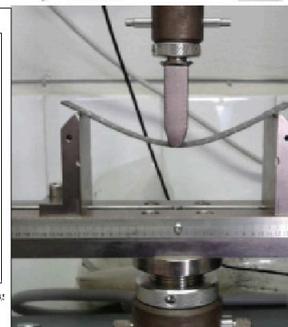
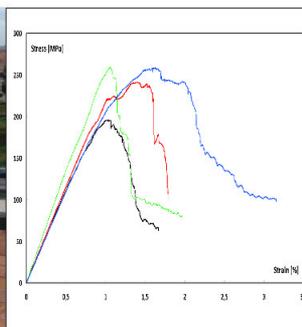
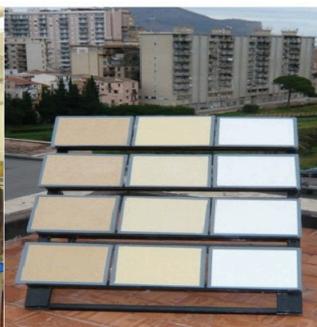


Giuseppe Alaimo - Daniele Enea

# La qualità tecnologica utile di prodotti edilizi innovativi



politecnica

**MAGGIOLI  
EDITORE**

# La qualità tecnologica utile di prodotti edilizi innovativi

**Giuseppe Alaimo – Daniele Enea**

  
**MAGGIOLI  
EDITORE**

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO  
DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA

Volume pubblicato con contributi di ricerca scientifica d' Ateneo:

- ex 60% 2007: *La durabilità di sistemi misti in legno lamellare e acciaio;*
- FFR 2012-2013: *Analisi sul campo del patrimonio edilizio pubblico di Palermo e implementazione di una banca dati per la valutazione della durabilità di componenti edilizi anche innovativi.*

Responsabile: Prof. Giuseppe Alaimo

ISBN 978-88-387-6291-8

© Copyright 2014 by Maggioli S.p.A.

È vietata la riproduzione, anche parziale, con qualsiasi mezzo effettuata, anche ad uso interno e didattico, non autorizzata.

**Maggioli Editore è un marchio di Maggioli S.p.A.**

**Azienda con sistema qualità certificato ISO 9001:2000**

*47822 Santarcangelo di Romagna (RN) • Via del Carpino, 8*

*Tel. 0541/628111 • Fax 0541/622595*

[www.maggioli.it/servizioclienti](http://www.maggioli.it/servizioclienti)

e-mail: [clienti.editore@maggioli.it](mailto:clienti.editore@maggioli.it)

Diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica, di riproduzione e di adattamento, totale o parziale con qualsiasi mezzo sono riservati per tutti i Paesi.

L'editore rimane a disposizione degli aventi diritto per eventuali fonti iconografiche non identificate

Il catalogo completo è disponibile su [www.maggioli.it](http://www.maggioli.it) area università

Finito di stampare nel mese di gennaio 2014  
da DigitalPrint Service s.r.l. – Segrate (Milano)

## INDICE

INTRODUZIONE	pag. 5
1 DALLA QUALITÀ EDILIZIA ALLA DURABILITÀ	pag. 9
1.1 La qualità edilizia	pag. 9
1.1.1 La qualità del prodotto	pag. 11
1.1.2 La qualità del progetto	pag. 16
1.1.3 La qualità del processo	pag. 18
1.2 La durabilità	pag. 19
2 METODI PER LA VALUTAZIONE DELLA DURABILITÀ	pag. 28
2.1 Le ultime novità in ambito normativo	pag. 28
2.2 La previsione della vita utile dei componenti edilizi	pag. 32
2.3 La propensione all'affidabilità	pag. 45
2.4 Dalla durabilità alla programmazione della manutenzione	pag. 47
3 L'ATTIVITÀ SPERIMENTALE	pag. 55
3.1 La metodologia di valutazione della vita utile	pag. 55
3.1.1 L'approccio metodologico della norma ISO 15686	pag. 55
3.1.2 Lo studio dei fattori climatici del contesto di Palermo	pag. 55
3.1.3 La messa a punto del ciclo di invecchiamento accelerato	pag. 56
3.1.4 La strumentazione per le prove di invecchiamento	pag. 57
4 I MATERIALI CEMENTIZI FOTOCATALITICI	pag. 60
4.1 L'inquinamento ambientale	pag. 60
4.2 La fotocatalisi eterogenea	pag. 62
4.3 Meccanismi di foto-riduzione degli inquinanti atmosferici	pag. 65
4.4 Proprietà delle superfici trattate con foto-catalizzatori	pag. 65
4.5 Le due linee di ricerca sperimentale	pag. 67
4.6 I parametri indagati e le strumentazioni	pag. 67
4.6.1 L'attività fotocatalitica	pag. 67
4.6.2 Il colore	pag. 69
4.6.3 L'aspetto superficiale	pag. 76
4.7 La preparazione dei campioni di prova	pag. 79
4.7.1 Gli intonaci fotocatalitici	pag. 79
4.7.2 La pittura fotocatalitica	pag. 81
4.8 La disposizione dei campioni nelle camere di invecchiamento	pag. 83
4.9 Analisi ed interpretazione dei risultati sperimentali	pag. 84
4.9.1 Gli intonaci fotocatalitici	pag. 84
4.9.2 La pittura fotocatalitica	pag. 94
5 GLI INTONACI SILOSSANICI	pag. 102
5.1 I polimeri silossanici	pag. 102
5.2 La struttura dei polimeri silossani	pag. 102
5.3 La struttura dei polimeri acrilici	pag. 103
5.4 La resina acril-silossanica	pag. 104

5.5 I requisiti più significativi	pag. 105
5.5.1 L'idrorepellenza e l'autopulizia	pag. 105
5.5.2 La permeabilità al vapor d'acqua	pag. 106
5.5.3 Protezione dagli agenti chimici e dai sali	pag. 106
5.6 La Normativa di riferimento per le pitture	pag. 106
5.6.1 L'assorbimento d'acqua	pag. 107
5.6.2 La permeabilità al vapore	pag. 107
5.6.3 L'assorbimento d'acqua e la permeabilità	pag. 108
5.6.4 Protezione all'acqua dei rivestimenti	pag. 109
5.6.5 Le emissioni di COV	pag. 110
5.7 La normativa di riferimento per i rasanti	pag. 111
5.7.1 La permeabilità al vapore	pag. 111
5.7.2 L'assorbimento d'acqua	pag. 111
5.8 La ricerca sperimentale	pag. 111
5.9 I parametri indagati e le strumentazioni	pag. 111
5.9.1 L'angolo di contatto	pag. 111
5.9.2 L'assorbimento d'acqua	pag. 114
5.10 La preparazione dei campioni di prova	pag. 115
5.11 La disposizione dei campioni nella camera climatica	pag. 116
5.12 Il monitoraggio del caso-studio a Palermo	pag. 117
5.13 Analisi ed interpretazione dei risultati sperimentali	pag. 119
<b>6 I MATERIALI COMPOSITI A BASE DI FIBRE DI BASALTO</b>	<b>pag. 155</b>
6.1 Il basalto	pag. 155
6.2 Le resine epossidiche	pag. 158
6.3 Il laminato composito	pag. 159
6.4 La ricerca sperimentale	pag. 159
6.5 I parametri indagati e le strumentazioni	pag. 160
6.6 La preparazione dei campioni di prova	pag. 160
6.6.1 I laminati compositi	pag. 160
6.6.2 I provini di resina epossidica	pag. 164
6.7 Misurazione ed etichettatura dei provini	pag. 165
6.8 L'invecchiamento accelerato	pag. 168
6.9 Analisi ed interpretazione dei risultati sperimentali	pag. 169
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>pag. 188</b>

Nel quadro di una impostazione metodologica e coordinamento generale della ricerca e delle singole attività sperimentali da parte di G. Alaimo e in una continua e costante collaborazione tra gli autori, la redazione dei capitoli può essere così attribuita: a G. Alaimo l'introduzione ed i capitoli 1, 2, 3; a D. Enea che ha curato maggiormente l'attività sperimentale sul campo, i capitoli 4, 5, 6.

## INTRODUZIONE

La ricerca si inserisce nel quadro più generale della valutazione e del controllo della qualità tecnologica<sup>1</sup> dei prodotti complessi per l'edilizia ed in particolare del requisito di durabilità<sup>2</sup>, fondamentale per il perseguimento della qualità in edilizia (ISO 8402, UNI 10838), in quanto riguarda il mantenimento nel tempo delle prestazioni possedute al momento della entrata in esercizio e le modalità secondo cui esse decadono nel tempo. Secondo Maggi il requisito di durabilità esprime proprio "l'attitudine del sistema edilizio a mantenere nel tempo, senza interventi manutentivi, in determinate condizioni ambientali e di uso, il livello delle prestazioni tecnologiche iniziali; pertanto il requisito attiene al comportamento del sistema tecnologico" (Maggi, 2008).

Si tratta di un argomento di grande attualità a livello internazionale, nell'ambito dell'International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB), nonché nell'ambito dell'International Standardization Organization (ISO).

Nel corso della vita utile del bene edilizio si assiste ad una progressiva diminuzione dei livelli prestazionali, ossia della capacità di soddisfare le esigenze dell'utenza da parte dell'organismo, dei sistemi, dei componenti e dei materiali in maniera molto variegata (modalità e tempi), in dipendenza di numerosi fattori fra cui la destinazione ed i modi d'uso, il contesto sollecitante, ecc. Quando tali prestazioni raggiungono un livello minimo accettabile occorre mettere in atto interventi di manutenzione per riportare le prestazioni ad un livello adeguato al fine di garantire una continuità di servizio sotto il profilo tecnico e funzionale. Infatti, assodato che una corretta manutenzione debba contribuire a far sì che l'opera mantenga per una vita di esercizio economicamente ragionevole i propri requisiti, non va trascurato l'aspetto secondo cui la riduzione del consumo di risorse di materie prime, può essere conseguito attraverso il prolungamento del ciclo di vita utile dei singoli edifici e delle diverse parti che li costituiscono.

Intorno a queste tematiche fervono attività di ricerca e normative.

Dopo i primi studi (1987) del CIB W80/RILEM 175 - *Service life prediction methodologies*, in campo internazionale la metodologia generale per la valutazione della durabilità di componenti edilizi, prevista dalla ISO 15686 - *Building and Constructed Assets Service Life Planning*<sup>3</sup>, è finalizzata alla definizione della vita utile in condizioni di riferimento o Reference Service Life (RSL) e della vita utile

---

<sup>1</sup> La qualità tecnologica comprende i quattro aspetti: qualità tecnologica caratteristica (iniziale); qualità tecnologica utile (durabilità); qualità tecnologica operativa (di collocazione in opera); qualità manutentiva (di manutenzione). Cfr. Maggi, 1994.

<sup>2</sup> Secondo la norma UNI 11156-2006. *Valutazione della durabilità dei componenti edilizi. Prima parte: La durabilità dei componenti edilizi. Terminologia e definizione dei parametri di valutazione*, "si intende la capacità di un prodotto di mantenere i livelli delle prestazioni e delle caratteristiche funzionali richieste nel tempo, sotto l'influenza di azioni prevedibili".

<sup>3</sup> La serie di norme ISO 15686 è divisa in 10 parti, che, assieme ai metodi per la valutazione della vita utile dei componenti edilizi e degli aspetti economici e di sostenibilità del ciclo di vita, comprende anche le modalità del loro utilizzo ai fini della programmazione della manutenzione.

in condizioni di progetto o Estimated Service Life (ESL). Alla prima si perviene attraverso prove sperimentali su campioni sottoposti a prove di invecchiamento accelerato in laboratorio e di invecchiamento naturale in esterno, ovvero da indagini statistiche o dati forniti dai produttori. Alla seconda si perviene correggendo i valori di RSL col *Metodo Fattoriale* basato su fattori moltiplicativi che tengono conto delle condizioni particolari di utilizzazione.

La Direttiva Europea 106/89/CEE<sup>4</sup> per il riconoscimento dell'idoneità all'impiego, aveva già stabilito che i prodotti da costruzione devono soddisfare i sei requisiti essenziali<sup>5</sup> per un periodo di vita economicamente ragionevole, al fine di assicurare, assieme alla qualità tecnologica, anche una equilibrata sostenibilità dell'organismo edilizio. Il nuovo Regolamento UE 305/2011, che modifica ed abroga la Direttiva 106/89/CEE, introduce il settimo requisito: *Uso sostenibile delle risorse naturali - Le opere di costruzione devono essere concepite, realizzate e demolite in modo che l'uso delle risorse naturali sia sostenibile e garantisca in particolare: a) il riutilizzo o la riciclabilità delle opere di costruzione, dei loro materiali e delle loro parti dopo la demolizione; b) la durabilità delle opere di costruzione; c) l'uso, nelle opere di costruzione, di materie prime e secondarie ecologicamente compatibili.*

In campo nazionale, l'attività di ricerca prenormativa si è sviluppata soprattutto, a partire degli anni '90, nell'ambito del DISET e dal 2002 nell'ambito del BEST, entrambi Dipartimenti del Politecnico di Milano.

Dal 2003 è stato sviluppato il programma biennale di ricerca di rilevante interesse nazionale (PRIN) cofinanziato dal MIUR sul tema delle *metodologie di valutazione sperimentale della durabilità dei componenti edilizi, finalizzate alla programmazione della manutenzione degli edifici*, che ha visto coinvolte oltre a quella di Palermo, anche le Unità di ricerca del Politecnico di Milano, del Politecnico di Torino, dell'Università di Brescia, dell'Università di Napoli e dell'Università di Catania. Una ricerca, coordinata all'inizio dal prof. P. N. Maggi, in cui assieme alle proposizioni metodologiche si è sviluppata anche una appropriata sperimentazione in situ ed in laboratorio, secondo procedure appositamente calibrate e messe a punto per il componente o soluzione tecnica scelti da ciascuna Sede e per le diverse situazioni del contesto climatico. I risultati di tale ricerca venivano presentati nel convegno *La qualità tecnologica edilizia: la valutazione della durabilità dei componenti edilizi*, svoltosi a Palermo nel 2006, anche attraverso la pubblicazione contestuale dei volumi con i risultati, da parte delle diverse Unità di ricerca e che in sintesi sono stati pubblicati nello status report internazionale del CIB 331 del 2010 (Daniotti & RE Cecconi, 2010).

Sempre nel 2006, sulla base dell'attività svolta dall'apposito Gruppo di lavoro UNI promosso dal BEST, usciva la norma UNI 11156. *Valutazione della durabilità dei componenti edilizi*, articolata in tre parti, approvata prima dalle Commissioni

---

<sup>4</sup> Recepita in Italia con DPR n. 246 del 21/04/1993 e DPR n. 499 del 10/12/1997.

<sup>5</sup> 1. Resistenza meccanica e stabilità; 2. Sicurezza in caso d'incendio; 3. Igiene salute e ambiente; 4. Sicurezza d'uso; 5. Protezione dal rumore; 6. Risparmio energetico e ritenzione di calore.

UNI “Processo edilizio” e “Prodotti e sistemi edilizi”, e poi dalla Commissione centrale tecnica dell’UNI. Norma coerente con la ISO 15686.

Anche nel D.M. 14 gennaio 2008 (*Norme Tecniche per le Costruzioni*), viene ribadito come gli aspetti della qualità, sicurezza e durabilità sono da perseguire in tutte le fasi di progettazione-costruzione dell’opera e viene introdotto il principio della *vita utile di progetto* per diverse classi di opere. Il Committente e il Progettista, di concerto, dichiarano nel progetto la vita utile dell’opera.

In quest’ambito s’inquadrano gli studi e le sperimentazioni, a livello nazionale ed internazionale, sulla valutazione della durata di vita utile di materiali, prodotti e componenti edilizi, che fin qui hanno dato maggiori contributi sulla conoscenza del comportamento in condizioni standard di riferimento ossia fuori sistema e fuori contesto, attraverso la valutazione ed il controllo dei parametri che la connotano: la durata di vita utile e affidabilità alla durata. Ambito di ricerca che alla luce delle attuali esigenze di sostenibilità e risparmio energetico ha assunto particolare rilevanza.

Obiettivo della ricerca è l’implementazione di metodi e strumenti di valutazione della durabilità attraverso la sperimentazione su materiali e componenti edilizi innovativi, finalizzata alla definizione di dati sulla loro “Vita utile di riferimento” e la confluenza nella banca dati che a livello internazionale raccoglie i dati disponibili di RSL utili per la messa a punto delle griglie di valutazione che consentono di passare dalla RSL alla ESL del componente nelle reali condizioni di utilizzo e sollecitazione. Questo è un obiettivo comune all’interno delle ricerche condotte dalla Rete Nazionale Durabilità di cui fanno parte le Sedi di Milano, Torino, Brescia, Napoli, Catania, Palermo, ciascuna impegnata nell’analisi di differenti materiali e componenti dell’involucro edilizio.

Il presente lavoro raccoglie i risultati di alcuni studi sperimentali sul comportamento nel tempo di alcuni materiali innovativi impiegati per la finitura dell’involucro edilizio, per i loro requisiti rivolti alla efficienza energetica e sostenibilità, finalizzando lo studio alla valutazione della loro durata di vita utile. Si tratta in particolare di pitture ed intonaci a base cementizia con proprietà fotocatalitiche; intonaci silossanici di nuova formulazione; laminati compositi in fibre di basalto per pannelli di rivestimento. Materiali per i quali risulta ancora poco noto il comportamento nel tempo. Un nuovo ambito di ricerca riguarda i pannelli compositi fibro-rinforzati per il loro notevole interesse nel campo delle costruzioni, come rivestimenti di parete o elementi di copertura. Su tale fronte ci si muove restando in linea con gli attuali indirizzi del mercato dei produttori di materie prime per l’edilizia e con gli indirizzi legislativi che mirano ad un utilizzo più razionale delle risorse impegnate sia in fase di costruzione che di gestione dell’edificio. Infatti, la progettazione di un nuovo organismo edilizio oggi impone la redazione del programma di manutenzione, indispensabile per una corretta gestione del bene che sarà tanto più facile redigere quanto più sono noti i livelli prestazionali forniti nel tempo dall’organismo edilizio fin dalla sua progettazione, per questo oggi si va diffondendo sempre più la definizione di “Capitolati speciali prestazionali”, al fine di tradurre in specifiche di prestazione i comportamenti attesi dalla Committenza.

Tali materiali/prodotti sono stati oggetto di indagine sperimentale, al fine di acquisire informazioni sia attraverso l'osservazione, lo studio e le indagini di assemblaggi su scala reale nel contesto climatico di Palermo, sia attraverso l'invecchiamento accelerato in laboratorio e il relativo monitoraggio delle caratteristiche prestazionali.

L'attività sperimentale, oltre che all'interno del Laboratorio di Edilizia del Dipartimento di Architettura, è stata condotta anche presso altri laboratori, cosa che ci ha consentito di fruire anche di apporti interdisciplinari, per i quali voglio ringraziare: il prof. Antonino Valenza, l'ing. Vincenzo Fiore e il Laboratorio dell'ex Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Processi e dei Materiali, per il contributo alla impostazione e allo svolgimento delle sperimentazioni sui materiali compositi con fibre di basalto; il prof. Giovanni Rizzo e l'ing. Bartolomeo Megna, per l'assistenza all'uso delle strumentazioni di microscopia ottica e di lettura dell'angolo di contatto; il prof. Salvatore Benfratello, il rag. Valerio La Ciura, per l'assistenza al taglio dei provini; il dott. Angelo Mulone del Laboratorio accreditato Geolab s.r.l. di Carini, il dott. Renato Giarrusso e il dott. Francesco Giannici, per la disponibilità del SEM e l'assistenza all'uso ed interpretazione dei risultati. Voglio ringraziare inoltre il C.T.G. Italcementi Group, nelle persone della dott.ssa Tiziana De Marco, dell'ing. Gian Luca Guerrini, del dott. Luca Bottalico, dell'ing. Piero Negro, per la fornitura delle pitture fotocatalitiche e l'esecuzione delle prove di attività fotocatalitica; il sig. Carlo Razzanelli e l'ing. Eugenio Nuccio, per la fornitura dei materiali silossanici e fotocatalitici, nonché l'assistenza al monitoraggio del caso studio; gli ingegneri Maria Letizia Garifo, Matteo Guttadauro, Giampiero Di Giovanni, Marilisa Benenati, Giuseppina Anna Gibiino, Roberto Ferrara, Alberto Cracolici, Miriam Spatafora e Simona Infantolino.

Ringrazio infine l'ing. Daniele Enea, per il grande impegno e la maturità mostrati nello svolgimento della sua fondamentale attività di ricerca, anche come titolare di assegno di ricerca cofinanziato dal MIUR, all'interno del Dipartimento di Architettura, dal 2009 al 2013.

Infine voglio cogliere l'occasione di questo ulteriore lavoro sulla durabilità, per ricordare la figura del prof. Pietro Natale Maggi, cui dedico questo volume, ed esprimere la mia profonda gratitudine e riconoscenza per il Maestro, un grande riferimento per me, oltre che per l'intera Comunità scientifica, per i fondamentali contributi dati alla ricerca scientifica, all'attività pre-normativa, al Settore della Produzione Edilizia.

Giuseppe Alaimo

# 1 DALLA QUALITÀ EDILIZIA ALLA DURABILITÀ

## 1.1 La qualità edilizia

Un ruolo importante nella diffusione della cultura della qualità, in campo internazionale, è stato svolto dall'ISO (International Organization for Standardization) che, con la dichiarazione d'intenti del 1977, ha modificato radicalmente la precedente visione oggettuale della normazione, basata sulla descrizione dei materiali, dei prodotti e delle loro caratteristiche principali, passando a una nuova impostazione di tipo esigenziale-prestazionale, che muovendo appunto dall'individuazione delle esigenze, arriva a definire le necessarie prestazioni delle opere e delle parti che le compongono ed i metodi per verificare la corrispondenza fra comportamenti attesi e comportamenti manifestati<sup>1</sup>. Con l'ampliamento dei mercati e l'aumento della concorrenza in tutti i settori produttivi diventa obbligata la necessità di una razionalizzazione delle risorse in tutte le fasi del processo edilizio e si diffonde il concetto di qualità, affiancato a quello di sostenibilità, come adeguamento alle mutate esigenze dell'utente e dell'ambiente (Maggi, 2000). Assumono maggiore importanza il rispetto delle prescrizioni contrattuali, il raggiungimento e il mantenimento nel tempo dei livelli di qualità attesi, la valutazione del rischio di insuccesso e l'attuazione delle azioni necessarie per eliminarlo o ridurlo, attraverso efficaci procedure di prevenzione e controllo.

Il tema della qualità edilizia intesa come *insieme delle proprietà e delle caratteristiche dell'organismo edilizio o di sue parti che conferiscono a essi la capacità di soddisfare, attraverso prestazioni, esigenze espresse o implicite* (UNI 10838:1999) e del suo controllo, pertanto, è divenuto di grande interesse per tutti gli operatori del processo edilizio. Lo sviluppo di qualsiasi progetto risulta, infatti, dall'integrazione dei diversi aspetti della qualità: ambientale, funzionale-spaziale, tecnica e tecnologica, che a sua volta si compone di qualità caratteristica, qualità utile (durabilità), qualità operativa, qualità manutentiva.

Ne deriva che la qualità globale di un organismo edilizio dipende da diversi contributi di qualità che riguardano la qualità del progetto, del prodotto e del processo (Turchini, 1994). Il perseguimento della qualità deve quindi avvenire in ogni fase del processo edilizio: da quella progettuale (*metodi per l'assicurazione e il controllo*), alla fase esecutiva (*piani di prevenzione e controllo*), alla fase gestionale (*piani di manutenzione*). Al concetto di qualità, dicevamo, va affiancato quello di sostenibilità edilizia<sup>2</sup>. Per non dirsi che nell'attuale periodo storico continuano a crescere la richiesta di risorse energetiche e il costo delle materie prime, quindi anche i consumi energetici e i conseguenti carichi sull'ambiente. Si

---

<sup>1</sup> Esempi di norme prestazionali sono le direttive settoriali riguardanti i diversi ambiti produttivi, le norme armonizzate europee CEN o gli Eurocodici.

<sup>2</sup> Il contributo che il settore delle costruzioni può dare allo sviluppo sostenibile risulta determinante, se si tiene conto che il settore incide per il 10% sul PIL, per il 45% sul consumo di energia e per il 20% sulle emissioni di gas serra.

comprende allora come risulti obbligata la scelta del perseguimento della qualità e della razionalizzazione delle risorse impiegate, anche attraverso la pianificazione e il prolungamento della durata del ciclo di vita utile dell'edificio e dei suoi elementi. Ciò contribuisce positivamente, oltre che sull'ambiente, anche sull'economia del paese o, a scala più piccola, sul bilancio di chi deve gestire il bene edilizio, sia esso il gestore di un grande parco immobiliare o l'amministratore del piccolo condominio.

Non basta conoscere le prestazioni tecnologiche del componente all'atto della sua messa in opera, ma occorre avere cognizioni sul comportamento nel tempo del singolo componente, del sistema e dell'edificio nel suo complesso. Nasce così l'esigenza di pianificare la durabilità dei componenti edilizi, ossia di conoscere e prevedere l'andamento delle prestazioni durante tutto il ciclo di vita dell'edificio in modo da poter programmare razionalmente le risorse da impiegare nelle diverse fasi del processo edilizio (progettazione, costruzione, gestione, dismissione ed eventuale riciclaggio) ed in definitiva contribuire alla sostenibilità del ciclo di vita dell'edificio.

Per definizione la qualità non ha un valore assoluto, ma relativo al fatto che il prodotto possa o meno soddisfare precise esigenze. Pertanto, un prodotto sarà di scarsa, buona o eccellente qualità, a seconda del grado di soddisfacimento delle esigenze espresse dall'utenza. Esigenze diverse di utenti rispetto ad un medesimo prodotto, implicano livelli diversi di qualità di quel prodotto. Non è detto quindi che ad elevati livelli di qualità, corrispondano maggiori livelli di costi.

Il raggiungimento degli obiettivi di qualità, comporta una adeguata gestione del processo edilizio, in tutte le sue fasi, attraverso il cosiddetto *sistema di gestione per la qualità*, definito come: *"Insieme di elementi correlati o interagenti per stabilire politica ed obiettivi e per conseguire tali obiettivi"*<sup>3</sup>. Definite le esigenze dell'utenza e i requisiti corrispondenti da attribuire all'opera e alle sue parti, l'obiettivo principale del sistema di gestione per la qualità è quella di definire i processi, attraverso una struttura organizzata, tesa ad un continuo miglioramento, in cui riveste un ruolo fondamentale il controllo, finalizzato a garantire affidabilità, riproducibilità e costanza dei risultati, per giungere al risultato atteso.

Gli obiettivi del processo edilizio risultano molteplici e interconnessi tra loro, (sostenibilità, minimizzazione dell'impatto ambientale, redditività, sicurezza e salute sui luoghi di lavoro, etc.), pertanto la qualità del processo dipenderà dal grado di conseguimento degli obiettivi preposti, cioè dalla qualità del processo produttivo e dall'organizzazione e competenza della struttura che gestisce il processo. La qualità del processo di produzione del bene edilizio dipende dalla qualità organizzativa della struttura produttiva, da cui l'interdipendenza tra la qualità dell'organizzazione e la qualità del prodotto.

Un contributo decisivo verso la garanzia di qualità è stato dato dall'introduzione della Direttiva 89/106/CEE, sostituita dal Regolamento UE 305/2011, che ha stabilito regole e requisiti minimi per il controllo di conformità dei prodotti edilizi:

---

<sup>3</sup> UNI EN ISO 9000:2005. Sistemi di gestione per la qualità - Fondamenti e vocabolario.

la marcatura CE per i prodotti edilizi attraverso il soddisfacimento dei requisiti minimi fissati. La qualità intrinseca dei prodotti utilizzati (corretta posa in opera, corretta esecuzione delle interfacce, etc.) per la realizzazione dell'opera, però non basta a garantire la qualità del prodotto finale.

Non deve essere trascurato il fatto che il processo edilizio ha anche un rilevante portato economico, determinato dall'impiego di una rilevante quantità di risorse, per cui ogni scelta deve essere sottoposta a verifiche di congruità, razionalità e ottimizzazione dei processi, in tutte le fasi costitutive, dalla progettazione alla realizzazione, fino alla gestione e manutenzione dell'opera. Il progettista, nell'attribuzione dei requisiti di qualità alle diverse parti dell'opera, terrà opportunamente conto delle risorse economiche disponibili, e valuterà attentamente i livelli di qualità ottenibili dai diversi sistemi, rispetto a quelli dei singoli componenti, puntando all'integrazione fra le diverse parti, e ad un comportamento globale soddisfacente rispetto alle esigenze degli utenti. Questo equilibrio è necessario affinché gli edifici funzionino bene globalmente, siano graditi all'utenza, si inseriscano armoniosamente nell'ambiente. Quando questo equilibrio non viene raggiunto, in genere per progettazione non soddisfacente, si producono sprechi economici, sia nella fase produttiva che in quella manutentiva.

La valutazione della qualità risulta un'attività complessa, dipendente da vari parametri ed aspetti: dal tipo di uso, dal contesto e dalle sollecitazioni indotte, dall'idonea integrazione tra i diversi sistemi e sub-sistemi edilizi, al tipo di prestazioni esplicate, etc. Il perseguimento della qualità, allora, deve costituire un obiettivo presente in ogni fase e sottofase del processo edilizio, dalla pianificazione alla progettazione, dall'esecuzione fino alla gestione, attraverso un'attenta politica di controllo.

Dicevamo come il concetto di qualità sia strettamente legato a quello di soddisfacimento delle esigenze dell'utenza. Oggi l'intera Industria delle Costruzioni, per il proprio peso economico e la sua importanza sociale, è chiamata a dare un significativo contributo alla soluzione dell'attuale crisi in cui versa l'ambiente, proprio attraverso interventi sulla qualità delle costruzioni, che, in linea con le attuali esigenze di sostenibilità ambientale, debbono riguardare l'efficienza energetica degli edifici e la compatibilità ambientale dei materiali utilizzati. A tale domanda di sviluppo e rilancio, che riguarda soprattutto la riqualificazione del patrimonio edilizio esistente, il settore è chiamato a dare risposte in termini di innovazione tecnologica, di produttività e competitività.

A tale scopo, oggi, in cui risulta attuale la riflessione sul ruolo della conoscenza come servizio e valore per l'intera società, risulta fondamentale, per l'ottimizzazione del processo edilizio, il contributo che può derivare dalla razionalizzazione dei flussi informativi, con strumenti e metodi propri del Building Knowledge Management System, tra le diverse fasi del processo e i differenti operatori coinvolti.

### 1.1.1. *La qualità del prodotto*

La scelta oculata dei materiali e dei prodotti in termini di qualità orienta e pone i presupposti di garanzia il raggiungimento della qualità finale dell'opera, ai fini del risultato prestazionale, poiché solo a partire da un'adeguata scelta delle caratteristiche dei prodotti costituenti si può sperare di giungere al livello di qualità atteso. Tra gli altri, questo aspetto della qualità è senza dubbio il più conosciuto e dibattuto, perché in questo ambito ricade la certificazione dei materiali, dei componenti e dei sistemi per l'edilizia, che coinvolge a vario titolo i fabbricanti, gli organismi di controllo e gli utenti finali. La norma di riferimento, come detto, è stata la Direttiva 86/106/CEE, oggi abrogata e sostituita dal Regolamento (UE) n. 305/2011 del Parlamento Europeo e del Consiglio, che definisce sette requisiti minimi per le opere di costruzione: resistenza meccanica e stabilità, sicurezza in caso d'incendio, igiene salute e ambiente, sicurezza ed accessibilità nell'uso, protezione contro il rumore, risparmio energetico e ritenzione del calore ed, infine, uso sostenibile delle risorse naturali. La novità, rispetto alla Direttiva 89/106/CEE, riguarda l'introduzione del settimo requisito, uso sostenibile delle risorse naturali, che pone l'attenzione sulla durabilità dei prodotti, sull'uso di materie prime seconde e sulla riciclabilità delle opere da costruzione. Lo scenario che viene delineato dal nuovo regolamento comunitario sottende la necessità di un incremento di attenzione, da parte del settore delle Costruzioni, verso il tema della sostenibilità. Quest'ultimo requisito implica, la dichiarazione sulla durabilità dei prodotti da costruzione da parte dei fabbricanti o degli importatori.

Le ricerche prenormative nell'ambito dello sviluppo di metodi e strumenti per la gestione della qualità di materiali, prodotti e componenti, comprendono i metodi di controllo e misura delle prestazioni esplicitate. Nella valutazione della qualità del prodotto, riveste un ruolo importante l'aspetto della sua qualità operativa, che esprime la qualità di messa in opera che dipende dalla sua complessità esecutiva, oltre che l'insieme delle caratteristiche intrinseche di tipo tecnico-dimensionali.

Molteplici sono oggi i motivi che giustificano una forte domanda di investimenti in termini di innovazione tecnologica, attraverso cui il settore delle costruzioni è chiamato a dare risposta alle attuali esigenze di una maggiore sostenibilità degli interventi, attraverso una significativa riduzione del consumo di energia, e in generale di risorse e dell'impatto sull'ambiente. Le innovazioni identificate possono riguardare tecnologie, processi, materiali, componenti e la loro integrazione, strumenti e tecniche di progettazione o valutazione, tecniche di costruzione o smontaggio, sistemi di gestione avanzati (smart-operation).

Molto si è fatto anche nel settore della certificazione dei prodotti, per migliorare la circolazione delle informazioni non solo di tipo prestazionale, ma in generale, di tipo qualitativo. La certificazione dei prodotti, a livello internazionale, secondo la classificazione contenuta nella norma ISO/IEC GUIDE 67:2004 *Conformity assessment – Fundamentals of product certification*, prevede otto sistemi diversi, riassunti in Tabella 1.1.

Tabella 1.1 Sistemi di certificazione internazionale (ISO/IEC GUIDE 67:2004)

1	Prove di tipo.	Un prodotto è provato secondo un metodo prescritto, al fine di verificarne la conformità, in maniera indipendente dal luogo di produzione.
2	Prove di tipo seguite da sorveglianza effettuata tramite prove di verifica su campioni prelevati sul libero mercato.	Alle prove di tipo si affiancano prove di controllo su campioni prelevati presso distributori o rivenditori.
3	Prove di tipo seguite da sorveglianza effettuata tramite prove di verifica prelevati in fabbrica.	Alle prove di tipo si affiancano prove di controllo su campioni prelevati presso il fabbricante prima della spedizione.
4	Prove di tipo seguite da sorveglianza effettuata tramite prove di verifica su campioni prelevati sia sul mercato che in fabbrica.	Alle prove di tipo si affiancano prove di controllo su campioni combinando i metodi 2 e 3.
5	Prove di tipo, di valutazione e accettazione del controllo di qualità in fabbrica seguite da una sorveglianza che prende in considerazione sia la verifica del controllo di qualità in fabbrica, sia le prove di verifica su campioni provenienti dalla fabbrica e dal mercato.	Alle prove di tipo si affianca la valutazione e l'approvazione del sistema di controllo del fabbricante sia prove di controllo su campioni combinando i metodi 2 e 3.
6	Valutazione ed accettazione del solo controllo di qualità in fabbrica.	Viene valutata la capacità del fabbricante di produrre secondo le specifiche fissate, inclusi i metodi di fabbricazione, di controllo e le procedure.
7	Prove di lotti.	Viene accertata la conformità di un lotto
8	Prove sul 100% dei prodotti.	Il 100% dei prodotti è sottoposto a verifica di conformità.

A livello italiano, sono possibili le forme di certificazione riportate in Tabella 1.2, che con un diverso approccio e modalità esecutiva, permettono all'utenza una conoscenza delle caratteristiche prestazionali del prodotto.

Tabella 1.2. Sistemi di certificazione presenti in Italia

Omologazione	Rappresenta l'approvazione da parte di un Ente certificato (INAIL) di un determinato prodotto o impianto, indispensabile per l'utilizzo del prodotto o la messa in esercizio dell'impianto.
Certificazione di Conformità	Stabilisce la conformità rispetto ad una serie di norme di prodotto. La conformità europea, istituita con la Direttiva 89/106/CEE, attesta la conformità del prodotto ai requisiti fissati da specifiche norme comunitarie, introducendo il marchio CE. Viene rilasciata da organismi notificati.
Certificato di Idoneità Tecnica	E' un giudizio tecnico sull'idoneità all'impiego di materiali, componenti e sistemi, rilasciato dall'UEAtc <sup>4</sup> e dal S.T.C. <sup>5</sup> , previsto in mancanza di norme di prodotto, cui poterne dichiarare la conformità, e si basa sull'effettuazione di una serie di indagini e test sperimentali.
Marchio di Qualità	Nasce con lo scopo di dare ulteriori garanzie di qualità al prodotto, sebbene la loro natura derivi da specifiche esigenze di vendita. Vengono rilasciati da Enti, Organismi privati e associazioni di categoria, sulla base di verifiche e prove non rispondenti a specifiche normative standardizzate.
Autocertificazione	E' una certificazione d'uso basata su controlli interni al fabbricante.

Per quanto attiene più espressamente al processo edilizio, i controlli sui prodotti da costruzione avvengono in fasi diverse, a partire dai controlli di accettazione, prima del loro utilizzo, fino ad arrivare ai controlli durante e dopo la messa in opera e per ultimi quelli alla fine del processo costruttivo, prima della messa in esercizio. Con riferimento al bene edilizio, inteso come prodotto, si possono analizzare le diverse componenti della qualità<sup>6</sup>:

- Qualità funzionale-spaziale
- Qualità ambientale
- Qualità tecnologica
- Qualità tecnica

<sup>4</sup> L'Union Européenne pour l'Agrément technique dans la construction (UEAtc) è un organismo istituito nel 1960 con lo scopo di garantire, nei vari Paesi europei, l'equivalenza dell'Agrément (valutazione tecnica favorevole riguardo all'idoneità dei materiali, attrezzature e procedimenti), rilasciati dai vari membri. Per l'Italia, il membro rappresentante è l'I.T.C. (Istituto per le Tecnologie della Costruzione, ex I.C.I.T.E.), facente parte del C.N.R.

<sup>5</sup> Il Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, ai sensi del D.M. 14/01/2008, norme tecniche per le costruzioni, rilascia il Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego per i prodotti che non sono marcati CE e per quelli che mancano di specifiche norme standardizzate.

<sup>6</sup> UNI 10838:1999. Edilizia - Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia.

- Qualità operativa
- Qualità utile
- Qualità manutentiva

La qualità funzionale-spaziale è “*l’insieme delle caratteristiche funzionali-spaziali degli elementi spaziali di un organismo edilizio*” ed indica il grado di adeguatezza tra i requisiti di fruibilità dello spazio, di sicurezza, dell’organismo edilizio, e le esigenze connesse all’attività dell’utenza. La qualità ambientale è “*l’insieme delle prestazioni ambientali degli elementi spaziali di un organismo edilizio*” e si riferisce allo stato dell’ambiente in relazione alle esigenze dell’utente. Tali esigenze si traducono nella classe dei requisiti detti “di benessere”, quali ad esempio il benessere termico e igrometrico, visivo, uditivo, psicologico, ecc. La condizione di soddisfacimento è in questo caso legata alla possibilità dell’utente di vivere bene e svolgere la propria attività in quello spazio costruito. La qualità tecnologica è “*l’insieme delle prestazioni tecnologiche dei sub-sistemi e degli elementi tecnici di un organismo edilizio*” e riguarda la rispondenza delle prestazioni degli elementi tecnici ai requisiti tecnologici. I requisiti tecnologici vengono definiti in fase di progettazione dell’edificio e sono strettamente legati a quelli ambientali. Allo stesso modo, la qualità tecnologica è articolata in requisiti tecnologici, cui l’elemento tecnico deve rispondere:

- *requisiti di sicurezza*: legati all’incolumità dell’utenza (es. resistenza statica e agli urti, al fuoco, sicurezza in cantiere, sicurezza d’uso degli impianti, ecc.)
- *requisiti di benessere*: isolamento termico, tenuta all’acqua e all’aria, isolamento acustico, ecc.
- *requisiti di fruibilità*
- *requisiti di aspetto*
- *requisiti di gestione* (manutenibilità, punibilità, accessibilità, ecc.)
- *requisiti di economicità* (la capacità delle parti di poter essere sostituite senza dover sostenere costi elevati).

La qualità tecnica è “*l’insieme delle caratteristiche degli elementi tecnici di un organismo edilizio articolate per requisiti tecnici*” e riguarda la corrispondenza degli elementi tecnici ai requisiti tecnici o di funzionamento. La valutazione della qualità tecnica di un elemento passa attraverso la verifica della sua conformità tecnica, cioè della sua rispondenza alle specifiche tecniche dichiarate. La qualità operativa, o qualità di messa in opera, si riferisce all’insieme delle caratteristiche degli elementi tecnici di un organismo edilizio, che traducono i requisiti tecnici in caratteristiche tecnico-dimensionali e di relazione, ai fini dell’esplicitazione delle prestazioni e si esprime attraverso la valutazione delle possibili difformità. La qualità utile è “*l’insieme delle caratteristiche degli elementi tecnici di un organismo edilizio, articolate per requisiti di durabilità*”, cioè per requisiti funzionali alla durata di funzionamento e alla relativa affidabilità. La qualità manutentiva è “*l’insieme delle caratteristiche degli elementi tecnici di un organismo edilizio articolate per requisiti di manutenibilità*” ed è inerente alla capacità degli elementi tecnici di essere oggetto di interventi di manutenzione.

### 1.1.2. La qualità del progetto

Fino a qualche decennio fa, anello debole del “trinomio” della qualità, oggi può contare su un nuovo *corpus* legislativo e nuovi strumenti di previsione e controllo delle prestazioni in fase di ideazione. Strumenti come il BIM (Building Information Modelling), a disposizione dei progettisti, sono in grado di modellare l’oggetto edilizio complesso, considerato cioè come un organismo costituito da sistemi e sub-sistemi interdipendenti, e di simularne le prestazioni lungo l’intero ciclo di vita, costituendo, di fatto, lo strumento più adeguato alla complessità degli attuali obiettivi di efficienza energetica e sostenibilità. A tal fine occorre dire che tale approccio presuppone una maggiore integrazione dei contributi progettuali interdisciplinari ed in generale di tutti gli operatori del processo edilizio. In tal modo, il progettista potrà contare su uno strumento guida per la progettazione, la gestione fino alla demolizione. In modo da avere un quadro sempre chiaro in termini di obiettivi di qualità prefigurati e scelta delle tecnologie che ne permettano il conseguimento.

Nel caso di Committenza pubblica, il momento culmine del controllo della fase progettuale è costituito dalla validazione del progetto, una procedura svolta a cura del Responsabile Unico del Procedimento, introdotta in Italia dal Regolamento DPR 554/99, in attuazione dell’art. 16, comma 6 della Legge Merloni, L. 109/1994<sup>7</sup>. Tale procedura è finalizzata ad accertare la rispondenza dei requisiti del progetto<sup>8</sup> alle esigenze e bisogni da soddisfare in relazione all’uso, all’economicità ed alla reale possibilità di realizzazione entro i tempi previsti, in coerenza con i principi esposti nel Documento Preliminare alla Progettazione, conferendo, così, un ruolo strategico alla fase progettuale, nel perseguimento della qualità all’interno del processo edilizio. Dalla Merloni in poi, inoltre, sono state codificate procedure per la qualificazione e selezione dei progettisti, e introdotte misure che regolano la copertura dei rischi derivati da errori di progettazione, attraverso polizze assicurative di responsabilità civile e professionale. Con il Codice dei Contratti, D.Lgs. 163/2006, che ha sostituito la legge Merloni, l’attenzione verso la qualità del progetto si è accresciuta, l’art. 93 recita testualmente *“La progettazione in materia di lavori pubblici si articola, nel rispetto dei vincoli esistenti, preventivamente accertati, laddove possibile fin dal documento preliminare, e dei limiti di spesa prestabiliti, secondo tre livelli di successivi approfondimenti tecnici, in preliminare, definitiva ed esecutiva, in modo da assicurare:*

- a) la qualità dell’opera e la rispondenza alle finalità relative;*
- b) la conformità alle norme ambientali e urbanistiche;*
- c) il soddisfacimento dei requisiti essenziali, definiti dal quadro normativo nazionale e comunitario.”*

---

<sup>7</sup> La legge Merloni ed i successivi approfondimenti, fino alla cosiddetta legge Merloni-quater (Legge n. 166/2002 *Disposizioni in materia di infrastrutture e trasporti*), hanno avuto il merito di ridisegnare l’articolazione del processo edilizio introducendo nella normativa italiana un forte impulso ai temi della qualità.

<sup>8</sup> Che prevede tre diversi livelli: progetto preliminare, definitivo ed esecutivo.

Nel caso di progetti complessi, il Responsabile del procedimento può essere affiancato da organismi di controllo, accreditati ai sensi della norma UNI CEI EN ISO/IEC 17020:2005, *Criteri generali per il funzionamento dei vari tipi di organismi che effettuano attività d'ispezione*, per opere di importo superiore a 20 milioni di euro o ai sensi della norma UNI EN ISO 9001:2005, *Sistemi di gestione per la qualità*, per opere di importo inferiore. Con il procedere dei successivi livelli di approfondimento progettuale, la prassi operativa di validazione, di cui all'art. 47 del Regolamento, comporta controlli più stringenti. Viene accertata la completezza, adeguatezza e chiarezza di tutti gli elaborati, la rispondenza delle scelte progettuali alle esigenze di manutenzione e gestione, l'acquisizione di tutte le approvazioni ed autorizzazioni di legge, necessarie ad assicurare l'immediata cantierabilità del progetto, il coordinamento tra le prescrizioni del progetto e le clausole dello schema di contratto e del capitolato speciale d'appalto.

Nella nuova formulazione del dettato normativo, introdotta dal nuovo Regolamento (DPR 207/2010), la verifica viene ampliata, oltre che sulla completezza della documentazione, al controllo sull'appaltabilità della soluzione progettuale prescelta, sui presupposti per la durabilità dell'opera nel tempo, sulla minimizzazione dei rischi di introduzione di varianti e di contenzioso, sulla possibilità di ultimazione dell'opera entro i termini previsti, sulla sicurezza delle maestranze e degli utilizzatori, sull'adeguatezza dei prezzi unitari utilizzati, in relazione al livello di progettazione verificato. Pertanto il ruolo del controllo, ai fini della garanzia della qualità del progetto, diviene sempre più importante, proprio per ridurre tutte le possibili cause di imprevisti, possibili varianti per errori progettuali. L'art. 52 del nuovo Regolamento definisce i criteri generali di verifica che riguardano l'affidabilità, intesa come rispondenza alle norme specifiche ed alle regole tecniche; la completezza ed adeguatezza della documentazione progettuale, anche in merito all'esaustività delle informazioni tecniche ed amministrative; la leggibilità, coerenza e ripercorribilità dei calcoli riportati; la compatibilità, intesa come rispondenza delle soluzioni progettuali ai requisiti espressi nello studio di fattibilità ovvero nel documento preliminare alla progettazione o negli elaborati progettuali prodotti nella fase precedente. Ciò con particolare attenzione agli aspetti di sicurezza degli operatori, superamento ed eliminazione delle barriere architettoniche, sicurezza antincendio, inquinamento, durabilità, manutenibilità, coerenza dei tempi e dei costi, sicurezza ed organizzazione del cantiere.

Nella nuova formulazione normativa la validazione perde il senso di mero adempimento burocratico del procedimento edilizio, di "attestazione" dell'ultimazione del progetto, necessaria per poter avviare le operazioni di gara, prevedendo un esame più approfondito del progetto, da parte della Pubblica Amministrazione, indispensabile per verificarne la coerenza con le esigenze, col quadro normativo e in definitiva attestarne l'affidabilità e la realizzabilità. L'implementazione del Sistema di Qualità nell'attività di progettazione è affrontata dalle norme UNI EN ISO 9001:2008 e UNI EN ISO 9004:2009. La UNI EN ISO 9001:2008, *Sistemi di gestione per la qualità - Requisiti*, sottolinea la necessità, non solo della pianificazione dell'attività progettuale, ma anche quella di verifica e

controllo. La UNI EN ISO 9004:2009, *Sistemi di gestione per la qualità - Linee per il miglioramento della qualità*, enfatizza, invece, la pianificazione del progetto assegnando le responsabilità e definendo preventivamente le attività di verifica e validazione. Criterio fondante è l'adozione di opportuni strumenti tecnico-gestionali di supporto alla progettazione in grado di tradurre correttamente i requisiti e le esigenze dell'utenza in specifiche, disegni, procedure, prodotti, processi e istruzioni.

### *1.1.3. La qualità del processo*

La qualità del processo riguarda principalmente due aspetti:

- quello relativo agli operatori e le operazioni tipiche delle fasi esecutive e realizzative;
- quello organizzativo e relazionale dei protagonisti del processo edilizio, comprendendo in esso la qualificazione degli operatori mediante il cosiddetto Sistema Qualità.

Il processo edilizio si presta perfettamente per l'applicazione dell'approccio della norma UNI EN ISO 9001:2008, l'adozione di sistemi di gestione per la qualità per le organizzazioni coinvolte, siano esse imprese di costruzioni, operatori della progettazione, operatori del controllo. Il processo edilizio è articolato in sottoprocessi e fasi in cui sono presenti momenti di ideazione, produzione e controllo. L'input di una fase diventa l'output della fase successiva. Il livello di qualità dipende anche dalla capacità di gestire il passaggio di informazioni da una fase all'altra senza perdite, o incomprensioni, disciplinando attraverso procedure operative le modalità di relazione tra le parti coinvolte nelle varie fasi e garantendo la possibilità di una partecipazione attiva e cosciente a tutti gli operatori, verso il raggiungimento degli obiettivi di qualità prefissati. Un processo che porta alla realizzazione di un oggetto edilizio può ritenersi efficace ed adeguato, se è in grado di pianificare, prevedere, gestire e controllare i risultati in termini di qualità del prodotto finale. Il Sistema Qualità dell'organizzazione coinvolta, ovvero dell'impresa appaltatrice, è finalizzato al perseguimento di tali obiettivi di qualità, dando evidenza a tutte le procedure organizzative, realizzative e di controllo su cui si basa. Questo approccio è basato sull'importanza dell'interpretazione e soddisfacimento delle esigenze della Committenza, considerando i processi in termini di valore aggiunto, e del conseguimento dei risultati in termini di prestazioni ed efficacia dei processi, aspirando ad un miglioramento continuo dei processi e dei risultati sulla base di controlli mirati. Il documento che riporta l'insieme delle procedure del sistema di gestione per la qualità dell'organizzazione è noto come "Manuale di Qualità". L'esecuzione di lavori pubblici in Italia, per quanto attiene la qualificazione dei soggetti esecutori, è disciplinata dall'art. 40 del Codice dei Contratti, che ne impone la certificazione, imponendo che l'attività costruttiva sia improntata ai principi della qualità, della professionalità e della correttezza. Il sistema di qualificazione, introdotto dalla Legge Merloni, è unico per tutti gli esecutori di lavori pubblici di importo superiore a 150.000 euro, ed è

articolato per categorie di opere generali e specializzate e per importo dei lavori<sup>9</sup>. Il sistema di qualità aziendale che consente alle imprese di poter operare nell'ambito dei lavori pubblici deve essere conforme alle norme della serie UNI EN ISO 9000. Il controllo della qualità del processo costruttivo può essere supportato da appositi strumenti, come il Piano della Qualità, di cui deve dotarsi l'impresa realizzatrice. Si tratta di un documento che precisa le modalità operative, le risorse e le sequenze delle attività per un determinato progetto, prodotto o contratto, secondo la definizione della norma UNI EN ISO 9000:2005, il cui carattere è rivolto alla gestione della commessa dal punto di vista qualitativo, e che deve essere redatto secondo le linee guida della norma UNI ISO 10005:2007 (Auteri et al., 2000). Il Piano della Qualità individua gli operatori addetti alla gestione della qualità e indica le opportune istruzioni operative e le relative procedure di controllo, articolandole per livelli e individuando i responsabili dei controlli stessi. In definitiva si tratta di un documento che descrive il Sistema/Manuale della Qualità dell'azienda, applicato ad una particolare commessa, contratto o progetto.

## 1.2 La durabilità

La durabilità è il requisito tecnologico di qualità che riguarda la durata di vita utile e l'affidabilità alla durata di un componente, un elemento tecnico o di una parte funzionale dell'organismo edilizio, con riferimento alle loro caratteristiche prestazionali. Per meglio comprendere la valenza di questo requisito, è opportuno scomporre l'oggetto edilizio nelle sue parti funzionali e caratterizzare ciascuna con i requisiti tecnologici che la connotano. Le prestazioni esplicitate dall'organismo edilizio sono generalmente distinte in ambientali e tecnologiche. Le prime fanno riferimento a requisiti ambientali (es. illuminazione interna, condizioni termigrometriche, ecc.), le seconde a requisiti tecnologici (resistenza agli agenti atmosferici, traspirabilità, ecc.). La norma UNI 8290 propone una classificazione del sistema tecnologico dell'oggetto edilizio, inteso come insieme strutturato di classi di unità tecnologiche, unità tecnologiche e classi di elementi tecnici. In un procedimento a cascata, ogni classe di unità tecnologica è scomposta in unità tecnologiche ed ogni unità tecnologica è a sua volta scomposta in classi di elementi tecnici. Le unità tecnologiche sono *raggruppamenti di funzioni, compatibili tecnologicamente, necessarie per l'ottenimento di prestazioni ambientali*<sup>10</sup> e vengono individuate dalla Tabella 1.3.

---

<sup>9</sup> Il Regolamento DPR 207/2010 riporta nell'Allegato A la classificazione in 13 categorie di opere generali e 35 categorie di opere specializzate, già contenuta nel DPR 34/2000. Le classi di importi sono 10 e vanno dalla I<sup>a</sup> per importi inferiori a €258.000, fino alla VIII<sup>a</sup> per importi superiori a € 15.494.000.

<sup>10</sup> UNI 10838:1999. Edilizia - Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia.

Tabella 1.3 La scomposizione tecnologica dell'organismo edilizio (UNI 8290)

<b>Classi di unità tecnologiche</b>	<b>Unità tecnologica</b>	<b>Classi di elementi tecnici</b>
<p><u>Struttura portante</u> Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici appartenenti al sistema edilizio, avente funzione di sostenere i carichi del sistema edilizio stesso e di collegare staticamente le sue parti.</p>	<p><u>Struttura di fondazione</u> Insieme degli elementi tecnici del sistema edilizio, avente funzione di trasmettere i carichi del sistema edilizio stesso al terreno.</p>	<p>Strutture di fondazione dirette Strutture di fondazione indirette</p>
	<p><u>Struttura di elevazione</u> Insieme degli elementi tecnici del sistema edilizio, avente funzione di sostenere i carichi verticali e/o orizzontali, trasmettendoli alle strutture di fondazione.</p>	<p>Strutture di elevazione verticali Strutture di elevazione orizzontali ed inclinate Strutture di elevazione spaziali</p>
	<p><u>Struttura di contenimento</u> Insieme di elementi tecnici funzionalmente connessi con il sistema edilizio avente funzione di sostenere i cariche derivanti dal terreno.</p>	<p>Strutture di contenimento verticali Strutture di contenimento orizzontali</p>
<p><u>Chiusura</u> Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio avente funzione di separare e di conformare gli spazi interni del sistema edilizio stesso rispetto all'esterno.</p>	<p><u>Chiusura verticale</u> Insieme degli elementi tecnici verticali del sistema edilizio avente funzione di separare gli spazi interni del sistema edilizio stesso rispetto all'esterno.</p>	<p>Pareti perimetrali verticali Infissi esterni verticali</p>
	<p><u>Chiusura orizzontale inferiore</u> Insieme degli elementi tecnici orizzontali del sistema edilizio avente funzione di separare gli spazi interni del sistema edilizio stesso dal terreno sottostante o dalle strutture di fondazione.</p>	<p>Solai a terra Infissi orizzontali</p>
	<p><u>Chiusura orizzontale su spazi esterni</u> Insieme degli elementi tecnici orizzontali del sistema edilizio avente funzione di separare gli spazi interni del sistema edilizio stesso da spazi esterni sottostanti.</p>	<p>Solai su spazi aperti</p>
	<p><u>Chiusura superiore</u></p>	<p>Coperture</p>

	Insieme degli elementi tecnici orizzontali del sistema edilizio avente funzione di separare gli spazi interni del sistema edilizio stesso dallo spazio esterno sovrastante.	Infissi esterni orizzontali
<u>Partizione interna</u> Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio avente funzione di dividere e conformare gli spazi interni del sistema edilizio stesso.	<u>Partizione interna verticale</u> Insieme degli elementi tecnici verticali del sistema edilizio avente funzione di dividere ed articolare gli spazi interni del sistema edilizio stesso.	Pareti interne verticali Infissi interni verticali Elementi di protezione
	<u>Partizione interna orizzontale</u> Insieme degli elementi tecnici orizzontali del sistema edilizio avente funzione di dividere ed articolare gli spazi interni del sistema edilizio stesso.	Solai Soppalchi Infissi interni orizzontali
	<u>Partizione interna inclinata</u> Insieme degli elementi tecnici del sistema edilizio con giacitura prossima all'orizzontale avente funzione di articolare gli spazi interni connessi del sistema edilizio stesso, collegando spazi posti a quote diverse.	Scale interne Rampe interne
<u>Partizione esterna</u> Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio avente funzione di dividere e conformare gli spazi esterni connessi con il sistema edilizio stesso.	<u>Partizione esterna verticale</u> Insieme degli elementi tecnici verticali del sistema edilizio avente funzione di dividere ed articolare gli spazi esterni connessi con sistema edilizio stesso.	Elementi di protezione Elementi di separazione
	<u>Partizione esterna orizzontale</u> Insieme degli elementi tecnici orizzontali del sistema edilizio avente funzione di dividere ed articolare gli spazi esterni connessi con sistema edilizio stesso.	Balconi e logge Passerelle
	<u>Partizione esterna inclinata</u> Insieme degli elementi tecnici del sistema edilizio	Scale esterne Rampe esterne

	con giacitura prossima all'orizzontale avente funzione di articolare gli spazi esterni connessi del sistema edilizio stesso, collegando spazi posti a quote diverse.	
<u>Impianto di fornitura servizi</u> Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio avente funzione di consentire l'utilizzazione di flussi energetici, informativi e materiali richiesti dagli utenti e di consentire il conseguente allontanamento degli eventuali prodotti di scarto.	<u>Impianto di climatizzazione</u> Insieme degli elementi tecnici del sistema edilizio avente funzione di creare e mantenere negli spazi interni del sistema edilizio stesso determinate condizioni termiche, di umidità e di ventilazione.	Alimentazione Gruppi termici Centrali di trattamento fluidi Reti di distribuzioni e terminali Reti di scarico condensa Canne di esalazione
	<u>Impianto idrico-sanitario</u> Insieme degli elementi tecnici del sistema edilizio avente funzione di addurre, distribuire e consentire l'utilizzazione di acqua nell'ambito degli spazi interni del sistema edilizio stesso e degli spazi esterni connessi.	Allacciamenti Macchine idrauliche Accumuli Riscaldatori Reti di distribuzione acqua fredda e terminali Reti di distribuzione acqua calda e terminali Reti di ricircoli dell'acqua calda Apparecchi sanitari
	<u>Impianto di smaltimento liquidi</u> Insieme degli elementi tecnici del sistema edilizio avente funzione di allontanare le acque usate e le acque meteoriche fino alle reti esterne di allontanamento.	Reti di scarico acque fecali Reti di scarico domestiche Reti di scarico meteoriche Reti di ventilazione secondaria
	<u>Impianto di smaltimento aeriformi</u> Insieme degli elementi tecnici del sistema edilizio avente funzione di allontanare flussi aeriformi raccolti dagli spazi interni del sistema edilizio stesso.	Alimentazione Macchine Reti di canalizzazione
	<u>Impianto di smaltimento solidi</u> Insieme degli elementi tecnici del sistema edilizio avente funzione di allontanare rifiuti solidi, accumulandoli per la rimozione.	Canne di caduta Canne di esalazione

	<p><u>Impianto di distribuzione gas</u> Insieme degli elementi tecnici del sistema edilizio avente funzione di addurre, distribuire domestici.</p>	<p>Allacciamenti Reti di distribuzione e terminali</p>
	<p><u>Impianto elettrico</u> Insieme degli elementi ed erogare combustibili gassosi per usi tecnici del sistema edilizio avente funzione di addurre, distribuire ed erogare energia elettrica per usi domestici.</p>	<p>Alimentazione Allacciamenti Apparecchiature elettriche Reti di distribuzione e terminali</p>
	<p><u>Impianto di telecomunicazioni</u> Insieme degli elementi tecnici del sistema edilizio avente funzione di distribuire ed erogare flussi informativi telefonici, citofonici e televisivi, nonché di comandare a distanza apparecchiature elettromeccaniche.</p>	<p>Alimentazione Allacciamenti Reti di distribuzione e terminali</p>
	<p><u>Impianto fisso di trasporto</u> Insieme degli elementi tecnici del sistema edilizio avente funzione di trasportare persone o cose.</p>	<p>Alimentazione Macchine Parti mobili</p>
<p><u>Impianto di sicurezza</u> Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio avente funzione di tutelare gli utenti e/o il sistema edilizio stesso a fronte di situazioni di pericolo.</p>	<p><u>Impianto antincendio</u> Insieme degli elementi tecnici del sistema edilizio avente funzione prevenire, eliminare, limitare o segnalare incendi.</p>	<p>Allacciamenti Rilevatori e trasduttori Reti di distribuzione e terminali Allarmi</p>
	<p><u>Impianto di messa a terra</u> Insieme degli elementi tecnici del sistema edilizio avente funzione di collegare ad un conduttore posto a potenziale nullo determinati punti elettricamente definiti.</p>	<p>Reti di raccolta Dispensori</p>
	<p><u>Impianto parafulmine</u> Insieme degli elementi tecnici del sistema edilizio avente funzione proteggere gli utenti ed il sistema edilizio stesso da scariche</p>	<p>Elementi di captazione Rete Dispensori</p>

	elettriche atmosferiche.	
	<u>Impianto antifurto ed antintrusione</u> Insieme degli elementi tecnici del sistema edilizio avente funzione prevenire, eliminare o segnalare intrusioni umane o di animali, indesiderate.	Alimentazione Rilevatori e trasduttori Rete Allarmi
<u>Attrezzatura interna</u> Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici connessi con il sistema edilizio avente funzione di consentire o facilitare l'esercizio di attività degli utenti negli spazi interni del sistema edilizio stesso.	<u>Arredo domestico</u> Insieme di elementi tecnici connessi con il sistema edilizio, quali mobilio o suppellettili, destinati ad attrezzare gli spazi interni.	Pareti contenitore (da definire)
	<u>Blocco servizi</u> Insieme di elementi tecnici connessi con il sistema edilizio, specializzati per fornire in forma aggregata servizi richiesti da particolari attività degli utenti.	(da definire)
<u>Attrezzatura esterna</u> Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici avente funzione di consentire o facilitare l'esercizio di attività degli utenti negli spazi esterni connessi con il sistema edilizio stesso.	<u>Arredi esterni collettivi</u> Insieme di elementi tecnici destinati ad attrezzare gli spazi aperti dei complessi insediativi residenziali.	(da definire)
	<u>Allestimenti esterni</u> Insieme di elementi tecnici destinati ad attrezzare e delimitare gli spazi aperti connessi con il sistema edilizio stesso.	Recinzioni Pavimentazione esterna

La classificazione riportata nella norma UNI 8290 deve essere ulteriormente approfondita in quanto l'elemento tecnico non è l'ultimo tassello della scomposizione tecnologica ed in relazione alla loro differenziata complessità tecnologica e funzionale, possono essere classificati in:

- Elemento tecnico o componente edilizio. E' un prodotto edilizio con differenti livelli di complessità capace di svolgere completamente o parzialmente funzioni proprie di una o più unità tecnologiche e che si configura come componente caratterizzante di una classe di elementi tecnici (es. muratura a "cappotto" per la classe delle Partizioni Esterne).

- Elemento semplice. E' un prodotto edilizio completamente definito nelle sue dimensioni (es. mattone, tavella).
- Semilavorato. E' un prodotto edilizio definito secondo due direzioni, che necessita di essere adattato dimensionalmente a piè d'opera (es. pannello sandwich).
- Materiale. E' un prodotto edilizio non definito dimensionalmente, che necessita di essere trasformato a piè d'opera (es. cemento, sabbia).

Per ciascuna parte funzionale dell'organismo edilizio, occorre, pertanto, primariamente individuare i requisiti che la connotano e per ciascuno di essi valutare la prestazione correlata svolta nel tempo cioè valutarne la durabilità. La conoscenza del mantenimento delle prestazioni nel tempo di un componente o elemento tecnico è di fondamentale importanza per la valutazione del decadimento funzionale del componente, di grande rilevanza per poterne programmare la sostituzione, oltre che obbligatoria con l'entrata in vigore del nuovo Regolamento (UE) n. 305/2011. Tale esigenza viene magistralmente espressa dal Maggi, secondo cui "i subsistemi tecnologici e gli elementi tecnici che li costituiscono devono resistere per un tempo definito, senza subire danni che possano pregiudicare le prestazioni caratteristiche (quelle progettate) di sicurezza e di benessere rispetto alle sollecitazioni indotte dai vari agenti di disturbo o di degrado" (Maggi, 1994). Si evince la necessità di contestualizzare il componente edilizio nel campo delle sollecitazioni tipiche delle particolari condizioni d'uso previste nel progetto. Ne discende, quindi, la necessità di rapportare il componente edilizio al cosiddetto sistema "Agenti-Azioni-Effetti" per il quale la norma UNI 8290 fornisce le seguenti definizioni:

- **Agente:** entità che provoca un determinato effetto mediante la propria azione. Gli agenti vengono considerati secondo le seguenti categorie:
  - Agente naturale: agente dovuto alle condizioni ambientali esterne al sistema edilizio non legate all'intervento dell'uomo;
  - Agente artificiale: agente dovuto alle condizioni ambientali esterne al sistema edilizio modificate dall'intervento dell'uomo;
  - Agente dovuto alla concezione (progettazione) degli edifici: agente indotto da scelte tipologiche e/o tecnologiche operate per ottenere determinati comportamenti di ambienti ed oggetti edilizi;
  - Agente dovuto all'utilizzazione (utenza) degli edifici: agente indotto dalle attività svolte nell'ambito degli organismi edilizi.
- **Azione:** mediatore fisico e/o chimico, capace di modificare l'ambiente e gli oggetti edilizi, nonché il loro comportamento.
- **Effetto:** modificazione del comportamento dell'ambiente e/o degli oggetti edilizi, conseguente ad un'azione determinata.
- **Fattore:** campo disciplinare di riferimento, utilizzato per conoscere ed interpretare la natura di azioni ed effetti, nonché per strumentarne il controllo. I fattori prevalentemente considerati nell'edilizia sono: acustici, atmosferici, biologici, chimici, elettrici ed elettromagnetici, idrici, ignei, luminosi, meccanici e termici.

Gli agenti di natura diversa (condizioni ambientali, scelte progettuali e attività degli utenti) inducono delle azioni (sollecitazioni) sugli oggetti edilizi che determinano effetti che ne modificano l'efficienza. Ciascuno degli agenti deve essere correlato ad uno o più fattori in modo da poterne individuare le azioni e gli effetti più significativi. L'intensità delle azioni e dei conseguenti effetti influenza in modo più o meno significativo la capacità di soddisfare i requisiti attribuiti nella fase di progetto all'oggetto edilizio. Il requisito di Durabilità viene definito dalla norma UNI 11156 come *“la capacità di un edificio o delle sue parti, di svolgere le funzioni richieste durante un periodo di tempo specificato, sotto l'influenza degli agenti prevista in esercizio”*<sup>11</sup>. Alla luce dei nuovi dettami normativi, risulta necessario attuare, durante la progettazione, il controllo della durabilità degli elementi tecnici attraverso l'adozione di prodotti edilizi a degrado conosciuto, coerente con l'obiettivo prefissato del tempo di durata. A questo fine occorre che la progettazione disponga di conoscenze adeguate sulle modalità di accadimento del degrado e sui cicli di vita degli oggetti edilizi. Il decadimento nel tempo delle prestazioni, però, avviene in maniera diversificata per ogni prestazione e per ogni componente o elemento ed in funzione degli effetti prodotti dal contesto sollecitante. Per questo motivo la valutazione della durabilità deve essere:

- condotta per elementi tecnici e per ogni prestazione tecnologica esplicitata dall'elemento tecnico;
- contestualizzata, per essere corrispondente alle reali condizioni d'uso e sollecitazione.

Le modalità di “caduta” prestazionale di un elemento tecnico, generalmente, avviene secondo due modalità distinte: una è caratterizzata da un passaggio repentino dallo stato di corretto funzionamento a quello di non funzionamento; l'altra è caratterizzata da una graduale riduzione di funzionamento. Nel primo caso il guasto è univocamente individuabile, nel secondo caso si ha l'esigenza di definire il livello di accettabilità del decadimento prestazionale per l'identificazione dello stato di guasto. Poiché le prestazioni tecnologiche fornite da un elemento tecnico facente parte di un organismo edilizio in un dato contesto sollecitante sono finalizzate a contribuire alla realizzazione di prestazioni ambientali necessarie alle attività previste, il limite di accettabilità di decadimento si può porre nel momento in cui la prestazione ambientale non è più soddisfacente. Di conseguenza il valore minimo di accettabilità della variazione di una singola prestazione tecnologica di un elemento tecnico non può essere univocamente determinato, ma è strettamente legato all'intensità delle sollecitazioni del contesto, previste per l'elemento tecnico. E' chiaro allora che *“non esiste durabilità con valore assoluto, come non esiste qualità con valore assoluto”*(Maggi, 2000), ma esistono valori relativi per il singolo organismo edilizio e per un determinato contesto di utilizzo e di sollecitazione.<sup>12</sup>

---

<sup>11</sup> UNI 11156-1:2006. La valutazione della durabilità dei componenti edilizi - Terminologia e definizione dei parametri di valutazione.

<sup>12</sup> Occorre, allora basarsi su procedure standardizzate, in particolare sulla serie di norme ISO 15686 e le UNI 11156.

## Bibliografia

- [1] Alaimo G., *L'affidabilità funzionale delle coperture discontinue*, Editecnica, Palermo, 2004.
- [2] Alaimo G., *Valutazione sperimentale della durabilità di coperture discontinue. Un'applicazione al pannello sandwich*, Editecnica, Palermo, 2006.
- [3] Auteri A., Maci E.L., *La qualità in edilizia*, Ente Cassa e Scuola Edile, Comitato Paritetico Territoriale Enna, 2000
- [4] Maggi P.N., *Il processo edilizio*, voll.1-2, CittàStudi, Milano, 1994.
- [5] Maggi P.N., *La qualità tecnologica dei componenti edilizi: la durabilità*, Epitesto, Milano, 2000.
- [6] Maggi P.N., *La qualità tecnologica dei componenti edilizi: la valutazione della durabilità*, Epitesto, Milano, 2001.
- [7] Maggi P.N., *Qualità e sostenibilità delle soluzioni tecniche nel progetto*, Quaderni del Politecnico di Milano, Milano, 2004.
- [8] Maggi P.N., *Qualità dimensionale nel progetto edilizio*, Quaderni del Politecnico di Milano, Milano, 2004.
- [9] Maggi P.N., Gottfried A., Morra L., *Qualità tecnologica dei prodotti complessi per l'edilizia*, Quaderni DISET vol.1, Società Editrice Esculapio, Bologna, 1992.
- [10] Daniotti B., *La durabilità in edilizia*, Cusl, Milano, 2009.
- [11] Documento Guida F (relativo alla Direttiva Prodotti da Costruzione 89/106/CEE): *Durabilità e direttiva dei prodotti da costruzione* (revisione dell'agosto 2002).
- [12] EOTA Guidance document, *Assessment of working life of products*, Guidance Document 003 - Edition December 1999.
- [13] EOTA Guidance document, *Assumption of working life of construction products in Guidelines for European Technical Approval, European Technical Approvals and Harmonized Standards*, Guidance Document 002 - Edition December 1999.
- [14] Turchini G., Moroni M., *La qualità*, in "Management per l'edilizia", a cura di Nicoletti B., DEI, Roma, 1994

## 2 METODI PER LA VALUTAZIONE DELLA DURABILITÀ

### 2.1 Le ultime novità in ambito normativo

Tra le novità introdotte dal Regolamento (UE) n. 305 del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 9 marzo 2011, che ha fissato le condizioni armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione, abrogando la Direttiva 89/106/CEE del Consiglio, la durabilità delle opere da costruzione è una delle più rilevanti. Infatti, oltre ai già citati sei requisiti essenziali che devono possedere le opere da costruzione e le loro parti, il Regolamento introduce un settimo requisito, denominato: *Uso sostenibile delle risorse naturali*. Per questo requisito, “le opere da costruzione devono essere concepite, realizzate e demolite in modo che l'uso delle risorse naturali sia sostenibile e garantisca in particolare:

- a) il riutilizzo o la riciclabilità delle opere da costruzione, dei loro materiali e delle loro parti dopo la demolizione;
- b) la durabilità delle opere da costruzione;
- c) l'uso, nelle opere da costruzione, di materie prime e secondarie ecologicamente compatibili.”<sup>14</sup>

Il nuovo Regolamento introduce alcune novità di rilievo per gli operatori economici coinvolti nella commercializzazione dei prodotti da costruzione: fabbricanti, mandatari, importatori, distributori. In particolare, dal 1° luglio 2013, i fabbricanti devono accompagnare i prodotti da costruzione non più con la dichiarazione di conformità, prevista dalla precedente Direttiva 89/106/CEE, ma con la dichiarazione di prestazione ed adeguare l'etichetta di marcatura CE. La documentazione tecnica e la dichiarazione di prestazione andranno conservate dal fabbricante per 10 anni dall'immissione del prodotto sul mercato. I fabbricanti dovranno garantire che la produzione in serie dei prodotti mantenga le prestazioni dichiarate attraverso procedure dettagliate e assicurarsi che i prodotti siano chiaramente identificabili. Il nominativo, la denominazione commerciale registrata (o il marchio) e l'indirizzo del fabbricante dovranno essere apposti sul prodotto, sul suo imballaggio e sul documento di accompagnamento. Il prodotto dovrà essere accompagnato da informazioni sulla sua sicurezza, in accordo a quanto stabilito dallo stato membro in cui immettono il prodotto. I prodotti che sono stati immessi sul mercato prima del 1° luglio 2013 potranno essere venduti dai distributori senza alcuna modifica alla documentazione di accompagnamento (Etichetta e Dichiarazione di Conformità) anche dopo tale data. I prodotti immessi sul mercato dopo il 1° luglio 2013 devono essere corredati di dichiarazione di prestazione e dovrà essere adeguata l'etichetta di marcatura CE. La dichiarazione di prestazione

---

<sup>14</sup> Il Regolamento n. 305/2011 è stato pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea del 4 aprile 2011 ed è entrato in vigore a partire dal ventesimo giorno dalla sua pubblicazione, su tutto il territorio degli Stati membri. Alcuni articoli, tra cui quelli contenenti le specifiche relative alla durabilità dei prodotti da costruzione, si applicano dal 1° luglio 2013.

dovrà contenere:

- il riferimento del prodotto-tipo per il quale la dichiarazione di prestazione è stata redatta;
- il sistema o i sistemi di valutazione e verifica della costanza della prestazione del prodotto da costruzione;
- il numero di riferimento e la data di pubblicazione della norma armonizzata o della valutazione tecnica europea usata per la valutazione di ciascuna caratteristica essenziale;
- se del caso, il numero di riferimento della documentazione tecnica specifica usata e i requisiti ai quali il fabbricante dichiara che il prodotto risponda;
- l'uso o gli usi previsti del prodotto, conformemente alla specifica tecnica armonizzata applicabile;
- l'elenco delle caratteristiche essenziali secondo quanto stabilito nella specifica tecnica armonizzata per l'uso o gli usi previsti dichiarati;
- la prestazione di almeno una delle caratteristiche essenziali pertinenti all'uso o agli usi previsti dichiarati.

La novità introdotta è di sostanziale impatto, infatti, mentre la dichiarazione di conformità attestava la conformità del prodotto ai requisiti di una norma tecnica armonizzata, con la dichiarazione di prestazione il fabbricante attesterà le prestazioni del prodotto in relazione alle caratteristiche essenziali, in modo conforme alle specifiche tecniche di riferimento per il prodotto, assumendosi la responsabilità sulle prestazioni dichiarate. Il Benestare Tecnico Europeo viene sostituito dalla Valutazione Tecnica Europea (European Technical Approval, ETA) che costituisce una valutazione documentata delle prestazioni di uno specifico prodotto da costruzione per un uso previsto. Un'ETA sarà rilasciata a prodotti per i quali:

- non esiste ancora una norma EN armonizzata;
- non esiste ancora una norma nazionale riconosciuta;
- non esiste ancora un Mandato per una norma EN;
- a giudizio della Comunità Europea, non possa ancora essere elaborata una norma EN;
- c'è una deviazione significativa dallo scopo di un'EN armonizzata o di una norma nazionale riconosciuta;
- esiste una deroga da parte della Comunità Europea, anche in presenza di un Mandato per una norma EN.

Nell'ambito del settimo requisito dei prodotti da costruzione, il fabbricante dovrà espressamente dichiarare la sostenibilità del prodotto, nella dichiarazione di prestazione, indicando, se del caso, l'impiego delle materie prime e/o semilavorati dal punto di vista non soltanto ambientale, ma anche sociale, economico e tecnico. L'applicazione di questo requisito non sarà immediata, ma demandata all'emanazione di specifiche norme armonizzate che detteranno i criteri per una valutazione oggettiva della sostenibilità dei prodotti. Nell'ambito della sostenibilità dei prodotti da costruzione, cui il nuovo Regolamento si riferisce, la durabilità

diventa uno degli aspetti di maggior rilievo. La valutazione della durabilità dei componenti edilizi rappresenta, pertanto, una fase necessaria per la valutazione della durabilità degli edifici, a partire dalle prime fasi della progettazione, per la programmazione gestionale dell'intervento e quindi, per l'identificazione dei costi relativi al Ciclo di Vita, giungendo fino alla definitiva dismissione o demolizione. La valutazione della durabilità ha lo scopo di ottimizzare le scelte progettuali, in modo che i sub-sistemi tecnologici e gli elementi tecnici resistano alle sollecitazioni indotte dai vari agenti sollecitanti per un tempo definito e conosciuto, senza subire alterazioni tali da compromettere le prestazioni caratteristiche. L'andamento nel tempo dei livelli prestazionali può essere rappresentato su base statistica da una distribuzione di probabilità intorno al valore più probabile della prestazione, in quanto la fase di produzione può garantire livelli prestazionali non deterministici ed univoci, ma variabili in un intorno accettabile (Fig. 2.1).

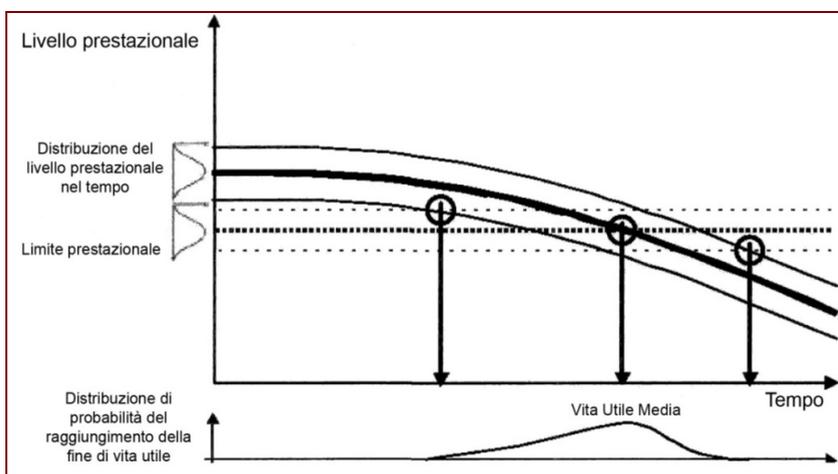


Figura 2.1 L'andamento del livello prestazionale di un componente edilizio su base statistica (Daniotti, 2009)

L'intersezione tra la curva probabilistica che rappresenta il livello prestazionale e il limite prestazionale fissato, anch'esso definito su base probabilistica come funzione di densità, permette di determinare una distribuzione di densità probabilistica relativa alla fine della Vita Utile. Volendo rappresentare questa funzione separatamente, essa presenta come punti significativi il valore medio di vita utile, come valore maggiormente probabile, e la deviazione standard. L'area sottesa dalla curva fino al tempo  $t_i$  rappresenta la probabilità che non venga raggiunto il valore  $t_i$  e rappresenta la probabilità di guasto (Fig. 2.2).

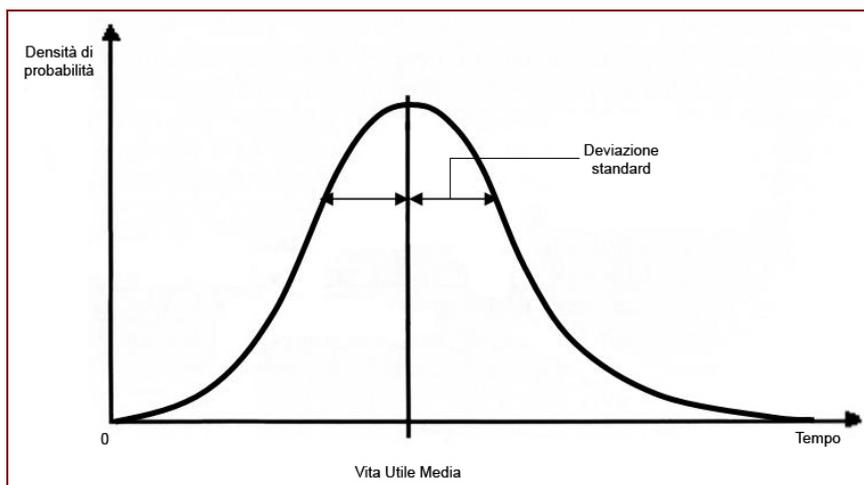


Figura 2.2 Densità di probabilità relativa alla Vita Utile (Daniotti, 2009)

Le componenti che definiscono il requisito di durabilità, secondo la norma UNI 10838<sup>15</sup>, sono la durata (vita utile) e l'affidabilità. *La Vita Utile* è il periodo di tempo durante il quale le prestazioni del componente, dopo la sua installazione, si mantengono superiori o uguali ad un livello di accettazione (tempo in cui vengono soddisfatti i sette requisiti essenziali posti dal Regolamento 305/2011) e può essere determinata sotto forma di dato deterministico oppure come distribuzione di probabilità (attraverso il valor medio e la deviazione standard). La norma ISO 15686-1 indica i tempi consigliati ai progettisti per procedere ad una progettazione che garantisca la durabilità delle opere da costruzione (Tabella 2.1).

Tabella 2.1. Durata minima di progetto consigliata per componente edilizio (ISO 15686-1)

Durata prevista dell'opera	Componenti inaccessibili o strutturali	Componenti difficilmente sostituibili	Componenti sostituibili	Componenti impiantistici
Illimitata	Illimitata	100	40	25
100	100	100	40	25
60	60	60	40	25
25	25	25	25	25
15	15	15	15	15
10	10	10	10	10

*L'affidabilità* (alla durata) è la probabilità che l'elemento tecnico mantenga sensibilmente invariata nel tempo la propria qualità, secondo definite condizioni d'uso ovvero la probabilità che il sistema o l'elemento funzioni senza guastarsi ad un livello predisposto, per un certo tempo  $t$  e in predeterminate condizioni ambientali. Un altro importante parametro che concorre alla determinazione

<sup>15</sup> UNI 10838:1999. Edilizia - Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia.

dell'affidabilità è il *tasso di guasto* o affidabilità istantanea, che indica per un campione significativo di elementi omogenei, il numero di guasti nell'unità di tempo. Di questi tre parametri sono necessari almeno i primi due per la stima della durabilità, e quindi per un'adeguata progettazione e programmazione degli interventi di manutenzione degli edifici. La durabilità dell'opera da costruzione dipende anche dagli errori progettuali e dalle modalità di posa in opera dei componenti tecnici e dei materiali perché l'incompatibilità chimica/fisica tra componenti tecnici e la non corretta connessione tra le diverse soluzioni tecniche, potrebbero causare il degrado precoce di una delle parti interessate. Per una corretta valutazione della durabilità degli elementi tecnici, bisognerebbe verificare sperimentalmente i loro comportamenti nel tempo nelle condizioni ambientali e d'uso prevedibili, ciò implicando monitoraggi e indagini sperimentali adeguatamente organizzate su campioni sufficientemente rappresentativi. Per portare avanti questo approccio, i tempi di queste indagini sarebbero troppo lunghi. Pertanto, si ricorre ad una metodologia alternativa e standardizzata dalla serie di norme ISO 15686 ed UNI 11156 che prevedono la valutazione della durabilità attraverso la valutazione della durata o vita utile attraverso prove sperimentali condotte su campioni rappresentativi dell'elemento tecnico considerato, esposti agli agenti naturali ed a prove di invecchiamento accelerato in laboratorio. Inoltre, si procede contestualmente alla valutazione dell'affidabilità, che viene stimata attraverso un metodo teorico che prevede il confronto tra elementi di una serie di soluzioni tecniche della stessa classe considerati fuori sistema e fuori contesto.

## **2.2 La previsione della Vita Utile dei componenti edilizi**

La norma UNI 11156-3 descrive una metodologia generale di valutazione della durabilità, distinguendo la valutazione della vita utile in condizioni di riferimento (Reference Service Life, nel seguito RSL) e la valutazione della vita utile stimata (Estimated Service Life, nel seguito ESL), cioè la vita utile dell'edificio o delle sue parti prevista in definite condizioni d'uso, calcolata correggendo le condizioni di riferimento in funzione di materiali, progetto, ambiente, condizioni d'uso e manutenzione<sup>16</sup>. La valutazione della ESL viene eseguita attraverso una metodologia basata sui seguenti step progressivi, rappresentati in Fig. 2.3.

---

<sup>16</sup> UNI 11156-3:2006. *La valutazione della durabilità dei componenti edilizi - Metodologia di valutazione della durata (vita utile).*

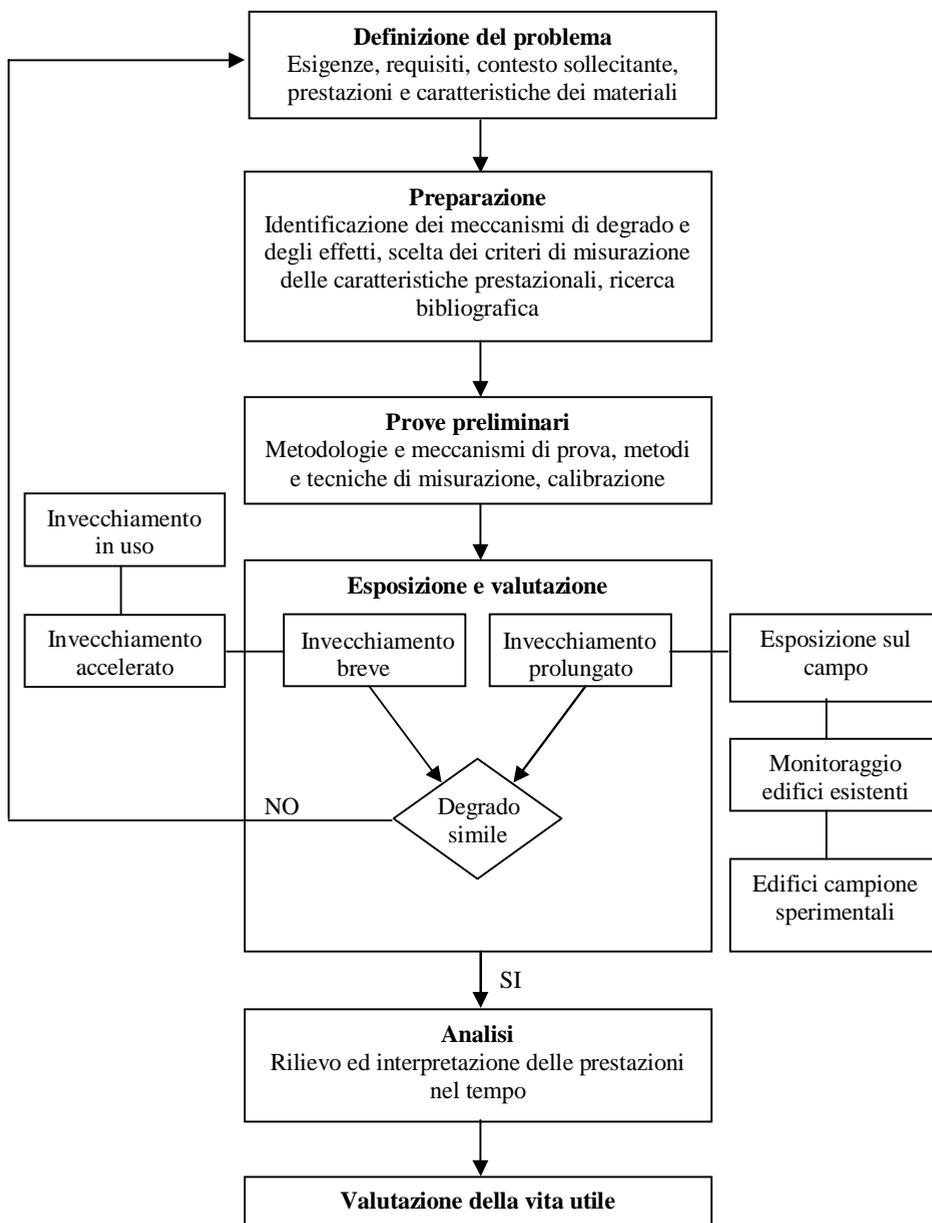


Figura 2.3 Metodo di valutazione della vita utile di un componente edilizio (ISO 15686-1 ed UNI 11156-3)

1) Definizione delle esigenze degli utenti, dei requisiti tecnologici connotanti l'elemento tecnico, del contesto sollecitante (tipo e intensità degli agenti), delle prestazioni richieste e caratterizzazione dei materiali. In prima istanza, bisogna definire il livello di approfondimento dello studio e la norma descrive i due casi estremi: Studio specifico in cui viene valutata la vita utile dell'elemento tecnico in definite condizioni ambientali e di uso di riferimento, per la verifica di fissate specifiche prestazionali e Studio generale in cui viene definito un modello di comportamento nel tempo dell'elemento tecnico idoneo per valutarne la vita utile in diverse condizioni ambientali di sollecitazione e di uso, sulla base dell'indicazione di specificazioni prestazionali. Per la caratterizzazione dell'elemento tecnico si procede con la definizione delle caratteristiche funzionali dell'elemento tecnico mediante il metodo dell'analisi funzionale.

2) Preparazione cioè identificazione dei meccanismi di degrado e degli effetti, scelta dei criteri di misurazione per le caratteristiche funzionali e delle prestazioni tecnologiche, ricerca bibliografica. Nel considerare gli agenti di degrado, si può fare riferimento alla norma UNI 8290-3<sup>17</sup>, e in base ai meccanismi di degrado indotti dagli agenti, si individuano le caratteristiche funzionali che possono essere soggette a decadimento prestazionale. Quindi vengono sviluppate le procedure di invecchiamento (naturale ed artificiale) basate sulla simulazione degli agenti sollecitanti individuati rappresentativi del contesto d'uso.

3) Prove preliminari per valutare le metodologie di prova e le tecniche di misurazione delle caratteristiche funzionali. Sulla base delle informazioni dedotte dalla fase di preparazione, si sviluppano le specifiche procedure di invecchiamento, tali da indurre il degrado del componente analizzato. Le prove preliminari sono necessarie soltanto quando le procedure di invecchiamento non sono già state sperimentate e vengono eseguite al fine di stabilire i livelli di intensità degli agenti, contribuire ad una migliore comprensione della natura dei fenomeni di degrado, verificare la fattibilità delle prove, stabilire gli agenti di degrado, dimostrare la comparsa dei meccanismi di degrado.

4) Esposizione e misurazione è la fase in cui si svolgono le prove d'invecchiamento, sia naturale che accelerato, e si misurano gli effetti degli agenti sui componenti edilizi (degradi). I programmi di esposizione possono essere di due tipi:

- esposizione in esterno a lungo termine, che può consistere in una esposizione in esterno di campioni di prova, ispezioni su edifici esistenti, esposizione in edifici sperimentali ed esposizioni in condizioni d'uso;
- esposizione a breve termine dove i campioni vengono sottoposti in laboratorio a cicli di invecchiamento accelerato, rappresentanti l'involuppo degli agenti di degrado ritenuti significativi ovvero esposizioni a breve termine in condizioni d'uso.

---

<sup>17</sup> UNI 8290-3:1987. Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Analisi degli agenti

5) Analisi ed interpretazione dei risultati è il momento in cui analizzando i risultati ottenuti attraverso il programma sperimentale, in termini di decadimento delle caratteristiche prestazionali nel tempo, per confronto tra i dati ottenuti dall'esposizione all'invecchiamento accelerato in laboratorio e naturale in esterno, viene valutata la vita utile di un componente in determinate condizioni di sollecitazione. La procedura per la valutazione della vita utile prevede che si desumano, dai risultati dell'attività sperimentale, le funzioni di decadimento nel tempo delle prestazioni,  $P(t)$ , per le specifiche condizioni di prova. Attraverso queste funzioni di decadimento, si introducono i limiti prestazionali per l'elemento tecnico e si calcola la vita utile. Questa procedura, meglio nota come *rescaling temporale*, consente per confronto tra i risultati delle misurazioni delle prestazioni attraverso le prove di invecchiamento accelerato e le prove di invecchiamento naturale, di pervenire alla previsione della vita utile del componente tecnico indagato. Se le condizioni di esposizione utilizzate non corrispondono alle condizioni reali d'uso, devono essere adeguate alle nuove condizioni le funzioni di decadimento, attraverso procedure di interpolazione ovvero adottando i seguenti metodi di valutazione della vita utile in condizioni di progetto:

- metodo fattoriale;
- metodi stocastici o probabilistici;
- metodi ingegneristici.

Il *metodo fattoriale* è un metodo semplificato che consente di determinare la vita utile in opera correggendo la RSL attraverso sette fattori moltiplicativi (generalmente compresi tra 0,8 e 1,2) che tengono conto delle condizioni specifiche di contesto e d'uso del componente tecnico. I *metodi stocastici* sono metodi che si basano sull'analisi statistica del contesto sollecitante e del comportamento dei materiali. Si tratta di metodi complessi ed onerosi per la grande quantità di dati necessari e per la loro necessaria affidabilità, risultano quindi vantaggiosamente applicabili solamente per progetti di grandi dimensioni. I *metodi ingegneristici* sono caratterizzati da un grado di difficoltà ancor più elevato dei metodi stocastici, per la complessità dei dati in ingresso necessari e per i metodi di calcolo utilizzati. Nel seguito, viene ampiamente trattato il metodo fattoriale e le più recenti innovazioni apportate al metodo, mediante le griglie-guida e l'evoluzione del metodo stesso, il cosiddetto metodo fattoriale evoluto.

#### *Il metodo fattoriale*

Il metodo fattoriale consente la valutazione della vita utile stimata attraverso il valore della vita utile di riferimento e per mezzo di sette fattori moltiplicativi, secondo la seguente formula:

$$ESL = RSL \times A \times B \times C \times D \times E \times F \times G$$

Il valore della RSL può essere calcolato attraverso la procedura di stima della vita utile sintetizzata in Fig. 2.1 e descritta precedentemente, avendo particolare cura nello stabilire le condizioni di riferimento, ovvero attraverso dati riportati dai fabbricanti per la marcatura CE del componente tecnico. I sette fattori moltiplicativi tengono conto delle specificità del componente tecnico indagato, del contesto in cui si trova ad operare e dell'uso che viene fatto del componente stesso,

secondo la seguente articolazione.

Il fattore A tiene conto della qualità del componente, in termini di:

- tipo di materiale;
- tipo e controlli in fase di fabbricazione;
- condizioni di stoccaggio e di trasporto.

Il fattore B riguarda la qualità di progettazione, in particolare:

- dettagli costruttivi;
- coordinamento tra progettisti;
- integrazione con gli impianti;
- giunti;
- strati protettivi;
- scelta di materiali a seconda delle zone di impiego;
- incompatibilità chimica di metalli o presenza di sostanze deterioranti su materiali lapidei;
- completezza dell'informazione a disposizione del progettista (dati climatici, indagini geognostiche, chiarezza della committenza nel chiarire le proprie necessità);
- previsione di modifiche future.

Il fattore C considera la qualità di esecuzione e nello specifico:

- condizioni in cantiere (progetto del cantiere, programma dei lavori, aree di stoccaggio, sicurezza, condizioni di approvvigionamento, mezzi di movimentazione, numero di subappalti, certificazione ISO dell'impresa);
- qualità generale dell'esecuzione (sistemi di tracciamento e tecnologie utilizzate, controlli di accettazione dei prodotti in cantiere, controlli a fine lavori delle opere eseguite);
- qualità della manodopera (formazione ed informazione, quantità sufficiente ed adeguata di manodopera per la lavorazione, adeguata turnazione e condizioni di affaticamento, complessità intrinseca della lavorazione).

Il fattore D riguarda l'ambiente interno, considerando:

- temperatura ed umidità relativa previste;
- condizioni di ventilazione;
- presenza di sostanze chimiche aggressive.

Il fattore E tiene conto dell'ambiente esterno ossia il contesto climatico in cui si trova ad operare il componente tecnico:

- precipitazioni medie;
- ventosità e nevosità;
- temperature medie stagionali;
- presenza di edifici alti o bassi al contorno;
- viabilità;
- orientamento elio-termico;
- altezza dell'edificio;
- quota di posa dell'elemento;
- rientri e sporgenze.

Il fattore F considera il tipo di utilizzo e l'utenza:

- usi consentiti;
- presenza di bambini.

Il fattore G tiene conto del livello di manutenzione, in particolare:

- accessibilità;
- ispezionabilità;
- punibilità;
- manutenibilità.

Sinteticamente i sette fattori moltiplicativi sono individuati e caratterizzati in Tabella 2.2.

Tabella 2.2. Fattori moltiplicativi per l'applicazione del metodo fattoriale (UNI 1156-3)

AGENTI		ESEMPI DI CONDIZIONI RILEVANTI	
Agenti legati alla qualità intrinseca del componente	A	Qualità del componente	Fabbricazione, stoccaggio, trasporto, ecc.
	B	Qualità di progettazione	Protezioni da altre parti dell'edificio
	C	Qualità di esecuzione	Qualità della manodopera, condizioni climatiche durante l'installazione
Ambiente	D	Ambiente interno	Aggressività dell'ambiente, ventilazione, condensazione
	E	Ambiente esterno	Altezza dell'edificio, micro-ambiente
Utilizzo	F	Condizioni d'uso	Impatti meccanici, tipologia di utenza, ecc.
	G	Livello di manutenzione	Qualità e frequenza della manutenzione, accessibilità, ecc

Il metodo è di semplice applicazione, adatto per stime di massima, che comunque risulta di scarsa affidabilità per la soggettività nell'attribuzione dei valori ai fattori moltiplicativi, generalmente compresi tra 0.8 e 1.2, per il calcolo della vita utile di progetto, che può portare a notevoli differenze nella stima finale (Hovde, 1998). Valori più alti o più bassi possono essere assegnati sulla base di situazioni specifiche, così come possono essere attribuiti pesi diversi sulla base dell'importanza attribuita all'aspetto espresso da quel parametro. Al fine di limitare questa soggettività e rendere il metodo più rispondente alla complessità dei fenomeni di invecchiamento dei componenti edilizi analizzati, diversi studi hanno proposto un'evoluzione di tipo semiprobabilistico, definendo un "metodo fattoriale evoluto" associando ad ogni valore deterministico del generico fattore, una distribuzione di probabilità, per giungere ad una distribuzione probabilistica dell'ESL. Negli ultimi anni sono state proposte anche griglie-guida prestazionali, quali strumenti per guidare il progettista nella corretta attribuzione dei valori ai fattori moltiplicativi.

#### *Le griglie-guida*

Il principio ispiratore di questo filone di ricerca, avviato dal Dipartimento BEST

del Politecnico di Milano a partire dai primi anni del 2000, è basato sulla suddivisione di ogni fattore in più sub-fattori, in modo da rendere meno soggettiva l'attribuzione del valore numerico del fattore, ma farla derivare da principi più oggettivi. Vengono così a comporsi griglie di valutazione, una per ciascun fattore, che costituiscono un supporto per il progettista alla stima del valore del fattore stesso. La base scientifica di questa impostazione, per la definizione dei valori dei sub-fattori, prevede l'utilizzo di standard normativi o procedure diffuse di progettazione. La metodologia per la redazione di una griglia-guida relativa ad un componente edilizio, sulla scorta della metodologia proposta dalla norma ISO 15686, si basa sulla individuazione dei fattori in grado di influenzarne la vita utile, attraverso l'analisi del quadro agenti-azioni-effetti. L'individuazione degli agenti di degrado a cui presumibilmente il componente tecnico sarà soggetto durante la sua vita utile, è basata sulla norma ISO 6241:1984. Successivamente si procede con l'individuazione delle azioni che questi agenti svilupperanno e infine con la definizione dei possibili effetti, senza trascurare gli agenti caratterizzati da bassa intensità, ma con una ciclicità e/o durata che potrebbero rendere critici i loro effetti nel tempo. Questi effetti saranno tradotti in parametri misurabili mediante metodi standardizzati, portando alla definizione di ciascun sub-fattore. La fase successiva è quella di assegnare i valori ai sub-fattori individuati, attraverso un'analisi prestazionale del componente tecnico, basata possibilmente su standard che individuino, per ciascun sub-fattore, una scala di valutazione delle stesse prestazioni. Si ottengono così le griglie-guida per la valutazione dei sub-fattori, ciascuna delle quali rappresenta una funzione (Fig. 2.4) o classi di prestazioni, da cui desumere il valore del sub-fattore da applicare.

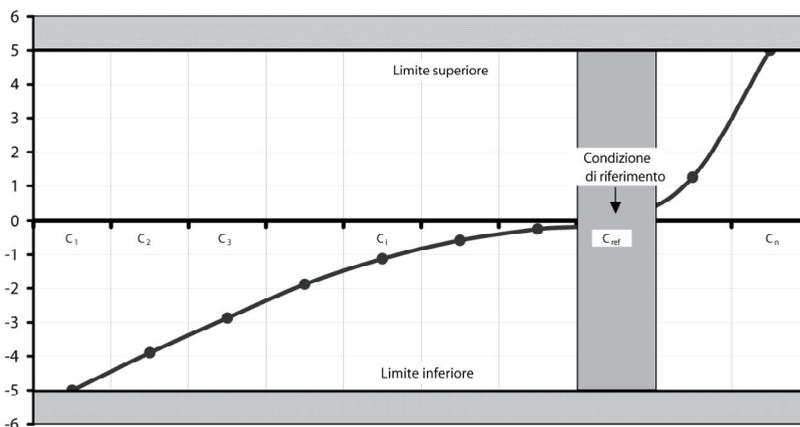


Figura 2.4 Esempio di griglia-guida (Re Cecconi, 2005)

Ci sono delle costanti nella realizzazione delle griglie di valutazione:

- il valore zero individua le condizioni di riferimento;
- sono basate su funzioni monotone (crescenti o decrescenti);
- i limiti del campo dei valori ammissibili sono, convenzionalmente, -5 e +5.

Definiti i sub-fattori, si procede all'attribuzione del peso di ciascun sub-fattore sulla base di considerazioni che tengono conto dell'ambiente, delle condizioni

d'uso, dell'utenza, etc. Al fine di relazionare ogni sub-fattore agli altri, si fa uso di matrici di confronto a coppie, come quella riportata in Fig. 2.5, che consentono di definire l'equivalenza tra fattori o le priorità di uno rispetto all'altro, secondo una metodologia che è correntemente applicata anche in ambiti diversi da quelli della valutazione della durabilità dei componenti edilizi<sup>18</sup>. Dalla somma dei punteggi ottenuti, si perviene ad una classifica dei sub-fattori, che verrà poi tradotta in una scala da 0 a 1.

	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>		a <sub>i</sub>		a <sub>n</sub>
a <sub>1</sub>						
	a <sub>2</sub>			a <sub>i</sub> <sup>j</sup>		
		a <sub>3</sub>				
					a <sub>n-1</sub>	

a<sub>i</sub> = sub-fattore  
j = valore del sub-fattore

Figura 2.5 Una matrice di confronto a coppie

Il confronto tra due sub-fattori può dar luogo a tre condizioni diverse:

- l'equivalenza tra i due sub-fattori, caratterizzata dall'apice 1 per entrambi i sub-fattori;
- la priorità di uno sull'altro, caratterizzata dall'apice 2 per il sub-fattore di maggior peso;
- l'alta priorità di uno sull'altro, caratterizzata dall'apice 3 per il sub-fattore di maggior peso.

Dalla somma dei valori ottenuti per ciascun sub-fattore, si perviene ad un valore per ciascun sub-fattore, che deve essere poi tradotto in una scala da 1 a 10, che rappresenta il peso relativo del sub-fattore rispetto agli altri,  $W_i$ . Per ottenere il valore finale del fattore, occorre stabilire, riferendosi alla funzione o classe di prestazione scelta (come nell'esempio in Fig. 2.5), il valore della prestazione,  $V_i$ , esplicita dal componente tecnico. Per ogni sub-fattore, il valore della prestazione,  $V_i$ , può risultare maggiore, uguale o minore di zero, a seconda che il componente di progetto offra prestazioni migliori, uguali o peggiori di quelle del componente di riferimento. Il valore del fattore suddiviso in  $n$  sub-fattori si ottiene attraverso la media ponderata dei valori,  $V_i$ , delle prestazioni sulla base dei pesi,  $W_i$ , dedotti dalla matrice di confronto a coppie, attraverso la formula seguente:

$$Fattore = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \cdot W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Il valore così ottenuto deve essere convertito nella scala propria per il metodo fattoriale che ha nell'unità la condizione di riferimento tipica, secondo quanto

<sup>18</sup> La normativa sui lavori pubblici in Italia prevede (DPR 207/2010), nella scelta del contraente per l'affidamento di una gara d'appalto, il criterio dell'offerta economicamente più vantaggiosa che si basa, ai sensi dell'Allegato M al decreto stesso, sull'utilizzo di matrici di confronto a coppie.

previsto dalla norma ISO 15686-1, per cui il valore di ogni fattore deve essere compreso nel range 0.8 / 1.2 e non -5 / +5. Il contributo al filone di ricerca delle griglie-guida è stato dato in relazione al componente edilizio: pannello sandwich (Alaimo & Enea, 2012). Lo studio ha riguardato la scomposizione dei sette fattori indipendenti in altrettante sette griglie-guida, una per ciascun fattore, pervenendo all'individuazione dei sub-fattori e alla definizione di griglie-guida. (Tabella 2.3-2.9)

Tabella 2.3 La griglia-guida per il fattore A riferita al pannello sandwich

<i>Sub-fattori del Fattore A: Qualità del componente</i>					
<b>Sub-fattore</b>		<b>Normativa</b>	<b>Classe o livello</b>	<b>Caratteristiche</b>	<b>Coefficiente</b>
a <sub>1</sub>	Deformazioni in specifiche cond. di carico	UNI EN 13165	livello 1	DLT (1)	0,9
			livello 2	DLT (2)	1,0
			livello 3	DLT (3)	1,1
a <sub>2</sub> *	Densità	UNI 10386	classe 1	34-38 kg/m <sup>3</sup>	1,0
			classe 2	39-42 kg/m <sup>3</sup>	1,1
			classe 3	≥ 42 kg/m <sup>3</sup>	1,2
a <sub>3</sub>	Gestione della qualità	Regolamento UE 305/2011	autocertificazione		0,9
			marcatura CE		1,0
a <sub>4</sub>	Reazione al fuoco	EN 13501-1	Euroclasse E		0,8
			Euroclasse D		0,9
			Euroclasse C		1,0
			Euroclasse B		1,1
a <sub>5</sub>	Resistenza a compressione	UNI EN 13165	classe 1	R <sub>c</sub> ≤ 130 kPa	0,9
		UNI 10386	classe 2	130 < R <sub>c</sub> < 175 kPa	1,0
			classe 3	175 ≤ R <sub>c</sub> ≤ 250 kPa	1,1
			classe 4	R <sub>c</sub> > 250 kPa	1,2
a <sub>6</sub> *	Resistenza a trazione	UNI EN 13165	classe 1	R <sub>tr</sub> < 100 kPa	0,8
		UNI 10386	classe 2	100 ≤ R <sub>tr</sub> ≤ 120 kPa	0,9
			classe 3	120 < R <sub>tr</sub> < 150 kPa	1,0
			classe 4	150 ≤ R <sub>tr</sub> ≤ 160 kPa	1,1
			classe 5	R <sub>tr</sub> > 160 kPa	1,2
a <sub>7</sub>	Resistenza alla corrosione	ISO 9227	base		0,9
		UNI EN ISO	intermedia		1,0

		6988	alta		1,1
a <sub>8</sub>	Stabilità dimensionale	UNI EN 13165	livello DS(TH) 1-3		0,9
			livello DS(TH) 4-6		1,0
			livello DS(TH) 7-9		1,1
			livello DS(TH) 10-12		1,2
a <sub>9</sub>	Permeabilità all'acqua	UNI EN 14509	classe C	≥ 300 Pa	0,9
			classe B	≥ 600 Pa	1,0
			classe A	≥ 1200 Pa	1,1
a <sub>10</sub>	Trasmittanza	D.Lgs. 192/2005	$U > U_{lim}^{2009}$		0,8
			$U > U_{lim}^{2010}$		0,9
			$U \leq U_{lim}^{2009}$		1,0
			$U \leq U_{lim}^{2010}$		1,1
a <sub>11</sub> *	Variazione del colore	ASTM D-2244	$\Delta E^*_{ab} > 8$		0,8
			$5 \leq \Delta E^*_{ab} \leq 8$		0,9
			$\Delta E^*_{ab} < 5$		1,0

Tabella 2.4 Valori del fattore B riferito al pannello sandwich

<i>Coefficienti del Fattore B: Qualità della progettazione</i>	<b>Coefficiente</b>
Progettazione non certificata o assente	<b>0,9</b>
Progettazione in base alla norma UNI 10372 (par. 5)	<b>1,0</b>

Tabella 2.5 La griglia-guida per il fattore C riferita al pannello sandwich

<i>Sub-fattori del Fattore C: Qualità di esecuzione</i>			<b>Coefficiente</b>
<b>Sub-fattore</b>			
c <sub>1</sub>	Modalità di esecuzione	Nessuna garanzia per l'esecuzione	<b>0,9</b>
		Esecuzione secondo UNI 10372 (par. 9) o raccomandazioni AIPPEG (all. C)	<b>1,1</b>
c <sub>2</sub>	Manodopera	Non specializzata	<b>0,9</b>
		Specializzata (patentino)	<b>1,0</b>

Tabella 2.6 Valori del fattore D riferito al pannello sandwich

<i>Coefficienti del Fattore D: Ambiente interno</i>		
<b>Tipo ambiente</b>	<b>Esempio</b>	<b>Coefficiente</b>
Molto aggressivo (alta aggressività chimica e operazioni di pulizia con prodotti con pH tra 5 e 9, una volta al giorno)	aziende zootecniche, cartiere, fungaie	<b>0,8</b>
Aggressivo (aggressività chimica e operazioni di pulizia con prodotti con pH tra 5 e 9, non più di una	cucine, bagni, piscine	<b>0,9</b>

volta al giorno)		
Medio aggressivo (aggressività chimica bassa e operazioni di pulizia con prodotti con pH tra 5 e 9, non più di una volta alla settimana)	industrie alimentari con processi secchi	<b>1,0</b>
Poco aggressivo (nessuna aggressività chimica e operazioni di pulizia con prodotti neutri non più di una volta alla settimana)	cinema, teatri, palazzetti	<b>1,1</b>
Non aggressivo (nessuna aggressività chimica e operazioni di pulizia con prodotti neutri non più di una volta al mese)	residenze, scuole, uffici	<b>1,2</b>

Tabella 2.7 La griglia-guida per il fattore E riferita al pannello sandwich

<i>Sub-fattori del Fattore E: Ambiente esterno</i>				
Sub-fattore		Normativa	Classe o livello	Coefficiente
e <sub>1</sub>	Classe di pioggia	ISO 15686-7	molto umido	0,8
			umido	0,9
			sub-umido	1,0
			secco	1,1
e <sub>2</sub>	Tipo di ambiente	ISO 15686-7	marino	0,8
		UNI EN 10169-2	industriale	0,9
			urbano	1,0
			rurale	1,1
e <sub>3</sub>		ISO 15686-7	A	0,8
			B	0,9
			C	1,0
			regioni montane sopra i 1000m	1,1
e <sub>4</sub>	Zona di vento	D.M.14/01/2008	9	0,8
			8	0,9
			4-7	1,0
			3	1,1
			1-2	1,2

Tabella 2.8 Valori del fattore F riferito al pannello sandwich

<i>Coefficienti del Fattore F: Condizioni d'uso</i>	
Tipo di urto	Coefficiente
frequente da corpo duro	<b>0,8</b>
frequente da corpo molle	<b>0,9</b>
non frequente	<b>1,0</b>

eccezionale	<b>1,1</b>
-------------	------------

Tabella 2.9 La griglia-guida per il fattore G riferita al pannello sandwich

<b>Sub-fattori del Fattore G: Livello di manutenzione</b>			
<b>Sub-fattore</b>			<b>Coefficiente</b>
g <sub>1</sub>	Tipo manutenzione	Assente	<b>1,0</b>
		Piano di manutenzione	<b>1,1</b>
g <sub>2</sub>	Ispezionabilità	Bassa	<b>0,9</b>
		Media	<b>1,0</b>
		Alta	<b>1,1</b>

### Il metodo fattoriale evoluto

Il metodo fattoriale evoluto propone, per ogni fattore, l'attribuzione di una funzione di distribuzione di probabilità, permettendo una migliore descrizione dell'incertezza dei dati di input, pur con il mantenimento delle peculiarità del metodo fattoriale, in particolare la semplicità di applicazione. Tra i diversi studi, uno degli antesignani è quello di Aarseth e Hovde del 1999 che introduce un principio detto "step-by-step", inteso come approccio sistematico alla progettazione, basato su contributi da parte di professionalità diverse (progettisti, sociologi, psicologi, pedagoghi) coordinati da un moderatore (metodo Delphi). In prima battuta, il valore di ciascuno dei fattori moltiplicativi è individuato dagli esperti attraverso una stima tripla, determinando il valore minimo,  $l$ , il valore massimo,  $h$ , ed il valore più atteso,  $m$ , che non necessariamente coincide con il valore statistico atteso,  $f$ . Come funzione di densità viene impiegata la funzione di Erlang, con  $k=10$ , per dare una rappresentazione statistica ragionevolmente valida della stima tripla (Fig. 2.6).

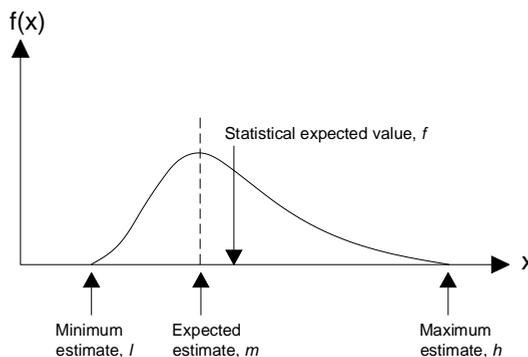


Figura 2.6 La funzione di Erlang rappresentativa della funzione di distribuzione dei fattori

Il valore statistico atteso,  $f$ , e la deviazione standard,  $\sigma$ , vengono calcolati mediante le formule:

$$f = (l + 2.95m + h) / 4.95$$

$$\sigma = (h - l) / 4.6$$

da cui desumere il valore dell'ESL, noto il valore della RSL:

$$ESL = RSL \times f \pm \sigma$$

Il metodo, che converte il valore adimensionale dei fattori in anni, si presta meglio ad osservare le variazioni indotte da ciascun fattore sulla ESL. Moser ed Edvardsen, per ogni funzione presa in considerazione, al posto dei valori minimi, massimi e medi, definiscono i frattili minimo (5% o 10%), medio (50%) e massimo (90% o 95%) e ad ogni fattore viene associata una funzione maggiormente rappresentativa del fenomeno descritto. Si procede successivamente con una simulazione Monte Carlo per la determinazione della ESL. Re Cecconi propone l'utilizzo di distribuzioni di probabilità triangolari caratterizzate dal valore più probabile e da un intervallo di confidenza tra un minimo ed un massimo. Il calcolo dell'equazione viene svolto automaticamente tramite l'ausilio di un software denominato "Service Life Planning Tool" (SLPT), che rielabora su base probabilistica, mediante simulazione Monte Carlo, i dati di input per ottenere una distribuzione probabilistica della ESL. La possibilità di utilizzare un software specifico per il calcolo della vita utile costituisce un ulteriore vantaggio nell'utilizzo del metodo. Listerud et al. propongono l'utilizzo di un metodo semplificato basato su una distribuzione  $\beta$  che consente di ottenere gli stessi risultati della simulazione Monte Carlo relativamente ad un caso applicativo per la valutazione delle ESL di pannelli di rivestimento in durame di quercia. Sulla scorta di questi studi, è stato elaborato un documento, proposta di norma ISO/PDTS 15686-4<sup>19</sup>, che si occupa della valutazione dei dati necessari per determinare la ESL dell'edificio o di un suo componente, attraverso vari metodi incluso quello fattoriale. Si procede, come per il fattoriale evoluto, attraverso funzioni di distribuzione di densità. Ciascun fattore viene espresso tramite una stima tripla con:  $l$  = il limite più basso,  $h$  = il limite più alto,  $m$  = valore più atteso. Per ciascun fattore viene calcolato il valore statistico più atteso,  $f$ , e la deviazione standard,  $\sigma$ , attraverso l'equazione di Erlang, pervenendo ad un'elaborazione delle due funzioni,  $f$  e  $\sigma$ , di poco diversa da quella precedentemente analizzata:

$$f = (l + 4m + h) / 6$$

$$\sigma = (h - l) / 6$$

Il prodotto delle stime triple viene calcolato con una simulazione Monte Carlo che darà come output finale una curva di distribuzione di probabilità, da cui desumere il valore medio e la deviazione standard, demandando agli esperti coinvolti (metodo Delphi) la scelta della migliore funzione di distribuzione. Il contributo dato alla ricerca nell'ambito del metodo fattoriale evoluto (Alaimo et al., 2013) prevede per tutti i fattori moltiplicativi l'uso della funzione di distribuzione log-normale (già utilizzata da Moser, ma solo per la modellazione dei fattori D ed E e del risultato del prodotto delle funzioni di distribuzione) in quanto idonea a modellare i fenomeni in cui le variabili casuali risultano fattori indipendenti tra di loro, secondo il teorema del limite centrale. Inoltre l'utilizzo della funzione log-normale fa "tendere" il valore statistico più atteso verso il centro dell'intervallo di

---

<sup>19</sup>ISO/PDTS 15686-4. Buildings and constructed assets – Service life planning. Part 4: Data requirements, in discussione nelle commissioni ISO TC 59, SC 14 e WG 3 dal 2003 e non ancora pubblicato

confidenza, dando così un peso relativamente minore ai frattili stimati.

I metodi stocastici o probabilistici si basano sull'analisi statistica sia del contesto sollecitante (agenti), sia del comportamento dei materiali per cui il degrado viene trattato come un fenomeno stocastico. Data la loro natura statistica necessitano di un dettaglio molto spinto sui dati di input che rendono l'applicabilità del metodo ristretta a casi di notevole complessità.

I metodi ingegneristici sono l'ulteriore evoluzione dei metodi probabilistici e anch'essi richiedono una particolare attitudine e professionalità degli operatori. Si riportano, come esempio, due metodi ingegneristici:

- metodo dei limiti prestazionali (Daniotti, 2009) che lega la definizione di vita utile di un componente alle prestazioni ambientali dello spazio che il componente delimita. Tale metodo si compone di 4 fasi:
  1. definizione degli obiettivi prestazionali;
  2. individuazione dei requisiti e delle specificazioni di prestazione che il componente deve fornire;
  3. traduzione delle specifiche di prestazione in specifiche tecniche delle caratteristiche funzionali e l'individuazione delle soglie di vita utile prestazionale;
  4. stima della vita utile.
- metodo FMEA (Failure Mode and Effects Analysis). Questo metodo di indagine dei modi di guasto, sviluppato a partire dagli anni '50 negli Stati Uniti, consente di trarre informazioni preziose in prospettiva di una programmazione della manutenzione fornendo un quadro completo delle più o meno plausibili fenomeniche di degrado che portano l'organismo progettato ad uno stato di non funzionamento (Blanchard, 1978).

L'applicazione di uno dei tre metodi sopraesposti, permette la previsione della durata dei singoli componenti edilizi e dell'intero edificio in sede progettuale, quando è possibile operare le scelte sui materiali, sulle tecnologie, sui sistemi da impiegare.

### **2.3 La propensione all'affidabilità**

La norma UNI 8290-2 definisce l'affidabilità di un componente o di un prodotto edilizio come la *“capacità di mantenere sensibilmente invariata nel tempo la propria qualità in condizioni d'uso determinate”*.<sup>20</sup> La metodologia esposta nella norma 11156-2<sup>21</sup> consente una valutazione previsionale di tipo qualitativo della seconda componente del requisito di durabilità: la propensione all'affidabilità. Essa consiste in una valutazione qualitativa, fuori contesto ed in condizioni di riferimento, della probabilità di non accadimento di guasto del componente edilizio nel periodo compreso tra l'avvio della valutazione (tempo zero che corrisponde al momento in cui il componente non è ancora stato soggetto ad alcuna sollecitazione) e la vita utile spontanea del componente stesso in esercizio. Tale valutazione viene

---

<sup>20</sup> UNI 8290-2:1983. Edilizia residenziale – Sistema tecnologico – Analisi dei requisiti.

<sup>21</sup> UNI 11156-2:2006. La valutazione della durabilità dei componenti edilizi - Il metodo di valutazione della propensione all'affidabilità.

espressa tramite valori numerici adimensionali, in scala 0-1, o tramite valori percentuali, in scala 0-100%. In relazione all'intervallo di valori assunti, il complemento a 1 o a 100, a seconda della scala scelta, del valore stimato di propensione all'affidabilità rappresenta il rischio di entrata in crisi dell'elemento durante la vita utile, per cui bassi valori di propensione all'affidabilità comportano elevati rischi che il componente si guasti prima di raggiungere il tempo di durata. La propensione di affidabilità si articola in quattro componenti:

- *affidabilità funzionale*,  $A_f$ , che individua il grado di equilibrio nella distribuzione delle funzioni che il componente tecnico deve svolgere, da cui dipende il grado di affaticamento del componente tecnico durante il suo funzionamento. Le tre classi di giudizio per la valutazione della propensione all'affidabilità funzionale sono:
  - semplicità del modello;
  - affaticamento del modello;
  - distribuzione delle funzioni.
- *affidabilità esecutiva*,  $A_e$ , che verifica il grado di rispondenza esecutiva rispetto alle previsioni di progetto. A questa valutazione si perviene attraverso tre componenti:
  - complessità merceologica;
  - complessità oggettuale;
  - complessità di relazione.
- *affidabilità inerente*,  $A_i$ , che riguarda le possibili variazioni dimensionali del componente in fase di esercizio. Tali fenomeni possono essere causati da:
  - variazioni di temperatura
  - variazioni di umidità.
- *affidabilità critica*,  $A_c$ , che dipende dalle possibili incompatibilità chimiche o chimico-fisiche tra i materiali di natura diversa costituenti la soluzione tecnica. Le possibili criticità saranno di natura:
  - chimica;
  - fisica.

Infine viene calcolata la propensione all'affidabilità globale,  $A_g$ , che esprime in termini medi rispetto le quattro componenti dell'affidabilità il grado di probabilità che la soluzione tecnica duri per il tempo previsto in esercizio (Vita utile di esercizio), senza che si verifichino dei guasti:

$$A_g = \frac{A_f + A_e + A_i + A_c}{4}$$

Come detto, l'affidabilità globale sarà espressa mediante valori adimensionali secondo una scala da 0 a 1, o in termini percentuali, da 0 a 100. Il punteggio unitario o 100% indica il massimo grado di propensione all'affidabilità e lo zero, il grado minimo. I valori limite, 0 e 1 o 100%, sono valori ideali che non possono essere mai raggiunti e la norma UNI 11156-2 suggerisce l'introduzione di un valore limite inferiore,  $\delta_1$ , e di un valore limite superiore,  $1 - \delta_2$ , che non viene

$$\delta_1 < A_g < 1 - \delta_2$$

Un altro parametro indicativo del requisito di durabilità di un componente tecnico è il *tasso di guasto* o *instantaneous failure rate*,  $h(t)$ , che viene definito come il rapporto tra il numero di oggetti guasti dopo un tempo  $t$ ,  $N_f(t)$ , e il numero di quelli che non hanno presentato il guasto,  $N_s(t)$ , ovvero il numero di guasti nell'unità di tempo (Beretta, 2009).

$$h(t) = \frac{1}{N_s(t)} \cdot \frac{dN_f(t)}{dt}$$

L'andamento della curva che viene espressa da una distribuzione di Weibull, riportata in Fig. 2.7, è tipico di tutti i componenti edilizi e non ed è nota come curva "a vasca da bagno" (bathtub), caratterizzate da tre aree significative:

1. a tasso di guasto decrescente (mortalità infantile);
2. a tasso di guasto costante (danneggiamento casuale);
3. a tasso di guasto crescente (usura).

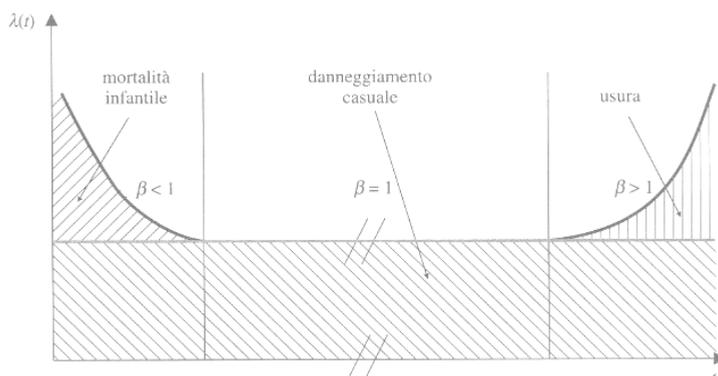


Figura 2.7 La curva rappresentativa del tasso di guasto dei componenti edilizi

## 2.4 Dalla durabilità delle opere da costruzione alla programmazione della manutenzione

L'organismo edilizio, per il solo fatto di esistere, è soggetto a ben determinate condizioni di sollecitazione, che comportano il decadimento nel tempo delle prestazioni esplicitate dai componenti tecnici che lo compongono. Pertanto, la qualità tecnologica prevista in progetto decade e le prestazioni fornite non sono più compatibili con il soddisfacimento dei requisiti essenziali. Al fine di conservare nel tempo il bene edilizio sono quindi necessari interventi di manutenzione<sup>22</sup> preventivi, già programmati nel tempo, o riparatori, a guasto avvenuto. Nel primo caso, per una gestione virtuosa del bene edilizio occorre conoscere la durata e l'affidabilità dei componenti edilizi dell'organismo edilizio, per poter

<sup>22</sup> Norma UNI 10147:2003. Manutenzione - Termini aggiuntivi alla UNI EN 13306 e definizioni. Il termine manutenzione viene definito come la combinazione di tutte le azioni tecniche, amministrative e gestionali durante il ciclo di vita di un'entità volte a mantenerla o riportarla in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta.

l'affidabilità dei componenti edilizi dell'organismo edilizio, per poter correttamente programmare la manutenzione sull'organismo edilizio. La manutenzione programmata di un bene edilizio si fonda, dunque, sulla previsione delle possibili condizioni di non funzionamento del bene e/o delle sue parti, sulla previsione temporale e probabilistica degli accadimenti dei guasti. La programmazione degli interventi manutentivi è divenuta una necessità, a partire dall'entrata in vigore della Legge Merloni<sup>23</sup>, come ribadita dal Codice dei Contratti, per effetto dell'istituzione del Piano di Manutenzione tra i documenti costitutivi del progetto esecutivo. Il Regolamento di attuazione della Legge Merloni, DPR 554/99, descriveva all'art. 40 il Piano di Manutenzione come quel documento in cui viene prevista, pianificata e programmata l'attività di manutenzione dell'intervento, tenendo conto degli elaborati del progetto esecutivo, al fine di mantenerne nel tempo la funzionalità, le caratteristiche di qualità, l'efficienza ed il valore economico. Il Piano di manutenzione deve essere costituito da tre documenti operativi:

- a) il manuale d'uso;
- b) il manuale di manutenzione;
- c) il programma di manutenzione.

*Il manuale d'uso*<sup>24</sup> deve contenere le informazioni relative all'uso corretto "delle parti più importanti del bene". Lo scopo di questo documento è quello di evitare danni derivanti da un'utilizzazione impropria del bene edilizio e far conoscere all'utente le operazioni atte alla conservazione del bene che possono essere svolte direttamente, senza ausilio di conoscenze specialistiche e personale specializzato.

*Il manuale di manutenzione* deve fornire "in relazione alle diverse unità tecnologiche, alle caratteristiche dei materiali o dei componenti interessati, le indicazioni necessarie per la corretta manutenzione, nonché per il ricorso ai centri di assistenza o di servizio".<sup>25</sup> Seguendo la filosofia della normativa vigente, improntata ad uno stretto rapporto tra esigenza da soddisfare e prestazione, tra i contenuti del manuale di manutenzione, che rispetto al manuale d'uso ha carattere più tecnico, essendo rivolto principalmente ad operatori specializzati, vi è l'individuazione del livello minimo delle prestazioni che i componenti edilizi devono soddisfare. Da qui la necessità di conoscere il livello prestazionale nel tempo dei componenti edilizi e quindi la loro durabilità. Il progettista deve anche individuare le anomalie riscontrabili e distinguere le manutenzioni eseguibili dall'utente da quelle eseguibili da personale specializzato. L'individuazione delle anomalie deve essere relativa a ciascun componente tecnico, al fine di consentire

---

<sup>23</sup> L'art. 16 della Legge 109/1994 prevedeva che il progetto esecutivo dovesse essere corredato da apposito piano di manutenzione dell'opera e delle sue parti da redigersi con le modalità stabilite dal regolamento di futura emanazione, il DPR 554/1999.

<sup>24</sup> I contenuti ed i criteri per la stesura dei manuali relativi ai servizi di manutenzione degli immobili con riferimento ad ogni componente edilizio sono desunti dalla norma UNI 10874:2000, *Manutenzione dei patrimoni immobiliari - Criteri di stesura dei manuali d'uso e di manutenzione*. Un'altra norma presa a riferimento dal legislatore è la UNI 15331:2011, *Criteri di progettazione, gestione e controllo dei servizi di manutenzione degli immobili*.

<sup>25</sup> Art. 38, comma 5 del DPR 207/2010.

al tecnico di prescrivere cicli di controlli volti a rilevare l'eventuale insorgenza di tali anomalie. *Il programma di manutenzione* è quel documento dove viene definito il programma degli interventi di manutenzione, che dovrà essere articolato secondo tre distinti sottoprogrammi:

- a) il sottoprogramma delle prestazioni;
- b) il sottoprogramma dei controlli;
- c) il sottoprogramma degli interventi.

Il sottoprogramma delle prestazioni riguarda le prestazioni fornite dal bene e dalle sue parti componenti nel corso del suo ciclo di vita. I sottoprogrammi dei controlli e degli interventi riguardano il programma di controlli, verifiche ed interventi, indicandone la cadenza temporale. In particolare, nel sottoprogramma dei controlli, il progettista dovrà indicare i valori estremi delle prestazioni: quello di collaudo ovvero la prestazione iniziale e quello minimo, derivato da una stima soggettiva della perdita di efficienza del componente tecnico analizzato. Dall'articolazione del Piano di Manutenzione, ne deriva un'attenzione molto spinta verso la prevenzione del guasto e verso la risoluzione degli stati di non funzionamento, oltre che nella scelta delle strategie più opportune per l'attivazione dell'intervento, preventivo o a posteriori, in ragione della significatività del guasto considerato. Si tratta allora di acquisire livelli di conoscenza sui prodotti e sui componenti edilizi adeguati a stimarne preventivamente la durabilità, per poter valutare le modalità con cui avvengono i processi di degrado ed agire di conseguenza. E' compito della progettazione tecnologica organizzare i componenti edilizi, selezionando prodotti caratterizzati da valori di durabilità noti, tali da consentire il governo della loro obsolescenza fisica differenziata ed equilibrata al valore di vita attesa per l'intervento. La conoscenza e l'attribuzione di pertinenti caratteristiche di durabilità ai prodotti edilizi, ai diversi livelli di complessità, costituiscono uno dei momenti chiave per la definizione della qualità globale di un'opera e rendono attuabili il controllo e il governo dei costi globali dell'intervento. Parallelamente è indispensabile valutare preventivamente la facilità con cui un componente può essere riparato o sostituito. Questo significa valutarne la manutenibilità cioè *“L'attitudine di un'entità in assegnate condizioni di utilizzazione ad essere mantenuta o riportata in uno stato nel quale essa può svolgere la funzione richiesta, quando la manutenzione è eseguita nelle condizioni date, con procedure e mezzi prescritti”*.<sup>26</sup> La manutenibilità rappresenta il grado di facilità che un sistema tecnologico offre per l'esecuzione della manutenzione, e si esprime come la probabilità che un elemento sia conforme alle condizioni prestabilite entro un tempo determinato durante il quale viene compiuta l'azione di manutenzione in conformità a procedure e risorse prescritte. Il requisito di manutenibilità si articola in:

- requisito di controllabilità: gli elementi tecnici dell'organismo edilizio devono essere controllabili e ispezionabili in modo da agevolare controlli destinati alla verifica dello stato dei materiali e dei componenti e alla

---

<sup>26</sup> Definizione della manutenibilità riportata nella norma UNI 9910:1991

realizzazione degli interventi di manutenzione al fine di prevenire eventuali guasti e di facilitare i necessari interventi manutentivi;

- requisito di pulibilità: gli elementi tecnici devono poter essere mantenuti in condizione di pulizia adeguati all'organismo, limitando il ricorso a personale specializzato;
- requisito di riparabilità: gli elementi tecnici devono consentire facilmente le operazioni di smontaggio e rimontaggio, limitando il rischio di danneggiamenti per la riparazione delle parti rotte o usurate e quindi per il ripristino della funzionalità e dell'efficienza di parti o meccanismi guasti;
- requisito di sostituibilità: gli elementi tecnici devono essere facilmente sostituibili al fine di aumentare la durata complessiva dei sub-sistemi e di non interromperne l'uso.

Quindi, quanto maggiore è il soddisfacimento di detti requisiti, tanto più l'intervento manutentivo può essere agevolmente attuato, avendone un beneficio in termini di ridotto consumo delle risorse e dei tempi di intervento. Pertanto occorre procedere alla programmazione gestionale allo scopo di poter pianificare le strategie manutentive, in termini di programma temporale ed economico. Gli aspetti da tenere in conto sono molteplici e più strategie manutentive possono sovrapporsi, senza creare impedimento ed intralcio l'una all'altra. Sulla programmazione della manutenzione influiscono diversi fattori, in primo luogo quello economico, legato alle possibilità di finanziamento delle strategie manutentive, e quindi tale da orientare gli interventi manutentivi. Rimane imprescindibile il legame tra strategia manutentiva e progettazione tecnologica perché è questa che determina il naturale decadimento delle prestazioni dei componenti tecnici dell'organismo edilizio, sebbene il guasto possa anche manifestarsi per ragioni imprevedibili durante la vita utile del componente tecnico ed allora determinando un necessario intervento di emergenza. Diverso è il caso dell'intervento di opportunità quando si deve ricorrere alla manutenzione in tempi anticipati rispetto al programma di manutenzione. In generale, gli interventi di manutenzione si articolano in:

- manutenzione di emergenza: detta anche accidentale, riguarda i guasti imprevedibili che possono manifestarsi nel periodo di vita utile di un componente, si attua "a guasto avvenuto" ed è tanto più frequente quanto più elevato è il tasso di guasto. Vista l'imprevedibilità con cui si verifica la necessità di procedere con questa tipologia di intervento, si può agire, sulla base dello studio del tasso di guasto (Fig. 2.14) per singolo componente tecnico, con una programmazione del magazzino ricambi;
- manutenzione a guasto avvenuto: detta anche ripartiva, viene eseguita a seguito della rilevazione del guasto e comunque dopo il termine della vita utile prevista del componente tecnico. Il suo scopo è di riportare l'elemento in condizioni di funzionamento. Si differenzia dalla manutenzione di emergenza perché riguarda anche guasti che possono o potrebbero essere previsti in anticipo in base alla conoscenza preventiva dell'affidabilità e durata o in base ad ispezioni sullo stato di deterioramento dei componenti.

In questo senso, a seconda della funzione esercitata dal componente tecnico in stato di guasto, si possono determinare anche prolungati periodi di non funzionamento;

- manutenzione preventiva-predittiva di soglia: viene eseguita in tempi o ad intervalli temporali definiti per prevenire l'accadimento del guasto, in relazione alla conoscenza della durata e dell'affidabilità del componente tecnico, derivata da conoscenze sperimentali o documentate sulla base di documentazione tecnica esistente. Possono distinguersi due tipi di manutenzione di soglia:
  - a età costante, che riguarda in genere componenti o sub-sistemi di cui siano noti la durata e l'affidabilità e prevede interventi preventivi di sostituzione prima della completa perdita di funzionalità del componente tecnico;
  - a intervalli temporali costanti, che riguarda in genere più componenti di uno o più sub-sistemi caratterizzati da analoghe funzioni di affidabilità, oltre che da durate simili e prevede interventi preventivi di sostituzione a distanza di tempo costante qualunque sia stata l'efficienza nel tempo e gli interventi manutentivi precedenti. Questo tipo di intervento è praticato nel settore aeronautico ed automobilistico.

La convenienza a praticare la manutenzione preventiva dipende dal grado di conoscenza della durabilità dei componenti tecnici impiegati, pertanto fino ad ora poco applicata in campo edile, per la scarsità di dati disponibili sul mercato. Questa conoscenza di dati di durabilità, desumibile da schede tecniche, indagini sperimentali, piattaforme di conoscenza internazionali, è ormai obbligatoria dopo l'entrata in vigore del nuovo Regolamento EU n. 305/2011;

- manutenzione preventiva secondo condizione: è costituita dall'insieme degli interventi di manutenzione preventiva eseguiti a seguito della conoscenza delle condizioni di funzionamento, acquisita mediante controlli periodici o continui. Le scadenze dei controlli e le loro modalità di effettuazione sono stabilite, per ogni componente, dalle schede di monitoraggio nel tempo delle prestazioni del componente tecnico, sulla base anche della conoscenza approssimata della durata e dell'affidabilità del componente. E' una strategia particolarmente onerosa, in termini di necessaria presenza di personale addestrato ad effettuare i controlli periodici, di disponibilità di strumentazione adeguata, di conoscenza della durabilità dei componenti tecnici;
- manutenzione di opportunità: raggruppa l'insieme degli interventi precedentemente descritti, nell'ambito della manutenzione programmata, che si rende necessario anticipare rispetto alla cadenza prefissata, per ragioni di opportunità, come nel caso di intervento di emergenza su altro componente tecnico in stretta relazione con quello per cui si anticipa l'intervento. (Daniotti, 2009)

Il criterio di scelta della strategia manutentiva o delle strategie manutentive deve puntare all'ottimizzazione del rapporto efficienza-costi, minimizzando il tempo di non funzionamento. La conoscenza della durata dei componenti edilizi, da sola, non può orientare i criteri di scelta, ma deve essere valutata insieme all'affidabilità e soprattutto al tasso di guasto. Nel periodo iniziale, di rodaggio dell'organismo edilizio, si può programmare la sola manutenzione di emergenza, intervenendo sul singolo guasto ed organizzando coerentemente le scorte di magazzino per minimizzare il tempo di non funzionamento. Nel periodo con tasso di guasto costante, le strategie plausibili sono la manutenzione preventiva di soglia e quella sotto condizione, a seconda della conoscenza ed affidabilità dei dati di durabilità sui componenti tecnici dell'organismo edilizio. Oltre la vita utile, nel periodo di usura, l'unica strategia possibile è quella a guasto avvenuto.

## Bibliografia

- [1] AA.VV., *La durabilità dei componenti edilizi*, Editecnica, Palermo, 2008.
- [2] Alaimo G., *L'affidabilità funzionale delle coperture discontinue*, Editecnica, Palermo, 2004.
- [3] Alaimo G., *Valutazione sperimentale della durabilità di coperture discontinue. Un'applicazione al pannello sandwich*, Editecnica, Palermo, 2006.
- [4] Daniotti B., *La durabilità in edilizia*, Cusl, Milano, 2009.
- [5] Maggi P. N., *Il processo edilizio*, voll.1-2, CittàStudi, Milano, 1994.
- [6] Maggi P. N., *Qualità dimensionale nel progetto edilizio*, Quaderni del Politecnico di Milano, Milano, 2004.
- [7] Maggi P. N., *Qualità e sostenibilità delle soluzioni tecniche nel progetto*, Quaderni del Politecnico di Milano, Milano, 2004.
- [8] Maggi P. N., *La qualità tecnologica dei componenti edilizi: la valutazione della durabilità*, Epitesto, Milano, 2001.
- [9] Maggi P. N., Gottfried A., Morra Luigi, *Qualità tecnologica dei prodotti complessi per l'edilizia*, Quaderni DISET vol.1, Società Editrice Esculapio, Bologna, 1992.
- [10] Maggi P. N., *La qualità tecnologica dei componenti edilizi: la durabilità*, Epitesto, Milano, 2000.
- [11] Ossola F., *La gestione del processo edilizio*, Levrotto & Bella, Torino, 1999.
- [12] Aarseth, L.I., Hovde, P.J., *A stochastic approach to the factor method for estimating service life*, Proceedings of 8DBMC, International Conference on Durability of Building Materials and Components, Vancouver, Canada, 1999.
- [13] Alaimo G., Accurso F., *The methods for the durability evaluation of pitched roof* in Daniotti B., Re Cecconi F. (a cura di), "CIB W80 WG3 – Test Methods for Service Life Prediction – State of the Art Report", CIB Publication 331, Rotterdam, 2010.
- [14] Daniotti B., Lupica Spagnolo S., Chevalier J. L., Hans J., Chorier J., *An International Service Life Database: The Grid Definition for an Actual Implementation of Factor Methods and Service Life Prediction*, Proceedings of the CIB World Building Congress, Gävle, Salford Quays, 2010.
- [15] Hovde P.J., *Evaluation of the Factor Method to estimate the service life of building components*, Proceedings of the CIB World Building Congress, Gävle, Sweden, 1998.
- [16] Lacasse M. A., Sjöström C., *Recent advances in methods for service life prediction of building materials and components – an overview*, Proceedings of the CIB World Building Congress, Toronto, Ontario, 2004.
- [17] Listerud C. A., Bjorberg, S., Hovde P.J., *Service life estimation of facades – Use of the factor method in practice*, Proceedings of 12DBMC International Conference on Durability of Building Materials and

- Components, Porto, Portugal, 2011.
- [18] Maggi P. N., Daniotti B., Alaimo G., Ciribini A., Morra L., Nicoletta M., Rodono' U., *La durabilità dei componenti edilizi*, Palermo, EdiTecnica, 2008.
- [19] Moser K., Edvardsen C., *Engineering design methods for service life prediction*, Proceedings of 9DBMC, International Conference on Durability of Building Materials and Components, Ottawa, Canada, 1999.
- [20] Re Cecconi F., Iacono P., *Enhancing the Factor Method – Suggestions to Avoid Subjectivity*, 10DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, Lyon, France, 2005.
- [21] Re Cecconi F., *Epistemic uncertainty propagation in service life prediction using the factor method*, Proceedings of 12DBMC, International Conference on Durability of Building Materials and Components, Porto, Portugal, 2011.
- [22] Alaimo G., Enea D., *Evolved factor method for service life prediction of building components*, in O. Ural, E. Pizzi, S. Croce (a cura di) “Changing needs, adaptive buildings, smart cities” proceedings of the 39th IAHS: The international association for housing science (IAHS) World Congress, Poliscript, 2013, Milano, pagg. 489-496;
- [23] Blanchard S. B., *Design and Manage to Life Cycle Cost*, Forest Grove, Weber System, 1978.
- [24] Beretta S., *Affidabilità delle costruzioni meccaniche: Strumenti e metodi per l'affidabilità di un progetto*, Springer-Verlag Italia, Milano, 2009.
- [25] Maggi P. N. (a cura di), *Controllo e qualificazione dell'attività manutentiva. Sistemi, tecniche, procedure*, UNI CNR progetto finalizzato edilizia. Progetto Leonardo. Esculapio editore, Bologna, 1995.
- [26] Baldi C., Sanvito M., *La gestione della qualità nel processo edilizio*, UNI, Bologna, 2001

## 3 L'ATTIVITÀ' SPERIMENTALE

### 3.1 La metodologia di valutazione della vita utile

L'interesse verso la conoscenza della durabilità di materiali, prodotti e componenti edilizi risulta sempre maggiore, soprattutto per la possibilità di poter orientare la politica di manutenzione, sempre più centrale nel processo edilizio. Ciò vale a maggior ragione per i prodotti innovativi immessi o da immettere sul mercato, di cui mancano le necessarie conoscenze sulle prestazioni nel lungo periodo, per i quali gli studi sulla durabilità forniscono indicazioni sull'affidabilità e la durata di vita utile. In questi ultimi anni, sono state sviluppate molteplici attività di ricerca sperimentale nell'ambito dei materiali innovativi presso il Laboratorio di Edilizia<sup>1</sup> del Dipartimento di Architettura, facente parte di UniNetLab, la rete dei laboratori d'Ateneo dell'Università di Palermo.

#### 3.1.1 L'approccio metodologico della norma ISO 15686

La metodologia applicata è quella standardizzata descritta dalla ISO 15686 e dalla UNI 11156, già descritta nelle sue linee generali (§ 2.2). I filoni principali di ricerca portati avanti, di cui nel seguito si riporta una sintesi e gli esiti finali delle sperimentazioni, hanno riguardato i seguenti prodotti:

- pitture ed intonaci a base cementizia con proprietà foto-catalitiche (§ 4);
- intonaci silossanici e monitoraggio sul campo (§ 5);
- laminati compositi in fibre di basalto (§ 6).

La procedura per la determinazione della vita utile di riferimento (RSL) segue le fasi previste dalle norme di riferimento (§ Fig. 2.3). Per quanto attiene la fase della definizione delle esigenze degli utenti, dei requisiti tecnologici e dei requisiti connotanti dell'elemento tecnico, del contesto sollecitante, delle prestazioni richieste e la caratterizzazione dei materiali, ci si riferisce allo specifico elemento tecnico indagato (intonaco, pittura, laminato composito), classificandolo in relazione alle norme di prodotto relative ed indagandone i requisiti caratterizzanti e le prestazioni in uso. La durabilità è stata valutata attraverso indagini ed analisi comparative tra campioni sottoposti a cicli di invecchiamento artificiale in laboratorio (camera climatica) e campioni invecchiati in modo naturale attraverso esposizione alle condizioni ambientali esterne. Nel caso degli intonaci silossanici, il comportamento prestazionale del prodotto è stato monitorato anche su un caso studio. Successivamente sono state effettuate ipotesi di rescaling temporale, proiettando i risultati delle prove di invecchiamento sul lungo periodo.

#### 3.1.2 Lo studio dei fattori climatici del contesto di Palermo

Lo studio preventivo del clima palermitano è stato necessario per individuare le caratteristiche meteo-climatiche del previsto contesto applicativo dei materiali e componenti tecnici. I dati elaborati sono stati desunti dai report relativi ai principali fattori ambientali (temperatura, umidità relativa, pioggia e radiazione solare),

---

<sup>1</sup> Di cui il prof. Giuseppe Alaimo è il responsabile scientifico.

rilevate dalle centraline meteo-climatiche disposte sul comprensorio palermitano<sup>2</sup> (Alaimo, 2006).

### 3.1.3 La messa a punto del ciclo di invecchiamento accelerato

Sulla base dello studio del contesto meteo-climatico di Palermo, è stato progettato il ciclo di invecchiamento accelerato, tenendo anche conto delle esperienze svolte dal gruppo di ricerca di Milano, coordinato dal prof. Bruno Daniotti (AA.VV., 2008). E' stato così definito un ciclo che esprime l'alternanza delle stagioni nel contesto ambientale di Palermo, considerando in maniera proporzionale la durata delle singole stagioni (30% autunno, 10% inverno, 40% primavera e 20% estate). La temperatura della stagione invernale è stata ridotta da 6°C a 2°C per rendere il segmento del ciclo maggiormente sollecitante, lo stesso è stato fatto per la stagione estiva con una temperatura portata a 70°C. Il ciclo di prova elaborato è riportato in tabella 3.1.

Tabella 3.1 Il ciclo climatico per l'invecchiamento accelerato

FASE A	Ciclo reale (Minuti)	Temperatura (C°)	U.R. (%)	Ciclo teorico (Minuti)	Incidenza (%)
Pioggia (stagione autunnale)	75	20	95	75	30
Transizione	8				
Freddo (stagione invernale)	32	2	-	40	10
Transizione	8				
Caldo umido (stagione primaverile)	107	35	87	115	40
Transizione	6				
Caldo secco (stagione estiva)	64	70	56	70	20
<b>Totale</b>	<b>300</b>		<b>300</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<b>FASE B</b>					
Irraggiamento (stagione primaverile)	<b>120</b>	35	87	120	

Ogni step di invecchiamento è stato suddiviso in due parti, ciascuna costituita da 24 ripetizioni delle due fasi A e B, per un totale di 168 ore (7 giorni). La scelta della divisione in due fasi, A e B, discende dalla necessità di dover porre all'interno della camera climatica la lampada UV, che simula l'irraggiamento solare, e mantenerla in un range di temperature compreso tra 15°C e 40°C, pertanto incompatibile con

<sup>2</sup> Dati raccolti ed aggregati per ciascun parametro dall'Ing. Tiziana Basiricò ad espletamento dell'incarico avente per oggetto "Rilevamento ed elaborazione di dati riguardanti il quadro degli agenti naturali del contesto ambientale di Palermo per la messa a punto di cicli di invecchiamento accelerato", finanziato con fondi PRIN 2003

gli altri segmenti di prova. Uno step completo di prova comprende l'esecuzione delle due fasi, A e B, pertanto, 48 ripetizioni con una durata di 336 ore (14 giorni). La ricerca ha previsto la valutazione dei parametri significativi scelti dopo ogni step fino al compimento del 6° step, per complessive 2016 ore (84 giorni) di durata complessiva netta di invecchiamento accelerato.

#### 3.1.3.1 Modifiche al ciclo di invecchiamento dei campioni fotocatalitici

Al fine di monitorare gli effetti aggressivi tipici di un ambiente marino, per ogni step e per metà dei provini di pittura fotocatalitica, due cicli della fase A sono stati sostituiti con due cicli in camera a nebbie saline, a temperatura di 35°C ed umidità relativa pari ad 87%.

#### 3.1.3.2 Modifiche al ciclo di invecchiamento dei campioni di laminato basaltico

Per la sperimentazione relativa ai laminati basaltici sono state fatte delle considerazioni diverse circa il ciclo di invecchiamento accelerato, scegliendo condizioni più sollecitanti per il materiale testato. Il ciclo di invecchiamento accelerato scelto alterna lo stress igrotermico all'irraggiamento UV. Sono stati previsti step di 28 giorni all'interno dei quali si ripete quattro volte un ciclo completo, formato dalla fase A che prevede lo stress igrotermico, e dalla fase B che prevede l'irraggiamento, come riepilogato in Tabella 3.2.

Tabella 3.2 Il ciclo di prova elaborato per i campioni basaltici

<b>FASE A</b>	<b>Ciclo reale (Minuti)</b>	<b>Temperatura (C°)</b>	<b>U.R. (%)</b>	<b>Ciclo teorico (Minuti)</b>	<b>Incidenza (%)</b>
Caldo	120	60	10	120	50
Transizione	8				
Freddo	120	2	80	120	50
Transizione	36				
<b>Totale</b>	<b>284</b>			<b>240</b>	<b>100</b>
<b>FASE B</b>					
Irraggiamento (stagione primaverile)	<b>180</b>	35	87	<b>180</b>	

Ogni step è suddiviso in 4 ripetizioni del ciclo base suddiviso a loro volta in due parti: la prima parte prevede 24 ripetizioni della fase A, la seconda parte 24 ripetizioni della fase B.

#### 3.1.4 La strumentazione a supporto dei test di invecchiamento accelerato

I test di invecchiamento artificiale accelerato sono stati condotti presso il laboratorio di Edilizia del Dipartimento di Architettura, mediante l'ausilio di una camera climatica e di una camera a nebbie saline (solo per la sperimentazione sulle pitture fotocatalitiche).

##### 3.1.4.1 La camera climatica

La camera climatica Challenge 1200 SP Angelantoni è costituita da una camera in acciaio inossidabile dotata di oblò termo-riscaldato per consentirne l'ispezione visiva. La coibentazione delle pareti è realizzata con schiuma poliuretanic espansa ad alta densità, mentre l'illuminazione interna è ottenuta tramite una lampada ad incandescenza UV da 125 W, avente uno spettro nella regione dell'Ultravioletto con un picco in corrispondenza della  $\lambda = 370$  nm (Fig. 3.1).

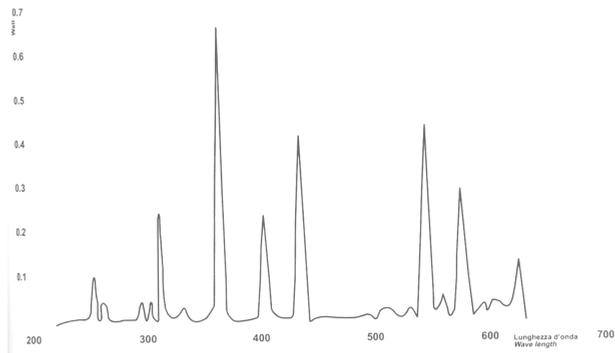


Figura 3.1 Lo spettro di emissione della lampada UV in dotazione alla camera climatica

La camera ha una capacità utile di 1152 l ed opera in un range di temperatura compreso tra  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $+180^{\circ}\text{C}$  ed in un range di umidità relativa compreso tra 10% e 98%. L'impianto di nebulizzazione dell'acqua è costituito da nove ugelli in grado di produrre, sotto un angolo di  $120^{\circ}$ , un getto di distribuzione uniforme. Attraverso l'utilizzo del software WINKRATOS<sup>®</sup> della Angelantoni è possibile programmare i cicli di prova (Fig. 3.2).



Figura 3.2 La camera climatica in dotazione al laboratorio di Edilizia

#### 3.1.4.2 La camera a nebbie saline

La camera a nebbie saline DCTC 600 (dry corrosion test cabinet) Angelantoni è costituita da una camera in materiale plastico a base di fibre di vetro, dotata di oblò termo-riscaldato per consentirne l'ispezione visiva. La coibentazione delle pareti è realizzata con lana di roccia. La camera ha una capacità utile di 600 l ed opera in un range di temperatura compreso tra +20°C e +55°C ed in un range di umidità relativa compreso tra 10% e 98%. L'impianto di nebulizzazione dell'acqua salina è costituito da un ugello in grado di produrre, sotto un angolo di 180°, un getto di distribuzione uniforme. Attraverso l'utilizzo del software KEYKRATOS™ della Angelantoni è possibile programmare i cicli di prova (Fig. 3.3).



Figura 3.3 La camera a nebbie saline in dotazione al laboratorio di Edilizia

## 4 I MATERIALI CEMENTIZI FOTOCATALITICI

La ricerca sperimentale ha riguardato la valutazione della durabilità di intonaci e pitture con proprietà fotocatalitiche, in diverse tinte di colore, applicati su supporti in laterizio, analizzandone le prestazioni nel tempo in termini di caratteristiche colorimetriche, attività fotocatalitica ed aspetto superficiale. L'interesse verso questa attività di ricerca deriva dall'innovazione tecnologica applicata al settore delle costruzioni, introdotta dalla scoperta delle potenzialità espresse dal fenomeno della fotocatalisi applicato ai materiali edilizi. In particolare tale processo produce la trasformazione dei prodotti gassosi inquinanti di origine industriale e dal trasporto veicolare, mediante la luce solare, in sostanze non nocive, di facile smaltimento.

### 4.1 L'inquinamento ambientale

L'inquinamento atmosferico (Fig. 4.1) è definito come: *“Ogni modificazione dell'aria atmosferica, dovuta all'introduzione nella stessa di una o di più sostanze in quantità e con caratteristiche tali da ledere o da costituire un pericolo per la salute umana o per la qualità dell'ambiente oppure tali da ledere i beni materiali o compromettere gli usi legittimi dell'ambiente.”*<sup>1</sup>



Figura 4.1 Inquinamento atmosferico in Cina prodotto da processi industriali

Nell'atmosfera si è riscontrata la presenza di sostanze nocive che nella naturale composizione dell'aria non sono presenti o lo sono in concentrazioni basse. La lista degli inquinanti tossici di origine sia organica sia inorganica, contenuti nell'aria atmosferica, secondo il Code of Federal Regulations dell'amministrazione americana riportava la cifra di oltre 180 specie chimiche diverse. Le sostanze inquinanti sono per lo più prodotte dalle attività umane e si presentano nelle tre fasi: particelle solide, liquide o gassose, in particolare i veicoli con motore a combustione interna, le centrali elettriche, i combustibili usati per il riscaldamento domestico e gli inceneritori di rifiuti, se non sono dotati di opportuni mezzi di

---

<sup>1</sup> Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 "Norme in materia ambientale"

abbattimento degli inquinanti. Tra gli inquinanti atmosferici, i più pericolosi per la salute umana sono il biossido di azoto ( $\text{NO}_2$ ), i composti organici volatili (VOC o *volatile organic compounds*) ed il particolato (PM o *particulate matter*). Il biossido di azoto è un gas tossico, che assorbe le radiazioni solari visibili e contribuisce a compromettere la visibilità atmosferica, svolge un ruolo dimostrato nel cambiamento climatico globale per l'interazione prodotta nella formazione di ozono nella troposfera, come è evidente dalla Fig. 4.2.

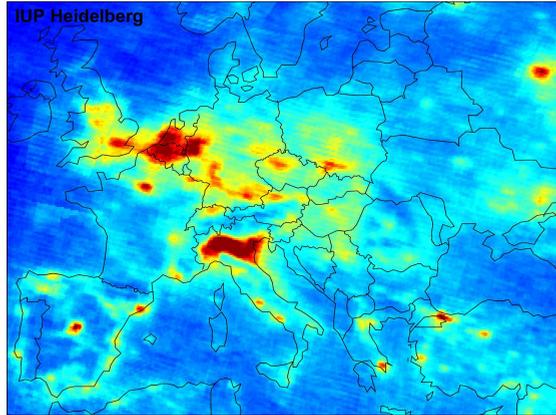


Figura 4.2 Concentrazioni di  $\text{NO}_2$  nella troposfera tra gennaio 2003 e giugno 2004 (satellite Envisat dell'Agencia Spaziale Europea)

È prodotto da ossidazione di ossido nitrico nell'aria atmosferica che si verifica comunemente nella maggior parte dei processi di combustione. Inoltre c'è una produzione su larga scala di ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ) a causa di motori a combustione interna, particolarmente concentrata nelle aree urbane congestionate, e di fonti fisse (riscaldamento e produzione di energia elettrica). Il particolato presente in aria è una miscela complessa di componenti, con composizione chimica e caratteristiche fisiche diverse. A causa di questa eterogeneità, è impossibile stabilire in modo inequivocabile i rischi per la salute, senza una correlazione con la dimensione delle particelle, le fonti e la composizione chimica. Il particolato è classificato in base al diametro aerodinamico, in quanto la dimensione è un parametro critico del rischio e del sito di deposizione all'interno delle vie respiratorie, quindi è solitamente indicato con le sigle PM10, con particelle di diametro inferiore o pari a 10 micron e PM2.5, di diametro inferiore o pari a 2,5 micron. La differenza tra PM10 e PM2.5 consiste nel particolato grossolano che si deposita nel torace, incluso nel PM10 ed escluso dal PM2.5. Il PM2.5 è più pericoloso di PM10 perché è maggiore la probabilità di deposizione nei più piccoli condotti aerei e negli alveoli polmonari. Negli ambienti urbani, è possibile trovare anche particelle ultrafini inferiori a 0,1  $\mu\text{m}$  (100 nm), con massa, origine, caratteristiche fisiche e composizione chimica diversa. Le particelle più grandi del PM10 spesso aderiscono a materiale biologico presente in atmosfera, come grani di polline e batteri, generalmente vengono prodotte da incompleta combustione nei motori veicolari e da impianti elettrici e

sono anche definite ceneri volanti. Le particelle di PM<sub>2.5</sub> provengono da particelle ultrafini prodotte da nucleazione e condensazione di sostanze a bassa pressione di vapore formate mediante vaporizzazione ad alta temperatura o reazioni chimiche nell'atmosfera. Le particelle più piccole (< 0,1 µm) possono essere prodotte anche dalla condensazione di metalli o composti organici che sono vaporizzati nei processi di combustione ad alta temperatura e dalla condensazione di gas (biossido di zolfo, ossidi di azoto, ammoniaca e composti organici volatili) che sono stati convertiti attraverso reazioni atmosferiche in sostanze a bassa pressione di vapore. Gli effetti pregiudizievoli sulla salute umana sono dimostrati ed aumentano con l'esposizione, interessando i sistemi respiratori e cardiovascolari. E' stata fissata una soglia di 10 µg/m<sup>3</sup> di PM<sub>2.5</sub> scelta per rappresentare l'estremo inferiore dell'intervallo durante il quale sono stati osservati effetti significativi sulla sopravvivenza in uno studio dell'American Cancer Society (Sameth et al., 2005). I composti organici volatili rappresentano una gamma molto ampia di idrocarburi ossigenati, alogenati e altri composti di carbonio esistenti nell'atmosfera in fase di vapore. La fonte principale è la fuoriuscita da sistemi pressurizzati (gas naturali, metano, ecc.) o l'evaporazione del combustibile liquido dai serbatoi di carburante dei veicoli. Tuttavia, la combustione di combustibili fossili ed i processi di incenerimento possono anche creare emissioni contenenti particelle di carburante incombuste, emesse sotto forma di VOC (Harrison, 2005). Il più pericoloso è il benzene, un liquido incolore e altamente infiammabile con un odore dolce, che ha come possibili effetti sulla salute, dovuti all'esposizione a lungo termine, l'anemia, la diminuzione di piastrine del sangue e l'aumento del rischio di cancro. L'Agenzia sulla Sicurezza della Salute degli Stati Uniti (OSHA) ha imposto un limite di esposizione accettabile di 1 parte per milione (1 ppm) di benzene sul posto di lavoro durante una giornata lavorativa di 8 ore, per una settimana di lavoro di 40 ore. Il limite di esposizione a breve termine per il benzene nell'aria è di 5 ppm per 15 minuti. Le direttive europee 1999/30/CE, 2000/69/CE e 2008/50/CE hanno imposto a tutti i membri un limite per gli ossidi di azoto, il particolato e il benzene nell'aria atmosferica; limiti che sono stati ridotti gradualmente. In particolare, i limiti annuali sono stati fissati in 40 µg/m<sup>3</sup> per NO<sub>2</sub> e avrebbe dovuto essere ridotto a zero dal 1° gennaio 2010, è stato fissato lo stesso limite per il PM<sub>10</sub> e la sua riduzione a zero avrebbe dovuto avvenire dal 1° gennaio 2005, 5 µg/m<sup>3</sup> per il benzene a zero entro il 1° gennaio 2010.

#### **4.2 La fotocatalisi eterogenea**

Il processo chimico di fotocatalisi applicato al costruito permette di dare una risposta alla esigenza di riduzione degli inquinanti atmosferici, di produzione industriale e da traffico veicolare, attraverso un processo di purificazione basato sull'energia solare rinnovabile. Si tratta di una tecnologia pulita che sfrutta l'energia solare, in particolare la componente UV della radiazione, mediante l'attivazione di un principio fotocatalitico disperso sulla superficie del materiale edilizio (intonaco, pittura, massello autobloccante, vetro, tessuto, etc.) ed in grado di contribuire a ridurre l'inquinamento ambientale, per via diretta, ed i consumi energetici, per via indiretta. Sono stati sviluppati e sono già disponibili sul mercato edile diversi

materiali innovativi, in grado di decomporre gli inquinanti atmosferici organici e inorganici, utilizzando questa tecnologia. Questi materiali - semiconduttori solidi - accelerano il processo ossidativo che porta alla completa mineralizzazione degli inquinanti atmosferici, divenendo sostanze innocue. Il semiconduttore solido più comunemente usato è il biossido di titanio ( $\text{TiO}_2$ ), grazie alla sua ampia disponibilità, la sua fotoattività, la più alta stabilità ed il basso costo. L'attenzione verso questo processo fotochimico e le sue applicazioni si fa derivare storicamente dal primo studio pubblicato sulla rivista *Nature* nel 1972 (Fujishima-Honda, 1972) che accertò sperimentalmente la produzione di bolle di ossigeno gassoso su un elettrodo di  $\text{TiO}_2$ , messo in contatto elettrico con un elemento di platino, immerso in acqua ed esposto alla luce e la contemporanea formazione di idrogeno sull'elettrodo di platino. Lo studio dimostrava il forte potere ossidante del  $\text{TiO}_2$  che sottoposto ad una sorgente luminosa, ossidava l'acqua in ossigeno. Molteplici altre ricerche hanno confermato quella iniziale scoperta, dimostrando la capacità del  $\text{TiO}_2$  di ossidare quasi tutti i tipi di composti organici, non solo in presenza di una sorgente luminosa nel campo UV, ma anche nel campo del visibile (Justicia et al., 2005; Silveyra et al., 2005; Dunnill et al., 2009). Le proprietà elettroniche ed ottiche di  $\text{TiO}_2$  hanno diverse applicazioni nella sensoristica, nei rivestimenti antiriflesso, nei filtri antibatterici, nei nano-film su supporti in vetro. A livello chimico, la fotocatalisi è un processo fotochimico di catalisi sotto irradiazione luminosa, che porta alla modifica (incremento) di velocità di una reazione chimica, consentita dalla presenza di un fotocatalizzatore. Il fotocatalizzatore, disperso nella matrice, non partecipa alla reazione e, dunque, non ne viene consumato, ma interviene nella reazione chimica, aumentandone la velocità, attraverso l'azione della radiazione luminosa. Questo processo è caratterizzato da diverse fasi e per questo motivo è meglio noto come fotocatalisi eterogenea; il catalizzatore, in genere, si trova in fase solida e i reagenti in fase liquida (Rothenberg, 2008) o gas. I reagenti entrano in contatto con il catalizzatore e sono adsorbiti in superficie, quindi le reazioni chimiche avvengono e infine i prodotti sono desorbiti dalla superficie e diffusi in atmosfera. Queste reazioni sono accelerate, in misura diversa, per effetto della natura di semiconduttore dei fotocatalizzatori. A causa della loro struttura elettronica, che è caratterizzata da una banda di valenza piena (*valence band* o VB) e una banda di conduzione vuota (*conduction band* o CB), i semiconduttori ( $\text{TiO}_2$ , ZnO, CdS, ecc.) possono attivare processi redox fotoindotti. La differenza tra il livello minimo di energia della CB e il livello di energia più alto della VB è il cosiddetto *Energy gap*,  $E_g$ , che corrisponde all'energia minima necessaria per rendere il materiale conduttore. La luce ultravioletta, sottoforma di quanto di energia,  $h\nu$ , garantisce l'energia minima necessaria per rendere queste fotoreazioni possibili, come mostrato in Figura 4.3.

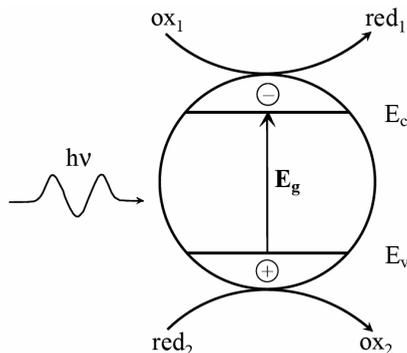


Figura 4.3 L'attivazione di una fotoreazione per una particella di semiconduttore

La foto-eccitazione si verifica quando un elettrone ( $e^-$ ) viene promosso verso la banda di conduzione per assorbimento di un fotone di luce, essendo  $h\nu > E_g$ . In questo caso, si forma una vacanza ( $h^+$ ) nella banda di valenza, tale per cui queste coppie di elettroni-vacanze si diffondono sulla superficie della particella fotocatalitica, prendendo parte a reazioni chimiche con le molecole adsorbite. L'Energy gap dei semiconduttori (Fig. 4.4) è minore dei materiali isolanti, quindi è sufficiente un'energia moderata (ad es. superiore a 3.2 eV per  $\text{TiO}_2$  in forma anatasio e 3.0 eV per  $\text{TiO}_2$  in forma rutilo) per promuovere gli elettroni alla banda di conduzione, spesso proveniente da una fonte non elettrica come calore o luce.

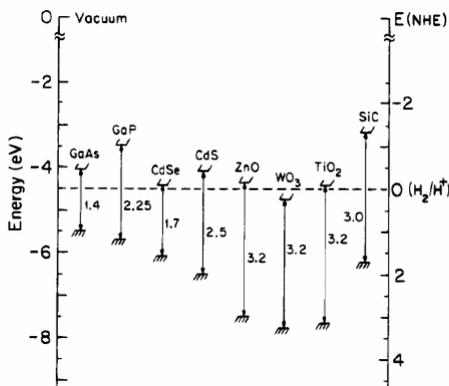
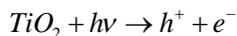
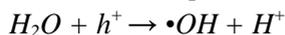


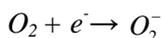
Figura 4.4 Energy gap per semiconduttori in soluzione acquosa a pH=1 (Linsebigler, 1995)

In particolare, è necessario un quanto di luce con lunghezza d'onda inferiore a 388 nm, nell'intervallo della luce ultravioletta, producendo così le coppie di elettroni-vacanze, secondo la reazione:



Le coppie elettrone-vacanza sono in grado di reagire e di decomporre ossigeno e acqua, presenti nell'atmosfera,  $\text{O}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ , generando radicali idrossili,  $\bullet\text{OH}$ , e, ioni super-ossido,  $\text{O}_2^-$ , secondo le seguenti reazioni:





Altri meccanismi possono promuovere questo flusso di elettroni, oltre la foto-eccitazione: l'eccitazione termica ed il doping, tali da generare analogamente queste specie chimiche altamente ossidanti. A loro volta, questi due potenti agenti ossidanti saranno in grado di disgregare e riorganizzare la struttura di alcuni inquinanti atmosferici e convertirli, attraverso reazioni redox che si verificano sulla superficie del catalizzatore, portando alla formazione di calcare, nitrati, CO<sub>2</sub>, che sono facilmente rimossi dalla pioggia (Hashimoto et al., 2007).

### 4.3 Meccanismi di foto-riduzione dei principali inquinanti atmosferici

I principali agenti inquinanti presenti nell'atmosfera che vengono coinvolti in reazioni redox per effetto del contatto con una superficie fotocatalitica contenente biossido di titanio sono gli NO<sub>x</sub>, gli SO<sub>x</sub> ed i VOC. Questi subiscono un processo di assorbimento, decomposizione e trasformazione finale in sali minerali e calcare che possono essere facilmente dilavati dalla pioggia. Gli inquinanti organici sono così decomposti con la formazione di CO<sub>2</sub>. Queste reazioni fotocatalitiche avvengono sulla superficie del biossido di titanio e hanno un carattere multi-fase, essendo il contatto del TiO<sub>2</sub> con l'acqua e con l'aria. La degradazione fotochimica degli inquinanti atmosferici è una conseguenza della decomposizione dell'ossigeno e dell'acqua sulle superfici trattate con TiO<sub>2</sub> e della formazione di radicali idrossili e ioni super-ossido altamente reattivi, secondo le reazioni chimiche riportate (§3.2.2). Come risultato dell'ossidazione fotocatalitica, tutti questi inquinanti sono mineralizzati in specie inorganiche: carbonio in CO<sub>2</sub>, idrogeno in H<sub>2</sub>O, alogeni in ioni alogenuri, solfuri in solfati, NO in acido nitrico. È documentata anche la rottura dell'anello di benzene da parte dei radicali •OH, prodotto dalla foto-ossidazione dell'acqua (Choi, 2005). La decomposizione dell'ossido di azoto presente nell'aria avviene attraverso l'ossidazione sotto luce ultravioletta in acido nitrico HNO<sub>3</sub> e parzialmente in biossido di azoto, NO<sub>2</sub>. Il biossido di azoto che si forma, in presenza di una matrice cementizia, aderisce alla superficie, insieme con l'acido nitrico formato, e viene facilmente rimosso dalla superficie per mezzo dell'acqua piovana (Ibusuki et al., 1994). Il sistema ottenuto dall'interazione del TiO<sub>2</sub> con il cemento crea le condizioni per la fotocatalisi ambientale e la degradazione dei composti inquinanti descritti.

### 4.4 Proprietà specifiche delle superfici trattate con foto-catalizzatori

Una caratteristica dimostrata sperimentalmente che posseggono le superfici trattate con foto-catalizzatori è l'autopulizia. Attualmente, non c'è nessuno standard internazionale che riporti una definizione di superficie autopulente, ma il termine è comunemente impiegato per designare la capacità super-idrofila e idrorepellente di una superficie cioè la capacità di favorire la rimozione della maggior parte degli inquinanti organici e di alcuni inorganici, che si depositano sulle superfici, per effetto della sola pioggia battente. Super-idrofilia ed idrorepellenza di una superficie sono strettamente correlate con l'angolo di contatto che si forma tra una goccia di liquido che entra in contatto con la superficie stessa, come illustrato in Figura 4.5.

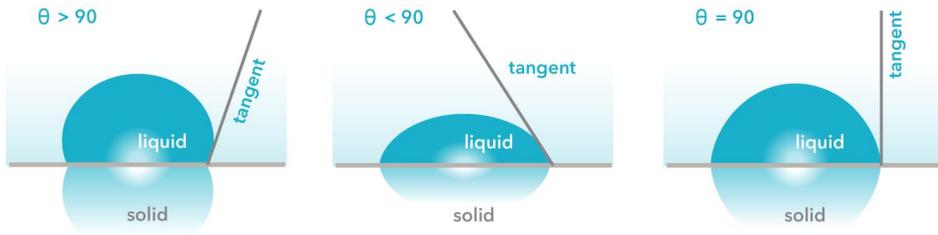


Figura 4.5 Angolo di contatto tra una goccia di liquido e una superficie

L'angolo di contatto,  $\theta$ , dà una misura quantitativa della bagnabilità di una superficie solida per contatto con un liquido e dipende dalle tensioni superficiali a livello di interfaccia. Valori bassi dell'angolo di contatto mostrano che il liquido si diffonde sulla superficie fino alla completa bagnatura della superficie, quando  $\theta = 0$ , ed allora la superficie è detta idrofila. Maggiore è l'angolo di contatto, minore sarà la bagnabilità della superficie e la superficie è detta idrofoba. L'angolo di contatto tra una superficie solida e una goccia di liquido non è univoco, ma risiede all'interno di un intervallo di valori che dipende dalle modalità di interazione. Il cosiddetto *Effetto Loto* è caratteristico delle foglie del fiore di loto (Fig. 4.6), un genere di piante acquatiche della famiglia delle Nelumbonaceae, e determina una superficie super-idrofoba per cui le goccioline d'acqua hanno un angolo di contatto superiore a  $130^\circ$ .

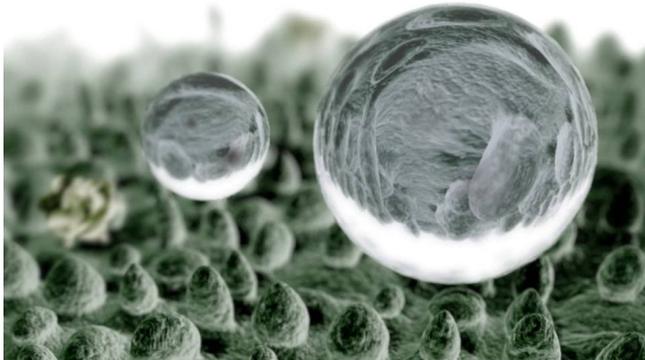


Figura 4.6 Render della superficie di una foglia di loto ([www.thielicke.gmxhome.de](http://www.thielicke.gmxhome.de))

Questo effetto garantisce la caratteristica autopulente che consiste nel fatto che il particolato atmosferico aderisce a queste goccioline e viene rimosso insieme con loro, per effetto dello scarso attrito della goccia con la superficie. Quando il biossido di titanio è irradiato dalla luce UV, la superficie trattata diventa super-idrofila e l'angolo di contatto formato tra le superfici trattate con  $\text{TiO}_2$  e le gocce d'acqua è prossimo a  $1^\circ$ . Questo fenomeno causa la diffusione dell'acqua sulla superficie, creando un film nanometrico, che è durevole per più di due giorni dal momento dell'irradiazione con raggi UV, anche in assenza di irradiazione. Questa azione di rivestimento aiuta non solo a lavare via lo sporco ed il materiale organico

depositato, minimizzando macchie e striature ed accelerando la capacità di asciugarsi della superficie. Le applicazioni principali riguardano lo sviluppo di film nanometrici a base di  $\text{TiO}_2$  per substrati di vetro (ad esempio specchietti retrovisori, barriere del suono, barriere autostradali, ecc). Nel campo delle costruzioni edili, è dimostrata l'efficienza dei prodotti cementizi fotocatalitici a base di biossido di titanio, in funzione della formulazione adottata (Cassar et al., 2007).

#### **4.5 Le due linee di ricerca sperimentale**

Particolare interesse mostrano, dunque, i materiali cementizi addizionati con biossido di titanio per le proprietà di abbattimento degli inquinanti atmosferici e per la capacità di conferire capacità autopulenti alle superfici trattate. Sulla base di queste conoscenze di letteratura e grazie ad una collaborazione di ricerca con il Centro Tecnico di Gruppo (C.T.G.), Italcementi Group, sono state condotte due sperimentazioni, la prima avente per oggetto intonaci di finitura colorati a base cementizia ed addizionati con biossido di titanio, confrontati con identiche formulazioni prive di addizione fotocatalitica, di provenienza commerciale, forniti dalla Hydratite S.r.l. di Palermo, partner locale della ricerca, e la seconda avente per oggetto una pittura cementizia bianca di nuova formulazione, anch'essa a base cementizia ed addizionata con  $\text{TiO}_2$ , messa a punto presso i laboratori C.T.G. Italcementi Group.

#### **4.6 I parametri indagati e le strumentazioni**

I materiali cementizi fotocatalitici individuati per lo sviluppo della ricerca sono stati oggetto di indagine, per testarne l'andamento delle prestazioni più significative nel tempo, in particolare:

- l'attività fotocatalitica per abbattimento degli ossidi di azoto, secondo la metodologia standardizzata della norma UNI 11247:2010;
- il colore mediante misurazione delle coordinate colorimetriche;
- l'aspetto superficiale per la valutazione della morfologia superficiale.

##### *4.6.1 L'attività fotocatalitica*

La norma UNI 11247:2010<sup>2</sup> descrive uno dei metodi più comunemente usati per valutare l'attività fotocatalitica dei materiali inorganici, considerato che gli ossidi di azoto sono tra gli inquinanti atmosferici quelli cui l'effetto fotocatalitico ha una maggiore efficacia. La prova viene svolta ponendo un campione, di superficie pari a  $65 \pm 2 \text{ cm}^2$ , generalmente  $80 \times 80 \text{ mm}$ , all'interno di una camera di reazione, con una concentrazione fissa di  $\text{NO}_x$  pari a 600 ppm, di cui il 55% di  $\text{NO}_2$  ed il 45% di  $\text{NO}$ , che corrisponde a una possibile condizione di atmosfera inquinata da  $\text{NO}_x$ . I risultati vengono espressi come percentuale di decomposizione di  $\text{NO}_x$  per effetto delle radiazioni UV della lampada al di sopra della camera di reazione (Fig. 4.7).

---

<sup>2</sup> UNI 11247:2010. Determinazione dell'indice di abbattimento fotocatalitico degli ossidi di azoto in aria da parte di materiali inorganici fotocatalitici: metodo di prova in flusso continuo

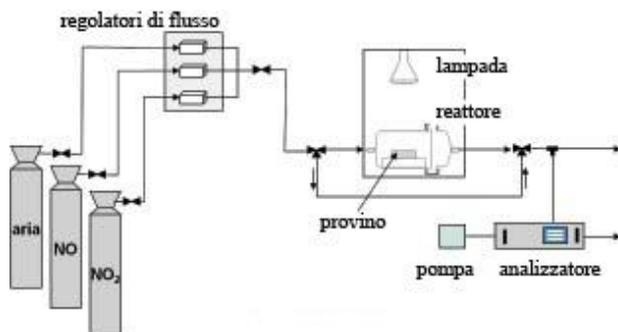


Figura 4.7 Rappresentazione schematica della prova secondo la norma UNI 11247:2010

Il test consente di monitorare il contenuto di  $\text{NO}_x$  della corrente gassosa in flusso continuo, prima e dopo essere stata a contatto con la superficie del campione fotocatalitico. La norma prevede l'utilizzo di una lampada monocromatica nel campo UV (potenza 300 Watt a 365 nm) con irradianza costante e pari a  $20 \pm 1 \text{ W/m}^2$ , misurata mediante radiometro, sulla superficie del campione. Le dimensioni della camera sono anch'esse definite e pari a  $3 \text{ l} \pm 20\%$  litri. Un analizzatore di  $\text{NO}_x$  a chemiluminescenza misura la concentrazione di  $\text{NO}_x$  all'ingresso ed all'uscita della camera di reazione. La procedura di misurazione consta di 3 fasi:

1. Viene misurata la concentrazione iniziale di  $\text{NO}_x$  all'ingresso della camera di reazione con la miscela di gas a flusso costante ( $1 \pm 0.1 \text{ l/min}$ ) e questa fase è conclusa quando il valore risulta costante per almeno 10 minuti. In questa fase si misura il valore  $C_A$  che rappresenta la concentrazione di  $\text{NO}_x$  in condizione di buio all'ingresso del reattore fotochimico.
2. Viene misurata la concentrazione di  $\text{NO}_x$  all'uscita della camera di reazione con la miscela di gas a flusso costante ( $1 \pm 0.1 \text{ l/min}$ ) ed il campione posto all'interno, in assenza di irraggiamento. Questa fase è conclusa quando il valore  $C_B$  [ppb] che rappresenta la concentrazione di  $\text{NO}_x$  in condizione di buio risulta costante per almeno 10 minuti.
3. La lampada UV viene accesa e il sistema tende a uniformarsi in un certo periodo di tempo, il valore della concentrazione è registrato quando diventa costante per almeno 10 minuti. In questa fase si misura il valore  $C_L$  [ppb] che rappresenta la concentrazione di  $\text{NO}_x$  in condizione di luce.

L'attività fotocatalitica  $A_C$  di abbattimento degli ossidi di azoto per diversi tempi di reazione è un indice adimensionale e viene calcolato con la seguente formula:

$$A_C = 100 \frac{C_B - C_L}{C_B} \frac{I_n S_n}{I S} \quad [\%]$$

con:

- $S$ , superficie geometrica del provino in esame [m<sup>2</sup>]
- $F$ , flusso di gas [m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>]
- $I$ , irradianza media misurata del flusso luminoso [W/m<sup>2</sup>]
- $I_n$ , irradianza nominale del flusso luminoso, valore medio dell'intensità della luce solare a mezzogiorno di un giorno medio di luglio ottenuta

rapportata all'intensità misurata sperimentalmente  
[20 W/m<sup>2</sup>]

- $S$ , area del campione misurata [cm<sup>2</sup>]
- $S_n$ , area nominale del campione [64 cm<sup>2</sup>]

Le prove sono state condotte presso i laboratori C.T.G. di Bergamo, mediante analizzatore a chemiluminescenza di NO<sub>x</sub>, successivamente spostato presso i laboratori Italcementi di Brindisi (Fig. 4.8).



Figura 4.8 La strumentazione per la prova di abbattimento NO<sub>x</sub> nei laboratori Italcementi

#### 4.6.2 Il colore

Il monitoraggio del colore di una superficie serve a valutare nel tempo il mantenimento dell'iniziale caratteristica colorimetrica e nel contempo a valutare indirettamente la capacità della superficie di rimanere pulita, per effetto della presenza del principio attivo fotocatalitico, che promuove l'autopulizia della superficie. Due sono i metodi utilizzati per indicare il colore di una superficie o di un oggetto. Il primo prevede il confronto con campioni standard rimovibili contenuti in un catalogo (Munsell Book of Color, 2010) e su questa metodologia si basa la classificazione standardizzata dalla norma UNI 8813:1986<sup>3</sup>. Il secondo metodo si basa sulla misurazione strumentale, mediante spettrofotometri, colorimetri, luxometri, etc. Dal punto di vista della percezione umana, il colore viene elaborato dal cervello sulla base dello stimolo che riceve dall'occhio in tre componenti diverse: il tono cromatico o *tinta*, la *saturazione* o croma e la *luminosità* (Vecchiattini, 2006).

##### *La tinta*

<sup>3</sup> La norma UNI 8813:1986. Edilizia. Sistema di specificazione del colore. si basa sul sistema Munsell costituito da un insieme di tessere plastificate rimuovibili che si accostano all'oggetto da classificare. Il sistema non è applicabile ai colori fluorescenti e alle sorgenti luminose primarie.

La tinta dipende fisicamente dalla lunghezza d'onda prevalente rispetto alle altre nello spettro visibile (400-750 nm) e rappresenta l'effetto sensoriale del colore, per cui consente di classificare i diversi colori in verde, rosso, giallo, etc. La continuità delle tinte crea la ruota di colori (Fig. 4.9) che contiene tutte le tonalità di colore, ad eccezione del bianco e del nero.

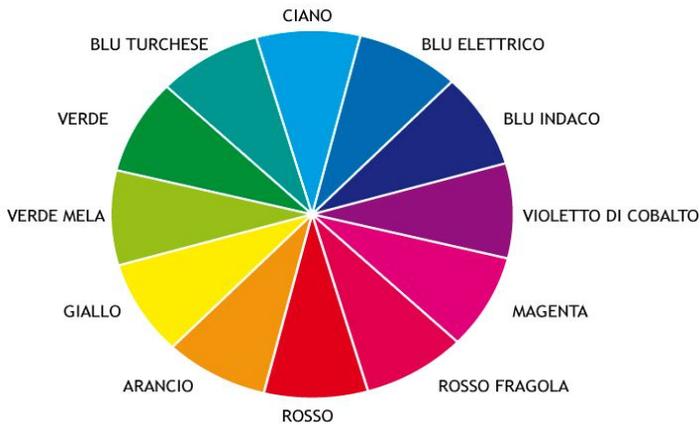


Figura 4.9 La ruota dei colori

#### *La saturazione*

La saturazione indica l'intensità del colore e fisicamente dipende dalla distribuzione spettrale. Un colore si definisce saturo quando è costituito da una sola lunghezza d'onda. Maggiore è la saturazione, maggiore sarà la brillantezza del colore, come evidenziato dalla Fig. 4.10, da sinistra verso destra il colore giallo diventa più brillante perché maggiormente saturo. Una minore saturazione corrisponde ad una sensazione di opacità del colore.



Figura 4.10 Da sinistra verso destra l'incremento della saturazione per la tinta gialla

#### *La luminosità*

La luminosità corrisponde alla quantità di energia luminosa che è riflessa da un colore. L'occhio umano è in grado di valutare l'intensità della riflessione e di distinguere un colore più o meno luminoso, definendolo chiaro o scuro. Un colore è tanto più luminoso quanto meno nero contiene. E' possibile ottenere una rappresentazione grafica tridimensionale delle tre componenti del colore, valida a livello qualitativo, sebbene non pienamente rispondente alla realtà del colore in quanto la saturazione è diversa per ciascuna tinta e luminosità. Riportando sull'asse z la luminosità, a partire dal basso con la tinta nera, crescendo verso il bianco, la saturazione sarà crescente radialmente dall'asse z verso l'esterno e la tinta varierà

lungo la circonferenza esterna seguendo l'andamento della ruota del colore (Fig. 4.11).

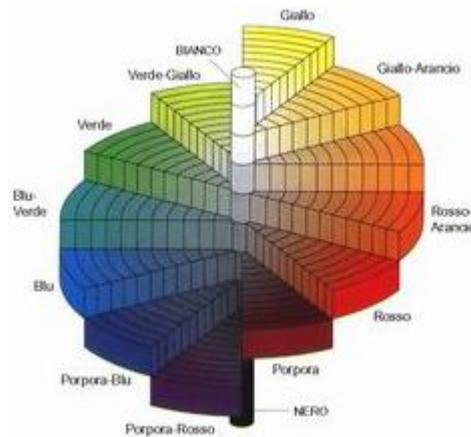


Figura 4.11 La rappresentazione tridimensionale delle tre componenti del colore

### *La misura del colore*

La misura strumentale del colore dei diversi campioni è stata effettuata attraverso un colorimetro ed uno spettrofotometro (Fig. 4.12).



Figura 4.12 Il colorimetro (sx) e lo spettrofotometro (dx) impiegati per le misurazioni

Il colorimetro è uno strumento che ha una sensibilità corrispondente a quella dell'occhio umano. Il principio di funzionamento è, infatti, basato sulla teoria tristimolo delle tre componenti della visione del colore secondo la quale l'occhio possiede dei ricettori per i tre colori primari (rosso, verde e blu) e tutti i colori sono visti come combinazione di questi tre colori primari. Le misurazioni sono indipendenti dalla sorgente luminosa esterna, perché il sistema di illuminazione dell'oggetto o della superficie è interno allo strumento, quindi le condizioni di misura sono indipendenti dai fattori esterni e ripetibili nel tempo e nello spazio. Lo strumento consente la misura delle coordinate di colore, in forma numerica, secondo differenti spazi di colore standardizzati. Lo spettrofotometro misura le caratteristiche spettrali della luce per poi calcolare i valori tristimolo, e quindi le coordinate colorimetriche in diversi spazi di colore, pertanto si possono ottenere maggiori informazioni sul colore della superficie o dell'oggetto misurato, in particolare il grafico di riflettanza spettrale (Fig. 4.13).

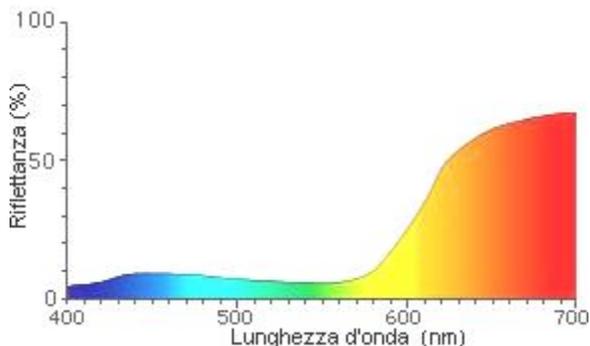


Figura 4.13 Grafico di riflettanza spettrale per un oggetto prevalentemente rosso  
([www.konicaminolta.it](http://www.konicaminolta.it))

Il grafico di riflettanza spettrale mostra l'assorbimento di energia luminosa della superficie misurata per singola lunghezza d'onda, dando un'informazione più completa sul colore. Lo spettrofotometro permette di rendere evidente il fenomeno del metamerismo, per cui due oggetti appaiono del medesimo colore alla luce del giorno, ma diversi sotto illuminazione artificiale. Per gli oggetti metamericici, le caratteristiche di riflettanza spettrale dei colori sono diverse, mentre le coordinate colorimetriche misurate con la sorgente luminosa interna che rappresenta la luce del giorno media (illuminante standard  $D_{65}$ ) risultano uguali. Cambiando la sorgente luminosa interna allo strumento (illuminante A o illuminante C) la misura delle coordinate colorimetriche dei due oggetti metamericici è diversa. I valori numerici delle coordinate colorimetriche identificano spazi di colore diversi. La metodologia di misura del colore e la definizione dei diversi spazi di colore è stata effettuata nel corso del secolo scorso dall'organizzazione mondiale che studia la luce e il colore, la "Commission Internationale de l'Eclairage", (CIE). I due modelli più conosciuti sono lo spazio di colore  $Yxy$ , ideato in base ai valori tristimolo XYZ nel 1931, e lo spazio di colore  $L^*a^*b^*$ , ideato nel 1976 per uniformare maggiormente le differenze di colore in relazione alla percezione visiva. Le letture del colore nelle sperimentazioni condotte sono state eseguite nello spazio  $L^*a^*b^*$  meglio noto come CIE  $L^*a^*b^*$  o CIELAB, basato su tre coordinate colorimetriche identificate dalle lettere  $L^*$  (luminosità),  $a^*$  (asse verde-rosso),  $b^*$  (asse giallo-blu). Il valore della luminosità  $L^*$  è compreso tra 0, corrispondente al nero, e 100, corrispondente al bianco. Valori positivi di  $a^*$  rappresentano toni cromatici rossi, valori negativi di  $a^*$  rappresentano, invece, toni verdi. Valori positivi di  $b^*$  rappresentano toni cromatici gialli, valori negativi di  $b^*$  rappresentano toni blu. E' possibile rappresentare lo spazio colorimetrico CIELAB attraverso un sistema tridimensionale (Fig. 4.14).

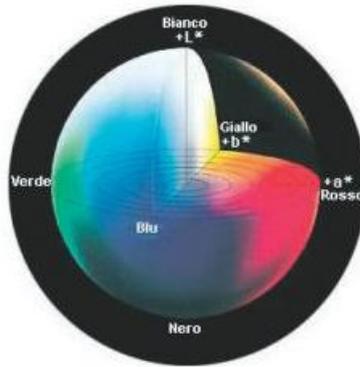


Figura 4.14 Solido del colore rappresentativo dello spazio CIELAB  
([www.konicaminolta.it](http://www.konicaminolta.it))

Allo stesso modo, si può rappresentare, mediante il cosiddetto diagramma di cromaticità, il piano  $a^*-b^*$  a Luminosità  $L^*$  costante (Fig. 4.15).

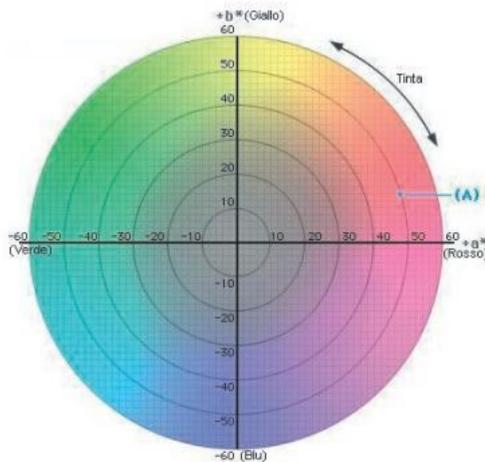


Figura 4.15 Diagramma di cromaticità per lo spazio colorimetrico CIELAB  
([www.konicaminolta.it](http://www.konicaminolta.it))

Nello spazio di colore CIELAB è possibile valutare la differenza di colore tra due oggetti misurati mediante tre indicatori: la differenza di colore<sup>4</sup>,  $\Delta E^*_{ab}$ , la differenza di croma,  $\Delta C^*_{ab}$ , e la differenza di tinta,  $\Delta H^*_{ab}$ . La differenza di colore, calcolata per differenza tra le tre coordinate colorimetriche, è data dalla formula:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Essa non fornisce alcuna indicazione sul carattere della differenza, poiché non indica le quantità relative e la direzione di questa differenza. La direzione della differenza di colore tra i due oggetti misurati è descritta dal valore e dal segno

<sup>4</sup> UNI 8941- 3:1987. Superfici colorate - Colorimetria - Calcolo di differenze di colore

algebrico delle componenti,  $\Delta L$ , positivo indica maggiore chiarezza del secondo rispetto al primo,  $\Delta L$  negativo indica minore chiarezza,  $\Delta a^*$  positivo indica una maggiore componente rossa del secondo rispetto al primo,  $\Delta a^*$  negativo il contrario, e  $\Delta b^*$  indica una maggiore componente gialla del secondo rispetto al primo positivo,  $\Delta b^*$  negativo il contrario. La classificazione riportata nella norma UNI EN ISO 3668:2002<sup>5</sup> per l'individuazione del colore delle superfici colorate prende in considerazione la differenza di colore  $\Delta E^*_{ab}$  con valori compresi tra 0 a 5, secondo il prospetto in Tabella 4.1.

Tabella 4.1 Classificazione delle differenze di colore di superfici colorate

Classificazione	Grado di differenza
0	Nessuna differenza percepibile
1	Differenza molto leggera, ovvero appena percepibile
2	Differenza leggera, ma chiaramente percepibile
3	Differenza modesta
4	Differenza considerevole
5	Differenza molto importante

La classificazione riportata nella norma correla il valore numerico della differenza di colore misurata,  $\Delta E^*_{ab}$ , alla percezione ottica, ponendo il valore più basso pari a zero, per rappresentare una differenza non percepibile dall'occhio umano, ed il valore massimo pari a 5 per rappresentare una differenza molto importante. Questa classificazione non tiene conto della diversa percezione di colore dell'occhio umano che è più sensibile ad alcune tinte piuttosto che ad altre. Pertanto nello spettro visibile, la differenza di colore,  $\Delta E^*_{ab}$ , può essere significativa o meno per l'occhio umano, a seconda della zona dello spettro in esame. Per tenere conto della diversa apprezzabilità della differenza di colore sono stati condotti diversi studi ed è stato definito il concetto di differenza appena percepibile (Just Noticeable Difference, J.N.D.) Nello spazio colore CIE Yxy, MacAdam, negli anni '40, definì i contorni di alcune ellissi nel diagramma di cromaticità xy, con la luminosità costante, calcolandone matematicamente i contorni (Fig. 4.17). I contorni di queste ellissi, di dimensioni variabili a seconda del centro dell'ellisse, rappresentano il limite entro cui la differenza di colore risulta non apprezzabile a partire dal punto al centro dell'ellisse (MacAdam, 1942).

<sup>5</sup> UNI EN ISO 3668:2002. Pitture e vernici - Confronto visivo del colore delle pitture

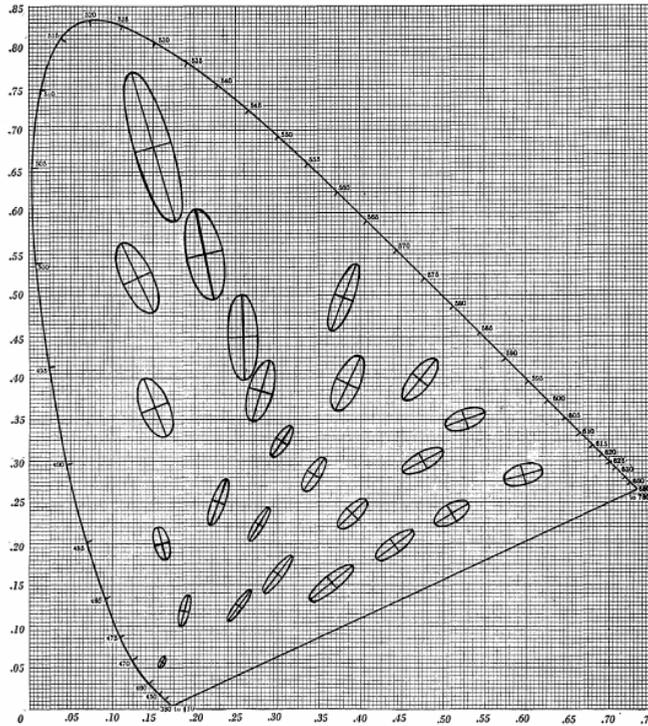


Figura 4.17 Deviazioni standard di cromaticità, nel diagramma di cromaticità CIE Yxy

Gli altri due indicatori del colore di un oggetto o di una superficie sono la croma,  $C^*$ , e l'angolo di tinta,  $h$ . Per caratterizzare la differenza di colore tra due punti si calcola, sulla base della misura delle coordinate colorimetriche, la differenza di croma,  $\Delta C^*_{ab}$ , tra due punti dello spazio colorimetrico CIELAB che è data dalla formula:

$$\Delta C^*_{ab} = \sqrt{(a_2^*)^2 + (b_2^*)^2} - \sqrt{(a_1^*)^2 + (b_1^*)^2}$$

La croma rappresenta nel diagramma di cromaticità  $a^*-b^*$  la distanza radiale del punto misurato dal centro, la differenza di croma, misurabile per differenza tra due punti 1 e 2, sarà un numero positivo se il punto 2 è più saturo del punto 1, negativo altrimenti. L'angolo di tinta  $h$  rappresenta nel diagramma di cromaticità  $a^*-b^*$  l'angolo formato tra l'asse  $a^*$  e la congiungente il centro del diagramma con il punto misurato. L'angolo di tinta si calcola mediante la seguente formula:

$$h = \arctan \frac{b^*}{a^*}$$

Per caratterizzare la differenza di colore tra due punti si calcola la differenza di tinta,  $\Delta h^*_{ab}$ , distanza angolare tra i due punti misurati 1 e 2, sarà un numero positivo se l'angolo formato con la congiungente il punto 2 è maggiore di quello formato con la congiungente il punto 1, negativo altrimenti. La differenza di tinta,  $\Delta h^*_{ab}$ , tra due punti dello spazio colorimetrico CIELAB è data dalla formula:

$$\Delta h_{ab}^* = \arctan \frac{b_2^*}{a_2^*} - \arctan \frac{b_1^*}{a_1^*}$$

#### 4.6.3 L'aspetto superficiale

L'analisi dell'aspetto superficiale è stata condotta con lo scopo di descrivere e documentare l'evoluzione delle forme di degrado e di alterazione superficiale che si sono verificate per effetto dei cicli di invecchiamento artificiale indotti sui provini delle due sperimentazioni. Le indagini sono state documentate e condotte, attraverso l'utilizzo di una fotocamera digitale, di un microscopio ottico e di un microscopio a scansione elettronica (Scansion Electronic Microscope, S.E.M.).

##### *Il microscopio ottico*

Le osservazioni al microscopio ottico sono state effettuate per monitorare i degradi della superficie per effetto dell'invecchiamento accelerato indotto sui provini. Il microscopio Leica MS5 (Fig. 4.18) in dotazione all'ex Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Processi e dei Materiali (DICPM) della rete dei laboratori UniNetLab dell'Università degli Studi di Palermo, ha permesso di monitorare la superficie dei provini a diversi livelli di ingrandimento, da 6.3x a 40x. Il microscopio è dotato di una videocamera Leica DFC che ha consentito di creare, elaborare ed archiviare le immagini digitalizzate. Per ogni provino sono stati osservati i due punti maggiormente rappresentativi e per ogni punto sono state effettuate quattro osservazioni con ingrandimenti crescenti (6.3x, 10x, 25x e 40x). Attraverso le immagini generate sono stati evidenziati e misurati i degradi presenti sulla superficie.



Figura 4.18 Microscopio ottico utilizzato per la sperimentazione

Il degrado rappresenta l'insieme dei processi che modificano la struttura e la morfologia di un materiale. Le possibili forme di alterazione, per gli intonaci, sono descritte nella norma UNI 11182:2006<sup>6</sup> ed interessano l'aspetto superficiale dei

<sup>6</sup> La norma UNI 11182:2006. Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Descrizione della forma di alterazione - Termini e definizioni. riporta l'elenco delle forme di degrado e di alterazione per gli intonaci

materiali lapidei naturali ed artificiali. Per vernici e pitture, l'elenco è il seguente<sup>7</sup>:

- Distacco: delle pitture dalle mani di fondo o dal supporto.
- Sbollatura: formazione di bolle tra la superficie e il supporto.
- Esfoliazione: distacco da parte della pellicola di piccoli o grandi lembi.
- Sfarinamento: impoverimento progressivo di una superficie dall'esterno verso il fondo, che viene di conseguenza ad assumere un aspetto farinoso.
- Variazioni cromatiche generali e localizzate: tendenza delle pitture a subire variazioni del colore nel tempo.
- Cavillature: fessure di dimensioni inferiori al mm, solitamente a forma di ragnatela.
- Fessurazioni: fessure di dimensioni superiori ad 1 mm.
- Efflorescenza: cristallizzazione dei sali solubili sulla superficie dei manufatti, avviene per capillarità e provoca danni estetici e strutturali.
- Vescicamento: formazione di bollicine o di vescichette sulla superficie di una pellicola di vernice applicata.

Le cause più ricorrenti di degrado e/o alterazione sono dovute alla scarsa compatibilità della vernice/pittura con il supporto e sono cause di natura chimica (efflorescenze), di natura fisica (sbollature) o di natura meccanica (fessurazioni). Ulteriori cause di degrado e/o alterazione sono: le infiltrazioni d'acqua nelle micro fessure, le escursioni termiche e gli shock termici, la mancata applicazione di primer e/o consolidanti, l'esposizione prolungata ai raggi UV, la perdita di aderenza dovuta ad agenti atmosferici, alla scarsa resistenza del prodotto o a difetti durante le fasi di applicazione e maturazione. La descrizione della quantità dei difetti (Tab. 4.2), le dimensioni (Tab. 4.3) e l'intensità (Tab. 4.4) è riportata nella norma UNI EN ISO 4628-1:2007<sup>8</sup>, che fornisce una classificazione per questi tre indicatori dei difetti su scala numerica, da 0 a 5. L'uso di valori numerici non interi è ammesso, solo se specificato, per fornire un rapporto più dettagliato sui difetti o le variazioni osservate.

Tabella 4.2 Quantità di difetti per pitture e vernici (UNI EN ISO 4628-1)

<b>Classificazione</b>	<b>Quantità di difetti</b>
0	nessuna ovvero nessun difetto rilevabile
1	molto pochi o numero ridotto, scarsamente significativo di difetti
2	pochi ovvero numero ridotto, ma significativo di difetti
3	numero moderato di difetti
4	numero considerevole di difetti
5	densa disposizione di difetti

Per quanto attiene le dimensioni medie (ordine di grandezza) dei difetti, deve

<sup>7</sup> La norma UNI EN ISO 4618:2007. Pitture e vernici - Termini e definizioni. riporta l'elenco delle forme di degrado e di alterazione per le superfici verniciate o pitturate

<sup>8</sup> UNI EN ISO 4628-1. Pitture e vernici - Valutazione del degrado dei rivestimenti - Indicazione della quantità e delle dimensioni dei difetti e dell'intensità di variazioni di aspetto uniformi. Parte 1: Introduzione generale e sistema di descrizione.

re utilizzata l'indicazione  $S_n$ , in cui  $S$  specifica le dimensioni ed  $n$  il numero di classificazione. Per cui, un difetto chiaramente visibile ad occhio nudo è indicato con la sigla S2.

Tabella 4.3 Dimensione dei difetti per pitture e vernici (UNI EN ISO 4628-1)

Classificazione	Dimensione dei difetti
0	non visibile all'ingrandimento 10 X
1	visibile solo all'ingrandimento 10 X
2	appena visibile alla visione normale corretta
3	chiaramente visibile alla visione normale corrette (fino a 0,5 mm)
4	da 0,5 mm a 5 mm
5	più grande di 5mm

L'intensità dei difetti viene classificata mediante numeri interi compresi tra 0 e 5, se non diversamente specificato e riguarda un giudizio qualitativo dell'aspetto superficiale della materia indagata.

Tabella 4.4 Classificazione dell'intensità dei difetti

Classificazione	Intensità dei difetti
0	invariata ovvero nessuna variazione percepibile
1	molto leggera ovvero variazione appena percepibile
2	leggera ovvero variazione chiaramente percepibile
3	moderata ovvero variazione percepibile con grande chiarezza
4	considerevole ovvero variazione pronunciata
5	variazione molto marcata

L'espressione dei risultati è stata riferita ai contenuti della stessa norma, indicando, per ogni provino, il tipo di difetto riscontrato, la quantità e le sue dimensioni, attraverso le tabelle precedenti e riportando la misura della superficie interessata o la sua proporzione rispetto alla superficie totale.

*Il microscopio a scansione elettronica (S.E.M.)*

Ulteriori e più approfondite analisi morfologiche della superficie dei provini sono state condotte presso il laboratorio autorizzato GEOLAB S.r.l di Carini (PA) attraverso l'uso di un microscopio elettronico a scansione (Fig. 4.19) Fei Quanta 200.



Figura 4.19 Microscopio a scansione elettronica della Geolab S.r.l.

La simultanea microanalisi elementare EDAX fornisce la composizione chimica locale. La possibilità di lavorare in basso vuoto (ESEM) consente di non influenzare lo stato fisico e di idratazione del campione durante l'analisi. Con l'analisi ai raggi X, tramite uno spettrometro E.D.S. (Energy Dispersive Spectrometry), che rileva il segnale degli elettroni caratteristici degli elementi chimici, si ottengono informazioni composizionali qualitative e quantitative sugli elementi chimici che compongono la materia analizzata. Il risultato viene riportato su grafici in cui viene riportato, sull'asse orizzontale, il livello di energia dei raggi X, caratteristico di ogni elemento chimico, e sull'asse verticale il numero di raggi X giunti allo spettrometro per ogni livello di energia. L'altezza ed ampiezza dei picchi da un'informazione qualitativa sulla maggiore o minore presenza nel campione di un determinato elemento.

## 4.7 La preparazione dei campioni di prova

### 4.7.1 Gli intonaci fotocatalitici

I test sono stati effettuati su due tipologie di intonaci premiscelati decorativi a base cementizia, differenti solo per la presenza del principio fotocatalitico, pigmentati in pasta in tre tinte differenti: bianco, giallo e salmone. L'unica variabile nella composizione di questi prodotti premiscelati consiste, pertanto, nella presenza o meno del principio fotocatalitico e nel tipo di pigmento addizionato; i restanti costituenti mantengono percentuali identiche. I materiali, oggetto di studio, sono stati individuati nell'ampia gamma di intonaci premiscelati caratterizzati da attività fotocatalitica, certificata dai laboratori del C.T.G. S.p.a. La fornitura dei materiali, già applicati su un supporto in laterizio e su uno strato di intonaco di fondo, anch'esso premiscelato della Linea SOSIVA N<sup>®</sup> a base di calce e cemento, è avvenuta tramite uno dei partner esterni alla ricerca, la ditta Hydratite S.r.l. di Palermo, con la quale è stata concordata la dimensione ed il numero di provini necessari alla sperimentazione. I prodotti utilizzati per la sperimentazione sono classificati come:

1. Intonaco di finitura premiscelato decorativo a base cementizia, addizionato con principio fotocatalitico (Linea SOSIVA ARIA<sup>®</sup>);
2. Intonaco di finitura premiscelato decorativo a base cementizia, senza principio fotocatalitico (Linea SOSIVA K<sup>®</sup>).

La stratigrafia dei provini è stata realizzata secondo quanto previsto dalle schede tecniche dei materiali costituenti (Fig. 4.20).

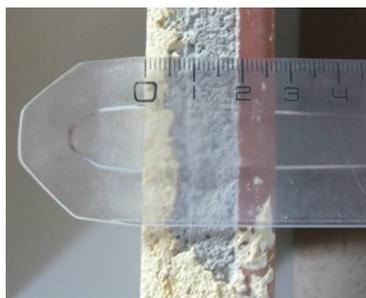


Figura 4.20 Stratigrafia: da sin. finitura (4 mm), intonaco (15 mm) e supporto (8 mm)

I provini realizzati nelle tre tinte diverse sono stati individuati dalle rispettive sigle: Bianco (sigla colore BN), giallo (A20) e salmone (B1), il supporto in laterizio scelto era di dimensioni pari a 23x30 cm (Fig. 4.21).

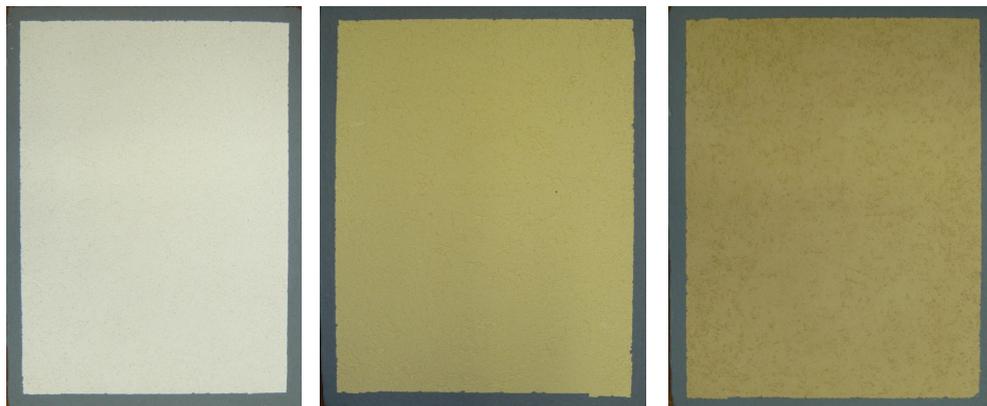


Figura 4.21 I provini di intonaco, nelle tre diverse tinte

Ai fini della ricerca sperimentale, ciascun campione, costituito da una tavola 23x30 cm contiene n. 6 provini 8x8 cm (Fig. 4.22), unità di prova ai fini del test di valutazione dell'attività fotocatalitica che richiede una superficie di 64 cm<sup>2</sup> (§ 4.6.1). Il prelievo dell'unità di prova è avvenuto tramite taglio a secco del campione.

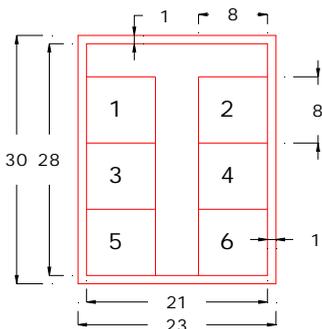


Figura 4.22 Lo schema di prelievo dei provini dal campione intero

I campioni sono stati rivestiti con un impermeabilizzante cementizio bicomponente, fornito dalla ditta Cascino S.r.l. di Termini Imerese, per una larghezza di 1 cm lungo tutto il bordo della superficie di prova, per tutto lo spessore del campione e su tutta la superficie di laterizio opposta a quella di prova. (Fig. 4.23)



Figura 4.23 I campioni durante la fase di indurimento dello strato di impermeabilizzazione  
Complessivamente sono stati oggetto della ricerca n. 36 campioni di prova, di cui n. 24 disposti in camera climatica e n. 12 da disporre in esterno (Fig. 4.24).



Figura 4.24 I campioni in esterno sulla terrazza dell'Edificio 8 della Facoltà di Ingegneria

#### 4.7.2 La pittura fotocatalitica

I test sono stati effettuati su una tipologia di pittura fotocatalitica a base cementizia, fornita dai laboratori del C.T.G. S.r.l. nella tinta bianca. I prodotti utilizzati per la sperimentazione sono classificati, in accordo con la norma UNI 8572:1985, come “pitture”. La pittura è stata applicata su un supporto in laterizio delle dimensioni di 20x20 cm, di spessore pari a 4 cm. Lo spessore del prodotto è stato applicato conformemente alle schede tecniche di prodotti similari e pari a 250-300 micron. Ai fini della ricerca sperimentale, ciascun campione, costituito da una tavella 20x20 cm contiene n. 4 provini 8x8 cm, unità di prova (Fig. 4.25). Il prelievo dell'unità di prova è avvenuto tramite taglio a secco del campione.

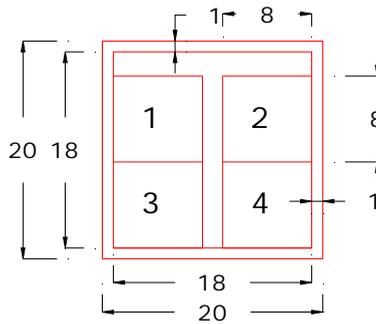


Figura 4.25 Lo schema di prelievo dei provini dal campione intero

Complessivamente sono stati oggetto della ricerca n. 18 campioni di prova, di cui n. 16 disposti in camera climatica e n. 2 disposti all'esterno (Fig. 4.26).



Figura 4.26 I campioni in esterno sulla terrazza dell'Edificio 8 della Facoltà di Ingegneria

I campioni sono stati rivestiti con un impermeabilizzante cementizio bicomponente, fornito da Cascino S.r.l. di Termini Imerese, lungo tutto il bordo e per tutto lo spessore del campione e su tutta la superficie opposta a quella di prova. Una parte dei campioni realizzati sono stati oggetto di sporcamento con ossido ferrico che li ha visivamente ingialliti. I test sono stati effettuati sulle due tipologie di campioni di pittura (vergine e trattati con una miscela di acqua ed ossido ferrico (Fig. 4.27).

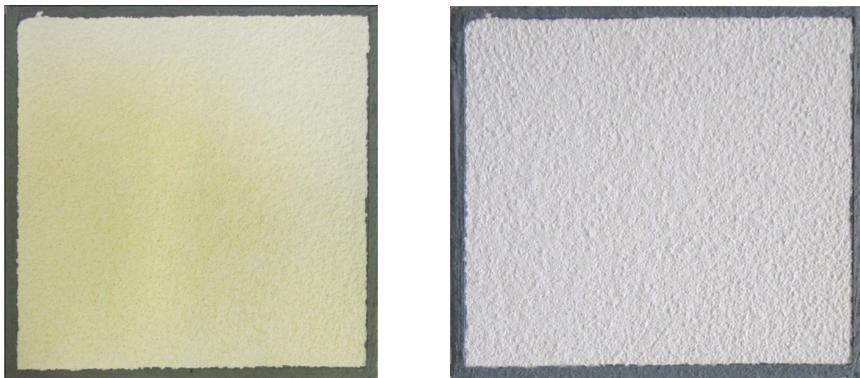


Figura 4.27 Un campione di pittura bianca ed uno trattato con ossido ferrico

#### 4.8 La disposizione dei campioni nelle camere di invecchiamento

La camera climatica ha un volume interno di circa 1 mc e consente l'ubicazione di n. 24 campioni (Fig. 4.28), uniformemente soggetti alle condizioni indotte.

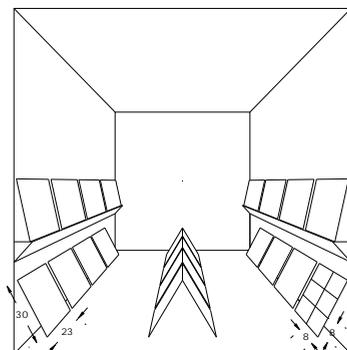


Figura 4.28 Schema della disposizione dei provini all'interno della camera climatica

Per la sperimentazione sugli intonaci fotocatalitici, la sequenza temporale dei diversi step di invecchiamento accelerato è riportata in Tabella 4.5.

Tabella 4.5 Il programma temporale della ricerca sugli intonaci fotocatalitici

	Data inizio	Data fine
Primo step	09/02/2011	23/02/2011
Secondo step	24/02/2011	10/03/2011
Terzo step	11/03/2011	25/03/2011
Quarto step	30/03/2011	13/04/2011
Quinto step	14/04/2011	28/04/2011
Sesto step	29/04/2011	13/05/2011

La sperimentazione sulle pitture fotocatalitiche ha avuto inizio nel mese di maggio del 2012 e si è conclusa ad agosto. Per ciascuno step della ricerca, dalla camera climatica (Fig. 4.29) è stata prelevata da ciascun campione 23x30 cm e 20x20 cm una coppia di provini 8x8 cm per la valutazione dell'attività fotocatalitica.



Figura 4.29 I campioni di pittura bianca ed ingiallita all'interno della camera climatica

Ciascun provino, al termine di ogni step di invecchiamento in camera climatica, è stato oggetto di misurazione delle coordinate colorimetriche e di valutazione dell'aspetto superficiale. La disposizione dei provini per la fase B, di irraggiamento con lampada UV, è stata modificata rispetto quella della fase A, in modo da mantenere un'irradianza costante su tutte le superfici esposte dei provini, pari a  $5 \text{ W/m}^2$  (Fig. 4.30). In questo modo, il bulbo è equidistante dal centro dei provini esposti.



Figura 4.30 I provini disposti nella camera climatica, per la fase B

Per ogni step di invecchiamento accelerato e per metà dei provini, inoltre, due cicli della fase A sono stati sostituiti con due cicli in camera a nebbie saline (Fig. 4.31), a temperatura di  $35^\circ\text{C}$  ed umidità relativa pari ad 87%.



Figura 4.31 I provini disposti nella camera a nebbie saline

## 4.9 Analisi ed interpretazione dei risultati sperimentali

### 4.9.1 Gli intonaci fotocatalitici

### L'attività fotocatalitica

Tutti i provini, sia quelli addizionati con il principio fotocatalitico, sia quelli che ne sono privi, sono stati oggetto di valutazione dell'attività fotocatalitica mediante la procedura descritta dalla norma UNI 11247 (§ 4.6.1). Il valore medio di  $\Delta NO_x$  a  $T_0$  per i provini bianchi è pari al 40%, per quelli gialli è pari al 32% e per i provini salmone è pari al 18%. Il grafico di Fig. 4.32 riporta i valori dell'attività fotocatalitica dei provini realizzati con intonaco fotocatalitico, a  $T_0$  e per ciascuno dei 6 step. I risultati mostrano una buona attività fotocatalitica fino al 3° step, pari a circa 150 cicli di invecchiamento accelerato, limite oltre il quale le prestazioni dei prodotti decadono in modo significativo. I provini bianchi, a fronte del valore iniziale maggiore, risultano quelli che subiscono una riduzione più rapida delle prestazioni legate all'abbattimento degli  $NO_x$ . Si osserva come i provini di colore salmone mantengano nel tempo valori abbastanza uniformi rispetto alle prestazioni iniziali fino al 3° step, dove si registra il valore maggiore tra i provini nei tre colori diversi.

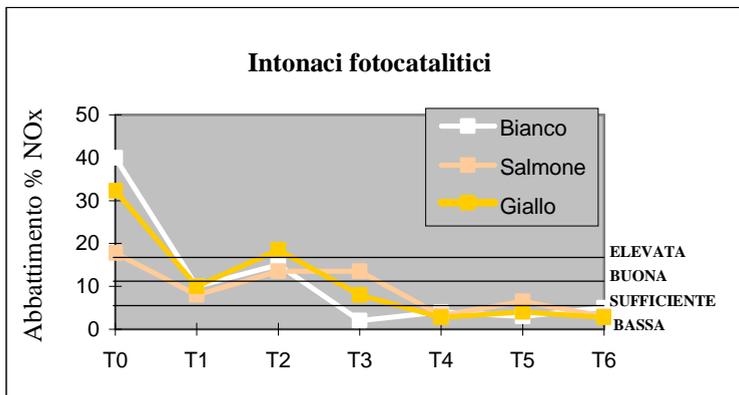


Figura 4.32 Attività fotocatalitica degli intonaci fotocatalitici invecchiati

La capacità di sviluppare attività fotocatalitica per i provini senza principio fotocatalitico è pressoché nulla, pertanto la capacità di abbattimento degli ossidi di azoto dipende esclusivamente dalla presenza del principio fotocatalitico (Fig. 4.33).

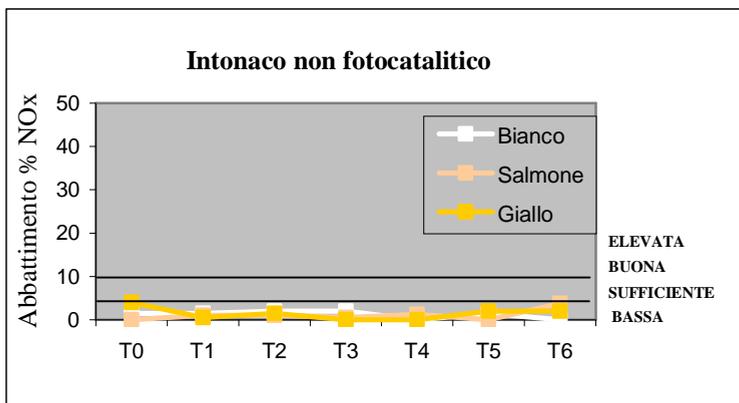


Figura 4.33 Attività fotocatalitica degli intonaci non fotocatalitici invecchiati

### Il colore: il monitoraggio dei provini invecchiati artificialmente

Le coordinate colorimetriche hanno mostrato variazioni significative fin dal primo step di invecchiamento. Gli intonaci non fotocatalitici hanno subito una variazione di colore più significativa, rispetto quelli fotocatalitici. Tramite la misura delle coordinate colorimetriche e della luminosità, sono stati calcolati i parametri colorimetrici più significativi:  $\Delta E^*_{ab}$  e  $\Delta C^*_{ab}$ , per ottenere una rappresentazione esaustiva del processo di invecchiamento del colore sulla superficie dei campioni. In prima analisi, la differenza di colore monitorata mostra come l'intonaco fotocatalitico mostri una tendenza alla variazione del colore che mediamente rimane inferiore di circa 2 punti rispetto all'intonaco non fotocatalitico. La variazione di colore è pressoché lineare fino al 2° step, poi si mantiene costante fino al 6° step, fino ai 4,5 punti l'intonaco fotocatalitico e 7,3 punti quello non fotocatalitico (Fig. 4.34).

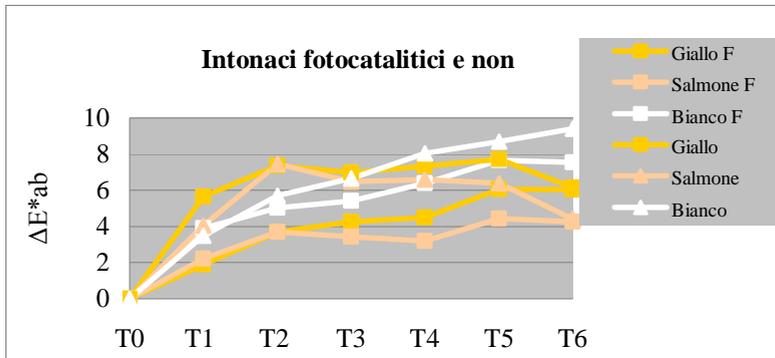


Figura 4.34 La differenza di colore per gli intonaci fotocatalitici (F) e non invecchiati

I diagrammi di cromaticità,  $a^*$ -  $b^*$ , mostrano una tendenza all'ingiallimento generalizzata per tutte le tinte indagate, con aumento progressivo della coordinata  $b^*$  nel verso positivo dell'asse delle ordinate, maggiore nei provini caratterizzati dall'assenza del principio fotocatalitico. Nei provini gialli fotocatalitici, l'incremento della coordinata  $b^*$  raggiunge il valore di 28 dopo il 6° step, mentre gli analoghi non fotocatalitici mostrano un valore finale di  $b^*$  pari a 32 (Fig. 4.35).

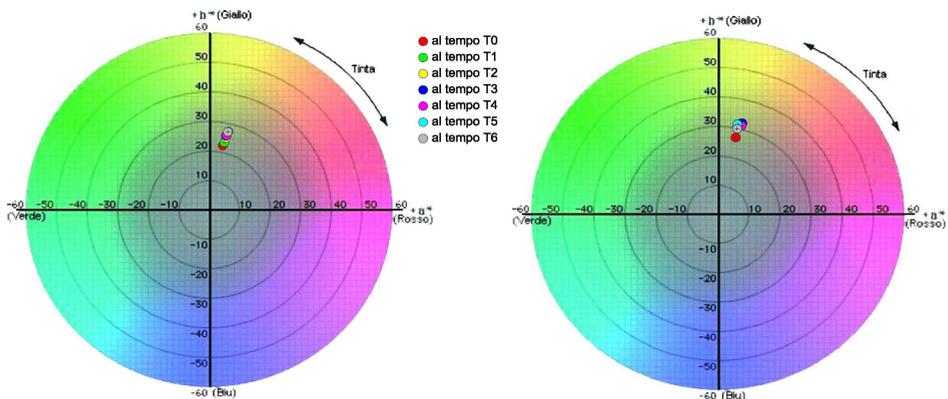


Figura 4.35 Diagramma di cromaticità dei provini gialli fotocatalitici (sx) e non (dx)

Analoghe considerazioni possono essere tratte per i provini di colore bianco e salmone. Per i provini bianchi, la tendenza all'ingiallimento è maggiore in quelli privi del principio fotocatalitico, per i quali l'incremento di  $b^*$  raggiunge il valore di 13 dopo il 6° step, mentre i fotocatalitici mostrano un valore finale di  $b^*$  pari a 11. Per i provini salmone, l'incremento di  $b^*$  raggiunge il valore di 24 per i non fotocatalitici e 23 per i fotocatalitici. I diagrammi che correlano la differenza di croma,  $\Delta C_{ab}^*$ , alla differenza di luminosità,  $\Delta L^*$ , sono utili per rappresentare graficamente e stimare l'evoluzione del colore in termini di percezione ottica (Fig. 4.36).

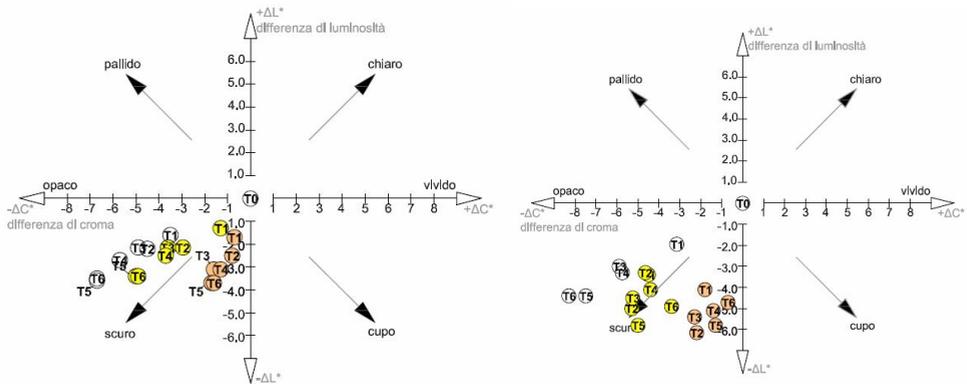


Figura 4.36 Diagramma  $\Delta C^*_{ab} - \Delta L^*$  per i provini fotocatalitici (sx) e non (dx)

I provini fotocatalitici hanno una tendenza a opacizzarsi inferiore rispetto a quelli non fotocatalitici. Per tutti i provini, la differenza di croma (in ascissa) è pressoché identica per entrambe le tipologie di provini, dopo l'invecchiamento accelerato, con valori intorno  $-6 \div -5$ , per i gialli, valori intorno  $-8 \div -7$  per i bianchi e  $-3 \div -2$  per i salmone. Per i provini fotocatalitici  $\Delta L^* = -4 \div -3$ , mentre per i provini non fotocatalitici è pari a circa il doppio, valori nel range  $-6 \div -5$ . I provini fotocatalitici hanno, dunque, una tendenza a scurire inferiore rispetto a quelli non fotocatalitici. La Tabella 4.6 mostra l'evoluzione del colore dei provini fotocatalitici, la Tabella 4.7 mostra l'evoluzione del colore dei provini non fotocatalitici.

Tabella 4.6 Immagini della superficie dei provini fotocatalitici invecchiati

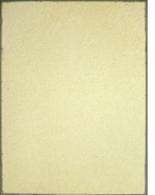
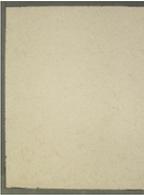
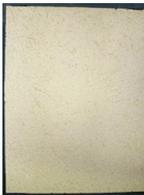
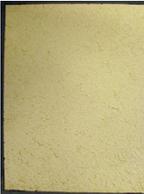
STEP	Giallo	Salmone	Bianco
<b>T<sub>0</sub></b>			
<b>T<sub>1</sub></b>			
<b>T<sub>2</sub></b>			
<b>T<sub>3</sub></b>			
<b>T<sub>4</sub></b>			
<b>T<sub>5</sub></b>			
<b>T<sub>6</sub></b>			

Tabella 4.7 Immagini della superficie dei provini non fotocatalitici invecchiati

STEP	Giallo	Salmone	Bianco
<b>T<sub>0</sub></b>			
<b>T<sub>1</sub></b>			
<b>T<sub>2</sub></b>			
<b>T<sub>3</sub></b>			
<b>T<sub>4</sub></b>			
<b>T<sub>5</sub></b>			
<b>T<sub>6</sub></b>			

### *Il colore: il monitoraggio dei provini invecchiati naturalmente*

I provini posti in esterno hanno subito l'influenza degli agenti atmosferici dell'ambiente palermitano, i dati si riferiscono ad un periodo di 12 mesi di esposizione esterna, a partire dal novembre 2010. Il grafico in Fig. 4.37 riporta i risultati del monitoraggio della differenza di colore sia per i provini fotocatalitici che non fotocatalitici.

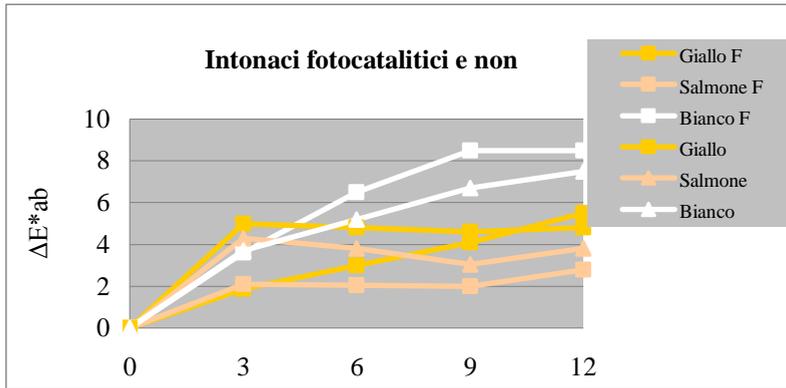


Figura 4.37 La differenza di colore dei provini fotocatalitici (F) e non, dopo un anno di invecchiamento naturale

Si riscontra un iniziale incremento della differenza di colore, relativa all'esposizione nei primi mesi invernali (novembre-gennaio), maggiore per l'intonaco non fotocatalitico colorato e simile per il bianco. Nei successivi mesi è stato riscontrato un mantenimento dei valori e quindi del colore per i provini fotocatalitici e non, di colore giallo e salmone, mentre per i provini bianchi continua l'incremento della differenza di colore, attestandosi su valori prossimi ad 8 punti, dopo 12 mesi di invecchiamento naturale. I provini di colore salmone sono quelli che mantengono maggiormente nel tempo il colore; la differenza di colore massima riscontrata è pari a 2.73 per quelli fotocatalitici e 3.81 per quelli non fotocatalitici.

### *Il colore: il rescaling temporale*

La procedura del rescaling temporale, come codificata prima dalla norma ISO 15686 e dalla norma UNI 11156 dopo, consiste nella comparazione dei dati di invecchiamento accelerato, ottenuti in laboratorio, con i dati misurati in esterno sugli stessi materiali sottoposti agli agenti naturali, nel contesto climatico di riferimento. L'analisi comparativa dei dati porta ad effettuare ipotesi di time-rescaling: l'evoluzione del colore è identica dopo 12 mesi e pari ad uno step di invecchiamento accelerato, pari a 48 cicli di invecchiamento accelerato per i provini di colore salmone, fotocatalitici e non, e per i provini non fotocatalitici gialli. Per i provini gialli fotocatalitici e per tutti i bianchi, 12 mesi = 4 step, pari a circa 200 cicli.

### *L'aspetto superficiale*

Attraverso la norma UNI 11182:2006 sono state individuate le forme di alterazione visibili macroscopicamente che interessano l'aspetto superficiale dei provini intonacati, permettendone così il rilevamento dello stato di conservazione per effetto dell'invecchiamento accelerato indotto. La forma di alterazione che è stata riscon-

trata sulla superficie dei campioni, al termine dei diversi step di cicli di invecchiamento accelerato, è la disgregazione<sup>9</sup>. La Tabella 4.8 e la Tabella 4.9 mostrano le immagini più significative del monitoraggio degli intonaci fotocatalitici e non, effettuato durante i cicli di invecchiamento accelerato mediante microscopio ottico. Le osservazioni al microscopio elettronico sono state utili per fornire un quadro più approfondito degli effetti causati dall'esposizione agli agenti atmosferici, cui sono stati oggetto i provini di intonaco fotocatalitico e non, in camera climatica. Ciò che si può rilevare è che inizialmente i campioni di intonaco fotocatalitico non mostrano presenza di micropori, soprattutto i gialli, che fino al 2° step conservano una superficie inalterata. Con il progredire degli step si ha un progressivo aumento del diametro dei micropori nel materiale, aumento non significativo in quanto questo si mantiene nell'ordine del decimo di millimetro e nello specifico nel diametro massimo di 0,07 mm per i provini gialli, 0,15 mm per i provini salmone e 0,12 mm per i provini bianchi. I provini non fotocatalitici mostrano un comportamento simile ai provini fotocatalitici, con disgregazione simile, sebbene qualitativamente appaia una maggiore presenza di micropori. Nei successivi step, il diametro dei micropori tende ad aumentare (0,16 mm i gialli, 0,14 mm per i salmone, 0,11 mm i bianchi).

### *Conclusioni*

L'attività fotocatalitica misurata in termini di abbattimento percentuale degli NOx, per i provini di intonaco decorativo fotocatalitico risulta molto elevata al tempo zero, riducendosi progressivamente e mantenendo valori significativi fino al 3° step, che corrisponde a 150 cicli di invecchiamento accelerato, oltre il quale si registra una perdita di efficienza. L'intonaco fotocatalitico nella tinta bianca, a fronte del suo maggiore valore iniziale, subisce l'abbattimento più veloce. Si osserva ancora come i provini nella tinta salmone mantengano nel tempo valori abbastanza uniformi rispetto alle prestazioni iniziali fino al 3° step dove raggiungono il valore maggiore rispetto agli altri fotocatalitici di tinta diversa. L'intonaco fotocatalitico, a parità di invecchiamento, subisce variazioni di colore mediamente inferiori di circa 2 punti rispetto a quelli non fotocatalitici dello stesso colore, dimostrando una maggiore capacità a mantenere il colore nel tempo. Anche per quanto riguarda il mantenimento del colore, i provini salmone mantengono un'efficienza maggiore, rispetto ai provini nelle tinte gialla e bianca. I risultati del rescaling temporale mostrano che dopo 12 mesi di invecchiamento naturale si ottengono variazioni di colore diverse in relazione alle tinte ed alla presenza del principio fotocatalitico, ma tali da poter affermare che mediamente uno step di invecchiamento accelerato corrisponde a 12 mesi di invecchiamento naturale. Si può affermare che gli intonaci fotocatalitici più scuri (salmone e giallo) sviluppano attività fotocatalitica più costante nel tempo (Enea, 2010) e mantengono maggiormente il colore rispetto alla tinta bianca, più soggetta a fenomeni di ingiallimento. In generale, a parità di composizione, la presenza del principio fotocatalitico aumenta la durabilità del colore dell'intonaco. Durabilità che risulta maggiore per i colori più scuri.

---

<sup>9</sup> L'acronimo nella norma UNI 11182:2006 per questa forma di alterazione è DIS e consiste in decoesione con caduta del materiale sotto forma di polvere o minutissimi frammenti.

Tabella 4.8 Ingrandimenti a 6.3x della superficie dei provini fotocatalitici

STEP	Giallo	Salmone	Bianco
<b>T<sub>0</sub></b>			
<b>T<sub>1</sub></b>			
<b>T<sub>2</sub></b>			
<b>T<sub>3</sub></b>			
<b>T<sub>4</sub></b>			
<b>T<sub>5</sub></b>			
<b>T<sub>6</sub></b>			

Tabella 4.9 Ingrandimenti a 6.3x della superficie dei provini non fotocatalitici

STEP	Giallo	Salmone	Bianco
<b>T<sub>0</sub></b>			
<b>T<sub>1</sub></b>			
<b>T<sub>2</sub></b>			
<b>T<sub>3</sub></b>			
<b>T<sub>4</sub></b>			
<b>T<sub>5</sub></b>			
<b>T<sub>6</sub></b>			

#### 4.9.2 La pittura fotocatalitica

##### L'attività fotocatalitica

I campioni di pittura sono stati oggetto di indagine, per testare l'attività fotocatalitica, secondo la metodologia standardizzata della norma UNI 11247 (§ 4.6.1), prima dell'azione degli agenti sollecitanti, e dopo una serie di sei step di invecchiamento artificiale indotto in camera climatica ed in camera a nebbie saline. Per effettuare il confronto tra le condizioni di laboratorio e quelle naturali, una serie di provini sono stati sottoposti alle condizioni meteo-climatiche esterne. Dalle analisi di abbattimento degli NOx, si è riscontrato un valore medio dell'abbattimento al tempo zero pari al 30%. Il diagramma in Fig. 4.38 riporta i valori dell'attività fotocatalitica dei campioni di pittura bianca sottoposti ad invecchiamento artificiale.

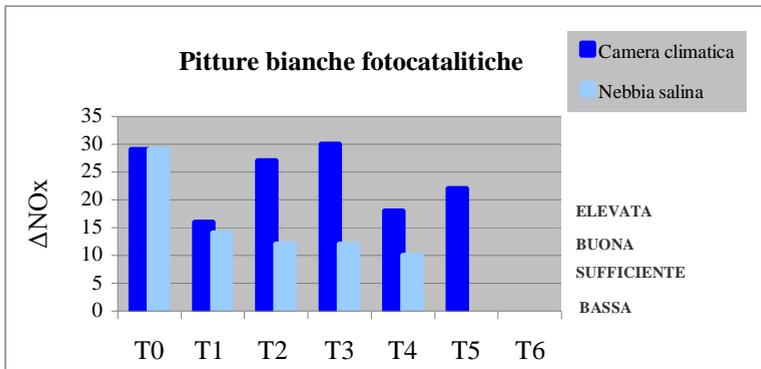


Figura 4.38 L'evoluzione dell'attività fotocatalitica dei provini bianchi

I risultati mostrano una buona attività fotocatalitica fino al sesto step di invecchiamento, pari a circa 300 cicli di invecchiamento accelerato, con un decadimento massimo pari al 25%. I dati di attività fotocatalitica ad un anno di invecchiamento naturale non sono ancora disponibili, pertanto, non è stato possibile procedere alla procedura di confronto con i dati di invecchiamento accelerato, così come previsto dalla norma ISO 15686. I risultati relativi ai provini di pittura bianca non si discostano significativamente da quelli della pittura ingiallita (Fig. 4.39).

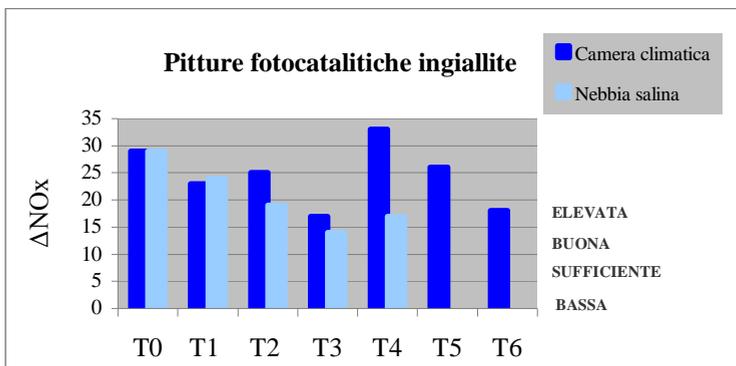


Figura 4.39 L'evoluzione dell'attività fotocatalitica dei provini ingialliti

### Il colore

Le misurazioni effettuate rappresentano per ciascun punto la media di cinque battute, su una superficie rappresentativa di circa 0.1 mq per ciascun campione. Nel grafico in Fig. 4.40 sono riportati i risultati del monitoraggio della variazione di colore dei provini fotocatalitici, dopo il 5° step di invecchiamento.

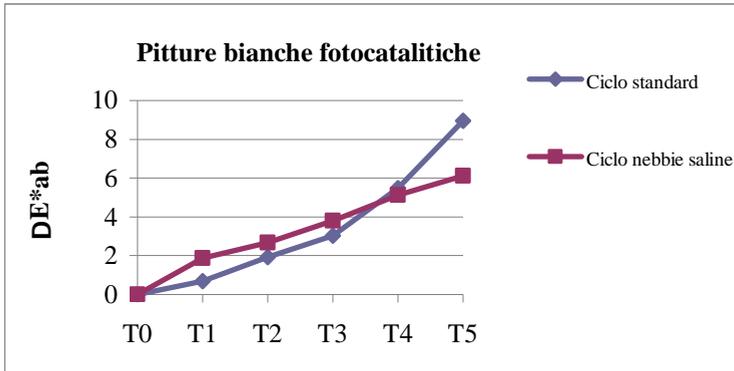


Figura 4.40 L'evoluzione della differenza di colore dei provini invecchiati artificialmente

La variazione di colore ha un andamento pressoché lineare fino al 4° step di invecchiamento, con incrementi simili per i provini invecchiati con il ciclo standard e con il ciclo nebbie saline ed una differenza di colore misurata a favore del ciclo standard di circa 1.5 punti. Dopo il 4° step, la tendenza si inverte e la variazione di colore riscontrata risulta essere maggiore per i provini soggetti al ciclo standard, piuttosto che quelli soggetti al ciclo nebbie saline, con una differenza misurata di circa 2.5 punti. Il diagramma di cromaticità in Fig. 4.41 mostra come la coordinata  $b^*$  aumenti progressivamente verso il giallo, mentre la coordinata  $a^*$  si mantenga costante.

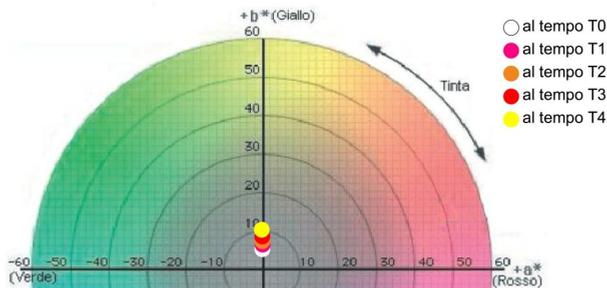


Figura 4.41 Diagramma di cromaticità dei campioni invecchiati artificialmente

I provini posti in esterno hanno subito l'influenza degli agenti atmosferici dell'ambiente palermitano, i dati si riferiscono ad un periodo di 12 mesi di esposizione esterna, a partire da novembre 2010 (Fig. 4.42).

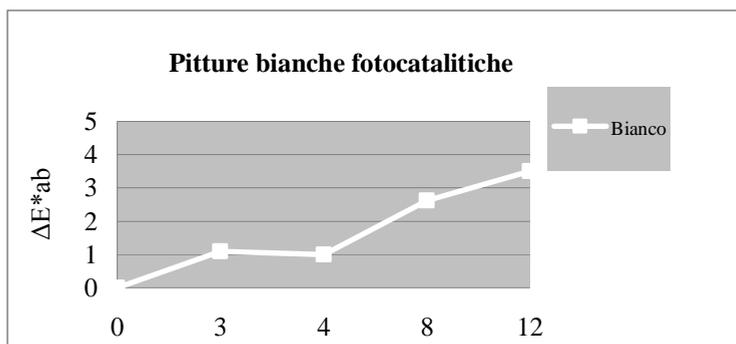


Figura 4.42 L'evoluzione della differenza di colore dei provini invecchiati naturalmente

Da questi primi rilievi è possibile riscontrare un iniziale incremento della differenza di colore, relativa all'esposizione nei primi mesi invernali (novembre-gennaio). Nei successivi mesi è stato riscontrato il mantenimento della differenza di colore intorno ad 1 punto. La procedura del rescaling temporale, come codificata prima dalla norma ISO 15686 e dalla norma UNI 11156 dopo, consiste nella comparazione dei dati di invecchiamento accelerato, ottenuti in laboratorio, con i dati misurati in esterno sugli stessi materiali sottoposti agli agenti naturali, nel contesto climatico di riferimento. L'evoluzione del colore, per i provini invecchiati secondo le due modalità (ciclo standard e nebbie saline) è identica dopo 12 mesi e pari ad 1 step di invecchiamento accelerato, pari a 48 cicli di invecchiamento accelerato. Le valutazioni potranno essere maggiormente dettagliate dopo almeno un altro anno di esposizione naturale.

#### *L'aspetto superficiale mediante microscopio ottico*

Le forme di alterazione riscontrate sulla superficie dei campioni di pittura, bianca ed ingiallita, al termine dei diversi step di cicli di invecchiamento accelerato, sono il distacco e lo sfarinamento, secondo la descrizione riportata nella norma UNI EN ISO 4618:2007, oltre che le variazioni cromatiche misurate e riportate in precedenza (Tabella 4.10 e Tabella 4.11). Le osservazioni al microscopio ottico permettono di determinare il quadro degli effetti causati dall'esposizione ai cicli di invecchiamento accelerato. In tutti i provini si può rilevare, al tempo T0, la presenza di cavillature, dovute alle tensioni interne che si sono determinate durante la fase di essiccazione, anche a causa della diversa elasticità della pittura, rispetto al supporto in laterizio su cui non è stato preventivamente steso un primer. I micropori in media hanno dimensione pari a 0,30 mm. Si è osservato, sia per i provini bianchi che per quelli ingialliti, un progressivo aumento del diametro dei micropori e della quantità delle cavillature, rispettivamente dell'ordine di 0,40 mm, con il procedere degli step di invecchiamento accelerato. I provini che hanno subito anche cicli di invecchiamento in camera a nebbie saline mostrano un maggiore degrado. A partire dal 2° step si è verificato il distacco progressivo di parti della pellicola pittorica.

Tabella 4.10 Ingrandimenti a 6.3x e fotografie della superficie dei provini di pittura bianca

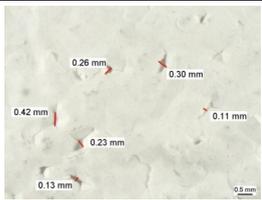
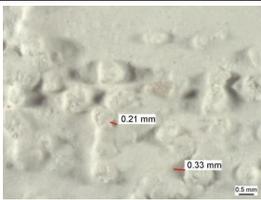
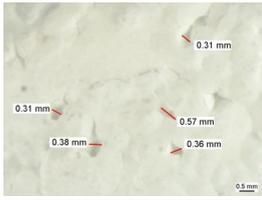
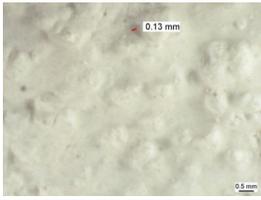
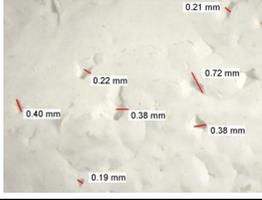
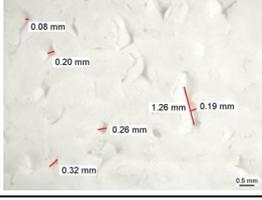
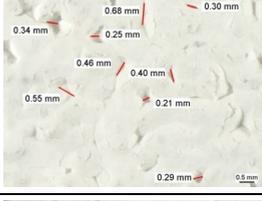
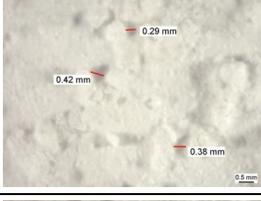
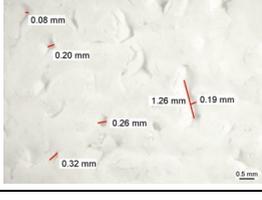
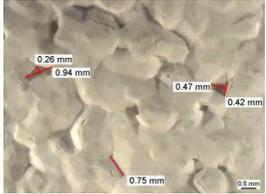
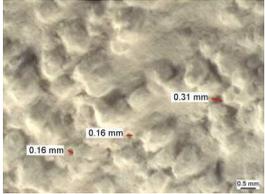
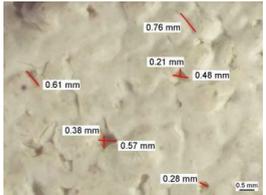
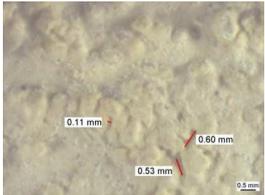
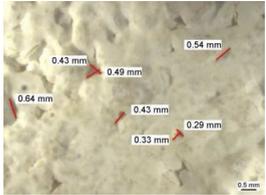
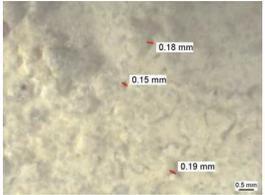
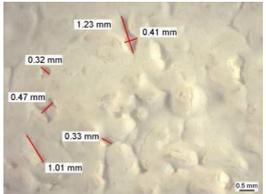
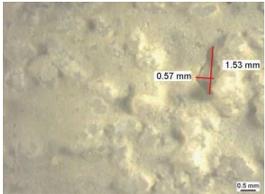
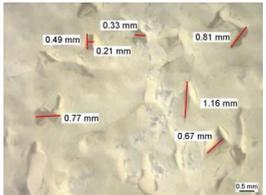
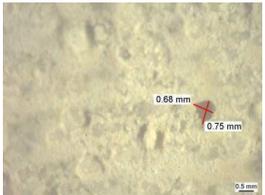
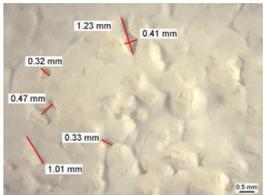
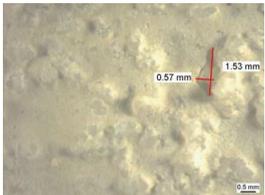
STEP	Ciclo A+B	Ciclo A+B (n)	Fotografia
<b>T<sub>0</sub></b>			
<b>T<sub>1</sub></b>			
<b>T<sub>2</sub></b>			
<b>T<sub>3</sub></b>			
<b>T<sub>4</sub></b>			
<b>T<sub>5</sub></b>			

Tabella 4.11 Ingrandimenti a 6.3x e fotografie della superficie dei provini ingialliti

STEP	Ciclo A+B	Ciclo A+B (n)	Fotografia
<b>T<sub>0</sub></b>			
<b>T<sub>1</sub></b>			
<b>T<sub>2</sub></b>			
<b>T<sub>3</sub></b>			
<b>T<sub>4</sub></b>			
<b>T<sub>5</sub></b>			

In base alla metodologia di valutazione del degrado superficiale di una superficie pittorica (UNI EN ISO 4628-1:2007), è stata effettuata la valutazione dei degradi riscontrati (Tab. 4.12).

Tabella 4.12 Classificazione dei degradi (UNI EN ISO 4628-1:2007)

Degradi	Classe			
	Cavillature	Microfori	Distacco	Sfarinamento
<b>F25</b>	-	5 (S2)	-	-
<b>F1</b>	-	5 (S2)	-	<b>1</b>
<b>F21</b>	-	3 (S4)	-	<b>3</b>
<b>F4</b>	2 (S5)	2 (S4)	<b>4</b>	-

*L'aspetto superficiale mediante microscopio a scansione elettronica*

La valutazione degli effetti dell'invecchiamento accelerato sulla superficie esposta agli agenti climatici indotti in camera climatica è stata condotta anche mediante il SEM del laboratorio Geolab S.r.l. di Carini (PA). Sono state confrontate le osservazioni, al termine di ogni step, su frammenti prelevati dai campioni utilizzati durante la sperimentazione. Le osservazioni in Fig. 4.43 si riferiscono al campione vergine di pittura bianca.

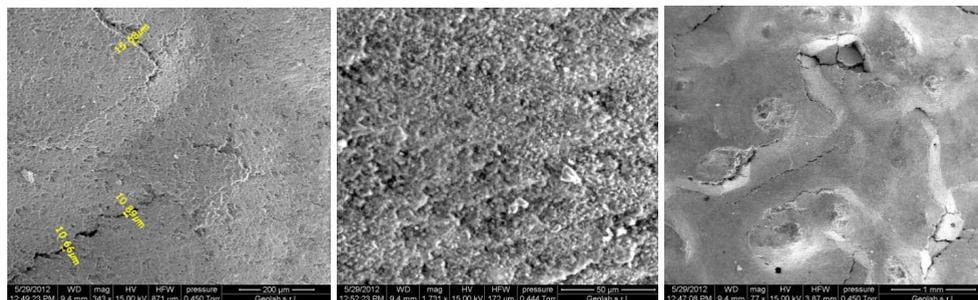
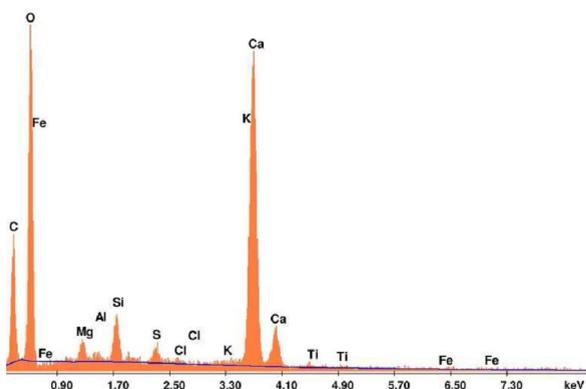


Figura 4.43 Immagini SEM a 80X (sx), 350X (centro) e 2000X ingrandimenti(dx)

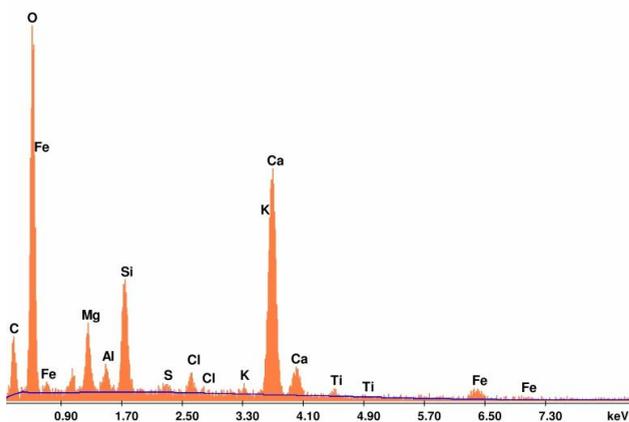
L'esame morfologico nei vari ingrandimenti mostra una superficie pressoché liscia ed omogenea. In particolare nell'ingrandimento a 80X si osserva la presenza sia di cavillature che di micropori, mentre ad un ingrandimento maggiore si evidenzia la dimensione delle cavillature dell'ordine di 10 µm. Nell'ingrandimento a 2000X, pur avendo una superficie omogenea, si evidenzia la presenza di particelle di forma irregolare di dimensioni variabili dell'ordine di pochi µm, disperse sulla superficie. L'analisi chimica del campione di pittura bianca mostra la presenza preponderante del Calcio e del Carbonio, il Titanio è presente in quantità tale da conferire proprietà fotocatalitiche alla superficie (Fig. 4.44).



Elemento	%	W%
<b>O K</b>	45,19	53,20
<b>Ca K</b>	30,75	14,45
<b>C K</b>	18,33	28,75
<b>Si K</b>	2,18	1,46
<b>Fe K</b>	0,22	0,07
<b>Ti K</b>	0,43	0,17
<b>Altri</b>	2,90	1,90
<b>Totale</b>	100	100

Figura 4.44 Spettro degli elementi chimici presenti nel campione di pittura bianca

L'analisi chimica di provini ingialliti dimostra la presenza del Ferro tra gli elementi chimici presenti sulla superficie dei campioni (Fig. 4.45).



Elemento	%	W%
<b>O K</b>	45,19	53,20
<b>Ca K</b>	30,75	14,45
<b>C K</b>	18,33	28,75
<b>Si K</b>	2,18	1,46
<b>Fe K</b>	0,22	0,07
<b>Ti K</b>	0,43	0,17
<b>Altri</b>	2,90	1,90
<b>Totale</b>	100	100

Figura 4.45 Spettro degli elementi chimici presenti nel campione di pittura ingiallita

### Conclusioni

L'attività fotocatalitica dei provini di pittura fotocatalitica, bianca ed ingiallita, a prescindere dal tipo di invecchiamento artificiale subito, risulta buona fino al 6° step di invecchiamento accelerato. Si è riscontrata un elevato valore dei prodotti tal quali, pari a circa il 30% di abbattimento degli NO<sub>x</sub>, che si riduce progressivamente mantenendo valori pari a circa il 20% alla fine del 6° step di invecchiamento accelerato. Non si riscontrano particolari differenze tra i provini bianchi ed

ingialliti, segno che l'ossido ferrico non influisce sull'attività fotocatalitica dei campioni. L'invecchiamento in camera a nebbie saline produce una riduzione dell'attività fotocatalitica pari all'incirca 50% a partire dal 2° step in poi, rispetto i provini invecchiati con il ciclo base. In termini colorimetrici, la variazione di colore ha un andamento lineare che raggiunge i 2 punti dopo il 2° step di invecchiamento accelerato. I risultati del rescaling temporale mostrano che dopo 12 mesi di invecchiamento naturale si ottengono variazioni di colore tali da poter affermare che uno step di invecchiamento accelerato corrisponde almeno a 12 mesi di invecchiamento naturale. La superficie dei campioni, a livello morfologico, rimane pressoché inalterata, sebbene gli effetti dell'invecchiamento accelerato indotto in camera climatica ed in camera a nebbie saline producano un distacco della pittura dal supporto e fenomeni di sfarinamento, dovuti anche al diverso modulo di elasticità dei materiali a contatto (pittura cementizia e tavella in laterizio). Verosimilmente l'applicazione di un primer avrebbe ridotto gli effetti delle diverse dilatazioni termiche evitando il distacco della pittura dal supporto.

## 5 GLI INTONACI DI FINITURA SILOSSANICI

I rivestimenti silossanici, nel quadro dei rivestimenti delle superfici esterne dei fabbricati, sono di grande interesse per le proprietà che conferiscono alle superfici trattate, in particolare l'idrorepellenza e la traspirabilità. L'idrorepellenza, in particolare, consente al particolato atmosferico di aderire meno alle superfici trattate e di essere più facilmente rimosso per dilavamento dalla pioggia battente. Sul mercato italiano, solo recentemente, intorno alla fine degli anni '80, sono state introdotte pitture e rasanti a base di resine silossaniche e non esistono norme italiane specifiche di prodotto, se non relative agli intonaci ed alle pitture. Si fa riferimento alla norma DIN 18363 per la composizione delle pitture a base di resine siliciche e alla norma EN 1062 per la classificazione delle pitture per esterni in base alla composizione e alle sue proprietà fisiche.

### 5.1 I composti

I rivestimenti silossanici sono basati su polimeri silossani, facenti parte della vasta gamma dei polimeri silicici, a base silicea ed organica. In particolare i silossani sono basati su legami fondamentali Si-O. I rivestimenti silossanici sono caratterizzati dalla presenza della resina come componente essenziale e se il contenuto di resina silossanica è superiore al 40%, i prodotti sono definiti "Silossanici Puri". Il contenuto percentuale di resina silossanica determina le prestazioni del rivestimento (Villavecchia, 1976).

### 5.2 La struttura dei polimeri silossani

I silossani sono polimeri caratterizzati da un'alternanza di atomi di Ossigeno e di Silicio, legati tra di loro e tali per cui le valenze libere degli atomi di Silicio sono saturate da gruppi alchilici o acrilici (-CH<sub>3</sub>, -C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>, -CH=CH<sub>2</sub> sono i più comuni), rappresentati dalla lettera R nella seguente formula di struttura in Fig. 5.1.

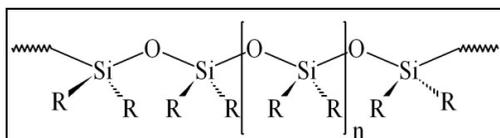


Figura 5.1 Formula di struttura della catena silossanica ([www.ctseurope.com](http://www.ctseurope.com))

La natura dei silossani è determinata dal tipo di gruppo R (se è un metile, il polimero silossanico risulta maggiormente elastico, se è un fenile, il polimero risulta più rigido) e dalla lunghezza della catena. I polimeri silossanici dove il radicale libero è costituito da un gruppo metilico (CH<sub>3</sub>), sono comunemente noti come polidimetilsilossani [SiO(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]<sub>n</sub>. Il polidimetilsilossano (PDMS) è tra i più comuni polimeri silossanici e si ottiene per idrolisi del dimetilclorosilano. Il polimero PDMS è caratterizzato da una notevole resistenza alla temperatura, agli attacchi chimici, all'ossidazione, è un ottimo isolante elettrico e resistente all'invecchiamento, trasparente, biocompatibile, inerte, non tossico, né infiammabile. Grazie a queste pro-

prietà, i silossani hanno molteplici usi nell'industria, non solo delle costruzioni, ma anche nella cosmetica, come deodoranti e saponi. La struttura di questi polimeri, costituiti da sequenze  $R_2SiO$ , la coesistenza nello stesso polimero di legami Si-O e di gruppi organici conferisce ai silossani una combinazione di proprietà derivanti dalla natura bivalente del polimero stesso. Le norme ASTM D1418 e ISO 1629 classificano i polimeri siliconici in base alla natura dei gruppi legati agli atomi di Silicio in:

- MQ (polidimetilsilossani);
- VMQ (polivinilmetilsilossani);
- PVMQ (polifenilvinilmetilsilossani);
- FVMQ (polifluorovinilmetilsilossani o fluorosiliconi).

Il legame silossanico Si-O alla base della catena silconica è altamente stabile, 433 KJ/mol, rispetto al legame Carbonio-Carbonio, 355 KJ/mol, alla base della composizione delle gomme più diffuse in commercio. Grazie a questa peculiarità, i siliconi hanno una maggiore resistenza al calore e stabilità chimica rispetto alle comuni gomme organiche. Inoltre, la conformazione elicoidale del polimero determina basse forze intermolecolari tra le catene e quindi elevata elasticità, alta comprimibilità e flessibilità fino a temperature molto basse (Fig. 5.2).

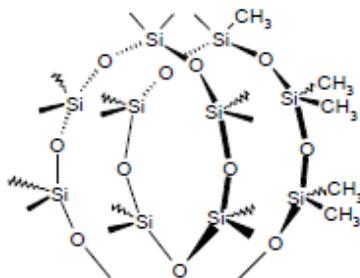


Figura 5.2 Conformazione elicoidale delle catene di PDMS (Serra et al., 2007)

La natura del PDMS è tale da legare direttamente al supporto i gruppi metilici,  $CH_3$ , per cui nel processo di reticolazione che subisce si formano legami chimici con il supporto, così garantendo un'adesione diretta. Il polimero, pertanto, nella reticolazione costituisce una struttura tale da conferire microporosità allo strato applicato, sufficiente ad impedire l'attraversamento della molecola dell'acqua, ma tale da garantire il passaggio del vapore acqueo. Lo strato applicato a base del polimero silossanico risulta idrofobo ed insieme traspirante al vapor d'acqua. Il polimero silossanico viene addizionato con gruppi acrilici o stirolo-acrilici per conferire ai polimeri silossanici un adeguato potere legante dei pigmenti. Il semplice contatto con gli agenti atmosferici comporterebbe un'immediata degradazione del rivestimento. Queste addizioni non alterano traspirabilità e aderenza al supporto.

### 5.3 La struttura dei polimeri acrilici

La resina acrilica (anche detta acrilstirolo copolimerizzato) addizionata al polimero silossanico per migliorarne alcune prestazioni è costituita da catene di monomeri, generalmente di acido acrilico  $[CH_2-(CH)COOH]_n$  o di acido metacrilico  $[CH_2-$

$(\text{CH}_3\text{COOH})_n$ . La sua caratteristica è quella di essere emulsionabile in acqua. La grande diffusione delle resine acriliche è dovuta sia alla loro versatilità che alle caratteristiche di resistenza agli agenti chimici, alle radiazioni UV e all'acqua. L'inerzia chimica è connessa sia con la stabilità della catena polimerica a base di legami C-C, sia con la struttura specifica acrilica o metacrilica. Le resine acriliche, a seconda delle loro caratteristiche, possono essere termoplastiche e termoindurenti. Le prime impiegano principalmente i monomeri di metacrilato di metile, acrilato di etile e metacrilato di etile ed hanno una massa molecolare variabile nel range  $0,5 \div 1 \times 10^5$  g/mol. Minore è la massa molecolare dei polimeri, minore è la resistenza agli agenti atmosferici, di contro, la maggiore massa molecolare, a causa dell'elevata viscosità corrispondente, determina difficoltà applicative. Queste resine acriliche di natura termoplastica, nella maggior parte dei casi, prevedono l'utilizzo di solventi costosi e nocivi, pertanto le procedure applicative devono sottostare a rigorosi controlli normativi. Le seconde, le resine acriliche termoindurenti, presentano un peso molecolare minore, compreso nel range  $5 \div 10 \times 10^3$  g/mol, e sono costituite da monomeri contenenti gruppi funzionali reattivi, capaci di indurre processi di reticolazione. Le resine termoindurenti sono classificabili in base alla natura chimica del gruppo funzionale che determina la reazione di reticolazione. Pertanto, le resine acriliche possono essere a base ossidrilica ovvero a base acrilamide ovvero a base epossidica ovvero con funzione carbossilica ovvero con funzioni amminiche (Martuscelli, 2008).

#### 5.4 La resina acril-silossanica

La produzione di resine acril-silossaniche avviene aggiungendo ad una dispersione acrilica bilanciata, quantità di emulsione acquosa di un polidimetilsilossano modificato (PDMS). La particolare caratteristica di queste resine è la bassa tensione superficiale cioè l'elevata capacità del prodotto in fase liquida di "bagnare" la superficie trattata. Questa capacità di "bagnare" la superficie trattata è misurata tramite l'angolo di contatto (Fig. 5.3) formato tra la tangente ad una goccia di acqua posta sulla superficie ed il piano di contatto, nel punto di contatto; tanto maggiore è l'angolo di contatto, tanto maggiore sarà l'idrorepellenza della superficie. In questo caso la superficie viene definita idrofoba.

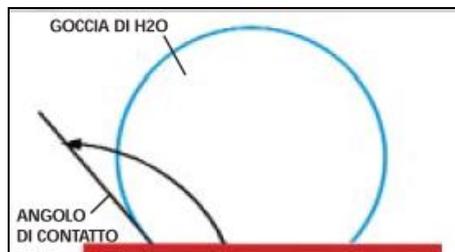


Figura 5.3 Angolo di contatto di un supporto idrorepellente

Se il supporto non è idrorepellente e ha una tensione superficiale maggiore di quella dell'acqua, avviene la diffusione della goccia sulla superficie e l'angolo di contatto risulterà minore di  $90^\circ$  (Fig. 5.4). La superficie verrà denominata idrofila.

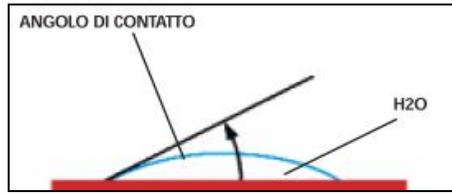


Figura 5.4 Angolo di contatto di un supporto idrofilo

I prodotti a base di resine acril-silossaniche determinano la formazione di uno strato aderente alla superficie, tale da rivestire le pareti dei pori capillari del supporto senza chiuderli. Si vengono a determinare una superficie con tensione superficiale minore di quella dell'acqua, tale da impedirne la penetrazione, ma consentendo la traspirabilità del supporto e quindi il passaggio delle molecole di vapore acqueo.

## 5.5 Requisiti

I principali requisiti dei rivestimenti acril-silossanici sono:

- Elevata idrofobicità della superficie con conseguente effetto autopulente;
- Elevata permeabilità al vapore dall'interno verso l'esterno;
- Ridotta possibilità di formazione di efflorescenze saline (Fig. 5.5).

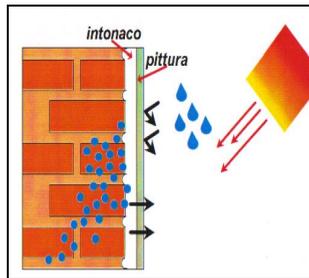


Figura 5.5 Rivestimento silossanico permeabile al vapore e impermeabile all'acqua

### 5.5.1 L'idrorepellenza e l'autopulizia

Il requisito di idrorepellenza che le superfici trattate con un rivestimento acril-silossanico acquisiscono determina, come effetto secondario, ma non meno rilevante, ai fini della durabilità della superficie, l'autopulizia della superficie stessa. La pioggia, a contatto con la superficie, non si spande su di essa, ma "rotola" via, mantenendo la sua tipica forma a goccia e non penetrando all'interno del supporto. E' il cosiddetto "effetto loto" (§ 4.4) tipico delle Nelumbonaceae (Fig. 5.6).



Figura 5.6 La foglia del loto non assorbe l'acqua a contatto che scivola via

La superficie di queste foglie è composta da protuberanze distanti poche decine di  $\mu\text{m}$  l'una dall'altra e composte a loro volta da nano-strutture tubolari (Fig. 5.7).

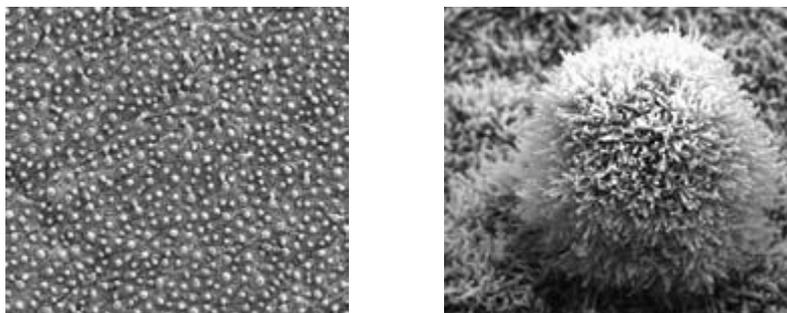


Figura 5.7 Immagini al SEM a ingrandimenti maggiori di una foglia di loto (Pugno, 2013)

Il rivestimento, possedendo questa caratteristica, si mantiene asciutto e dunque protetto dalla formazione di muffe, funghi e muschio. Per i climi particolarmente rigidi, con temperature che scendono al di sotto di  $0^{\circ}\text{C}$  viene evitata la formazione di cristalli di ghiaccio in superficie ed il conseguente degrado sotto forma di sfarinamenti, distacchi e la conseguente perdita del requisito di isolamento termico. Un'ulteriore innovazione tecnologica consistente nell'inserimento di una molecola di fluoro nella catena del polimero silossanico, conferisce proprietà oleofobiche cioè respingenti le sostanze grasse contenute nell'atmosfera.

#### 5.5.2 *La permeabilità al vapor d'acqua*

I rivestimenti a base di resine acril-silossaniche permettono all'umidità presente nei muri di evaporare liberamente verso l'esterno, impedendo il fenomeno della condensazione dell'acqua e la formazione di rigonfiamenti all'interfaccia tra supporto e rivestimento che ne determinerebbero il distacco. La pittura, infatti, si caratterizza per una struttura microporosa che permette la permeabilità al vapore acqueo.

#### 5.5.3 *Protezione dagli agenti chimici e dai sali*

Il rivestimento acril-silossanico è efficace anche per la protezione dei supporti dagli aggressivi chimici presenti in atmosfera. L'effetto idrofobizzante, protegge i capillari e le microcavillature dei muri e non permette la penetrazione in profondità delle piogge acide, prevenendo l'azione corrosiva ed espansiva dovuta alla formazione dei sali e del gelo.

### 5.6 **La normativa di riferimento per le pitture**

Per la valutazione dei due principali requisiti espliciti da un rivestimento acril-silossanico, in particolare per le pitture, la normativa italiana e la normativa tedesca forniscono alcune norme di riferimento, la norma DIN 52617:1987<sup>1</sup> e la norma UNI EN 1062-3:2008<sup>2</sup> per la valutazione dell'idrorepellenza o impermeabilità

<sup>1</sup> DIN 52617:1987. Determination of the water absorption coefficient of construction materials

<sup>2</sup> UNI EN 1062-3:2008. Pitture e vernici - Prodotti e sistemi di verniciatura di opere murarie esterne e calcestruzzo - Parte 3: Determinazione della permeabilità all'acqua liquida

all'acqua; la norma DIN 52615:1987<sup>3</sup> adesso sostituita dalla norma DIN EN ISO 12572:2001<sup>4</sup>, e la norma UNI EN ISO 7783:2012<sup>5</sup> per la valutazione della permeabilità al vapore acqueo o traspirabilità. Inoltre la Direttiva Europea 2004/42/CE, recepita in Italia dal D.Lgs. 161/2006<sup>6</sup>, regola le emissioni di composti organici volatili conseguenti all'uso di solventi di pitture e vernici.

#### 5.6.1 L'assorbimento d'acqua (DIN 52617 e UNI EN 1062-3)

Il coefficiente di assorbimento d'acqua  $w$  [ $\text{Kg m}^{-2} \text{h}^{-0,5}$ ] che rappresenta la permeabilità all'acqua di una pittura indica la quantità d'acqua, espressa in kg, che riesce ad attraversare una superficie di 1 mq in un determinato tempo. Una pittura è classificata idrorepellente o repellente a seconda del valore di  $w$  (Tab. 5.1). La permeabilità all'acqua  $w$  di un prodotto viene misurata mettendo a contatto il liquido sul supporto trattato, misurando poi il peso (Kg) dello stesso liquido "permeato" o assorbito, in una specifica superficie (mq) in un dato tempo (h).

Tabella 5.1 Valori del parametro assorbimento d'acqua tratte dalle norme

Permeabilità bassa	Permeabilità media	Permeabilità elevata
$w < 0,1 \text{ Kg m}^{-2} \text{h}^{-0,5}$	$0,1 < w < 0,5 \text{ Kg m}^{-2} \text{h}^{-0,5}$	$w > 0,5 \text{ Kg m}^{-2} \text{h}^{-0,5}$
Classe III <sup>a</sup>	Classe II <sup>a</sup>	Classe I <sup>a</sup>

#### 5.6.2 La permeabilità al vapore (DIN EN ISO 12572 e UNI EN ISO 7783)

Per la valutazione della permeabilità al vapore acqueo occorre definire due parametri:  $\mu$  ed  $Sd$ .  $\mu$  è il coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore ed indica la traspirabilità del materiale rispetto ad un pari spessore d'aria. I prodotti con valori minori di  $\mu$ , a parità di spessore applicato, sono quelli dotati di caratteristiche di traspirabilità migliori. Questo parametro rappresenta il numero di volte in cui un materiale costituisce una barriera al passaggio di vapore acqueo rispetto ad uno strato equivalente di aria. Se una pittura possiede un valore  $\mu=50$  significa che essa corrisponde ad una barriera al vapore acqueo 50 volte superiore ad uno strato equivalente d'aria. Il numero  $\mu$  non è un parametro che da solo possa indicare la traspirabilità del materiale poiché la pittura può essere applicata in spessori differenti e lo spessore di una pellicola influenza sensibilmente la permeabilità al vapore. Il valore di  $\mu$ , allora, deve essere moltiplicato per lo spessore  $s$  in metri. Si determina così il valore del parametro  $Sd = \mu s$  (con  $s$  riferito a 2 mani di pittura). Quest'ultimo è il parametro che identifica la resistenza alla diffusione del vapore acqueo e rappresenta lo spessore di aria equivalente in metri che offre una resisten-

<sup>3</sup> DIN 52615:1987. Testing of thermal insulating materials; determination of water vapour permeability of construction and insulating materials

<sup>4</sup> DIN EN ISO 12572:2001. Hygrothermal performance of building materials and products determination of water vapour transmission properties

<sup>5</sup> UNI EN ISO 7783:2012. Pitture e vernici - Determinazione delle proprietà di trasmissione del vapore acqueo - Metodo della capsula

<sup>6</sup> D. Lgs. 161 del 27 marzo 2006. Attuazione della Direttiva 2004/42/CE, per la limitazione delle emissioni di composti organici volatili conseguenti all'uso di solventi in talune pitture e vernici, nonché in prodotti per la carrozzeria.

za alla diffusione del vapore pari al film di pittura in questione. La classificazione è effettuata sulla base dei valori di  $S_d$  secondo la Tabella 5.2.

Tabella 5.2 Classificazione della traspirabilità delle pitture (UNI EN ISO 7783)

Classe	Densità di flusso $g\ m^2 \cdot d^{-1}$	Densità di flusso $g\ m^2 \cdot h^{-1}$	Resistenza alla diffusione del vapore acqueo $S_d$ (m)
I <sup>a</sup> (alta)	>150	> 6	< 0,14
II <sup>a</sup> (media)	15 - 150	0,6 - 6	0,14 - 1,4
III <sup>a</sup> (bassa)	< 15	< 0,6	>1,4

La norma DIN EN ISO 12572, diversamente dalla norma italiana, classifica una pittura come traspirabile se  $S_d < 2$  m. Uno studio comparativo tra quattro tipologie di pitture diverse dimostra l'efficacia della pittura acril-silossanica rispetto a pitture al quarzo, a solvente tipo pliolite ed ai silicati (Fig. 5.8).



Figura 5.8 Valori di  $w$  ed  $S_d$  per differenti pitture ([www.mastellaricolori.it](http://www.mastellaricolori.it))

Le differenze tra i quattro diversi materiali sono notevoli e risulta evidente che la pittura acril-silossanica riesca a coniugare entrambi i requisiti.

### 5.6.3 L'assorbimento d'acqua e la permeabilità al vapore (DIN 18550-1:1985<sup>7</sup>)

La norma DIN 18550-1, nell'individuazione dei requisiti di un intonaco, include l'assorbimento d'acqua e la permeabilità al vapore misurati mediante le DIN 12572 e DIN 52617. Il principio viene rappresentato dal diagramma di Künzel (Fig. 5.9).

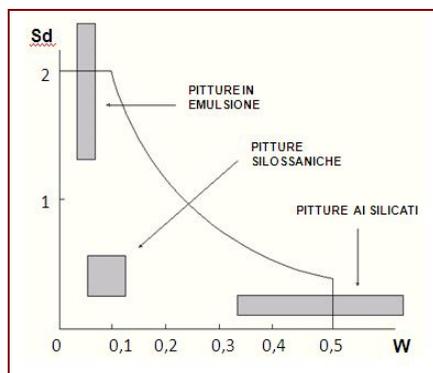


Figura 5.9 Il diagramma di Künzel

<sup>7</sup> DIN 18550-1:1985. Plaster: terminology and requirements

Il diagramma di Künzel identifica le caratteristiche delle pitture per facciate riportando nel grafico la resistenza al passaggio di vapore acqueo ( $Sd$ ) e il grado di permeabilità all'acqua ( $w$ ). Queste due caratteristiche sono difficilmente conciliabili, infatti una pittura in emulsione offre buona impermeabilità all'acqua, ma scarsa permeabilità al vapore, a causa della natura organica del film. Una pittura ai silicati offre, invece, ottima permeabilità al vapore, ma scarsa protezione per la penetrazione dell'acqua piovana. Le pitture acril-silossaniche, grazie alla loro natura ibrida, acrilica e silconica, all'effetto idrorepellente della componente silconica e alla tipica struttura microporosa, offrono un compromesso ottimale tra permeabilità al vapore e impermeabilità all'acqua, collocandosi nel diagramma di Künzel nella posizione più favorevole. Le immagini al SEM mostrano la struttura microporosa del film di una pittura acril-silossanica e di una pittura convenzionale (Fig. 5.10). La microporosità consente il passaggio del vapor d'acqua, mentre la bassa permeabilità all'acqua è garantita dalla natura idrorepellente del polimero silconico.

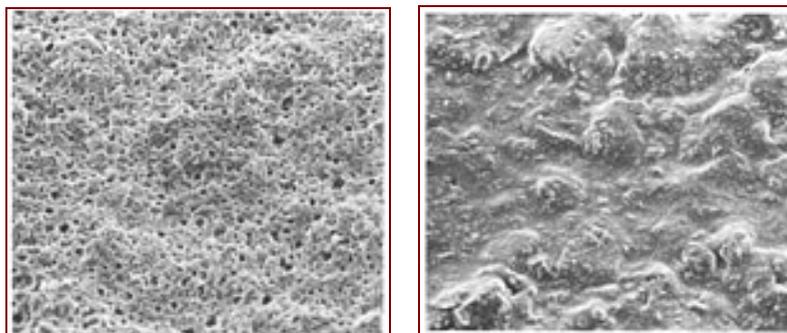


Figura 5.10 (Sin) Pittura silossanica e (dx) pittura convenzionale ([www.irisvernici.com](http://www.irisvernici.com))

Per le pitture acril-silossaniche, avendo  $Sd$  e  $w$  valori minori di tutte le altre pitture, il prodotto  $Sd \times w$  sarà minore ( $0,004 \div 0,007 \text{ Kg m}^{-1} \text{ h}^{-0,5}$  contro  $0,03 \div 0,10 \text{ Kg m}^{-1} \text{ h}^{-0,5}$  per le altre pitture) offrendo perciò il migliore compromesso tra idrorepellenza e traspirabilità e quindi una protezione ottimale.

#### 5.6.4 Protezione all'acqua dei rivestimenti (DIN 4108-3)

La norma DIN 4108-3:1981<sup>8</sup> classifica le finiture che offrono protezione all'acqua ed insieme siano traspirabili al vapore acqueo, mantenendo il supporto maggiormente isolato termicamente. Per sottostare alle indicazioni descritte è necessario che vengano rispettati i seguenti valori, derivati dalle tre norme descritte precedentemente:

- 1) Coefficiente di assorbimento di acqua:  $w < 0,5 \text{ Kg m}^{-2} \text{ h}^{-0,5}$  (DIN 52617)
- 2) Strato di aria equivalente:  $Sd \leq 2 \text{ m}$  (DIN 12572)
- 3) Il prodotto dei due valori:  $Sd \times w \leq 0,1 \text{ Kg m}^{-1} \text{ h}^{-0,5}$  (DIN 18550)

Dal diagramma di Künzel e dai dati statistici disponibili sulle diverse tipologie di rivestimenti superficiali viene confermata la capacità delle pitture acril-silossaniche

<sup>8</sup> DIN 4108-1:1981. Heat insulation in buildings; protection against moisture caused by the climate; requirements and directions for planning and construction

a rispondere in maniera maggiormente efficace ai due requisiti richiesti (Fig. 5.11).

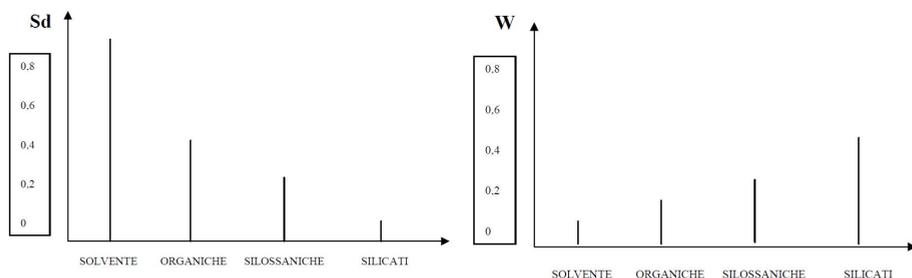


Figura 5.11 Traspirabilità ed assorbimento d'acqua a confronto per diversi tipi di pitture

### 5.6.5 Le emissioni di COV (Direttiva 2004/42/CE e D.Lgs. 161/2006)

I prodotti a base di resine acriliche e siliconiche in dispersione acquosa non creano una pellicola impermeabile al vapore, consentendo di mantenere invariate le proprietà deumidificanti e di acquisire nel contempo idrorepellenza ed hanno un COV (contenuto di sostanze organiche volatili), generalmente prossimo allo zero. La Direttiva 2004/42/CE definisce i valori limite per i COV al fine di ridurre i fattori di inquinamento dell'aria e di rischio per la salute umana. Dal 1° gennaio 2007, i valori di COV devono essere dichiarati dal produttore e devono essere inferiori ai limiti imposti dalla normativa. Il Decreto Legislativo n° 161/2006, recepisce la direttiva comunitaria 2004/42/CE, finalizzata a limitare le emissioni inquinanti di composti organici volatili, determinando per le pitture, le vernici e i prodotti per carrozzeria il contenuto massimo di COV ammesso ai fini dell'immissione sul mercato. Il valore limite di COV viene definito in base alla destinazione d'uso del prodotto verniciato ed alla natura del prodotto. La Tabella 5.3 riporta i valori limite del contenuto di COV nelle pitture per l'edilizia, i silossani fanno parte della classe di pitture per pareti esterne di supporto minerale, secondo l'allegato II al D.Lgs.161/2006. Lo stesso decreto impone che l'etichetta del prodotto verniciante riporti: la tipologia di prodotto, il contenuto massimo di COV del prodotto espresso in grammi per litro (g/l) ed il corrispondente limite di COV imposto.

Tabella 5.3 Valori limite dei COV espressi in g/l di prodotto pronto all'uso

Pitture e Vernici		Base	dal 1-1-07	dal 1-1-10	Pitture e Vernici		Base	dal 1-1-07	dal 1-1-10
<b>A</b>	Pitture opache per pareti e soffitti interni	BA	75	30	<b>G</b>	Primer	BA	50	30
		BS	400	30			BS	450	350
<b>B</b>	Pitture lucide per pareti e soffitti interni	BA	150	100	<b>H</b>	Primer fissanti	BA	50	30
		BS	400	100			BS	750	750
<b>C</b>	Pitture per pareti esterne di supporto minerale	BA	75	40	<b>I</b>	Pitture monocomponenti ad alte prestazioni	BA	140	140
		BS	450	430			BS	600	500
<b>D</b>	Pitture per finiture e tamponature da int/est per legno, metallo o plastica	BA	150	130	<b>J</b>	Pitture bicomponenti ad alte prestazioni	BA	140	140
		BS	400	300			BS	550	500
<b>E</b>	Vernici e impregnanti per legno per finiture interne ed esterne	BA	150	130	<b>K</b>	Pitture multicolori	BA	150	100
		BS	500	400			BS	400	100
<b>F</b>	Impregnanti filmogeni per legno	BA	150	130	<b>L</b>	Pitture per effetti decorativi	BA	300	200
		BS	700	700			BS	500	200

## 5.7 La normativa di riferimento per i rasanti

Per i rasanti le norme italiane di riferimento sono la UNI EN 1015-19:2008<sup>9</sup> e la UNI 1015-18:2004<sup>10</sup>.

### 5.7.1 La permeabilità al vapore (UNI EN 1015-19)

La norma UNI EN 1015-19 descrive un metodo per la determinazione della permeabilità al vapore d'acqua in condizioni di flusso stazionario per malte da intonaco realizzate conformemente alla norma UNI EN 998-1<sup>11</sup>. Il metodo di prova si applica a campioni cilindrici di spessore uniforme compreso tra 10 mm e 30 mm. I campioni, prima di essere sottoposti alla prova, vengono sigillati superiormente e successivamente la pressione del vapore d'acqua viene mantenuta costante a valori prefissati per mezzo di soluzioni saline sature. Il contenitore dove la malta viene applicata viene posto in un ambiente a temperatura controllata ad umidità relativa costante ad un valore diverso da quella interno ai contenitori. Il flusso di vapore attraverso la malta viene valutato in condizioni stazionarie.

### 5.7.2 L'assorbimento d'acqua (UNI EN 1015-18)

La norma UNI EN 1015-18 specifica un metodo di prova per determinare il coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità, di malte indurite preparate con leganti minerali ed aggregati normali o leggeri.

## 5.8 La ricerca sperimentale

La ricerca sperimentale ha riguardato la valutazione della durabilità di intonaci di finitura acril-silossanici, in quattro tinte diverse, applicati su supporti in laterizio. Inoltre è stata monitorata un'applicazione di questo intonaco su un edificio campione, analizzando il comportamento nel tempo delle prestazioni più significative. La possibilità di monitorare un caso studio, dove i materiali di base sono stati applicati, ha consentito di poter confrontare le prestazioni del prodotto testato in laboratorio con quelle del prodotto applicato in esterno e di poter effettuare il rescaling temporale delle prestazioni, punto di arrivo della metodologia ISO 15686 (§ 2.2).

## 5.9 I parametri indagati e le strumentazioni

I parametri individuati come maggiormente significativi per questa tipologia di intonaci di finitura silossanici sono:

- il colore mediante misurazione delle coordinate colorimetriche (§ 4.6.2);
- l'aspetto superficiale per la valutazione della morfologia (§ 4.6.3);
- l'angolo di contatto;
- l'assorbimento d'acqua.

### 5.9.1 L'angolo di contatto

La misura dell'angolo di contatto è stata effettuata mediante un tensiometro a goc-

---

<sup>9</sup> UNI EN 1015-19:2008. Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 19: Determinazione della permeabilità al vapore d'acqua delle malte da intonaco indurite

<sup>10</sup> UNI 1015-18:2004. Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 18: Determinazione del coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità della malta indurita

<sup>11</sup> UNI EN 998-1:2004. Specifiche per malte per opere murarie - Malte per intonaci interni ed esterni.

cia pendente. In particolare è stato impiegato il modello FTA 1000 C in dotazione al Laboratorio dell'ex Dipartimento di Ingegneria chimica, dei processi e dei materiali (DIPCM) della rete UniNetLab dell'Università degli Studi di Palermo (Fig. 5.12). La misura dell'angolo di contatto ha consentito di valutare la bagnabilità della superficie rivestita con il rasante silossanico.

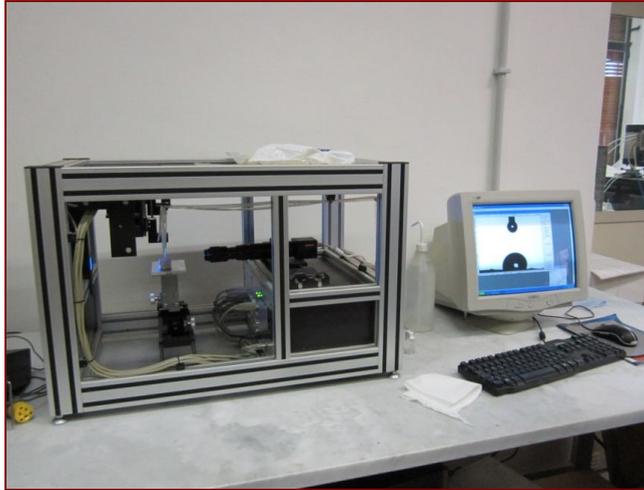


Figura 5.12 Misuratore di angolo di contatto FTA 1000 C in dotazione al DIPCM

L'apparecchiatura di prova è costituita da:

1. una sorgente di illuminazione artificiale;
2. un supporto porta-campioni;
3. un sistema per la deposizione della goccia, generalmente costituito da una micro-pipetta graduata, con un ago a testa piana, in posizione perpendicolare alla superficie del campione e in grado di rilasciare gocce d'acqua identiche;
4. un sistema ottico, munito di videocamera, che acquisisce l'immagine della goccia d'acqua;
5. uno schermo dove l'immagine della goccia viene trasferita, in cui l'altezza della goccia d'acqua e il diametro della superficie di contatto possono essere misurati;
6. un sistema di misurazione a base millimetrica, che il software di gestione dello strumento mette a disposizione per le misurazioni della goccia d'acqua (Fig. 5.13).

Il software dello strumento è denominato FTA 32 Video 2.0 e permette di ricavare informazioni sui campioni analizzati mediante l'analisi dell'immagine, l'algoritmo utilizzato è basato sull'equazione di Young-Laplace, che permette di correlare la forma della goccia con la tensione superficiale. Il profilo della goccia viene rilevato dalla videocamera ed elaborato dal software in modo da ricavare la tensione superficiale e l'angolo di contatto.

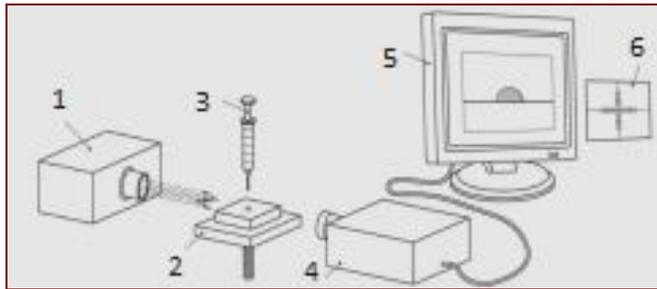


Figura 5.13 Schema dell'apparecchiatura di misurazione dell'angolo di contatto

La norma italiana seguita per condurre una misura standardizzata dell'angolo di contatto è la UNI EN 15802:2010<sup>12</sup> relativa ai materiali inorganici porosi. Per materiali inorganici porosi, la norma intende le pietre naturali ed i materiali artificiali (malte, gesso, mattone, etc.). La superficie di prova deve essere piana. Il numero e le dimensioni dei campioni dipende dall'eterogeneità del materiale, ma per ogni campione omogeneo devono essere condotte almeno 3 letture, per poi mediare i risultati. Per iniziare la prova bisogna innanzitutto riempire la micro-pipetta con acqua deionizzata/distillata avendo cura che l'ago sia pulito in modo da evitare bolle d'aria o deformazioni della goccia. Il campione è posto sul porta-campione in modo che la superficie di prova sia orizzontale. La goccia, avente un volume che varia tra 5  $\mu\text{l}$  e 10  $\mu\text{l}$ , si deposita sulla superficie del campione avvicinando lentamente la micro-pipetta alla superficie del campione. Dopo 10 secondi dalla deposizione della goccia viene misurato l'angolo di contatto  $\theta$  formato tra la tangente alla goccia ed il piano di deposizione; nel caso in cui le gocce risultino macroscopicamente asimmetriche devono essere ripetute le misurazioni. Se la goccia perde almeno il 50% del suo volume nei primi 10s la misura non è possibile e ciò dovrà essere riportato nel verbale di prova. Le gocce devono essere depositate a una distanza di almeno 3 mm l'una dall'altra per evitare sovrapposizioni. La misura dell'angolo di contatto statico di un liquido su una superficie consente di valutare la bagnabilità della superficie, ma non può essere usata per valutare l'efficacia e l'uniformità della protezione. La relazione esistente tra bagnabilità e misura dell'angolo  $\theta$  è tale che si possono verificare quattro casi limite possibili:

- Bagnabilità massima per  $\theta = 0^\circ$  ( $\cos \theta = 1$ ), caratteristica di una bassa tensione superficiale del liquido, di una bassa tensione interfacciale e di una elevata tensione superficiale del solido (Fig. 5.14).

<sup>12</sup> UNI EN 15802:2010. Conservazione dei beni culturali - Metodi di prova - Determinazione dell'angolo di contatto statico.

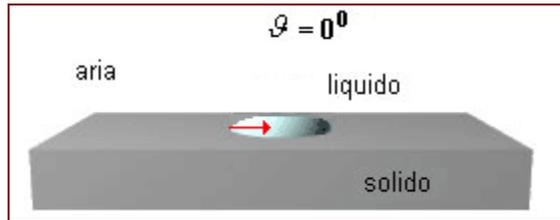


Figura 5.14 Angolo di contatto pari a  $0^\circ$  (www.galenotech.org)

- Bagnabilità parziale quando  $\theta < 90^\circ$  ( $\cos \theta < 1$ ) in Fig. 5.15

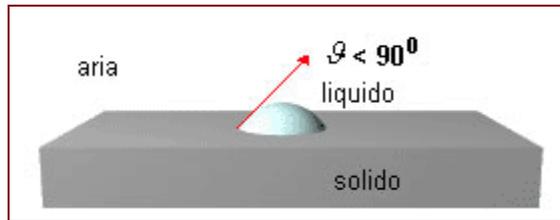


Figura 5.15 Angolo di contatto minore di  $90^\circ$  (www.galenotech.org)

- Bagnabilità scarsa quando  $\theta > 90^\circ$  ( $\cos \theta < -1$ ) in Fig. 5.16;

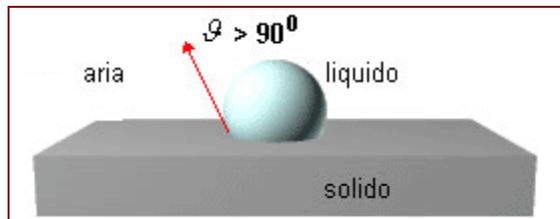


Figura 5.16 Angolo di contatto minore di  $90^\circ$  (www.galenotech.org)

- Nessuna bagnabilità quando  $\theta = 180^\circ$  ( $\cos \theta = -1$ ) in Fig. 5.17

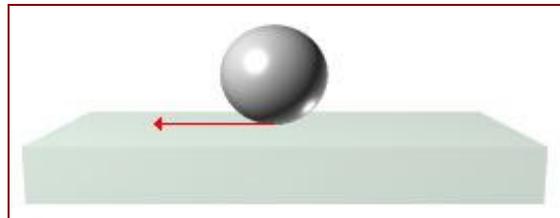


Figura 5.17 Angolo di contatto pari a  $180^\circ$  (www.galenotech.org)

### 5.9.2 L'assorbimento d'acqua

Il coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità è stato misurato sulla base della procedura descritta nella norma UNI EN 1015-18, sottoponendo i provini di rasante acril-silossanico ad immersione in acqua distillata per un'altezza di 5-10 mm e misurando l'aumento di massa a prefissati tempi.

## 5.10 La preparazione dei campioni di prova

Il prodotto testato è un rasante premiscelato silossanico, fornito dalla Hydratite S.r.l. di Palermo ed è classificato secondo la norma UNI EN 998-1 come intonaco di finitura premiscelato decorativo a base silossanica, fornito in quattro tinte diverse (Fig. 5.18): Bianco (BN), rosa (A18), giallo (A20) e salmone (B1).



Figura 5.18 I provini nelle quattro tinte diverse, da sinistra rosa, salmone, giallo e bianco

I campioni di intonaco decorativo sono stati applicati su un supporto in laterizio delle dimensioni di 23x30 cm, spessore 1 cm. Gli spessori applicati conformemente alla scheda tecnica del prodotto, sono di 2-3 mm su idoneo substrato di intonaco di base prodotto da Razzanelli S.r.l. di Palermo, denominato Sosiva N<sup>®</sup>, a base di calce e cemento, dello spessore di circa 15 mm. I campioni sono stati rivestiti con un impermeabilizzante cementizio bicomponente, RASOLASTIK ADV HD<sup>®</sup>, prodotto da Technokolla S.r.l., fornito dalla ditta Cascino S.r.l. di Termini Imprese (PA), lungo tutto il bordo della superficie di prova, per tutto lo spessore del campione e su tutta la superficie di laterizio opposta a quella di prova. Complessivamente sono stati oggetto della ricerca n. 26 campioni di prova, di cui n. 18 disposti all'interno della camera climatica e n. 8 da disporre in esterno per le prove di invecchiamento naturale (Fig. 5.19)



Figura 5.19 I provini nelle quattro tinte diverse, esposti all'atmosfera urbana

### 5.11 La disposizione dei campioni nella camera climatica

La camera climatica ha un volume interno di circa 1 mc e consente l'ubicazione dei n. 18 campioni al suo interno, tali da risultare uniformemente soggetti alle condizioni ambientali indotte, secondo lo schema riportato in Fig. 5.20.

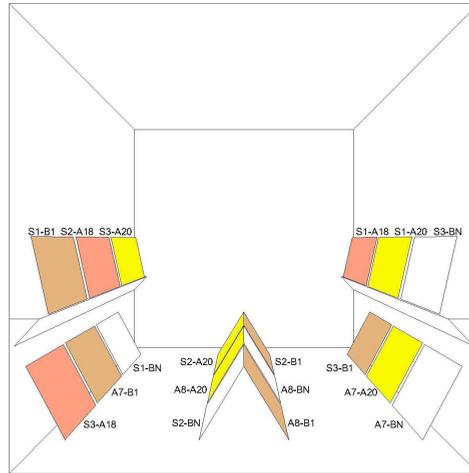


Figura 5.20 Schema della disposizione dei provini all'interno della camera climatica

La sperimentazione sui rasanti acril-silossanici ha avuto inizio nel mese di giugno del 2011 e si è conclusa nel mese di settembre 2011. Ciascun provino, al termine di ogni step di invecchiamento, all'interno della camera climatica (Fig. 5.21), è stato oggetto di misurazione delle coordinate colorimetriche, di valutazione dell'aspetto superficiale, di misura dell'angolo di contatto e della permeabilità all'acqua. La disposizione dei provini per la fase B, di irraggiamento con lampada UV, è stata modificata rispetto quella della fase A, in modo da mantenere un'irradianza costante su tutte le superfici esposte dei provini, pari a  $5 \text{ Wm}^{-2}$



Figura 5.21 I provini disposti nella camera climatica per la fase A

## 5.12 Il monitoraggio del caso-studio a Palermo

Il monitoraggio degli effetti dell'invecchiamento naturale, in particolare per quanto attiene gli aspetti legati al colore della superficie, è stato condotto su un caso-studio attraverso l'osservazione di un insieme significativo di punti individuati sulle sue superfici, nelle quattro diverse esposizioni. Il fabbricato, individuato come caso-studio, è ubicato in via Roccazzo a Palermo ed è stato completato nel mese di ottobre-novembre 2010. Il progetto del fabbricato e la direzione dei lavori sono stati affidati all'Arch. Francesco Renda. I materiali di finitura dei prospetti sono stati forniti dalla ditta Hydratite S.r.l. di Palermo ed è stato applicato lo stesso intonaco nella tinta rosa utilizzato per la sperimentazione. L'edificio, a cinque elevazioni fuori terra, ha una pianta a forma quadrata (Fig. 5.22) con i prospetti orientati secondo le quattro direzioni: N-E, N-O, S-E e S-O (Fig. 5.23). Su ciascun prospetto, sono stati individuati gli elementi rappresentativi da monitorare, in particolare, le parti basamentali e l'atrio interno, facilmente accessibili e le terrazze (Fig. 5.24), tutte rivestite con il medesimo rasante, nella tinta rosa. Dalle immagini seguenti (Figg. 5.25, 5.26 e 5.27) è evidente il trattamento superficiale comune di tutti i prospetti interni ed esterni con il rasante acril-silossanico nella tinta rosa.



Figura 5.22 Vista satellitare del fabbricato ([www.bing.com/maps](http://www.bing.com/maps))



Figura 5.23 Prospetto Nord-Ovest



Figura 5.24 Prospetto-sezione Nord-Ovest, in cui sono rappresentate le terrazze

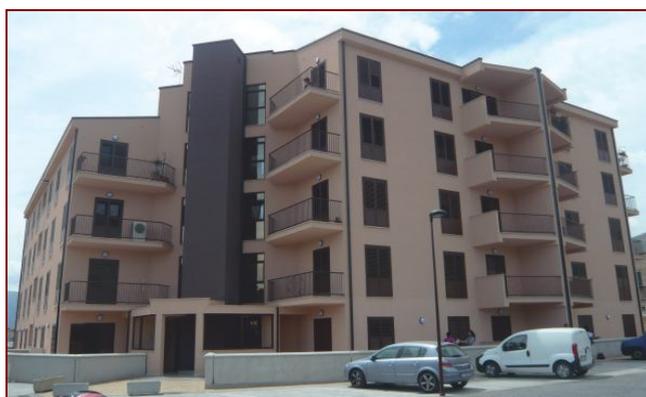


Figura 5.25 Vista del prospetto Nord-Ovest



Figura 5.26 Vista della corte interna dalle terrazze di copertura



Figura 5.27 Vista di una delle due terrazze dell'edificio

### 5.13 Analisi ed interpretazione dei risultati sperimentali

#### *Il colore: il monitoraggio dei provini invecchiati artificialmente*

Il colore dei provini è stato misurato mediante uno spettrofotometro ed un colorimetro. I risultati dell'indagine condotta, mostrano che le misurazioni effettuate con lo spettrofotometro, in condizione di componente speculare inclusa (SCI) ed esclusa (SCE) non differiscono mai di oltre  $\Delta E^*_{ab} = 0,5$  (trattandosi di superfici opache in cui è modesto il contributo della luce speculare riflessa). Pertanto i grafici e le tabelle successive fanno riferimento alle misure in componente speculare esclusa (SCE). Nel grafico in Fig. 5.28 sono riportati i risultati del monitoraggio della differenza di colore dei provini acril-silossanici, soggetti ad invecchiamento artificiale in camera climatica, di durata pari a sei step di invecchiamento (2016 ore complessive). L'andamento della differenza di croma (Fig. 5.29) mostra una tendenza crescente per il provini gialli, salmone e rosa, per cui il colore tende a diventare più saturo, per i provini bianchi il colore tende ad opacizzarsi. La differenza di tinta  $\Delta H^*_{ab}$ , mostra una tendenza crescente fino a T<sub>1</sub> per tutti i provini della sperimentazione, per il quale raggiungono un valore di circa 1 punto, nelle quattro diverse tinte. Per i successivi step i provini bianchi, gialli e rosa mantengono un valore costante, mentre i provini salmone mostrano un incremento fino a 2 punti in corrispondenza del 6° step di invecchiamento accelerato (Fig. 5.30).

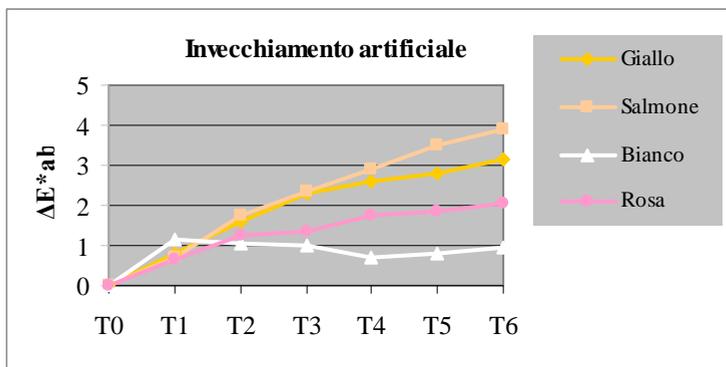


Figura 5.28 Grafico della differenza di colore dei provini invecchiati artificialmente

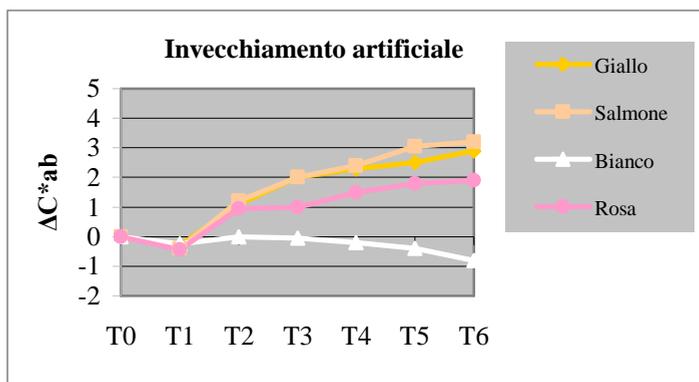


Figura 5.29 Grafico dell'evoluzione di  $\Delta C^*_{ab}$  dei provini invecchiati artificialmente

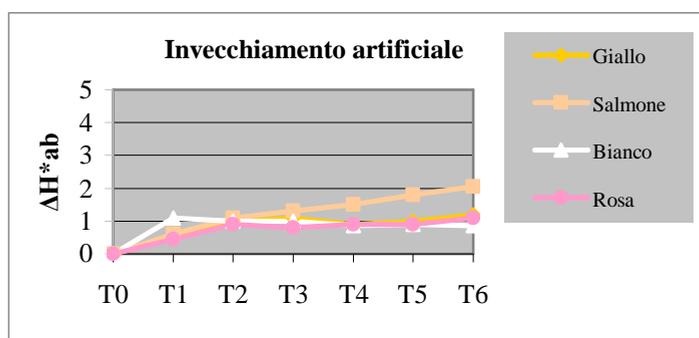


Figura 5.30 Grafico dell'evoluzione di  $\Delta H^*_{ab}$  dei provini invecchiati artificialmente

La rappresentazione grafica nel diagramma di cromaticità  $a^*-b^*$  delle coordinate colorimetriche relative ai provini gialli, mostra una tendenza ad un incremento della coordinata colorimetrica  $b^*$ , indice di ingiallimento, che passa da circa 28 punti a circa 32 punti, ed un valore pressoché costante della coordinata  $a^*$  (Fig. 5.31).

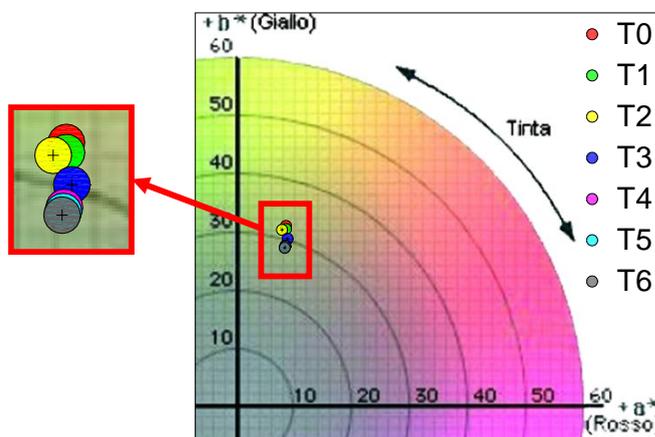


Figura 5.31 Diagramma di cromaticità dei provini gialli invecchiati artificialmente

Dal diagramma croma-luminosità si può notare che i provini di colore giallo tendono a schiarirsi e tra il 2° ed il 6° step di invecchiamento accelerato si registra un valore quasi costante di  $\Delta L^*$ . La differenza di croma  $\Delta C^*$  ha un andamento crescente fino al valore pari a circa 3 punti (Fig. 5.32).

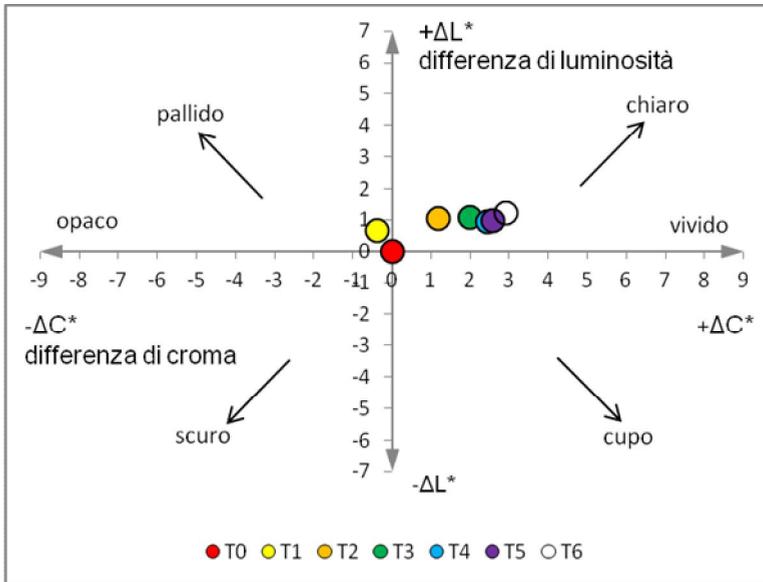


Figura 5.32 Diagramma di  $\Delta C^* - \Delta L^*$  dei provini gialli invecchiati artificialmente

Per i provini salmone si nota un lieve decremento sia della componente  $a^*$  che di quella  $b^*$ , per cui i provini tendono a divenire meno saturi (Fig. 5.33).

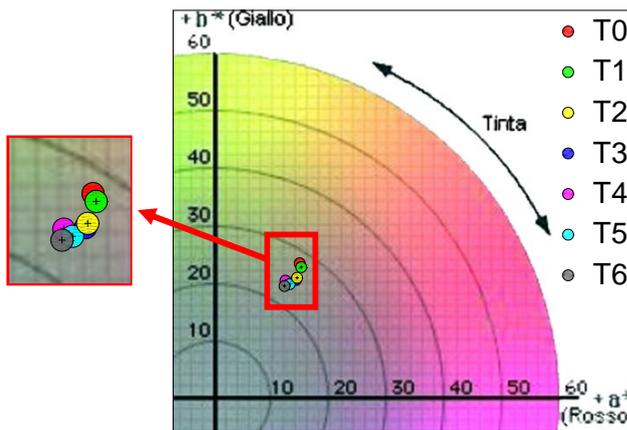


Figura 5.33 Diagramma di cromaticità dei provini salmone invecchiati artificialmente

Il diagramma  $\Delta L^* - \Delta C^*$  mostra come anche i provini salmone tendano a schiarirsi; dal 2° step il valore di  $\Delta L^*$  si mantiene pressoché costante mentre subisce un incremento fino a circa 3,5 il valore di  $\Delta C^*$  (Fig. 5.34).

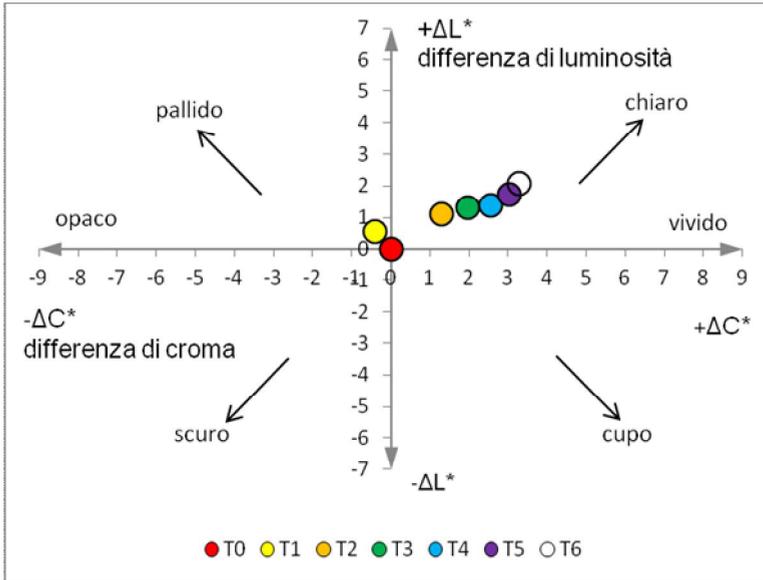


Figura 5.34 Diagramma di  $\Delta C^* - \Delta L^*$  dei provini salmone invecchiati artificialmente

Il diagramma di cromaticità dei provini bianchi mostra che vi è un pressoché mantenimento dei valori delle coordinate  $a^*$  e  $b^*$ , indice che i provini bianchi mantengono la propria tinta pressoché invariata (Fig. 5.35).

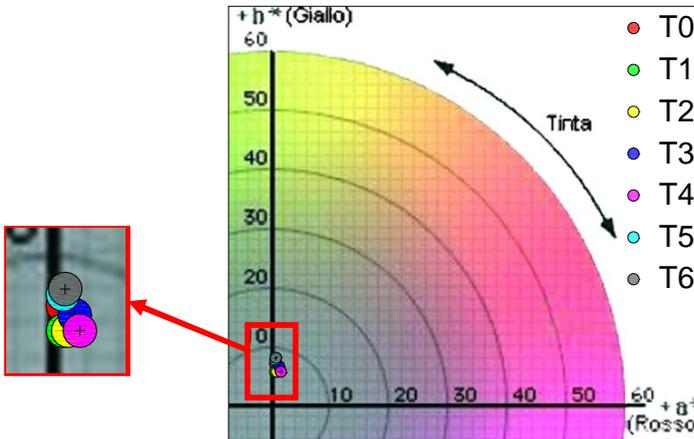


Figura 5.35 Diagramma di cromaticità dei provini bianchi invecchiati artificialmente

Il diagramma  $\Delta L^* - \Delta C^*$  mostra mantenimento dei valori di  $\Delta L^*$  e  $\Delta C^*$  (Fig. 5.36).

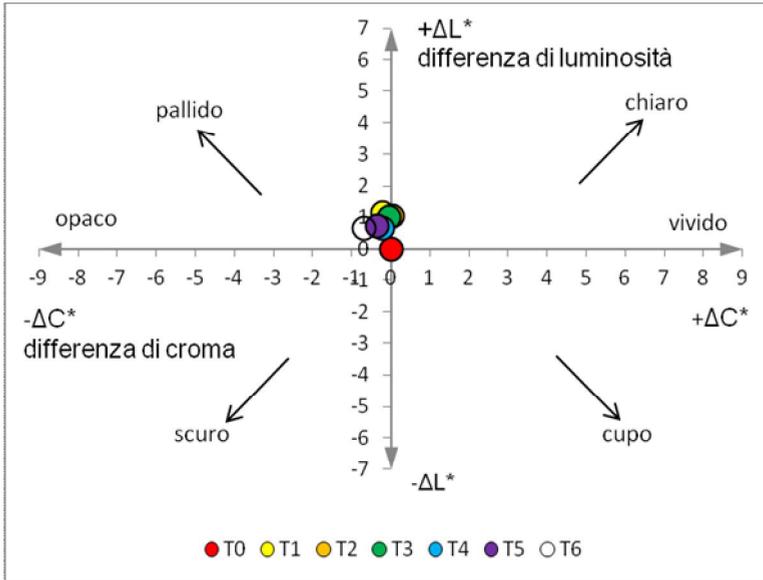


Figura 5.36 Diagramma di  $\Delta C^* - \Delta L^*$  dei provini bianchi invecchiati artificialmente

Per i provini rosa, la componente  $a^*$  si mantiene pressoché costante mentre si ha un lieve decremento di  $b^*$  (Fig. 5.37).

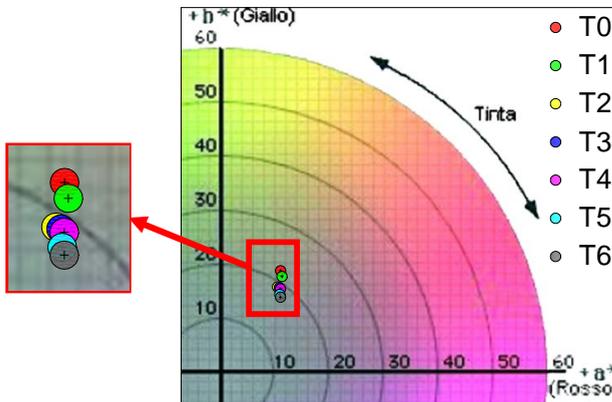


Figura 5.37 Diagramma di cromaticità dei provini rosa invecchiati artificialmente

Dal diagramma  $\Delta C^* - \Delta L^*$  si evince che anche i provini rosa tendano a schiarirsi. Il valore di  $\Delta L^*$  tende a mantenersi costante dal 2° step in poi, mentre il valore di  $\Delta C^*$  subisce un incremento fino a 2 punti al 6° step, mostrando una tendenza del colore a divenire più vivido (Fig. 5.38).

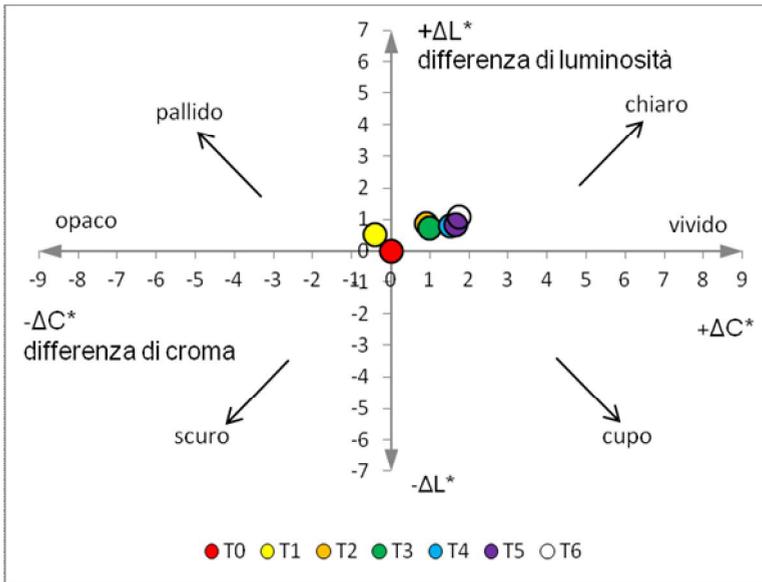


Figura 5.38 Diagramma di  $\Delta C^*$  -  $\Delta L^*$  dei provini rosa invecchiati artificialmente

La Tabella 5.4 mostra l'evoluzione del colore dei provini acril-silossanici soggetti ad invecchiamento artificiale in camera climatica per una durata di 2016 ore complessive (84 giorni).

Tabella 5.4 Immagini della superficie dei provini acril-silossanici invecchiati

STEP	Giallo	Salmone	Bianco	Rosa
<b>T<sub>0</sub></b>				
<b>T<sub>1</sub></b>				
<b>T<sub>2</sub></b>				
<b>T<sub>3</sub></b>				
<b>T<sub>4</sub></b>				
<b>T<sub>5</sub></b>				
<b>T<sub>6</sub></b>				

### Il colore: il monitoraggio delle superfici del caso-studio

Per ciascuno dei prospetti diversamente orientati, sia interni alla corte che esterni, sono state misurate le coordinate colorimetriche di un numero significativo di punti, ed elaborata la differenza del colore rispetto il monitoraggio effettuato subito dopo la fine dei lavori, definendo i grafici di evoluzione del  $\Delta E^*_{ab}$ , per singolo prospetto e differenziando i prospetti interni da quelli esterni (Fig. 5.39).

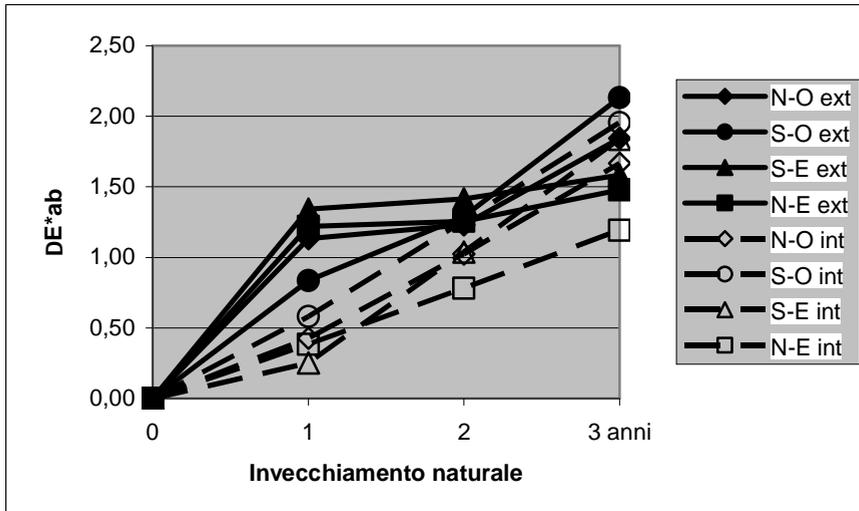


Figura 5.39 Grafico dell'evoluzione del colore rosa relativo alle superfici del caso-studio

### Il colore: il rescaling temporale ed i risultati per confronto

Sulla base delle comparazioni dei risultati fin qui ottenuti si è potuto stabilire che:

- L'invecchiamento artificiale in camera climatica produce per le quattro tinte indagate, dopo sei step di invecchiamento accelerato, una differenza di colore  $\Delta E^*_{ab}$  variabile nell'intervallo 1÷4;
- Il colore salmone subisce il maggiore viraggio, quelli bianco e rosa il minore;
- Per quanto riguarda il caso-studio, dopo circa 3 anni di invecchiamento naturale, il colore delle pareti, sia quelle perimetrali esterne che interne alla corte presenta una variazione valutata tramite il  $\Delta E^*_{ab}$  compresa tra 1,19 punti (N-E int) e 2,13 punti (S-O ext);
- Le superfici sull'atrio interno, meno esposte, subiscono una variazione leggermente minore rispetto a quelle esterne, mediamente pari a 0,25 punti, dimostrando che non c'è particolare differenza nel tempo tra il colore delle superfici esterne ed interne.

Per ciò che riguarda il rescaling temporale, effettuabile per la sola tinta rosa, di cui si dispone dei dati di laboratorio e dei dati del caso-studio, si osserva che il decadimento del colore prodotto artificialmente in laboratorio,  $\Delta E^*_{ab} \approx 2,0$ , dopo l'applicazione di sei step di invecchiamento ( $S_6$ ), risulta confrontabile con il degrado naturale riscontrato sulle superfici esterne ed interne orientate a S-O e N-O, do-

po 3 anni di invecchiamento naturale. Le superfici interne ed esterne orientate a N-E e S-E, la cui differenza di colore rispetto la superficie non degradata è mediamente pari a 1,50 punti, mostrano che i sei step di invecchiamento accelerato equivalgono a circa 5 anni di invecchiamento accelerato, per cui si può concludere che il time rescaling è il seguente:

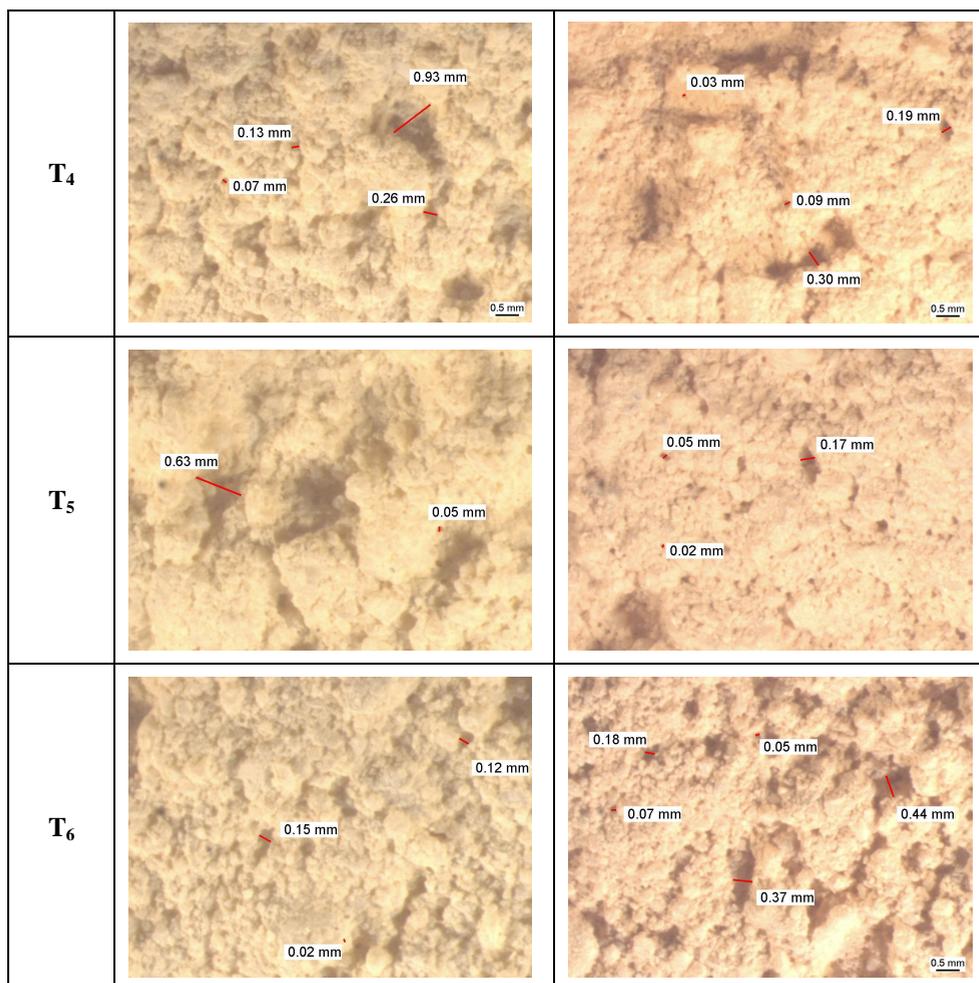
- superfici N-E e S-E → 336 ore di invecchiamento accelerato = 10 mesi di invecchiamento naturale (5 anni x 12 mesi / 6 step);
- superfici S-O e N-O → 336 ore di invecchiamento accelerato = 6 mesi di invecchiamento naturale (3 anni x 12 mesi / 6 step).

#### *L'aspetto superficiale mediante microscopio ottico*

La norma UNI 11182:2006 (§ 4.6.3) fornisce la descrizione delle forme di alterazione visibili macroscopicamente che interessano l'aspetto superficiale dei materiali lapidei naturali ed artificiali, permettendo così il rilevamento dello stato di conservazione dell'intonaco. La forma di alterazione che è stata riscontrata sulla superficie dei campioni, al termine dei diversi step di cicli di invecchiamento accelerato, è la disgregazione (dis) che consiste in decoesione con caduta del materiale sotto forma di polvere o minutissimi frammenti. Vengono riportate le immagini più significative relative ai provini gialli e salmone, in Tabella 5.5, che mostrano il monitoraggio effettuato per i diversi step di invecchiamento. Dall'indagine al microscopio ottico dei campioni gialli e salmone, si evidenzia che al tempo zero la superficie dei campioni risulta avere modeste quantità di micropori, di diametro variabile tra 0,04 mm a 0,17 mm e delle cavità che vanno da 0,42 mm a 0,70 mm, cavità che dipendono dal fatto che il rasante non è liscio, ma frattazato. Con il progredire degli step di invecchiamento accelerato, fino al 2°, le cavità aumentano in numero seppur di poco, mantenendosi di dimensione pressoché costante, lo stesso vale per i micropori. Dal 3° step in poi si nota un aumento significativo della quantità dei micropori con dimensioni che variano tra 0,03 mm e 0,30 mm, quantità che aumenta soprattutto nei campioni salmone. Al 6° step di invecchiamento, la superficie dei provini risulta più scabra, con una morfologia che denota la formazione di microcanyon ed un aumento del numero di micropori di nuova formazione con diametro variabile tra 0,02 mm e 0,15 mm.

Tabella 5.5 Immagini al microscopio ottico 0.63 x dei provini acril-silossanici invecchiati

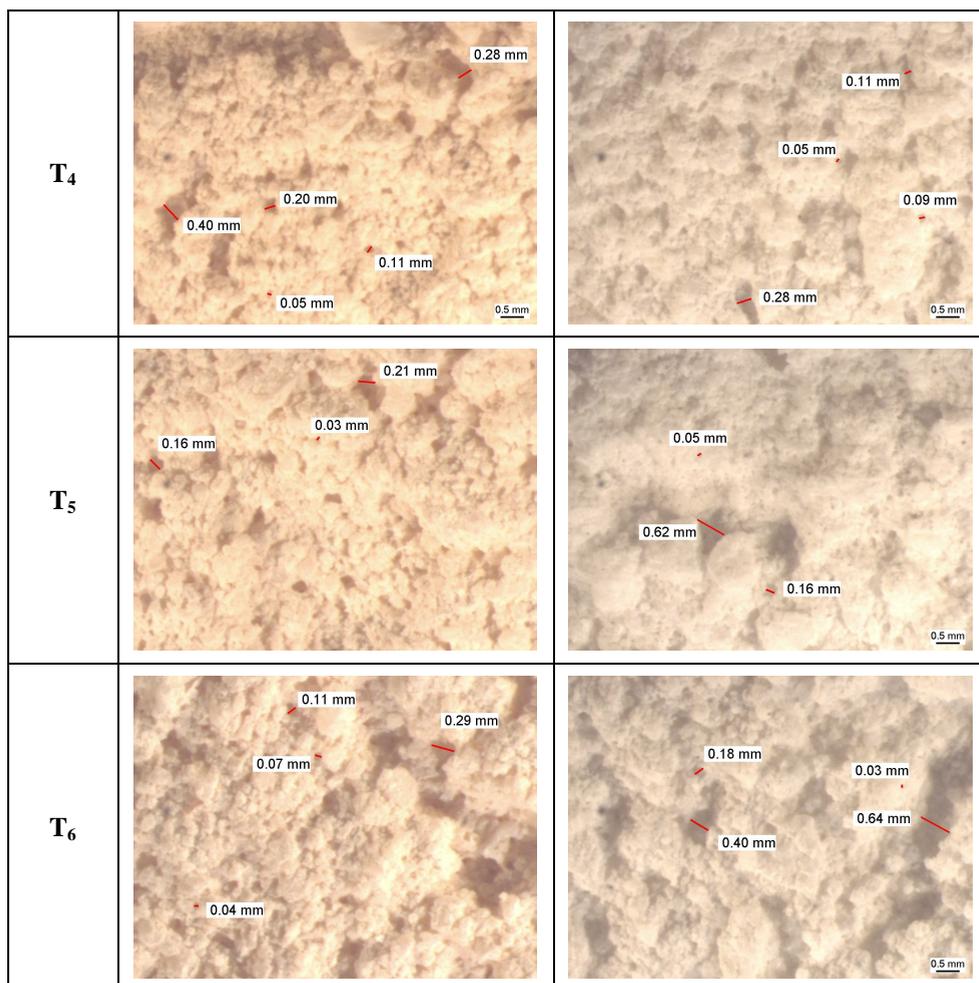
STEP	Giallo	Salmone
<b>T<sub>0</sub></b>		
<b>T<sub>1</sub></b>		
<b>T<sub>2</sub></b>		
<b>T<sub>3</sub></b>		



La tabella 5.6 riporta le immagini più significative relative ai provini bianchi e rosa, soggetti a 6 step di invecchiamento accelerato. Dall'indagine al microscopio ottico, si evidenzia che al tempo zero la superficie dei campioni risulta avere modeste quantità di micropori, di diametro variabile tra 0,03 mm a 0,11 mm e delle cavità con dimensioni massime di 0,47 mm. Con il progredire degli step di invecchiamento accelerato, le cavità aumentano in numero e dimensione, così come i micropori. Al 6° step di invecchiamento, la superficie dei provini risulta più scabra, anche per questa serie di provini, con una morfologia che denota la formazione di microcanyon di larghezza pari a circa 0,65 mm ed un aumento del numero di micropori di nuova formazione con diametro variabile tra 0,03 mm e 0,18 mm. È stato possibile mettere a confronto la morfologia dei campioni non invecchiati con quella dei campioni esposti alle condizioni atmosferiche per 18 mesi e le immagini più significative sono riportate in tabella 5.7.

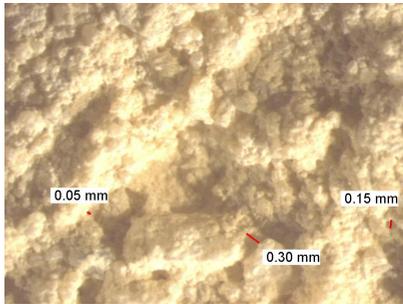
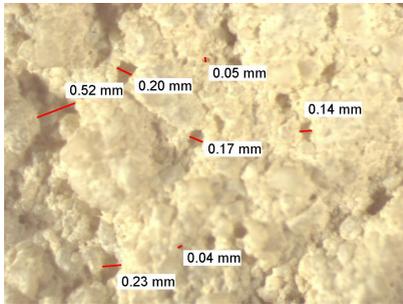
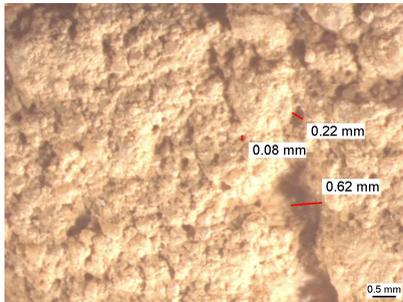
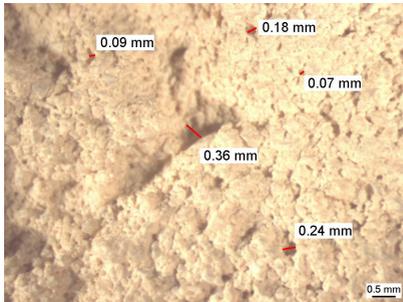
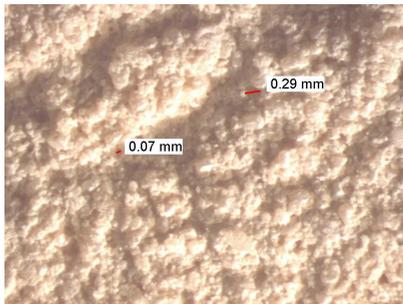
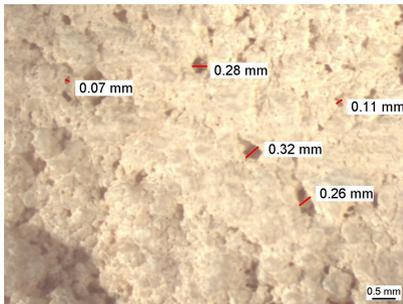
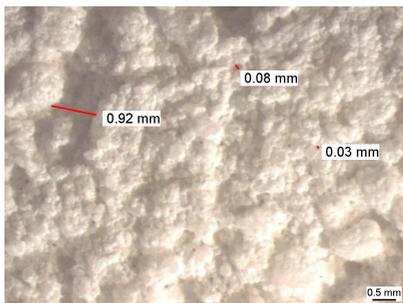
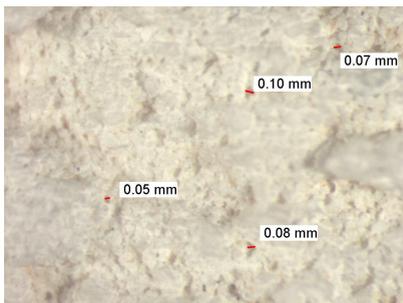
Tabella 5.6 Immagini al microscopio ottico 0.63 x dei provini acril-silossanici invecchiati

STEP	Rosa	Bianco
<b>T<sub>0</sub></b>		
<b>T<sub>1</sub></b>		
<b>T<sub>2</sub></b>		
<b>T<sub>3</sub></b>		



Dal confronto dei campioni a tempo zero e di quelli sottoposti agli agenti atmosferici in esterno per un periodo di 18 mesi si può notare che nei campioni gialli a T<sub>0</sub> le dimensioni dei micropori variano da 0,05 mm a 0,15 mm con cavità di dimensioni di 0,30 mm, mentre dopo 18 mesi vi è un aumento della quantità dei micropori di dimensioni che variano da 0,04 mm a 0,20 mm e cavità di dimensioni massime di 0,52 mm. Nei campioni salmone a T<sub>0</sub>, i micropori hanno dimensione di circa 0,08 mm con cavità che variano fino a 0,62 mm, mentre dopo 18 mesi di invecchiamento naturale vi è un aumento della quantità dei micropori, le cui dimensioni variano da 0,07 mm a 0,24 mm e cavità per lo più invariate. Nei campioni rosa a T<sub>0</sub>, i micropori hanno dimensione variabile da 0,07 mm a 0,29 mm con cavità fino a 0,62 mm, mentre i campioni esposti ad invecchiamento naturale mostrano un aumento della quantità dei micropori di dimensioni variabili tra 0,07 mm e 0,32 mm.

Tabella 5.7 Immagini al microscopio ottico 0.63 x dei provini invecchiati per 18 mesi

STEP	$T_0$	18 mesi
<b>Giallo</b>		
<b>Salmon</b>		
<b>Rosa</b>		
<b>Bianco</b>		

Nei campioni bianchi a  $T_0$ , i micropori hanno dimensione variabile tra 0,03 mm e 0,08 mm con cavità fino a 0,92 mm, mentre dopo 18 mesi di invecchiamento naturale vi è un aumento della quantità dei micropori di dimensioni variabili tra 0,05 mm e 0,10 mm.

#### *L'aspetto superficiale al SEM*

La valutazione degli effetti dell'invecchiamento accelerato sulla superficie esterna è stata condotta anche mediante il SEM del laboratorio Geolab S.r.l. di Carini (PA). Sono stati indagati due set di campioni: uno prelevato da tavelle allo stato originario, che non hanno subito alcun processo di invecchiamento e il secondo da tavelle che hanno subito 6 cicli di invecchiamento accelerato in camera climatica. Il campionamento è stato effettuato mediante asportazione meccanica di frammenti (provini) pressoché quadrati di dimensioni pari a circa 5 mm di lato, dalle parti estreme delle tavelle. I provini oggetto dello studio sono complessivamente otto, di cui quattro rappresentativi delle condizioni originarie, uno per ciascun colore – bianco, giallo, rosa e salmone – e quattro, nei medesimi colori, rappresentativi dei campioni invecchiati (Fig. 5.40).



Figura 5.40 I provini predisposti sul porta-campioni del SEM

#### *Provini bianchi non invecchiati*

L'esame morfologico a bassi ingrandimenti del campione bianco non invecchiato (Fig. 5.41) mostra la presenza di un corpo mediamente compatto con presenza diffusa di cavità di dimensione compresa tra 50  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ , che conferiscono l'aspetto tipico scabro della superficie. L'analisi chimica effettuata attraverso una scansione dell'intera superficie dell'immagine mostra la presenza di Ossigeno, Carbonio, Calcio, Silicio e Titanio come elementi predominanti che indicano la presenza del polimero a base silicea e del titanio come pigmento bianco del rivestimento (Fig. 5.42). Dal punto di vista quantitativo, i valori maggiori sono relativi al Carbonio (42.30%) ed al Calcio (8.46%), sono importanti anche le quantità rilevate di Silicio (9.44%) e Titanio (4.94%), sintetizzate in Fig. 5.43.

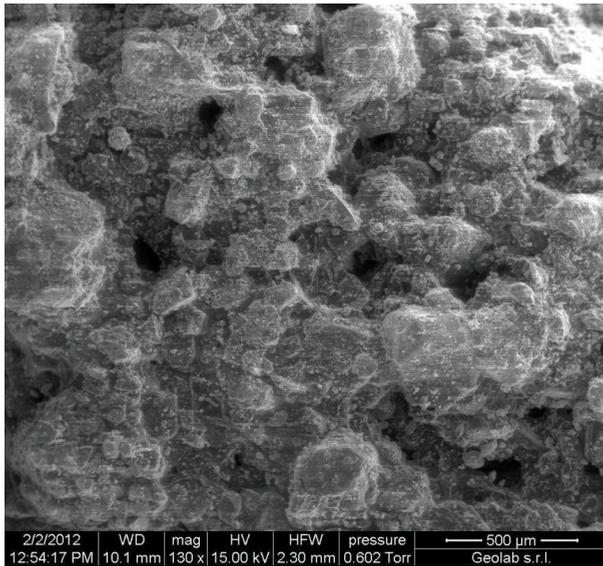


Figura 5.41 Immagine SEM del campione bianco non invecchiato a 130X ingrandimenti

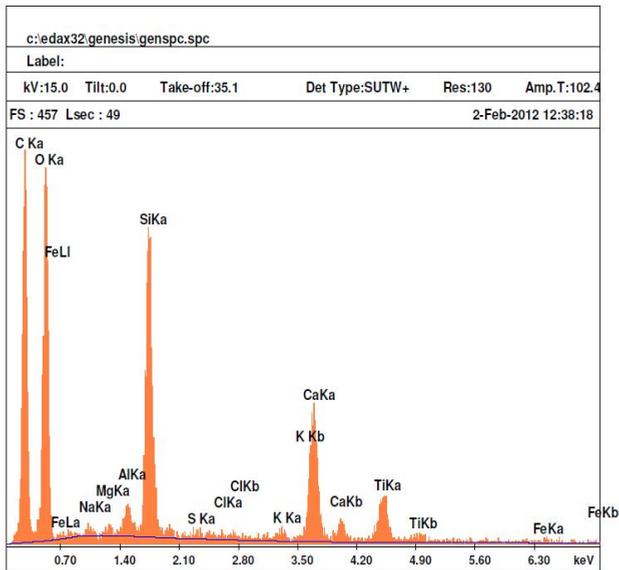


Figura 5.42 Spettro degli elementi chimici nel campione bianco non invecchiato in Fig. 5.41

EDAX ZAF Quantification (Standardless)						
Element Normalized						
SEC Table : Default						
Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	42.30	56.50	0.1536	1.0319	0.3519	1.0003
O K	31.29	31.37	0.0706	1.0124	0.2229	1.0001
NaK	0.30	0.21	0.0015	0.9449	0.5199	1.0012
MgK	0.26	0.17	0.0017	0.9679	0.6735	1.0025
AlK	0.87	0.52	0.0065	0.9365	0.7943	1.0046
SiK	9.44	5.39	0.0792	0.9583	0.8740	1.0018
S K	0.31	0.15	0.0027	0.9492	0.9205	1.0053
ClK	0.20	0.09	0.0017	0.9083	0.9536	1.0092
K K	0.70	0.29	0.0065	0.9111	0.9904	1.0251
CaK	8.46	3.39	0.0792	0.9303	0.9976	1.0088
TiK	4.94	1.65	0.0414	0.8462	0.9909	1.0011
FeK	0.95	0.27	0.0080	0.8371	1.0003	1.0000
Total	100.00	100.00				
Element	Net Inte.	Bkqd Inte.	Inte. Error	P/B		
C K	40.91	0.24	2.23	169.58		
O K	42.22	0.46	2.21	91.30		
NaK	1.09	1.27	24.85	0.86		
MgK	1.21	1.45	23.80	0.83		
AlK	4.50	1.45	8.56	3.11		
SiK	49.70	1.45	2.07	34.33		
S K	1.39	1.21	19.92	1.15		
ClK	0.80	1.01	29.58	0.80		
K K	2.45	0.72	11.42	3.39		
CaK	26.32	0.72	2.84	36.36		
TiK	10.31	0.52	4.63	19.73		
FeK	0.94	0.30	18.67	3.13		

Figura 5.43 Analisi chimica quantitativa del campione bianco non invecchiato in Fig. 5.41

Un ingrandimento maggiore (Fig. 5.44) mette in evidenza come la superficie, sebbene non liscia, sia molto compatta e sulla superficie siano presenti particelle di forma irregolare e dimensioni variabili, circa 10  $\mu\text{m}$ .

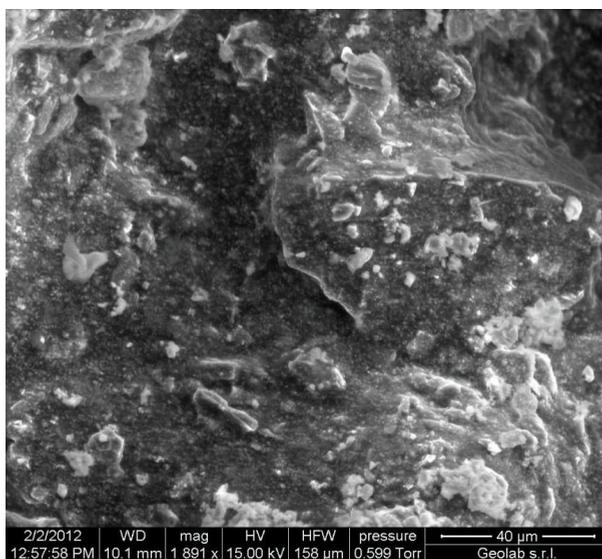


Figura 5.44 Immagine SEM del campione bianco non invecchiato a 2000X ingrandimenti

L'analisi chimica effettuata attraverso la nuova scansione dello stesso campione a maggiori ingrandimenti mostra la presenza degli stessi elementi rilevati in precedenza (Ossigeno, Carbonio, Silicio e Titanio) in percentuali pressoché simili a quelle riscontrate per l'immagine precedente.

### Provini bianchi invecchiati

L'esame morfologico a bassi ingrandimenti del campione bianco invecchiato artificialmente dopo il 6° step (Fig. 5.45) mostra la presenza di un corpo compatto con presenza diffusa di cavità di dimensione pari a  $50\div 100\ \mu\text{m}$ , senza apprezzabili differenze in termini di dimensione delle cavità rispetto al campione non invecchiato.

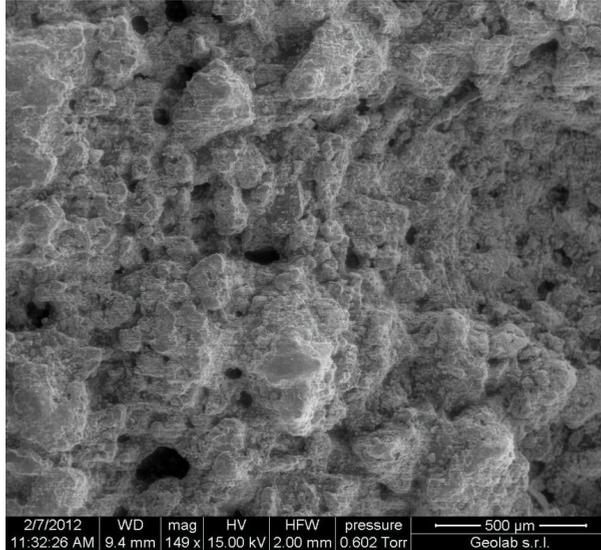


Figura 5.45 Immagine SEM del campione bianco invecchiato a 150X ingrandimenti

L'analisi chimica qualitativa dell'intera superficie dell'immagine scansionata mostra picchi molto ridotti per il Carbonio e per il Silicio (Fig. 5.46).

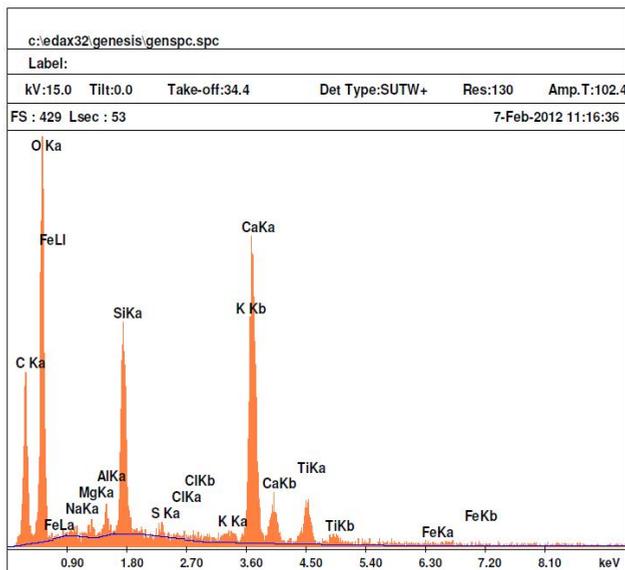


Figura 5.46 Spettro degli elementi chimici nel campione bianco invecchiato in Fig. 5.45

Il Carbonio si riduce della metà, da 42.30% a 22.90%, lo stesso per il Silicio, da 9.44% a 7.16%, ed aumenta il Calcio, da 8.46% a 21.26% (Fig. 5.47).

EDAX ZAF Quantification (Standardless)						
Element Normalized						
SEC Table : Default						
Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	22.90	35.07	0.0834	1.0437	0.3486	1.0005
O K	40.86	46.97	0.0883	1.0239	0.2110	1.0001
NaK	0.08	0.06	0.0003	0.9555	0.4598	1.0011
MgK	0.51	0.39	0.0031	0.9786	0.6163	1.0021
AlK	0.72	0.49	0.0051	0.9479	0.7440	1.0040
SiK	7.16	4.69	0.0584	0.9714	0.8365	1.0031
S K	0.40	0.23	0.0035	0.9613	0.9125	1.0100
ClK	0.00	0.00	0.0000	0.9195	0.9477	1.0181
K K	0.57	0.27	0.0055	0.9223	0.9882	1.0518
CaK	21.26	9.75	0.2008	0.9419	0.9964	1.0063
TiK	4.79	1.84	0.0396	0.8570	0.9660	1.0006
FeK	0.75	0.25	0.0063	0.8483	0.9915	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	17.15	0.28	3.37	60.60
O K	40.93	0.57	2.18	72.33
NaK	0.19	1.45	128.06	0.13
MgK	1.74	1.36	16.70	1.28
AlK	2.75	1.74	12.44	1.59
SiK	28.54	2.21	2.76	12.93
S K	1.41	1.96	22.43	0.72
ClK	0.00	1.49	0.00	0.00
K K	1.62	1.13	16.69	1.43
CaK	52.00	0.91	1.94	57.44
TiK	7.70	0.74	5.40	10.46
FeK	0.58	0.28	25.19	2.07

Figura 5.47 Analisi chimica quantitativa del campione bianco invecchiato in Figura 5.45

La diminuzione del Carbonio nei campioni bianchi è da attribuirsi alla riduzione della componente organica del polimero silossanico. L'esame a maggiori ingrandimenti (Fig. 5.48) evidenzia sulla superficie la presenza di microcanyon, rispetto all'immagine di Fig. 5.41, sebbene la superficie rimanga molto compatta.

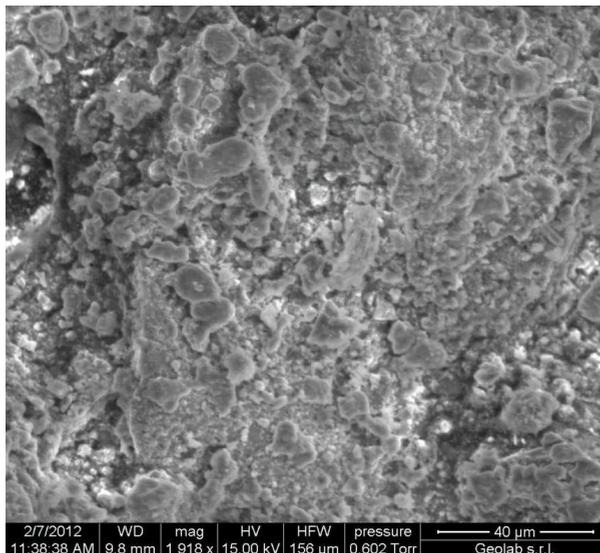


Figura 5.48 Immagine SEM del campione bianco invecchiato a circa 2000X ingrandimenti

L'analisi chimica rileva un picco maggiore per il Silicio, con percentuale che passa da 7.16% a 11.36% ed una riduzione rispetto all'immagine a bassi ingrandimenti di Fig. 5.45 del picco del Calcio, da 21.26% a 15.45% (Figg. 5.49 e 5.50).

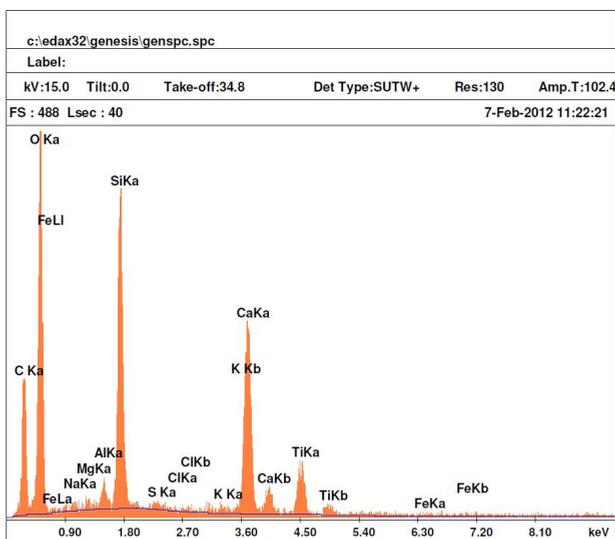


Figura 5.49 Spettro degli elementi chimici del campione bianco invecchiato in Fig. 5.48

EDAX ZAF Quantification (Standardless)						
Element Normalized						
SEC Table : Default						
Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	23.83	36.22	0.0754	1.0443	0.3027	1.0005
O K	39.36	44.91	0.0895	1.0246	0.2219	1.0001
NaK	0.39	0.31	0.0018	0.9561	0.4756	1.0014
MgK	0.41	0.31	0.0025	0.9793	0.6293	1.0028
AlK	0.94	0.63	0.0068	0.9484	0.7556	1.0052
SiK	11.36	7.39	0.0934	0.9717	0.8437	1.0024
S K	0.32	0.18	0.0028	0.9618	0.8956	1.0073
ClK	0.00	0.00	0.0000	0.9199	0.9351	1.0131
K K	0.45	0.21	0.0042	0.9228	0.9809	1.0375
CaK	15.45	7.04	0.1457	0.9424	0.9913	1.0091
TiK	6.69	2.55	0.0559	0.8574	0.9743	1.0007
FeK	0.79	0.26	0.0066	0.8486	0.9931	1.0000
Total	100.00	100.00				
Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B		
C K	23.20	0.30	3.31	78.00		
O K	61.96	0.59	2.02	104.17		
NaK	1.49	1.39	21.86	1.07		
MgK	2.13	1.78	17.63	1.19		
AlK	5.43	1.98	8.89	2.74		
SiK	68.03	2.45	1.98	27.73		
S K	1.69	2.33	23.53	0.72		
ClK	0.00	1.88	0.00	0.00		
K K	1.86	1.49	18.62	1.25		
CaK	56.18	1.19	2.14	47.23		
TiK	16.16	0.97	4.14	16.72		
FeK	0.92	0.37	22.12	2.47		

Figura 5.50 Analisi chimica quantitativa del campione bianco invecchiato in Fig. 5.48

### Provini gialli non invecchiati

L'esame morfologico a bassi ingrandimenti del campione giallo non invecchiato (Fig. 5.51) mostra la presenza di un corpo mediamente compatto con presenza dif-

fusa di cavità di dimensione compresa tra 50  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ .

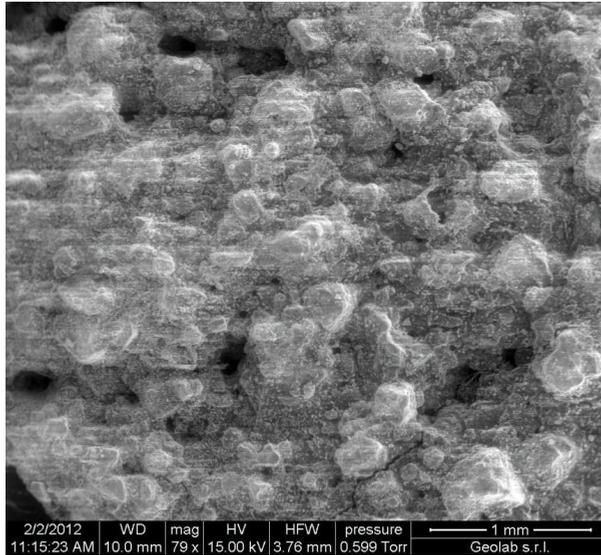


Figura 5.51 Immagine SEM del campione giallo non invecchiato a 80X ingrandimenti

L'analisi chimica effettuata attraverso una scansione dell'immagine mostra la presenza, oltre che degli elementi presenti nei campioni bianchi (Carbonio, Calcio, Silicio e Titanio) anche tracce di Ferro, dovuto al pigmento giallo (1.13%) in Figg. 5.52 e 5.53. Rispetto ai campioni bianchi non invecchiati c'è una maggiore presenza di Calcio (8.46% nei bianchi, 10.51% nei gialli), gli altri elementi presentano simili percentuali.

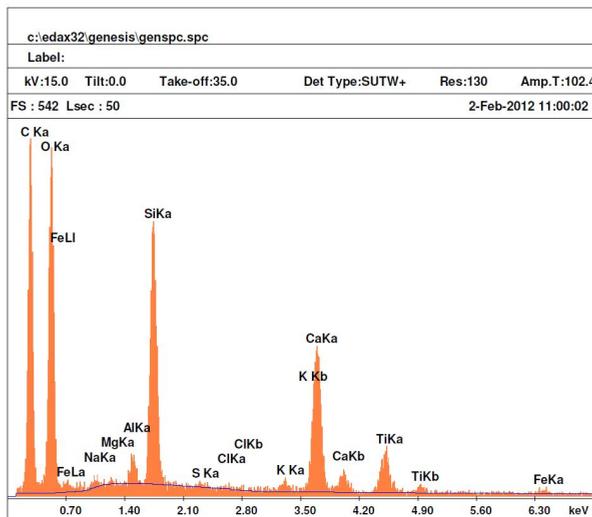


Figura 5.52 Spettro degli elementi chimici del campione giallo non invecchiato dell'immagine in Figura 5.51

EDAX ZAF Quantification (Standardless)							
Element Normalized							
SEC Table : Default							
Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F	
C K	41.42	59.82	0.1570	1.0327	0.3670	1.0003	
O K	31.52	31.89	0.0697	1.0132	0.2184	1.0001	
NaK	0.38	0.27	0.0018	0.9457	0.5120	1.0011	
MgK	0.10	0.07	0.0007	0.9687	0.6653	1.0023	
AlK	0.79	0.47	0.0058	0.9374	0.7888	1.0043	
SiK	8.54	4.92	0.0715	0.9593	0.8706	1.0019	
S K	0.17	0.09	0.0015	0.9501	0.9232	1.0061	
ClK	0.13	0.06	0.0011	0.9091	0.9564	1.0108	
K K	0.63	0.26	0.0059	0.9120	0.9922	1.0302	
CaK	10.51	4.25	0.0986	0.9312	0.9991	1.0082	
TiK	4.67	1.58	0.0392	0.8470	0.9879	1.0013	
FeK	1.13	0.33	0.0095	0.8379	0.9994	1.0000	
Total	100.00	100.00					
Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte.	Error	P/B		
C K	50.39	0.48	2.01		105.00		
O K	50.27	0.48	2.01		104.75		
NaK	1.62	1.70	19.56		0.95		
MgK	0.58	2.86	61.20		0.20		
AlK	4.88	2.88	9.45		1.69		
SiK	54.13	3.12	2.03		17.35		
S K	0.96	2.50	35.96		0.38		
ClK	0.64	1.96	47.19		0.33		
K K	2.68	1.44	12.44		1.86		
CaK	39.51	1.44	2.33		27.44		
TiK	11.76	1.30	4.56		9.05		
FeK	1.36	0.90	18.49		1.51		

Figura 5.53 Analisi chimica quantitativa del campione giallo non invecchiato dell'immagine in Figura 5.51

Un ingrandimento maggiore (Fig. 5.54) del provino giallo mostra una simile configurazione della superficie molto compatta e con particelle di forma irregolare e dimensioni variabili tra pochi  $\mu\text{m}$  e qualche decina di  $\mu\text{m}$  disperse sulla stessa. Lo spettro e l'analisi chimica confermano le stesse percentuali degli elementi chimici riscontrati con l'analisi sulla Figura 5.51.

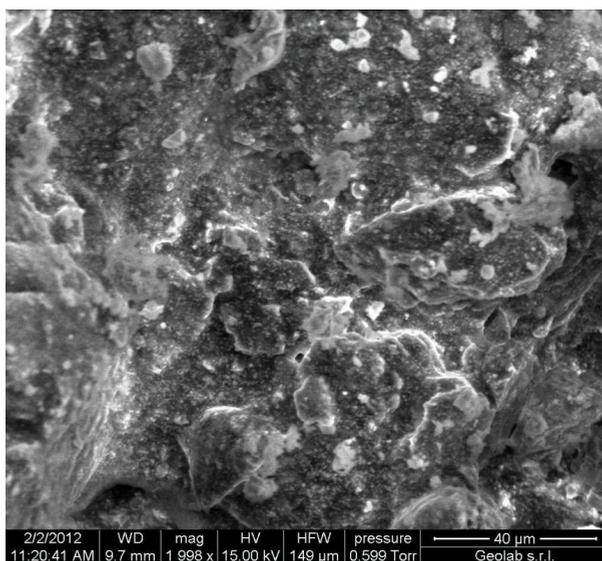


Figura 5.54 Immagine SEM del campione giallo non invecchiato a 2000X ingrandimenti

### *Provini gialli invecchiati*

Il campione giallo invecchiato artificialmente (Fig. 5.55) mostra la presenza di un corpo mediamente compatto con presenza diffusa di cavità di dimensione compresa tra 50  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$ , pertanto viene mantenuto l'aspetto tipico scabro della superficie, senza apprezzabili variazioni all'osservazione ad occhio nudo rispetto al campione non invecchiato.

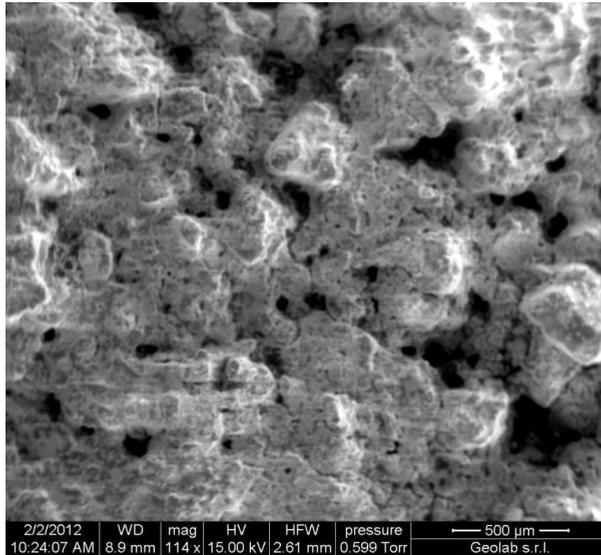


Figura 5.55 Immagine SEM del campione giallo invecchiato a 110X ingrandimenti

L'analisi chimica dell'immagine mostra una composizione simile dal punto di vista qualitativo del campione giallo non invecchiato con una riduzione della percentuale del Ferro (da 1.13% a 0.73%), una maggiore percentuale di Calcio (da 10.51% al 27.67%) ed una diminuzione del Carbonio (da 41.42% a 23.04%) e del Titanio che si riduce della metà. L'esame condotto a maggiori ingrandimenti (Fig. 5.56) conferma quanto osservato per il provino bianco cioè la presenza di microcanyon sulla superficie. E sono pressoché mancanti rispetto al campione non invecchiato le particelle disperse e depositate sulla superficie. L'analisi chimica conferma le risultanze dell'analisi a bassi ingrandimenti rileva con un incremento doppio della percentuale del Titanio (da 2.20% a 4.38%) ed una riduzione analoga del Calcio (da 27.67% a 24.03%).

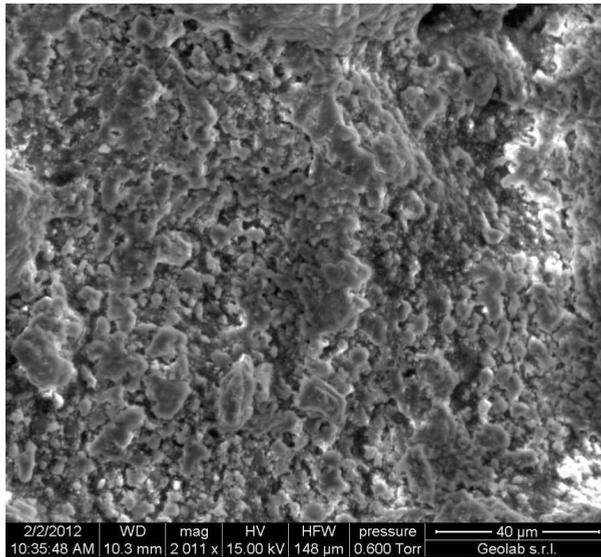


Figura 5.56 Immagine SEM del campione giallo invecchiato a 2000X ingrandimenti

*Provini rosa non invecchiati*

L'esame morfologico a bassi ingrandimenti del campione rosa non invecchiato (Fig. 5.57) mostra la presenza di un corpo mediamente compatto con presenza diffusa di cavità comprese tra 50  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$ .

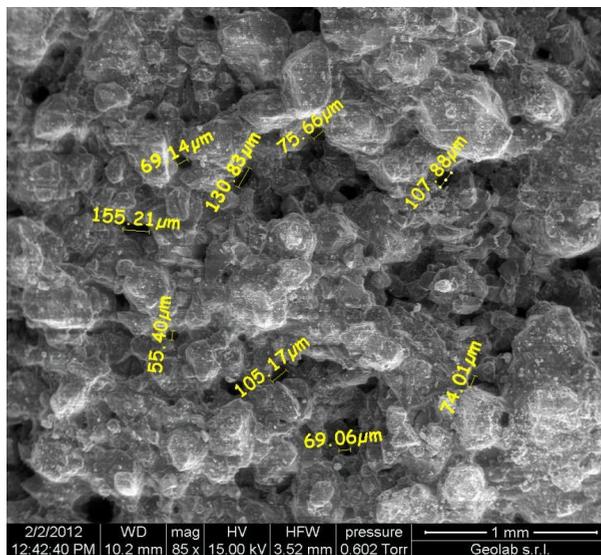


Figura 5.57 Immagine SEM del campione rosa non invecchiato a 85X ingrandimenti

L'analisi chimica mostra la presenza, come per gli altri provini non invecchiati, di una gran quantità di Carbonio (45.12%) e soprattutto di Titanio (6.33%) maggiore rispetto sia al provino bianco (4.94%) che giallo (4.67%). Un ingrandimento maggiore (Fig. 5.58) mostra le stesse caratteristiche morfologiche dei provini bianchi e

gialli, con una matrice molto omogenea e particelle di limitate dimensioni disperse in superficie.

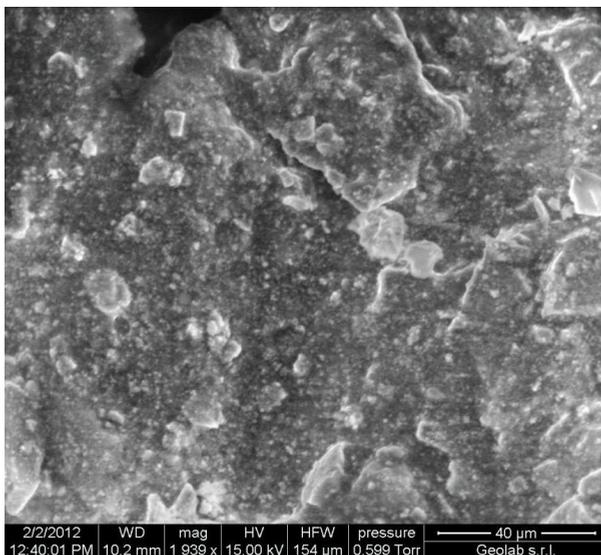


Figura 5.58 Immagine SEM del campione rosa non invecchiato a 2000X ingrandimenti

#### *Provini rosa invecchiati*

L'esame morfologico a bassi ingrandimenti del campione rosa invecchiato per 6 step (Fig. 5.59) mostra la presenza di un corpo mediamente compatto con presenza diffusa di cavità di dimensione compresa tra 50 μm e 100 μm.

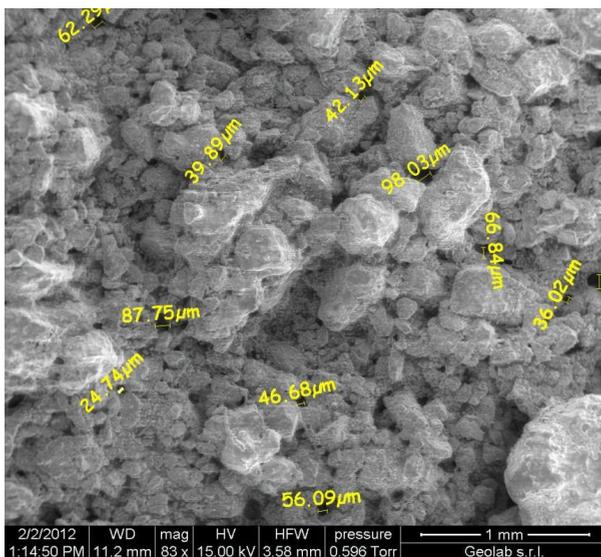


Figura 5.59 Immagine SEM del campione rosa invecchiato a 80X ingrandimenti

L'analisi chimica mostra la presenza, come per gli altri provini invecchiati, di una

bassa percentuale di Carbonio (24.06%), ma di una ridotta percentuale di Calcio (16.72%) rispetto ai campioni bianchi (21.26%) ed ai campioni gialli (27.62%) compensata da un incremento del Silicio (10.79%) rispetto ai bianchi (7.16%) e ai gialli (4.14%). Un ingrandimento maggiore (Fig. 5.60) mostra le stesse caratteristiche morfologiche dei provini bianchi e gialli, con una matrice erosa e la formazione di microcanyon senza particelle disperse sulla superficie.

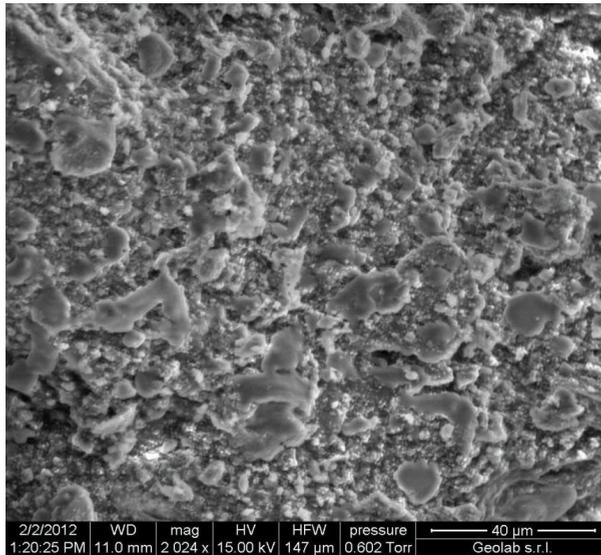


Figura 5.60 Immagine SEM del campione rosa invecchiato a 2000X ingrandimenti

Lo spettro e la relativa analisi chimica mostrano una variazione nelle percentuali degli elementi chimici riscontrati rispetto l'analisi a bassi ingrandimenti di Figura 5.59, per cui il Silicio ha un notevole incremento dal 10.79% al 15.84% e lo stesso vale per il Titanio dal 5.50% all'8.27%, compensato da una netta diminuzione del Calcio dal 16.72% al 10.12%.

#### *Provini salmone non invecchiati*

L'esame morfologico a bassi ingrandimenti del campione salmone non invecchiato (Fig. 5.61) mostra una similitudine nell'aspetto superficiale rispetto gli altri campioni non invecchiati con presenza diffusa di cavità di dimensione compresa tra 50 µm e 100 µm, che conferiscono l'aspetto tipico scabro della superficie. L'analisi chimica mostra la presenza, come per gli altri provini non invecchiati, di una gran quantità di Carbonio (40.33%) e soprattutto di Titanio (5.71%) maggiore rispetto sia al provino bianco (4.94%) che al provino giallo (4.67%).

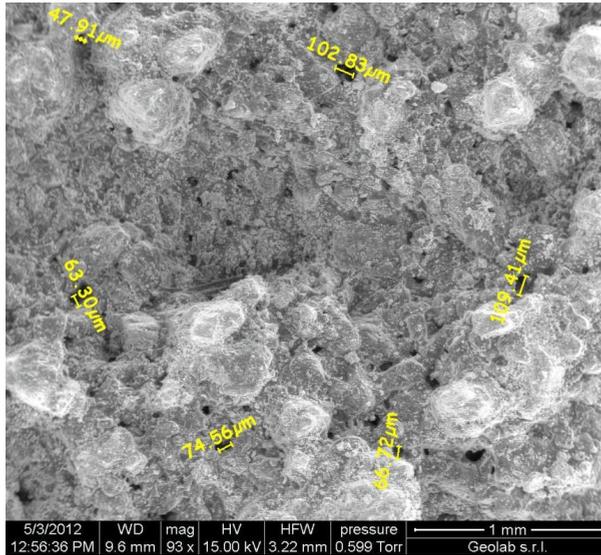


Figura 5.61 Immagine SEM del campione salmone non invecchiato a 100X

Un ingrandimento maggiore (Fig. 5.62) mostra le stesse caratteristiche morfologiche degli altri provini, con una matrice molto omogenea e particelle di limitate dimensioni, non superiori ai 15-20  $\mu\text{m}$ , e forma irregolare disperse sulla superficie.

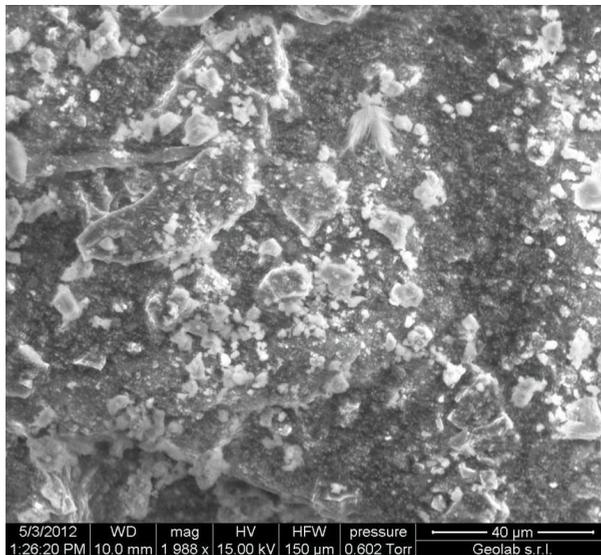


Figura 5.62 Immagine SEM del campione salmone non invecchiato a 2000X

#### *Provini salmone invecchiati*

L'esame morfologico a bassi ingrandimenti del campione salmone invecchiato (Fig. 5.63) mostra la presenza di un corpo mediamente compatto con presenza di cavità di circa 50÷100  $\mu\text{m}$ , che conferiscono l'aspetto tipico scabro della superficie.

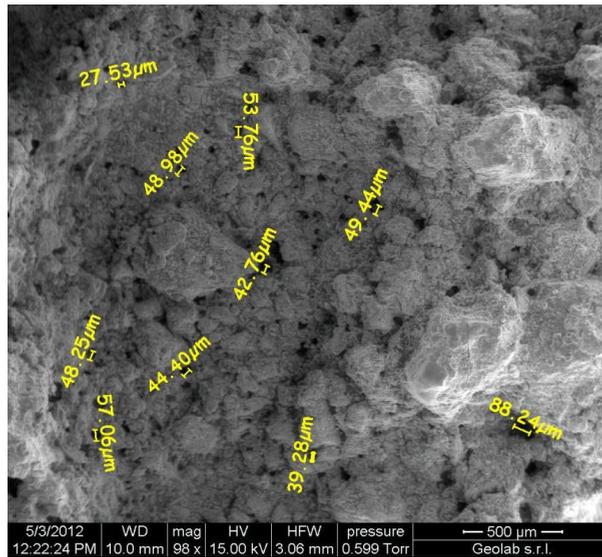


Figura 5.63 Immagine SEM del campione salmone invecchiato a 100X ingrandimenti

L'analisi chimica mostra la presenza, come per gli altri provini invecchiati, di una bassa percentuale di Carbonio (19.56%), ma di una ridotta percentuale di Calcio (18.51%) rispetto ai campioni bianchi (21.26%) ed ai campioni gialli (27.62%) compensata da un incremento del Silicio (8.99%) rispetto ai bianchi (7.16%) e ai gialli (4.14%) ed un'elevata percentuale di titanio (6.67%). Un ingrandimento maggiore (Fig. 5.64) mostra le stesse caratteristiche morfologiche dei provini invecchiati, con una matrice erosa e la formazione di microcanyon senza particelle disperse sulla superficie.

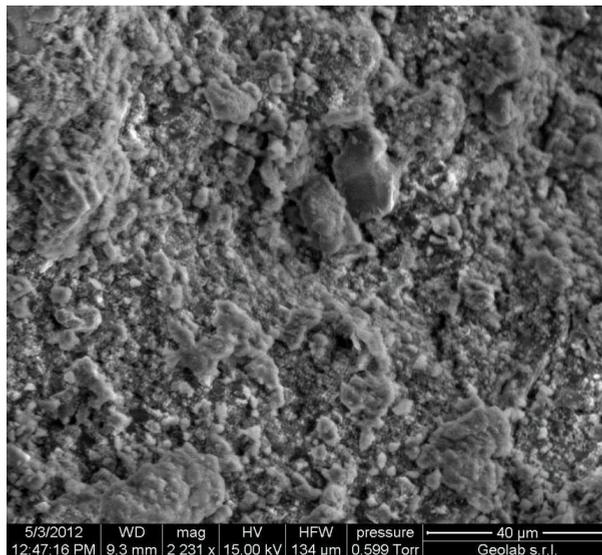


Figura 5.64 Immagine SEM del campione salmone invecchiato a 2200X ingrandimenti

### Analisi dei risultati delle indagini al SEM per confronto

I campioni non invecchiati, nei quattro diversi colori, bianco, giallo, rosa e salmone, mostrano uniformità di configurazione morfologica della superficie con una matrice compatta e la presenza di particelle disperse sulla superficie di limitate dimensioni, non superiori ai 15-20  $\mu\text{m}$ , e forma irregolare, visibili ad alti ingrandimenti (2000X ingrandimenti). Anche la composizione chimica rilevata è molto simile con i principali elementi chimici presenti nelle seguenti percentuali: Ossigeno (30-31%), Carbonio (42-45%), Calcio (6-10%), Silicio (9-10%) e Titanio (5-6%). I campioni invecchiati, nei quattro diversi colori, bianco, giallo, rosa e salmone, mostrano anch'essi uniformità di configurazione morfologica della superficie con matrice meno compatta, la quasi assenza di particelle disperse sulla superficie e la presenza di microcanyon dovuti all'azione erosiva degli agenti climatici indotti dai cicli di invecchiamento artificiale. La composizione chimica rilevata è molto simile tra i campioni invecchiati con i principali elementi chimici presenti nelle seguenti percentuali: Ossigeno (38-40%), Carbonio (22-24%), Calcio (10-25%), Silicio (6-15%) e Titanio (4-8%). Pertanto il Carbonio diminuisce drasticamente per effetto dell'invecchiamento artificiale, riducendosi della metà, a vantaggio del Calcio che aumenta sensibilmente, meno evidenti sono le variazioni in aumento del Silicio e del Titanio rispetto alla condizione dei provini non invecchiati (Fig. 5.65).

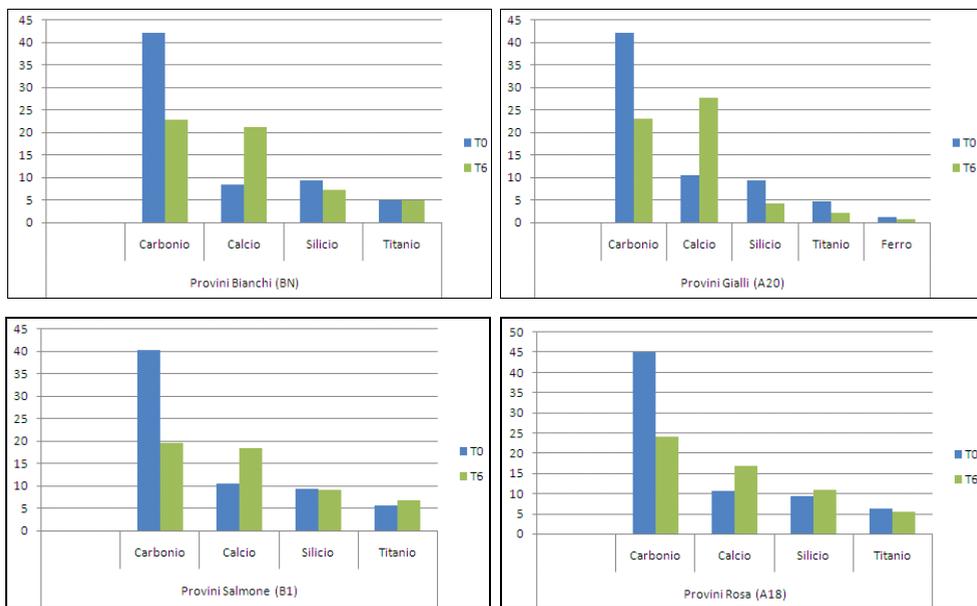


Figura 5.65 Confronto tra le percentuali dei principali elementi chimici a T<sub>0</sub> e T<sub>6</sub>

### L'angolo di contatto e la bagnabilità

Il test per la misura dell'angolo di contatto è stato effettuato secondo la metodologia descritta nella norma UNI EN 15802. La prova dell'angolo di contatto è stata fatta su 6 campioni bianchi e salmone, di cui due provini a tempo zero, due provini sottoposti a 6 step di invecchiamento artificiale e due provini sottoposti a 3 anni di

invecchiamento naturale. La misura dell'angolo di contatto è stata effettuata attraverso il tensiometro a goccia pendente sito presso il Dipartimento al Laboratorio di Ingegneria chimica, dei processi e dei materiali (DIPCM) della rete UniNetLab. Per ogni provino viene effettuata la misura dell'angolo di contatto che la goccia d'acqua forma con la superficie, facendo depositare sulla superficie, per ciascun provino, tre gocce d'acqua tramite il tensiometro a goccia pendente e considerando la media delle tre misure effettuate (Fig. 5.66).

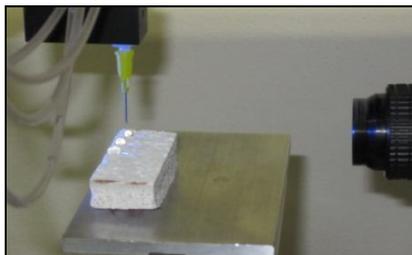


Figura 5.66 La deposizione delle tre gocce d'acqua sulla superficie del provino

L'intervallo di tempo tra la misura della prima goccia e la successiva è di 5 minuti. Dopo 50 secondi dalla deposizione della goccia viene misurato l'angolo  $\theta$ , quando la goccia si è stabilizzata e la misura non è più variabile (Fig. 5.67).

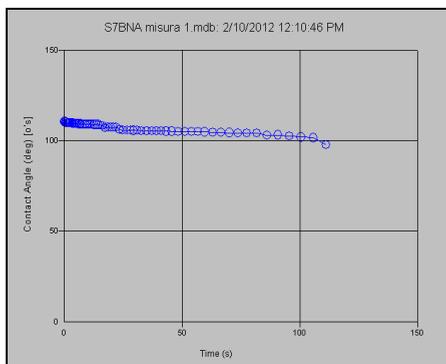


Figura 5.67 L'andamento dell'angolo di contatto nel tempo

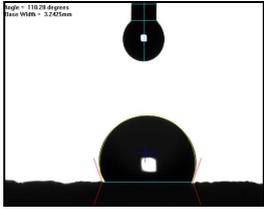
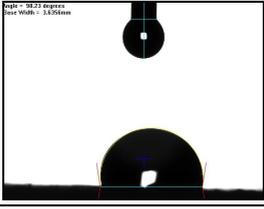
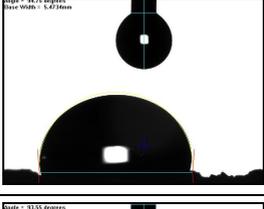
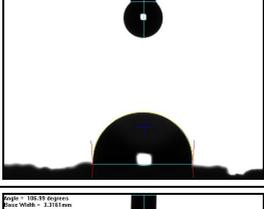
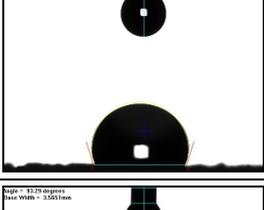
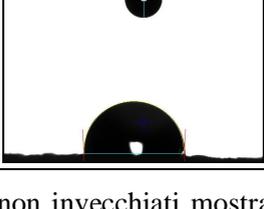
In base alle misure effettuate, la superficie dei provini testati risulta idrofoba. Ogni misurazione sui provini diversamente invecchiati ha dato luogo a valori dell'angolo di contatto superiori a  $90^\circ$ , come riepilogato in tabella 5.8.

Tabella 5.8 Misura dell'angolo di contatto

<b>Campioni</b>	<b>1<sup>a</sup> misura</b>	<b>2<sup>a</sup> misura</b>	<b>3<sup>a</sup> misura</b>	<b>Valore medio</b>
Bianco a $T_0$	110°28'	97°42'	101°34'	<b>103°01'</b>
Salmone a $T_0$	105°36'	98°23'	93°98'	<b>99°19'</b>
Bianco al 6° step	94°75'	108°83'	101°83'	<b>101°80'</b>
Salmone al 6° step	93°55'	94°80'	97°26'	<b>95°20'</b>
Bianco a 3 anni	106°99'	90°11'	107°36'	<b>101°49'</b>
Salmone a 3 anni	93°29'	97°48'	108°36'	<b>99°71'</b>

La tabella 5.9 mostra le immagini più significative di questa sperimentazione.

Tabella 5.9 Immagini più significative del test di misura dell'angolo di contatto

Campioni	Vista dall'alto delle gocce deposte	Immagine della goccia
Bianco a T <sub>0</sub>		
Salmone a T <sub>0</sub>		
Bianco al 6° step		
Salmone al 6° step		
Bianco a 3 anni		
Salmone a 3 anni		

Dai risultati ottenuti si osserva che i campioni salmone non invecchiati mostrano un valore medio dell'angolo di contatto di circa 99°, angolo che si mantiene pres-

soché invariato nei campioni sottoposti a 3 anni di invecchiamento naturale mentre si riduce a circa 95° nei provini sottoposti a 6 step di invecchiamento accelerato. I campioni bianchi non invecchiati mostrano un valore medio di circa 103°, che si riduce di circa 2° sia per i campioni sottoposti a 3 anni di invecchiamento naturale, sia per quelli sottoposti ad invecchiamento artificiale (circa 101°).

#### *La prova di assorbimento d'acqua per capillarità*

Il coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità è stato misurato attraverso la procedura standardizzata descritta nella norma UNI EN 1015-18. Dopo l'essiccazione fino a raggiungere un peso costante, una faccia del provino è immersa in 5-10 mm d'acqua e a distanza di 10 minuti e di 90 minuti dall'inizio della prova, viene misurato il peso del provino. I provini sono stati sigillati lungo tutto il bordo mediante un sigillante al quarzo della TEKNICA®. Per poter ricavare i campioni è stata utilizzata una macchina carotatrice ad acqua che ha consentito di estrarre provini cilindrici di altezza pari a 2,5cm e diametro di 5cm (Figura 5.68). I campioni bianchi e salmone sono stati sottoposti alla prova, in particolare 3 per colore, rispettivamente al tempo zero e dopo il 6° step di invecchiamento artificiale.



Figura 5.68 Carotaggio ed estrazione dei provini cilindrici

L'essiccazione dei provini avviene attraverso un forno a  $60\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Il peso costante si raggiunge quando due pesate consecutive, distanti tra loro 24h, non differiscono di oltre lo 0,2% del peso totale. Raggiunto il peso costante, i campioni vengono pesati (M0). Eseguita tale operazione si inseriscono dentro il recipiente d'acqua e si esegue la prima pesata (M1) dopo 10 min di immersione (Fig. 5.69), poi si ricollocano dentro il recipiente d'acqua e si ripete la pesata dopo 90 min (M2).



Figura 5.69 Fase di immersione dei campioni in acqua

Dopo aver pesato i campioni trovati i valori di M0, M1 e M2, si è proceduto a calcolare il valore medio del lotto di 3 provini per ciascuna condizione di invecchiamento (Tabella 5.10).

Tabella 5.10 Pesate per la determinazione dell'assorbimento d'acqua dei campioni

CAMPIONI		Peso iniziale M0 (g)	Peso dopo 10 min M1 (g)	Peso dopo 90 min M2 (g)
<b>Bianco a T<sub>0</sub></b>	A	78,67	78,95	79,87
	B	80,88	81,89	84,42
	C	77,87	78,29	79,67
<b>Media</b>		<b>79,14</b>	<b>79,21</b>	<b>81,32</b>
<b>Salmone a T<sub>0</sub></b>	A	84,65	85,41	88,18
	B	78,52	79,20	81,49
	C	89,11	90,13	93,74
<b>Media</b>		<b>84,09</b>	<b>84,91</b>	<b>87,80</b>
<b>Bianco al 6° step</b>	A	80,51	82,82	85,43
	B	79,10	79,27	79,55
	C	80,91	82,22	85,02
<b>Media</b>		<b>80,17</b>	<b>81,44</b>	<b>83,33</b>
<b>Salmone al 6° step</b>	A	90,28	90,60	91,56
	B	90,29	90,85	92,96
	C	89,25	89,62	90,58
<b>Media</b>		<b>89,94</b>	<b>90,36</b>	<b>91,70</b>

Il coefficiente di assorbimento all'acqua viene valutato attraverso la formula:

$$C = 0,1(M2 - M1) \text{ Kg m}^{-2}\text{min}^{-0,5}$$

La tabella 5.11 riassume i valori del coefficiente di assorbimento all'acqua dei provini soggetti alla sperimentazione.

Tabella 5.11 Valori del coefficiente di assorbimento all'acqua dei provini (UNI 1015-18)

CAMPIONI		Coefficiente d'assorbimento d'acqua	Valor medio del coefficiente d'assorbimento d'acqua
<b>Bianco a T<sub>0</sub></b>	A	0,09	0,16 Kg/(m <sup>2</sup> min <sup>0,5</sup> )
	B	0,25	
	C	0,14	
<b>Salmone a T<sub>0</sub></b>	A	0,28	0,29 Kg/(m <sup>2</sup> min <sup>0,5</sup> )
	B	0,23	
	C	0,36	
<b>Bianco al 6° step</b>	A	0,26	0,19 Kg/(m <sup>2</sup> min <sup>0,5</sup> )
	B	0,03	
	C	0,28	
<b>Salmone al 6° step</b>	A	0,10	0,13 Kg/(m <sup>2</sup> min <sup>0,5</sup> )
	B	0,21	
	C	0,10	

Per poter stabilire la classe di appartenenza dei provini testati, si utilizza la norma UNI 998-1:2004 che riporta i valori in tabella 5.12.

Tabella 5.12 Classificazione delle proprietà delle malte indurite (UNI 998-1)

Proprietà	Categorie	Valori
Assorbimento d'acqua per capillarità	W0	non specificato
	W1	$c \leq 0,40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
	W2	$c \leq 0,20 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$

I risultati ottenuti dalla prova di assorbimento d'acqua mostrano un buon comportamento del rasante acril-silossanico, essendo i valori del coefficiente di assorbimento dei campioni compresi nel range  $0,13 \div 0,29 \text{ Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$ . Alla classe W2 appartengono i campioni bianchi, invecchiati e non invecchiati dopo 6 step, ed i campioni salmone invecchiati mentre i campioni salmone non invecchiati hanno un coefficiente di assorbimento maggiore ed appartengono alla classe W1, avendo un buon comportamento idrorepellente. Le tabelle 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16 riportano i risultati della misura del peso dei provini entro 24h, necessari per calcolare il coefficiente di assorbimento d'acqua secondo la procedura della DIN 52617.

Tabella 5.13 Misura del peso dei provini bianchi a  $T_0$

	A	B	C	Media
<b>Peso iniziale (g)</b>	78,67	80,88	77,87	<b>79,14</b>
<b>Peso 10 min</b>	78,95	81,89	78,29	<b>79,71</b>
<b>Peso 30 min</b>	79,21	82,77	78,70	<b>80,23</b>
<b>Peso 60 min</b>	79,55	83,69	79,25	<b>80,83</b>
<b>Peso 90 min</b>	79,87	84,42	79,67	<b>81,32</b>
<b>Peso 2 ore</b>	80,18	85,15	80,09	<b>81,81</b>
<b>Peso 3 ore</b>	80,76	86,27	80,84	<b>82,62</b>
<b>Peso 4 ore</b>	81,28	86,79	81,55	<b>83,21</b>
<b>Peso 5 ore</b>	81,77	87,13	82,26	<b>83,72</b>
<b>Peso 6 ore</b>	82,17	87,31	82,77	<b>84,08</b>
<b>Peso 24 ore</b>	85,23	89,65	85,95	<b>86,94</b>

Tabella 5.14 Misura del peso dei provini salmone a  $T_0$

	A	B	C	Media
<b>Peso iniziale (g)</b>	84,65	78,52	89,11	<b>84,09</b>
<b>Peso 10 min</b>	85,41	79,20	90,13	<b>84,91</b>
<b>Peso 30 min</b>	86,13	79,90	91,26	<b>85,76</b>
<b>Peso 60 min</b>	87,26	80,83	92,64	<b>86,91</b>
<b>Peso 90 min</b>	88,18	81,49	93,74	<b>87,80</b>
<b>Peso 2 ore</b>	89,10	82,15	94,83	<b>88,69</b>
<b>Peso 3 ore</b>	90,63	83,30	96,37	<b>90,10</b>
<b>Peso 4 ore</b>	91,30	84,16	96,73	<b>90,73</b>
<b>Peso 5 ore</b>	91,58	84,60	96,98	<b>91,05</b>
<b>Peso 6 ore</b>	91,73	85,01	97,20	<b>91,31</b>
<b>Peso 24 ore</b>	94,03	87,95	99,61	<b>93,86</b>

Tabella 5.15 Misura del peso dei provini bianchi a T<sub>6</sub>

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>Media</b>
<b>Peso iniziale (g)</b>	80,51	79,10	80,91	<b>80,17</b>
<b>Peso 10 min</b>	82,82	79,27	82,22	<b>81,44</b>
<b>Peso 30 min</b>	83,95	79,36	83,28	<b>82,20</b>
<b>Peso 60 min</b>	85,08	79,48	84,51	<b>83,02</b>
<b>Peso 90 min</b>	85,43	79,55	85,02	<b>83,33</b>
<b>Peso 2 ore</b>	85,78	79,62	85,52	<b>83,64</b>
<b>Peso 3 ore</b>	85,98	79,75	86,11	<b>83,95</b>
<b>Peso 4 ore</b>	86,18	79,86	86,34	<b>84,13</b>
<b>Peso 5 ore</b>	86,35	79,97	86,46	<b>84,26</b>
<b>Peso 6 ore</b>	86,51	80,03	86,64	<b>84,39</b>
<b>Peso 24 ore</b>	88,88	81,00	88,35	<b>86,08</b>

Tabella 5.16 Misura del peso dei provini salmone a T<sub>6</sub>

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>Media</b>
<b>Peso iniziale (g)</b>	90,28	90,29	89,25	<b>89,94</b>
<b>Peso 10 min</b>	90,60	90,85	89,62	<b>90,36</b>
<b>Peso 30 min</b>	90,84	91,47	89,89	<b>90,73</b>
<b>Peso 60 min</b>	91,23	92,34	90,28	<b>91,28</b>
<b>Peso 90 min</b>	91,56	92,96	90,58	<b>91,70</b>
<b>Peso 2 ore</b>	91,88	93,58	90,87	<b>92,11</b>
<b>Peso 3 ore</b>	92,64	94,60	91,34	<b>92,86</b>
<b>Peso 4 ore</b>	93,39	95,46	91,79	<b>93,55</b>
<b>Peso 5 ore</b>	94,15	96,18	92,15	<b>94,16</b>
<b>Peso 6 ore</b>	94,76	96,59	92,48	<b>94,61</b>
<b>Peso 24 ore</b>	99,54	100,21	96,63	<b>98,79</b>

Questi risultati del monitoraggio del peso dei provini nell'arco di 24h possono essere diagrammati (Figg. 5.70 e 5.71).

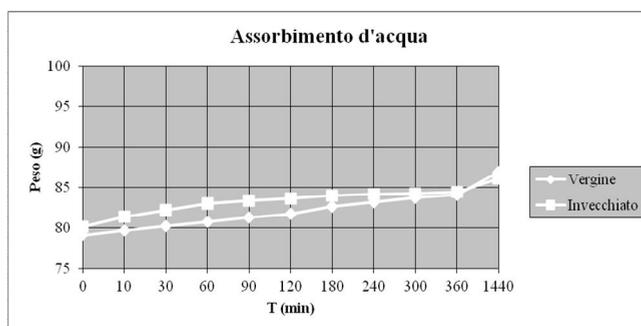


Figura 5.70 L'evoluzione del peso per i campioni bianchi invecchiati e non

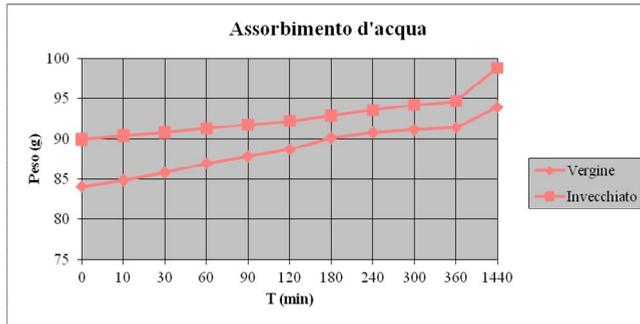


Figura 5.71 L'evoluzione del peso per i campioni salmone invecchiati e non

Come ulteriore approfondimento è stata anche utilizzata la norma DIN 52617. Il coefficiente di assorbimento capillare ( $W$ ), è stato ottenuto dividendo la quantità d'acqua assorbita per unità di superficie sino all'istante  $t$  per la radice quadrata del tempo  $t$  (con  $t = 24h$ ).

$$W = \frac{\text{Acqua}_{\text{assorbita}}}{\sqrt{t}}$$

da cui si sono ottenuti i risultati in tabella 5.17.

Tabella 5.17 Risultati della prova secondo la norma DIN 52617

CAMPIONI		Coefficiente d'assorbimento d'acqua	Valor medio del coefficiente d'assorbimento d'acqua
Bianco a $T_0$	A	1,34	0,33 Kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> )
	B	1,79	
	C	1,65	
Salmone a $T_0$	A	1,91	0,41 Kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> )
	B	1,92	
	C	2,14	
Bianco al 6° step	A	1,71	0,25 Kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> )
	B	0,39	
	C	1,52	
Salmone al 6° step	A	1,89	0,37 Kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> )
	B	2,02	
	C	1,51	

Secondo la classificazione della norma DIN 52617, la malta per intonaci risulta sufficientemente idrorepellente se ha un valore  $W < 0,5 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$  di acqua assorbita nel tempo. I provini testati mostrano un valore medio del coefficiente di assorbimento che risulta compreso tra  $0,25 \text{ Kg/(m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$  e  $0,41 \text{ Kg/(m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$ , pertanto sono classificati come rasanti ad assorbimento sufficiente.

## 6 I LAMINATI COMPOSITI IN FIBRE DI BASALTO

I materiali compositi, realizzati con matrice epossidica e fibre di basalto, riscontrano un interesse crescente da parte della comunità scientifica e dell'industria delle Costruzioni per le potenzialità non del tutto ancora espresse, soprattutto in ambito costruttivo e strutturale. Viste le istanze di sostenibilità richieste agli interventi edilizi, la tendenza è quella di utilizzare fibre di origine organica naturale (canapa, lino, curaua, etc.) e minerale, come il basalto (Sarasini et al., 2013).

### 6.1 Il basalto

Il basalto è una roccia ignea effusiva basica dalla grana fine e tinta scura o nera (Fig. 6.1), e rappresenta la roccia maggiormente presente sulla crosta terrestre.



Figura 6.1 Basalti colonnari, Sheepeater Cliffs, Yellowstone National Park. Immagine tratta da Natalie Teager, Arizona State University ([www.alexstrekeisen.it](http://www.alexstrekeisen.it))

Il tenore di silice,  $\text{SiO}_2$ , è intorno al 50%, più basso di quello del vetro e delle comuni rocce granitiche, che si attestano intorno al 70%, come riportato nella tabella 6.1.

Tabella 6.1 Composizione chimica tipica delle rocce di basalto utilizzate nella produzione delle fibre confrontata con quella di un vetro tipico ([www.basaltnet.it](http://www.basaltnet.it))

Composto	% nelle rocce basaltiche	% nel vetro tipico
SiO <sub>2</sub>	49.58	72.16
TiO <sub>2</sub>	2.08	1.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.48	13.85
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.42	-
Ore FeO	9.43	3.66
K <sub>2</sub> O	1.89	2.67
Na <sub>2</sub> O	2.1	5.24
MgO	5.1	0.52
CaO	8.5	1.62
MnO	0.17	-

La roccia basaltica presenta numerosi vantaggi:

- facilità di reperibilità;
- mantenimento delle proprietà meccaniche anche ad alte temperature, fino ad 800°C, contro circa la metà per le fibre di vetro;
- stabilità chimica anche in ambienti aggressivi;
- basso coefficiente di conduzione termica, pari a circa 0,035 W/mK, confrontabile con quella delle fibre di vetro, circa 0,04 W/mK;
- elevato modulo elastico, 89 GPa contro 77 GPa delle fibre di vetro;
- elevata resistente alla corrosione (Wei et al., 2010);
- elevata resistenza a fuoco;
- resistenza a trazione maggiore rispetto alle fibre di vetro, 4840 MPa contro 3450 MPa.

Le fibre di basalto, utilizzate per la realizzazione di laminati compositi, vengono prodotte dalla roccia basaltica frantumata, principalmente attraverso un processo di fusione in fornace a circa 1450°C e filatura finale si trovano in commercio sotto forma di lana, per uso come isolante termico e acustico, roving, per uso tessile, chopped strand e tondini, per rinforzo di calcestruzzo, fabrics (tessuti), per la produzione di compositi (Fig. 6.2).



Figura 6.2 Forme diverse di basalto: (1) lana, (2) fabric, (3) tondini ([www.basaltnet.it](http://www.basaltnet.it))

Uno dei motivi per cui la fibra di basalto risulta vantaggiosa rispetto ad altre,

risiede nel processo di produzione che non prevede addizioni chimiche. Diversamente da quanto accade per altri tipi di fibre, quelle di basalto non rilasciano sostanze chimiche quando sottoposte a riscaldamento, né residui solidi nelle fasi di produzione. L'uso delle fibre di basalto, in sostituzione dell'amianto, è ormai consolidato e la normativa italiana ha inserito il basalto nell'elenco ufficiale dei materiali che possono sostituire l'amianto<sup>13</sup>. Infatti il diametro della fibra di basalto eccede i 6µm, misura limite affinché una sostanza si nociva per l'apparato respiratorio umano. Inoltre i filamenti continui che hanno diametri superiori a 5µm non subiscono processi di frattura in senso longitudinale, e questo contribuisce a caratterizzarli come non respirabili e quindi "sicuri" secondo le normative internazionali sull'igiene e sicurezza nei luoghi di lavoro. Per quanto riguarda la stabilità termica delle fibre di basalto, confrontate con quelle di vetro, è stato dimostrato che, sottoposte a trattamento termico a 600°C per 2 ore, il basalto mantiene le sue proprietà di resistenza a trazione e modulo elastico in un intervallo di temperatura decisamente maggiore rispetto al vetro (Fig. 6.3). Per temperature superiori ai 400-500°C, il basalto diventa meno resistente rispetto al vetro, ma mantiene una rigidità superiore (Van de Velde et al., 2003).

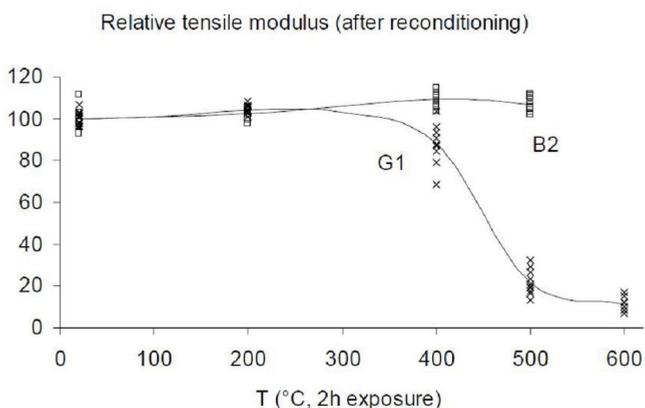


Figura 6.3 Evoluzione del modulo elastico delle fibre di basalto (B2) e di vetro (G1), al variare della temperatura di esposizione

Altri studi comparativi tra fibre di basalto, di vetro e di carbonio hanno dimostrato che con l'aumento della temperatura, oltre i 200°C, le fibre di basalto mantengono la loro resistenza a trazione in modo superiore alle altre fibre (Fig. 6.4). Per un'esposizione limite a 1200°C per 2h, condizione rappresentativa delle temperature raggiunte durante un incendio, si verifica sulle fibre di vetro e di carbonio una perdita di stabilità volumetrica al contrario delle fibre di basalto che mantengono ancora una rigidità residua (Sim et al., 2005).

<sup>13</sup> Decreto Ministero dell'Industria del Commercio e dell'Artigianato 26/03/1998

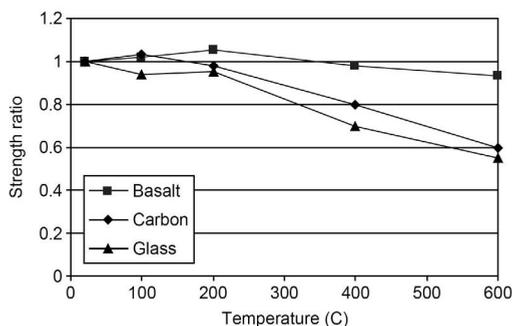


Figura 6.4 Evoluzione del rapporto tra la resistenza finale ed iniziale di fibre di basalto, carbonio e vetro, per effetto di esposizione a cicli termici per 2h

## 6.2 Le resine epossidiche

Le resine epossidiche sono polimeri a basso peso molecolare (in forma solida o liquida) le cui molecole sono costituite da uno o più gruppi epossidici reattivi. Il gruppo epossidico è costituito da un atomo di ossigeno legato a due atomi di carbonio direttamente o indirettamente collegati tra loro, secondo la formula di struttura in Fig. 6.5.

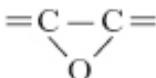


Figura 6.5 Formula di struttura del gruppo epossidico

In presenza di induritori/catalizzatori, le resine epossidiche hanno la capacità di reticolare dando luogo alla formazione di una struttura tridimensionale ad alto grado di reticolazione. Le resine epossidiche più diffuse sul mercato sono poliesteri alifatico-aromatici costituiti da prodotti di condensazione derivati dalla reazione della epichelidrina con bisfenolo A, secondo la formula di struttura in Fig. 6.6 (Vecchiattini, 2006).

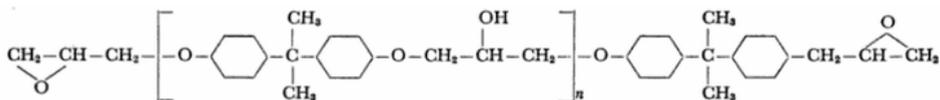


Figura 6.6 Formula di struttura di una comune resina epossidica

A temperatura ambiente, se  $n < 1,5$  la resina si trova in forma liquida, per  $n > 1,5$  la resina si trova in forma solida. L'effetto della reticolazione della resina epossidica, per effetto della miscelazione con catalizzatori, consiste nella formazione di legami chimici (cross-link) che fungono da "ponti" fra le molecole stesse. Il sistema passa da uno stato iniziale fluido ad uno stato solido vetroso, tipico dei materiali termoindurenti. La bassa massa molecolare (450-9000 uma) delle resine epossidiche allo stato liquido gli conferisce elevata mobilità ossia bassa viscosità

nelle prime fasi di reticolazione, determinando ottima lavorabilità del sistema resina/catalizzatore non reticolato. Il sistema è in grado di impregnare velocemente e completamente le superfici trattate e questa caratteristica è di notevole importanza quando le resine epossidiche vengono utilizzate come matrici per materiali compositi fibro-rinforzati, laddove è necessario evitare la formazione di vuoti all'interfaccia. L'elevata reattività del gruppo epossidico con agenti di reticolazione come le ammine fornisce un elevato grado di reticolazione e quindi elevata durezza, resistenza meccanica e chimica del sistema reticolato. La fase di reticolazione è caratterizzata da bassi ritiri, fino al 5% del volume iniziale contro il 12-15% delle resine vinilesteri e poliesteri (Martuscelli, 2008).

### **6.3 Il laminato composito**

Per materiale composito si intende un materiale costituito da più materiali semplici tra loro differenti per composizione o forma. Ciascun costituente mantiene la propria identità nel composto finale senza dissolversi o fondersi completamente nell'altro. Nel materiale composito, si distinguono la matrice, il rinforzo ed eventuali filler o inerti riempitivi che riducono il contenuto di matrice, incrementando alcune proprietà del composito. Nei materiali compositi fibro-rinforzati a matrice polimerica (FRP ovvero fiber reinforced polymer), il rinforzo è costituito da fibre (di vetro, aramidiche, di carbonio) mentre la matrice è costituita da materiale polimerico in genere termoindurente (resine epossidiche, poliesteri o vinilesteri). Il rinforzo ha il compito di sopportare i carichi applicati al composito e la matrice ha il compito di tenere distanziate le fibre, trasferire il carico ad esse, proteggerle dagli agenti chimici e dai danneggiamenti meccanici e ritardare la propagazione delle fratture a tutto il composito. Un laminato composito può essere composto dall'assemblaggio di più lamine composite con rinforzo di fibre legate tra loro tramite un legante polimerico. Ogni laminato è caratterizzato da una sequenza di laminazione che rappresenta la sequenza di orientazione delle varie lamine rispetto ad una direzione predefinita. I laminati compositi in fibre di basalto riscontrano interesse e numerosi studi ne dimostrano l'efficacia nel rinforzo di strutture in calcestruzzo armato (Thorhallsson, 2011) (Di Ludovico et al., 2008) e per applicazioni in ambiente marino (Fiore et al., 2011).

### **6.4 La ricerca sperimentale**

L'obiettivo della ricerca è quello di valutare la durabilità di due tipi di compositi in fibre di basalto, realizzati con una successione diversa di strati di fibre di basalto, in termini di prestazioni meccaniche e parametri fisico-chimici. Lo studio è rivolto a verificare la possibilità di impiego di tali laminati compositi per la produzione di pannelli di rivestimento esterno di manufatti edilizi. Sempre secondo la metodologia ISO 15686 e UNI 11156-3 (§ 2.2) per la valutazione della vita utile, il programma sperimentale è stato rivolto all'acquisizioni di informazioni sul comportamento prestazionale di tali materiali, con l'invecchiamento per effetto di esposizione ai raggi UV e di variazioni repentine di temperatura ed umidità relativa. Pertanto nella definizione del quadro di agenti sollecitanti sono state

individuare le condizioni cui un pannello di rivestimento è soggetto nel contesto di riferimento della città di Palermo, con temperature variabili tra 2°C e 60°C, umidità relative tra 10% e 80% ed esposizione ad irraggiamento, mediante lampada UV. E' stata anche definita una fase di esposizione alle condizioni ambientali esterne, per un anno, in modo da ottenere per confronto dati utili alla definizione della vita utile del componente edilizio (rescaling temporale).

### 6.5 I parametri indagati e le strumentazioni

I parametri considerati, ritenuti maggiormente significativi per pannelli composti in fibre di basalto, sono:

- modulo elastico;
- resistenza a flessione a rottura;
- massa;
- resistenza a trazione a rottura, per i provini di resina.

La norma ASTM D790:2010<sup>14</sup> descrive la procedura per l'esecuzione del test a flessione su 3 punti. Il rapporto tra lo spessore e la distanza dagli appoggi deve essere pari a 1:60, in modo che la componente flessionale sia preponderante rispetto a quella di taglio. La strumentazione impiegata è un dinamometro Zwick Roell Z005 con cella di carico da 5KN in dotazione al Laboratorio dell'ex Dipartimento di Ingegneria chimica, dei processi e dei materiali (DIPCM) della rete UniNetLab dell'Università degli Studi di Palermo (Fig. 6.7). Dalla prova si ottengono i parametri meccanici dei provini sottoposti a sforzo di flessione su tre punti. La stessa attrezzatura è stata impiegata per le prove di trazione sui provini di resina, secondo la procedura descritta dalla norma ASTM D 638:2010<sup>15</sup>.



Figura 6.7 Il dinamometro Zwick Roell Z005 in dotazione al DIPCM

<sup>14</sup> ASTM D790:2010. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials

<sup>15</sup> ASTM D 638:2010. Standard test methods for tensile Properties of Plastics

## 6.6 La preparazione dei campioni di prova

### 6.6.1 I laminati compositi

I laminati compositi in fibre di basalto e resina epossidica sono stati realizzati in due tipologie diverse di laminato, per sovrapposizione successiva di 6 lamine di tessuti (fabrics) in fibra di basalto, secondo due sequenze di laminazione diverse, mostrate in Fig. 6.8.

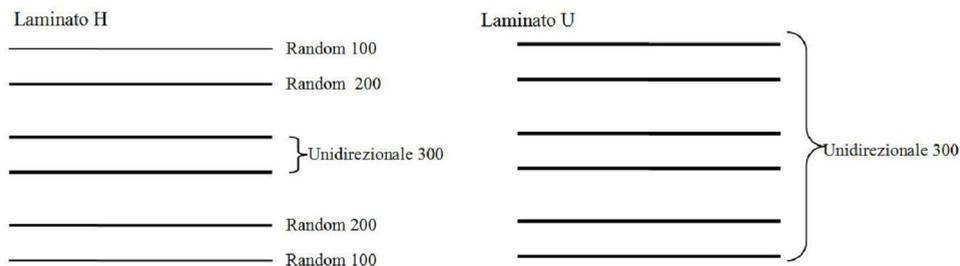


Figura 6.8 (Sin) Configurazione laminato ibrido e (dx) laminato unidirezionale

La prima sequenza di laminazione prevedeva tre diversi fabrics -unidirezionale 300, random 200 e random 100 (Fig. 6.9) – a comporre il cosiddetto laminato ibrido (H) e la seconda impiegando il solo fabric unidirezionale 300, a comporre il laminato unidirezionale (U). L'indicazione numerica indicava la grammatura del tessuto in  $g/m^2$ .



Figura 6.9 Fabric random 100 (1), random 200 (2) Unidirezionale 300 (3)

La differenza di direzione delle fibre incide sulle caratteristiche meccaniche del composito, infatti i tessuti unidirezionali sono caratterizzati dall'aver modulo elastico e resistenza elevati nella direzione dell'orientazione delle fibre, ma bassi in direzione trasversale. I tessuti random sono caratterizzati dall'aver le fibre disposte in maniera casuale lungo il piano, conferendo al tessuto proprietà isotrope e quindi anche al laminato corrispondente. La tecnica utilizzata per la realizzazione dei laminati compositi è nota come stampaggio sottovuoto (vacuum bagging) ed è basata sull'utilizzo di un involucro plastico, all'interno del quale viene creata una depressione mediante una pompa, per tenere insieme i componenti della laminazione (fabrics e resina epossidica) durante il processo di reticolazione della resina, come mostrato nello schema in Fig. 6.10. La depressione pari a  $-0,8$  atm per 5h ha comportato notevoli vantaggi nella realizzazione dei laminati compositi:

- rimozione dell'aria intrappolata tra gli strati;
- maggiore compattezza degli strati di fibra per garantire un'efficace trasmissione degli sforzi ed impedire lo spostamento delle fibre durante la reticolazione della resina;
- riduzione dell'umidità;
- ottimizzazione del rapporto fibra/resina nella struttura composita, perché la tecnica permette l'eliminazione della resina in eccesso;
- omogenea distribuzione della resina, evitando la presenza di zone in cui il rinforzo è o scarsamente o eccessivamente impregnato;
- realizzazione di manufatti di peso notevolmente inferiore grazie all'eliminazione della resina in eccesso.

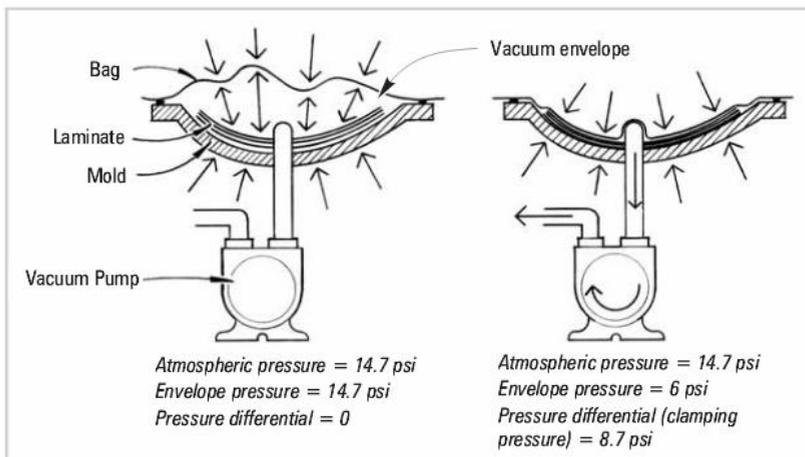


Figura 6.10 Schema della procedura di stampaggio sottovuoto prima e dopo che la depressione sia applicata all'interno dell'involucro (West System Inc., 2010)

Per ottimizzare il processo tecnologico sottovuoto, sono stati utilizzati due tessuti con caratteristiche diverse: un tessuto distaccante (peel ply) ed un tessuto assorbente (bleeder). I fogli di peel ply permettono, alla fine del processo, di rimuovere ed estrarre il laminato dall'involucro, mantenendolo intatto, i fogli di bleeder garantiscono l'assorbimento della resina in eccesso fuoriuscita dal laminato per effetto della depressione applicata (Fig. 6.11).

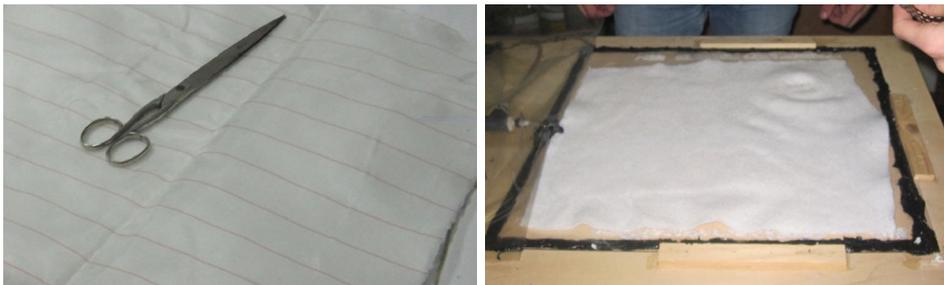


Figura 6.11 (Sin) Il foglio di peel ply e (dx) il bleeder utilizzati

La sequenza delle fasi operative necessarie alla realizzazione dei laminati compositi prevedeva, a partire dal basso (Fig. 6.12):

- 1) Posizionamento di un foglio di peel ply, di un foglio di bleeder e del primo fabric del laminato composito;
- 2) Impregnazione manuale tramite rullo della prima lamina con la matrice costituita dalla miscela resina/catalizzatore;
- 3) Posizionamento del secondo fabric del laminato composito;
- 4) Ripetizione della fase 2) per 5 volte, tanti quanti sono i fabric;
- 5) Posizionamento di un foglio di bleeder e del foglio finale di peel ply;
- 6) Chiusura del composito nell'involucro ed avvio della pompa per il vuoto.

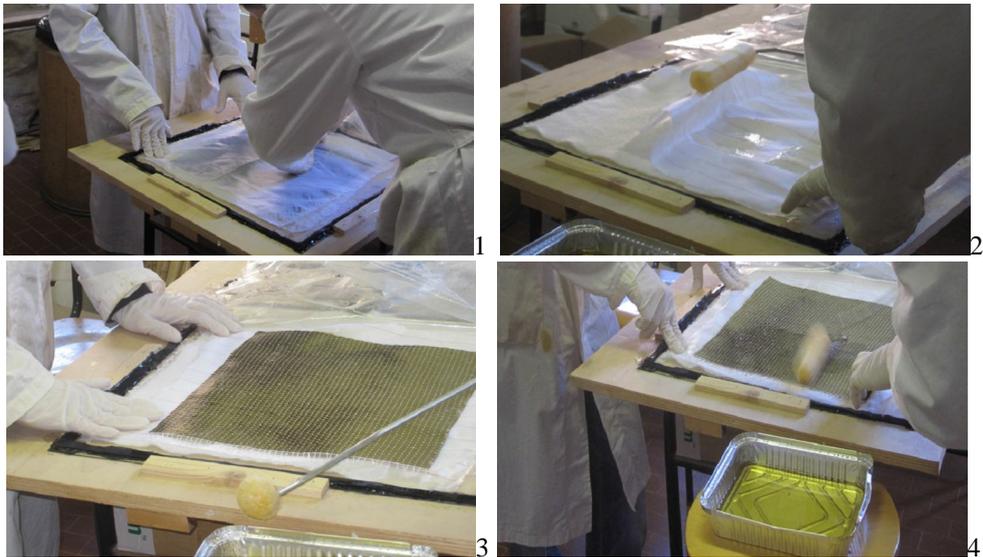


Figura 6.12 (1) Posizionamento del peel ply, (2) posizionamento del bleeder, (3) posizionamento del primo fabric, (4) impregnazione del primo fabric con la resina

Completato il processo di stampaggio sottovuoto, sono stati rimossi i fogli di peel ply e di bleeder, i pannelli compositi unidirezionali ed ibridi (Fig. 6.13) sono stati estratti dall'involucro e posti in stufa per un trattamento termico a 40°C per 24h, per completare il processo di reticolazione della resina.

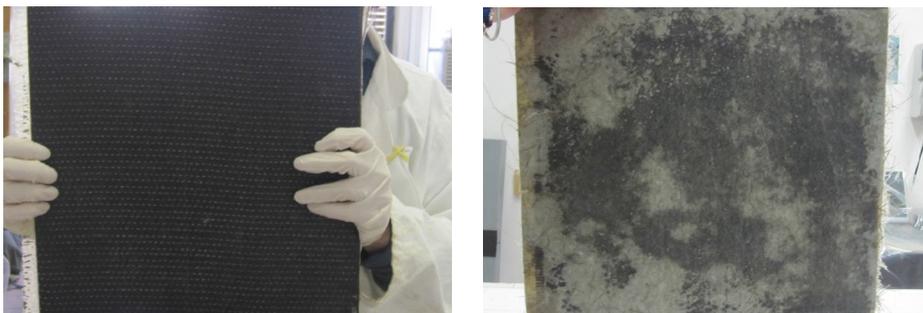


Figura 6.13 (Sin) Il laminato unidirezionale e (dx) il laminato ibrido

Dai pannelli realizzati, sono stati ricavati i provini di dimensioni standardizzate 150x25x1,5 mm, secondo la norma ASTM D790, tramite taglio ad acqua con strumentazione a controllo numerico, effettuato presso la Waterjet G&G s.r.l. di Bagheria (Fig. 6.14).



Figura 6.14 Fasi del taglio ad acqua dei provini di laminato composito

Dal taglio dei pannelli in laminato composito sono stati ottenuti 35 provini per ciascun pannello in laminato composito, H ed U, per le prove di invecchiamento naturale ed artificiale (Fig. 6.15).



Figura 6.15 I provini ottenuti dal pannello laminato composito unidirezionale

### 6.6.2 I provini di resina epossidica

Sono stati realizzati campioni in sola resina di forma ad osso di cane (Dumbbell Shape), con dimensioni standardizzate (Fig. 6.16) secondo la norma ASTM D 638, utilizzando la resina SP<sup>®</sup> 106, della Gurit Ltd.

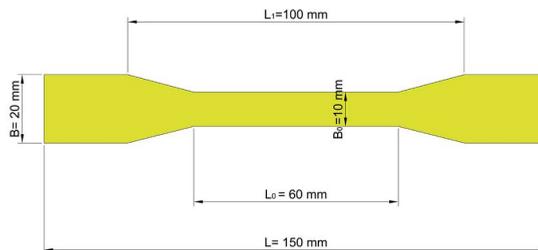


Figura 6.16 Dimensioni del provino di resina epossidica

Le principali caratteristiche della resina epossidica sono riportate nella tabella 6.2.

Tabella 6.2 Caratteristiche principali della resina epossidica

	Resina	Agente Indurente (Veloce)
Rapporto in peso	100	18
Rapporto in volume	100	20
Viscosità a 25°C [cP]	815	198
Stabilità nella conservazione [mesi]	24	24
Colore	Giallo scuro	Giallo chiaro
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	1164	0,968
Miscela dopo la reticolazione		
Ritiro lineare [%]	1,6	
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	1,131	
Tg [°C]	61.8	
Durezza (Barcol)	26	

La sequenza delle fasi operative necessarie alla realizzazione dei provini di resina è la seguente (Fig. 6.17):

- 1) Miscelazione manuale del catalizzatore e della resina secondo i rapporti stechiometrici indicati nella scheda tecnica della resina per 5 minuti a temperatura ambiente;
- 2) Colatura della resina in stampi di gomma siliconica, a forma di osso di cane;
- 3) Reticolazione dei provini per 24h a temperatura ambiente e successiva post-cura alla temperatura di 40 °C per 4h;
- 4) Smerigliatura dei provini, per rendere scabra la superficie di attacco del grip per la prova di trazione.



Figura 6.17 Fasi di preparazione dei provini di resina

### 6.7 Misurazione ed etichettatura dei provini

Tutti i provini, sia dei due tipi di laminato composito che di resina epossidica, sono stati misurati con l'ausilio di un calibro e del micrometro (Fig. 6.18) e successivamente etichettati.



Figura 6.18 (1 e 2) Fasi di misura con micrometro e (3) bilancia elettronica dei provini

I campioni di laminato sono stati etichettati ed è stata assegnata una lettera per ciascun lotto in relazione al momento di prelievo:

- A: test a flessione a  $T_0$ ;
- B: test a flessione a  $T_1$ ;
- C: test a flessione a  $T_2$ ;
- D: test a flessione a  $T_3$ ;
- N: test a flessione invecchiamento naturale (Fig. 6.19);
- M: misura della massa.



Figura 6.19 (1) Le griglie metalliche di supporto per l'esposizione agli agenti atmosferici dei provini, (2) dettaglio dei provini ibridi e (3) dei provini unidirezionali e di resina

Le dimensioni misurate dei provini sono riportate in tabella 6.3 e la misura della massa è riportata in tabella 6.4.

Tabella 6.3 Dimensioni dei provini in laminato composito misurati mediante micrometro

Prelievo	Codice	Unidirezionali			Ibridi		
		lunghezza (mm)	larghezza (mm)	spessore (mm)	lunghezza (mm)	larghezza (mm)	spessore (mm)
T <sub>0</sub>	A1	151,00	25,00	1,483	150,00	24,97	1,840
	A2	150,00	25,00	1,525	150,00	25,00	1,817
	A3	150,10	25,07	1,398	150,00	25,00	1,963
	A4	150,00	25,00	1,598	149,75	24,88	1,933
T <sub>1</sub>	B1	150,00	25,00	1,473	150,00	25,00	1,693
	B2	150,00	25,00	1,423	150,09	25,36	2,337
	B3	150,00	25,00	1,385	150,05	25,05	1,833
	B4	150,00	25,00	1,450	149,75	25,00	1,810
	B5	150,00	25,00	1,407	150,10	25,00	1,900
T <sub>2</sub>	C1	150,00	25,00	1,422	150,00	25,00	1,897
	C2	150,00	25,00	1,530	150,10	25,03	1,820
	C3	150,00	25,00	1,507	150,00	25,00	1,857
	C4	150,00	25,00	1,550	150,00	25,00	1,910
	C5	150,00	25,00	1,475	150,00	25,09	2,010
T <sub>3</sub>	D1	150,00	25,00	1,417	150,10	25,05	2,012
	D2	150,00	25,00	1,425	150,05	25,06	2,237
	D3	150,00	25,00	1,463	150,05	25,03	2,203
	D4	150,00	25,00	1,442	150,00	25,00	1,827
	D5	150,00	25,00	1,513	150,00	25,00	1,860
Invecchiamento naturale	N1	150,00	25,00	1,460	150,05	25,05	2,097
	N2	150,00	25,00	1,457	150,05	25,05	2,377
	N3	150,00	25,00	1,420	150,03	25,05	1,815
	N4	150,00	25,00	1,467	150,00	25,00	2,097
	N5	150,00	25,00	1,457	150,05	25,05	2,365

Tabella 6.4 Misura della massa dei provini in laminato composito e resina

Codice	Massa Unidirezionali (g)	Massa Ibridi (g)	Massa Resina (g)
M1	9,00	9,66	9,86
M2	8,93	9,27	8,91
M3	8,91	8,98	8,34
M4	8,88	8,81	8,76
M5	8,83	9,26	9,20
M6	9,01	9,75	8,71
M7	8,95	9,50	6,89
M8	8,93	9,84	9,55
M9	8,93	9,08	7,94
<b>Media</b>	<b>8,93</b>	<b>9,35</b>	<b>8,55</b>

## 6.8 L'invvecchiamento accelerato

L'esposizione a breve termine dei provini della sperimentazione è stata preceduta da uno studio preliminare per l'individuazione delle condizioni climatiche ritenute rappresentative dei fattori di stress a cui si prevede che il materiale debba essere soggetto durante il ciclo di vita. I laminati compositi realizzati per la sperimentazione sono destinati al rivestimento esterno di manufatti edilizi, pertanto, per la definizione del ciclo di invecchiamento accelerato, si è partiti dallo studio sul contesto climatico di Palermo (§ 3.1.2) e dalle informazioni disponibili sui pannelli compositi. Noto che nel pannello composito, la fase meno resistente e maggiormente degradabile è la resina epossidica, è stato messo a punto un ciclo di invecchiamento accelerato che alternasse lo stress igrotermico all'irraggiamento UV, cui la resina è maggiormente sensibile. Dalla letteratura, infatti, è notorio che la resina epossidica ha scarsa capacità di resistenza alla radiazione ultravioletta e l'elevata temperatura potrebbe modificare lo stato della resina, in corrispondenza della temperatura di transizione vetrosa ( $T_g$ ).  $T_g$  è la temperatura alla quale ogni polimero subisce una variazione strutturale passando dallo stato vetroso allo stato gommoso. La resistenza meccanica del polimero viene di conseguenza compromessa per effetto del passaggio da una struttura reticolare cristallina ad uno stato di disordine liquido. Generalmente le resine epossidiche presentano una  $T_g$  maggiore della temperatura media ambiente, come la resina utilizzata per la sperimentazione che ha temperatura di transizione vetrosa pari a  $61,8^\circ\text{C}$ . Temperature dell'ordine dei  $60^\circ\text{C}$  possono essere facilmente raggiunte da superfici esposte per molte ore consecutive alla radiazione solare nel contesto climatico di Palermo. Pertanto, il ciclo base di invecchiamento accelerato definito per questa sperimentazione è costituito da una fase A con l'alternanza di un segmento di 2h a  $60^\circ\text{C}$  e 10% di umidità relativa e di un segmento di 2h a  $10^\circ\text{C}$  e 80% di umidità relativa, da ripetersi 24 volte, ed una fase B con la radiazione ultravioletta di 3h a  $35^\circ\text{C}$  e 87% di U.R. (§ Tab. 3.2), anch'essa da ripetersi 24 volte. La durata del ciclo base è stata di 7 giorni; uno step di invecchiamento accelerato è stato considerato composto dalla ripetizione per 4 volte del ciclo base, per un totale di 28 giorni. Alla fine di ogni step è stato fatto un prelievo di 10 provini per tipologia di laminato composito e 5 di resina da sottoporre a test meccanici.

### *La disposizione dei provini in camera climatica*

I provini sono stati disposti all'interno della camera climatica in modo da subire in maniera uniforme le condizioni climatiche imposte. Per la fase A, i provini sono stati disposti nella parte bassa della camera su 3 file (Fig. 6.20) con un'inclinazione di circa  $70^\circ$ . Per la fase B, i provini sono stati disposti nella parte alta della camera climatica, su una griglia distante della lampada UV circa 25 cm, tale da mantenere questa distanza per tutti i provini, secondo una sfera ideale attorno al bulbo della lampada (Fig. 6.21) per mantenere costante l'irradianza sul valore misurato di  $5\text{ W/m}^2$ .

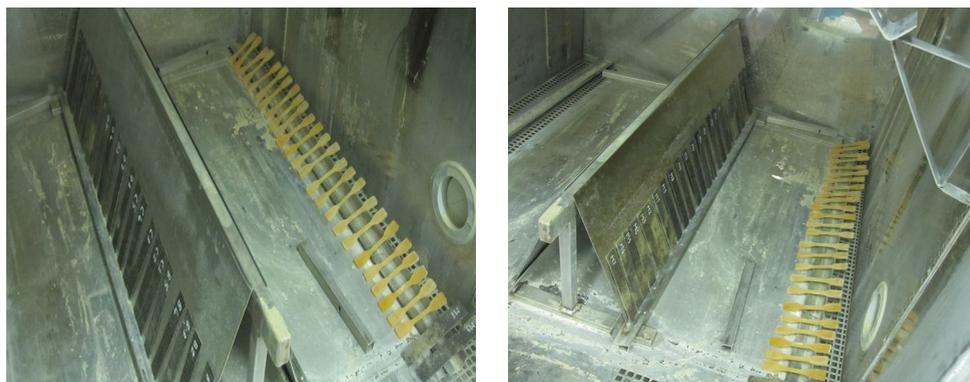


Figura 6.20 Disposizione dei provini per la fase A su tre file

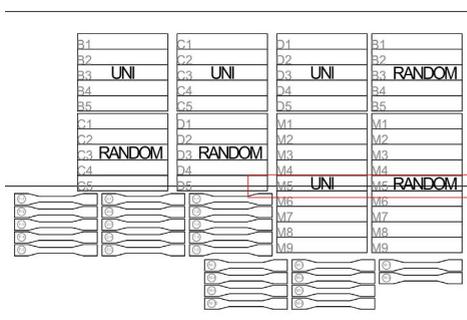


Figura 6.21 Disposizione dei provini per la fase B a 25 cm dalla lampada UV

## 6.9 Analisi ed interpretazione dei risultati sperimentali

### *I laminati compositi*

I provini di laminato composito, sia unidirezionale che ibrido, a  $T_0$  ed i lotti di provini prelevati per ciascuno step di invecchiamento accelerato, sono stati oggetto di test a flessione su tre punti secondo la metodologia descritta dalla norma ASTM D790 (§ 6.5) mediante dinamometro Zwick Roell Z005 (Fig. 6.22).

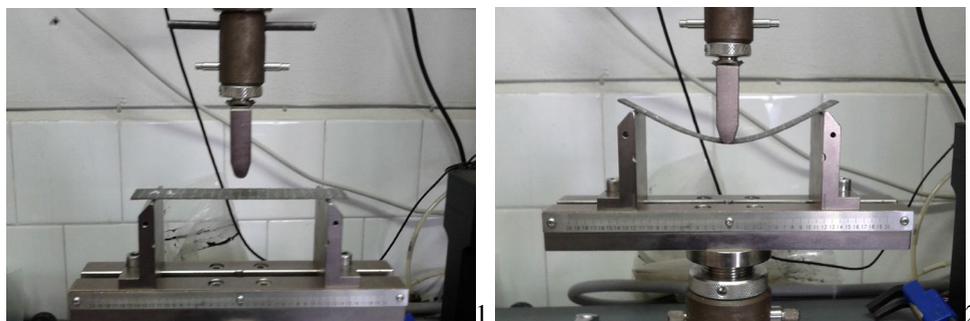


Figura 6.22 Un provino di laminato unidirezionale (1) prima e (2) durante il test

### *Test a $T_0$*

I risultati del test di flessione su tre punti per il lotto costituito da n. 4 provini di

laminato composito unidirezionale, etichettati con la sigla A sono riportati in Tabella 6.5 e nel grafico in Fig. 6.23.

Tabella 6.5 Valori dei parametri meccanici per i provini unidirezionali A

UD A	P [N]	$\sigma$ [MPa]	Deformazione [%]	Deformazione [mm]	E [GPa]
1	59,71	195,4	1,04	16,81	22,53
2	93,36	240,9	1,40	15,34	23,10
3	84,56	259,5	1,06	12,67	27,03
4	110,05	258,5	1,63	16,96	21,93
<b>media</b>	<b>86,92</b>	<b>238,5</b>	<b>1,28</b>	<b>15,44</b>	<b>23,65</b>
dev. St.	21,00	30,0	0,28	1,99	2,31

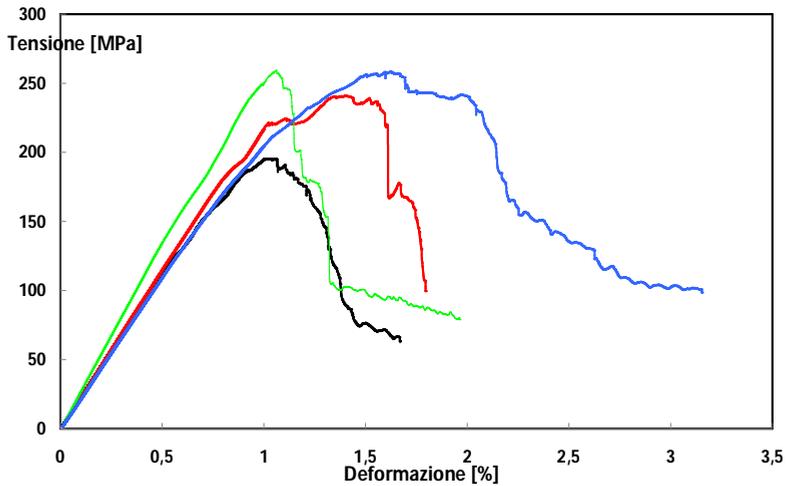


Figura 6.23 Grafico deformazione-tensione per i provini unidirezionali a  $T_0$

I risultati del test di flessione su tre punti per il lotto costituito da n. 5 provini di laminato composito ibrido, etichettati con la sigla A sono riportati in Tabella 6.6 e nel grafico in Fig. 6.24.

Tabella 6.6 Valori dei parametri meccanici per i provini ibridi A

Ibrido A	P [N]	$\sigma$ [MPa]	Deformazione [%]	Deformazione [mm]	E [GPa]
1	45,8	81,3	2,99	27,12	4,32
2	71,4	103,9	3,08	18,07	4,90
3	64,1	79,8	4,05	22,02	3,23
4	72,8	94,0	3,58	19,74	4,15
5	98,6	104,8	3,10	15,56	4,87
<b>media</b>	<b>70,6</b>	<b>92,8</b>	<b>3,36</b>	<b>20,50</b>	<b>4,30</b>
dev. St.	19,0	11,9	0,45	4,39	0,68

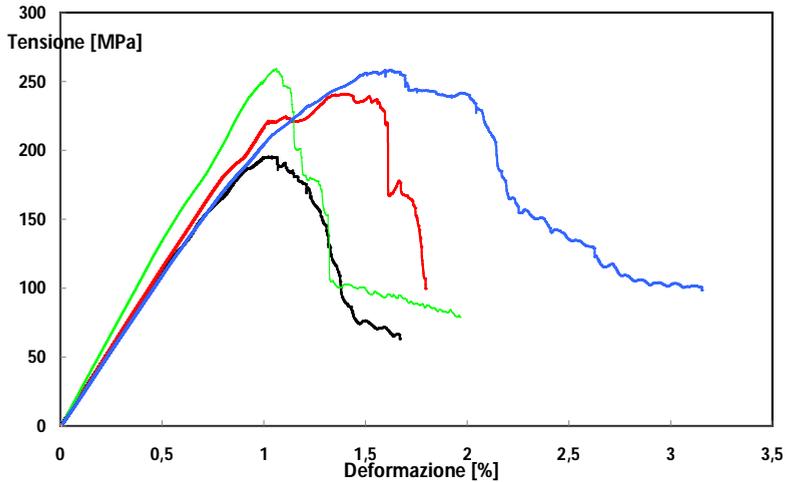


Figura 6.24 Grafico deformazione-tensione per i provini ibridi a  $T_0$

I risultati confermano quanto ci si attendesse, cioè che le migliori prestazioni in termini di parametri meccanici sono state ottenute con i provini unidirezionali, con valore medio della tensione a rottura pari a 238,5 MPa contro i 92,8 MPa dei provini ibridi. La deformazione a rottura è maggiore per i provini ibridi, circa 20,5 mm contro 15,5 mm. Il valore medio del modulo elastico per i provini unidirezionali è pari a 23,65 GPa contro 4,30 GPa per i provini ibridi.

#### Test a $T_1$

I risultati del test di flessione su tre punti per il lotto costituito da n. 5 provini di laminato composito unidirezionale, etichettati con la sigla B sono riportati in Tabella 6.7 e nel grafico in Fig. 6.25.

Tabella 6.7 Valori dei parametri meccanici per i provini unidirezionali B

UD B	P [N]	$\sigma$ [MPa]	Deformazione [%]	Deformazione [mm]	E [GPa]
1	114,7	317,1	1,86	21,08	23,01
2	109,1	323,0	1,46	17,05	25,98
3	98,5	308,0	1,68	20,16	25,86
4	110,4	315,2	1,80	20,73	25,03
5	106,8	323,8	1,42	16,87	27,66
<b>media</b>	<b>107,9</b>	<b>317,4</b>	<b>1,64</b>	<b>19,18</b>	<b>25,51</b>
dev. St.	6,0	6,5	0,20	2,05	1,69

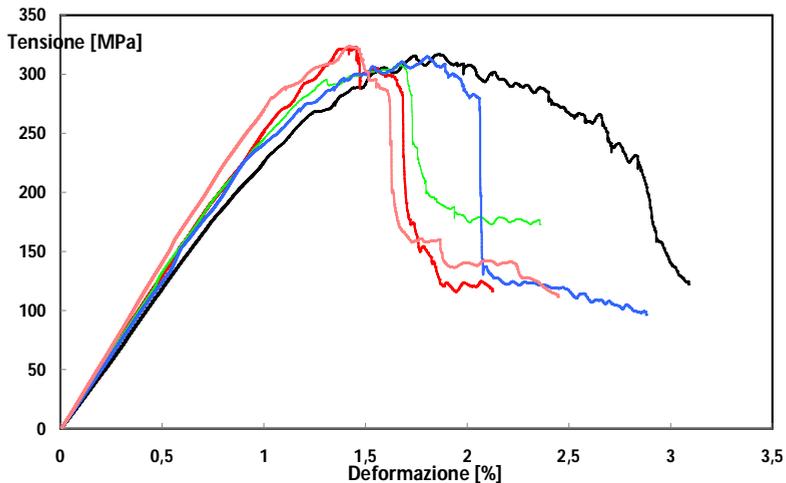


Figura 6.25 Grafico deformazione-tensione per i provini unidirezionali a  $T_1$

I risultati per il lotto costituito da n. 5 provini di laminato composito ibrido, sigla B, sono riportati in Tabella 6.8 e nel grafico in Fig. 6.26.

Tabella 6.8 Valori dei parametri meccanici per i provini ibridi B

Ibrido B	P [N]	$\sigma$ [MPa]	Deformazione [%]	Deformazione [mm]	E [GPa]
1	67,5	113,0	3,70	23,28	5,25
2	118,9	103,0	3,20	14,62	4,42
3	82,6	117,7	3,76	21,87	5,25
4	65,8	96,4	3,30	19,43	4,23
5	65,8	87,6	4,21	23,63	3,74
<b>media</b>	<b>80,1</b>	<b>103,5</b>	<b>3,63</b>	<b>20,57</b>	<b>4,58</b>
dev. St.	22,8	12,2	0,40	3,71	0,66

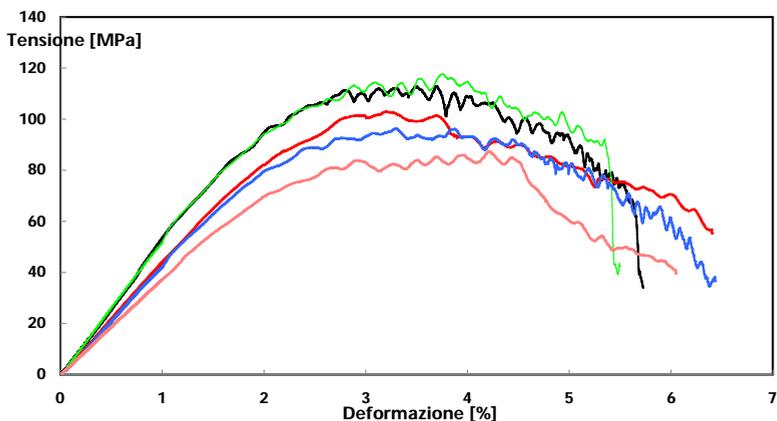


Figura 6.26 Grafico deformazione-tensione per i provini ibridi a  $T_1$

Rispetto ai due lotti di provini A, soggetti a test a flessione su tre punti a  $T_0$ , quindi non ancora invecchiati artificialmente, è emerso che il lotto dei provini invecchiati a  $T_1$  è caratterizzato da una resistenza a rottura media maggiore di quella del lotto dei provini vergine a  $T_0$ . In particolare si è riscontrato un incremento del valore medio della tensione a rottura del 33% per gli unidirezionali, passando da 238,5 MPa a 317,4 MPa, e dell'11% per gli ibridi, passando da 92,8 MPa a 103,5 MPa. Anche il modulo elastico ha subito un incremento dell'8,2% per gli unidirezionali e del 4,4% per gli ibridi.

*Test a  $T_2$*

I risultati del test per il lotto costituito da n. 5 provini di laminato composito unidirezionale, sigla C, sono riportati in Tabella 6.9 e nel grafico in Fig. 6.27.

Tabella 6.9 Valori dei parametri meccanici per i provini unidirezionali C

UD C	P [N]	$\sigma$ [MPa]	Deformazione [%]	Deformazione [mm]	E [GPa]
1	79,3	248,3	1,63	25,50	21,36
2	75,7	235,0	1,56	24,52	21,04
3	80,9	274,7	1,77	28,83	23,51
4	98,8	327,0	1,63	26,46	27,00
5	82,5	279,8	1,69	27,73	24,15
<b>media</b>	<b>83,4</b>	<b>273,0</b>	<b>1,70</b>	<b>26,60</b>	<b>23,40</b>
dev. St.	8,90	35,4	0,10	1,70	2,40

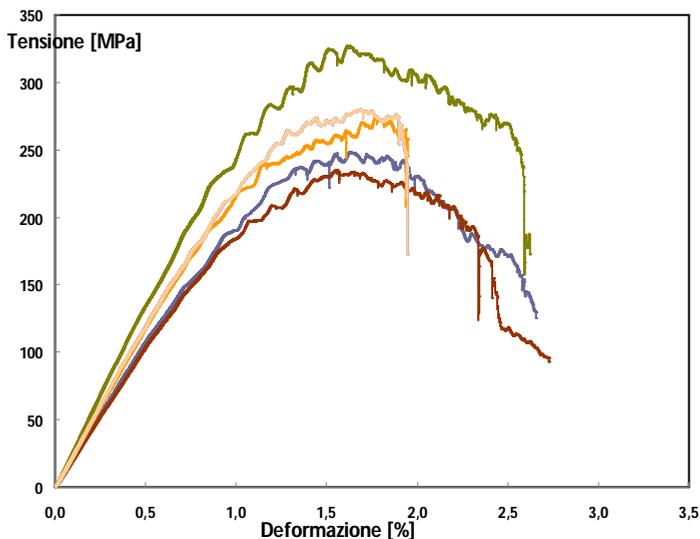


Figura 6.27 Grafico deformatore-tensione per i provini unidirezionali a  $T_2$

I risultati per il lotto costituito da n. 5 provini di laminato composito ibrido, sigla C, sono riportati in Tabella 6.10 e nel grafico in Fig. 6.28.

Tabella 6.10 Valori dei parametri meccanici per i provini ibridi C

Ibrido C	P [N]	$\sigma$ [MPa]	Deformazione [%]	Deformazione [mm]	E [GPa]
1	29,7	59,8	2,00	25,33	4,07
2	30,1	60,8	2,70	34,58	3,92
3	35,0	73,3	2,43	31,50	4,92
4	34,4	70,5	2,54	32,56	4,59
5	31,1	59,0	2,36	29,36	3,86
<b>media</b>	<b>32,1</b>	<b>64,7</b>	<b>2,40</b>	<b>30,67</b>	<b>4,27</b>
dev. St.	2,5	6,7	0,26	3,52	0,46

Il 2° step di invecchiamento accelerato determina un decremento delle prestazioni sia per i laminati compositi unidirezionali che per i laminati compositi ibridi. In particolare si è riscontrato un decremento del valore medio della tensione a rottura del 16% per gli unidirezionali, passando da 317,4 MPa a 273,0 MPa, e del 38% per gli ibridi, passando da 103,5 MPa a 64,7 MPa. Anche il modulo elastico ha subito un decremento passando da 25,51 GPa al 1° step a 23,40 al 2° step, pari all'8,2% per gli unidirezionali e da 4,58 GPa a 4,27 GPa (-7%) per gli ibridi.

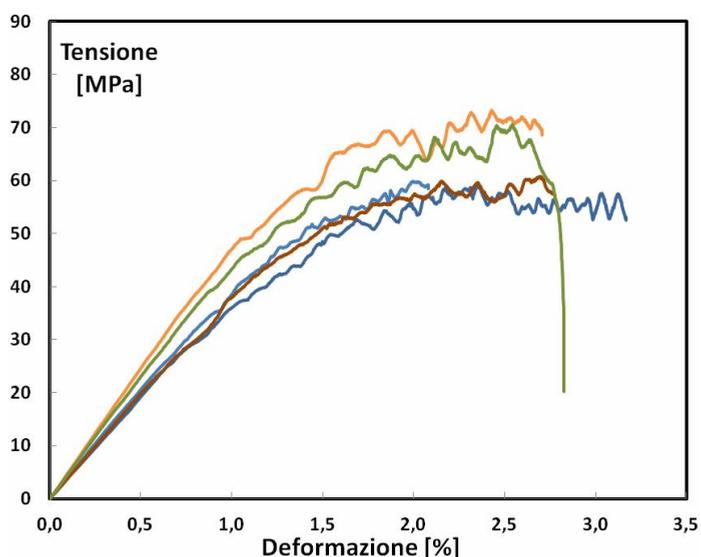


Figura 6.28 Grafico deformazione-tensione per i provini ibridi a  $T_2$

### Test a $T_3$

I risultati del test di flessione su tre punti per il lotto costituito da n. 5 provini di laminato composito unidirezionale, etichettati con la sigla D sono riportati in Tabella 6.11 e nel grafico in Fig. 6.29.

Tabella 6.11 Valori dei parametri meccanici per i provini unidirezionali D

UD D	P [N]	$\sigma$ [MPa]	Deformazione [%]	Deformazione [mm]	E [GPa]
1	87,6	160,1	2,14	26,12	10,11
2	83,2	173,8	2,19	26,70	11,99
3	66,6	130,7	1,47	18,69	10,95
4	67,1	131,1	1,59	20,04	10,28
5	68,1	137,0	1,48	18,98	11,44
<b>media</b>	<b>74,5</b>	<b>146,5</b>	<b>1,77</b>	<b>22,11</b>	<b>10,96</b>
dev. St.	10,1	19,4	0,36	3,97	0,79

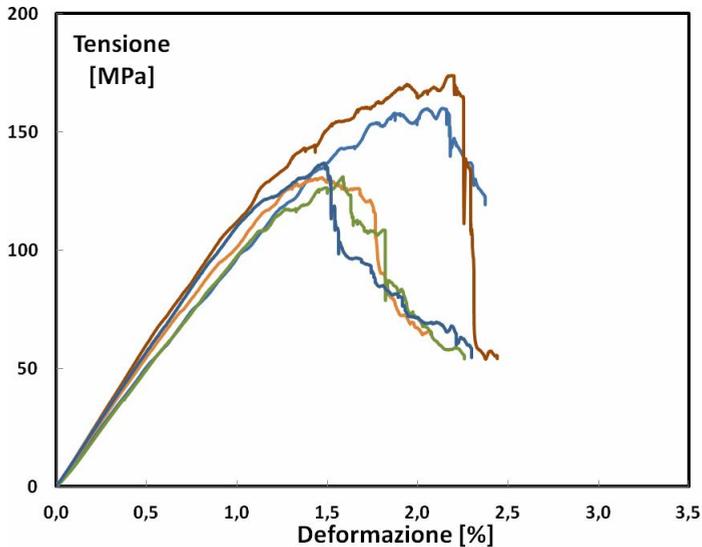


Figura 6.29 Grafico deformazione-tensione per i provini unidirezionali a T<sub>3</sub>

I risultati per il lotto costituito da n. 5 provini di laminato composito ibrido, sigla D, sono riportati in Tabella 6.12 e nel grafico in Fig. 6.30.

Tabella 6.12 Valori dei parametri meccanici per i provini ibridi D

Ibrido D	P [N]	$\sigma$ [MPa]	Deformazione [%]	Deformazione [mm]	E [GPa]
1	30,5	49,1	2,07	23,72	3,20
2	54,3	86,7	2,55	29,10	4,97
3	46,1	66,1	2,76	29,90	3,51
4	32,4	72,0	2,25	30,34	4,62
5	30,7	64,9	2,23	29,44	4,20
<b>media</b>	<b>38,8</b>	<b>67,8</b>	<b>2,37</b>	<b>28,50</b>	<b>4,10</b>
dev. St.	10,8	13,6	0,28	2,71	0,74

Il 3° step di invecchiamento accelerato determina un ulteriore significativo

decremento delle prestazioni per i laminati compositi unidirezionali, che non si verifica per gli ibridi. Il decremento del valore medio della tensione a rottura per gli unidirezionali è pari al 47%, passando da 273,0 MPa a 146,5 MPa; per gli ibridi, il valore passa da 64,7 MPa a 67,8 MPa. Anche il modulo elastico subisce un decremento del 56%, per gli unidirezionali passando da 23,40 GPa a 10,40 GPa; per gli ibridi si passa da 4,27 GPa a 4,10 GPa (-4%).

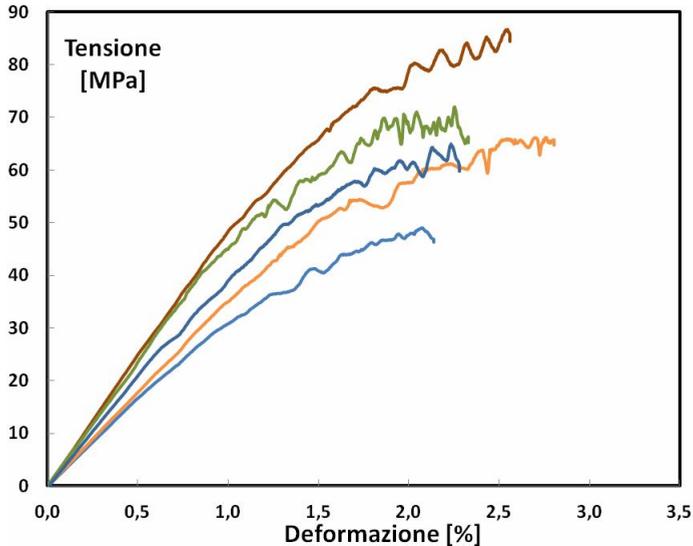


Figura 6.30 Grafico deformazione-tensione per i provini ibridi a T<sub>3</sub>

*Test sui provini esposti ad invecchiamento naturale per 1 anno*

I risultati dei test effettuati su un lotto di provini di laminato composito unidirezionale, sigla N, dopo l'esposizione agli agenti atmosferici del contesto ambientale di Palermo per un anno sono riportati in Tabella 6.13 e nel grafico in Fig. 6.31. I provini di laminato unidirezionale, soggetti all'esposizione in ambiente esterno, sono stati ottenuti per taglio, ortogonalmente e non parallelamente alle fibre, come per i provini sottoposti ad invecchiamento accelerato, pertanto presentano valori sensibilmente inferiori rispetto i provini esposti ad invecchiamento accelerato.

Tabella 6.13 Valori dei parametri meccanici per i provini unidirezionali N

UD N	P [N]	$\sigma$ [MPa]	Deformazione [%]	Deformazione [mm]	E [GPa]
1	6,5	21,2	1,28	20,78	3,87
2	7,0	23,5	1,63	26,75	3,21
3	7,2	25,1	1,59	26,51	3,21
4	8,6	29,3	1,71	28,28	3,21
5	7,2	20,3	1,81	26,94	2,10
<b>media</b>	<b>7,3</b>	<b>23,9</b>	<b>1,60</b>	<b>25,85</b>	<b>3,12</b>
dev. St.	0,8	3,6	0,20	2,92	0,64

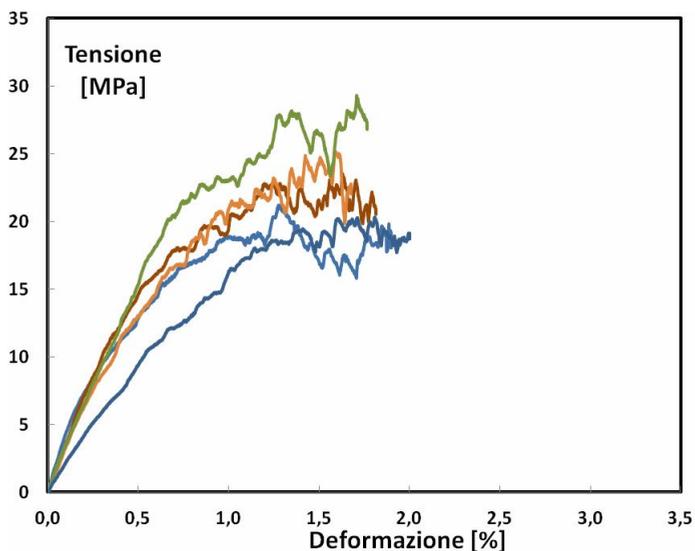


Figura 6.31 Grafico deformazione-tensione per i provini unidirezionali N invecchiati naturalmente per un anno

I risultati dei test effettuati su un lotto di provini di laminato composito ibrido, etichettati con la sigla N, dopo l'esposizione agli agenti atmosferici del contesto ambientale di Palermo per un anno sono riportati in Tabella 6.14 e nel grafico in Fig. 6.32.

Tabella 6.14 Valori dei parametri meccanici per i provini ibridi N

Ibrido N	P [N]	$\sigma$ [MPa]	Deformazione [%]	Deformazione [mm]	E [GPa]
1	43,9	73,6	2,60	30,09	4,16
2	31,1	72,3	1,95	26,57	4,78
3	40,1	77,4	2,42	30,06	4,68
4	43,0	88,9	2,14	27,55	5,48
<b>media</b>	<b>39,5</b>	<b>78,0</b>	<b>2,27</b>	<b>28,57</b>	<b>4,78</b>
dev. St.	5,8	7,5	0,29	1,78	0,54

I risultati, vista la natura dei provini unidirezionali, ottenuti per taglio ortogonale alle fibre e non parallelo alle fibre stesse, mostrano migliori prestazioni in termini di parametri meccanici per i provini ibridi, con valore medio della tensione a rottura pari a 78,0 MPa contro i 23,9 MPa dei provini unidirezionali. La deformazione a rottura è maggiore per i provini ibridi, pari a 28,57 mm contro 25,85 mm degli unidirezionali. Il valore medio del modulo elastico per i provini unidirezionali è pari a 3,12 GPa contro 4,78 GPa per i provini ibridi.

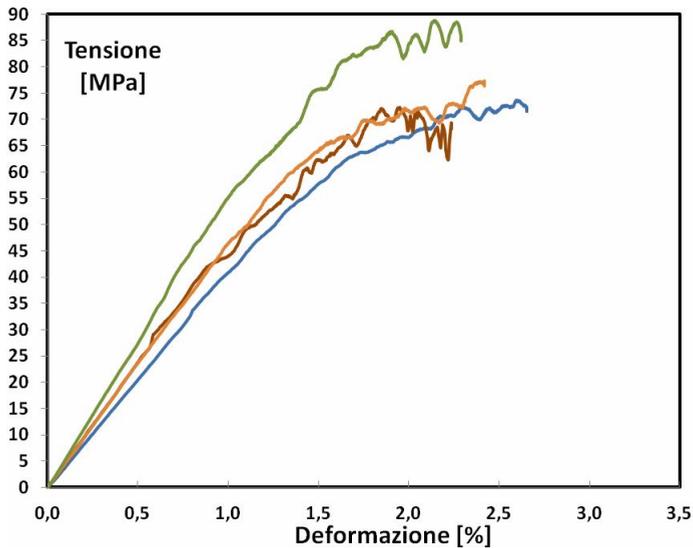


Figura 6.32 Grafico deformazione-tensione per i provini ibridi N invecchiati naturalmente per un anno

*Risultati a confronto per i laminati compositi*

Dal confronto dei risultati dei valori medi dei parametri meccanici per i provini di laminato composito unidirezionale soggetti a tre step di invecchiamento accelerato e ad un anno di esposizione al contesto climatico esterno, i cui dati sono riassunti in Tabella 6.15, si è riscontrato un iniziale incremento delle prestazioni meccaniche al termine del primo step di invecchiamento accelerato. Dopo il 2° step, le prestazioni meccaniche sono risultate pressoché pari alle prestazioni dei provini non invecchiati, mentre al 3° step si sono ottenuti valori inferiori rispetto al valore iniziale, pari al 39% per la tensione a rottura e del 54% per il modulo elastico.

Tabella 6.15. Riepilogo valori medi dei parametri meccanici per i provini unidirezionali

UD	P [N]	$\sigma$ [MPa]	Deformazione [%]	Deformazione [mm]	E [GPa]
A a T <sub>0</sub>	86,9	238,5	1,28	15,44	23,6
B a T <sub>1</sub>	107,9	317,4	1,64	19,18	25,5
C a T <sub>2</sub>	83,4	273,0	1,70	26,60	23,4
D a T <sub>3</sub>	74,5	146,5	1,80	22,11	11,0
N dopo 1 anno*	7,3	23,9	1,60	25,85	3,12
*provini ottenuti dal taglio ortogonale alle fibre unidirezionali					

Il grafico in Fig. 6.33 mostra gli involucri delle curve deformazione-tensione per ciascuna serie di provini unidirezionali invecchiati artificialmente, dal lotto A a T<sub>0</sub> al lotto D al 3° step di invecchiamento accelerato.

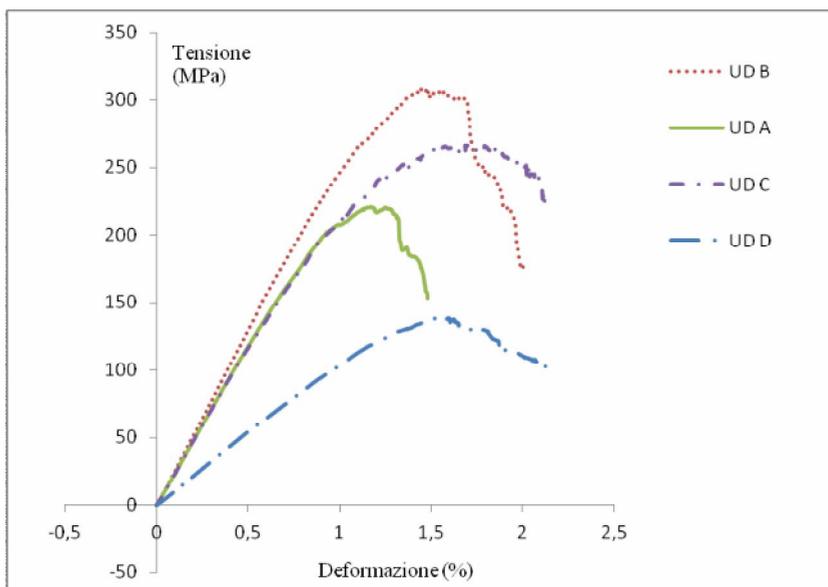


Figura 6.33 Grafico deformazione-tensione per i provini unidirezionali a  $T_0$  ed ai diversi step di invecchiamento artificiale

Per i provini ibridi, dal confronto dei risultati dei valori medi dei parametri meccanici soggetti a tre step di invecchiamento accelerato e ad un anno di esposizione al contesto climatico esterno, sono stati ottenuti i dati riassunti in Tabella 6.16.

Tabella 6.16. Riepilogo valori medi dei parametri meccanici per i provini ibridi

Ibridi	P [N]	$\sigma$ [MPa]	Deformazione [%]	Deformazione [mm]	E [GPa]
A a $T_0$	70,6	92,7	3,36	20,50	4,30
B a $T_1$	80,1	103,5	3,63	20,57	4,58
C a $T_2$	32,1	64,7	2,40	30,67	4,30
D a $T_3$	38,8	67,8	2,40	28,50	4,10
N dopo 1 anno	39,5	78,0	2,27	28,57	4,78

Anche per i provini ibridi si è verificato un iniziale incremento delle prestazioni meccaniche al termine del primo step di invecchiamento accelerato, rispetto ai provini non invecchiati. Dopo il 2° step, le prestazioni meccaniche hanno subito un decremento fin oltre i valori misurati sui campioni non trattati. Al 3° step si sono ottenuti valori pressoché invariati rispetto al 2° step. I valori ottenuti dal test condotto sui provini esposti ad un anno di invecchiamento accelerato, mostrano valori che si collocano tra il 1° ed il 2° step di invecchiamento accelerato, per cui è possibile affermare per i provini ibridi che i sei step di invecchiamento accelerato equivalgono a circa 4 anni di invecchiamento naturale. Pertanto da un primo tentativo di rescaling temporale è possibile affermare che:

- Laminato composito ibrido → 1008 ore di invecchiamento accelerato (1,5 step) = 12 mesi di invecchiamento naturale (4 anni / 6 step).

Il grafico in Fig. 6.34 mostra gli involuppi delle curve deformazione- tensione per ciascuna serie di provini ibridi invecchiati artificialmente, dal lotto A a  $T_0$  al lotto D al 3° step di invecchiamento accelerato.

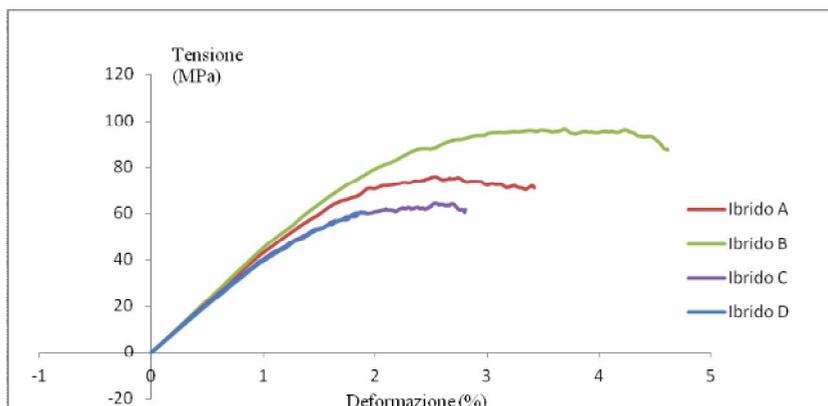


Figura 6.34 Grafico deformazione-tensione per i provini ibridi a  $T_0$  ed ai diversi step di invecchiamento artificiale

Il decadimento nel tempo delle caratteristiche prestazionali dei laminati compositi unidirezionali ed il sostanziale mantenimento delle prestazioni dei laminati ibridi fa ipotizzare che il degrado del composito sia causato dall'azione che esercita l'ambiente sull'interfaccia fibra/matrice e non in un eventuale degrado della resina o della fibra. Il fatto che tale degrado interfacciale si mostri quasi esclusivamente sui laminati unidirezionale può dipendere dal fatto che i tessuti random dei laminati ibridi proteggano la parte più interna del composito per una maggiore adesione. In termini di durabilità, i laminati ibridi risultano più prestanti in quanto, anche se presentano delle caratteristiche meccaniche iniziali minori rispetto agli unidirezionali, conservano comunque questi parametri in maniera pressoché invariata.

#### *I provini di resina epossidica*

I provini di resina epossidica, a  $T_0$  e per i lotti di provini prelevati per ciascuno step di invecchiamento accelerato, sono stati oggetto di test a trazione a rottura secondo la metodologia descritta dalla norma ASTM D638 (§ 6.5) mediante dinamometro Zwick Roell Z005 (Fig. 6.35).



Figura 6.35 Un provino di resina (1) prima e (2) dopo la fine del test di trazione

*Test a  $T_0$*

I risultati del test di trazione a rottura per il lotto costituito da n. 4 provini di resina epossidica, sigla A, sono riportati in Tabella 6.17 e nel grafico in Fig. 6.36.

Tabella 6.17 Valori dei parametri meccanici per i provini di resina A

Resina A	P [N]	$\sigma$ [MPa]	Deformazione [%]	Deformazione [mm]	E [GPa]
1	1809,9	50,9	3,02	1,97	1,90
2	2016,2	58,2	4,44	2,88	1,94
3	1440,6	43,6	2,81	1,83	1,90
4	1792,3	53,0	2,79	1,81	2,31
<b>media</b>	<b>1764,7</b>	<b>51,4</b>	<b>3,26</b>	<b>2,12</b>	<b>2,01</b>
dev. St.	238,8	6,1	0,79	0,51	0,20

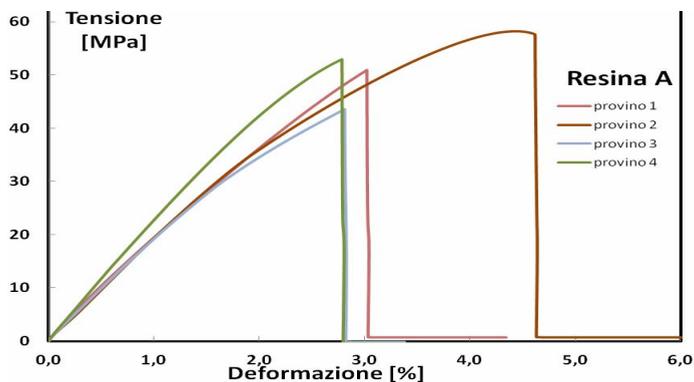


Figura 6.36 Grafico deformazione-tensione per i provini di resina a  $T_0$

### Test a $T_1$

I risultati del test per il lotto costituito da n. 5 provini di resina epossidica, etichettati con la sigla B sono riportati in Tabella 6.18 e nel grafico in Fig. 6.37.

Tabella 6.18 Valori dei parametri meccanici per i provini di resina B

Resina B	P [N]	$\sigma$ [MPa]	Deformazione [%]	Deformazione [mm]	E [GPa]
1	786,8	24,4	1,09	0,71	2,19
2	749,1	22,7	1,12	0,73	1,97
3	832,3	19,5	1,22	0,79	1,58
4	1042,2	26,6	1,31	0,85	2,09
5	962,2	30,0	1,30	0,84	2,37
<b>media</b>	<b>874,5</b>	<b>24,6</b>	<b>1,21</b>	<b>0,78</b>	<b>2,04</b>
dev. St.	123,5	4,0	0,10	0,06	0,29

Rispetto al lotto di provini A, non ancora invecchiati artificialmente, soggetti a test a trazione a rottura, è emerso che il lotto dei provini invecchiati a  $T_1$  è caratterizzato da una resistenza a rottura media inferiore di quella del lotto dei provini vergine a  $T_0$ . In particolare si è riscontrato un decremento del valore medio della tensione a rottura del 53%, passando da 51,4 MPa a 24,6 MPa. Il modulo elastico rimane invariato intorno al valore di 2 GPa.

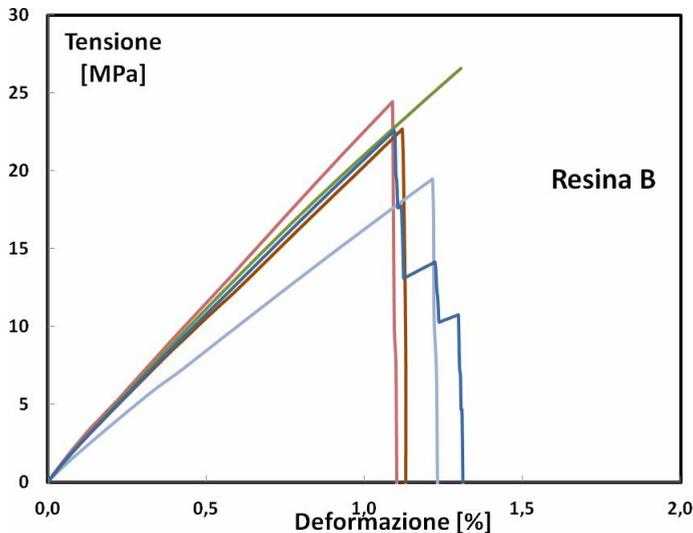


Figura 6.37 Grafico deformazione-tensione per i provini di resina a  $T_1$

### Test a $T_2$

I risultati del test per il lotto costituito da n. 5 provini di resina epossidica, etichettati con la sigla C sono riportati in Tabella 6.19 e nel grafico in Fig. 6.38.

Tabella 6.19 Valori dei parametri meccanici per i provini di resina C

Resina C	P [N]	$\sigma$ [MPa]	Deformazione [%]	Deformazione [mm]	E [GPa]
1	1376,5	37,1	2,22	1,44	2,02
2	1736,6	51,7	2,84	1,85	2,21
3	730,7	21,8	0,90	0,59	2,57
4	535,3	23,5	0,96	0,63	2,52
5	872,3	33,5	1,20	0,78	2,90
<b>media</b>	<b>1050,3</b>	<b>33,5</b>	<b>1,63</b>	<b>1,06</b>	<b>2,44</b>
dev. St.	494,1	12,0	0,86	0,56	0,34

Il 2° step di invecchiamento accelerato determina un incremento delle prestazioni dei provini di resina. In particolare si è riscontrato un incremento del valore medio della tensione a rottura del 36%, passando da 24,6 MPa a 33,5 MPa. Anche il modulo elastico ha subito un incremento passando da 2,04 GPa al 1° step a 2,44 al 2° step, pari al 20%.

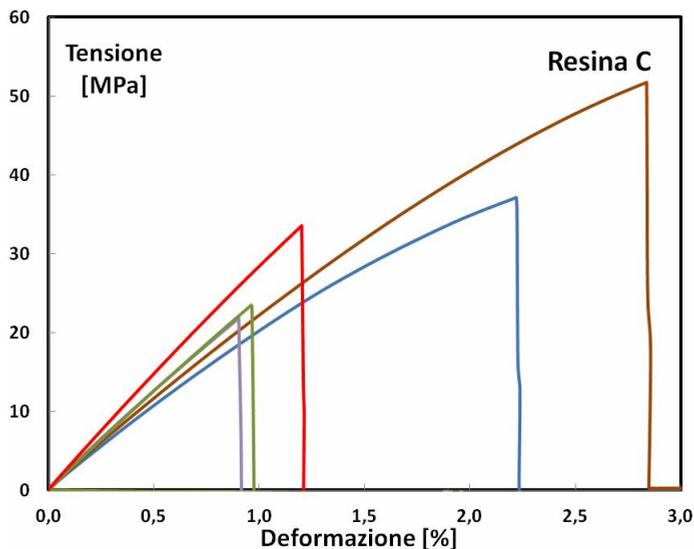


Figura 6.38 Grafico deformazione-tensione per i provini di resina a T<sub>2</sub>

### Test a T<sub>3</sub>

I risultati del test per il lotto costituito da n. 5 provini di resina epossidica, etichettati con la sigla D sono riportati in Tabella 6.20 e nel grafico in Fig. 6.39.

Tabella 6.20 Valori dei parametri meccanici per i provini di resina D

Resina D	P [N]	$\sigma$ [MPa]	Deformazione [%]	Deformazione [mm]	E [GPa]
1	667,7	22,0	1,12	0,73	2,02
2	511,5	20,2	0,84	0,55	2,48
3	617,9	21,0	0,88	0,57	2,50
4	706,3	25,1	0,93	0,61	2,80
5	817,1	23,0	1,02	0,66	2,33
<b>media</b>	<b>664,1</b>	<b>22,3</b>	<b>0,96</b>	<b>0,62</b>	<b>2,43</b>
dev. St.	112,5	1,9	0,11	0,07	0,28

Il 3° step di invecchiamento accelerato determina un decremento delle prestazioni. Il decremento del valore medio della tensione a rottura è pari al 34%, passando da 33,5 MPa a 22,3 MPa. Il modulo elastico si mantiene invariato intorno al valore di 2,43 GPa.

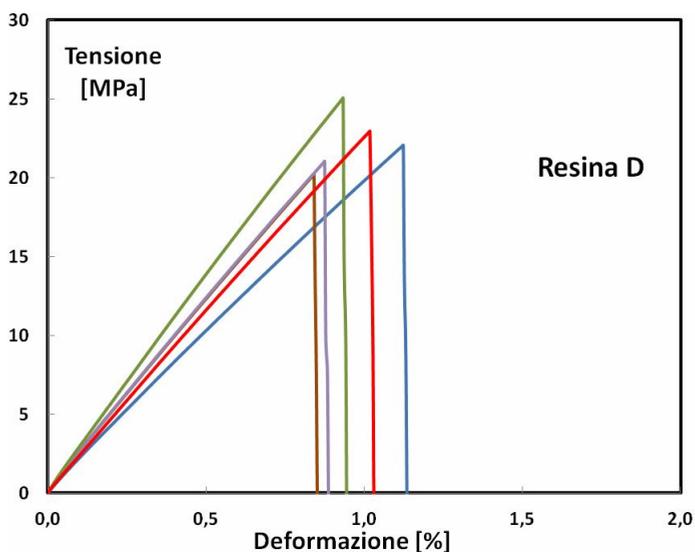


Figura 6.39 Grafico deformazione-tensione per i provini di resina a T<sub>3</sub>

*Test sui provini esposti ad invecchiamento naturale per 1 anno*

I risultati dei test effettuati su un lotto di provini di resina, etichettati con la sigla N, dopo l'esposizione agli agenti atmosferici del contesto ambientale di Palermo per un anno sono riportati in Tabella 6.21 e nel grafico in Fig. 6.40.

Tabella 6.21 Valori dei parametri meccanici per i provini di resina N

Resina N	P [N]	$\sigma$ [MPa]	Deformazione [%]	Deformazione [mm]	E [GPa]
1	569,0	20,6	0,70	0,46	3,02
2	307,9	9,5	0,00	0,00	2,89
3	569,0	14,4	0,70	0,46	2,09
4	307,9	7,2	0,35	0,23	2,06
5	666,0	22,9	1,14	0,74	2,20
<b>media</b>	<b>483,9</b>	<b>14,9</b>	<b>0,58</b>	<b>0,38</b>	<b>2,45</b>
dev. St.	165,5	6,8	0,43	0,28	0,46

Rispetto al lotto di provini vergine A, è emerso che il lotto dei provini invecchiati per un anno in condizioni esterne è caratterizzato da una resistenza a rottura media inferiore di quella del lotto dei provini vergine a  $T_0$ . In particolare si è riscontrato un decremento del valore medio della tensione a rottura del 71%, passando da 51,4 MPa a 14,9 MPa. Il modulo elastico rimane invariato intorno a  $2 \div 2,5$  GPa.

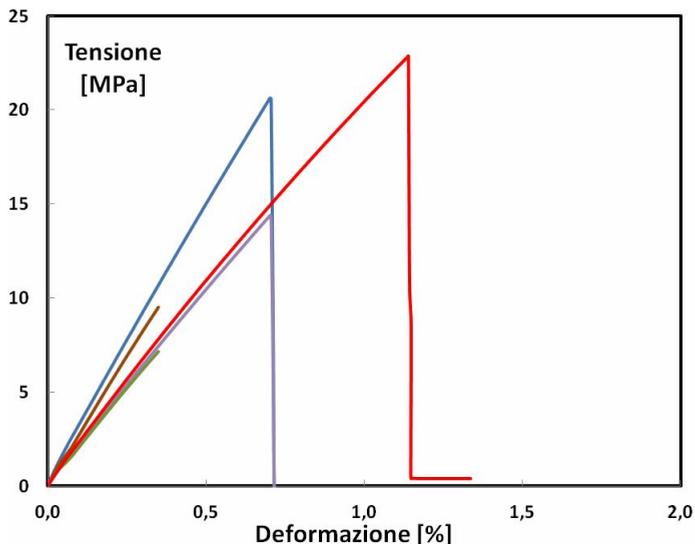


Figura 6.40 Grafico deformazione-tensione per i provini di resina N invecchiati naturalmente per un anno

#### *Risultati a confronto per la resina epossidica*

Dal confronto dei risultati dei valori medi dei parametri meccanici per i provini di resina epossidica soggetti a tre step di invecchiamento accelerato e ad un anno di esposizione al contesto climatico esterno, i cui dati sono riassunti in Tabella 6.22, si è riscontrato un decadimento delle prestazioni meccaniche progressivo e continuo. Al 2° step, si è riscontrato un leggero incremento delle prestazioni meccaniche ma che è proseguito al 3° step. Il modulo elastico ha subito, dopo il 1° step un incremento del 20% che ha mantenuto fino al 3° step di invecchiamento accelerato con un valore di 2 GPa.

Tabella 6.22. Riepilogo valori medi dei parametri meccanici per i provini di resina

Resina	P [N]	$\sigma$ [MPa]	Deformazione [%]	Deformazione [mm]	E [GPa]
A a T <sub>0</sub>	1764,7	51,4	3,3	2,1	2,0
B a T <sub>1</sub>	874,5	24,6	1,2	0,8	2,0
C a T <sub>2</sub>	1050,3	33,5	1,6	1,1	2,4
D a T <sub>3</sub>	664,1	22,3	1,0	0,6	2,4
N dopo 1 anno	483,9	14,9	0,6	0,4	2,4

I valori ottenuti dal test condotto sui provini esposti ad un anno di invecchiamento accelerato, mostrano valori che si collocano oltre il 3° step di invecchiamento accelerato, per cui occorre effettuare ulteriori step di invecchiamento accelerato per poter procedere ad un tentativo di rescaling temporale. Il grafico in Fig. 6.41 mostra gli involuppi delle curve deformazione- tensione per ciascuna serie di provini di resina invecchiati artificialmente, dal lotto A a T<sub>0</sub> al lotto D al 3° step di invecchiamento accelerato.

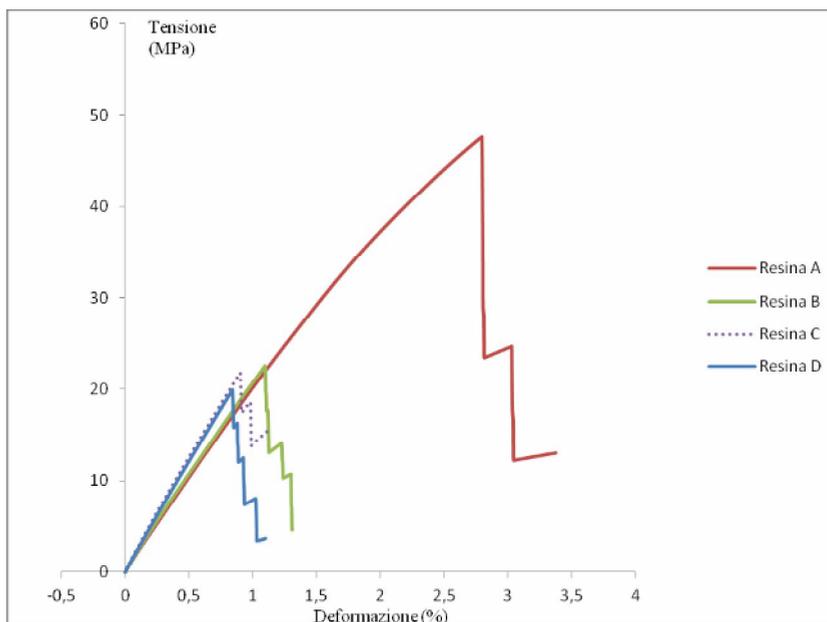


Figura 6.41 Grafico deformazione-tensione per i provini di resina a T<sub>0</sub> ed ai diversi step di invecchiamento artificiale

I test a trazione eseguiti sui campioni di resina mostrano un decremento della resistenza a rottura media e una variazione del modulo elastico non apprezzabile. Questi risultati hanno portato all'esclusione di una possibile reticolazione residua della resina dovuta all'esposizione alla radiazione ultravioletta come causa dell'incremento delle prestazioni meccaniche dei laminati. Dalla misurazione della perdita percentuale di massa, non sono state riscontrate variazioni significative

(0.53% per i laminati unidirezionali, 1.32% per i laminati ibridi, 0.23% per la resina). Questo risultato è stato verificato dal fatto che non sono avvenute modifiche di natura chimica all'interno del composito durante il processo di ageing e quindi non vi siano stati processi di post-reticolazione. Per ulteriore conferma è stata condotta un'analisi DSC (Differential Scanning Calorimetry) per identificare eventuali transizioni termiche. L'analisi è stata effettuata in atmosfera inerte (flusso di azoto con portata di 50 ml/min) in modalità dinamica, fra le temperature di 40°C e 140°C, imponendo una velocità di riscaldamento costante pari a 10°C/min. L'analisi è stata condotta per valutare il calore residuo di reticolazione del materiale. Il test ha dato risultati simili sia nel caso dei provini di resina a  $T_0$  e  $T_1$ , confermando quindi che il materiale non ha subito un avanzamento del processo di reticolazione. L'analisi ha evidenziato una reazione esotermica con picco intorno ai 70°C (Fig. 6.42).

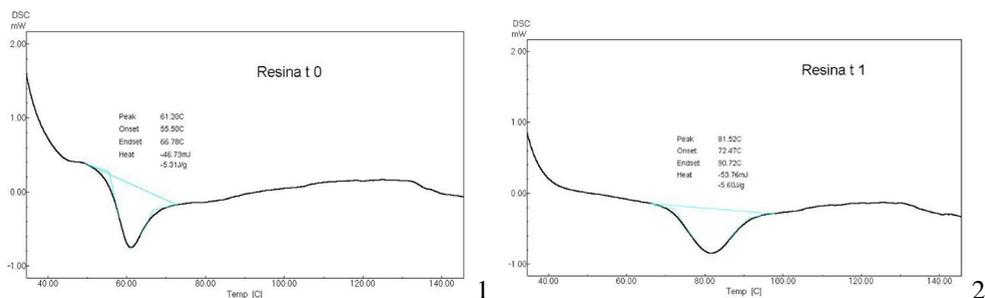


Fig. 6.42 (1) DSC del campione di resina a  $T_0$  e (2) a  $T_1$

## Bibliografia capitoli 4, 5 e 6

- [1] Alaimo G., Enea D., Nuccio E., *Innovative siloxane coating formulations: the experimental assessment of the durability of colour*, Advanced Materials Research, vol. 346, Trans Tech Publications, 2012, pagg. 63-68;
- [2] Alaimo G., Enea D., Guerrini G. L., Bottalico L., *Experimental evaluation of the durability of innovative cementitious coatings: photocatalytic activity and colour*, atti della Third International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering, SPIE Proceedings, vol. 8409, 2012, pubblicato anche online: SPIE Digital Library, doi: 10.1117/12.923436;
- [3] Alaimo G., *Valutazione sperimentale della durabilità di coperture discontinue. Un'applicazione al pannello sandwich*, Editecnica, Palermo, 2006;
- [4] Brown W.H., Foote C.S., *Chimica organica*, EDISES, Napoli, 2004
- [5] Cassar L., Beeldens A., Pimpinelli N. and Guerrini G.L., *Photocatalysis of cementitious materials*, in proceedings of RILEM Int. Symposium on Photocatalysis, Environment and Construction Materials, Firenze, 2007, RILEM PRO 55, pp.131-145
- [6] *Chemical Sampling Information: Benzene*, Occupational Safety and Health Administration, United States Department of Labor, 2003
- [7] Choi W., *Pure and modified TiO<sub>2</sub> photocatalysts and their environmental applications*, Catalysis Surveys from Asia, Vol. 10, N. 1, March 2006
- [8] Daniotti B., Re Cecconi F. (a cura di), *CIB W80 WG3 – Test Methods for Service Life Prediction – State of the Art Report on Accelerated Laboratory Test Procedures and Correlation between Laboratory Tests and Service Life Data*, CIB Publication 331, Rotterdam, Maggio 2010.
- [9] Di Ludovico M., Prota A., Manfredi G., *Concrete confinement using innovative materials: basalt reinforced mortar (BRM)*, in Challenges for Civil Construction – CCC2008, Porto, Portugal, 2008
- [10] Dunnill C.W.H., Aiken Zoie A., Pratten J., Wilson M., Morgan D.J., Parkin I.P., *Enhanced photocatalytic activity under visible light in N-doped TiO<sub>2</sub> thin films produced by APCVD preparations using t-butylamine as a nitrogen source and their potential for antibacterial films*, Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry, Vol. 207, Issue: 2-3, 2009, pp. 244-253;
- [11] Enea D., *Recent development on self-cleaning cementitious coatings*, in “Self-cleaning Materials and Surfaces: A Nanotechnology Approach”, a cura di Walid Daoud, School of Energy and Environment, City University of Hong Kong, John Wiley & Sons, 2013, pagg. 35-56;
- [12] Enea D., Alaimo G., Bottalico L., De Marco T., *Service life of cementitious photocatalytic paints newly formulated*, Advanced Materials Research, vol. 818, Trans Tech Publication, 2013, pagg. 98-103;
- [13] Enea D., Guerrini G.L., *Photocatalytic properties of cement-based plasters and paints containing mineral pigments*, Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2141, 2010, pp. 52-60
- [14] Fiore V., Di Bella G., Valenza A., *Glass-basalt/epoxy hybrid composites*

- for marine applications, *Materials and Design*, vol. 32, n. 4, pp. 2091-2099, 2011
- [15] Fujishima A., Honda K., *Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode*, *Nature* 238, 1972, pp. 37-38;
- [16] Harrison R.M., *Source of air pollution* in Air quality guidelines: Global update 2005, Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulphur dioxide, World Health Organization Europe, 2005
- [17] Hashimoto K., Irie H., Fujishima A., *TiO<sub>2</sub> Photocatalysis: A Historical Overview and Future Prospects*, AAPPS Bulletin, December 2007, Vol. 17, n. 6, pp. 12-28
- [18] Ibusuki T., Takeuchi K., *Removal of low concentration nitrogen oxides through photoassisted heterogeneous catalysis*, *Journal of Molecular Catalysis*, Vol. 88, Issue 1, February 1994, pp. 93-102
- [19] Justicia I., Garcia G., Vázquez L., Santiso J., Ordejón P., Battiston G., Gerbasi R., Figueras A., *Self-doped titanium oxide thin films for efficient visible light photocatalysis: An example: Nonylphenol photodegradation*, *Sensors & Actuators: B. Chemical*, Vol. 109, Issue: 1, 2005, pp. 52-56;
- [20] Linsebigler A.L., Lu G., Yates J.T., *Photocatalysis on TiO<sub>2</sub> Surfaces: Principles, Mechanisms, and Selected Results*, *Chemical Reviews*, Vol. 95, n. 3, 1995, pp. 735-758
- [21] Maggi P.N., Daniotti B., Alaimo G., Ciribini A., Morra L., Nicoletta M., Rodonò U., *La durabilità dei componenti edilizi*, Editecnica, Palermo, 2008
- [22] Martuscelli E., *La chimica macromolecolare applicata alla conservazione dei manufatti lapidei*, Paideia Editore, Firenze, 2008
- [23] Pugno N., *Effetto loto*, *Le scienze*, n. 537, maggio 2013, pagg. 58-63
- [24] Rothenberg G., *Catalysis: Concepts and green applications*, Wiley-VCH: Weinheim, 2008
- [25] Samet J.M., Brauer M., Schlesinger R., *Particulate matter* in Air quality guidelines: Global update 2005, Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulphur dioxide, World Health Organization Europe, 2005
- [26] Sarasini F., Tirillò J., Valente M., Valente T., Cioffi S., Iannace S. et Sorrentino L., *Effect of basalt fiber hybridization on the impact behavior under low impact velocity of glass/basalt woven fabric/epoxy resin composites*, *Composites Part A* 47, pagg. 109-123, 2013
- [27] Serra S., Saggio F., *Istruzioni pratiche e aggiornate sulle novità nel campo dei siliconi*, su [www.tsfgomma.com](http://www.tsfgomma.com), aprile 2007
- [28] Silveyra R., De La Torre Sáenz L., Flores Wilber A., Martínez V. Collins, Elguézabal Aguilar A., *Doping of TiO<sub>2</sub> with nitrogen to modify the interval of photocatalytic activation towards visible radiation*, *Catalysis Today*, Vol. 107-108, 2005, pp. 602-605;
- [29] Sim J., Park C., Moon D., *Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures*, *Composite Part B: Engineering*, vol. 36, pagg. 504-512, 2005

- [30] Thorhallsson E.R., Konráðsson A., Kubens S., *Strengthening of concrete columns by wrapping basalt fiber matrix*. Nordic Concrete Research Symposium 2011
- [31] Title 40, Code of Federal Regulation: Appendix A to Part 355, *The List of Extremely Hazardous Substances and Their Threshold Planning Quantities*, 2008, U.S. Government Printing Office
- [32] Vad J., Pölöskei K., *Basalt fiber of polymer composites*. Period Polytech Mech Eng, vol. 49, pagg. 3-14, 2005
- [33] Van de Velde K., Kiekens P., Van Langenhove L., *Basalt fibres as reinforcement for composites*, Proceedings of 10<sup>th</sup> International Conference on Composites / Nano Engineering ICCE/10, 2003
- [34] Vargiu S., *Polimeri Termoindurenti* in *Macromolecole*, Scienza e Tecnologia, Pacini Editore, Pisa, 1983
- [35] Vecchiattini R., *Tra occhio e cervello: tinta, chiarezza e saturazione*, Progetto colore n. 2, Anno 40, marzo 2006, pp. 22-23
- [36] Villavecchia V., *Nuovo dizionario di merceologia e chimica applicata*, Volume 6, Hoepli Editore, Milano, 1976
- [37] Wei B., Cao, H.-L., Song S.-H., *Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers*, Mater Sci Eng A – Struct Mater Prop Microstruct Process, vol. 527, pagg. 4708–4715, 2010
- [38] West System Inc., *Vacuum Bagging Techniques*, Gougeon Brothers Inc., April, 2010





Avere cognizione sul requisito di durabilità, inteso come attitudine dell'elemento tecnico a mantenere nel tempo le prestazioni possedute al momento dell'entrata in esercizio e sulle sue modalità di decadimento nel tempo, significa avere elementi molto utili per controllare le risorse da impiegare in un equilibrato rapporto tra costi e prestazioni attese e quindi contribuire alla sostenibilità del processo edilizio. L'argomento risulta, infatti, di grande attualità a livello internazionale in ambito CIB e ISO. La durabilità, requisito fondamentale per il perseguimento della qualità edilizia, può essere studiata attraverso i suoi parametri principali: affidabilità e tempo di durata. La durata viene indagata attraverso prove sperimentali su campioni di elementi tecnici o suoi componenti esposti in esterno agli agenti naturali e in laboratorio ad invecchiamento accelerato (ISO 15686 e UNI 11156). La presente pubblicazione contiene i risultati di alcuni studi sperimentali sul comportamento nel tempo di alcuni prodotti innovativi di finitura dell'involucro edilizio, con particolare riferimento ai requisiti di efficienza energetica e sostenibilità, finalizzando lo studio alla valutazione della loro durata di vita utile di riferimento (RSL). Si tratta in particolare di pitture ed intonaci a base cementizia con proprietà fotocatalitiche; intonaci silossanici di nuova formulazione; laminati compositi in fibre di basalto. Materiali per i quali risulta ancora poco noto il comportamento nel tempo.

**Giuseppe Alaimo** è professore associato di "Produzione Edilizia" presso il Dipartimento di Architettura dell'Università di Palermo, dove insegna Organizzazione del Cantiere. Attualmente svolge attività di ricerca prevalentemente nel campo della valutazione e controllo della qualità tecnologica ed in particolare della valutazione sperimentale della durabilità di materiali e componenti edilizi anche innovativi, si occupa anche di temi riguardanti la gestione del processo costruttivo la gestione del ciclo di vita utile degli edifici.

**Daniele Enea**, ingegnere, dottore di ricerca in "Ingegneria Edile: Progetto e Recupero", svolge attività di ricerca nel campo della valutazione della durabilità di materiali innovativi presso il Dipartimento di Architettura dell'Università di Palermo. E' stato professore a contratto presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Palermo, dove ha insegnato Sicurezza in Edilizia e Normativa per l'edilizia + Sicurezza in Edilizia. E' cultore di materie dei settori di Architettura Tecnica e Produzione Edilizia.



€ 34,00

SAGGI

ARCHITETTURA  
INGEGNERIA  
SCIENZE