

I METODI DI PROVA PER LA VALUTAZIONE DELLA DURABILITÀ DEI COMPONENTI EDILIZI

BRUNO DANIELIOTTI, Politecnico di Milano
FULVIO RE CECCONI, Politecnico di Milano
SONIA LUPICA SPAGNOLO, Politecnico di Milano
RICCARDO PAOLINI, Politecnico di Milano

SUMMARY

This contribution deals with a research activity about methods for durability assessment and Service Life Prediction of building components, which was undertaken by Politecnico di Milano in the early 90's (with Ministerial founded research programmes). Thereafter in 2006 the Italian standard UNI 11156 about durability assessment of building components was published (Politecnico di Milano coordinated the working group). Currently Politecnico di Milano takes part in CIB's commission W080 - Prediction of Service Life of Building Materials and Components and coordinates the Working Group 3 - Test methods for service life prediction, which is aiming for a state of the art of service life prediction methods, in order to achieve standardization for specific test methods (at the present time in ISO 15686 only general criteria are introduced). In this paper also three examples of experimental assessment of durability are provided: the first concerning paints and finishing systems for non load bearing walls, the second related to cementitious materials containing titanium dioxide and the third regarding ETICS (i.e. External Thermal Insulation Composite Systems with rendering, also known as EIFS).

1. INTRODUZIONE

Si presenta in questa sede l'attività di ricerca in corso presso il Politecnico di Milano relativamente alla definizione di metodi per la valutazione sperimentale della durabilità dei componenti edilizi. Questa attività di ricerca, iniziata negli anni '90 con alcuni progetti di ricerca finanziati dal Ministero, premiata dalla pubblicazione della norma UNI 11156:2006 *La valutazione della durabilità dei componenti edilizi* di cui il Politecnico di Milano era coordinatore, continua tutt'oggi anche con la partecipazione ai lavori della commissione W080 *Prediction of Service Life of Building Materials and Components* del CIB (*International Council for Research and Innovation in Building and Construction*) di cui, in particolare, il Politecnico di Milano coordina il gruppo di lavoro WG3 *Test methods for service life prediction*.

L'articolo presenta inoltre alcuni esempi presi tra gli esiti delle attività di ricerca condotte riguardanti i rivestimenti esterni per murature, i prodotti fotocatalitici ed i sistemi di isolamento esterno a cappotto.

2. LE METODOLOGIE DI PREVISIONE DELLA VITA UTILE

La previsione della vita utile di materiali e componenti edilizi è oggetto di ricerca da ormai parecchio tempo ed è passata attraverso alcuni momenti fondamentali per lo sviluppo dei metodi oggi conosciuti, tra questi si segnalano:

- "Service life prediction – A state of the art report" articolo pubblicato da Masters negli atti del 4° DBMC;
- "BS7543 Guide to durability of buildings and building elements, products and components" edita nel 1992 dal British Standards Institution;
- Edizione inglese della "Principal guide for service life planning of buildings" pubblicata nel 1993 a cura di Architectural Institute of Japan.

In particolare, l'edizione in lingua inglese della guida alla pianificazione della vita utile degli edifici è importante perché rende accessibile ad un vasto pubblico l'esperienza giapponese nel campo della pianificazione e programmazione della vita utile degli edifici che già all'epoca era notevole. I meriti principali della guida furono quelli di mettere in luce le problematiche correlate alla durabilità nelle diverse fasi del

processo edilizio, dalla pianificazione dell'intervento alla progettazione, alla costruzione ed esercizio sino ad arrivare alla demolizione o recupero. In questa guida si trova anche un metodo di previsione della vita utile molto simile a quello che è poi diventato il metodo più conosciuto per la previsione della vita utile: il metodo fattoriale standardizzato nella norma ISO 15686 "Service Life Planning".

Il metodo fattoriale consente di determinare la vita utile in condizioni di progetto correggendo la vita utile di riferimento (Reference Service Life - RSL) con sette fattori (generalmente compresi tra 0.8 e 1.2) che tengono conto delle condizioni particolari in cui il componente è utilizzato (qualità di produzione, progettazione e posa in opera, agenti sollecitanti, manutenzione programmata molto frequente, particolare cura dei dettagli costruttivi, ecc.). Il maggior pregio (e contemporaneamente il più grande limite) di tale metodo è la semplicità: esso risulta pertanto economicamente vantaggioso da applicare anche in progetti di piccole dimensioni, ma non quando sia necessaria la modellazione di fenomeni complessi quali quelli legati al degrado nel tempo dei materiali.

La formula normata per il calcolo della vita utile di progetto è la seguente:

$$ESL = RSL * A * B * C * D * E * F * G$$

I sette fattori correttivi sono i seguenti:

- A - Qualità del componente: tiene conto sia delle fasi di fabbricazione (presenza o meno di controlli in fase di produzione che assicurino la permanenza del livello qualitativo di progetto, sistemi qualità, ...) sia di quelle di trasporto e stoccaggio;
- B - Qualità di progettazione: con questo fattore si vuole tenere conto della cura con cui è stata progettato l'utilizzo del componente (ad esempio se sono stati previsti particolari ripari dagli agenti atmosferici);
- C - Qualità di esecuzione: considera gli aspetti legati alla qualità della manodopera (formazione in cantiere o abitudine alla tecnica di posa), delle condizioni climatiche durante la posa, e di tutto quello legato al cantiere;
- D - Ambiente interno: tiene conto dell'aggressività dell'ambiente interno (in pratica della possibilità di formazione di condensa);
- E - Ambiente esterno: tiene conto delle condizioni microclimatiche nelle vicinanze del componente, non solo agenti atmosferici ma anche altezza dell'edificio, aggetti, ecc.;
- F - Condizioni d'uso: tiene conto del tipo di utilizzo e del tipo di utenza (ad esempio la presenza frequente di bambini aumenta l'incidenza di rotture a seguito di uso improprio);
- G - Livello di manutenzione: tiene conto dell'influenza della manutenzione sulla durata del componente.

La vita utile di riferimento, definita come la vita utile dell'elemento tecnico prevista in definite condizioni d'uso di riferimento, può essere ricavata, ai sensi della parte 2 della norma ISO 15686, da indagini statistiche sul parco edilizio esistente, da indagini sperimentali in laboratorio e in esterno, oppure dai dati forniti da produttori.

3. LA SPERIMENTAZIONE PER LA DEFINIZIONE DELLA VITA UTILE IN CONDIZIONI DI RIFERIMENTO: ESEMPI DI APPLICAZIONE DEL METODO NORMATO

In Italia per la determinazione sperimentale della RSL di componenti edilizi si può fare riferimento al metodo presentato nella UNI 11156-3 e basato su quanto previsto nella ISO 15686-2, esso si articola come segue:

- *Definizione:* delle esigenze degli utenti, dei requisiti tecnologici caratterizzanti l'elemento tecnico, del contesto sollecitante (tipo e intensità degli agenti), delle prestazioni richieste, caratterizzazione dei materiali, ecc.

In questa prima fase, in particolare, si decide il livello di approfondimento dello studio stesso: i due livelli estremi sono lo studio specifico (in definite condizioni d'uso e ambientali) e lo studio generale (valido in differenti condizioni ambientali e di sollecitazioni d'uso). Si effettua poi la cosiddetta "caratterizzazione dell'elemento tecnico", attraverso la definizione delle caratteristiche funzionali degli elementi funzionali dell'elemento tecnico.

- **Preparazione:** identificazione dei meccanismi di degrado e degli effetti, scelta dei criteri di misura per le caratteristiche funzionali e le prestazioni tecnologiche, ricerca bibliografica, ecc.
Nel considerare gli agenti è opportuno affrontare lo studio secondo la cadenza logica “agente – azione – effetto” proposta dalla norma UNI 8290. Devono essere identificati tutti i possibili meccanismi di degrado dovuti agli agenti significativi individuati, che possono indurre variazioni significative delle prestazioni tecnologiche dell'elemento tecnico. Le azioni degli agenti possono essere identificate sulla base del comportamento chimico (ad esempio reazioni alcali aggregati, ossidazione, ecc.) e sul comportamento fisico (dilatazioni, fessurazioni, ecc.) dei componenti della soluzione tecnica.
Per le caratteristiche funzionali che possono essere soggette a decadimento prestazionale occorre individuare un valore critico, definire il metodo di misura e valutare l'intensità del decadimento prestazionale. A questo punto si sviluppano specifiche procedure di invecchiamento per simulare gli agenti sollecitanti individuati, facendo attenzione che i livelli di intensità di detti agenti simulati non siano tanto severi da provocare meccanismi di degrado non riscontrabili nella realtà.
- **Prove preliminari:** si testano le metodologie di prova e le tecniche di misura per le caratteristiche funzionali. Durante questa fase si misurano le prestazioni iniziali dell'elemento tecnico e si effettuano tutte quelle operazioni di taratura preventiva del programma sperimentale, al fine di limitare possibili imprevisti.
- **Esposizione e misura:** si svolgono i test d'invecchiamento, sia naturale che accelerato, ed in cui si misurano gli effetti degli agenti sui componenti edilizi (degradi).
Esistono diverse tipologie di esposizione in esterno:
 - su campioni di prova;
 - su edifici esistenti;
 - su edifici sperimentali.
 Le misurazioni devono avvenire ad intervalli temporali definiti secondo gli obiettivi di studio. Inoltre, vanno operate analisi non distruttive ad intervalli ravvicinati. L'esposizione deve proseguire fino al raggiungimento dei limiti prestazionali stimati corrispondenti alla fine della Vita Utile dell'elemento tecnico.
- **Analisi ed interpretazione dei risultati:** analizzando i risultati ottenuti con la sperimentazione (in termini di andamento delle prestazioni nel tempo), viene definita una Vita Utile per il componente, in determinate condizioni di sollecitazione assunte come riferimento (Reference Service Life).

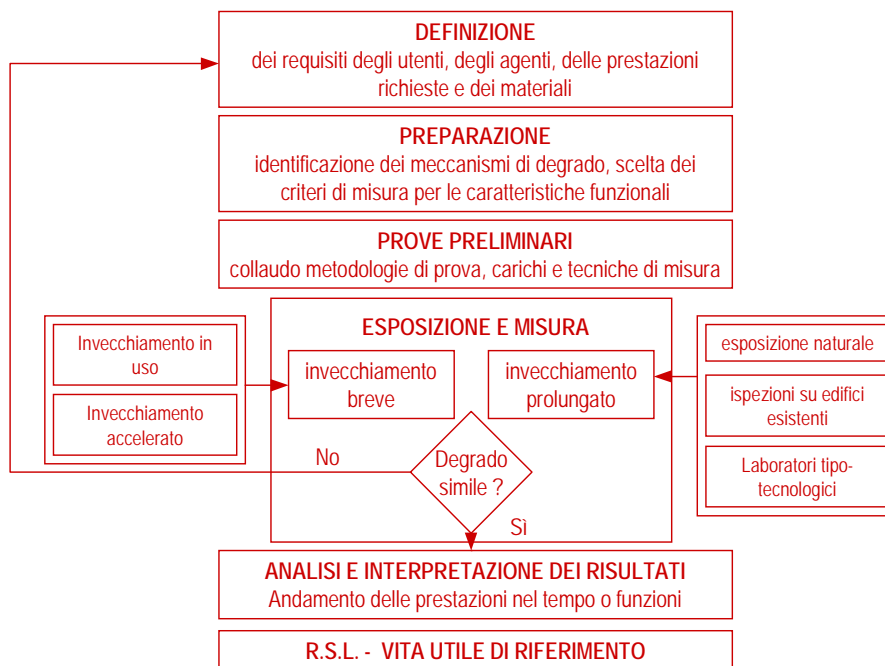


Figura 1. Il processo per la definizione della Vita Utile di Riferimento [UNI 11156-3]

2.1. IL PROGRAMMA SPERIMENTALE SUI RIVESTIMENTI ESTERNI PER MURATURE

Il programma sperimentale di valutazione della durabilità di rivestimenti per murature, che ha avuto inizio nel 1996 in collaborazione con il Laboratorio Tecnico Sperimentale della Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana di Lugano (CH), ha come oggetto di studio il doppio tavolato in laterizio con interposto l'isolante termico, con entrambe le superfici intonacate e con uno strato di pittura protettiva su quella esterna, soluzione tecnica che ancora oggi, continua ad essere tra le più utilizzate, in particolare nell'edilizia residenziale.

Si sono studiate alcune alternative significative di pitture protettive, ad alta e bassa concentrazione di resine acriliche e vinilversatiche. Nel corso degli anni si sono condotte sia prove di invecchiamento accelerato che prove in esterno di invecchiamento sul lungo termine in due contesti di sollecitazione reali: Milano e Lugano; si riporta, quindi, il confronto tra i risultati ottenuti nelle prove in laboratorio ed in quelle in esterno, confronto fatto al fine di ottenere il fattore di re-scaling temporale tra i due tipi di invecchiamento per la stima della Vita Utile di Riferimento, in particolare, del rivestimento protettivo esterno: i risultati ricavati dalle prove accelerate sono stati confrontati con quelli letti in ambiente naturale, in modo che la coincidenza degli effetti misurati portasse ad equivalenze tra durate accelerate e durate reali.

In una prima fase sperimentale si sono svolte prove in parallelo accelerate in ambiente condizionato di laboratorio e prove di esposizione ad invecchiamento naturale su campioni di "pacchetto parziale esterno", ovvero su provini costituiti dagli strati di finitura esterni su supporto in laterizio.

In questa fase si è scelto di considerare come variabile del sistema il grado di protezione ottenibile con le pitture, testando sia soluzioni non protette che soluzioni protette da pitture con diversa tipologia di resina e peso percentuale nella composizione del prodotto verniciante.

1.1.1 Le prove di laboratorio per l'invecchiamento accelerato

Sono stati inseriti nella cella climatica quattro campioni "pacchetto parziale esterno" alla volta, con la superficie esterna rivolta verso il centro della cella da dove avevano origine gli agenti del ciclo raggiunti i periodi di invecchiamento programmati, sottoponendoli ad una serie di cicli di invecchiamento accelerato.

Il ciclo a cui si sono sottoposti i provini possiede una durata complessiva di 6 ore e 25 minuti, comprensiva dei transitori ed è strutturato come segue:

FASE	Temperatura (°C)	Umidità relativa (%)	Durata (minuti)
Pioggia	20	95	60
Gelo	-20	95	90
Caldo Umido	55	95	60
Caldo Secco +UV	30	40	80

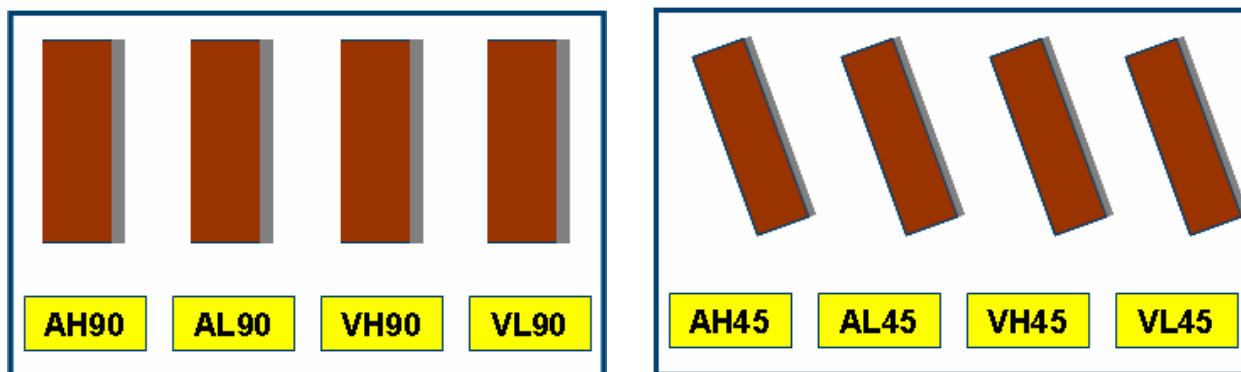
Tabella 1 - Composizione del ciclo di invecchiamento accelerato di laboratorio

Per monitorare il degrado nel tempo, i provini sono stati sottoposti sia al tempo zero che a successivi periodici step temporali a prove di caratterizzazione non distruttive: l'ispezione visiva dell'aspetto della pittura e, attraverso la pesatura, la misura della quantità di acqua residua; inoltre si sono eseguite prove distruttive al termine del periodo di invecchiamento su provini prelevati mediante carotaggio per determinare la resistenza a compressione dell'intonaco, l'adesione del sistema intonaco esterno - laterizio, la porosità dell'intonaco, e, per il sistema intonaco-pittura, l'assorbimento d'acqua, la resistenza alla diffusione del vapore e la microstruttura (con analisi al microscopio).

1.1.2 Le prove di invecchiamento in esterno

Gli stessi elementi testati nelle prove accelerate sono stati ricostruiti secondo le varie tipologie di pittura ed esposti verso Sud ad invecchiamento naturale in esterno sia a Milano che a Lugano, ambienti con condizioni climatiche simili ma con livelli di inquinamento diversi. Nel fare ciò si sono utilizzate due tipologie di inclinazione: quella verticale a 90° e quella inclinata a 45°, che, secondo normativa ISO dovrebbe portare ad accelerare l'invecchiamento esterno, variabile che quindi permetterebbe un confronto con i risultati delle prove accelerate molto prima di quanto si potrebbe fare con le prove ad inclinazione verticale.

Si sono testate, pertanto, le casistiche di provini mostrate in figura 2.



AH90 = Pittura acrilica con alto contenuto di resina (CVP¹40) inclinazione a 90°

AL90 = Pittura acrilica con basso contenuto di resina (CVP60) inclinazione a 90°

VH90 = Pittura vinilversatica con alto contenuto di resina (CVP40) inclinazione a 90°

VL90 = Pittura vinilversatica con basso contenuto di resina (CVP60) inclinazione a 90°

AH45 = Pittura acrilica con alto contenuto di resina (CVP40) inclinazione a 45°

AL45 = Pittura acrilica con basso contenuto di resina (CVP60) inclinazione a 45°

VH45 = Pittura vinilversatica con alto contenuto di resina (CVP40) inclinazione a 45°

VL45 = Pittura vinilversatica con basso contenuto di resina (CVP60) inclinazione a 45°

Figura 2 – Tipologie e configurazioni di provini esposti ad invecchiamento naturale in esterno.

Al fine di valutare lo sviluppo del degrado nel tempo per i diversi campioni si è definita una classificazione dei livelli di degrado attraverso una scala dimensionale (da 0 a 3) basata sull'analisi fotografica:

- DL0: film protettivo indenne e intatto
- DL1: fessurazioni localizzate o rigonfiamenti lacerati
- DL2: fitta rete di microcavillature, fessurazioni
- DL3: presenza molto estesa di bolle lacerate, distacchi e cristallizzazione salina della superficie

	VH 90	VL 90	AH 90	AL 90
2001	DL 0	DL 1	DL 0	DL 0
2003	DL 0	DL 2	DL 0	DL 0
2004	DL 1	DL 2	DL 0	DL 1
2005	DL 1	DL 3	DL 0	DL 1
2006	DL 1	DL 3	DL 0	DL 1

Tabella 2 - Scala dimensionale per il confronto dei livelli di degrado su provino a 90°.

	VH 45	VL 45	AH 45	AL 45
2001	DL 0	DL 1	DL 0	DL 0
2003	DL 0	DL 1	DL 0	DL 0
2004	DL 1	DL 2	DL 0	DL 1
2005	DL 1	DL 3	DL 1	DL 2
2006	DL 2	DL 3	DL 1	DL 2

Tabella 3 – Scala dimensionale per confronto dei livelli di degrado su provini a 45°.

Questo tipo di classificazione, oltre a consentire la comparabilità de degnadi nel tempo, potrà essere utilizzata per strumentare le schede diagnostiche finalizzate a definire le modalità d'ispezione di queste soluzioni tecniche.

¹ CVP: Concentrazione in Volume di Polveri, indica la quantità di cariche presenti nella pittura (il suo complemento a uno indica la concentrazione di resina). Ad esempio CVP40 significa che il 40% del volume è occupato dalle polveri, il 60% dalla resina, quindi la pittura sarà ad alto contenuto di resina.



Figura 3 - Assetto sperimentale delle prove in esterno.

Confrontando i livelli di degrado riscontrati nei vari anni nelle due località si ottengono le seguenti conclusioni:

- lo sviluppo del degrado per i campioni inclinati a 90° esposti a Milano e a Lugano risulta molto simile; l'unica differenza sostanziale riguarda i campioni VL90 rivestiti con pittura a basso contenuto di resina vinilversatica perchè si degradano più velocemente a Milano rispetto a Lugano;
- lo sviluppo del degrado si conferma più veloce per i campioni inclinati a 45° che per i campioni inclinati a 90°.

Per una più accurata valutazione ed interpretazione dei risultati delle prove in esterno, si sono inoltre confrontati i dati climatici delle due località (Milano e Lugano) durante gli anni di esposizione dei provini in esterno a partire dal 1999, osservando in estrema sintesi che a Lugano risulta superiore la quantità di pioggia, mentre a Milano si hanno più alti livelli di inquinamento (PM10, SO₂ e NO₂), di energia solare incidente giornaliera e di temperatura media.

Da queste indicazioni relative agli agenti sollecitanti e dalle modalità di degrado, si può pertanto ipotizzare che le pitture vinilversatiche subiscono un degrado maggiore a Milano a causa, innanzitutto, delle azioni termiche ed in secondo luogo dell'attacco chimico dovuto agli agenti inquinanti (fenomeno ancora da valutare quantitativamente).

1.1.3 Il confronto tra i risultati ottenuti con i due tipi di invecchiamento: la valutazione della Vita Utile di Riferimento

Il confronto tra i risultati delle prove di invecchiamento accelerato e di invecchiamento in esterno, mediante l'analisi visiva ed al microscopio dei degradi sulla superficie esterna, nonché mediante la misura del decadimento prestazionale del grado protettivo all'acqua, ha consentito di valutare la Vita Utile di Riferimento per le pitture considerate.

In particolare nel caso dei campioni rivestiti da pitture con alto contenuto di resine vinilversatiche in laboratorio dopo 150 cicli ed esposti in esterno dopo 4 anni di invecchiamento naturale, si ottengono gli stessi livelli di degrado con presenza molto estesa di bolle lacerate e distacchi. Il fattore di time-rescaling per le pitture a base di resine vinil-versatiche è stato quindi valutato in 4 anni in esterno equivalenti a 150 cicli di invecchiamento accelerato².

² Daniotti, Iacono, Evaluating the Service Life of External Walls: a Comparison between Long-Term and Short-Term Exposure, 10DBMC International Conférence, LYON [France] 2005

La valutazione del decadimento prestazionale relativa al grado protettivo all'acqua del rivestimento esterno è stata effettuata la misura dell'assorbimento d'acqua dapprima sui provini con pittura ed in un secondo momento sugli stessi provini senza lo strato di pittura. Il grado protettivo è stato quindi valutato come differenza tra i due valori di assorbimento misurati e il valore di assorbimento dell'intonaco non protetto.

Dai risultati sperimentali effettuati alla fine dei 4 anni d'invecchiamento in esterno e dopo 150 cicli di invecchiamento accelerato in laboratorio emerge che, mentre i provini protetti da pittura acrilica mostrano ancora un grado protettivo rilevante, al contrario i provini protetti da pittura vinilversatica, hanno perso completamente le loro caratteristiche prestazionali relative al grado protettivo all'acqua e si può quindi concludere che hanno raggiunto la fine della vita utile.

Si può quindi sinteticamente concludere che:

- le pitture acriliche mostrano un miglior grado protettivo rispetto a quelle vinilversatiche;
- un alto contenuto di resina assicura una maggior protezione all'acqua;
- le prove di laboratorio sui campioni rivestiti da pittura a base di resine vinilversatiche (ed in particolare a basso contenuto di resina) hanno stabilito che tale pittura termina la sua vita utile, dopo 4 anni di esposizione in esterno, corrispondenti a 150 cicli di invecchiamento accelerato in laboratorio.

2.2. IL PROGRAMMA SPERIMENTALE SUI PRODOTTI FOTOCATALITICI

I materiali fotocatalitici per uso edile rappresentano uno dei più interessanti sviluppi apparsi nel settore in questi ultimi anni. Questa nuova tecnologia, oggetto di numerosi programmi di ricerca e sviluppo in tutto il mondo, permette di ottenere alcune prestazioni quali l'autopulizia, la rimozione di alcuni inquinanti dall'aria ambientale e l'autodisinfezione da contaminanti batterici: tali materiali hanno, infatti, la capacità di utilizzare l'energia luminosa (solare o artificiale) per attivare reazioni chimiche di ossidazione che portano all'eliminazione di composti inquinanti adsorbiti dalla superficie, permettendo quindi di rimuovere sostanze inquinanti dall'aria evitando, inoltre, l'accumulo di composti organici che sono causa del progressivo annerimento dei manufatti architettonici esposti agli ambienti urbani.

Come tutti i materiali innovativi, oltre a studiare le prestazioni al tempo zero, occorre conoscerne il comportamento nel tempo e definirne una Vita Utile: con questo fine, il gruppo durabilità del BEST ha recentemente condotto un programma di valutazione sperimentale della Vita Utile di alcune tipologie di prodotti fotocatalitici ed, in particolare, delle pitture addittivate con biossido di titanio, tenendo a tal fine come riferimento gli studi sopra riportati effettuati sulle pitture a base acrilica e vinilversatica: tale scelta è stata effettuata per economicità di tempo potendo far valere il re-scaling temporale effettuato in tale sede che ha necessitato di un'esposizione di campioni in esterno di più di 4 anni.

La sperimentazione ha come scopo quello di monitorare nel tempo il decadimento delle proprietà fisiche dei provini oggetto di studio, valutandone in particolare non solo l'integrità, ma anche la variazione colorimetrica, caratteristiche entrambe che compromettono la capacità fotocatalitica del provino stesso.

Il ciclo di invecchiamento ipotizzato è strutturato come segue, diviso in due sottocicli, per evitare una drastica diminuzione della vita utile della lampada UV, dovuta all'esposizione a basse temperature.

n.	Fase	T _{aria} [°C]	T _{H2O} [°C]	UR[%]	Durata [min]
1	Pioggia	20	15-20	---	60
2	Gelo	-20	---	---	90
3	Caldo umido	55	---	95	60
4	Caldo secco senza UV	70	---	40	80

Tabella 4 - Specifiche del sottociclo "A"

n.	Fase	T _{aria} [°C]	T _{H2O} [°C]	UR[%]	Durata [min]
1	Irraggiamento UV	30	---	40	80

Tabella 5 – Specifiche del sottociclo "B"

La durata complessiva teorica del sottociclo A risulta quindi essere di 4h e 50 minuti, mentre per il sottociclo B, essendo composto dalla sola fase di irraggiamento UV, coincide con la durata della fase stessa (80 minuti). Nella fase di collaudo dei cicli impostati nei piani operativi, si è verificata la durata reale del ciclo stesso, comprensiva dei transitori, pari in media a 6 ore e 11 min.

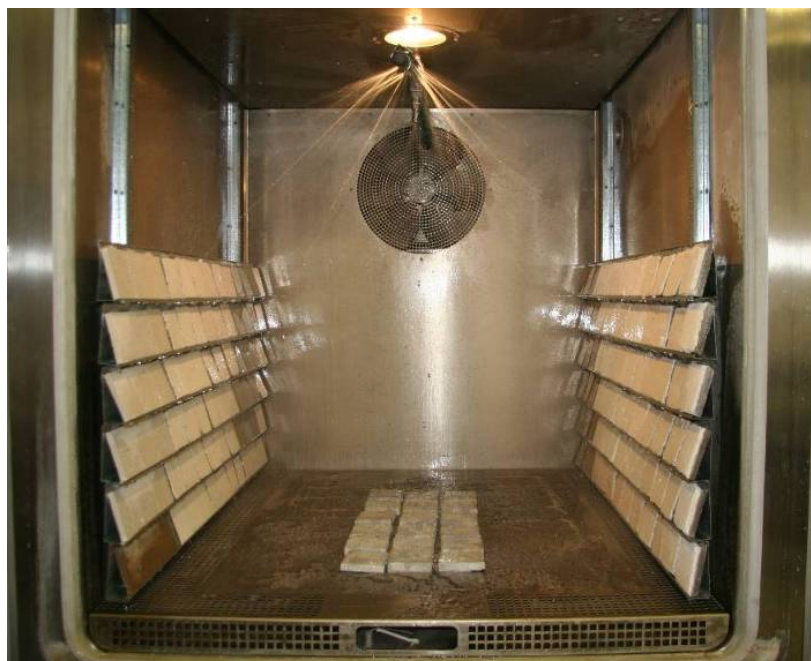


Figura 4 – Assetto sperimentale delle prove accelerate in camera climatica

Si è deciso di sottoporre ogni tipologia di provini ad un massimo di 300 cicli di esposizione: ad intervalli regolari (e precisamente ogni 50 cicli) sono stati prelevati n° 3 campioni per ogni tipologia dalla camera climatica per valutarne lo stato di degrado ed il decadimento dei livelli prestazionali.

A seguito dei cicli di invecchiamento le considerazioni più rilevanti sono qui di seguito brevemente riassunte.

- Già dopo i primi 50 cicli di invecchiamento, i provini pitturati tendono all'ingiallimento, specie se il supporto è in vetroresina.

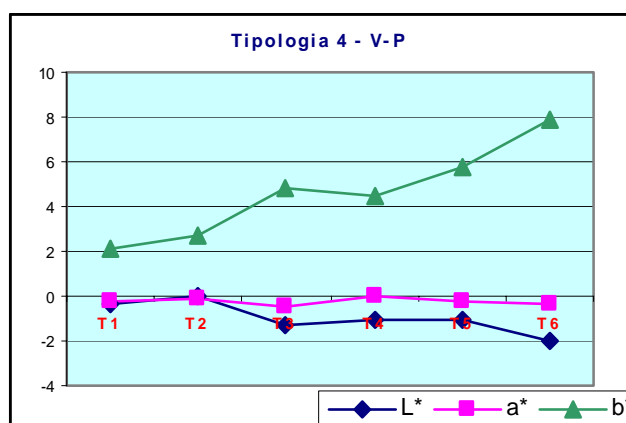


Figura 5 – Andamento delle componenti colorimetriche nei provini in vetroresina rivestito di pitture fotocatalitiche

L'ingiallimento e la perdita di luminosità sono proporzionali all'invecchiamento: anche nel rilievo fotografico si nota un progressivo intensificarsi del giallore diffuso, probabilmente dovuto ad un assottigliamento dello strato protettivo con conseguente "emersione" del colore del supporto stesso (la

vetroresina). D'altra parte, i provini in vetroresina pitturati con materiali fotocatalitici mostrano una maggior resistenza meccanica dello strato di pittura con solo in alcuni casi fenomeni di distacco locale.

- Tra tutti i provini pitturati, si riscontra un miglior comportamento nel tempo dei provini in cui la pittura è preceduta da uno strato di primer. In particolare, alcuni provini senza strato di primer mostrano già dopo i primi 50 cicli dei distacchi vistosi dello strato di pittura.



Figura 6 – Degrado del provino senza strato di primer dopo i primi 50 cicli³

- Il degrado nei provini inizia in generale nella parte inferiore degli stessi, fenomeno che fa concentrare l'attenzione sull'azione sollecitante dell'accumulo d'acqua.

Appare importante, da ultimo, sottolineare come l'utilizzo di provini di piccole dimensioni abbia contribuito ad un incremento delle azioni sollecitanti degli agenti climatici prevalentemente lungo bordi dei provini stessi, effetto che per essere tenuto in debita considerazione, necessita di uno studio anche su campioni di maggiori dimensioni nonché mediante un parallelo monitoraggio di applicazioni reali.

2.1. IL PROGRAMMA SPERIMENTALE SUI SISTEMI DI ISOLAMENTO TERMICO A CAPPOTTO

Il programma sperimentale di valutazione della durabilità di sistemi di isolamento termico dall'esterno con intonaco sottile su isolante (ossia sistemi a cappotto, in Europa noti come ETICS ovvero External Thermal Insulation Composite Systems with rendering) ha avuto inizio nel 2003 ed ha sia scopi specifici (sostanzialmente la valutazione del decadimento prestazionale e dello sviluppo di degradi) sia metodologici (ovvero lo sviluppo di metodologie di valutazione della durabilità con riferimento a più prestazioni mutuamente influenzate). Il programma sperimentale nel suo complesso include invecchiamento accelerato in laboratorio (ottenuto con una camera climatica che riproduce un ciclo dimensionato ad hoc), invecchiamento a lungo termine in esterno (in campo di esposizione in prossimità di una stazione climatica) ed ispezioni in-situ su edifici reali.

Sono state previste quattro tipologie di provini con supporto in muratura (rasatura a gesso, intonaco interno, laterizi forati da 12 cm, intonaco di regolarizzazione), polistirene espanso come isolante (EPS 150 pannelli da 6 cm tassellati ed incollati con lo stesso prodotto utilizzato per la malta rasante) e malta rasante (di spessore 5 mm) con aggiunta in resina: per due campioni con resina vinilica e per altri due campioni con resina acrilica. Su queste due tipologie una ulteriore differenziazione è stata operata in base alla finitura: pittura acrilica (CVP 45) o RPAC (Rivestimento Plastico ad Applicazione Continua, sempre con legante acrilico). Entrambe le finiture hanno colore rosso ed assorbanza solare $\alpha = 0.6$. Per le prove di laboratorio, per ogni tipologia, sono previsti due set di campioni (uno da invecchiare ed uno da utilizzare come riferimento per la caratterizzazione) composti ciascuno da:

- 1 provino di un metro quadro (giunto di isolante a T, completo di profili e paraspigoli). Il provino da invecchiare viene applicato come sportello della camera climatica;
- Provini di piccole dimensioni (quelli da invecchiare posizionati all'interno della camera climatica):
 - 1 set di 3 provini (200 x 200 mm) per la misura dell'assorbimento capillare ad immersione parziale
 - 1 set di 3 provini (200 x 200 mm) per la prova di adesione della finitura all'isolante;

³ B. Daniotti, S. Lupica Spagnolo, "Relazione sul programma sperimentale di invecchiamento accelerato prodotti fotocatalitici", 14 dicembre 2007.

- 1 set di 5 provini (5000 mm² ciascuno) per la misura della permeabilità al vapore acqueo;
- 1 set di 3 provini (strisce di 600 mm x per 100 mm) per la prova di resistenza a trazione della malta rasante.

Sul provino da un metro quadrato, vengono posizionati sensori di temperatura e umidità relativa in tre posizioni (sulla superficie interna, fra isolante e supporto murario e sulla superficie esterna) ed in modo tale da realizzare tre profili (sezione corrente, sul giunto fra i pannelli di isolante e sul giunto di malta). In sezione corrente (sul lato interno) è applicato anche un termo-flussimetro. L'invecchiamento accelerato in laboratorio viene ottenuto con l'esposizione a cicli dimensionati sulla base di un'analisi dei dati climatici (vedi Daniotti *et al.* 2008) del contesto di riferimento (Milano), grazie alla quale è stato individuato un rapporto fra cicli in regime estivo e cicli in regime invernale pari a 2.5.

I UV		Camera climatica				Laboratorio		Durata [min]
n°	Fase	T _{aria} [°C]	T _{sup} [°C]	T _{H2O} [°C]	UR[%]	T _{op,i} [°C]	UR[%]	
1	UV	35	-	-	15 ± 2	26 ± 3	60 ± 5	60
Durata totale del ciclo in condizioni estive (transitori esclusi) [h]								1
Durata totale del ciclo in condizioni estive (transitori stimati inclusi) [h]								1
II Estivo		Camera climatica				Laboratorio		Durata [min]
n°	Fase	T _{aria} [°C]	T _{sup} [°C]	T _{H2O} [°C]	UR[%]	T _{op,i} [°C]	UR[%]	
1	Caldo secco	70 ± 5	70 ± 5	-	15 ± 2	26 ± 3	60 ± 5	60
2	Pioggia	20	-	20	100	26 ± 3	60 ± 5	60
Durata totale del ciclo in condizioni estive (transitori esclusi) [h]								2
Durata totale del ciclo in condizioni estive (transitori stimati inclusi) [h]								3
III Invernale		Camera climatica				Laboratorio		Durata [min]
n°	Fase	T _{aria} [°C]	T _{sup} [°C]	T _{H2O} [°C]	UR[%]	T _{op,i} [°C]	UR[%]	
1	Pioggia	5 ± 1	-	5 ± 1	100	19 ± 2	60 ± 5	60
2	Gelo	-20 ± 2	-	-	-	19 ± 2	60 ± 5	180
3	Caldo inv.	30 ± 2	-	-	50 ± 2	19 ± 2	50 ± 5	60
Durata totale del ciclo in condizioni invernali (transitori esclusi) [h]								5
Durata totale del ciclo in condizioni invernali (transitori stimati inclusi) [h]								6

Tabella 6 – Cicli base di invecchiamento per ETICS (in grassetto i valori di set point).

I cicli di base (vedi tabella 6) vengono ripetuti in sequenze - 5 x (25 UV + 10 cicli invernali + 25 cicli estivi) – in modo tale da comporre macro-cicli (indicati come tempo di invecchiamento T). Prima dell'esposizione all'invecchiamento accelerato e ad ogni macro-ciclo vengono eseguite (secondo la sequenza indicata) le seguenti prove non distruttive:

- Rilievo fotografico dei degradi (in posizioni fissate);
- Misura dell'assorbimento d'acqua a bassa pressione (metodo di Karsten);
- SINa – regime variabile estivo. La forzante è un'onda sinusoidale che riproduce l'andamento della temperatura dell'aria esterna. Si ricavano fattore di attenuazione e sfasamento;
- SINb – regime variabile estivo. La forzante è un'onda sinusoidale che riproduce l'andamento della temperatura aria-sole. Si ricava lo sfasamento in condizioni reali (non il fattore di attenuazione poiché l'onda non risulta simmetrica, ma composizione di più armoniche);
- TI – Regime variabile invernale: inerzia termica. Forzante composta da tre gradini di 24 ore ciascuno (T = + 20[°C], + 70[°C], + 20[°C]) con umidità relativa costante (RH = 50%). Si ricavano le costanti di tempo;
- CON + IRT – regime stazionario (forzante T = -20[°C]): misura conduttanza e termografia all'infrarosso. Si ricavano la resistenza termica in sezione corrente e la differenza delle temperature in corrispondenza dei ponti termici;
- RHst – valutazione del tempo di stabilizzazione dell'umidità relativa (ultimo segmento di pioggia) nella finitura.

Prove distruttive sono invece eseguite sui provini di caratterizzazione (non invecchiati) ed alla fine dell'esposizione all'invecchiamento accelerato (sui piccoli provini e su carote dai provini di 1 m²). Queste prove comprendono:

- analisi microscopica dei degradi
- assorbimento capillare per immersione parziale [UNI EN ISO 15148]
- permeabilità al vapore acqueo [UNI EN 12086]
- resistenza dell'adesione del collante e della malta rasante all'isolante [UNI EN 13494]
- resistenza a trazione della malta rasante [ETAG 004 - § 5.5.4.1]

I primi risultati (inerenti il primo provino sottoposto ad invecchiamento della tipologia con malta rasante con aggiunta in resina vinilica ed RPAC come finitura) riguardano il decadimento della resistenza termica, lo sviluppo di ponti termici in corrispondenza dei giunti fra i pannelli e lo sviluppo di degradi (evidentemente bolle e dilavamento) sul rivestimento plastico ad applicazione continua. Si presentano in tabella 7 i valori numerici misurati al tempo zero (provino non invecchiato), dopo due macro-cicli di invecchiamento ed al secondo macro-ciclo dopo esposizione ad un ciclo di pioggia. Si apprezza un decadimento della resistenza termica di circa il 10% in sezione corrente (mentre sul giunto dei pannelli si possono osservare decadimenti maggiori, ma più complessi da caratterizzare). Il decadimento è imputato eminentemente all'isolante, in ragione di un aumento del contenuto d'acqua dovuto all'assorbimento che si verifica durante i cicli di pioggia da parte dello strato di finitura (malta rasante ed RPAC). Si ha poi (in funzione dell'assorbimento capillare, di fenomeni diffusivi e della gravità) una redistribuzione dell'acqua che si accumula negli sezioni più esterne dell'isolante. L'isolante può inoltre accumulare una quantità d'acqua maggiore al procedere dell'invecchiamento poiché durante i cicli di gelo – disgelo si ha un aumento della dimensione dei pori. Dopo il ciclo T1 si sono inoltre sviluppate bolle in conseguenza degli eventi di shock termico, che hanno dato luogo ad una deformazione plastica della finitura. L'attività futura riguarderà l'esposizione di provini in esterno, il confronto fra i degradi ottenuti in laboratorio ed in esterno e quindi la determinazione del valore dei cicli in anni.

Proprietà		T0	T1	T2	T2+	u.m.
Resistenza termica supporto	$R_{cd\ 12}$	0.376	0.346	0.344	0.334	[m ² K/W]
Resistenza termica ETICS	$R_{cd\ 23}$	1.725	1.684	1.640	1.553	[m ² K/W]
Resistenza conduttiva totale	$R_{cd\ TOT}$	2.100	2.030	1.984	1.887	[m ² K/W]
Conduttanza	Λ	0.476	0.493	0.504	0.530	[W/(m ² K)]
Resistenza termica totale	R_{TOT}	2.270	2.200	2.154	2.057	[m ² K/W]
Trasmittanza	U	0.440	0.455	0.464	0.486	[W/(m ² K)]
Capacità termica supporto	C_{12}	162.9	165.4	168.0	177.5	[kJ/(m ² K)]
Capacità termica ETICS	C_{23}	18.7	19.0	19.9	21.3	[kJ/(m ² K)]
Capacità termica totale	C_{TOT}	181.6	184.5	187.8	198.8	[kJ/(m ² K)]

Tabella 7 – Variazione delle proprietà al procedere dell'invecchiamento (per ETICS si intende solo isolante e finitura, mentre per supporto si intende l'insieme di muratura ed intonaci).

4. LA RICERCA SUI METODI DI VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELLA DURABILITA': UNO STATO DELL'ARTE NAZIONALE ED INTERNAZIONALE

Le attività sperimentali presentate rientrano nei programmi di collaborazione nazionale ed internazionale che il Politecnico di Milano ha sviluppato e coordinato in questi anni:

1) Network italiano di ricerca sulla valutazione sperimentale della durabilità. Il programma di ricerca scientifica di rilevante interesse nazionale cofinanziato dal Ministero dell'Istruzione "Metodologie di progettazione e di valutazione della durabilità dei componenti edilizi in processi di produzione sostenibili: valutazione sperimentale di durabilità standard e loro correzioni per l'impiego del componente in specifiche condizioni di utilizzo finalizzate alla programmazione della manutenzione degli edifici" ha favorito lo sviluppo di un network di ricerca tra alcune delle principali università e politecnici italiani che ha portato, tra l'altro, alla pubblicazione di una serie di volumi sulla previsione della vita utile di componenti edilizi tra cui si segnalano:

- La valutazione della durabilità di pareti perimetrali verticali non portanti;

- Valutazione sperimentale della durabilità di coperture discontinue. Un'applicazione al pannello sandwich;
- La durabilità delle coperture continue;
- La valutazione di durabilità degli infissi esterni e delle pitture murali in esterno;
- La valutazione del decadimento prestazionale di componenti edilizi tipici del contesto mediterraneo.

2) **CIB W80 WG3 Status Report**, il Dipartimento BEST del Politecnico di Milano, nell'ambito delle sua attività di coordinamento del gruppo di lavoro WG3 "Test methods for service life prediction" è stato incaricato di curare la redazione di un rapporto che illustri lo stato dell'arte dei metodi sperimentali di previsioni della vita utile. Tale rapporto è previsto in uscita per la fine dell'anno.

5. CONCLUSIONI E PROSPETTIVE DI SVILUPPO

Nel paper si sono presentati i risultati delle attività di ricerca in corso presso il Politecnico di Milano, sulla definizione di metodi per la valutazione sperimentale della durabilità dei componenti edilizi.

Queste ricerche sono state sviluppate nell'ambito di reti di collaborazione a livello nazionale ed internazionale ed hanno portato ad una serie di sviluppi ed importanti pubblicazioni.

Gli sviluppi che si possono prevedere circa queste attività di ricerca, riguarderanno:

- Il confronto tra i metodi ed i risultati sperimentali tra i gruppi di ricerca a livello internazionale, che si stanno occupando delle stesse tecnologie, con auspicabili collaborazioni di ricerca;
- L'implementazione dello stato dell'arte internazionale sui metodi di prova con il contributo dei gruppi di ricerca che hanno partecipato al programma nazionale di ricerca;
- Lo sviluppo di nuovi metodi per la valutazione della vita utile, riferiti ad altre tecnologie;
- Lo sviluppo di metodi di valutazione della durabilità basati su dati ricavati da edifici reali,
- Lo sviluppo di nuove norme che tengano conto dei risultati ottenuti nelle ricerche, sia a livello nazionale UNI, che internazionale ISO.

6. BIBLIOGRAFIA

- [01] **AA.VV.** "La durabilità dei componenti edilizi. The durability of building components" (2008) Editecnica
- [02] **G. ALAIMO** a cura di, "Valutazione sperimentale della durabilità di coperture discontinue. Un'applicazione al pannello sandwich", (2006) Editecnica
- [03] **B. DANIOTTI, S. LUPICA SPAGNOLO**, "Service Life Prediction Tools for buildings' design and management", in atti del convegno "11DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components", Istanbul, Turkey, 2008.
- [04] **B. DANIOTTI, S. LUPICA SPAGNOLO**, "Climatic comparison to analyse different degradation levels in external walls' outdoor exposure", in atti del convegno "11DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components", Istanbul, Turkey, 2008.
- [05] **B. DANIOTTI, S. LUPICA SPAGNOLO, J. HANS, J. CHORIER**, "Service Life Estimation using Reference Service Life Databases and Enhanced Factor Method", in atti del convegno "11DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components", Istanbul, Turkey, 2008.
- [06] **B. DANIOTTI, R. PAOLINI**, "Experimental Programme to Assess ETICS Cladding Durability" in atti del convegno "11DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components", Istanbul, Turkey, 2008.

- [07] **B. DANIOTTI, R. PAOLINI**, “Evolution of Degradation and Decay in Performance of ETICS” in atti del convegno “11DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components”, Istanbul, Turkey, 2008.
- [08] **B. DANIOTTI, S. LUPICA SPAGNOLO, R. PAOLINI**, “Climatic Data Analysis to Define Accelerated Ageing for Reference Service Life Evaluation” in atti del convegno “11DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components”, Istanbul, Turkey, 2008.
- [09] **B. DANIOTTI, S. LUPICA SPAGNOLO, F. RE CECCONI**, “La valutazione della durabilità dei componenti edilizi: la sperimentazione per la definizione della Vita Utile”, Rivista del Consulente Tecnico n° 2-2008.
- [10] **B. DANIOTTI, S. LUPICA SPAGNOLO**, “Service life prediction for buildings’ design to plan a sustainable building maintenance”, in atti del convegno “SB07 Sustainable construction, materials and practices”, Lisbon, Portugal, 2007.
- [11] **B. DANIOTTI, S. LUPICA SPAGNOLO, F. RE CECCONI**, “La valutazione della durabilità dei componenti edilizi”, Rivista del Consulente Tecnico n° 3-2007, pagg. 18-26.
- [12] **B. DANIOTTI** a cura di, “La valutazione della durabilità di pareti perimetrali verticali non portanti”, (2006) Editecnica
- [13] **L. MORRA** a cura di, “La valutazione della durabilità degli infissi esterni e delle pitture murali in esterno”, (2006) Editecnica
- [14] **M. NICOLELLA** a cura di, “La durabilità delle coperture continue”, (2006) Editecnica
- [15] **R. CAPONETTO**, “La valutazione del decadimento prestazionale di componenti edili tipici del contesto mediterraneo”, (2006) Editecnica
- [16] **ISO 15686-1:2000**: “Building and constructed assets – Service life planning: General principles”
- [17] **ISO 15686-2:2001**: “Building and constructed assets – Service life planning: Service life prediction procedures”
- [18] **UNI 8290-1:1981**: “Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia”
- [19] **UNI 11156-1:2006** “La valutazione della durabilità dei componenti edilizi – Terminologia e definizione dei parametri di valutazione”
- [20] **UNI 11156-2:2006** “La valutazione della durabilità dei componenti edilizi – Metodo per la valutazione della propensione all’affidabilità”
- [21] **UNI 11156-3:2006** “La valutazione della durabilità dei componenti edilizi – Metodo per la valutazione della durata (Vita Utile)”

Contatti autori:

Bruno Daniotti: bruno.daniotti@polimi.it

Fulvio Re Cecconi: fulvio.receconi@polimi.it

Sonia Lupica Spagnolo: sonia.lupica@polimi.it

Riccardo Paolini: ric.paolini@gmail.com