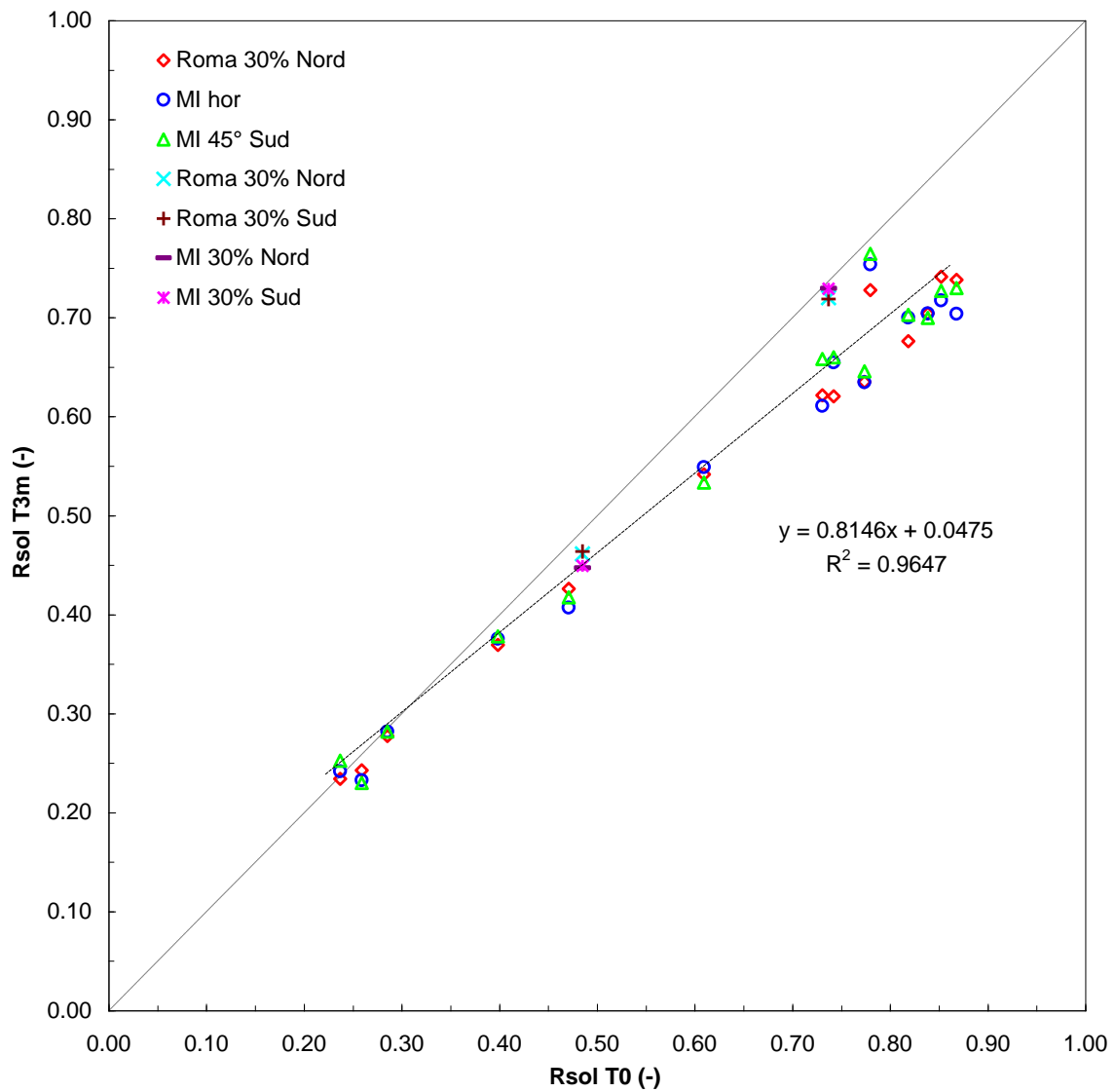


Figura 18. Riflettanza solare dopo tre mesi rispetto al valore iniziale. I decrementi maggiori si osservano per i campioni avente maggiore riflettanza iniziale.

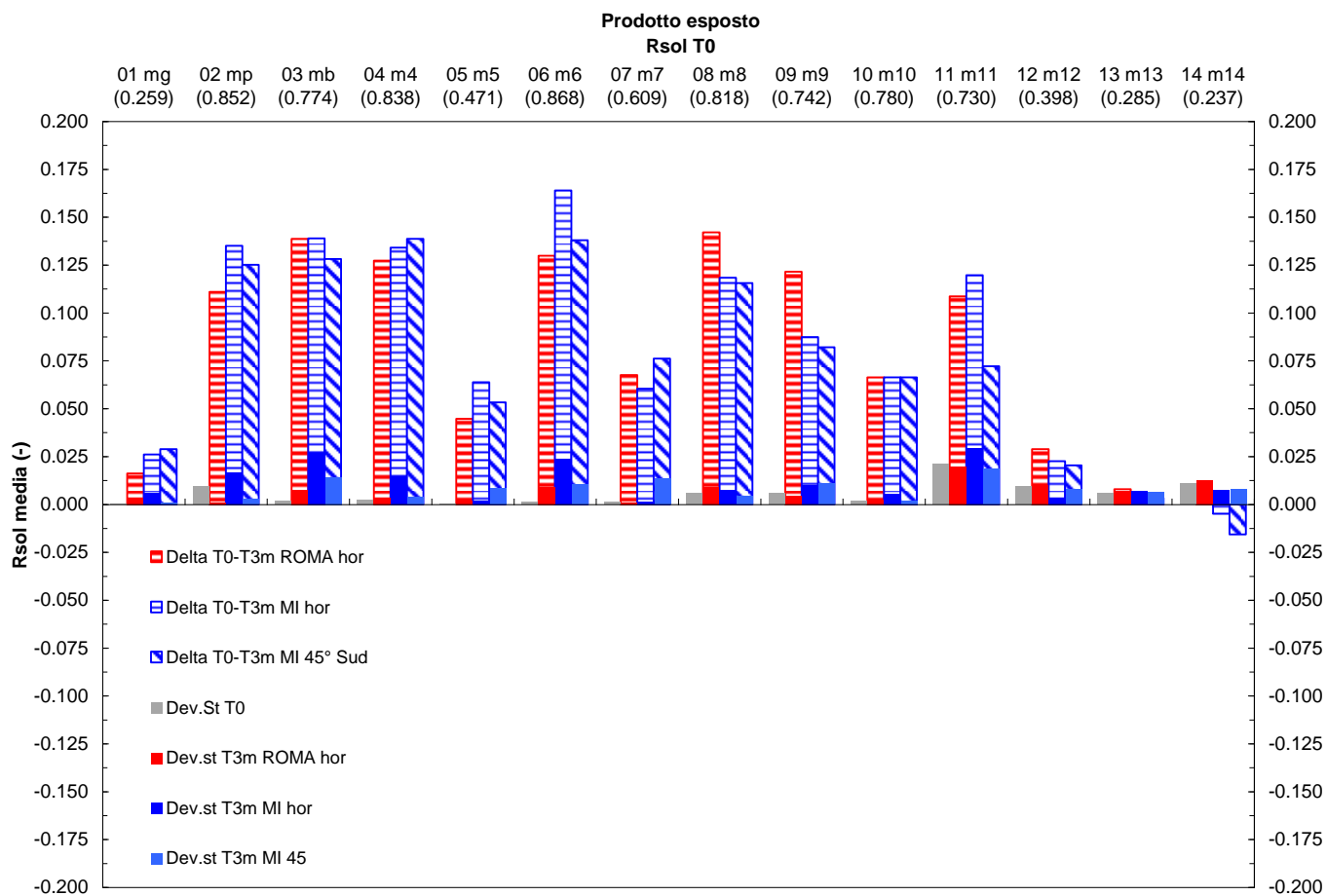


Figura 19. Riflettanza solare: differenze assolute rispetto al valore iniziale (riflettanza iniziale meno riflettanza dopo tre mesi). In sovrapposizione e con il retino pieno è riportata la deviazione standard rispetto alla misura sui tre provini misurati al tempo zero e per ogni condizione di esposizione.

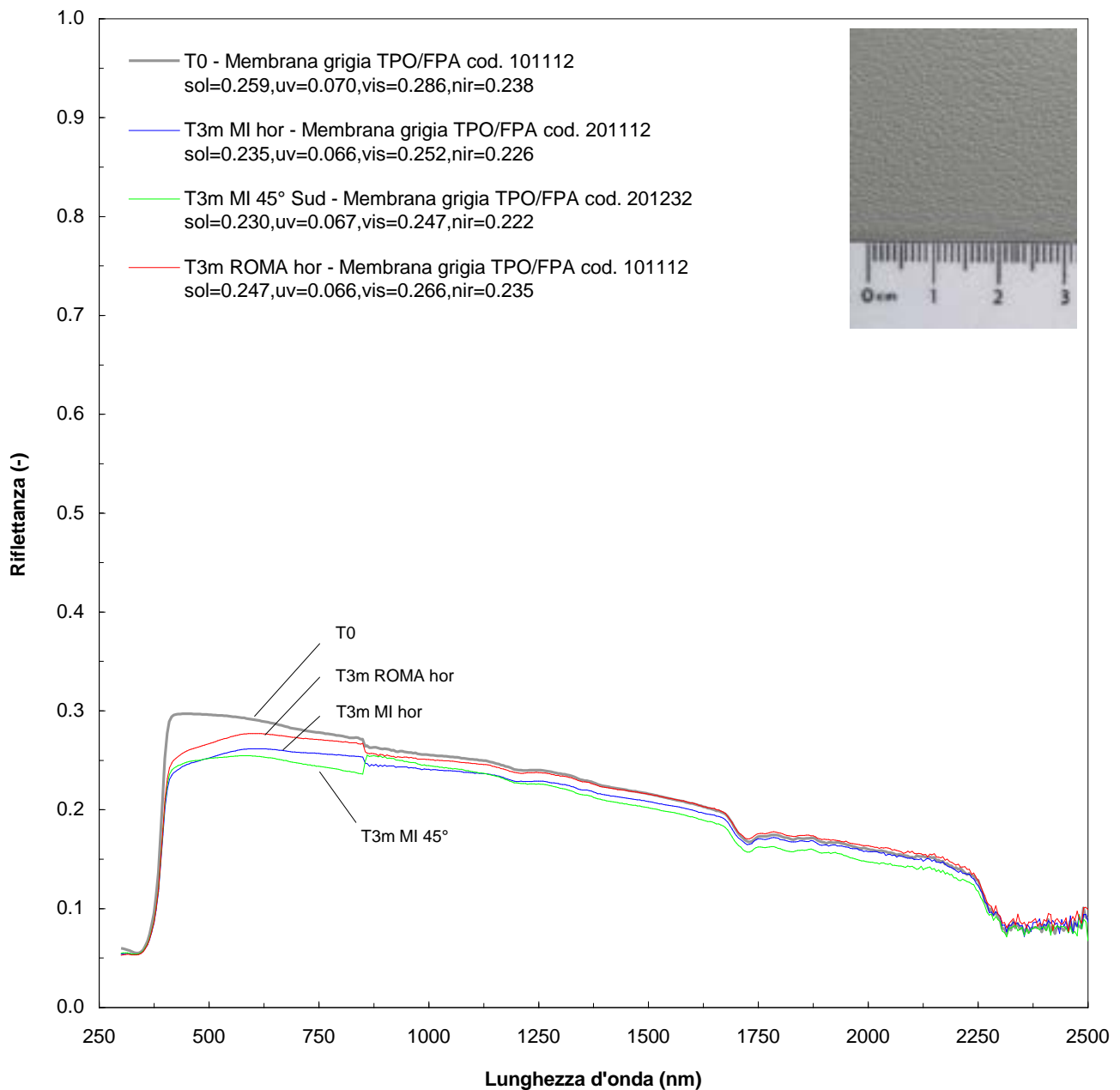


Figura 20. Riflettanza di una membrana grigia in TPO/FPA al tempo zero (T0) e dopo tre mesi (T3m) di esposizione naturale in ambiente esterno a Roma e Milano.

Tra gli spettri misurati a T0 e quelli a 3 mesi di esposizione, per esposizione orizzontale, si osservano andamenti comparabili, e scostamenti modesti nei valori assoluti di riflettanza (Figura 20). Si nota un notevole decremento della riflettanza in corrispondenza della banda del visibile VIS.

Comparando a 3 mesi di esposizione naturale i campioni di Milano con esposizione orizzontale con quelli a esposizione inclinata di 45° si nota come gli spettri presentino un andamento simile, fatta esclusione per la zona dell'intero spettro del visibile e del vicino infrarosso fino a 1200 nm.

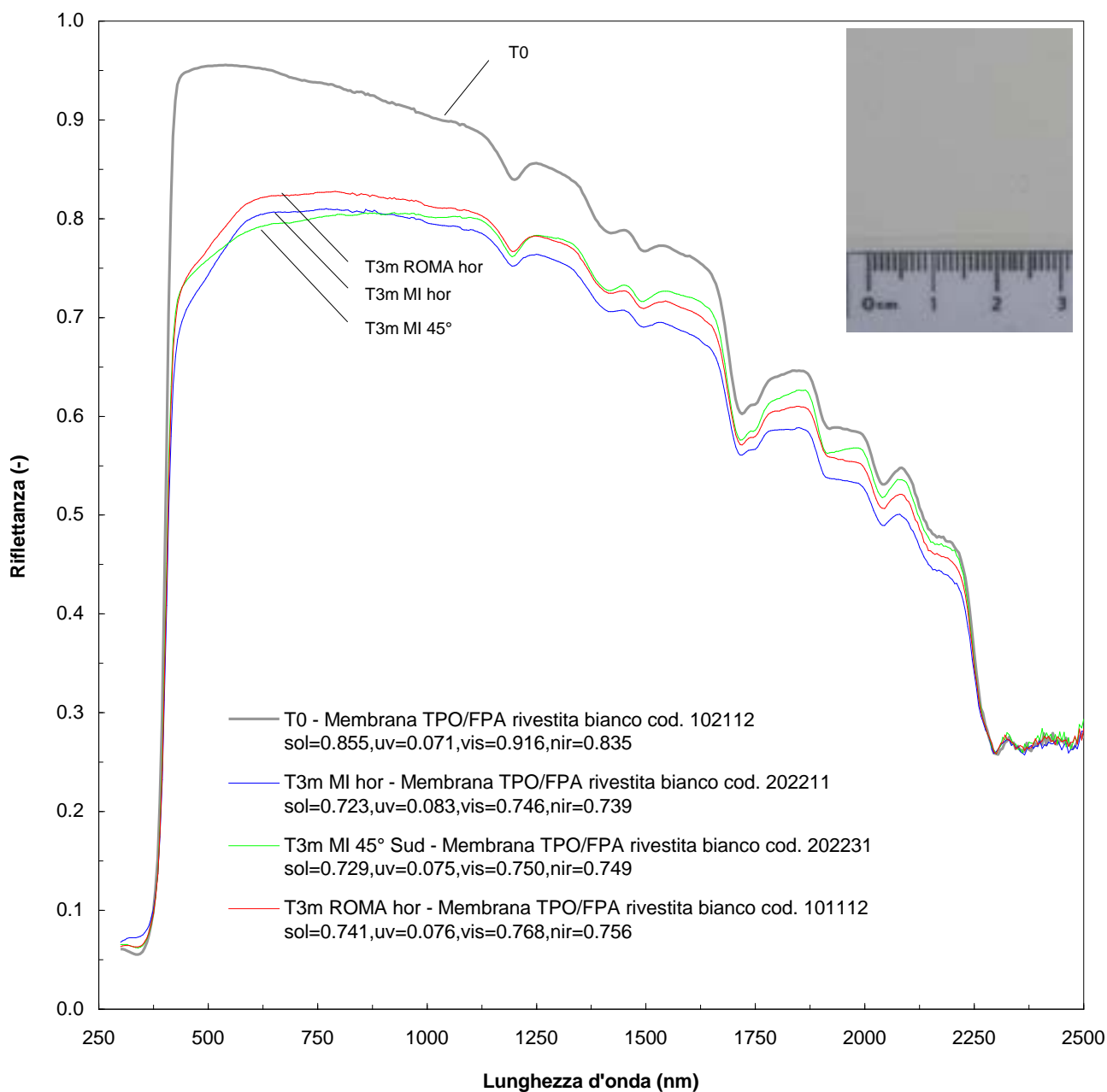


Figura 21. Riflettanza di una membrana grigia in TPO/FPA rivestita con un coating elastomerico bianco al tempo zero (T0) e dopo tre mesi (T3m) di esposizione naturale in ambiente esterno a Roma e Milano.

Tra gli spettri misurati a tempo zero T0 e quelli a 3 mesi di esposizione, per esposizione orizzontale, si osservano scostamenti notevoli dei valori assoluti misurati di riflettanza, soprattutto in corrispondenza della banda del visibile (-19%). Gli andamenti possono essere considerati comparabili ad esclusione della banda del visibile, in cui si ha una variazione del profilo di riflettanza in corrispondenza delle lunghezze d'onda tra 400 e 600 nm (Figura 21).

Comparando a 3 mesi di esposizione naturale i campioni di Milano con esposizione orizzontale con quelli a esposizione inclinata di 45° si nota come gli spettri presentino un andamento similare, fatta esclusione per la zona dell'intero spettro del visibile e del vicino infrarosso fino a 1200 nm.

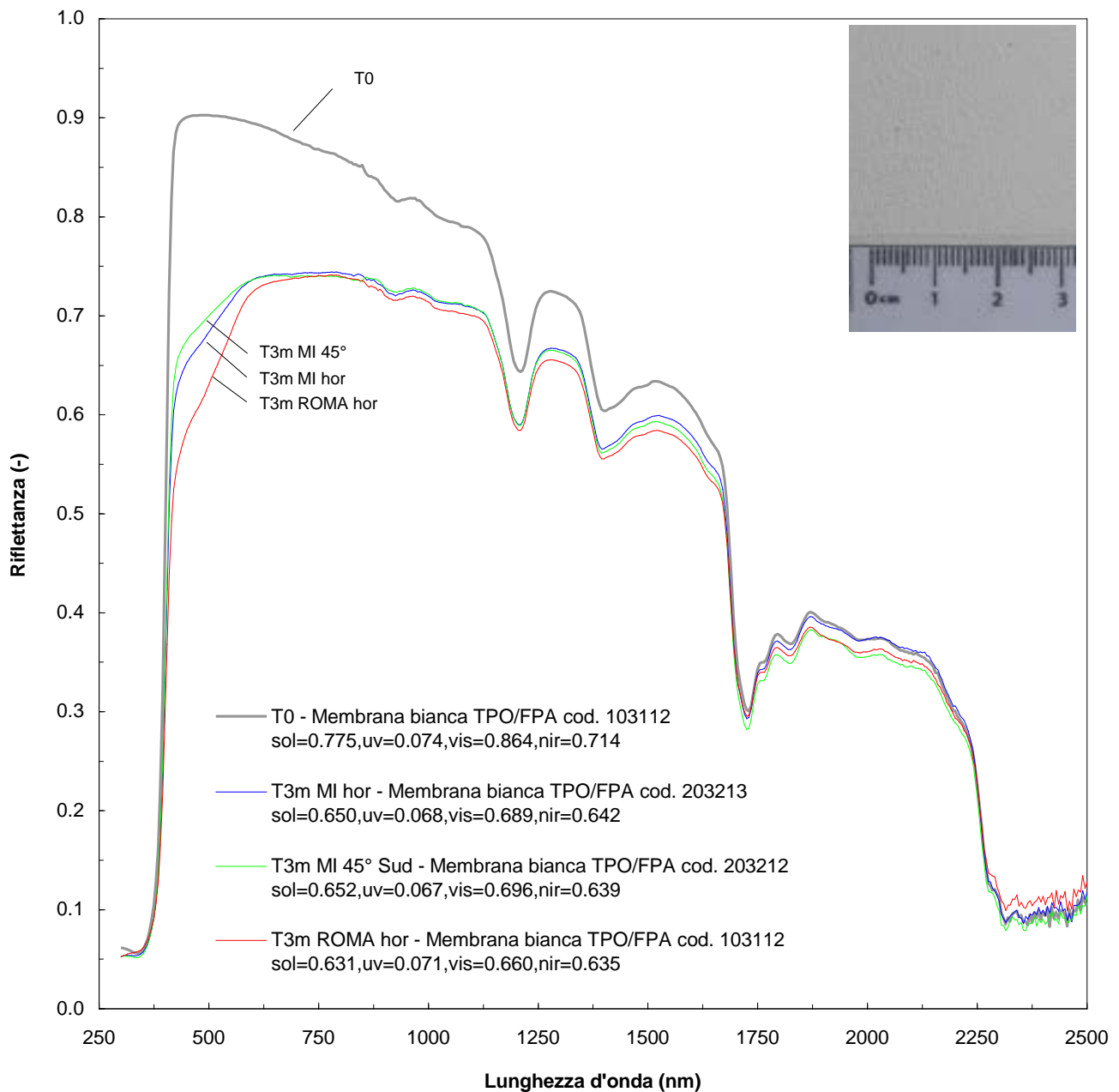


Figura 22. Riflettanza di una membrana bianca in TPO/FPA al tempo zero (T0) e dopo tre mesi (T3m) di esposizione naturale in ambiente esterno a Roma e Milano.

Tra gli spettri misurati a tempo zero T0 e quelli a 3 mesi di esposizione, per esposizione orizzontale, si osservano scostamenti notevoli dei valori assoluti misurati di riflettanza, soprattutto in corrispondenza della banda del visibile (-21%). Gli andamenti possono essere considerati comparabili ad esclusione della banda del visibile, in cui si ha una variazione del profilo di riflettanza in corrispondenza delle lunghezze d'onda tra 400 e 600 nm. Nel vicino infrarosso e per le lunghezze d'onda comprese tra 1600 e 1800 nm si nota una quasi totale sovrapposizione degli spettri. Tale sovrapposizione si manifesta nuovamente per lunghezze d'onda superiori a 2100 nm (Figura 22).

Comparando a 3 mesi di esposizione naturale i campioni di Milano con esposizione orizzontale con quelli a esposizione inclinata di 45° si nota come gli spettri presentino un andamento simile, fatta esclusione per la zona dell'intero spettro del visibile.

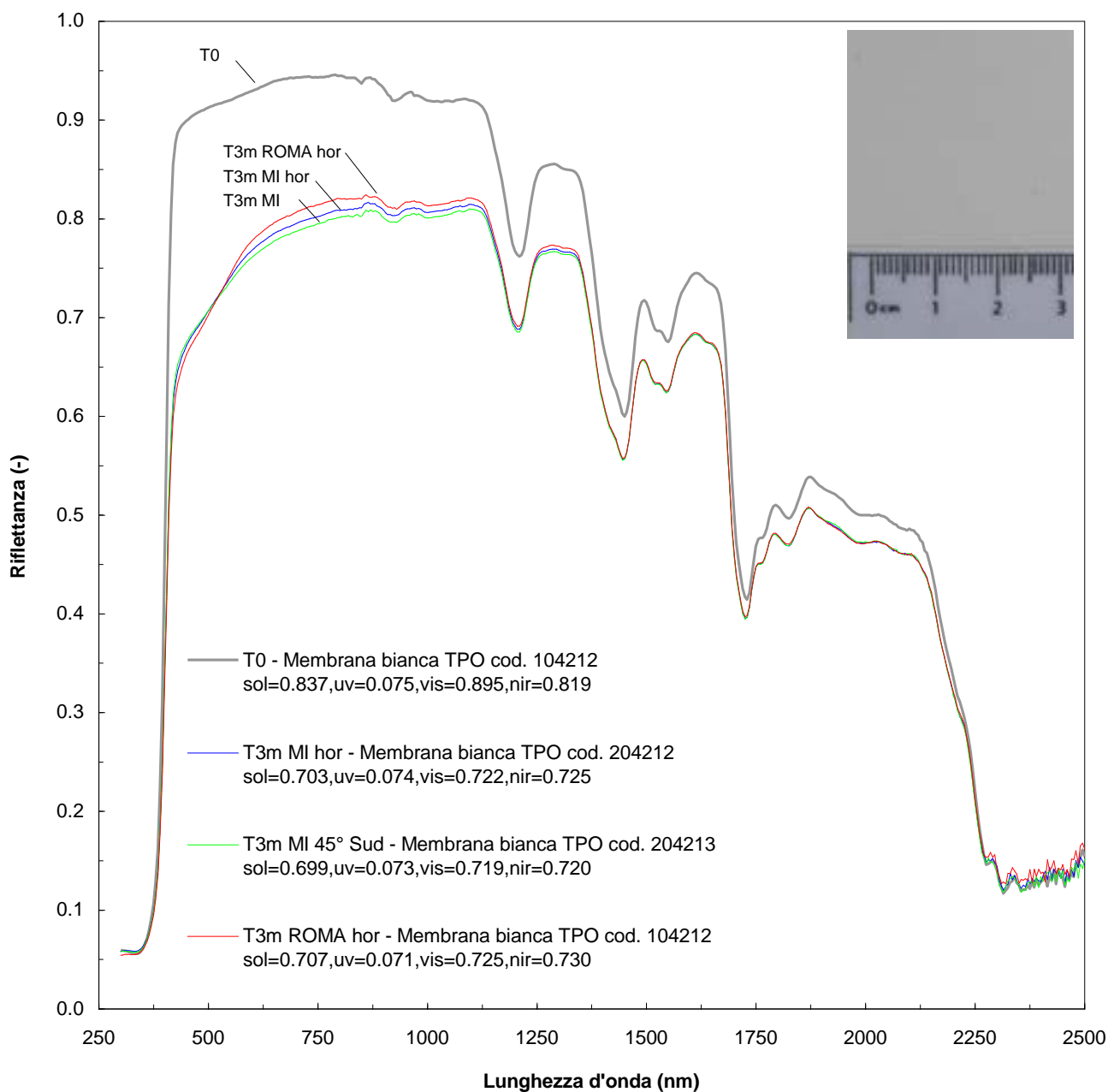


Figura 23. Riflettanza di una membrana bianca in TPO al tempo zero (T0) e dopo tre mesi (T3m) di esposizione naturale in ambiente esterno a Roma e Milano.

Tra gli spettri misurati a tempo zero T0 e quelli a 3 mesi di esposizione, per esposizione orizzontale, si osservano scostamenti notevoli dei valori assoluti misurati di riflettanza, soprattutto in corrispondenza della banda del visibile (-20%). Gli andamenti possono essere considerati comparabili ad esclusione della banda del visibile, in cui si ha una variazione del profilo di riflettanza in corrispondenza delle lunghezze d'onda tra 400 e 600 nm. Nel vicino infrarosso e per le lunghezze d'onda comprese tra 1600 e 1800 nm si nota una quasi totale sovrapposizione degli spettri. Tale sovrapposizione si manifesta nuovamente per lunghezze d'onda superiori a 2100 nm. Comparando a 3 mesi di esposizione naturale i campioni di Milano con esposizione orizzontale con quelli a esposizione inclinata di 45° si nota come gli spettri presentino un andamento simile (Figura 23).

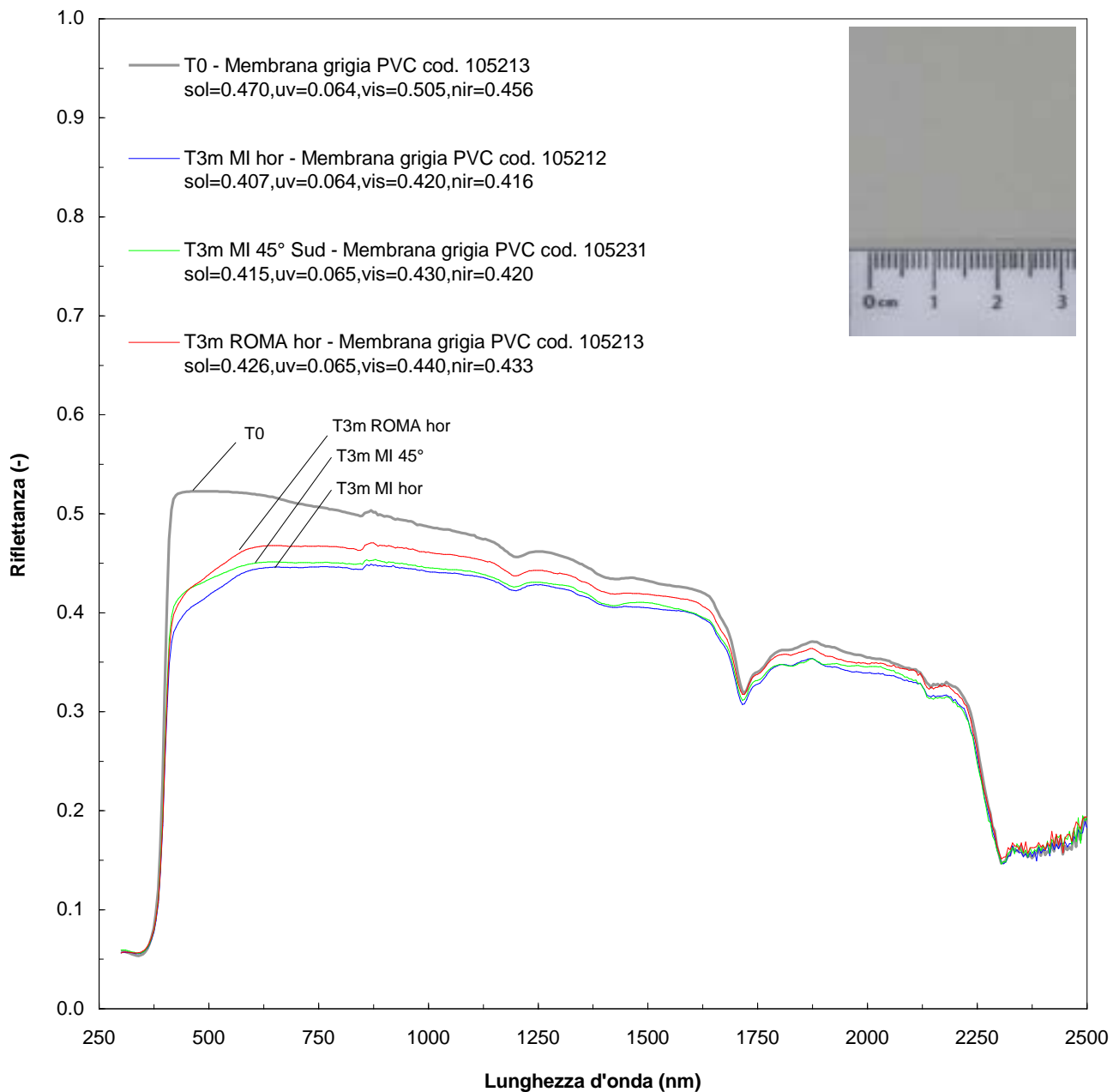


Figura 24. Riflettanza di una membrana grigia in PVC al tempo zero (T0) e dopo tre mesi (T3m) di esposizione naturale in ambiente esterno a Roma e Milano.

Tra gli spettri misurati a tempo zero T0 e quelli a 3 mesi di esposizione, per esposizione orizzontale, si osservano scostamenti notevoli dei valori assoluti misurati di riflettanza, soprattutto in corrispondenza della banda del visibile (-17%). Gli andamenti possono essere considerati comparabili ad esclusione della banda del visibile, in cui si ha una variazione del profilo di riflettanza in corrispondenza delle lunghezze d'onda tra 400 e 600 nm. Nel vicino infrarosso e per le lunghezze d'onda comprese tra 1600 e 1700 nm si nota una quasi totale sovrapposizione degli spettri. Tale sovrapposizione si manifesta nuovamente per lunghezze d'onda superiori a 2100 nm. Comparando a 3 mesi di esposizione naturale i campioni di Milano con esposizione orizzontale con quelli a esposizione inclinata di 45° si nota come gli spettri presentino un andamento simile, fatta esclusione per la banda tra i 400 e i 600 nm (Figura 24).

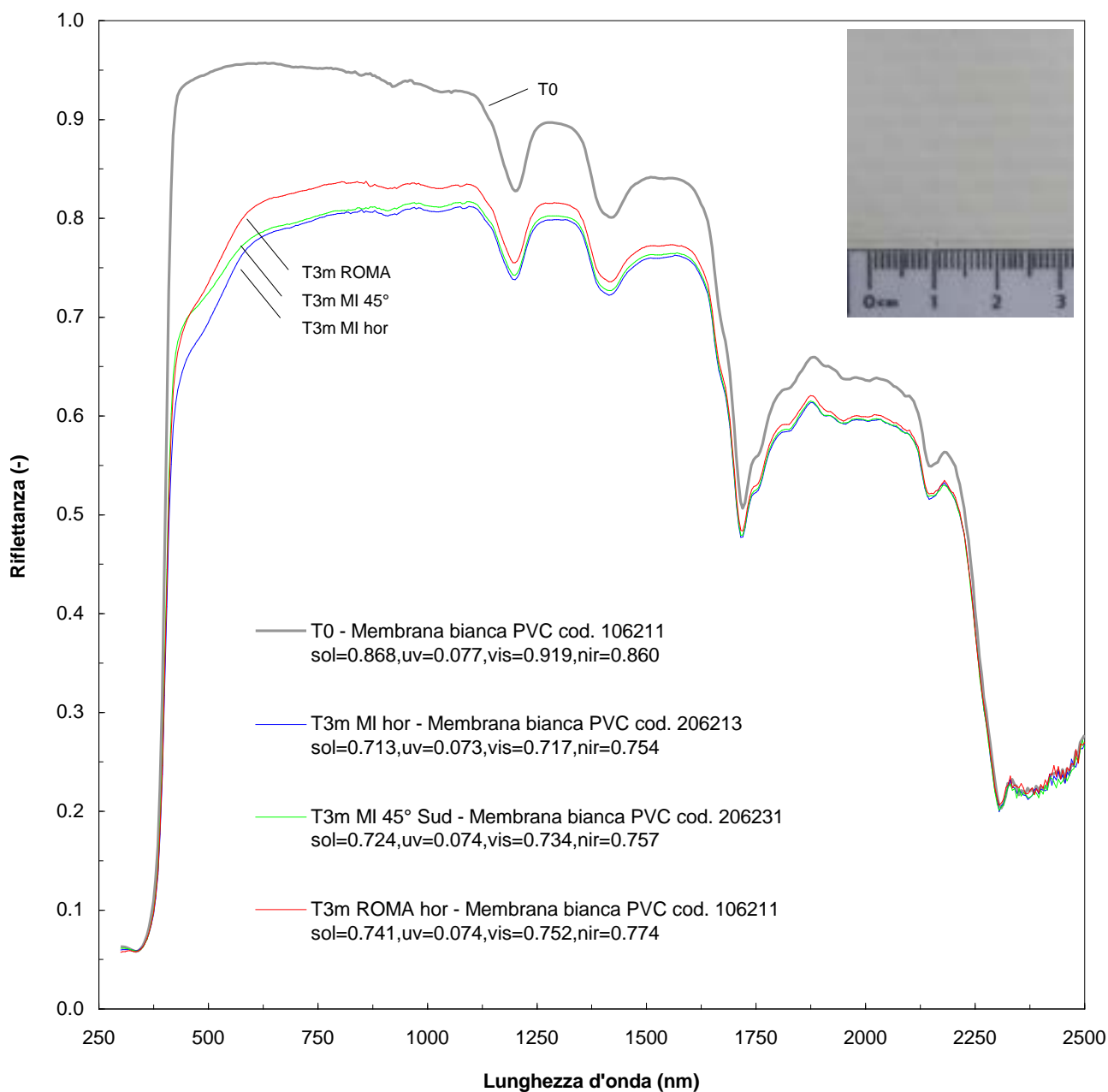


Figura 25. Riflettanza di una membrana bianca in PVC al tempo zero (T0) e dopo tre mesi (T3m) di esposizione naturale in ambiente esterno a Roma e Milano.

Tra gli spettri misurati a tempo zero T0 e quelli a 3 mesi di esposizione, per esposizione orizzontale, si osservano scostamenti notevoli dei valori assoluti misurati di riflettanza, soprattutto in corrispondenza della banda del visibile (-22%). Gli andamenti possono essere considerati comparabili ad esclusione della banda del visibile, in cui si ha una variazione del profilo di riflettanza in corrispondenza delle lunghezze d'onda tra 400 e 600 nm. Nel vicino infrarosso e per le lunghezze d'onda comprese tra 1600 e 1700 nm si nota una quasi totale sovrapposizione degli spettri. Tale sovrapposizione si manifesta nuovamente per lunghezze d'onda superiori a 2100 nm. Comparando a 3 mesi di esposizione naturale i campioni di Milano con esposizione orizzontale con quelli a esposizione inclinata di 45° si nota come gli spettri presentino un andamento simile, fatta esclusione per la banda tra i 400 e i 550 nm (Figura 25).

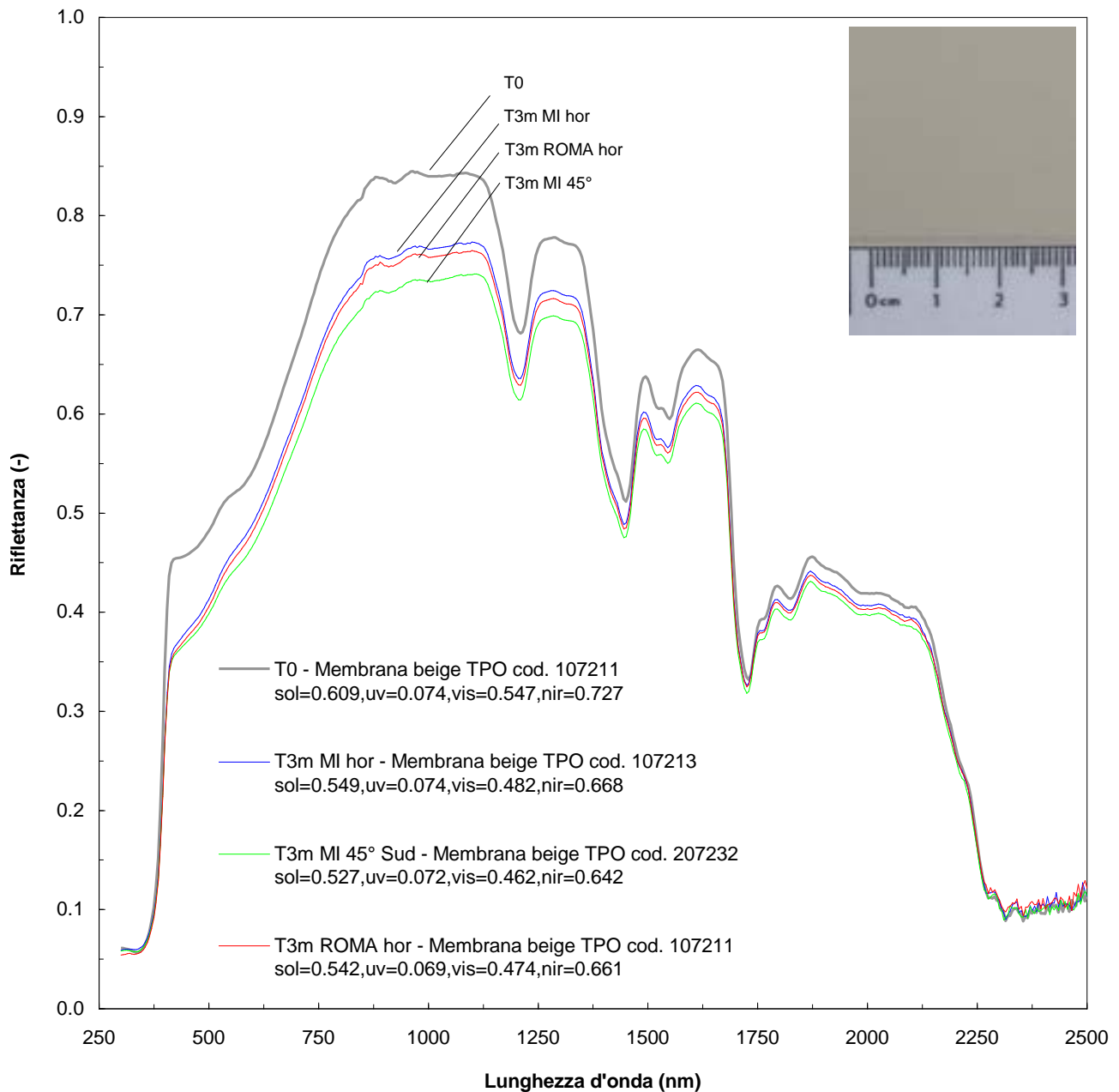


Figura 26. Riflettanza di una membrana beige in TPO al tempo zero (T0) e dopo tre mesi (T3m) di esposizione naturale in ambiente esterno a Roma e Milano.

Tra gli spettri misurati a tempo zero T0 e quelli a 3 mesi di esposizione, per esposizione orizzontale, si osservano scostamenti dei valori assoluti misurati di riflettanza, e concentrati soprattutto in corrispondenza della banda del visibile (-12%). Gli andamenti possono essere considerati comparabili ad esclusione della banda del visibile, in cui si ha una variazione del profilo di riflettanza in corrispondenza delle lunghezze d'onda tra 360 e 500 nm. Da notare come per alcune bande di lunghezze d'onda nel vicino infrarosso si abbia una quasi totale sovrapposizione degli spettri. Il fenomeno avviene nella maggior parte dei casi in corrispondenza di picchi di assorbimento del campione. Tale sovrapposizione si manifesta nuovamente per lunghezze d'onda superiori a 2100 nm. Comparando a 3 mesi di esposizione naturale i campioni di Milano con esposizione orizzontale con quelli a esposizione inclinata di 45° si nota come gli spettri presentino un andamento simile, fatta esclusione per la banda tra i 400 e i 550 nm (Figura 26).

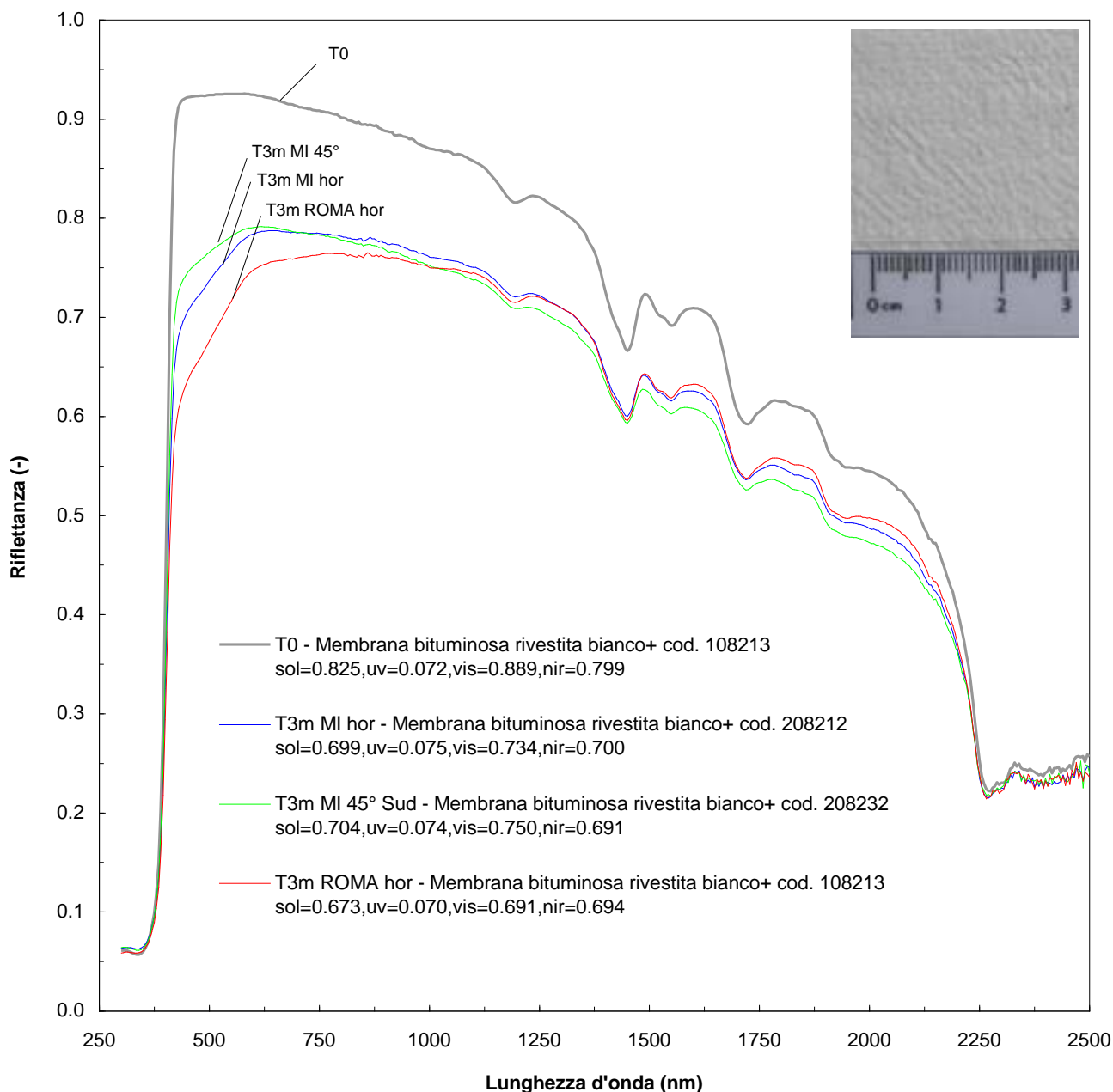


Figura 27. Riflettanza di una membrana bitume-polimero rivestita in opera con un coating elastomerico bianco (tipo ad alte prestazioni) al tempo zero (T0) e dopo tre mesi (T3m) di esposizione naturale in ambiente esterno a Roma e Milano.

Tra gli spettri misurati a tempo zero T0 e quelli a 3 mesi di esposizione, per esposizione orizzontale, si osservano scostamenti dei valori assoluti misurati di riflettanza, e concentrati soprattutto in corrispondenza della banda del visibile (-18%). Gli andamenti possono essere considerati comparabili ad esclusione della banda del visibile, in cui si ha una variazione del profilo di riflettanza in corrispondenza delle lunghezze d'onda tra 360 e 500 nm. Da notare come per lunghezze d'onda nel vicino infrarosso e superiori a 2150 nm si abbia una quasi totale sovrapposizione degli spettri. Comparando a 3 mesi di esposizione naturale i campioni di Milano con esposizione orizzontale con quelli a esposizione inclinata di 45° si nota come gli spettri presentino un andamento similare, fatta esclusione per la banda del visibile e dl vicino infrarosso fino ai 1200 nm (Figura 27).

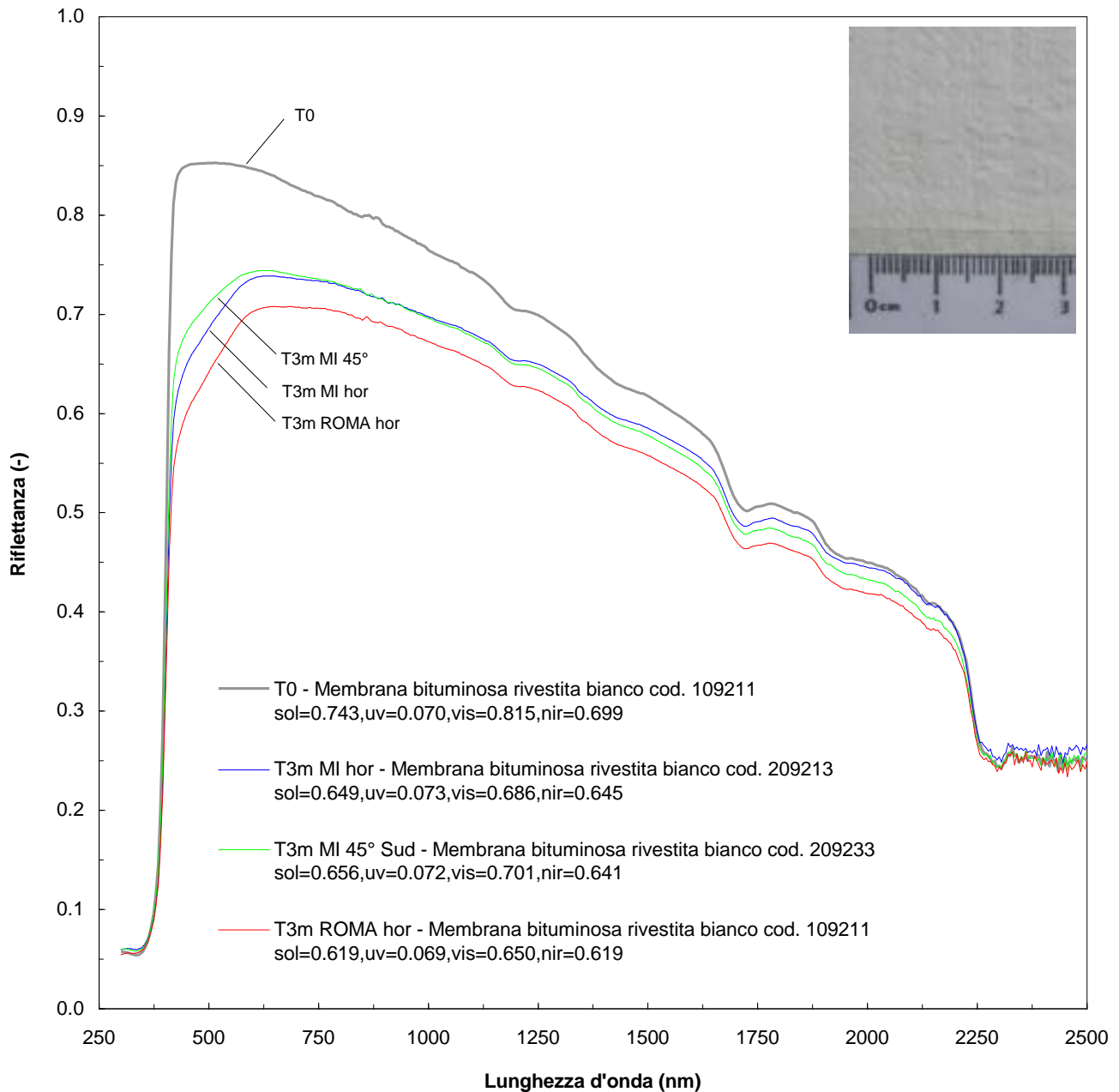


Figura 28. Riflettanza di una membrana bitume-polimero rivestita in opera con un coating elastomerico bianco (tipo standard) al tempo zero (T0) e dopo tre mesi (T3m) di esposizione naturale in ambiente esterno a Roma e Milano.

Tra gli spettri misurati a tempo zero T0 e quelli a 3 mesi di esposizione, per esposizione orizzontale, si osservano scostamenti dei valori assoluti misurati di riflettanza, e concentrati soprattutto in corrispondenza della banda del visibile (-16%). Gli andamenti possono essere considerati comparabili ad esclusione della banda del visibile, in cui si ha una variazione del profilo di riflettanza in corrispondenza delle lunghezze d'onda tra 360 e 500 nm. Da notare come per lunghezze d'onda nel vicino infrarosso e superiori a 2150 nm si abbia una quasi totale sovrapposizione degli spettri. Comparando a 3 mesi di esposizione naturale i campioni di Milano con esposizione orizzontale con quelli a esposizione inclinata di 45° si nota come gli spettri presentino un andamento similare (Figura 28).

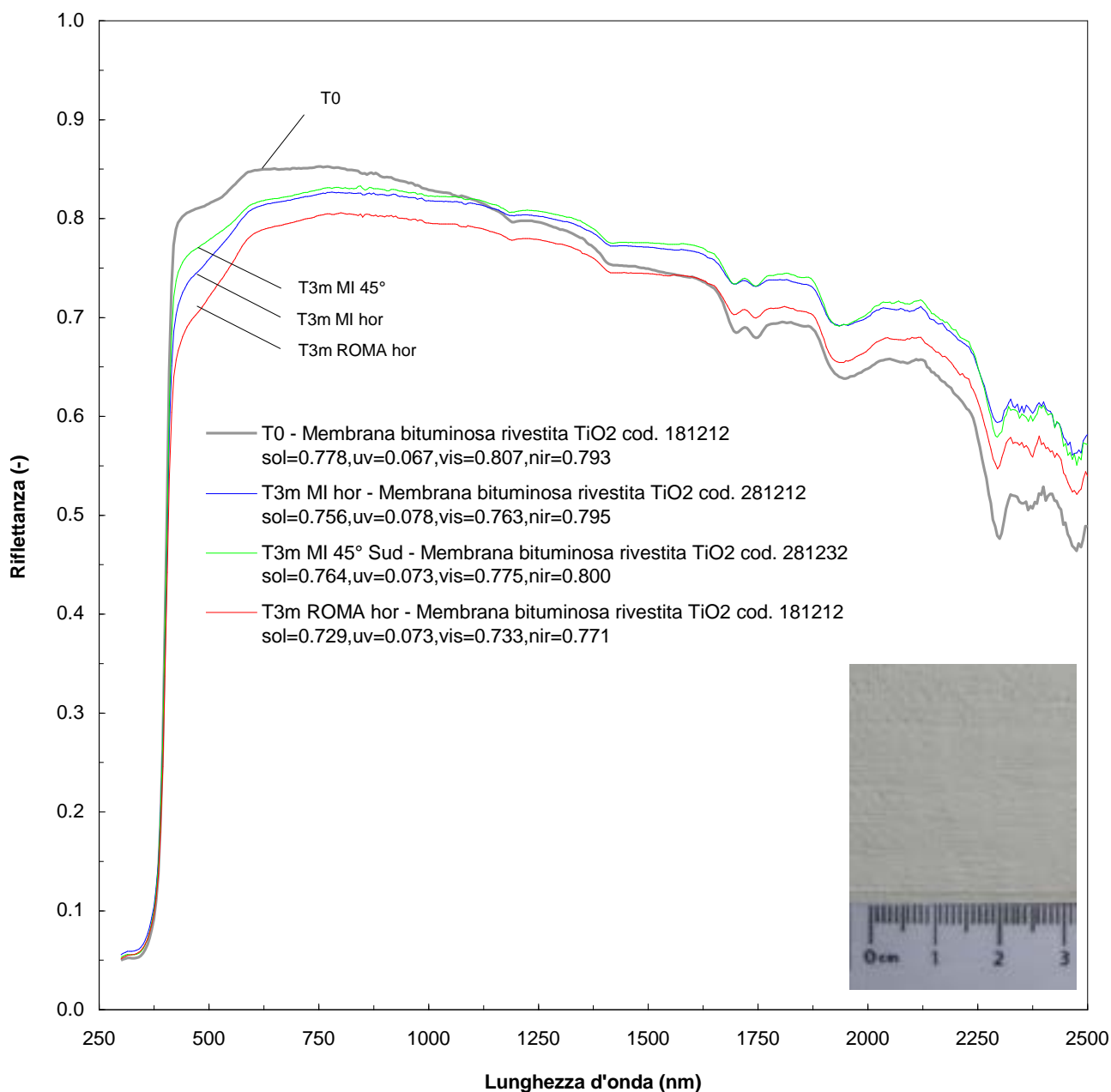


Figura 29. Riflettanza di una membrana bitume-polimero rivestita in opera con un coating elastomerico bianco con biossido di titanio (tipo standard) al tempo zero (T0) e dopo tre mesi (T3m) di esposizione naturale in ambiente esterno a Roma e Milano.

Tra gli spettri misurati a tempo zero T0 e quelli a 3 mesi di esposizione, per esposizione orizzontale, si osservano scostamenti dei valori assoluti misurati di riflettanza, concentrati soprattutto in corrispondenza della banda dell' UV (-15%). Gli andamenti a 3 mesi di esposizione possono essere considerati comparabili sia per le esposizioni orizzontali che per quelle a 45°. E' da notare come la riflettanza dei campioni esposti sia superiore a quella dei campioni a T0 per lunghezze d'onda superiori a 1100 nm. Sono necessarie ulteriori prove per verificare questo fenomeno (Figura 29).

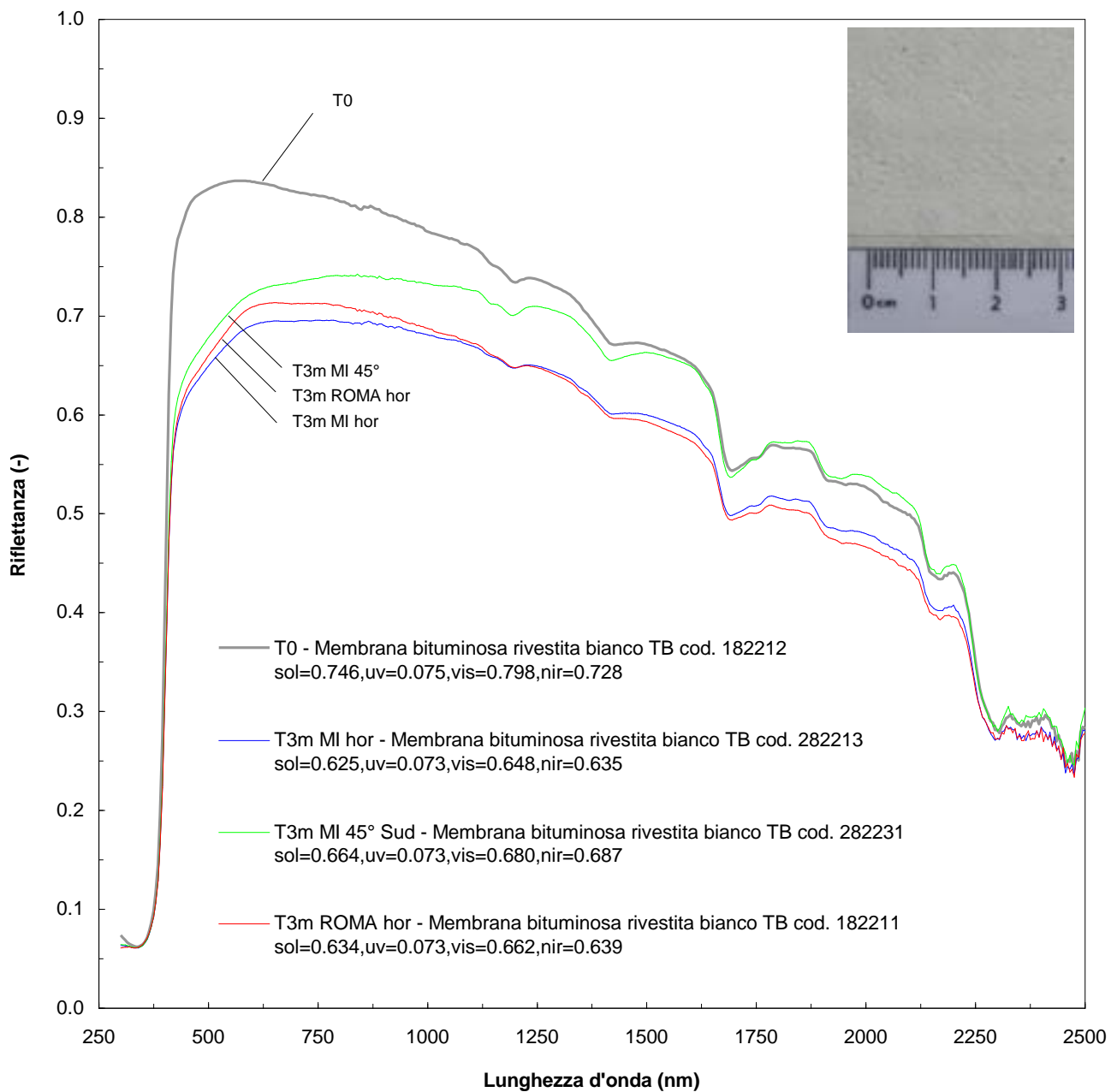


Figura 30. Riflettanza di una membrana bitume-polimero rivestita in opera con un coating elastomerico bianco (tipo B) al tempo zero (T0) e dopo tre mesi (T3m) di esposizione naturale in ambiente esterno a Roma e Milano.

Tra gli spettri misurati a 3 mesi di esposizione e quelli al tempo zero T0, per esposizione orizzontale, si osservano scostamenti dei valori assoluti misurati e concentrati soprattutto in corrispondenza della banda del visibile (-19%). Gli andamenti possono essere considerati comparabili ad esclusione della banda del visibile, in cui si ha una variazione del profilo di riflettanza in corrispondenza delle lunghezze d'onda tra 360 e 500 nm. Da notare come per lunghezze d'onda nel vicino infrarosso e superiori a 2150 nm si abbia una quasi totale sovrapposizione degli spettri. Comparando a 3 mesi di esposizione naturale i campioni di Milano con esposizione orizzontale con quelli a esposizione inclinata di 45° si nota come gli spettri di quest'ultimo caso presentino valori di riflettanza spettrale maggiori dei campioni esposti orizzontalmente (Figura 30).

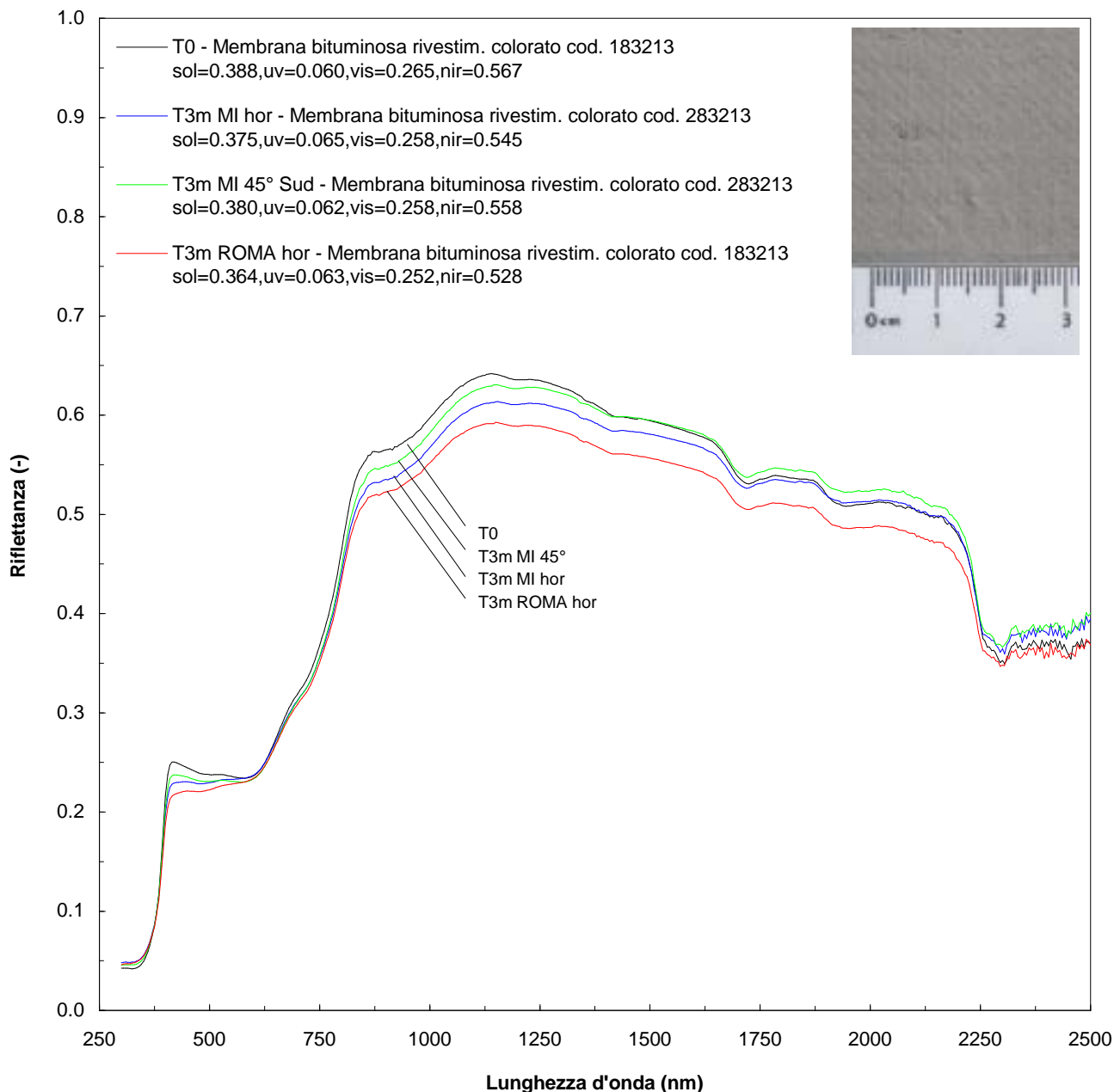


Figura 31. Riflettanza di una membrana bitume-polimero rivestita in opera con un coating elastomerico colorato al tempo zero (T0) e dopo tre mesi (T3m) di esposizione naturale in ambiente esterno a Roma e Milano.

Tra gli spettri misurati a tempo zero T0 e quelli a 3 mesi di esposizione, per esposizione orizzontale, si osservano modesti scostamenti dei valori assoluti misurati di riflettanza, e concentrati soprattutto in corrispondenza della banda dell' UV (-8%). Gli andamenti possono essere considerati comparabili lungo le bande dell' UV-VIS e NIR, con una sovrapposizione degli spettri in corrispondenza delle lunghezze d'onda comprese tra 600 e 850 nm. Per lunghezze d'onda di dimensione superiore ai 1600 nm la riflettanza spettrale dei campioni esposti a 45° e dopo 3 mesi di esposizione è superiore alla riflettanza spettrale misurata al tempo zero (Figura 31).

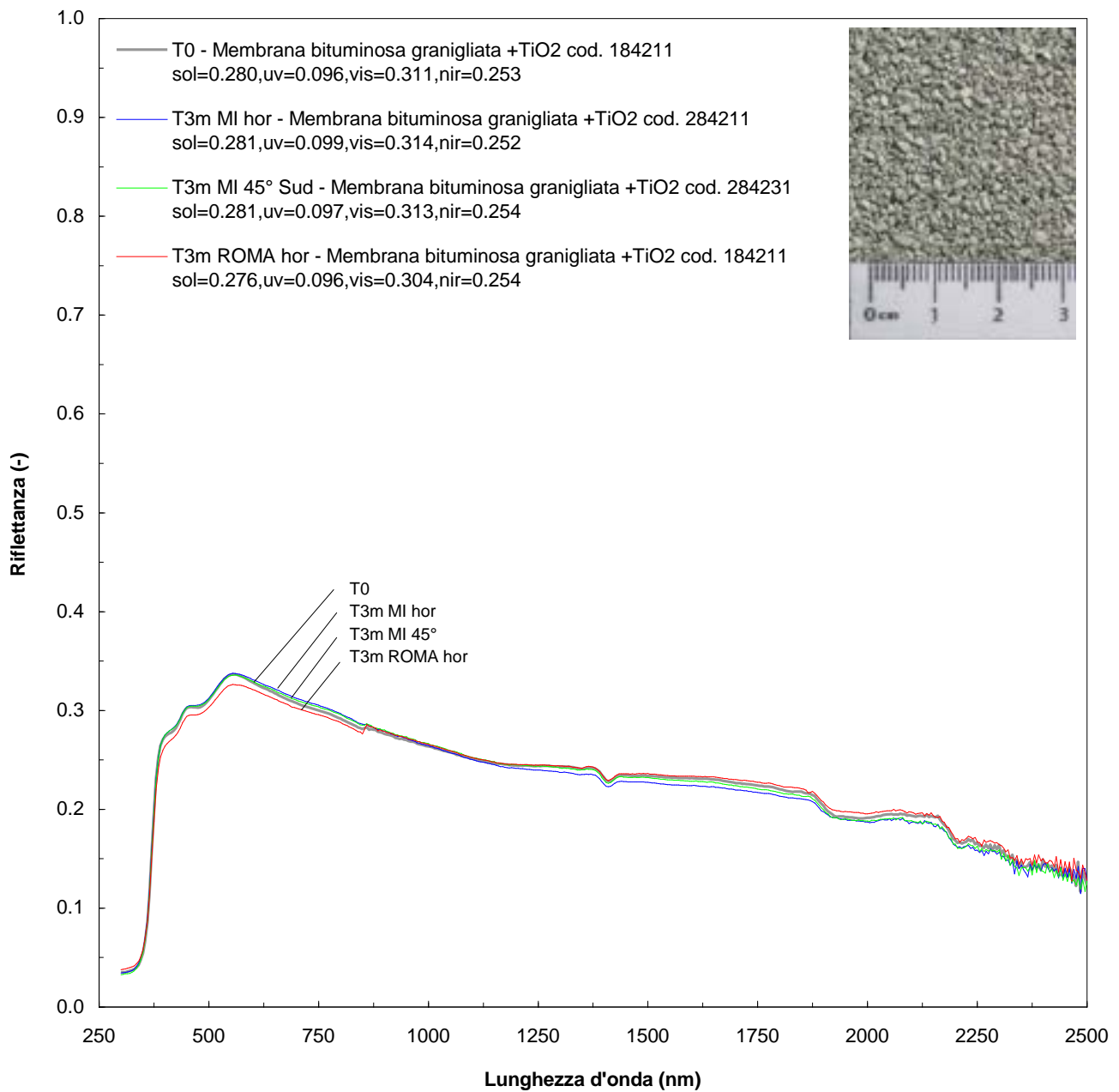


Figura 32. Riflettanza di una membrana bitume-polimero granigliata rivestita con biossido di titanio al tempo zero (T0) e dopo tre mesi (T3m) di esposizione naturale in ambiente esterno a Roma e Milano.

Tra gli spettri misurati a tempo zero T0 e quelli a 3 mesi di esposizione, per esposizione orizzontale e a 45° di inclinazione, si osservano modesti scostamenti dei valori assoluti misurati di riflettanza spettrale. Gli andamenti possono essere considerati comparabili lungo le bande dell' UV-VIS e NIR, con una sovrapposizione degli spettri lungo differenti bande di frequenza (Figura 32).

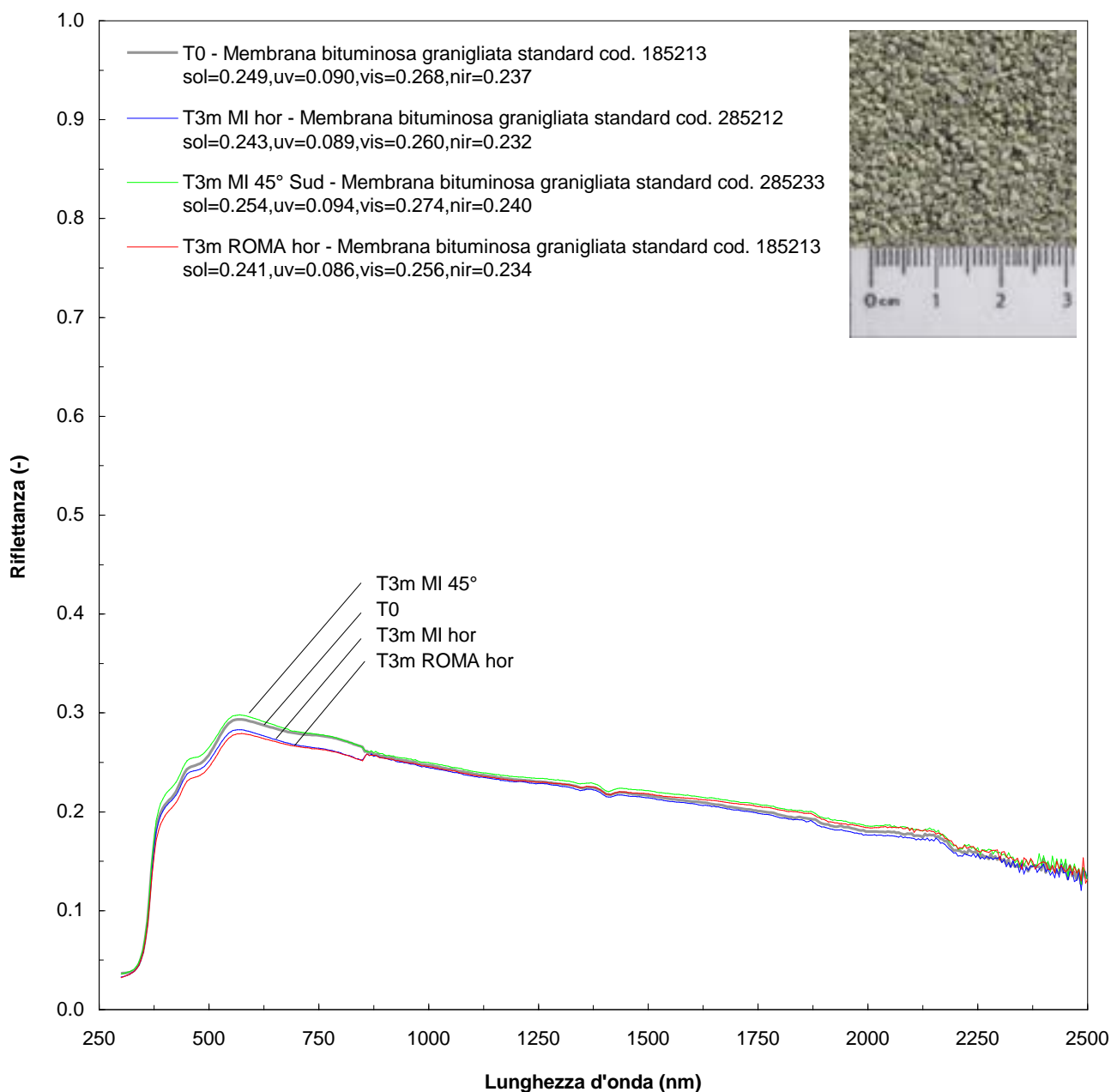


Figura 33. Riflettanza di una membrana bitume-polimero granigliata al tempo zero (T0) e dopo tre mesi (T3m) di esposizione naturale in ambiente esterno a Roma e Milano.

Tra gli spettri misurati a tempo zero T0 e quelli a 3 mesi di esposizione, per esposizione orizzontale, si osservano modesti scostamenti dei valori assoluti misurati di riflettanza, e concentrati soprattutto in corrispondenza della banda dell' UV (-5%). Gli andamenti possono essere considerati comparabili lungo le bande dell' UV-VIS e NIR (Figura 33).

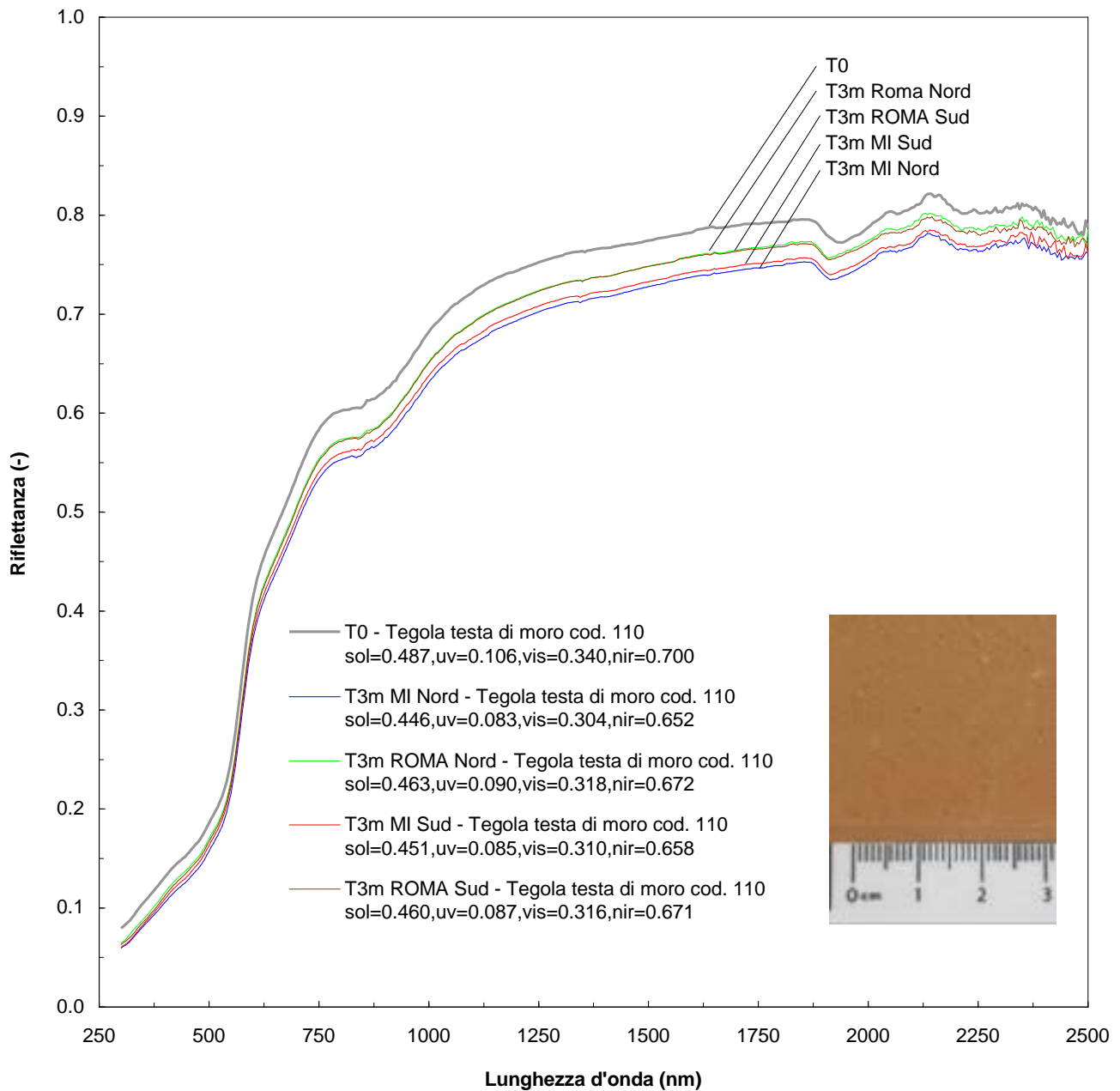


Figura 34. Riflettanza di una tegola color testa di moro al tempo zero (T0) e dopo tre mesi (T3m) di esposizione naturale in ambiente esterno a Roma e Milano.

Tra gli spettri misurati a 3 mesi di esposizione e quelli al tempo zero T0, per esposizione orizzontale e inclinata 30°, si osservano scostamenti dei valori assoluti misurati e concentrati soprattutto in corrispondenza della banda del vicino infrarosso (-7%). Gli andamenti possono essere considerati comparabili lungo le bande di lunghezze d'onda UV-VIS-NIR. E' da notare come i valori di riflettanza spettrale misurati a 3 mesi di esposizione sono simili per sito di esposizione, indipendentemente dall'orientamento. Da notare, inoltre, come per le tegole e a differenza delle membrane precedentemente analizzata non si rileva un modesto decadimento della riflettanza in corrispondenza della banda del visibile VIS (Figura 34).

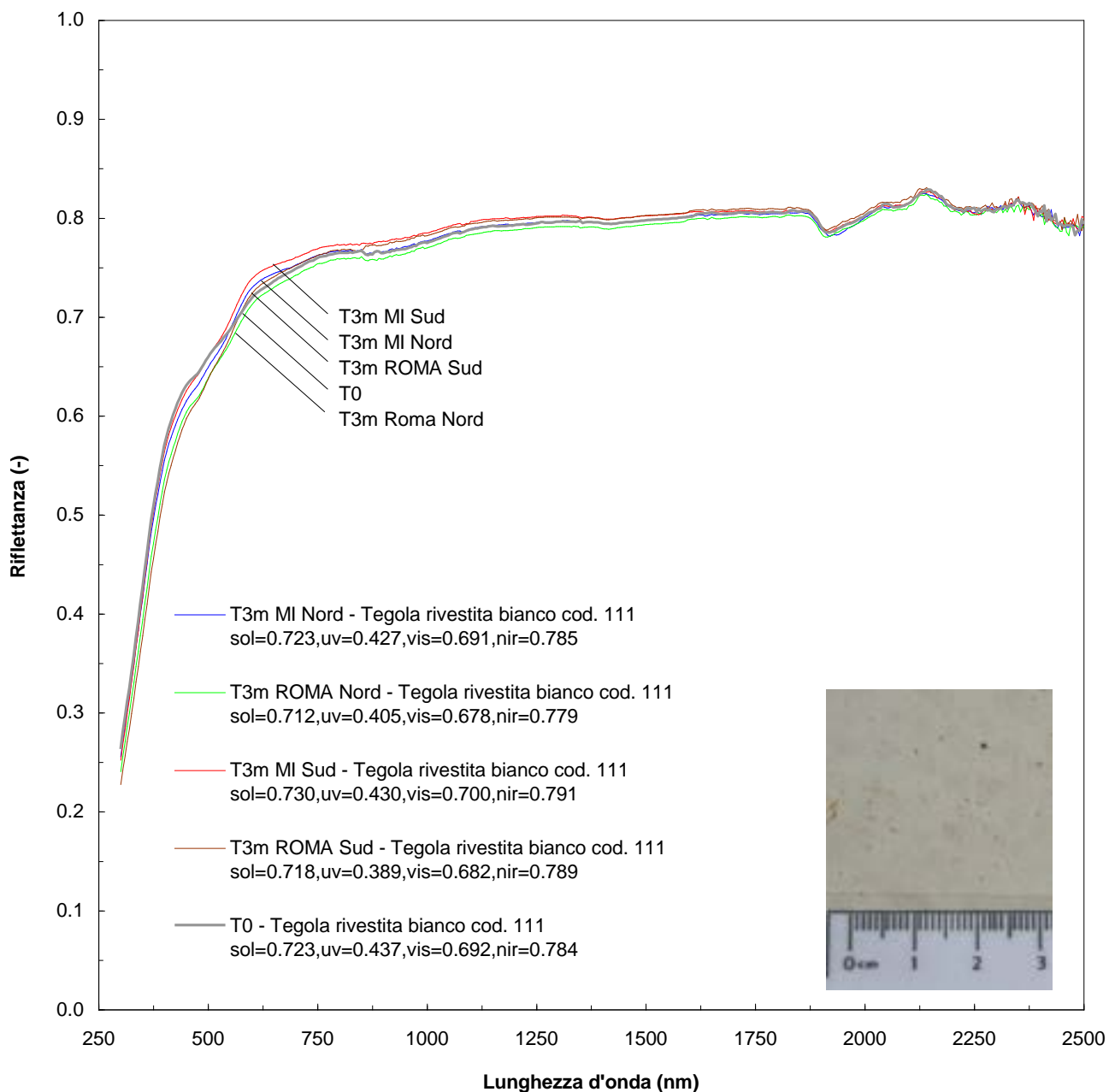


Figura 35. Riflettanza di una tegola color testa di moro rivestita con un ciclo di pittura bianca al tempo zero (T0) e dopo tre mesi (T3m) di esposizione naturale in ambiente esterno a Roma e Milano.

Tra gli spettri misurati a 3 mesi di esposizione e quelli al tempo zero T0, per esposizione orizzontale e inclinata 30°, si osservano scostamenti molto ridotti dei valori assoluti misurati lungo le bande di lunghezze d'onda UV-VIS-NIR. Gli andamenti possono quindi essere considerati comparabili e pressochè sovrapponibili (Figura 35).

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 sporcamento, e processi di invecchiamento dei materiali.

Un'analisi della letteratura scientifica ha messo in evidenza come lo sporcamento di coperture aventi alta riflettanza possa comportare una sensibile riduzione del risparmio conseguito con l'utilizzo di cool materials. Inoltre, anche se esistono efficaci tecniche per ripristinare la riflettanza iniziale, interventi di pulizia della copertura non sono economicamente sostenibili al solo fine del risparmio energetico. Esistono anche dei database (US Environmental Protection Agency, e Cool Roofing Rating Council) di prodotti soggetti a esposizione naturale in ambiente esterno dei quali è stata valutata la riflettanza solare ogni tre mesi per un periodo non inferiore a tre anni. Tuttavia, sono relativi solo a tre campi di esposizione negli USA, in contesti non urbani.

Le procedure di esposizione naturale presenti in normativa, per alcuni aspetti, appaiono non completamente armonizzate. Inoltre, per molti prodotti da costruzione, l'inclinazione d'impiego è molto differente dalle condizioni di esposizione indicate in normativa e utilizzate per l'invecchiamento naturale (le norme suggeriscono di esporre campioni inclinati di 5°, 45°, e 90° rivolti verso l'equatore).

Sono stati selezionati 16 prodotti per coperture di cui 14 membrane impermeabilizzanti e 2 tegole tipo olandese. Per ogni materiale è stato selezionato un prodotto avente proprietà "standard", ossia rappresentativo delle proprietà dei prodotti già presenti in commercio, e una o più alternative aventi prestazioni ottimizzate, cioè ad alta riflettanza (cool materials) o con proprietà fotocatalitiche. Fra le membrane sono state selezionate membrane sintetiche poliolefiniche (TPO e TPO/FPA), in polivinilcloruro (PVC), bituminose con armatura polimerica e rivestite con un coating elastomerico da applicarsi in opera, bituminose con armatura polimerica e rivestite con graniglia. Tre campioni per ogni prodotto selezionato sono stati esposti in area urbana a Milano e a Roma. Tutte le membrane impermeabilizzanti sono state esposte debolmente inclinate (con pendenza pari a circa 2°) sia a Milano che a Roma, mentre solo a Milano sono state in aggiunta esposte inclinate di 45° rivolte a Sud. Le tegole invece sono state esposte sia a Milano che a Roma inclinate del 30% rivolte a Nord e a Sud. Per ogni prodotto, sito e condizione di esposizione, sono stati esposti tre campioni, dei quali, al tempo zero e dopo tre mesi di esposizione naturale, è stata caratterizzata la riflettanza spettrale con uno spettroflettometro UV-VIS-NIR e sono stati calcolati i valori di riflettanza solare, nel campo UV, visibile e del vicino infrarosso secondo la norma ISO 9050 [31]. L'esposizione ha avuto inizio contemporaneo a Roma e Milano il 18 aprile 2012.

Per quanto concerne la riflettanza solare sono stati osservati decrementi significativi già dopo i primi tre mesi di esposizione per i prodotti maggiormente riflettenti, ad esempio una membrana bianca in TPO ha una riflettanza iniziale pari a 0.838 e dopo tre mesi ha una riflettanza pari a 0.711 esposta a Roma, e pari a circa 0.700 per i campioni esposti a Milano. Per tutti i prodotti esposti, si osservano i maggiori decrementi di riflettanza nel campo della radiazione visibile (fra 380 e 780 nm), mentre nel campo del vicino infrarosso (fra 780 e 2500 nm) si osservano, in media, variazioni significative, anche se meno pronunciate. Per la maggior parte dei prodotti presi in considerazione si ha un decremento, rispetto alla riflettanza iniziale, maggiore del 5%, e per i prodotti aventi maggiore riflettanza iniziale (ad esempio i prodotti avente riflettanza solare iniziale maggiore di 0.70), il decremento nei primi tre mesi di esposizione, supera nettamente il 10% (la mediana è il 14.1%, con un massimo del 18.9%). In generale, si osserva come i prodotti avente maggiore riflettanza solare iniziale sono quelli che presentano i maggiori decrementi di riflettanza solare dopo tre mesi di esposizione.

Fra le attività future si individuano:

- La misura della riflettanza dei campioni esposti in ambiente esterno, per almeno 3 anni;
- Valutazione ed esposizione di ulteriori prodotti per coperture.

Riferimenti bibliografici

- [1] H. Akbari. 2005. Energy Saving Potentials and Air Quality Benefits of Urban Heat Island Mitigation. in Proceedings of First International Conference on Passive and LowEnergy Cooling for the Built Environment, Athens, Greece, May 17-24, 2005
- [2] H. Akbari, A.A. Berhe, R. Levinson, S. Graveline, K. Foley, A.H. Delgado, R.M. Paroli. 2005. Aging and weathering of cool roofing membranes. Lawrence Berkeley National Laboratory. Retrieved from: <http://escholarship.org/uc/item/3qb8j3k7>
- [3] H. Akbari, S. Menon, A. Rosenfeld. 2009. Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO₂. *Climatic Change*. 94: 275-286
- [4] P. Berdahl, H. Akbari, L.S. Rose. 2002. Aging of reflective roofs: soot deposition. *Applied Optics*. 41: 2355-2360
- [5] P. Berdahl, H. Akbari, R. Levinson, W.A. Miller. 2008. Weathering of roofing materials - An overview. *Construction and Building Materials*. 22: 423– 433
- [6] H. Berdahl, H. Akbari, R. Levinson, J. Jacobs, F. Klink, R. Everman. 2012. Three-year weathering tests on asphalt shingles: Solar reflectance. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 99: 277–281.
- [7] S.E. Bretz, H. Akbari. 1997. Long-term performance of high-albedo roof coatings. *Energy and Buildings*. 25: 159-167
- [8] CRRC. 2011. Cool Roof Rating Council Product Rated Products Directory. Online at: [/http://coolroofs.org](http://coolroofs.org)
- [9] H. Gilbert, R. Levinson, J. Kim, S. Mazur-Stommen, R. Paolini, M. Pomerantz, P. Rosado, S. Rose. (Lawrence Berkeley National Laboratory). 2011. Cool Communities Report. California Energy Commission. https://webpace.lbl.gov/xythoswfs/webui/_xy-10354570_1-t_yfIOUZOU
- [10] M. Ichinose, T. Inoue, Y. Sakamoto. 2009. Long-term performance of high-reflectivity exterior panels. *Building and Environment*. 44: 1601–1608
- [11] IGLAE. 2012. Codice di pratica delle impermeabilizzazioni. Istituto per la Garanzia dei Lavori Affini all'Edilizia. <http://www.iglae.org>
- [12] R. Levinson, H. Akbari. 2002. Effects of composition and exposure on the solar reflectance of portland cement concrete. *Cement and Concrete Research*. 32: 1679-1698.
- [13] 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
- [14] T.R. Oke. 1987. Boundary layer climates, Methuen, London-New York
- [15] T. Poli, L. Gattoni, R. Paolini, G. Pansa, M. Favaron, S. Pilati. 2009. The Influence of the Urban Heat Island over Building Energy Demand: the Case of Milan, in Proc. of 7th ICUC Conference, 29 June-3 July, Yokohama (Japan)
- [16] A.M. Rizwan, Y.C.L. Dennis, C. Liu. 2008. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*. 20: 120–128
- [17] M. Sleiman, G. Ban-Weiss, H.E. Gilbert, D. Francois, P. Berdahl, T.W. Kirchstetter, H. Destailats, R. Levinson. 2011b. 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: 3385–3399
- [18] T. Toppi, P. Zangheri, R. Paolini. 2009. Simplified Method for Modification of Weather Data File for Energy Simulations within Urban Areas, pp. 65–70, in R. Paolini (Editor) Proc. of the 8th Workshop CIB W108 Climate Change and the Built Environment, 26th March 2009, Milano (Italia). CIB Publication 325, CIB – International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Rotterdam, The Netherlands

- [19] US EPA. 2011. US Environmental Protection Agency ENERGY STAR® Roof Products. Online at: http://www.energystar.gov/index.cfm?fuseaction=find_a_product.showProductGroup&pgw_code=ROS

Riferimenti normativi

- [20] ASTM G 7: 2011. Standard Practice for Atmospheric Environmental Exposure Testing of Nonmetallic Materials
- [21] SIA 271: 2007. Impermeabilizzazione di edifici.
- [22] UNI EN ISO 877: 2009. Plastics - Methods of exposure to solar radiation - Part 2: Direct weathering and exposure behind window glass
- [23] ASTM E 891: 1992. E 891 Tables for Terrestrial Direct Normal Solar Spectral Irradiance for Air Mass 1.53
- [24] ASTM E 903: 1996. Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres
- [25] ASTM D 1006: 2001. Standard Practice for Conducting Exterior Exposure Tests of Paints on Wood
- [26] ASTM D 1014: 2009. Standard Practice for Conducting Exterior Exposure Tests of Paints and Coatings on Metal Substrates
- [27] ASTM C 1549: 2009. Standard Test Method for Determination of Solar Reflectance Near Ambient Temperature Using a Portable Solar Reflectometer
- [28] ASTM E 1918: 2006. Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field
- [29] ISO 2810: 2004. Paints and varnishes - Natural weathering of coatings - Exposure and assessment
- [30] JSTM J 7601: 2003. Outdoor exposure test methods that target the pollution of outer wall material for construction (disponibile solo in giapponese)
- [31] ISO 9050: 2003. Glass in building — Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors
- [32] ISO 15686: 2000. Building and constructed assets. Service life planning. Part 1. General Principles
- [33] ISO 15686: 2001. Building and constructed assets. Service life planning. Part 2. Service life prediction principles
- [34] ANSI/CRRC-1: 2010. CRRC Standard. <http://www.coolroofs.org/documents/CRRC-1Standard-finalANSI.pdf>

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 - Risultati per tutti i campioni

#	Cod.	Prodotto	Tempo	Sito	Esposizione	Rsol	Ruv	Rvis	Rnir	
1	101111	Membrana grigia TPO/FPA	T0	-	-	0.258	0.069	0.286	0.238	
	101112					0.259	0.070	0.286	0.238	
	101113					0.259	0.071	0.287	0.238	
	101111		Membrana grigia TPO/FPA	T3m	Roma	hor (inclinato 2°)	0.241	0.064	0.258	0.233
	101112						0.247	0.066	0.266	0.235
	101113						0.240	0.063	0.256	0.234
	201111				Milano		0.226	0.066	0.241	0.219
	201112						0.235	0.066	0.252	0.226
	201113						0.237	0.065	0.255	0.227
	201231			45° Sud	0.230	0.067	0.247	0.222		
	201232				0.230	0.067	0.247	0.222		
	201233				0.229	0.068	0.245	0.220		
2	102111	Membrana standard TPO/FPA rivestita bianco		T0	-	-	0.860	0.071	0.918	0.842
	102112						0.855	0.071	0.916	0.835
	102113						0.842	0.071	0.900	0.823
	102111		Membrana standard TPO/FPA rivestita bianco	T3m	Roma	hor (inclinato 2°)	0.742	0.077	0.764	0.762
	102112						0.741	0.076	0.768	0.756
	102113						0.740	0.078	0.767	0.755
	202111				Milano		0.723	0.083	0.746	0.739
	202112						0.730	0.081	0.757	0.744
	202113						0.699	0.077	0.720	0.717
	202231			45° Sud	0.729	0.075	0.750	0.749		
	202232				0.724	0.073	0.745	0.744		
	202233				0.729	0.074	0.749	0.751		
3	103111	Membrana bianca TPO/FPA		T0	-	-	0.772	0.074	0.858	0.714
	103112						0.775	0.074	0.864	0.714
	103113						0.774	0.075	0.863	0.712
	103111		Membrana bianca TPO/FPA	T3m	Roma	hor (inclinato 2°)	0.643	0.068	0.681	0.638
	103112						0.631	0.071	0.660	0.635
	103113						0.631	0.071	0.660	0.635
	203111				Milano		0.604	0.069	0.637	0.601
	203112						0.651	0.069	0.688	0.645
	203113						0.650	0.068	0.689	0.642
	203231			45° Sud	0.655	0.065	0.698	0.644		
	203232				0.652	0.067	0.696	0.639		
	203233				0.629	0.069	0.668	0.621		

continua sulla prossima pagina

#	Cod.	Prodotto	Tempo	Sito	Esposizione	Rsol	Ruv	Rvis	Rnir	
4	104211	Membrana bianca TPO	T0	-	-	0.837	0.074	0.895	0.819	
	104212					0.837	0.075	0.895	0.819	
	104213					0.841	0.076	0.900	0.821	
	104211		Membrana bianca TPO	T3m	Roma	hor (inclinato 2°)	0.714	0.073	0.734	0.734
	104212						0.707	0.071	0.725	0.730
	104213						0.712	0.073	0.730	0.736
	204211				Milano		0.690	0.073	0.706	0.715
	204212						0.703	0.074	0.722	0.725
	204213						0.719	0.075	0.739	0.740
	204231			45° Sud		0.704	0.074	0.724	0.723	
	204232				0.696	0.073	0.715	0.717		
204233	0.699	0.073			0.719	0.720				
5	105211	Membrana grigia PVC		T0	-	-	0.471	0.065	0.506	0.456
	105212						0.471	0.064	0.506	0.456
	105213		0.470				0.064	0.505	0.456	
	105211		Membrana grigia PVC	T3m	Roma	hor (inclinato 2°)	0.424	0.064	0.439	0.431
	105212						0.428	0.069	0.443	0.435
	105213						0.426	0.065	0.440	0.433
	205211				Milano		0.409	0.063	0.420	0.419
	205212						0.407	0.064	0.420	0.416
	205213						0.405	0.063	0.415	0.417
	205231			45° Sud		0.415	0.065	0.430	0.420	
	205232				0.427	0.065	0.446	0.429		
205233	0.411	0.064			0.426	0.417				
6	106211	Membrana bianca PVC		T0	-	-	0.868	0.077	0.919	0.860
	106212						0.867	0.077	0.919	0.858
	106213		0.869				0.077	0.920	0.862	
	106211		Membrana bianca PVC	T3m	Roma	hor (inclinato 2°)	0.741	0.074	0.752	0.774
	106212						0.729	0.074	0.734	0.769
	106213						0.745	0.074	0.756	0.780
	206211				Milano		0.677	0.073	0.673	0.727
	206212						0.721	0.073	0.727	0.761
	206213						0.713	0.073	0.717	0.754
	206231			45° Sud		0.724	0.074	0.734	0.757	
	206232				0.724	0.073	0.734	0.759		
206233	0.742	0.074			0.757	0.772				
7	107211	membrana beige TPO		T0	-	-	0.609	0.074	0.547	0.727
	107212						0.608	0.074	0.546	0.726
	107213		0.611				0.073	0.548	0.728	
	107211		membrana beige TPO	T3m	Roma	hor (inclinato 2°)	0.542	0.069	0.474	0.661
	107212						0.543	0.069	0.476	0.662
	107213						0.541	0.069	0.472	0.663
	207211				Milano		0.547	0.073	0.480	0.668
	207212						0.550	0.072	0.483	0.670
	207213						0.549	0.074	0.482	0.668
	207231			45° Sud		0.524	0.071	0.459	0.640	
	207232				0.527	0.072	0.462	0.642		
207233	0.549	0.074			0.482	0.668				

continua sulla prossima pagina

#	Cod.	Prodotto	Tempo	Sito	Esposizione	Rsol	Ruv	Rvis	Rnir	
8	108211	Membrana bituminosa rivestita bianco+	T0	-	-	0.816	0.072	0.885	0.783	
	108212					0.814	0.072	0.882	0.782	
	108213					0.825	0.072	0.889	0.799	
	108211			T3m	Roma	hor (inclinato 2°)	0.687	0.072	0.716	0.693
	108212						0.670	0.071	0.694	0.681
	108213						0.673	0.070	0.691	0.694
	208211				0.693		0.074	0.732	0.688	
	208212				0.699		0.075	0.734	0.700	
	208213				0.708		0.075	0.744	0.708	
	208231			45° Sud	0.707	0.074	0.750	0.697		
	208232				0.704	0.074	0.750	0.691		
	208233				0.698	0.074	0.744	0.686		
9	109211	Membrana bituminosa rivestita bianco		T0	-	-	0.743	0.070	0.815	0.699
	109212						0.736	0.071	0.812	0.688
	109213						0.748	0.070	0.822	0.703
	109211			T3m	Roma	hor (inclinato 2°)	0.619	0.069	0.650	0.619
	109212						0.617	0.069	0.651	0.614
	109213						0.626	0.068	0.658	0.625
	209211				0.649		0.074	0.692	0.635	
	209212				0.666		0.073	0.706	0.659	
	209213				0.649		0.073	0.686	0.645	
	209231			45° Sud	0.652	0.073	0.702	0.629		
	209232				0.672	0.072	0.721	0.654		
	209233				0.656	0.072	0.701	0.641		
10	181211	Membrana bituminosa rivestita TiO2		T0	-	-	0.779	0.067	0.800	0.804
	181212						0.778	0.067	0.807	0.793
	181213						0.781	0.068	0.806	0.801
	181211			T3m	Roma	hor (inclinato 2°)	0.725	0.071	0.726	0.772
	181212						0.729	0.073	0.733	0.771
	181213						0.730	0.072	0.733	0.773
	281211				0.758		0.077	0.762	0.802	
	281212				0.748		0.075	0.756	0.785	
	281213				0.756		0.078	0.763	0.795	
	281231			45° Sud	0.763	0.075	0.773	0.800		
	281232				0.764	0.073	0.775	0.800		
	281233				0.766	0.074	0.778	0.802		
11	182211	Membrana bituminosa rivestita bianco TB		T0	-	-	0.739	0.078	0.799	0.711
	182212						0.746	0.075	0.798	0.728
	182213						0.707	0.076	0.776	0.664
	182211			T3m	Roma	hor (inclinato 2°)	0.634	0.073	0.662	0.639
	182212						0.632	0.073	0.654	0.644
	182213						0.599	0.072	0.634	0.593
	282211				0.577		0.071	0.601	0.583	
	282212				0.630		0.073	0.644	0.653	
	282213				0.625		0.073	0.648	0.635	
	282231			45° Sud	0.664	0.073	0.680	0.687		
	282232				0.638	0.074	0.670	0.638		
	282233				0.673	0.073	0.690	0.695		

continua sulla prossima pagina

#	Cod.	Prodotto	Tempo	Sito	Esposizione	Rsol	Ruv	Rvis	Rnir	
12	183211	Membrana bituminosa rivestita color	T0	-	-	0.400	0.059	0.265	0.595	
	183212					0.407	0.060	0.263	0.614	
	183213					0.388	0.060	0.265	0.567	
	183211			T3m	Roma	hor (inclinato 2°)	0.363	0.063	0.244	0.535
	183212						0.381	0.063	0.250	0.570
	183213						0.364	0.063	0.252	0.528
	283211				Milano		0.380	0.063	0.256	0.559
	283212						0.373	0.064	0.256	0.543
	283213						0.375	0.065	0.258	0.545
	283231			45° Sud	0.369	0.062	0.258	0.532		
	283232				0.384	0.062	0.257	0.569		
	283233				0.380	0.062	0.258	0.558		
13	184211	Membrana bituminosa granigliata fotocatalitica TiO2		T0	-	-	0.280	0.096	0.311	0.253
	184212						0.291	0.100	0.324	0.263
	184213						0.285	0.101	0.320	0.254
	184211			T3m	Roma	hor (inclinato 2°)	0.276	0.096	0.304	0.254
	184212						0.272	0.095	0.298	0.251
	184213						0.284	0.100	0.313	0.261
	284211				Milano		0.276	0.101	0.311	0.243
	284212						0.289	0.104	0.322	0.261
	284213						0.281	0.099	0.314	0.252
	284231			45° Sud	0.281	0.097	0.313	0.254		
	284232				0.276	0.102	0.312	0.244		
	284233				0.289	0.104	0.323	0.259		
14	185211	Membrana bituminosa granigliata		T0	-	-	0.231	0.085	0.246	0.222
	185212						0.231	0.087	0.245	0.224
	185213						0.249	0.090	0.268	0.237
	185211			T3m	Roma	hor (inclinato 2°)	0.220	0.074	0.231	0.216
	185212						0.242	0.090	0.258	0.233
	185213						0.241	0.086	0.256	0.234
	285211				Milano		0.249	0.088	0.266	0.238
	285212						0.243	0.089	0.260	0.232
	285213						0.234	0.089	0.252	0.222
	285231			45° Sud	0.244	0.089	0.259	0.237		
	285232				0.260	0.094	0.281	0.245		
	285233				0.254	0.094	0.274	0.240		

continua sulla prossima pagina

#	Cod.	Prodotto	Tempo	Sito	Esposizione	Rsol	Ruv	Rvis	Rnir
15	110	Tegola testa di moro	T0	-	-	0.488	0.105	0.341	0.702
	110					0.487	0.106	0.340	0.700
	110					0.481	0.105	0.333	0.695
	110		T3m	Roma	30% Nord	0.463	0.092	0.320	0.670
	110					0.459	0.089	0.315	0.669
	110					0.463	0.090	0.318	0.672
	110				30% Sud	0.472	0.092	0.327	0.684
	110					0.460	0.087	0.316	0.671
	110					0.459	0.093	0.317	0.665
	110			Milano	30% Nord	0.446	0.083	0.304	0.652
	110					0.452	0.085	0.310	0.659
	110					0.444	0.086	0.304	0.646
	110				30% Sud	0.451	0.085	0.310	0.658
	110					0.444	0.083	0.304	0.648
	110					0.452	0.087	0.310	0.658
16	111	Tegola testa di moro rivestita bianco	T0	-	-	0.723	0.437	0.692	0.784
	111					0.753	0.470	0.722	0.812
	111					0.734	0.430	0.701	0.798
	111		T3m	Roma	30% Nord	0.712	0.405	0.678	0.779
	111					0.735	0.428	0.702	0.798
	111					0.713	0.412	0.680	0.778
	111				30% Sud	0.713	0.387	0.676	0.784
	111					0.718	0.389	0.682	0.789
	111					0.725	0.424	0.690	0.791
	111			Milano	30% Nord	0.728	0.436	0.698	0.787
	111					0.737	0.446	0.707	0.797
	111					0.723	0.427	0.691	0.785
	111				30% Sud	0.730	0.430	0.700	0.791
	111					0.720	0.431	0.689	0.781
	111					0.737	0.448	0.708	0.794

Allegato B - 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.