

Confronto fra invecchiamento accelerato e naturale di rivestimenti organici protettivi: uso di dati meteorologici

F. Deflorian, S. Rossi, L. Fedrizzi, C. Zanella

Le proprietà protettive dei rivestimenti organici per applicazioni per esterni sono tradizionalmente valutate attraverso test accelerati di laboratorio. Una questione aperta rimane la reale correlazione fra questi test accelerati e l'esposizione naturale in ambienti diversi. In questo lavoro è descritto un nuovo approccio basato sulla semplice idea di quantificare il grado di invecchiamento naturale utilizzando un numero limitato di parametri ambientali che possono influenzare le proprietà protettive: l'energia totale nell'intervallo UV, il tempo di esposizione ad umidità relative superiori ad una certa soglia (tale da causare condensa superficiale), il tempo di esposizione ad una temperatura superiore alla Tg del polimero, ecc. In questo lavoro si è cercato di applicare questo approccio a un rivestimento poliestere ottenuto per coil-coating per applicazioni per esterni. I primi risultati sono molto interessanti e incoraggiano ulteriori sviluppi che considerino un maggior numero di materiali e siti naturali di esposizione.

Parole chiave: rivestimenti, corrosione, acciaio, caratterizzazione materiali

INTRODUZIONE

Le qualità e le caratteristiche dei prodotti vernicianti finalizzati a proteggere dalla corrosione, specialmente per ambienti esterni, sono generalmente valutate tramite prove di laboratorio che in maniera accelerata simulano alcune sollecitazioni ambientali [1].

I materiali sono cioè sottoposti a prove frequentemente standardizzate quali l'esposizione alla camera a nebbia salina, esposizione a radiazioni UV, ciclaggi termici, ecc., frequentemente in modo combinato. Sono stati sviluppati infatti numerosi cicli di invecchiamento che combinando in modo bilanciato diverse prove cercano di avvicinarsi il più possibile (accelerando i tempi naturalmente), alla situazione che si verifica per esposizioni naturali [2].

La valutazione del degrado, dopo invecchiamento, è spesso fatta in modo visivo, ma talvolta vengono eseguite analisi più accurate sia di natura fisica che chimica ed elettrochimica [3]. Prove di invecchiamento accelerato sono anche considerate delle esposizioni naturali in ambienti particolarmente aggressivi, ad esempio per l'elevata umidità o temperatura o presenza di atmosfere aggressive, tali da accelerare i fenomeni di invecchiamento; uno dei siti più noti di questi genere è in Florida [4]. Un problema che è stato individuato da tempo è che non esiste, in generale, una buona correlazione fra risultati di prove di invecchiamento accelerato e risultato su campo [5]. Alcune correlazioni parziali si possono trovare, ma mai è stata verificata una corrispondenza soddisfacente. In altri termini non è possibile fare un ranking di diversi prodotti vernicianti in laboratorio, sicuri che la classifica valga anche per materiali applicati ed esposti all'atmosfera.

Le ragioni di questa mancanza di corrispondenza sono abba-

stanza chiare. Da un lato molti test di invecchiamento accelerato sono una forte semplificazione della situazione reale (prendono in considerazione solo un numero ristretto di "stress" ambientali), ad inoltre concentrarne le intensità nel tempo non sempre garantisce una equivalenza di conseguenze (assenza di linearità). Dall'altra ovviamente anche l'invecchiamento cosiddetto naturale dipende in modo marcato dall'ambiente considerato (marino, industriale, rurale, tropicale, ecc.). Una chiara evidenza di tutto ciò deriva dalla constatazione, presente in numerosi lavori scientifici, che anche esposizioni naturali in ambienti diversi danno spesso risultati diversi, o addirittura esposizioni nello stesso sito, ma in tempi diversi (ad esempio anni diversi) danno risultati diversi.

L'invecchiamento naturale ed il degrado di un prodotto verniciante è influenzato da fattori quali l'umidità, l'insolazione solare, la temperatura e molti altri ancora, che ovviamente variano, anche nello stesso luogo, in funzione delle condizioni meteorologiche [6].

Appare quindi naturale cercare di "quantificare" l'invecchiamento attraverso dati meteorologici e quindi permettere confronti omogenei fra materiali esposti in siti diversi. Inoltre una quantificazione degli "stress ambientali" può permettere di individuare migliori correlazioni con le prove di laboratorio.

In questo lavoro si è cercato di fare i primi passi in questa direzione confrontando l'invecchiamento naturale (per 10 mesi nella città di Trento) quantificando i dati meteorologici e l'invecchiamento accelerato in laboratorio (utilizzando diverse tecniche di ampia diffusione) ottenuto su due sistemi vernicianti ottenuti per coil coating. L'entità del degrado delle proprietà protettive è stata valutata principalmente mediante tecniche elettrochimiche (spettroscopia di impedenza elettrochimica).

In questa prima fase sono state considerate tecniche di invecchiamento di laboratorio prese singolarmente, e non l'azione combinata di cicli complessi.

MATERIALI E PROCEDURA SPERIMENTALE

I materiali studiati sono dei prodotti preverniciati (coil coating) costituiti da un substrato di lamiera elettrozincata fosfatata ricoperta da un primer (5 µm) di tipo poliestere e da

F. Deflorian, S. Rossi, C. Zanella

Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e Tecnologie Industriali,
Università di Trento, Via Mesiano 77, Trento

L. Fedrizzi

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche,
Università di Udine, Via delle Scienze 208, Udine

Memoria presentata alle Giornate Nazionali Corrosione e protezione
organizzate da AIM, Senigallia, 29 giugno-1 luglio 2005

	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre	giugno	luglio	marzo	aprile	maggio
precipitazioni totali (mm)	40,6	7,8	148,8	197,6	108,6	1,4	54,8	88,6	53,4	113,4
T media (°C)	26,25	18,54	10,97	7,31	3,38	1,45	4	7,99	13,11	15,87
RH < 30 e T > 20°C (minuti)	7290	5450	40	0	0	0	0	460	1650	330
60 < RH < 80 (minuti)	10780	10870	14530	8550	12430	16630	11110	11560	14640	11430
RH > 80 (min)	3850	5260	17340	32280	18920	14750	12940	10830	10130	11050
radiazione (kJ/m ²)	597832,4	445912,92	242085,2	122445,6	123194,6	147865,6	202027,4	349957,7	441331,6	615684,3
T>Tg (minuti)	11250	20	0	0	0	0	0	0	0	0

	6 mesi	8 mesi	10 mesi
precipitazioni totali (mm)	505	648	815
T media (°C)	11,32	9,99	10,89
RH < 30 e T > 20°C (minuti)	12780	13240	15220
60 < RH < 80 (minuti)	73790	96460	122530
RH > 80 (min)	92400	116170	137350
radiazione (kJ/m ²)	1679336	2231322	3288338
4: T>Tg (minuti)	11270	11270	11270

Tabella 1 – Dati meteorologici.
Table 1 – Meteorological data.

un top coat sempre di tipo poliestere a due spessori: 40 µm (campione denominato A) e 100 µm (campione denominato B). La temperatura di transizione vetrosa dei rivestimenti è circa 32°C.

Tali materiali sono stati esposti con angolo a 45° in direzione sud in un sito presso la città di Trento per 10 mesi fra i mesi di agosto e maggio (compresi). Sono stati acquisiti contemporaneamente tutti i dati meteorologici durante l'esposizione (temperatura, umidità, radiazione solare, precipitazioni, ecc.).

I materiali sono stati anche invecchiati artificialmente attraverso tecniche consolidate e diffuse come l'esposizione alle radiazioni UV per 1000 ore e l'esposizione alla camera a nebbia salina (300 ore), sia mediante approcci più recenti come l'uso dei ciclaggi termici a contatto con elettrolita, il cui ciclo standard nel nostro caso è così costituito: 4 ore a 75°C e 20 ore a temperatura ambiente. Sono stati eseguiti 12 cicli di invecchiamento.

La valutazione del degrado è stata eseguita, per quanto riguarda le caratteristiche chimiche del rivestimento, mediante analisi FTIR, per quanto riguarda le proprietà protettive del rivestimento mediante prove di spettroscopia di impedenza in una soluzione di NaCl al 3.5% (range di frequenze 10⁵-10⁻³ Hz, ampiezza del segnale 20 mV).

I campioni esposti all'atmosfera sono stati valutati dopo 6, 8 e 10 mesi di esposizione, i campioni esposti alle radiazioni UV alla fine della prova (1000 ore), i campioni in camera a nebbia salina dopo 300 e 600 ore di esposizione ed infine i campioni sottoposti a ciclaggio termico dopo ogni ciclo a temperatura ambiente. Per ogni punto sperimentale si sono ripetute le prove su tre campioni.

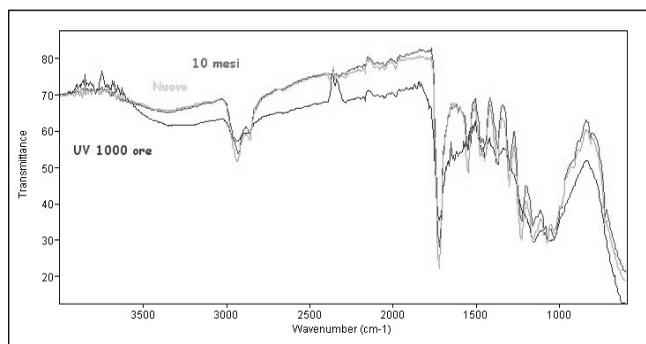


Fig. 1 – Spettro FTIR del campione A dopo diverse procedure di invecchiamento.

Fig. 1 – FTIR spectra after different weathering procedures for sample A.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Alla fine dell'esposizione naturale erano a disposizione un numero enorme di dati meteorologici in quanto il campionamento di misura dei parametri era estremamente fitto (ogni pochi minuti veniva misurata e registrata la temperatura, l'umidità e tutti gli altri parametri). E' stato quindi necessario ricavare dei dati complessivi o medi che vengono riportati nella tabella 1.

Mese per mese i dati sono stati raggruppati in diverse categorie scelte preliminarmente come significative. In particolare sono riportati i valori di precipitazioni in millimetri, la temperatura media, l'intensità totale (energia) della radiazione solare nell'intervallo di frequenze della radiazione UV, e il tempo in minuti in cui si sono verificate delle condizioni ambientali significative: bassa umidità e alta temperatura (tempo in cui è probabile un desorbimento d'acqua dal rivestimento), alta umidità (diffusione d'acqua nel rivestimento), elevatissima umidità (condensa d'acqua sul rivestimento) ed infine il tempo per cui la temperatura ambientale superava la temperatura di transizione vetrosa del rivestimento. Ovviamente questa non è l'unica scelta possibile per raggruppare i dati meteorologici ma è sembrata, come primo approccio, la più ragionevole.

In tabella 1 sono anche riportati i medesimi dati integrati dopo 6, 8 e 10 mesi che sono i tempi a cui i campioni sono stati sottoposti alle prove elettrochimiche.

Il primo confronto che verrà discusso riguarda l'esposizione UV accelerata di laboratorio e l'invecchiamento naturale.

E' interessante notare che dai valori di energia totale UV di tabella 1 e dalla potenza delle lampade UV (600 W/m²) è possibile ricavare che 6 mesi di esposizione naturale portano ad una energia di irraggiamenti UV totale equivalente a circa 765 ore in camera UV, 8 mesi a 1000 ore circa e infine 10 mesi a 1500 ore circa. Naturalmente fra i diversi dati non c'è una linearità diretta in quanto l'irraggiamento dipende dalla stagione.

In figura 1 sono riportati gli spettri infrarossi ottenuti sul campione nuovo, quello irraggiato per 1000 ore e quello esposto per 10 mesi all'ambiente naturale, nel caso del campione A (bassi spessori).

Lo spettro del campione nuovo appare del tutto identico a quello del campione esposto a 10 mesi di invecchiamento naturale (analogo risultato ovviamente si ha confrontando il nuovo con i campioni esposti per 6 e 8 mesi), mentre una differenza significativa (soprattutto a numeri d'onda compresi fra 1700 e 1000 cm⁻¹) si ha con il campione invecchiato per 1000 ore nella camera UV. Questo benché il campione invecchiato naturalmente abbia subito una irradiazione UV complessiva per energie superiori (equivalente a 1500 ore di invecchiamento accelerato). Risultati del tutto analoghi sono stati ottenuti sul campione B (alto spessore).

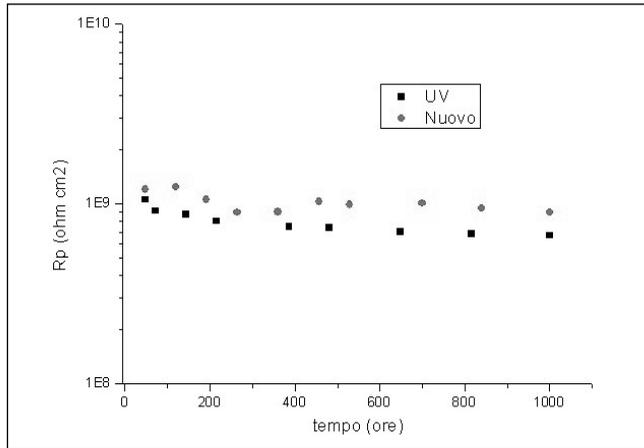


Fig. 2 – Andamento della resistenza del rivestimento del campione A invecchiato artificialmente per 1000 ore in camera UV.

Fig. 2 – Evolution of the coating resistance for sample A after 1000 hours of UV radiation.

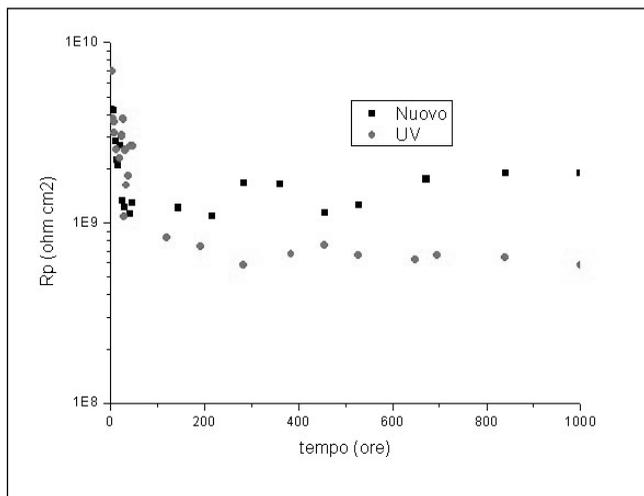


Fig. 3 – Andamento della resistenza del rivestimento del campione B invecchiato artificialmente per 1000 ore in camera UV.

Fig. 3 – Evolution of the coating resistance for sample B after 1000 hours of UV radiation.

Tale risultato va confrontato con la variazione di proprietà protettive. Le misure d'impedenza sono state modellate nell'intervallo di alte frequenze (10^5 -1 Hz) mediante un semplice modello elettrico del rivestimento che comprenda una resistenza in parallelo con una capacità. In particolare la resistenza del rivestimento può essere direttamente associata alle proprietà di barriera del rivestimento stesso. Le misure sono state ottenute dopo vari intervalli di tempo per un tempo complessivo di immersione piuttosto lungo (42 giorni) al fine di evidenziare le differenze non riconoscibili per brevi tempi di immersione.

Nelle figure da 2 a 5 sono ripostati gli andamenti di tale resistenza per entrambi i campioni nei casi di invecchiamento accelerato e invecchiamento naturale, riportando sempre come riferimento l'andamento del campione nuovo.

Dai grafici sopra riportati emergono chiaramente alcune differenze. Innanzitutto l'esposizione UV accelerata non modifica se non marginalmente le proprietà di barriera. Infatti sia il campione A che B (figure 2 e 3) mostrano solo limitati cali della resistenza del rivestimento (questo in contrasto con le modifiche chimiche in figura 1).

Al contrario i campioni invecchiati naturalmente, che non mostravano significativi cambiamenti di natura chimica in figura 1, denotano crolli significativi e progressivi delle proprietà barriera in funzione dell'esposizione naturale. E' evidente quindi che l'esposizione accelerata UV non può da sola simu-

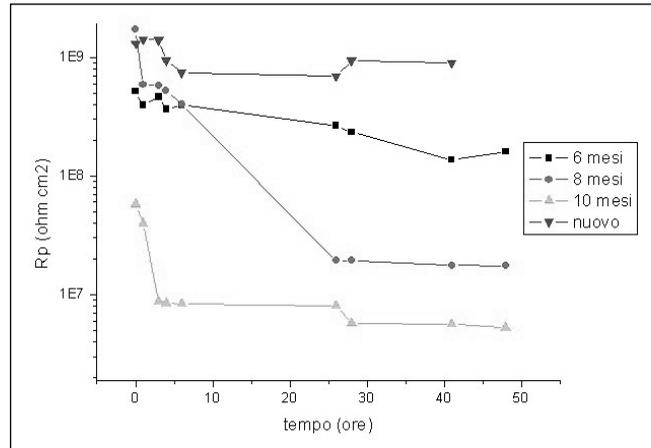


Fig. 4 – Andamento della resistenza del rivestimento del campione A invecchiato naturalmente.

Fig. 4 – Evolution of the coating resistance for sample A after natural exposure.

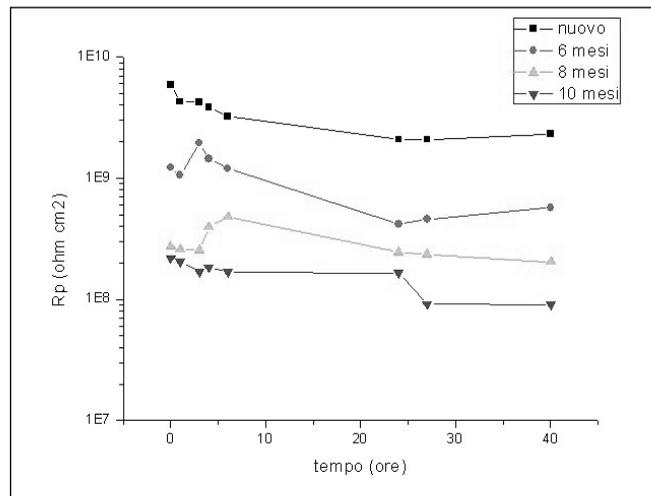


Fig. 5 – Andamento della resistenza del rivestimento del campione B invecchiato naturalmente.

Fig. 5 – Evolution of the coating resistance for sample B after natural exposure.

lare l'esposizione naturale. E' noto infatti dalla letteratura che intense esposizioni UV per tempi brevi possono profondamente modificare lo strato superficiale del rivestimento (e quindi anche l'aspetto estetico, la gloss, ecc.) ma non modificano significativamente le caratteristiche dell'intero rivestimento, cosa che al contrario accade nell'esposizione naturale. Questo in maniera diversa da quanto è risultato dalle analisi FTIR.

Passiamo quindi ad esaminare i risultati ottenuti con il ciclaggio termico. In figura 6 è riportata l'evoluzione della resistenza del rivestimento A fino a 6 cicli. Infatti alla fine del sesto ciclo sono apparsi alcuni blisters e quindi si è considerato completamente degradato il rivestimento.

E' interessante ricordare come i rivestimenti invecchiati naturalmente siano rimasti esposti tutti per circa 3000 minuti ad alte temperature (maggiori della Tg pari a 32°C) e alte umidità relative a prescindere dalla durata dell'esposizione naturale. Infatti le massime temperature e umidità si sono registrate nel periodo estivo, stagione durante la quale tutti i materiali sono stati esposti. Tempi comparabili di esposizione in ambiente acquoso e alta temperatura (75°C) si raggiungono dopo 12 cicli di invecchiamento accelerato.

Il ciclaggio termico causa una progressiva riduzione delle proprietà barriera già dopo pochi cicli, ed i valori risultano confrontabili con quelli ottenuti dopo esposizione naturale, ma per tempi notevolmente inferiori a causa dell'esposizione a tem-

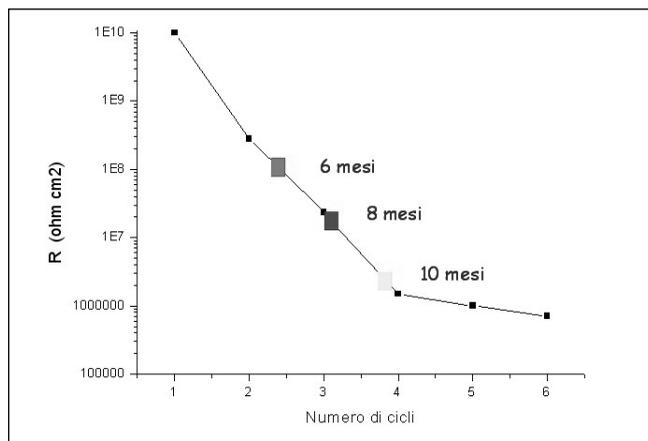


Fig. 6 – Resistenza del rivestimento A in funzione del numero di cicli di invecchiamento accelerato per ciclaggio termico. A confronto sono riportati i valori di resistenza dopo invecchiamento naturale.

Fig. 6 – Evolution of the coating resistance for sample A after thermal cycling; as reference the coating resistances after different times of natural exposure are also reported.

perature decisamente più elevate (75°C) di quelle esterne. Ben diverso è il risultato del ciclaggio termico sul campione a maggiore spessore (100 µm), campione B. I dati sono riportati in figura 7.

In questo caso 12 cicli termici non producono una riduzione sostanziale delle proprietà barriera. L'unica variazione rilevante si osserva solo dopo il primo ciclo. Infatti dopo si assiste addirittura ad una leggera crescita probabilmente dovuta al fatto che l'assorbimento d'acqua favorito dalla alta temperatura causa un leggero swelling del rivestimento che riduce le porosità. In ogni caso non si raggiungono mai i valori ottenuti nell'invecchiamento naturale.

Questo risultato mette in evidenza l'importanza degli spessori in quanto il degrado accelerato agisce soprattutto sull'interfaccia coating-substrato e quindi è fortemente condizionato dallo spessore del rivestimento (alti spessori ritardano l'assorbimento d'acqua all'interfaccia e quindi la formazione di blisters che per deformazione meccanica del coating ne causano anche il deperimento delle proprietà barriera). Infatti nel caso del campione B non si hanno blisters visibili dopo 12 cicli. E' possibile ipotizzare che soltanto un numero maggiore di cicli termici avrebbe potuto indurre risultati simili a quelli misurati sul campione A.

Infine vengono riportati i valori di resistenza ottenuti su cam-

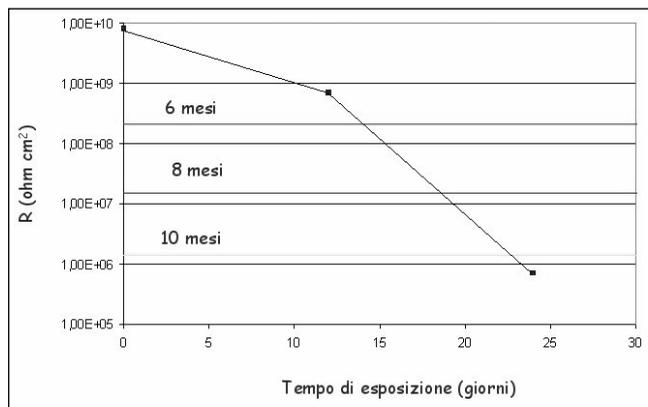


Fig. 8 – Resistenza del rivestimento A in funzione tempo di esposizione in camera a nebbia salina. A confronto sono riportati i valori di resistenza dopo invecchiamento naturale.

Fig. 8 – Evolution of the coating resistance for sample A after salt spray exposure; as reference the coating resistances after different times of natural exposure are also reported.

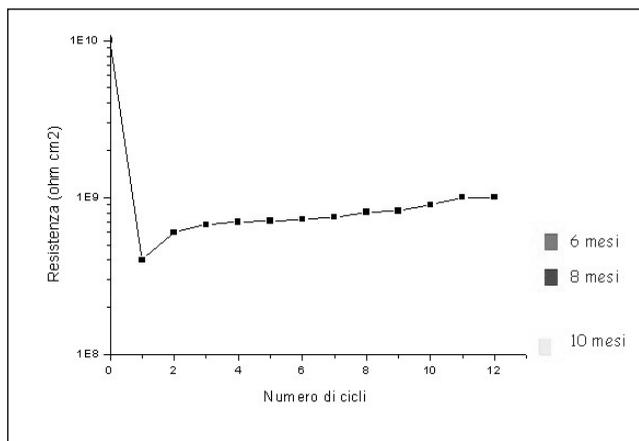


Fig. 7 – Resistenza del rivestimento B in funzione del numero di cicli di invecchiamento accelerato per ciclaggio termico. A confronto sono riportati i valori di resistenza dopo invecchiamento naturale.

Fig. 7 – Evolution of the coating resistance for sample B after thermal cycling; as reference the coating resistances after different times of natural exposure are also reported.

pioni esposti in camera a nebbia salina e valutati a 12 e 24 giorni d'esposizione circa mediante misure d'impedenza.

In questo caso i campioni sono rimasti a contatto con una atmosfera umida (ed una temperatura confrontabile con la Tg) un tempo notevolmente inferiore a quello di esposizione naturale. Infatti i campioni invecchiati naturalmente sono rimasti in condizioni umide per tempi quasi 10 volte maggiori (ma per temperature mediamente inferiori). I risultati ottenuti sono riportati nelle figure 8 e 9. Si può notare come l'effetto di acceleramento del degrado sia maggiore per i bassi spessori.

Contrariamente a quanto osservato dopo il ciclaggio termico, in questo caso entrambi i campioni a spessori diversi mostrano una progressiva riduzione delle proprietà barriera che può essere confrontata con quella ottenuta con invecchiamento naturale, anche se nel caso del campione B, anche dopo 24 giorni in camera a nebbia salina non si raggiunge la riduzione di resistenza che si verifica dopo 10 mesi di invecchiamento naturale.

Anche dopo esposizione in camera a nebbia salina il campione A mostra blistering.

E' necessario sottolineare come, per ogni test accelerato di degrado, la prima fase necessaria è l'assorbimento d'acqua nel rivestimento. L'utilizzo di elevate temperature (al di sopra della Tg) accelera i processi di water uptake, che a loro volta dipendono dallo spessore del rivestimento. Nell'esposizione alla ca-

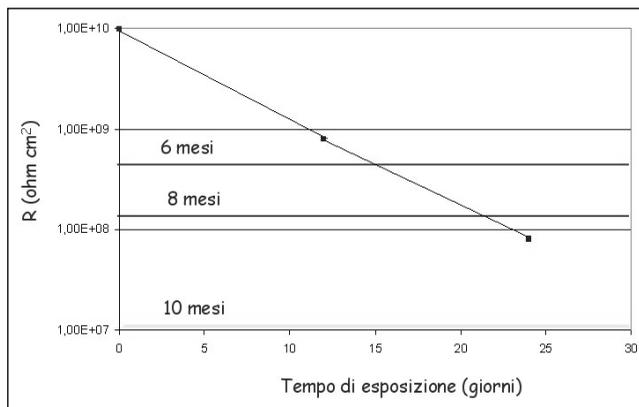


Fig. 9 – Resistenza del rivestimento B in funzione tempo di esposizione in camera a nebbia salina. A confronto sono riportati i valori di resistenza dopo invecchiamento naturale.

Fig. 9 – Evolution of the coating resistance for sample B after salt spray exposure; as reference the coating resistances after different times of natural exposure are also reported.

mera a nebbia salina abbiamo 12 e 24 giorni di esposizione ad alta temperatura, mentre nel caso del ciclaggio termico abbiamo, per 12 cicli, solo 2 giorni totali di esposizione ad alta temperatura. Tale tempo, per il rivestimento ad alto spessore, non è sufficiente a permettere in modo sufficiente i processi di assorbimento d'acqua, e questo spiega il diverso comportamento del materiale B dopo prove di ciclaggio termico e dopo prove di esposizione in camera a nebbia salina.

CONCLUSIONI

Alla fine di questo lavoro iniziale si possono trarre le seguenti considerazioni con riferimento ai materiali studiati:

- si conferma ancora una volta che la semplice esposizione UV da sola non è in grado di simulare l'esposizione naturale;
- il ciclaggio termico (in tempi più brevi) e l'esposizione in nebbia salina causano una riduzione delle proprietà barriera che può essere confrontata con quella ottenuta per esposizione naturale nel caso di rivestimenti a basso spessore. Infatti lo spessore ha una forte influenza sul risultato delle prove accelerate in quanto queste spesso agiscono sull'interfaccia inducendo la formazione di stacchi e blisters;
- si riconosce l'importanza del degrado dell'interfaccia come innesco del degrado generale nei processi di invecchiamento accelerato;
- è risultata evidente l'utilità di confrontare invecchiamento accelerato e naturale quantificando gli "stress ambientali" anche attraverso un monitoraggio dell'invecchiamento naturale ottenuto da dati meteorologici.

Da queste considerazioni derivano indicazioni sui passi futuri necessari:

- necessità di confrontare invecchiamenti naturali ottenuti in diversi ambienti di cui si conoscano i parametri ambientali e meteorologici per capire il peso relativo di ogni variabile

ambientale (variazioni di temperatura, umidità, irradiazione solare, inquinamento, ecc.);

- studio dell'effetto combinato di diversi test accelerati (per esempio UV + ciclaggio termico) su tipi diversi di rivestimento organico;
- con le informazioni ottenute dai precedenti due punti, sviluppare un test di invecchiamento accelerato complesso che possa essere adattato quantitativamente e numericamente in funzione dell'ambiente d'applicazione del rivestimento.

RINGAZIAMENTI

Gli autori ringraziano il Prof. Dino Zardi dell'Università di Trento responsabile dell'Osservatorio Meteorologico Molino Vittoria dell'Università di Trento (http://www.unitn.it/en/campus/vivere_trento/meteo.htm), per l'aiuto fornito nel reperimento e nella gestione dei dati meteorologici

RIFERIMENTI

- [1] J.W. Martin, S.C. Saunders, F.L. Floyd, J.P. Wineburg, Methodologies for Predicting the Service Life of Coatings Systems, Federation of Societies for Coatings Technology, Blue Bell, PA, USA, 1996.
- [2] U. Schulz, P. Trubiroha, U. Schernau, H. Baumgart, Prog. Org. Coat. 40 (2000) 151;
- [3] F. Deflorian, L. Fedrizzi, S. Rossi, Corrosion, 54, (1998), 598;
- [4] F. Deflorian, L. Fedrizzi, S. Rossi, P.L. Bonora, Journal of Coating Technology, 72 – 908 (2000);
- [5] K.N. Wernstahl, Polymer Degradation and Stability, 54 (1996), 57;
- [6] G. Wypych, Handbook of Material Weathering, ChemTec Publishing, Toronto, Canada.

A B S T R A C T

COMPARISON OF ACCELERATED TESTS AND NATURAL WEATHERING OF PROTECTIVE ORGANIC COATINGS: USE OF METEOROLOGICAL DATA

Key words: coating, corrosion, steel, materials characterisation

The protective properties of organic coatings for outdoor applications are generally evaluated by means of accelerated laboratory tests, including electrochemical techniques.

The coatings are stressed by different mechanical, chemical, thermal loads and the effects on the protective properties can be measured by using well established electrochemical techniques, like electrochemical impedance spectroscopy, electrochemical noise, etc.

An open question is how these accelerated tests can be correlated with natural exposure in different environments.

It is well known that many papers did not find any significant correlation between the natural exposure and different laboratory tests. This fact is due to many reasons, but one aspect very important is that the natural exposure is generally not sufficiently defined. The time of exposure (and the season) in a natural site is not sufficient to define the weathering, being the meteorological conditions variables considering different years.

In this paper we proposed a new different approach. The starting point is a very simple consideration. We can try to

define the natural weathering by considering a few different environmental parameters affecting the organic coatings properties: total amount of energy coming from UV radiation, time with relative humidity higher than a defined threshold (causing surface water condensation), environmental temperature higher than the polymer T_g, temperature range, etc.

In this way, by carefully monitoring these parameters, it is interesting to verify if a correlation exists with some artificial accelerated tests (UV exposure, thermal cycling, salt spray chamber, etc.).

This paper is a first attempt to apply this approach to a polyester coil coating for outdoor application.

We considered different times of natural exposure in Trento (alpine region, north of Italy), monitoring at the same time all the meteorological parameters (table 1).

The same coatings were tested in the laboratory using Electrochemical Impedance Spectroscopy, in order to quantify the damage, after some different accelerated tests: thermal cycling (figures 6 and 7), salt spray chamber (figures 8 and 9) and UV exposures (figures 2 and 3).

The results were compared with the impedance data measured after natural exposure (figures 2 and 3) and a correlation was investigated between the sum of the "natural stresses" and the sum of the "artificial stresses"

The first results are very interesting and encouraging future work using the same approach on different materials and comparing several natural sites of exposure.