

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI

FEDERICO II



SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE

Dipartimento Di Ingegneria Civile, Edile Ed Ambientale

CORSO DI DOTTORATO IN INGEGNERIA DEI SISTEMI
CIVILI

XXXIV° ciclo

VALUTAZIONI DI DURABILITA' DEGLI ETICS

Roberto Landolfi

Supervisore:
Prof. Ing. Maurizio Nicolella

Coordinatore del
programma di dottorato:
Prof. Ing. Andrea Papola

Anno accademico 2021/2022

Ringraziamenti

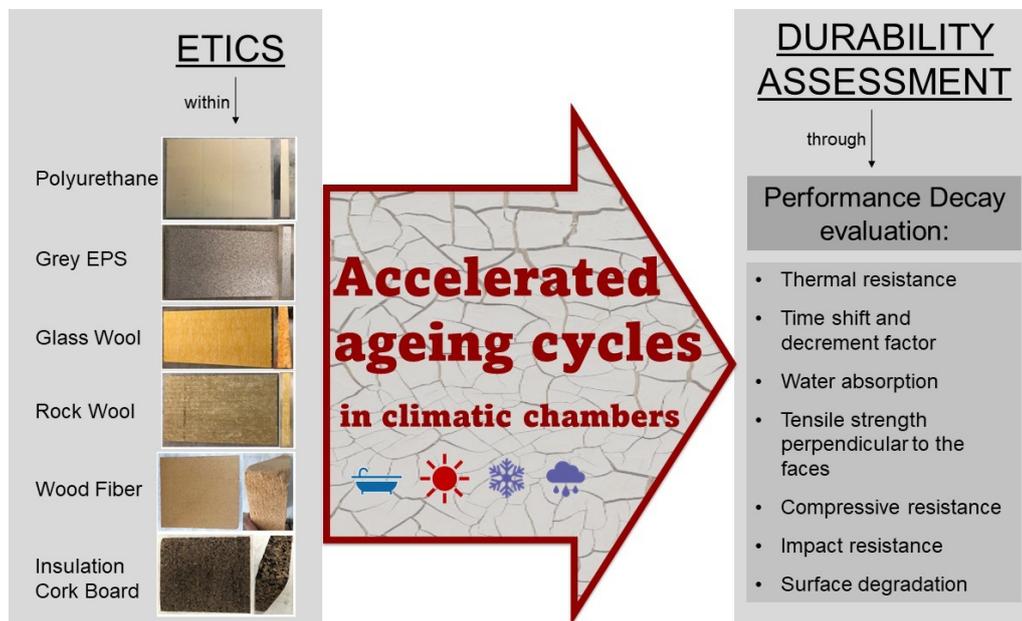
Desidero vivamente ringraziare il Professor Nicoella che si è stato per me molto più di un tutor/supervisore, bensì una guida in questo percorso non privo di difficoltà. Il suo supporto è stato fondamentale per i validi consigli, la disponibilità e la pazienza con la quale mi ha sostenuto e guidato aiutandomi a superare i vari ostacoli che via via si presentavano nel percorso di ricerca. Attraverso dialoghi e confronti costruttivi ha lasciato in me un bagaglio importante, sia culturale, sia professionale che porterò ovunque con me.

INDICE

<i>Abstract</i>	8
<i>Capitolo 1: Introduzione</i>	10
<i>Capitolo 2: Sistemi di isolamento termico</i>	12
2.1 <i>Premessa</i>	12
2.2 <i>Involucro verticale opaco</i>	18
2.3 <i>Tipologie di sistemi di isolamento termico</i>	19
2.4 <i>Benessere termico</i>	21
2.5 <i>La certificazione energetica</i>	23
<i>Capitolo 3: External Thermal Insulation Composite System (ETICS)</i>	27
3.1 <i>Definizione e posa in opera degli ETICS secondo la UNI/TR 11715</i>	28
3.2 <i>La metodologia di valutazione della durabilità dei componenti edilizi</i>	33
3.3 <i>Tipologie di degrado degli ETICS</i>	35
<i>Capitolo 4: Stato dell'arte sull'analisi del degrado degli ETICS</i>	38
4.1 <i>Reportage sugli studi condotti sull'analisi del degrado dei casi reali di ETICS</i>	38
4.2 <i>Reportage sugli studi condotti sull'analisi del degrado degli ETICS invecchiati artificialmente in laboratorio</i>	50
<i>Capitolo 5: L'EAD 040083-00-0404 per lo studio di durabilità degli ETICS</i>	64
5.1 <i>Procedure di rilascio dei prodotti da costruzione sul mercato Europeo secondo il CPR305/2011</i>	64
5.2 <i>Regolamento CPR305/2011 – Prodotti coperti da norme armonizzate</i>	65
5.3 <i>Valutazione tecnica Europea ETA – Prodotti non coperti da norme armonizzate</i> 67	
5.4 <i>Struttura dell'EAD 040083-00-0404</i>	68
5.5 <i>I cicli di invecchiamento accelerato previsti nell'EAD 040083-00-0404</i>	70
<i>Capitolo 6: Metodologia di laboratorio</i>	72
6.1 <i>Approccio sperimentale</i>	72
6.2 <i>Confronto invecchiamento accelerato e invecchiamento naturale</i>	75
6.3 <i>Confezionamento materiali</i>	79
6.3.1 <i>Poliuretano espanso rigido</i>	81
6.3.2 <i>EPS grigio</i>	86
6.3.3 <i>Lana di roccia</i>	89
6.3.4 <i>Lana di vetro</i>	92

6.3.5	<i>Sughero</i>	94
6.3.6	<i>Fibra di legno</i>	97
6.4	<i>Preparazione dei provini</i>	100
6.5	<i>Procedure di invecchiamento accelerato eseguite in laboratorio</i>	107
6.6	<i>Prove di prestazione sui campioni</i>	111
6.6.1	<i>Degrado Superficiale</i>	111
6.6.2	<i>Resistenza termica</i>	115
6.6.3	<i>Fattore di attenuazione e sfasamento</i>	119
6.6.4	<i>Assorbimento d'acqua</i>	124
6.6.5	<i>Adesione – prova a trazione perpendicolare alle facce</i>	127
6.6.6	<i>Resistenza a compressione</i>	130
6.6.7	<i>Resistenza d'impatto</i>	132
6.6.8	<i>Reazione al fuoco</i>	134
Capitolo 7: Risultati e discussioni		135
7.1	<i>Valutazione del degrado superficiale</i>	135
7.2	<i>Valutazione della Resistenza Termica</i>	151
7.3	<i>Fattore di Attenuazione e Sfasamento</i>	156
7.4	<i>Assorbimento d'acqua</i>	160
7.5	<i>Valutazione della Resistenza a Trazione perpendicolare alle facce</i>	162
7.6	<i>Valutazione della Resistenza a compressione</i>	165
7.7	<i>Valutazione della Resistenza d'impatto</i>	168
7.8	<i>Reazione al fuoco</i>	171
Capitolo 8: Conclusioni e sviluppi futuri		173
Bibliografia		178
Riferimenti normativi		182

Abstract



Graphical abstract

Gli External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) costituiscono una tecnologia per l'isolamento termico degli edifici largamente utilizzata per i suoi benefici nel risparmio energetico e nel comfort abitativo. Un aspetto ancora poco approfondito riguarda la durabilità a lungo termine di questi sistemi per cui si è ipotizzata una ricerca sperimentale per studiare l'evoluzione del degrado di tali sistemi.

Questo studio, con la relativa sperimentazione, ha l'intento di verificare la durabilità del sistema cappotto attraverso una comparazione del degrado di alcuni (i più diffusi) materiali utilizzati per l'isolamento termico impiegati per gli ETICS (EPS grigio, Poliuretano, Lana di Roccia, Lana di Vetro, Sughero, Fibra di Legno) con lo scopo di prolungare la vita utile e garantire una prestazione al di sopra dei minimi di normativa.

Per questa sperimentazione sono stati realizzati campioni 60 cm x 55 cm di ETICS con i sei materiali isolanti elencati precedentemente, completi di rasatura armate e finitura come previsto nelle certificazioni di sistema e secondo la norma UNI 11715; a seguire sono stati eseguiti processi di invecchiamento artificiale, utilizzando cicli di invecchiamento accelerato in camera climatica e sono stati eseguiti test di performance pre e post invecchiamento. I metodi di indagine considerati valutano il degrado superficiale, la resistenza termica, il fattore di attenuazione e lo sfasamento, la resistenza a compressione, la resistenza a trazione perpendicolare alle facce (prova a strappo), l'assorbimento d'acqua e la resistenza all'urto (impatto).

Parallelamente alla sperimentazione di laboratorio, seguendo la norma ISO

15686, si è potuto comparare il degrado dei campioni invecchiati artificialmente nella camera climatica con quello di casi reali di ETICS ovvero le facciate di una serie di fabbricati trattati con un sistema a cappotto realizzati tra il 2010 ed il 2012 invecchiati naturalmente; si è determinato così un rapporto di proporzionalità con una ascissa temporale reale di esposizione naturale corrispondente a 9/10 anni.

La ricerca ha documentato che i campioni ETICS hanno subito variazioni insignificanti rispetto alle prestazioni valutate in seguito all'azione dell'invecchiamento accelerato; tali risultati suggeriscono che le prestazioni degli ETICS non sono soggette a variazioni significative durante la loro vita utile per i primi 9/10 anni analizzati.

Si può concludere che gli ETICS hanno un'elevata durata intrinseca e che l'eventuale degrado può essere causato principalmente da difetti applicativi in fase di posa in opera nella fase di cantiere oppure da eventi atmosferici e/o naturali di carattere eccezionale.

Capitolo 1: Introduzione

La Conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici del 2021 (COP26) evidenzia la crescente attenzione alle tematiche dell'inquinamento e del surriscaldamento del pianeta esprimendo un evidente interesse collettivo e sociale verso temi di rilevanza comune che hanno anche introdotto nel nostro lessico quotidiano termini come climate change e global warming.

In questo contesto si inserisce il tema dell'efficientamento e riqualificazione energetica degli edifici, dato che gli stessi costituiscono, insieme ai trasporti, la prima fonte di inquinamento antropogenico per CO₂.

Per combattere il fenomeno dell'inquinamento antropogenico, uno dei migliori strumenti di riqualificazione energetica degli edifici è l'isolamento termico a cappotto degli stessi, un sistema che consente di migliorare l'involucro dell'edificio limitandone le dispersioni termiche.

Il tema relativo all'isolamento può sembrare di semplice attuazione, ciascuno di noi può immaginare quali benefici possa apportare l'isolamento di un edificio; tuttavia la questione va affrontata apportando una visione globale di tutti i processi di accumulo e di scambio di calore ed altri fenomeni che vanno ben oltre il semplice processo di incollaggio di un sistema isolante su una superficie, questione che si complica ulteriormente se vogliamo mantenere costanti le caratteristiche del sistema isolante durante l'intero ciclo di vita.

Invero, negli ultimi anni, le continue evoluzioni tecnologiche e le immissioni sul mercato di nuovi materiali e prodotti, più o meno innovativi, sono state accompagnate da uno sviluppo altrettanto accelerato ed incontrollato di degrado di natura patologica. L'elevata dinamica innovativa tende ad influenzare l'evoluzione dei sistemi costruttivi tradizionali, creando spesso problemi connessi a nuove tipologie di guasto ed evoluzioni patologiche. Infatti, si tende sempre di più ad applicare le moderne tecnologie costruttive senza averle sperimentate in tempi e modalità sufficientemente adeguati.

In particolare nei sistemi di isolamento termico a cappotto i fattori di degrado come gli agenti atmosferici aumentano il grado di attenzione necessario per garantire una vita utile maggiore (durata del sistema). Tale attenzione andrà riposta sia nella fase di posa del sistema di isolamento termico a cappotto (limitando gli errori che emergono spesso in tale fase) sia nella fase di progettazione, rendendosi necessaria un'ulteriore sotto fase di scelta dei materiali isolanti con proprietà diverse.

Inoltre i sistemi di isolamento termico a cappotto rappresentano una tecnologia recente che ad oggi non è ancora stata oggetto di approfonditi studi relativamente alla durabilità del sistema; difatti, la letteratura scientifica non ha trovato una soluzione adeguata restituendo degli studi incompleti sul degrado dei sistemi durante l'intero arco di ciclo di vita utile e sul mantenimento costante delle proprietà tecniche dei sistemi.

A tal fine si rende necessario uno studio che approfondisca le principali performance nel tempo, analizzando sia le proprietà meccaniche sia di degrado superficiale nonché di prestazioni termiche, proprietà fondamentali per un

proficuo utilizzo dell'intero sistema.

Questo studio è focalizzato principalmente sulla tematica di sostenibilità ambientale che va oltre la riduzione dei consumi energetici necessari per un involucro edilizio e riguarda l'effettivo tempo di vita utile del sistema di isolamento termico a cappotto.

Infatti conoscere il comportamento e studiare le performance nel tempo dei principali sistemi di isolamento termico a cappotto associati al periodo di maggior durata all'interno dell'intero ciclo di vita, ossia la vita utile, consente di conoscere il reale impatto ambientale del sistema.

La tematica approfondita nell'ambito delle attività del Dottorato di Ricerca si inserisce con un chiaro punto di vista all'interno di questo scenario di riduzione dei consumi energetici e degli impatti ambientali, considerando i sistemi di isolamento termico a cappotto come uno degli strumenti per affrontare la lotta contro i cambiamenti climatici, a favore di un'edilizia più sostenibile ed efficiente energeticamente.

In particolare, in questa ricerca vengono messi a *confronto* sei sistemi composti di isolamento termico esterno (in cui l'unica variabile è l'isolante termico) attraverso procedure sperimentali capaci di invecchiare artificialmente il sistema per valutarne le diverse prestazioni nel tempo. A tale scopo si è reso necessario redigere una serie di protocolli di prova, riguardanti solo alcuni dei molteplici test proposti per la certificazione del cappotto termico, basati sulle linee guida dell'*EAD 040083-00-0404* (ex *ETAG 004*) e su altre normative vigenti. Pertanto l'obiettivo principale della sperimentazione è stato lo sviluppo di una metodologia di prova atta a valutare, tra le diverse alternative che offre il mercato, il sistema di isolamento termico che possa garantire le migliori performance nel tempo.

Capitolo 2: Sistemi di isolamento termico

2.1 Premessa

L'attuale contesto energetico ha mostrato chiaramente limiti e criticità, pertanto il raggiungimento dell'efficienza energetica costituisce l'argomento di maggiore interesse nelle politiche nazionali ed internazionali [1].

Il notevole aumento di costo di tutte le fonti di energia registrato negli ultimi anni, conseguente anche alla forte richiesta determinata a livello mondiale dagli elevati tassi di crescita dei Paesi in via di sviluppo, unitamente alla consapevolezza degli effetti negativi dell'aumento della concentrazione dei gas a effetto serra in atmosfera, hanno indotto, infatti, ad una crescente attenzione ai consumi energetici ed alla valorizzazione della riqualificazione ed efficientamento energetico di tutto il patrimonio edilizio.

Il settore degli edifici e delle costruzioni ha rappresentato, nel 2018 il 36% del consumo finale di energia e il 39% delle emissioni di anidride carbonica (CO₂) con le emissioni relative ai consumi dei servizi energetici degli edifici (provenienti dall'energia utilizzata per riscaldamento, raffrescamento, forza motrice ed illuminazione degli edifici) pari al 28%. Il rimanente 11% proviene da emissioni di carbonio associate ai materiali e ai processi di costruzione durante l'intero ciclo di vita dell'edificio [2].

Sul tema, il Global Status Report di quest'anno fornisce un aggiornamento sui dati di emissioni di CO₂ e sulla domanda di energia a livello globale dal 2017, insieme ad esempi di politiche, tecnologie ed investimenti che supportano gli stock di edifici a basse emissioni di carbonio.

Di seguito si riportano i principali trend di avanzamento delle tendenze globali del settore edilizio:

- le emissioni di gas inquinanti del settore edile globale sono aumentate del 2% dal 2017 al 2018, raggiungendo un livello record, mentre la domanda finale di energia è aumentata dell'1% dal 2017 e del 7% dal 2010.

Gli aumenti sono stati determinati dalle forti espansioni di superfici sfruttate e della crescita della popolazione, al contempo i miglioramenti di efficienza realizzati, non sono stati adeguati per superare la crescita della domanda.

- il 2021 è un anno chiave per i paesi che cercano di migliorare il loro contributo verso la sostenibilità ambientale a livello nazionale (NDC), con particolare attenzione all'approntamento di ulteriori azioni per affrontare il problema del consumo energetico e delle emissioni, del settore dell'edilizia e delle costruzioni. I paesi, infatti stanno innovando ed attuando misure per migliorare l'efficienza energetica e, di conseguenza, ridurre l'inquinamento determinato dal loro patrimonio edilizio. Tale processo viene attuato mediante la condivisione di misure efficaci a livello globale che ne amplificano l'impatto traducendosi nell'attuazione di strategie condivise in tal senso [3].

La visione di World GBC di decarbonizzare completamente il settore richiede l'eliminazione delle emissioni di carbonio sia operative che incorporate.

Il rapporto 'Bringing embodied carbon upfront' propone proprio questo obiettivo ambizioso unitamente alla ricerca di soluzioni per accelerare l'azione immediata dell'intera catena del settore edilizio. La visione è sostenuta da rappresentanti di imprese di costruzioni, istituzioni finanziarie, reti cittadine e di governo, così come dai rappresentanti dell'industria di cemento, acciaio e legno e molti altri. Ottenere drastici tagli a tutte le emissioni di carbonio nel prossimo decennio è fondamentale per cercare di mantenere l'aumento della temperatura globale ad una soglia che non superi 1,5°C.

In tale ottica, quindi, affrontare il problema dei macroscopici utilizzi del carbonio in anticipo è cruciale per combattere la crisi climatica, poiché si prevede che le nuove costruzioni raddoppino lo stock edilizio mondiale entro il 2060, provocando un aumento vertiginoso delle emissioni di carbonio in atto in questo momento. Pertanto, dalla disamina del rapporto sopracitato si evince che è richiesta – e resasi quanto mai necessaria- un'azione coordinata in tutto il settore per cambiare radicalmente il modo in cui gli edifici sono progettati, costruiti, utilizzati durante la vita utile ed eventualmente demoliti [4].

In Europa i numeri del settore edilizio e delle costruzioni non sono da meno ed addirittura, come evidenziato dalla Commissione Europea [5], il settore edilizio si qualifica come quello con i consumi energetici più grandi in Europa, responsabile infatti di circa il 40% del consumo energetico dell'UE e del 36% delle emissioni di gas ad effetto serra.

Attualmente, circa il 35 % degli edifici dell'UE ha più di 50 anni e quasi il 75 % del parco immobiliare è inefficiente dal punto di vista energetico; tuttavia, malgrado l'obsolescenza energetica del parco immobiliare europeo solo l'1% di questo viene ristrutturato ogni anno.

La ristrutturazione degli edifici esistenti può portare a notevoli risparmi energetici, in quanto potrebbe ridurre il consumo totale di energia dell'UE del 56% e ridurre le emissioni di CO₂ di circa il 50%.

In Europa quindi, già prima della diffusione del Covid 19, gli investimenti nell'efficienza energetica stimolavano l'economia, in particolare l'industria edile, che genera circa il 9 % del PIL europeo e rappresenta 18 milioni di posti di lavoro [6].

In Italia, in quella che può essere chiamata era post Covid, il Decreto Legge n.34 del 2020 (cd. decreto Rilancio), poi convertito con legge 77 del 2020, ha introdotto cospicui incentivi fiscali per l'efficientamento energetico degli edifici trainando fortemente l'economia italiana nell'ottica di rinnovamento.

Negli interventi di efficientamento energetico, incentivati in Europa ed in particolar modo negli ultimi anni in Italia, si inseriscono la sostituzione di impianti di riscaldamento obsoleti, l'inserimento di impianti derivanti da fonti di energia rinnovabile (impianto fotovoltaico, impianto solare termico e impianto geotermico), la sostituzione degli infissi e l'isolamento termico dell'involucro (di cui fa parte l'isolamento delle facciate con il sistema di

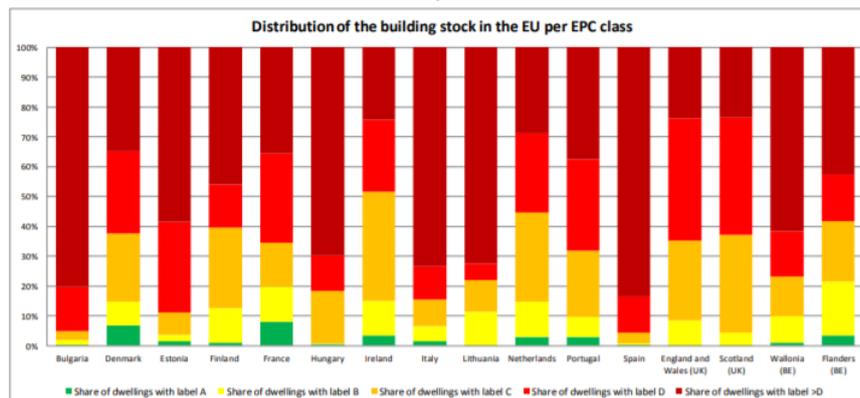
isolamento termico a cappotto).

Come infatti evidenziato dai rapporti della “Buildings performance institute Europe (BPIE)”, che si pongono come obiettivo il raggiungimento di un parco immobiliare “decarbonizzato” entro il 2050, la grande maggioranza degli edifici dell'Unione Europea dovrebbe essere altamente efficiente dal punto di vista energetico, con almeno un certificato di prestazione energetica di livello A (EPC - Energy Performance Certificate, altrimenti detto APE in Italia).

Ebbene il problema è di grande impatto e difficile risoluzione dal momento che dalle analisi condotte dalla BPIE dei dati EPC disponibili viene rilevato che meno del 3% del parco edilizio europeo è classificato in classe energetica A.

I dati EPC nazionali sono attualmente l'unica fonte di informazioni dettagliate sul rendimento energetico del parco immobiliare nell'UE. Un'analisi dei dati per 16 paesi, che copre il 66% (2/3) della superficie totale europea, mostra che oltre il 97% degli stock edilizi deve essere aggiornato per raggiungere l'obiettivo di decarbonizzazione entro il 2050. Secondo i dati dell'EPC, Francia e Danimarca detengono la quota maggiore di edifici ad alta efficienza energetica (rispettivamente 7% e 8%).

Figure 1 - Latest available EPC data retrieved from the EU Building Stock Observatory (BG, FR, ES, NL, IT, FI), national databases (DK, HU, PT, EN & WAL, IE, LT, , FL) and reports by the Concerted Action EPBD (EE, SL, WL). The sample covers half of EU Member States, with a minor bias toward Western European countries



Mentre alcun dato EPC completo è disponibile per la Germania, i dati DENA (Deutsche ENergy Agency) sulla prestazione energetica degli edifici in Germania riportano una storia simile con solo il 2% degli edifici aventi un'energia totale consumata in un anno per metro quadro di superficie inferiore a 50 kWh/m² (ovvero edifici molto efficienti).

Dato che gli edifici sono responsabili di circa il 40% dei consumi energetici e che il 75-90% di quelli attuali con altissima probabilità non sarà oggetto di ristrutturazione energetica entro il 2050, e considerato che il tasso di costruzione di nuovi edifici è complessivamente basso, il rinnovamento rapido e proficuo (in termini di risparmio energetico) è fondamentale per il raggiungimento dell'impegno dell'Europa nei confronti dell'accordo di Parigi. L'attuale discussione politica nel contesto del pacchetto sull'energia pulita offre un'opportunità unica per garantire l'impegno dell'Europa anche nella

Conferenza quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici del 2021, la COP 26 (Conference of the Parties).

La Direttiva europea sul rendimento energetico nell'edilizia (EPBD) fornisce piani chiari ed efficaci per la ristrutturazione del patrimonio edilizio, con l'individuazione di tappe puntuali e di un sistema di monitoraggio dei progressi. Gli Stati membri hanno così iniziato ad introdurre strumenti di sostegno che consentano ai cittadini di elaborare piani di ristrutturazione individuali e di garantire elevate prestazioni energetiche degli edifici con la ristrutturazione degli stessi agevolata da strumenti di finanziamento efficaci (ad es. incentivi fiscali) [5].

Di conseguenza le soluzioni sostenute con questi incentivi fiscali vedono il miglioramento della prestazione energetica degli edifici.

Fra le tipologie di interventi possibili per l'efficientamento energetico degli edifici vi sono: miglioramento degli impianti o il miglioramento dell'inerzia termica delle partizioni dell'involucro edilizio, in tale ultima ipotesi, il metodo più efficace per raggiungere lo sviluppo è l'isolamento termico a cappotto dell'edificio.

In Italia, ripercorrendo le tappe di un "problema energetico" mai risolto del tutto, si può comprendere in modo abbastanza chiaro la motivazione che ha portato a tali scelte.

Dopo la Seconda Guerra Mondiale, la necessità di operazioni di ricostruzione ha generato l'aumento del numero di alloggi, ed era praticamente ignorato il principio di isolamento termico delle abitazioni, in quanto in quel periodo l'energia era disponibile in grandi quantità e a costi ridotti e l'impatto delle attività dell'uomo sul clima e sull'ambiente non erano ancora state definite.

Nel 1973, con la prima crisi petrolifera si prese coscienza del fatto che il petrolio costituiva una risorsa limitata, e a seguito di un forte rialzo dei prezzi risultò chiara la necessità di effettuare dei risparmi riducendo il consumo di energia.

In tutti i paesi europei furono intraprese strategie per limitare i consumi energetici.

Per la prima volta fu incoraggiata ed agevolata la riqualificazione degli edifici esistenti, la promozione dell'utilizzo di doppi vetri all'interno delle nuove abitazioni ed iniziarono le prime operazioni di isolamento termico di tamponature e coperture. In Italia la prima normativa a carattere energetico fu la Legge 373/1976 che definì i valori massimi di dispersione termica, poi abrogata e sostituita dalla Legge 10/91. Nei trent'anni successivi alla emanazione della Legge n.373/1976, le prestazioni termiche delle costruzioni non sono molto progredite.

Con il recepimento della Direttiva europea n. 2002/91 *CE*, i Decreti Legislativi 192/2005 e 311/2006 e i loro decreti attuativi, mirano ad ottenere un miglioramento attraverso l'introduzione di limiti piuttosto restrittivi, sia per la nuova edificazione sia per alcuni tipi di intervento su edifici preesistenti [6]. Attualmente le abitazioni rappresentano il 31,5% del consumo di energia finale, al pari dei trasporti e maggiore dell'industria. Il 57% dell'energia consumata

all'interno degli edifici è destinata al riscaldamento.

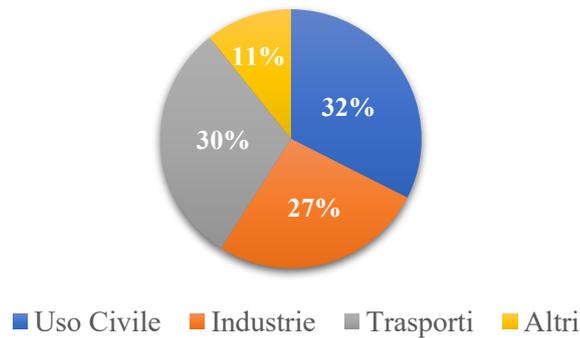


Figura 2 - Consumo di energia primaria in Italia, fonte: Convegno di progettazione integrata, Mosca, 29 settembre 2007

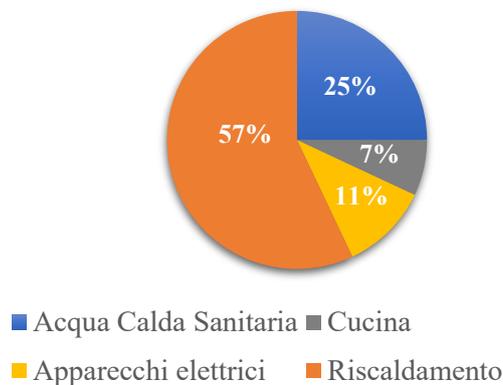


Figura 3 - Consumo dell'energia nell'ambiente abitativo, fonte La certificazione energetica dell'involucro edilizio, SE, 2010, pag. 21, fig.1.7b

Il potenziale applicativo delle norme sul risparmio energetico è dunque immenso, soprattutto per gli edifici preesistenti. Oltre alla riduzione dell'utilizzo di energie fossili e alla fluttuazione del loro prezzo, il problema del contenimento energetico è strettamente legato alla tutela dell'ambiente e ai cambiamenti climatici. Discussa negli anni Novanta, l'influenza delle attività umane sul clima rappresenta una realtà che nessuno può più negare infatti la comunità scientifica internazionale ne ha ufficialmente riconosciuto il problema nel 2007 con il rapporto dell'*IPCC WGI*. Si è constatato che, nonostante siano sempre riscontrati aumenti e diminuzioni della temperatura media della Terra nell'arco dei secoli, durante gli ultimi cinquant'anni si è verificato un aumento della temperatura anomalo rispetto all'andamento naturale. La necessità di ridurre le emissioni del principale gas a effetto serra, l'anidride carbonica CO_2 , e di preservare l'ambiente alza drammaticamente la posta in gioco in ambito energetico. In Italia, gli edifici costituiscono, insieme ai trasporti, la prima fonte di inquinamento antropogenico per CO_2 , corrispondente a un'emissione globale di circa 519,5 milioni di tonnellate annue nel 1990. Tra il 1990 e il 2000 le emissioni sono aumentate del 6,7%, tra il 2002 e il 2003 si è avuto un ulteriore incremento del 3%, mentre tra il 2003 e il 2007 dell'1%. L'obiettivo dell'Italia per rispettare il protocollo di Kyoto era quello di diminuire le

emissioni del 6,5% rispetto a quelle del 1990. In Europa invece, rispetto al 1990, si è riscontrata una leggera diminuzione di circa l'1%. Gli edifici con insufficiente isolamento termico sono dunque tra i maggiori responsabili. L'IPCC, *International Panel on Climate Change*, gruppo istituito dall'ONU nel 1998, stima che gli interventi di miglioramento delle prestazioni energetiche degli impianti e degli involucri edilizi degli edifici civili e industriali potrebbero ridurre l'inquinamento dovuto dalla CO_2 di oltre un miliardo di tonnellate all'anno. Le prospettive definite dall'Unione Europea miravano a diminuire del 20% le emissioni di gas a effetto serra in relazione al 1990, entro il 2020. In tal senso, anche i Paesi più industrializzati hanno sottoscritto le promesse e hanno proposto di ridurre alla metà le loro emissioni entro il 2050, mentre i Paesi emergenti si dimostrano meno propensi ad accettare l'impegno. Ad oggi, la situazione è nota, le volontà e le soluzioni esistono. In Italia, grazie all'adozione del D.lgs 311/2006 e delle sue integrazioni e modifiche, gli edifici pubblici e terziari devono essere realizzati in modo da rispettare le norme in materia e garantire bassi consumi. Il 2020 era l'anno in cui la normativa sul settore climatico termico mirava a raggiungere per gli alloggi il livello delle case passive, caratterizzate da consumi quasi nulli. Questo avveniva e avviene tutt'ora grazie ad una serie di incentivi e detrazioni fiscali, per interventi di riqualificazione energetica. Tuttavia, i provvedimenti vengono attuati a ritmi che variano da uno Stato all'altro. È chiaro che la posta in gioco dipende dalla volontà politica, dagli investimenti nella ricerca e nello sviluppo industriale, dalla formazione dei professionisti e dall'informazione oggettiva dell'utenza [6]. L'isolamento termico rappresenta, inoltre, un mezzo per aumentare il comfort delle abitazioni sia nelle stagioni invernali che estive. Una casa adeguatamente isolata non richiede maggiore manutenzione e potenza le prestazioni acustiche. La maggior parte degli isolanti termici, infatti, possiede anche proprietà di isolamento acustico, da tenere conto in fase di progettazione ed esecuzione.

2.2 Involucro verticale opaco

Secondo l'UNI 8290-1:1981 – “Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia”, che ha lo scopo di unificare la terminologia nel campo dell'edilizia, un sistema edilizio è definibile attraverso tre livelli: “classi di unità tecnologiche” (primo livello); “unità tecnologiche” (secondo livello); “classi di elementi tecnici” (terzo livello).

EDILIZIA RESIDENZIALE - SISTEMA TECNOLOGICO CLASSIFICAZIONE E TERMINOLOGIA (NORMA UNI 8290 - 1981)		
Classi di unità tecnologiche	Unità tecnologiche	Classi di elementi tecnici
1. Struttura portante	1.1 Struttura di fondazione	1.1.1 Strutture di fondazione dirette 1.1.2 Strutture di fondazione dirette
	1.2 Struttura di elevazione	1.2.1 Strutture di elevazione verticali 1.2.2 Strutture di elevazione orizzontali e inclinate 1.2.3 Strutture di elevazione spaziali
	1.3 Struttura di contenimento	1.3.1 Strutture di contenimento verticali 1.3.2 Strutture di contenimento orizzontali
2. Chiusura	2.1 Chiusura verticale	2.1.1 Pareti perimetrali verticali 2.1.2 Infissi esterni verticali
	2.2 Chiusura orizzontale inferiore	2.2.1 Solai a terra 2.2.2 Infissi orizzontali
	2.3 Chiusura orizzontale su spazi esterni	2.3.1 Solai su spazi aperti
	2.4 Chiusura superiore	2.4.1 Coperture 2.4.2 Infissi esterni orizzontali
3. Partizione interna	3.1 Partizione interna verticale	3.1.1 Pareti interne verticali 3.1.2 Infissi interni verticali 3.1.3 Elementi di protezione
	3.2 Partizione interna orizzontale	3.2.1 Solai 3.2.2 Soppalchi 3.2.3 Infissi interni orizzontali
	3.3 Partizione interna inclinata	3.3.1 Scale interne 3.3.2 Rampe interne

Figura 4 – Stralcio schema di classificazione del sistema tecnologico. Norma UNI 8290

La stessa UNI 8290, tra le chiusure richiamate al n° d'ordine 3.2. (vedi figura 4), definisce al n° d'ordine 3.2.1, il termine chiusura verticale come: “Insieme degli elementi tecnici verticali del sistema edilizio aventi funzione di separare gli spazi interni del sistema edilizio stesso rispetto all'esterno”. Recentemente, dal concetto di chiusura nasce anche il termine più recente di involucro che identifica, come unità distinte tra loro, i tamponamenti esterni (orizzontali, verticali, opachi, trasparenti, etc.).

Con involucro edilizio viene, quindi, indicato l'intero sistema di chiusura esterno articolato in diversi strati funzionali e materiali.

Le problematiche ambientali hanno fatto crescere l'interesse verso tematiche di sostenibilità energetica contribuendo a far sì che l'involucro edilizio non venga più considerato solo come l'elemento separatore tra interno ed esterno, ma come un'interfaccia dinamica in continua ed attiva interazione con i fattori climatici esterni. L'efficienza dell'involucro ha il suo più grande punto di forza nel miglioramento del comfort abitativo e della qualità ambientale attraverso un'ottima capacità di reagire in maniera flessibile alla variabilità delle condizioni ambientali, minimizzando le dispersioni termiche nel periodo invernale e limitando l'innalzamento delle temperature in quello estivo.

Al n° d'ordine 3.2.1.1 della suddetta norma viene definito il raggruppamento pareti perimetrali verticali che “raccolgono i subsistemi aventi funzione di

separare lo spazio artificiale utile dalle sollecitazioni del contesto naturale circostante”. In tale circostanza, l’involucro viene paragonato alla pelle di un organismo umano in grado di svolgere funzione protettiva e assicurando benessere e salute. Infatti l'abbigliamento e la pelle del corpo umano sono paragonabili all'involucro dell'abitazione, inteso non più solo come "chiusura", separazione tra interno ed esterno, ma come frontiera di trasformazione in grado di governare le condizioni ambientali interne rispetto a quelle esterne.

2.3 Tipologie di sistemi di isolamento termico

Lo scopo di governare proprio le condizioni ambientali interne rispetto a quelle esterne ha spinto nella direzione dell’isolamento termico dell’involucro degli edifici, ovvero isolare muri perimetrali, sottotetti, coperture e solai contro terra. Inoltre è buona prassi coibentare anche le pareti o i solai che confinano con locali non riscaldati come ad esempio cantine, autorimesse e scale di servizio. In edilizia esistono diverse tecnologie relative all’impiego dell’isolamento termico, che si distinguono principalmente per il posizionamento dell’isolante: all’esterno, all’interno o in intercapedine. La posizione dell’isolante influisce sulla distribuzione della temperatura e della pressione di saturazione del vapore acqueo nella parete, con le relative conseguenze che riguardano il benessere termo-igrometrico. L’isolante infatti può essere applicato nei seguenti modi:

- Isolamento interno; questa applicazione è poco diffusa e viene generalmente utilizzata solo nei casi di edifici esistenti in cui non è possibile l’intervento esterno sulla facciata o di interventi su edifici la cui facciata debba rimanere a vista o presenti vincoli architettonici o particolari pregi architettonici. Infatti, con questa pratica si presentano diversi inconvenienti tra i quali la riduzione della superficie abitabile a causa dello spessore degli isolanti, la difficile eliminazione dei ponti termici con rischi di condensa interstiziale o in corrispondenza di elementi costruttivi con maggiori conducibilità (travi, pilatri etc.); questa soluzione viene ancora considerata per le piccole ristrutturazioni di edifici esistenti perché economica e di facile esecuzione;
- Isolamento in intercapedine; realizzata tramite l’inserimento del materiale termoisolante nella camera d’aria spesso presente tra i due paramenti in laterizio, questo tipo di muratura nell’isolare termicamente può garantire prestazioni acustiche più o meno elevate (a seconda dell’isolante selezionato) e può eliminare il problema del ponte termico solo in corrispondenza dei solai (se il muro portante è posto esclusivamente all’interno); l’intercapedine permette l’utilizzo di una grande varietà di materiali, anche di quelli sciolti (fibre di cellulosa, granulato di perlite, granulato di sughero, poliuretano a spruzzo ecc.) che però non sempre riescono a garantire una omogeneità di realizzazione
- Facciata ventilata; si tratta costruttivamente di un rivestimento esterno

fissato alla tamponatura dell'edificio mediante un sistema intelaiato di traversi e montanti che consentono il passaggio dell'aria tra il rivestimento ed un isolante applicato al muro creando una intercapedine d'aria di 6-8 cm. Infatti si inserisce in questa intercapedine ventilata, uno strato di materiale isolante fissato alla parete esterna dell'edificio. È utilizzato in edifici di nuova costruzione per garantire la ventilazione naturale della parete grazie all'effetto camino che si genera lasciando due aperture, una superiore ed una in corrispondenza dell'estremità inferiore. Il sistema che già garantisce un ottimo isolamento termico, grazie alla ventilazione migliora il comportamento estivo in regime termodinamico. Questo sistema a secco, di facile installazione anche su muri non esattamente planari, è di facile manutenzione esponendo a facciavista un rivestimento specifico normalmente brevettato per avere un minor degrado rispetto a finiture cementizie ed intonaci

- Isolamento termico a cappotto; lo strumento più efficace per migliorare le prestazioni energetiche di un edificio è il cappotto termico, sistema di isolamento termico dell'involucro che permette di ottimizzare le prestazioni energetiche degli edifici, migliorando il comfort abitativo, garantendo una ottima coibentazione termica, riducendo le dispersioni termiche e di conseguenza i consumi energetici sia per il riscaldamento invernale che per il raffrescamento estivo. Questo sistema di isolamento è la soluzione più diffusa, sia in caso di ristrutturazione sia in caso di nuove costruzioni per i suoi innumerevoli vantaggi, tra cui l'eliminazione del problema dei ponti termici, ovvero i punti dell'involucro edilizio in cui si verifica una maggiore dispersione del calore maggiore che provoca condensa e muffe.

2.4 Benessere termico

Il benessere termo-igrometrico è solo un aspetto di quello che generalmente viene definito benessere ambientale, il quale comprende molteplici parametri, come il benessere visivo, benessere acustico e il benessere olfattivo. Fra gli obiettivi che si deve prefissare un progettista, fondamentale è garantire che l'involucro sia in grado di esercitare quanto più possibile la funzione di controllo climatico. Lo scopo è duplice: da un lato bisogna garantire il benessere termo-igrometrico per gli occupanti dell'edificio, dall'altro occorre razionalizzare i consumi di energia, con tutti i benefici che questo comporta sull'ambiente globale [7]. Secondo *UNI ISO EN 7730*, il benessere termo-igrometrico dell'individuo è “*la condizione mentale di soddisfazione nei confronti dell'ambiente termico*”. Quindi, la condizione di benessere si realizza quando viene raggiunto un equilibrio fra il flusso termico generato dall'organismo umano, per effetto dei processi di ossidazione e di trasformazione chimica delle sostanze alimentari, e i flussi di calore dispersi dal corpo verso l'ambiente, condizione che coincide con lo stato in cui il soggetto non percepisce né caldo né freddo. Nel corso della storia il concetto e la quantificazione del benessere termico si è evoluta, partendo da una semplice misurazione della temperatura interna, fino a sviluppare una serie di parametri che riescono a definire con più precisione il benessere in un ambiente termico. Attualmente possiamo definire, in condizioni stazionarie, il benessere termo-igrometrico di un individuo in un determinato ambiente mediante parametri di tipo *ambientale* e parametri di tipo *individuale*.

I parametri ambientali, anche definiti come microclima, rappresentano l'insieme di parametri fisici che caratterizzano l'aria di un ambiente confinato, che in un locale influiscono sui sistemi uomo-ambiente. Le persone trascorrono molto tempo all'interno di luoghi chiusi, e ciò rischia d'incorrere a disagi provocati dalla cattiva gestione del microclima in cui si trova, per questo è fondamentale capire cosa può influenzarlo. Importante sottolineare che il *D.Lgs. 81/2008* obbliga i datori di lavoro alla valutazione dei rischi sul lavoro, comprese le condizioni di comfort termico, contenute nelle direttive di prevenzione del rischio ergonomico. Tuttavia, il decreto, non fornisce indicazioni quantitative sui valori limite dei parametri microclimatici da rispettare, ma si limita a raccomandare una valutazione che consideri il tipo di attività svolta dal lavoratore. Queste caratteristiche ambientali vengono definite attraverso quattro parametri: temperatura dell'aria, temperatura media radiante, velocità dell'aria e umidità relativa dell'aria.

I parametri individuali sono delle grandezze molto complesse da definire, e ciò deriva dal fatto che la sensazione di caldo, di freddo, o l'assenza di tali sensazioni varia da individuo a individuo. Per cui studi hanno condotto alla definizione di “diagrammi del benessere” e “ambienti termici accettabili” che hanno lo scopo di fissare veri e propri intervalli di comfort. Quindi non esiste un valore che mette tutti d'accordo, ma esiste un valore per cui la maggior parte delle persone si trovano in condizioni di comfort. La norma *UNI EN ISO 7730*,

fornisce i requisiti per degli *ambienti termici accettabili*, ovvero indica intervalli di valori delle grandezze fisiche ambientali che permettono di ottenere un benessere accettabile negli ambienti. La norma raccomanda di realizzare delle condizioni ambientali che risultano soddisfacenti per il 90% degli occupanti ovvero di conseguire una percentuale di insoddisfatti non superiore a 10%.

La definizione di tutti questi parametri si traduce in specifiche di progetto di un impianto e di un involucro edilizio che deve, quindi, presupporre la conoscenza del rapporto che esiste tra le grandezze oggettive, proprie dell'ambiente, e le sensazioni soggettive che queste provocano nell'individuo. Attraverso questi elementi il legislatore ha potuto definire una serie di parametri, che se rispettati, garantiscono la soddisfazione del benessere termico degli ambienti sia in regime estivo sia in regime invernale.

2.5 La certificazione energetica

L'attenzione ai problemi sul risparmio energetico, l'introduzione di nuove norme ambientali a livello mondiale ed europeo e la consapevolezza che il 44% di energia termica (combustibile) venga utilizzata in ambito residenziale, in uffici e aree commerciali, ha sollecitato l'introduzione della certificazione energetica. La certificazione energetica nasce proprio con lo scopo di "misurare" e dichiarare quanta energia viene consumata per il funzionamento di impianti per riscaldamento, raffrescamento, ventilazione meccanica e produzione di acqua calda sanitaria.

La certificazione energetica degli edifici è, quindi, una procedura di valutazione volta a promuovere il miglioramento degli edifici in termini di efficienza energetica, al fine di informare i proprietari e gli utilizzatori dell'immobile circa i consumi energetici richiesti per mantenere determinate condizioni ambientali interne. Dunque la certificazione energetica è il documento ufficiale, introdotto dalla normativa europea 2002/91/CE che indica il rendimento o la prestazione energetica di un edificio, redatto da un tecnico abilitato, che tiene conto delle caratteristiche architettoniche dell'edificio, dei materiali impiegati, della zona climatica, dell'esposizione, del tipo di riscaldamento e di tutto ciò che può influire sui consumi energetici. L'Unione Europea ha emanato una serie di direttive per dare ai singoli stati membri dispositivi simili per la valutazione energetica. Dal 2015 sono in vigore le nuove regole sui requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e per la redazione dell'*APE, Attestato di Prestazione Energetica*. La classe energetica dell'edificio è determinata sulla base dell'*indice di prestazione energetica globale non rinnovabile dell'edificio*, per mezzo del confronto con una scala di classi prefissate, ognuna delle quali rappresenta un intervallo di prestazione energetica definito.

Per quanto riguarda il metodo per determinare la classificazione, le precedenti linee guida definivano la scala da A a G secondo i Gradi Giorno (GG) del comune dove si trovava l'immobile e secondo il rapporto S/V (superficie disperdente/volume riscaldato); a partire dal 2015 invece la classificazione deriva dal confronto con "l'edificio di riferimento", un edificio identico a quello oggetto della progettazione per geometria (sagoma, volumi, superficie calpestabile, superfici degli elementi costruttivi e dei componenti), orientamento, ubicazione territoriale, destinazione d'uso e situazione al contorno e avente caratteristiche termiche e parametri energetici predeterminati conformemente all'Allegato B del Decreto Requisiti Minimi (Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici).

Quindi, la prestazione energetica invernale del fabbricato, riportata nell'Attestato di Prestazione Energetica è definita a partire dal valore dell'indice di prestazione termica utile per la climatizzazione invernale dell'edificio di riferimento, $EP_{H,nd,limite}$, ipotizzando che in esso siano installati elementi edilizi rispondenti ai requisiti minimi di cui al punto 1 dell'Allegato B del suddetto

decreto.

In pratica, l'edificio di riferimento serve per determinare i range di energia primaria limite che l'edificio oggetto di attestazione rispetta e con il quale deve confrontarsi.

Questa nuova classificazione, utilizzando l'edificio di riferimento, pratica già diffusa in altre procedure come nella normativa americana ASHRAE e nella procedura LEED, ha il vantaggio che i limiti vengono modellati sull'edificio oggetto di intervento o attestazione.

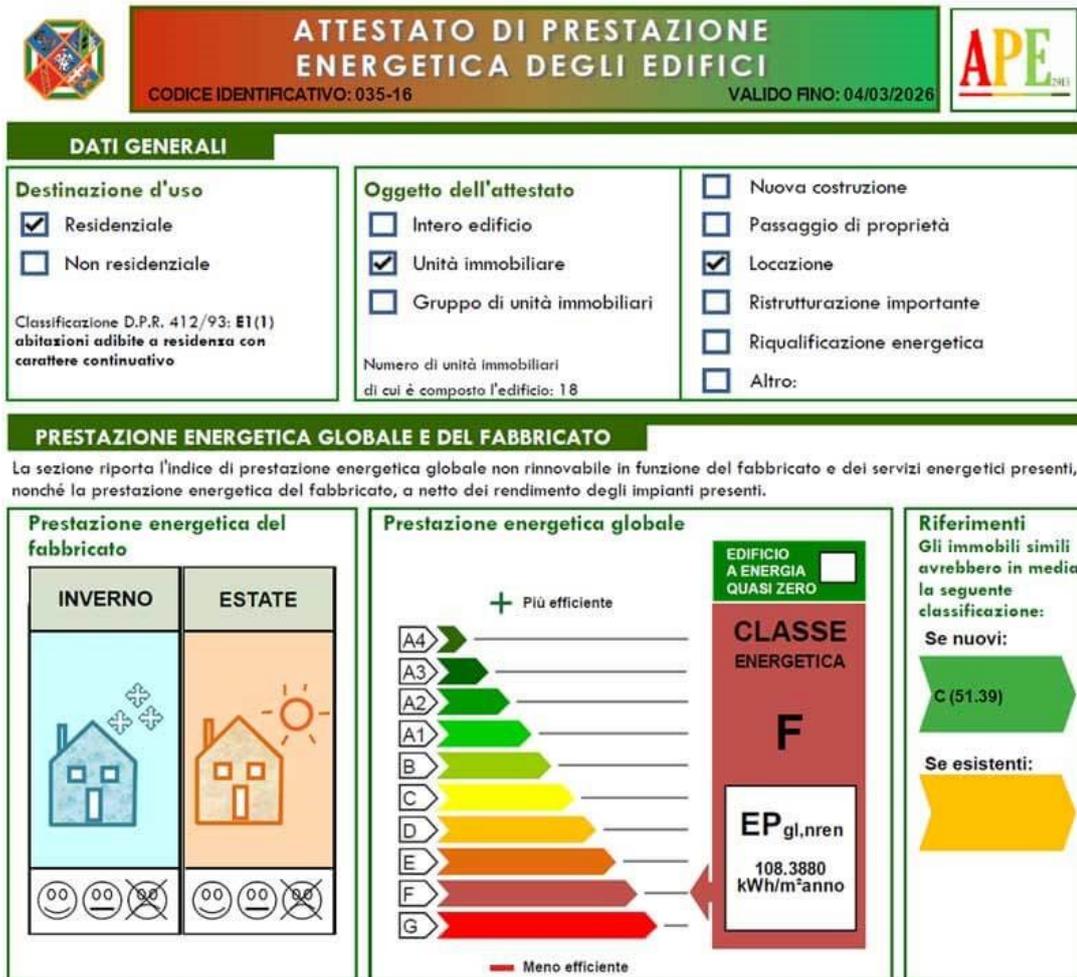


Figura 5 – Esempio di “attestato di prestazione energetica

La classificazione della prestazione energetica degli immobili viene determinata tramite l'indice di prestazione energetica globale dell'edificio in termini di energia primaria non rinnovabile ed è formata da 10 classi: A4, A3, A2, A1, B, C, D, E, F, G (dal più efficiente al meno efficiente).

Tabella 1. Scala di classificazione degli edifici sulla base dell'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile.

	Classe A4	$\leq 0,40 EP_{gl,nren,rif}$
$0,40 EP_{gl,nren,rif} <$	Classe A3	$\leq 0,60 EP_{gl,nren,rif}$
$0,60 EP_{gl,nren,rif} <$	Classe A2	$\leq 0,80 EP_{gl,nren,rif}$
$0,80 EP_{gl,nren,rif} <$	Classe A1	$\leq 1,00 EP_{gl,nren,rif}$
$1,00 EP_{gl,nren,rif} <$	Classe B	$\leq 1,20 EP_{gl,nren,rif}$
$1,20 EP_{gl,nren,rif} <$	Classe C	$\leq 1,50 EP_{gl,nren,rif}$
$1,50 EP_{gl,nren,rif} <$	Classe D	$\leq 2,00 EP_{gl,nren,rif}$
$2,00 EP_{gl,nren,rif} <$	Classe E	$\leq 2,60 EP_{gl,nren,rif}$
$2,60 EP_{gl,nren,rif} <$	Classe F	$\leq 3,50 EP_{gl,nren,rif}$
	Classe G	$> 3,50 EP_{gl,nren,rif}$

Il parametro su cui si basa la qualità assegnata, all'involucro edilizio, in regime invernale è l' $EP_{H,nd}$ che rappresenta l'energia termica necessaria da fornire al nostro edificio in regime invernale per mantenerlo a 20 °C, valori poi confrontati con l'edificio di riferimento. Precedentemente (prima del 2015) l'energia primaria per la climatizzazione invernale era l'unica necessaria per la certificazione energetica. Dal 2015 l'indice di prestazione a cui si associa la classe energetica non riguarda più solo il fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale ma è la sommatoria di climatizzazione invernale, produzione di acqua calda sanitaria, climatizzazione estiva, ventilazione, illuminazione artificiale e trasporti di persone e cose (questi due ultimi valori solo per gli edifici non residenziali). Si valuta solo la componente non rinnovabile del fabbisogno di energia primaria. In regime estivo i valori calcolati, per effettuare il confronto con l'edificio di riferimento presuppongono: per i componenti opachi la trasmittanza periodica, per i componenti trasparenti l'area solare equivalente estiva. Tutti gli indici sono espressi in kWh/m² anno.

Considerazioni derivanti dal nuovo significato dell'attestato di prestazione energetica possono suggerirci l'importanza che inizia a rivestire anche il comportamento estivo degli edifici.

Precedentemente ignorato, il problema viene anche regolato da alcuni parametri come la trasmittanza termica periodica Y_{ie} , la capacità termica periodica interna C_{ip} , l'irradianza sul piano orizzontale nel mese di massima insolazione estiva, $I_{m,s}$ e la riflettanza solare.

Per questo motivo questa ricerca, che si pone come obiettivo l'analisi della

prestazione termica degli edifici, va oltre lo studio dei parametri stazionari, ossia trasmittanza termica, resistenza termica e conducibilità termica, ma mira a caratterizzare anche parametri dinamici estivi come sfasamento ed attenuazione.

Capitolo 3: External Thermal Insulation Composite System (ETICS)

Il sistema di isolamento a cappotto è una tecnologia molto comune nel mondo dell'edilizia.

Fin dal 1960 in Europa continentale è stata spesso applicata alla muratura o al substrato di calcestruzzo, mentre in Nord America è spesso utilizzata applicata ad uno strato in legno; in quest'ultimo caso prende il nome di EIFS, Exterior insulation and finish system.

ETICS è l'abbreviazione comunemente utilizzata a livello internazionale per External Thermal Insulation Composite System e significa Sistema di isolamento termico a cappotto, mentre, come precedentemente anticipato, in Nord America prende il nome di EIFS, Exterior insulation and finish system.

Oggi, i sistemi di isolamento termico a cappotto vengono molto utilizzati in tutta Europa. Per questo motivo, l'ente tecnico europeo di riferimento per il settore delle costruzioni, l'EOTA (European Organization for Technical Approval) ha ricevuto dalla commissione europea il compito di redigere le linee guida per l'approvazione tecnica dei sistemi ETICS a livello europeo: così è nata la Linea Guida Tecnica ETAG 004 (European Technical Approval Guideline) per sistemi ETICS su supporti in muratura o calcestruzzo.

Generalmente la tecnologia utilizzata per il sistema a cappotto è quasi sempre la stessa: vi sono variazioni nei materiali isolanti utilizzati che spesso sono determinati anche in funzione del supporto su cui si va ad applicare; poche sono le variazioni sulle finiture che sono realizzate sempre allo stesso modo con componenti differenti ma con le stesse funzioni, e possono influire sulla resa estetica finale.

I sistemi ETICS prevedono pannelli termoisolanti in lastre che vengono posti in opera con malta adesiva cementizia, previa applicazione di idoneo primer se la superficie lo richiede.

Inoltre l'applicazione più comune secondo la regola dell'arte prevede il fissaggio meccanico dei pannelli isolanti con tasselli plastici a fungo con inserto autoespandente in corrispondenza di tutti gli spigoli di ogni pannello e due centrali con profondità di ancoraggio tale da garantire una corretta adesione al supporto (circa 3cm nella parte sana del supporto murario); fissati meccanicamente e con un collante cementizio alla muratura od ad un substrato in calcestruzzo, a seguire si realizza uno strato di rasatura di pochi millimetri con una malta apposita, in cui vi è annegato un rinforzo con una rete in fibra di vetro, coperto infine da una finitura (in cantiere comunemente detta tonachino di finitura a colore).

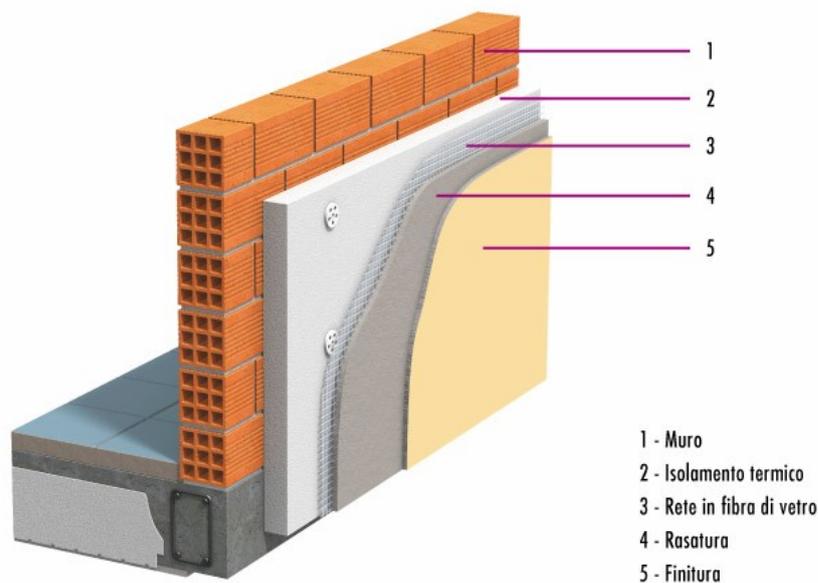


Figura 6 – Sistema di isolamento termico a cappotto – ETICS

3.1 Definizione e posa in opera degli ETICS secondo la UNI/TR 11715

ETICS è l'abbreviazione di External Thermal Insulation Composite System, ovvero *Sistema Composito per l'Isolamento Termico Esterno*. Questo sistema di isolamento termico nasce in Germania intorno agli anni '60 e venne importato in Italia qualche decennio dopo, attualmente i sistemi a cappotto rappresentano la tipologia di isolamento più utilizzata in Europa.

Per *sistema composito* si indica il cosiddetto “cappotto”, derivante dall'assemblaggio in opera di diversi componenti, che nel loro insieme costituiscono un organismo complesso le cui singole parti collaborano in stretto rapporto fra loro, con un unico obiettivo. L'obiettivo principale è l'isolamento termico. Con *isolamento termico*, viene indicata la finalità del sistema, ossia isolare termicamente un edificio, che significa ridurre al minimo il passaggio di calore dall'interno all'esterno durante l'inverno e dall'esterno all'interno durante l'estate. Alcuni di questi sistemi possono avere anche altre finalità come, ad esempio, l'isolamento acustico il miglioramento sismico. Infine il concetto di *esterno*, definisce la caratteristica principale degli ETICS, quella che ne ottimizza il potere isolante: il posizionamento all'esterno permette di isolare ogni elemento costruttivo, senza lasciare punti critici (i cosiddetti ponti termici) di dispersione.

La UNI/TR 11715 – Isolanti termici per l'edilizia – Progettazione e messa in opera dei sistemi isolanti termici per l'esterno (ETICS), ha lo scopo di definire le condizioni generali di utilizzo e le modalità di messa in opera degli ETICS,

secondo tale normativa un sistema ETICS è composto dai seguenti strati funzionali come in *Fig. 9*:

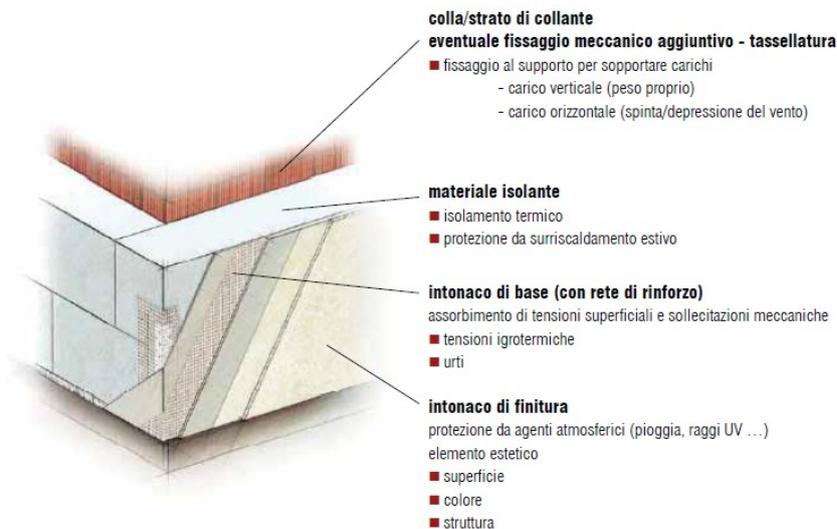


Figura 7 – Stratigrafia ETICS secondo la UNI/TR 11715

La *UNI 11716* in vigore da Giugno 2018, definisce i requisiti che devono avere i posatori di cappotti termici. La norma distingue, in base ai compiti e alle responsabilità, due tipologie di professionalità: *l'installatore base* e *l'installatore caposquadra*. Per ciascun profilo vengono delineati i requisiti di competenza, abilità e conoscenza che i posatori di cappotti termici devono acquisire e dimostrare di possedere. Tali requisiti sono espressi in maniera tale da agevolare e contribuire a rendere omogenei, i processi di valutazione e convalida dei risultati dell'apprendimento, a livello europeo [8].

Nell'allestimento di cantiere è necessaria una particolare attenzione al corretto stoccaggio dei componenti del sistema di isolamento termico (soprattutto per gli isolanti fibrosi). Infatti anche l'installazione in condizioni atmosferiche sfavorevoli può influenzare negativamente le caratteristiche di lavorazione e le caratteristiche del materiale isolante scelto. Le operazioni preliminari da compiere per l'applicazione di un sistema sono da eseguirsi con la massima attenzione, in quanto possono influenzare in maniera significativa tutto il processo di posa e di conseguenza il risultato finale.

La prima operazione è sicuramente quella di avere delle superfici pulite. Una superficie sporca è una superficie che presenta delle sostanze, che potrebbero portare ad una non corretta aderenza del sistema ETICS sulla facciata. Quindi si procederà alla rimozione di polvere, sporco, parti incoerenti, ecc. mediante lavaggio con acqua pulita a bassa pressione. Importante verificare l'assenza di patologie sul supporto. In caso si rilevi la presenza di tracce di *umidità di risalita*, questa va rimossa e ricostruita tutta la zona coinvolta da tale fenomeno, è consigliabile utilizzare un intonaco di fondo idrorepellente a base di calce e cemento. Nel caso in cui vi sia la presenza di muffe, alghe, funghi, ecc., va eseguito un trattamento preventivo con detergente specifico e successiva sanificazione [8]. Dopo un intervento di pulizia della superficie è opportuno

verificare la resistenza meccanica e l'adesione al sottofondo per ottenere un efficace incollaggio evitando inconvenienti dovuti al distacco del cappotto dal supporto preesistente (intonaco o altro rivestimento).

La prima fase che vede l'utilizzo del ETICS, è la fase di fissaggio. Il fissaggio, ha la funzione di sopportare i carichi da peso proprio ed eventuali carichi orizzontali quali spinte laterali o depressione del vento.

Ai fini della certificazione dei sistemi ETICS e delle prove necessarie per la certificazione, l'ETAG 004 e il prEN 17237 classificano i sistemi in base al tipo di fissaggio:

I sistemi ETICS si differenziano secondo i metodi di fissaggio, in:

- sistemi esclusivamente incollati, che possono essere completamente o parzialmente incollati in fasce e/o punti specifici;
- sistemi incollati e con fissaggi meccanici aggiuntivi, dove il carico è distribuito totalmente dallo strato legante, e i fissaggi meccanici sono utilizzati per fornire stabilità fino alla completa essiccazione dell'adesivo, agiscono quindi come collegamento temporaneo;
- sistemi fissati meccanicamente con adesivo supplementare, dove il carico è distribuito totalmente dai fissaggi meccanici, e il collante viene utilizzato per garantire la planarità del sistema installato;
- sistemi con fissaggio esclusivamente meccanico.

Nella realtà, il fissaggio di un sistema a cappotto funziona bene con la collaborazione di colla e fissaggi meccanici: il sistema è vincolato al supporto tramite l'incollaggio, che trasferisce le tensioni termiche e i carichi, ed eventualmente da fissaggi meccanici che collaborano con la colla a contrastare tensioni e carichi di carattere orizzontale (spinta e depressione del vento) [8]. Dopo aver verificato puntualmente l'idoneità del supporto dai diversi punti di vista, (chimico, fisico e geometrico) si procede con l'inizio effettivo delle operazioni di posa in opera del sistema a cappotto. Partenza che può avvenire in due modi: il primo è la partenza con profilo e il secondo è la partenza con i pannelli di zoccolatura.



Figura 8 – Pannelli metallici

Successivamente si applica la stesura del collante, la funzione del collante è quella di regolarizzare il fondo e creare un ponte di adesione tra il supporto ed il pannello, opponendosi alle forze di trazione parallele alla superficie da incollare. La vasta gamma di materiali isolanti in commercio ha comportato una conseguente diversificazione sulla gamma di collanti presenti sul mercato, da scegliersi in funzione della tipologia del pannello da utilizzare. Quindi un sistema composto da pannelli in silicato di calcio verrà applicato con un collante differente rispetto ad uno con pannelli in EPS. Collante che sarà preparato in cantiere rispettando le istruzioni contenute sulla scheda tecnica o sulla confezione, mescolando con la quantità d'acqua prestabilita, per mezzo di un agitatore o un mescolatore. Importante, applicare il collante sul pannello, e non sulla superficie di supporto, con l'applicazione che può avvenire a mano o attraverso una macchina.

La posa in opera dei pannelli deve essere eseguita dal basso verso l'alto, a giunti sfalsati, evitando la presenza di fessure tra i pannelli ed esercitando una leggera pressione con le mani. Il disallineamento verticale dei giunti deve essere di almeno 25 cm. Durante l'installazione dei pannelli, questi vanno battuti con un frattazzo di legno o plastica per farli aderire il più possibile al supporto. È importante controllare spesso e ripetutamente la planarità di tutta la superficie con una staggia.

A distanza di circa un giorno, e comunque dopo l'indurimento del collante, si procede con il fissaggio dei pannelli, che avviene utilizzando appositi tasselli "a fungo". Questi sono formati da un disco (o testa) che ha il compito di pressare il pannello isolante contro il supporto, e da un gambo a cui è demandata la funzione di aderenza al supporto stesso. La funzione principale dei tasselli non è di assorbire gli sforzi di adesione o di portanza dei pannelli, ma di permettere una stabilità dell'adesione nel tempo che potrebbe essere compromessa da una non corretta preparazione del supporto e dalle sollecitazioni del vento. In definitiva possiamo dire che, il collante è utilizzato per contrastare le forze parallele al supporto mentre il tassello lavora nel contrastare le forze perpendicolari al supporto. Il mancato rispetto delle prescrizioni circa quantità e modalità di tassellatura può essere causa di difetti estetici e funzionali del sistema. La scelta della tipologia dei tasselli si effettua in funzione del tipo di supporto murario sul quale viene applicato il sistema a cappotto, sia in funzione del tipo di isolante utilizzato. La scelta della lunghezza del tassello deve avvenire considerando l'intonaco ed eventualmente la malta di livellamento e la planarità del supporto di ancoraggio in modo che il fissaggio presenti un'adeguata resistenza allo strappo. Per la maggior parte dei pannelli isolanti lo schema da utilizzare per la tassellatura è a T, in cui i tasselli vengono disposti in corrispondenza degli incroci dei pannelli più uno centrale. Generalmente, per i pannelli isolanti appartenenti alla categoria dei fibrosi si utilizza invece uno schema a W, dove ogni pannello è fissato con tre tasselli ad una distanza di circa 5 – 10 cm dal bordo. Per determinare il tipo e il numero di tasselli si deve eseguire la verifica statica, per valutare la resistenza al carico da vento. Azioni

ricondotte ad azioni statiche costituite da pressioni e depressioni che agiscono normalmente sulle superfici, sia esterne che interne, degli elementi che compongono la costruzione. Azione del vento che viene determinata considerando la combinazione più gravosa delle pressioni agenti. Ogni produttore di sistema a cappotto termico certifica presso un laboratorio di prova, le caratteristiche del proprio sistema per ottenere il rilascio del Benestare tecnico europeo (ETA), sia con l'incollaggio o con incollaggio e fissaggio meccanico aggiuntivo.

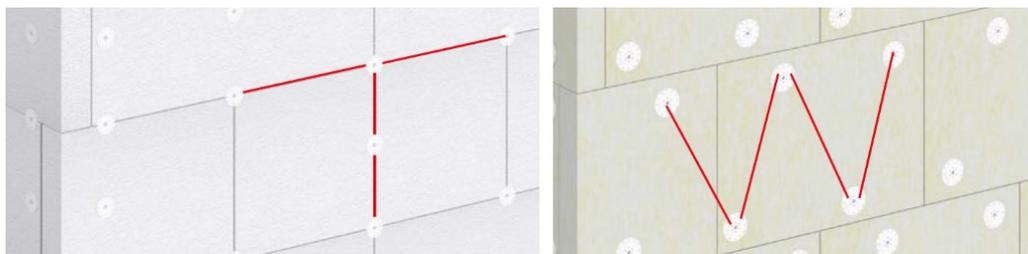


Figura 9 – Tassellatura a T (sinistra), Tassellatura a W (destra)

La fase successiva alla tassellatura è l'applicazione dell'intonaco di fondo. Con il termine intonaco di fondo, derivato dalla norma *ETAG 004*, intendiamo: malta rasante, strato di armatura e rasatura, si parla quindi di una rasatura armata. È possibile utilizzare diversi tipi di intonaco di fondo, in base ai requisiti del sistema e al materiale delle lastre isolanti. Quindi sullo strato isolante si applica l'intonaco di fondo a mano o a macchina, negli spessori indicati dal produttore. Nell'intonaco di fondo viene inserita un'armatura, spesso una rete in fibra di vetro, dall'alto verso il basso, con una sovrapposizione di almeno 10 cm evitando la formazione di pieghe. Ad asciugatura avvenuta della prima mano di rasante, con annegata la rete d'armatura, si applica una seconda mano di rasante in modo da ottenere una superficie liscia ed uniforme. La seconda mano avrà uno spessore minimo di 1 mm, ed almeno 0,5 mm nella zona di sovrapposizione delle reti.

Dopo circa 15 - 20 giorni dall'ultimazione dell'applicazione del rasante, e comunque dopo il completo indurimento, si applicherà a rullo o a pennello il fondo fissativo trasparente, il primer di sistema. Dopo l'applicazione del primer di sistema, in presenza di condizioni atmosferiche idonee e trascorso il tempo sufficiente, si può applicare il rivestimento di finitura. Anche in questo caso l'applicazione può avvenire a mano o a macchina, con l'utilizzo di spatola, a spruzzo o a frattazzo. Ciascuna tipologia di rivestimento, in base alla tipologia di sistema, ha le proprie indicazioni di posa e spessori minimi da rispettare. In alternativa agli intonaci possono essere utilizzati rivestimenti modulari, rivestimenti in pietra o rivestimenti ceramici che vengono incollati all'intonaco di fondo. La scelta di questi va sempre fatta laddove esistano resistenze meccaniche a trazione tali da sostenere rivestimenti del genere.

3.2 La metodologia di valutazione della durabilità dei componenti edilizi

La norma UNI 11156, “valutazione della durabilità dei componenti edilizi” definisce la durabilità come la capacità dei componenti edilizi di svolgere le funzioni richieste durante un periodo di tempo specificato, sotto l’influenza degli agenti previsti in esercizio.

La durabilità dei componenti edilizi è, quindi, un requisito relativo al comportamento nel tempo di tali componenti edilizi; infatti l’elemento tecnico subisce una naturale caduta prestazionale nel tempo in relazione anche alla vita utile propria dei materiali impiegati per realizzarla, alla loro messa in opera ed all’interfaccia che si crea tra i differenti materiali della stratigrafia realizzata. Solitamente, in questo campo di studio della durabilità, si considera che, per un componente edilizio, oltre un certo limite di soglia la prestazione raggiunge valori sotto i quali non è più in grado di dare una risposta efficace in relazione alla funzione richiestagli e decretando così la sua fine di vita utile.

La ISO 15686, Building and constructed assets service life planning, fornisce il quadro generale a livello internazionale in merito alla valutazione ed alla gestione della vita utile dell’edificio, divenendo anche una linea guida per la UNI 11156 che definisce appunto questa durata o vita utile del componente (service life) come il periodo di tempo dopo l’installazione durante il quale l’elemento tecnico mantiene livelli prestazionali superiori o uguali ai limiti di accettazione definiti in relazione al soddisfacimento delle funzioni richiestegli ed alle esigenze espresse dall’utenza, considerando sempre un livello di manutenzione minimo assimilabile alle operazioni di manutenzione ordinaria che normalmente si effettuano sempre durante il periodo di uso e gestione del manufatto edile.

La valutazione della vita utile (service life) si fonda principalmente sulla analisi di dati input partendo dalla cosiddetta “durata spontanea”. Quest’ultima si ottiene sperimentalmente attraverso prove di invecchiamento sotto azioni di agenti sollecitanti ed indica (da letteratura) la durata spontanea del componente, o meglio, il periodo di tempo durante il quale le prestazioni del componente si mantengono entro limiti accettabili per le esigenze di esercizio, sotto la sola influenza degli agenti sollecitanti.

Il concetto di vita utile, inoltre, si sviluppa articolandosi, a seconda di chi effettua la valutazione e di quale obiettivo si pone, in “vita utile di riferimento” (reference service life) ed in “vita utile stimata” (Estimated service life).

La “vita utile di riferimento” è destinata principalmente a quegli enti preposti al controllo della durabilità degli elementi tecnici nella fase di produzione ed in particolare per la certificazione di durabilità dei prodotti. Queste certificazioni sono spesso inserite come ulteriore prova effettuata dai produttori per l’ottenimento del marchio CE relativamente alla direttiva CEE 89/106 su prodotti da costruzione. Tale vita utile si dice “di riferimento” per indicare le condizioni al contorno assunte dal produttore che certifica la durabilità del suo prodotto fuori sistema e considerando condizioni di uso e di degrado plausibili e che mediamente si verificano.

La “vita utile stimata” è, invece, relativa alle condizioni reali in cui si colloca il suo progetto ed è calcolata dal progettista. Il progettista, infatti, partendo dai dati della durata dichiarati nella reference service life, può renderli più reali particolarizzandoli relativamente allo specifico progetto, modificando le condizioni di riferimento assunte dal produttore perché risultino più veritiere rispetto alle condizioni del contesto progettuale specifico.

Per seguire tutto questo iter, il progettista ha a disposizione diversi metodi , più o meno complessi e più o meno affidabili, che utilizzano dei fattori correttivi basandosi su analisi statistiche sia del contesto sollecitante che del comportamento dei materiali, correggendo le condizioni di riferimento in funzione di materiali, progetto, ambiente, condizioni d’uso e manutenzione.

Infine sempre la UNI 11156 introduce anche il termine di “vita utile di progetto”, che indica la vita utile che il progettista pone come obiettivo, in termini di durata, del suo progetto e che trova una sua verifica nella procedura di valutazione della Estimated service life.

Nella seguente tabella sono mostrati gli anni di vita utile prevista per ogni categoria di edificio.

CATEGORIA DI EDIFICIO	VITA UTILE (anni)	ESEMPI
Temporaneo	$T < 10$	Edifici per mostre temporanee, spazi per attività provvisorie..
Vita breve	$10 < T < 25$	Aule temporanee
Vita media	$25 < T < 50$	Edifici industriali
Vita lunga	$50 < T < 100$	Residenze, uffici, centri commerciali, scuole, percheggi..
Vita permanente	$T > 100$	Musei, monumenti..

Tabella 2 – Classificazione degli edifici secondo la NTC18 in base alla vita nominale VN per diversi tipi di opere;

3.3 Tipologie di degrado degli ETICS

Per patologia edilizia si intende un deterioramento, considerato come perdita prestazionale di un componente o dell'intero sistema, che si manifesta in tempi anticipati rispetto a quelli attesi. La nascita di uno stato patologico si sviluppa sempre a causa della presenza di difetti degli elementi o di difetti all'interno di una fase in cui si sviluppa il processo edilizio. La patologia edilizia ha quindi l'obiettivo di studiare i fattori che attivano i degradi patologici, partendo dai fenomeni di alterazione e sviluppando strumenti di supporto logici, analitici e procedurali per la fase diagnostica e prognostica. Queste fasi, permettono di mettere a punto le strategie di intervento manutentive più opportune, mirate ad eliminare i difetti e i fattori patologici generatori di guasto. Quindi la problematica delle patologie di degrado, deve essere affrontata, attraverso opportune indagini diagnostiche, siano esse visive o strumentali, al fine di valutare lo stato di conservazione e le condizioni di funzionamento dell'elemento tecnico del sistema edilizio. La procedura di diagnosi, dunque, ha il compito di individuare, descrivere e spiegare gli eventuali fenomeni rilevabili o possibili di rischio, patologia o degrado, disagio, obsolescenza dei sistemi insediativi, ma anche rilevare e segnalare i valori positivi di sicurezza, protezione, durabilità, efficienza funzionale ed i livelli di comfort esistenti.

Le attività diagnostiche, che vengono eseguite su scala edificio (e componenti che lo compongono), si avvalgono di metodi *diretti* in cui le informazioni vengono rilevate direttamente sul luogo. I metodi diretti sono sostanzialmente quelli condotti con *osservazioni visive* (quando per la definizione della diagnosi è sufficiente l'esperienza dell'operatore) e con *indagini strumentali* (distruttive o non distruttive) e *indagini di laboratorio*. Per cui l'obiettivo dell'attività di diagnosi è quello di ridurre il grado di incertezza interpretativa dei fenomeni di degrado (naturale o patologico) degli elementi tecnici attraverso un approccio multidisciplinare e, conseguentemente, di consentire la esecuzione di interventi manutentivi appropriati e durevoli.

Bisogna, pertanto, valutare se un sistema è tendente a fenomeni che posso indurre ad un'anomalia (manifestazione inattesa) o ad un difetto (inadeguatezza di uno o più elementi costituenti il sistema) che comporterebbero un degrado progressivo oppure ad un guasto che rende inutilizzabile un elemento tecnico. In particolare, un isolamento a cappotto correttamente applicato e con i corretti materiali, ha un'aspettativa di vita che può essere paragonata a quella dell'edificio su cui il cappotto è applicato, ma risulta molto frequente imbattersi in ETICS realizzati con materiali scadenti o in periodi in cui le informazioni relative alla corretta posa non erano facilmente reperibili come al giorno d'oggi o in tempi di estrema diffusione di mentalità di massimizzazione dei profitti con conseguente riduzione al minimo dei costi di posa in opera.

Sistemi di questo tipo possono presentare, dunque, patologie di piccola o media entità, sulle quali è necessario intervenire con manutenzioni di diverso genere, che possono andare dalla semplice sanitizzazione superficiale ad interventi più drastici come il peeling (rimozione per strappo) dello strato rasante. In alcuni

casi è possibile intervenire mediante il metodo del raddoppio del sistema, da eseguire esclusivamente per incrementare il potere isolante dell'edificio laddove il sistema esistente risulti idoneo, a seguito di specifiche valutazioni; in altri casi ancora, sarà invece necessario intervenire con la demolizione e una nuova installazione. Nella pratica comune, le possibili tipologie di degrado che posso riscontrarsi sui sistemi di isolamento a cappotto sono:

- Presenza di alghe e muffe
- Fessurazioni
- Danni e rotture di tipo meccanico
- Difetti estetici
- Distacco dell'intonaco
- Aumento della conducibilità termica

Le normative internazionali impongono, per il bene della nostra salute, limiti alle quantità di biocidi che possono essere utilizzati all'interno dei rivestimenti ed inoltre tali biocidi vengono, con il tempo, disciolti dall'acqua piovana fino ad azzerare la protezione dai microrganismi, quindi in sistemi del genere è comune trovare superfici attaccate dalle muffe. I microrganismi che principalmente prendono possesso delle nostre superfici murarie sono *alghe e funghi (muffe)*, organismi con caratteristiche e necessità diverse: unico fattore comune indispensabile per il loro sviluppo è l'acqua o, più correttamente, l'umidità. Per limitare quanto più possibile lo sviluppo di questi, sono consigliati alcune procedure che mirano ad uno smaltimento delle acque piovane più efficiente. L'evitabile crescita fungina può essere risolta con un consistente lavaggio delle superfici con appositi sanitizzanti e successivamente prevedere una tinteggiatura con pitture silossaniche, che garantiscono un'elevata idrorepellenza.

Le dilatazioni igrotermiche dei pannelli isolanti possono portare a *fessurazioni superficiali* del sistema in caso di materiali non idonei (es. pannelli ad alta densità, rasanti o rivestimenti non compatibili con l'isolante) o applicazione mal eseguita (es. reti non sovrapposte o non correttamente annegate, eccessiva quantità di rasante). Le fessurazioni, oltre ad essere un difetto estetico sgradevole, possono favorire l'accumulo di muffe. Le possibili forme di fessurazioni riscontrabili posso essere:

- *Microfessurazioni*, sono fessure dovute più frequentemente al ritiro essiccativo dei materiali, si presentano già nei primi mesi di vita del sistema isolante e hanno una dimensione inferiore ai 0,2 mm; poiché non vengono considerate un difetto tecnico de sistema, esse non necessitano di una manutenzione urgente se non per fini estetici;

- *Cavillature e Crepe*, fessure che hanno una dimensione maggiore di 0,2 mm, per le quali possono esistere rischi di infiltrazione d'acqua e di conseguente danneggiamento del sistema isolante. Sono in maggior parte causati da difetti di posa e progettazione del Sistema. A volte, inoltre, si possono riscontrare

quando l'isolamento a cappotto applicato utilizza prodotti non coerenti ad un Sistema in kit;

- *Fessure strutturali*, ovvero fessure che sono dovute per effetto di cedimenti o assestamenti dell'edificio o di parti di esso.

Operazioni di ripristino sono da valutare caso per caso, a seconda della tipologia del fenomeno fessurativo. Tra le varie possibilità di intervento possono eseguirsi: se le fessurazioni sono di lieve entità (microfessurazioni) posso facilmente eliminarle mediante l'applicazione di finiture (es. specifiche pitture) aventi caratteristiche in linea con quanto presente in opera al fine di non alterare le proprietà del sistema stesso; per uno stato evolutivo più avanzato della patologia, come ad esempio in caso di distacco del rivestimento o di una parte della rasatura armata, dovrà essere trattato con maggiore attenzione e valutato caso per caso. La valutazione della casistica può portare a manutenzioni più semplici, come il ripristino del rivestimento a spessore, o più gravose, come la rimozione tramite peeling della rasatura armata.

I *danni e rotture di tipo meccanico* del sistema sono eventi dovuti a piccoli urti che possono verificarsi sulla superficie del sistema a seguito, per esempio, di grandinate. In caso di danneggiamento da urti superficiali, sarà possibile intervenire localmente, andando a verificare lo stato di integrità della rete d'armatura e l'eventuale presenza di infiltrazioni che abbiano compromesso la pannellatura sottostante; asportare parte della finitura e dello strato più superficiale di rasante attorno alla lacuna e procedere mediante rappezzi; applicare uno strato di finitura uniformante su tutta la superficie.

Nei riguardi dei *difetti estetici*, questi risultano di difficile risoluzione, connessi a errori grossolani spesso commessi da applicatori inesperti o disattenti. Questi generalmente si manifestano, in "bollini" che compaiono sul cappotto finito in corrispondenza dei tasselli o delle strisce che vengono evidenziate in corrispondenza delle fughe dei pannelli isolanti. Questi difetti, derivanti dall'accumulo di malta rasante in alcuni punti (tasselli troppo schiacciati nell'isolante, pannelli non correttamente accostati), sono conseguenza di assorbimenti d'acqua e dilatazioni differenti. Un peeling sarebbe solo dannoso e poco risolutivo: una nuova applicazione di rasante e di una finitura altamente idrorepellente (rivestimento silossanico) è nella maggior parte dei casi la soluzione migliore, ma è da prendere in considerazione la possibilità che tale intervento non sia sufficiente, perché in casi particolarmente critici continuerei ad avere dei punti con caratteristiche e comportamenti differenti dal resto della facciata. Un'altra tipologia di difetto estetico, è lo scolorimento generato dalla perdita del colore originario della finitura, degrado che comunque non investe aspetti prestazionali del Sistema ma si riferisce alla sola tenuta della pigmentazione del colore, generata di norma da raggi solari. Questo tipo di difetto si accentua con l'utilizzo di colori scuri che portano ad un surriscaldamento del sistema, per cui la scelta del colore è fondamentale per garantire una bassa perdita di colore, ma un colore corretto favorisce anche una corretta riflessione per limitare il surriscaldamento delle facciate.

Capitolo 4: Stato dell'arte sull'analisi del degrado degli ETICS

Nell'ambito degli studi sulla durabilità di un sistema di isolamento termico a cappotto, il cui iniziale impiego risale a circa gli anni 70, sono stati condotti diversi studi sull'analisi del degrado degli ETICS.

Si riporta di seguito una attenta analisi di tutti gli studi più significativi rispettivamente su casi reali e su sperimentazioni di laboratorio, relativi alle valutazioni della durabilità degli ETICS, una tecnologia di recente impiego.

Nel panorama di ricerche nazionali ed internazionali le maggiori ricerche che analizzano la durabilità del sistema possono essere suddivise in due grandi macro famiglie di studi.

L'una analizza reali casi studio di edifici esistenti, indagandone le cause di degrado o di anomalie.

L'altra tipologia di ricerca, invece, esplora, tramite test di laboratorio, le prestazioni di durabilità o il degrado superficiale di campioni costituiti da muratura ed il classico isolante termico con rivestimento finale esterno. Quindi nella prima tipologia, parliamo di valutazioni sperimentali su campo (in situ); nel secondo caso si parla di cicli di invecchiamento applicato a campioni di ETICS (in laboratorio).

4.1 Reportage sugli studi condotti sull'analisi del degrado dei casi reali di ETICS

In questa sezione si analizzano gli studi e le ricerche che avviano indagini statistiche su casi reali di edifici esistenti trattati con sistemi di isolamento termico a cappotto ETICS.

Precedenti ricerche avevano analizzato contesti climatici differenti e quindi stress ambientali differenti per gli ETICS.

Per la maggior parte di questi studi sul campo, si tratta di indagini visive statistiche sulle diverse tipologie di patologie che si possono riscontrare sugli ETICS.

Tra questi, di particolare interesse sono le ricerche presso l'università di Porto [9]. Lo scopo di questo studio è studiare il degrado dello strato di finitura degli ETICS: la ricerca è stata effettuata su due edifici situati in Portogallo e su questi sono stati creati dei report sulle patologie degli ETICS da inserire sul catalogo *PATORREB*.

The Building Pathology Study Group della facoltà di ingegneria dell'Università di Porto (FEUP) ha creato un sito web dove gli utenti possono consultare i rapporti sulle patologie afferenti a diversi elementi costruttivi, raccolti in un catalogo denominato *PATORREB*. Il sistema di isolamento preso in considerazione, comprende lastre isolanti prefabbricate in XPS (polistirene espanso estruso), incollate al paramento murario; intonaco di base con rete di rinforzo in fibra di vetro e intonaco di finitura a base acrilica. Lo studio è stato condotto su due facciate, ovvero una prima facciata situata al piano terra, appartenente ad un primo edificio esposto ad EST ed una seconda facciata situata

al primo piano, appartenete ad un secondo edificio esposto ad OVEST. In particolare si è analizzata, tramite indagine visiva, la formazione di crepe sull'intonaco di finitura del sistema isolante, le quali sono dovute principalmente: allo scarso fissaggio dei pannelli isolanti sul supporto, al posizionamento non corretto dei profili di partenza e di quelli laterali, al posizionamento errato della rete di rinforzo, allo spessore inadeguato dell'intonaco di base e di finitura e utilizzo di colore scuro per la tinteggiatura. Si è osservato che le crepe interessavano solo lo strato di finitura ma non il supporto. Altra analisi è stata condotta sul comportamento termo-igrometrico della muratura, prendendo in considerazione: le condizioni climatiche, le caratteristiche dei pannelli isolanti e quelle del supporto e dello strato di finitura. Dalle analisi si è concluso che le diverse proprietà dei pannelli isolanti in XPS, in termini di coefficiente di dilatazione termica e rigidità e il diverso coefficiente di dilatazione termica dello strato di finitura, unitamente alle condizioni climatiche hanno portato alla comparsa di crepe sulla superficie esterna del sistema isolante. Infine, è stato creato un catalogo delle patologie degli ETICS, come in *Fig.10*. Tale catalogo è stato creato andando ad analizzare 146 edifici situati in Portogallo, costruiti tra il 1989 e il 2008.

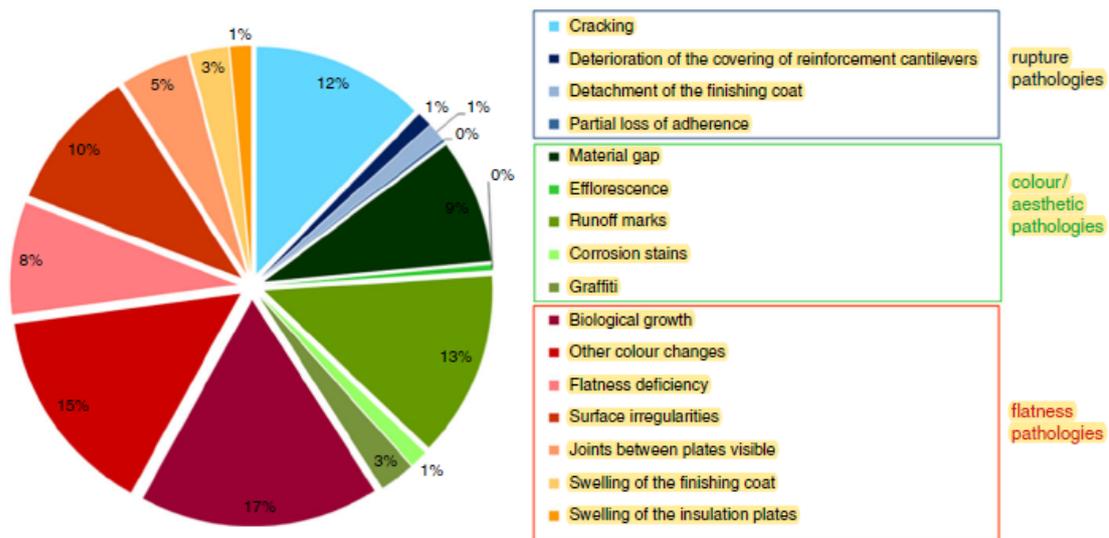


Figura 10 – Patologie degli ETICS

L'obiettivo principale dello studio era l'analisi del degrado della finitura degli ETICS e quindi, per le facciate esaminate sono state create una serie di schede di diagnosi riguardanti le patologie riscontrate singolarmente sulle facciate, ovvero sulle diverse fessurazioni dello strato di finitura degli ETICS, così come riportato a titolo esemplificativo in *Fig.11* [9].

Exterior Wall – Thermal Expansion
CRACKS ON THE EXTERIOR RENDER OF AN ETICS ASSOCIATED WITH THERMAL INSULATION JOINTS

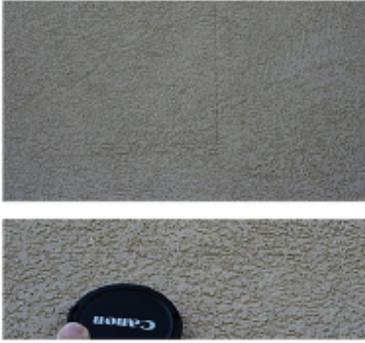
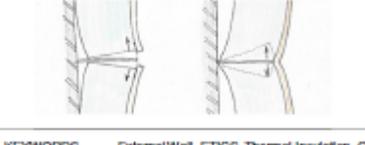
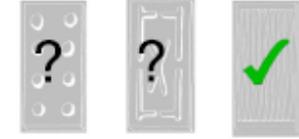
<p>DESCRIPTION OF THE DEFECT</p> <p>Cracks on the exterior render along the thermal insulation joints of an ETICS system with XPS insulation.</p> 	<p>SURVEYS AND OBSERVATIONS</p> <p>Two surveys were conducted to identify the characteristics of the applied layers and analyse the observed cracks.</p> <p>The support consisted of brick masonry and the cracks coincided with the thermal insulation joints. The ETICS system comprises:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Spot bonding of the thermal insulation to the support; – Thermal insulation plates (XPS) with 40 mm thickness; – Base coat with a thickness between 2.4 and 2.9 mm, with a reinforcing fiberglass mesh with 5x5 mm²; – Thin acrylic-based coat with an average thickness of 1.5 mm. 
<p>CAUSES</p> <p>The origin of the crack in the thermal insulation joints is mainly due to the combination of two characteristics of the thermal insulation: stiffness and thermal expansion coefficient, weather conditions and bonding process.</p> <p>The temperature gradient at the exterior surface and the outer thermal insulation surface can vary by more than 40°C, between summer and winter, and above 25°C, on a typical summer day. The inner face of the thermal insulation plate has an almost stable temperature. Considering the thermal expansion coefficient of cellular plastic is $7 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, i.e., about 5 times higher than the render system, the insulation plates deform and bend the outwardly, during the day, which generates tensions and, consequently, the cracks observed. The fact that the bonding between the support and the insulation is not continuous aggravates the phenomenon. If the thermal insulation boards had a lower stiffness value, the deformation and the pathology would have been minimized.</p> 	<p>RECOMMENDATIONS</p> <p>The thermal insulation materials should be selected according to the climate with an adequate stiffness and compatible with the properties of the reinforced render. A continuous bonding may be required for certain conditions.</p> 
<p>KEYWORDS External Wall, ETICS, Thermal Insulation, Cracks</p> <p>AUTHORS Eng.ª Sara Stingil de Freitas / Prof. Vasco P. de Freitas / Eng.ª Andreia Mota Miranda</p>	

Figura 11 – Cracks on the exterior render of an ETICS associated with thermal insulation joints

Ancora in Portogallo, un altro studio di particolare interesse è stato un sondaggio statistico sulle patologie con la relativa diagnosi e il possibile ripristino degli ETICS. Partendo dallo sviluppo di un sistema di ispezione e di diagnosi che permetta un'accurata indagine statistica che possa dare indicazioni sulle più diffuse patologie riscontrabili negli ETICS realizzati in Portogallo, si arriva alla creazione di elenchi di classificazione delle anomalie, delle cause più probabili, dei metodi di diagnosi e di tecniche di riparazione/manutenzione. La raccolta di questi dati è avvenuta attraverso il lavoro sul campo sulla base di uno sondaggio statistico, che consiste nell'ispezione visiva di 146 facciate con rivestimento ETICS per un totale di 14 edifici, situati in varie aree del Portogallo e invecchiati naturalmente da 3 a 22 anni.

Lo studio ha inoltre rivelato i principali problemi sensibili del sistema di rivestimento durante la sua vita utile, evidenziando l'importanza di un corretto piano di manutenzione. Lo scopo di questa ricerca è quello di sensibilizzare e di implementare metodologie per l'ispezione, la diagnosi e la riparazione di ETICS e un più frequente monitoraggio delle prestazioni. Sulla base dei dati

raccolti, mediante ispezione visiva, è stata condotta un'analisi statistica sulle patologie che si presentano nei sistemi di isolamento ETICS con lo scopo di valutare i parametri per i quali il sistema risulta più sensibile al fine di ridurre al minimo i processi di degrado. Dall'analisi si evince che la maggiore percentuale di anomalie, riscontrate sulle 146 facciate, rientra nel gruppo delle anomalie estetiche, come in Fig.12, quali alterazione cromatica della tinteggiatura, presenza di alghe e muffe, segni dovuti alle acque di deflusso, anomalie che rappresentano comunque l'inizio di ben più serie patologie che possono andare col tempo ad alterare le prestazioni del sistema ETICS.

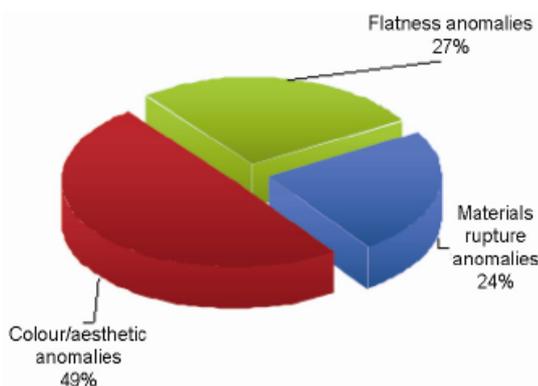


Figura 12 – Schema di percentuale di anomalie rilevate

Inoltre, come evidenziato nella Fig.12, sussistono molteplici cause che portano al degrado degli ETICS; occorre, quindi, una corretta manutenzione, che deve includere l'ispezione periodica e la diagnosi del sistema, per risolvere i problemi che si presentano in servizio e controllare il tasso di degrado del sistema.

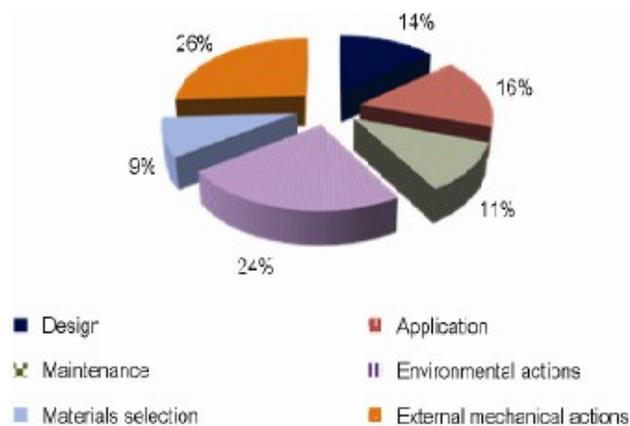


Figura 13 – Contributo di ciascun gruppo di cause che portano al degrado degli ETICS

In particolare, la Fig.13 mostra che il 39% delle anomalie degli ETICS può essere evitata con una progettazione (14%) e un'applicazione adeguata (16%) e un'altrettanta adeguata scelta dei materiali (9%); inoltre l'attuazione di un piano di ispezioni periodiche e la manutenzione aiuta a prevenire il degrado precoce dovuto ad azioni meccaniche ambientali ed esterne durante la vita di esercizio; una scelta ed una applicazione corretta del rivestimento potrà evitare le alterazioni cromatiche della finitura.

Un'altra considerazione che viene riportata è che all'ispezione visiva dovrebbe essere accoppiato un metodo d'indagine più analitico per avere una diagnosi completa. Tra i metodi diagnostici più diffusi, si suggerisce di utilizzare la termografia ad infrarossi e il metodo della misurazione dell'umidità da contatto. In conclusione, nella ricerca si elencano le cause più frequenti delle anomalie riscontrate sulle facciate esaminate, ovvero l'accumulo di sporcizia, l'umidità della condensa superficiale e l'azione della pioggia battente; questi ultimi sono poi ricompresi in macro-gruppi di cause che si sviluppano più frequentemente, ovvero in definitiva, le azioni meccaniche dovute a fattori esterni e le azioni dovute a fenomeni ambientali. Una parte delle anomalie degli ETICS possono essere evitate attraverso una corretta progettazione, una corretta applicazione e con la scelta dei materiali e tecniche di riparazione più frequenti, che agiscono in primis sulla superficie del sistema (attraverso una pulizia ed applicazione della protezione superficiale) e successivamente quelle che agiscono sul rivestimento (con enfasi sulla sostituzione parziale/totale); è stato valutato che in minima parte (ovvero solo un quinto delle volte) è necessario intervenire drasticamente con la correzione degli elementi geometrico-costruttivi del sistema [10].

Di significativo interesse anche gli studi condotti dalle università di Tallinn e Berlino che attraverso un quadro metodologico propone una metodologia per classificare i fattori di degrado in sito e fornire un numero di priorità del rischio. Sulla base dei requisiti tecnici stabiliti per i prodotti da costruzione, i fattori di degrado vengono classificati utilizzando una forma modificata di *Failure Mode Effects Analysis (FMEA)*; la metodologia fornisce uno strumento di valutazione della significatività per identificare i fattori di degrado in fase di costruzione. L'intenzione è quella di valutare la rilevanza di ciascun fattore di degradazione (*DF*) in base al suo significato tecnico, la probabilità di accadimento e la possibilità di rilevazione. Scoprendo l'effetto delle attività sul posto, sarebbe possibile evitare errori durante il processo di costruzione che porta al degrado anomalo dell'involucro dell'edificio. Lo strumento sviluppato consente a clienti, a supervisori e costruttori di focalizzare la loro attenzione sulle attività in loco più rilevanti per aumentare l'economia a lungo termine e i benefici sociali.

La tecnologia di costruzione in loco è guidata da requisiti tecnici obbligatori, stabiliti per la prestazione del sistema o per il processo di costruzione. Precedenti lavori, hanno rivelato che vi sono tre principali tipi di regolamenti che disciplinano il processo di costruzione:

- atti giuridici;
- norme nazionali, comunitarie e armonizzate;
- certificati e linee guida descrittive dei produttori comunemente usati.

L'organizzazione europea per le approvazioni tecniche ha pubblicato linee guida specifiche nell'*EAD 040083-00-0404 (ex ETAG 004)* per i produttori di ETICS, che definiscono specifiche e requisiti di prestazione misurabili per il sistema e i suoi componenti. In questa ricerca, la valutazione dei requisiti

essenziali degli ETICS è descritta sulla base delle seguenti otto categorie:

- resistenza meccanica e stabilità;
- umidità e protezione dagli agenti atmosferici;
- protezione dal rumore;
- sicurezza in caso d'incendio;
- resistenza termica;
- durabilità a lungo termine;
- capacità di bypassare le tensioni;
- protezione dal degrado.

Tali categorie sono influenzate dalle diverse attività d'installazione in loco. Ogni categoria ha un impatto sulla qualità generale della facciata e le carenze influiscono sulle prestazioni del sistema. Per valutare la gravità del degrado, viene proposta una valutazione dell'impatto per ciascuna categoria. L'elenco dei fattori di degrado (*DF*) è compilato utilizzando una serie di prove e di analisi dei produttori, studi sui materiali realizzati in laboratorio, studi sul campo che hanno identificato le cause visibili di degrado. In particolare, i fattori di degrado sono classificati in base agli strati del sistema: strato di supporto, adesivo, isolamento, ancoraggio meccanico, rasatura con rete di rinforzo e strato di finitura. Per classificare e valutare il significato di ciascun guasto, viene utilizzata la metodologia di valutazione del rischio Failure Mode Effects Analysis. La FMEA è utilizzata principalmente nella produzione, ma è anche applicabile nel settore delle costruzioni al fine di identificare guasti e gestire i rischi. Lo strumento di gestione del rischio proposto consente l'identificazione, la quantificazione, la definizione delle priorità e valutazione del rischio. L'obiettivo è quello di analizzare e ridurre i rischi e migliorare l'affidabilità durante il processo di costruzione. Ogni fattore di degrado è descritto con una potenziale causa di guasto e un potenziale effetto di degrado e il sistema di valutazione consiste nel valutare la severità rispetto alle prestazioni del sistema, la probabilità di accadimento e la rilevabilità; viene quindi determinato il numero di priorità del rischio come:

$$RPN_{DF,e} = SV_{DF,e} \times OV_{DF,e} \times DV_{DF,e}$$

$RPN_{DF,e}$ Risk Priority Number

$SV_{DF,e}$ Severity Value

$OV_{DF,e}$ Likelihood of Occurrence Value

$DV_{DF,e}$ Detectability Value

In definitiva, gli ETICS devono soddisfare specifici criteri tecnici di prestazione. Piccole modifiche nelle attività in loco durante il processo d'installazione possono alterare le prestazioni tecniche, con conseguenze che comportano:

- deterioramento del sistema
- riduzione dell'efficienza energetica
- riduzione della durata della facciata.

Viene quindi proposta questa metodologia, che consente di classificare la pertinenza delle attività. Il framework mette in relazione requisiti tecnici specifici con i fattori di degrado, consentendo di quantificare il danno tecnico ed il rischio, quest'ultimo influenzato anche dalla probabilità di accadimento e dalla possibilità di rilevare il difetto durante la fase di costruzione [11].

Una ricerca che mira ad aumentare la qualità di costruzione del sistema ETICS, rivelando i fattori di degrado in loco propone, invece, una classificazione del degrado degli ETICS per avere un miglioramento della qualità del sistema. Il processo di fissaggio degli ETICS è guidato da numerosi regolamenti e linee guida; viene, quindi, creato un elenco di fattori di degrado (*DF*) per classificare i processi d'installazione in situ. Sulla base dei requisiti di controllo di qualità stabiliti dalle linee guida dei produttori, è stato condotto uno studio sul campo, per rivelare ulteriori carenze del processo di posa in opera in Estonia. Sono stati selezionati sette edifici e le osservazioni si sono ripetute quattro volte in ciascun cantiere durante la stagione autunnale, che risulta essere il periodo più problematico per le facciate. Sebbene gli strati del sistema isolante siano stati installati e rivestiti rapidamente, lo studio sul campo ha permesso di analizzare nel dettaglio le diverse fasi del processo d'installazione.

I fattori di degrado rilevati (*DF*) sono classificati in base alla stratigrafia degli ETICS:

- *substrato*: la parete esterna dell'edificio che costituisce il supporto su cui si appoggia il sistema isolante dovrà essere in grado di resistere ai relativi carichi ed è responsabile in larga misura della stabilità o delle caratteristiche adesive del sistema. I possibili fattori di degrado rilevanti in cantiere per il substrato sono riassunti nella tabella 3.

ID	Degradation Factor
S1	Substrate is covered with grease/oil
S2	Substrate is covered with dust/dirt
S3	Substrate is covered with biological growth
S4	Substrate is covered with paint or other material which can chemically react with adhesive
S5	Substrate is under required load bearing capacity
S6	Substrate has defects, detached areas or is uneven
S7	Smooth substrate surface or the adhesive is not suitable
S8	Substrate has low humidity
S9	Substrate is wet; internal moisture level is high

Tabella 3 – Fattori di degrado del substrato

- *strato adesivo*; la dimensione dell'adesivo deve essere compresa tra il 40% e il 100% a seconda del tipo di apparecchio (incollato e/o fisso) e materiale isolante. I possibili fattori di degrado sono riassunti nella seguente Tabella 4.

ID	Degradation Factor
D1	Missing insulation on the edges (polystyrene)
D2	Missing insulation in the centre (polystyrene)
D3	Insufficient adhesive
D4	Adhesive not rubbed into insulation plate (mineral wool)
D5	Adhesive is not treated with notch towel
D6	Increased area covered with adhesive
D7	Working time of the adhesive is exceeded
D8	Lack of pressure during application of insulation plates
D9	Large unevenness of the adhesive layer

Tabella 4 – Fattori di degrado dello strato adesivo

- strato isolante; le caratteristiche del materiale isolante influenzano principalmente la trasmittanza termica della facciata e il degrado può ridurre in misura significativa la stabilità del sistema e la capacità di protezione dal degrado e dall'invecchiamento. Patologie causate dalla cattiva posa possono rilevarsi a causa di un periodo di asciugatura troppo breve, un utilizzo di materiale umido o altre carenze durante le attività di applicazione. I possibili fattori di degrado dello strato isolante sono riassunti nella seguente tabella in tabella 5.

ID	Degradation Factor
I1	Material is exposed to UV-radiation for a longer period
I2	Insulation plates are installed shortly after manufacturing
I3	Wet insulation plates
I4	Continuous gaps between substrate and insulation material (opened to air entry)
I5	Insulation plate vertical joints are crossed or too close
I6	Comers of the openings have crossed joints
I7	Insulation plates joint width is too wide or not aligned
I8	Height difference between insulation plates
I9	Broken areas of the insulation plates are not filled
I10	Missing or too narrow fire reluctant areas

Tabella 5 – Fattori di degrado dello strato isolante

- ancoraggio meccanico; i requisiti prestazionali stabiliti per gli ancoraggi meccanici possono presentare anomalie in presenza di un ancoraggio non idoneo o di una applicazione non corretta. I possibili fattori di degrado sono riassunti in tabella 6.

ID	Degradation Factor
A1	Increased diameter of drilled anchor hole
A2	Decreased diameter of anchor plate
A3	Decreased amount of anchors
A4	Increased amount of anchors
A5	Location is not as foreseen
A6	Anchor plate is installed too deeply into insulation material
A7	Anchor plate is placed too high
A8	Amount of anchors is not increased in the corners
A9	Unsuitable anchor type
A10	Hole of the anchor is not cleaned

Tabella 6 – Fattori di degrado del sistema di ancoraggio meccanico

- strato di rinforzo (rasatura e rete di rinforzo); le sollecitazioni che si riscontrano nel sistema ETICS vengono trasmesse allo strato di rinforzo; la capacità di trasmettere le sollecitazioni può presentare anomalie durante una non corretta applicazione della malta. Secondo gli studi, i principali fattori che possono causare patologie nello strato di rinforzo sono riassunti nella tabella 7.

ID	Degradation Factor
R1	Too smooth external layer of the insulation plate
R2	Decreased overlap of the mesh
R3	Folded mesh
R4	Missing diagonal mesh
R5	Mesh not filled with mortar, unsuitable placement in the layer
R6	Thin mortar layer
R7	Layer is not applied in wet to wet conditions
R8	Not compatible mesh is used

Tabella 7 – Fattori di degrado dello strato di rinforzo

- *strato di finitura*; lo strato esterno ha sia una funzione estetica sia una funzione di protezione dagli agenti atmosferici. Le condizioni naturali comprendono una combinazione agenti atmosferici in grado di generare degrado: vento, pioggia, inquinanti, umidità relativa, temperatura e radiazione solare. Nello studio le principali anomalie rilevate nello strato di finitura sono riassunti nella seguente tabella 8.

ID	Degradation Factor
F1	Missing primer
F2	Reinforcement mixture or primary coat is not cured
F3	Thick render layer/ differences in thickness
F4	Thin render layer (thinner than single grain diameter)

Tabella 8 – Fattori di degrado dello strato di finitura

In conclusione, ogni strato che compone il sistema ETICS deve soddisfare requisiti specifici e le prestazioni del generico strato possono essere migliorate grazie ad un'opportuna selezione dei materiali, una corretta progettazione ed una corretta posa in opera. Gli errori commessi durante la posa in opera spesso causano difetti sulla facciata ETICS o una ridotta efficienza termica del sistema. Per rivelare tali difetti, viene creato un elenco dei fattori di degrado degli strati degli ETICS, poiché ciascuno dei *DF* ha un impatto sulle prestazioni del sistema. Inoltre, rivelando i fattori di degrado in loco, è possibile valutare la pertinenza tecnica ed economica di ciascuno fattore. La conoscenza consente di migliorare la qualità del processo di posa in opera [12].

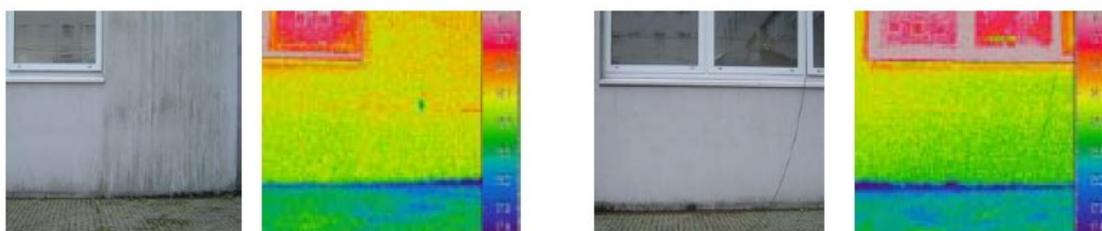
Lo studio evidenzia inoltre l'importanza della termografia per rilevare le patologie riscontrabili nei rivestimenti di finitura degli ETICS; la camera termografica ha il vantaggio di rilevare attraverso la radiazione dell'infrarosso l'insorgenza di patologie in corso non ancora visibili che potrebbero portare all'insorgenza di anomalie.

In alcuni studi [13] l'uso della termocamera permette di analizzare il degrado dello strato di finitura, che spesso è afflitto dalla comparsa di macchie, dovute alla crescita di alghe e muffe. Queste macchie compromettono l'aspetto estetico delle facciate, problema che si accentua se l'edificio è soggetto a scarsa manutenzione. È essenziale studiare le cause della crescita di alghe e muffe per comprendere il comportamento termo-igrometrico delle facciate dove sono presenti gli ETICS. Gli scambi di calore dinamici tra l'ambiente e i componenti dell'edificio e le variazioni di temperatura e di umidità relativa delle superfici delle pareti causate dalle radiazioni solari sono due aspetti importanti da considerare. Durante la notte, si verificano scambi di energia tra lo strato più esterno degli ETICS e l'atmosfera provocando un raffreddamento superficiale del sistema con la conseguente formazione di condensa e proliferazione di alghe e muffe.

La termografia che permette di misurare le temperature superficiali può essere uno strumento utile per comprendere le cause della condensa superficiale sugli ETICS. Le telecamere raccolgono le radiazioni infrarosse emesse dalla superficie, le quali vengono convertite in segnali elettrici e viene creata un'immagine termica che mostra la distribuzione superficiale della temperatura dell'elemento costruttivo. In questo processo, ogni colore rappresenta un intervallo specifico di temperatura.

Lo studio ha permesso di visualizzare il processo di bagnatura e asciugatura dei campioni, poiché l'acqua di evaporazione è una reazione endotermica che induce il raffreddamento superficiale locale.

Questo esperimento, eseguito su campioni di edifici esistenti rivestiti da sistemi ETICS, ha evidenziato che l'apparecchiatura termografica rileva problemi di condensa, soprattutto in corrispondenza di alghe e muffe. Le immagini termiche mostrano che le aree con alghe e muffe presentano variazioni di temperatura superficiale più elevate; al contrario, le aree dove non si riscontrano anomalie visibili presentano una temperatura superficiale più uniforme.



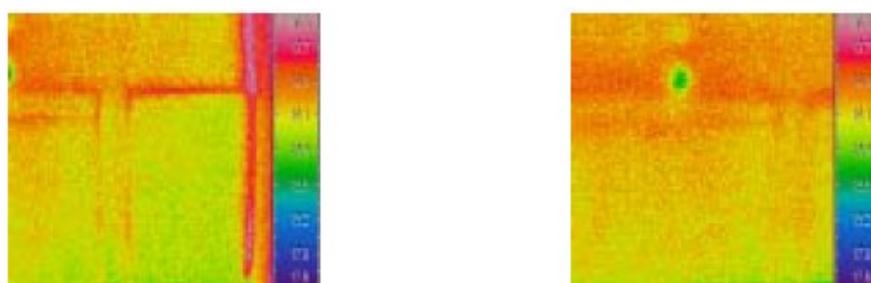
Zona che presenta alghe e muffe superficiali

Zona che non presenta problemi visibili

Figura 15 – Immagini termografiche di una facciata coperta da ETICS esposta a nord

Con la tecnologia della camera termografica si è potuto osservare i giunti tra i pannelli isolanti non perfettamente accostati ed il degrado degli strati esterni causati da urti meccanici come in Fig.15. È da ritenersi rilevante considerare questo aspetto in quanto tali difetti celano variazioni di temperatura superficiale responsabili di condensa localizzata causa di futuri danni visibili al sistema ETICS. Inoltre, sono stati rilevati anche danni dovuti ad impatti meccanici.

In tal senso si è reso evidente che la sperimentazione dovesse tenere in considerazione anche un metodo di valutazione riguardante gli impatti meccanici casuali, sviluppando dei test di performance di urti o impatti da corpi rigidi sui campioni ETICS.



Giunti di accostamento tra i pannelli isolanti

Degrado causato da impatti meccanici

Figura 16 – Immagini termografiche di una facciata ETICS

In conclusione, la ricerca condotta presso il Building Physics Laboratory (LFC) ha rivelato che l'emissività (il rapporto tra energia irraggiata dal corpo e quella che irraggerebbe se fosse un corpo nero, avendo fissato una temperatura assoluta) influenza le misurazioni termografiche e può limitare potenziali applicazioni [13].

Indagini termografiche sono state effettuate sulle facciate di un grosso complesso residenziale di edifici presso Ponticelli (Napoli) [14], oggetto di un grande intervento di efficientamento energetico mediante realizzazione di un sistema di isolamento termico a cappotto. Dal 2010, anno dell'applicazione del sistema ETICS su più di 25.000 mq di facciata, è stato monitorato il degrado senza registrare alcun deterioramento visibile se non per piccole crepe localizzate (vedi figura 17) e per piccole variazioni di temperatura registrate nello spettro dell'infrarosso in corrispondenza di alcuni accostamenti di pannelli o di anomalie causate da davanzali di infissi (figura 18) [14].

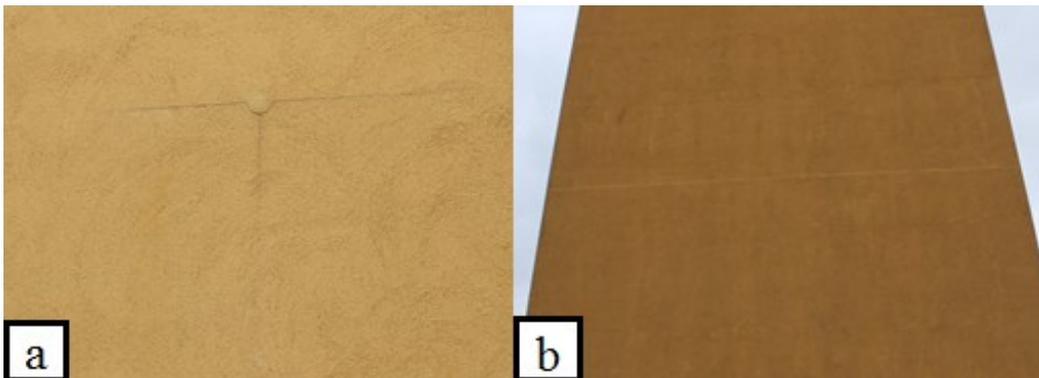


Figura 17 – Foto facciate cieche presso condominio a Ponticelli: a) Crepe a forma di croce in corrispondenza dell'ancoraggio meccanico; b) Crepe lineari in corrispondenza del contatto tra pannelli adiacenti.

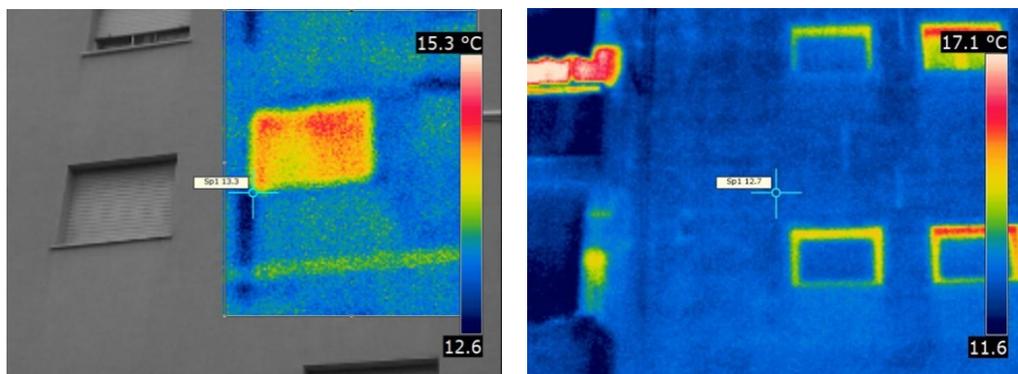


Figura 18 – Termografie presso condominio a Ponticelli

4.2 Reportage sugli studi condotti sull'analisi del degrado degli ETICS invecchiati artificialmente in laboratorio

La ricerca ha analizzato una seconda tipologia di studi, quelli effettuati in laboratorio mediante programmi sperimentali che vedono l'impiego di apparecchiature e di tecniche più sofisticate.

Il medesimo obiettivo di definire i fattori di degrado e stimare la durabilità dei sistemi ETICS, già analizzato nei casi reali nel capitolo precedente, viene ora riproposto nelle simulazioni effettuate in laboratorio.

In laboratorio è possibile valutare dati quantitativi e qualitativi più precisi rispetto alle analisi eseguite in sito descritte nei precedenti studi.

In queste tipologie di sperimentazioni, si è riprodotta una serie di cicli di invecchiamento per simulare l'evoluzione e la trasformazione naturale alla quale il sistema è sottoposto nel corso degli anni.

Gli studi prevedono programmi di cicli di invecchiamento accelerato che riproducano gli stress climatici dell'ambiente; in particolare si studiano i fattori ambientali estremi in grado di avere effetti sul degrado degli ETICS (si parte dall'idea di escludere le parti dell'anno non in grado di generare un "invecchiamento" nel sistema).

Tali cicli variano in funzione del clima (località climatica) al quale si vuole far riferimento, ma apportano un notevole vantaggio dal punto di vista delle tempistiche necessarie per l'invecchiamento dei campioni; infatti non saranno più necessari i tempi di degrado naturale (almeno 10 anni) ma basteranno alcuni mesi.

Una prima ipotesi di studio condotta alla Silesian University [15], che si pone come obiettivo generale la valutazione della durabilità di generici componenti edilizi esposti ad ambiente atmosferico, ripropone la simulazione di agenti climatici mediante processi di invecchiamento accelerato tramite test di durabilità accelerata in camera climatica. L'apparato utilizzato per svolgere le sperimentazioni è una camera climatica a rotazione che simula diverse influenze climatiche tra le quali: radiazione solare UV, pioggia battente, basse temperature. Già in questa prima ipotesi si riesce a stabilire un metodo per la definizione del programma climatico simulato ritrovando una sorta di re-scaling factor valido per le zone della alta Silesia (Polonia). L'esperienza acquisita dagli studiosi [16] [17] [18] per arrivare a definire il rapporto tra il numero di cicli di invecchiamento accelerato e l'invecchiamento naturale hanno consentito di arrivare ad ottimi progressi in tal senso.

Per simulare una zona climatica mite, altri test accelerati in camera climatica sono stati condotti su campioni di vernici ruvide alla University of Technology di Kaunas [19]. Anche in questo caso i risultati sono stati confrontati con campioni reali invecchiati naturalmente, includendo però anche l'impatto dell'inquinamento atmosferico. La valutazione delle prestazioni si è basata sulle misurazioni a più riprese durante i cicli di invecchiamento delle proprietà di permeabilità all'acqua di rivestimenti di pitture.

Tali programmi sperimentali di invecchiamento accelerato hanno permesso la comparazione della durabilità relativa di materiali differenti senza prevederne però la vita utile di servizio. Tra questi di particolare interesse, perché applicate agli ETICS e non a differenti componenti edili, sono le sperimentazioni di laboratorio portate avanti a Trondheim alla Norwegian University of Science and Technology (NTNU) [20] le quali hanno il vantaggio dell'impiego di una macchina per l'invecchiamento accelerato (camera climatica) molto all'avanguardia. Questa sperimentazione è stata effettuata analizzando edifici esistenti situati in Norvegia per eseguire in laboratorio una simulazione del clima ottenuta tramite indagini sul campo.

A tal riguardo gli studi di Lisø sono stati molto utili per l'analisi dei contesti climatici di Norvegia, Germania e Finlandia e degli agenti atmosferici al quale sono sottoposti componenti dell'involucro edilizio [21] [22].

La parte relativa allo studio in sito, ha evidenziato le stesse problematiche citate precedentemente (capitolo 4.1), in cui la maggior parte del calo prestazionale dell'ETICS è dovuto ad errori di posa in opera e alla vulnerabilità di questo sistema nei confronti dell'umidità (il problema dell'umidità in stati come la Norvegia, caratterizzate da frequenti precipitazioni, risulta più evidente).

In questi casi, il sistema ETICS, a seguito di precipitazioni, tende a non asciugarsi efficacemente, formando crepe e generando altre debolezze sullo strato di finitura più esterno che potrebbero recare gravi danni in seguito alla penetrazione dell'umidità nell'isolante (ciò comprometterebbe la sua funzione). In laboratorio è stato eseguito su campioni un invecchiamento climatico artificiale accelerato degli ETICS su tre aree di prova attraverso 19 diversi sistemi di ETICS, di cui nove con EPS, sette con lana minerale e tre con isolamento in poliisocianurato (PIR). Inoltre, sono stati testati anche 11 sistemi con rivestimento su facciata ventilata. L'area di prova più grande è alta 2,4 m e larga 1,3 m e presenta una finestra all'interno; altri due campioni più piccoli non presentano alcuna finestra. L'esposizione climatica dell'area più grande è durata 28 giorni e lo scopo del test era esaminare i difetti associati alla finestra installata e la possibilità di fessurazione. Gli oggetti più piccoli (alti 0,7 m e larghi 0,6 m), invece, sono stati esposti a 18 e 48 settimane di cicli di invecchiamento accelerato. L'esperimento ha fornito importanti informazioni sui cicli di invecchiamento accelerato riprodotti e sulla risposta degli ETICS [20]. I cicli di invecchiamento artificiale sono stati effettuati utilizzando il metodo Nordtest NT Build 495:2000 nel simulatore climatico di SINTEF (Figura 24).

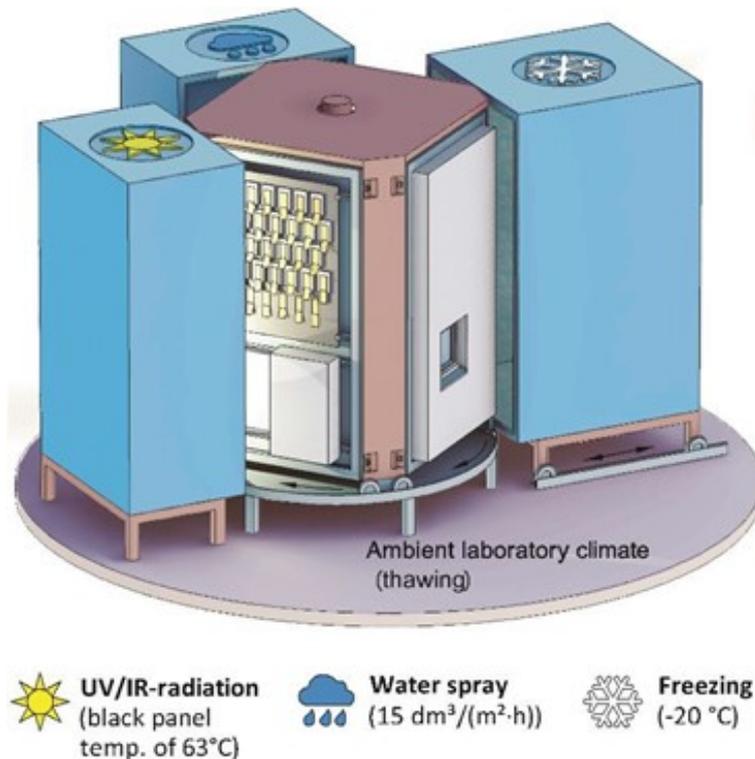


Figura 19 – Simulatore climatico SINTEF con quattro zone climatiche, rotazione in senso orario

L'obiettivo di questo metodo è quello di concentrare i singoli fattori climatici in modo che, in totale, producano un ciclo di agenti di stress climatico che diano risultati di degradazione simili all'esposizione naturale ma in un periodo di tempo molto più breve. Il metodo NT Build 495:2000 sottopone i campioni all'esposizione di luce UV, calore, acqua e gelo-disgelo, grazie ad un apparato in cui i materiali possono essere ruotati tra le quattro zone climatiche. Il tempo medio di esposizione è di un'ora in ogni zona climatica. Inoltre a seconda della zona è possibile definire diversi tipi di intensità per aumentare gradualmente l'esposizione dei campioni all'interno delle varie camere climatiche. Questo metodo è stato precedentemente studiato da approfonditi studi di Jelle [23], il quale aveva iniziato i propri studi ponendosi proprio il problema che spesso i componenti edilizi disattendevano le aspettative di vita utile stimata (Estimated service life) non soddisfacendo i requisiti specifici richiesti [24].

Anche questa ricerca [20] ha individuato la presenza di punti deboli nei componenti che compongono il sistema ETICS o nei dettagli di esecuzione durante la posa in opera. Come già evidenziato dai casi reali, la problematica più rilevante è stata la presenza di acqua all'interno del sistema.

In un contesto climatico come quello analizzato in Norvegia [25] sono state ipotizzate diverse soluzioni per risolvere i problemi relativi all'umidità.

Di seguito vengono riportate le raccomandazioni scaturite dalle sperimentazioni norvegesi:

- I punti più vulnerabili per un sistema di facciata sono i bordi/gli angoli. È imperativo usare profili d'angolo e scossaline di zoccolo che

funzionino bene con l'intonaco e che diano un rischio ridotto di fessurazione. La Figura 20 mostra un esempio di rinforzo d'angolo raccomandato che è stato sviluppato sulla base dei test di laboratorio e delle esperienze sul campo.

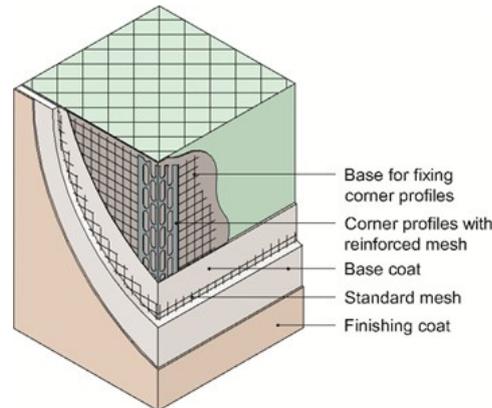


Figura 20 – Esempio rinforzo d'angolo

- L'omissione della scossalina dello zoccolo porta sempre a una grave esposizione all'acqua sul bordo dell'intonaco e a successivi danni da gelo. Allo stesso modo, un design insoddisfacente del bordo di gocciolamento della scossalina dello zoccolo impedisce all'acqua di scorrere via dall'edificio.
- Molti sistemi di intonaco richiedono l'applicazione di una vernice o di uno speciale strato di finitura. Per salvaguardare sufficientemente lo strato di base, è importante che il trattamento con vernice/finitura sia applicato anche al bordo inferiore dello strato di base (contro la scossalina dello zoccolo).
- Se i pannelli non sono posati vicini e allo stesso livello, le giunzioni tra i pannelli dell'isolamento termico possono portare a zone fessurate/deboli. Lo stesso vale se si lascia che i giunti della rete di armatura si sovrappongano ai giunti dei pannelli senza una generosa sovrapposizione.
- Le reti di armatura sono spesso posizionate troppo vicino allo strato di isolamento termico, limitando così l'efficacia della rete stessa, per cui è molto importante annegare bene la rete con posa e quantità corretta di malta.
- Le proprietà di invecchiamento dei sistemi con intonaco su EPS sono generalmente migliori di quelli con intonaco su lana minerale [26].

Una interessante ricerca svedese, comparando i risultati ottenuti con la ricerca norvegese caratterizzata da climi analoghi, ha potuto trarre ulteriori considerazioni. In Svezia, la ricerca sugli ETICSS di alcuni edifici ha confermato che la formazione di piccole crepe e fori è dovuta a danni da umidità, arrivando a raccomandare l'utilizzo di efficaci scossaline. Tuttavia, l'indagine svedese rivela un'allarmante incidenza di crescita di muffa nella

parte posteriore degli ETICS, che raramente si osserva in Norvegia (sia in sito che in laboratorio). Il motivo per cui si siano segnalati questi danni nel nord della Svezia non è spiegato, ma la campionatura di edifici in questa zona era limitata (soli cinque edifici) e i risultati potrebbero essere stati influenzati dall'esiguo numero di campioni considerati.

Sulla base di queste considerazioni e dei dati climatici relativi alla pioggia battente (le precipitazioni annuali, nonché la quantità e la direzione dominante della pioggia battente) lo studio norvegese ha identificato una classificazione climatica per cui il sistema ETICS è:

- "Consigliato" quando l'esposizione a pioggia battente è inferiore a 400mm/anno;
- "Non sicuro" quando l'esposizione a pioggia battente è inferiore a 600 mm/anno
- "sconsigliato" quando la pioggia battente è maggiore di 600 *mm/anno*.

Per cui precipitazioni superiori a 400 mm/anno necessitano di una maggiore attenzione ai dettagli costruttivi di esecuzione del sistema ETICS evitando la penetrazione dell'acqua piovana. Inoltre, in presenza di rivestimenti ventilati, l'ETICS mostra una maggiore resistenza contro i danni da funghi e alghe grazie ad una più rapida essiccazione della finitura esterna dopo l'esposizione da pioggia [27].

Le stesse anomalie riscontrate in numerosi ETICS hanno portato gli studi di Parracha et al a studiare la durabilità di tali sistemi concentrandosi sugli effetti dell'invecchiamento naturale registrati durante un arco temporale di un anno e dell'invecchiamento artificiale attraverso cicli igrotermici definiti dall' EAD 040083-00-0404 (cicli caldo/pioggia, cicli caldo/freddo). Sono stati eseguiti quindi test di assorbimento d'acqua, analisi della bio-suscettibilità (sviluppo di muffe) e delle proprietà della superficie (colore, lucentezza e rugosità) di 3 sistemi ETICS [28].

In seguito all'invecchiamento i risultati hanno mostrato una significativa perdita di idrofobicità superficiale, tracce di crescita di muffe, un sostanziale cambiamento di colore per tutti i sistemi confermando un'alterazione estetica. Tali risultati contribuiscono allo sviluppo di protocolli di invecchiamento artificiale in grado di simulare gli agenti atmosferici.

Tuttavia, ulteriori importanti condizioni ambientali urbane, come le radiazioni UV e gli inquinanti atmosferici, nonché il degrado biologico, non sono previste nella norma EAD 040083-00-0404.

Un ulteriore studio [29] si era reso quindi necessario per studiare gli ETICS sottoposti ad un innovativo processo di invecchiamento accelerato che riprende i cicli igrotermici dell' EAD 040083-00-0404 ampliando però con dei cicli di esposizione alle radiazioni UV e agli inquinanti atmosferici (SO₂); questo studio presenta i risultati di una sperimentazione che tratta diversi ETICS disponibili in commercio analizzando le performance con prove fisiche effettuate prima e dopo ogni ciclo di invecchiamento al fine di valutarne la

durabilità.

Diversamente da altri studi, queste ricerche evidenziano, dopo un brevissimo invecchiamento artificiale, un abbassamento della durezza e della lucentezza superficiale, un aumento della rugosità superficiale, il cambiamento di colore e persino un accenno di crescita biologica. Tutto ciò suggerirebbe un elevato degrado intrinseco del sistema, non confermato dalle altre ricerche della letteratura scientifica.

Altri studi molto rilevanti sono quelli portati avanti alla Kaunas University of technology con il metodo di prova di durabilità per gli ETICS, tradizionalmente usato in paesi con climi freddi e umidi del nord Europa. In questi luoghi vengono esaminate le principali esposizioni climatiche e il modo in cui queste impattano sul sistema; lo studio viene condotto in Lituania analizzando la temperatura dell'aria, le precipitazioni e l'intensità della radiazione ultravioletta (UV), sulla base della valutazione dei dati giornalieri registrati dalle stazioni meteorologiche. Inoltre, in questo studio vengono eseguiti diversi esperimenti riguardanti la durata dell'ETICS, utilizzando diversi metodi di prova. Lo scopo è esaminare ricerche precedenti che indagano sulla durata dell'ETICS, analizzare le principali esposizioni climatiche e definire come queste possono essere riprodotte ed applicate nelle condizioni di laboratorio. Per questo motivo si è cercato di scoprire la correlazione tra agenti atmosferici naturali ed accelerati, confrontando diversi studi in cui gli impatti climatici dei test accelerati erano abbastanza diversi. La maggior parte di questi studi si basava sul presupposto che l'aumento delle temperature e dell'irradiazione dell'acqua possono accelerare le reazioni responsabili dell'invecchiamento naturale. Questa analisi di confronto tra i diversi metodi ha evidenziato una serie di vantaggi e svantaggi. Riassumendo sorge una questione: perché tali agenti atmosferici, perché tali durate e ampiezze?

Molto spesso, le prove accelerate applicate nelle indagini sperimentali si basano sulla realizzazione di un complesso di condizioni climatiche estreme che cercano di riprodurre un "ambiente universale" e quindi potrebbero risultare non corrispondenti alle condizioni climatiche reali di una specifica località.

La stessa norma relativa agli ETICS, l'EAD 040083-00-0404, fa riferimento ad un generico contesto ambientale nord-europeo impiegandolo globalmente per tutti i contesti in cui si applica la norma.

Tendenza opposta suggerisce invece che, quando si modellano i cicli di invecchiamento accelerato, è necessario seguire metodi di prova appositamente studiati per la specificità climatica di una certa località per creare cicli conformi alle condizioni d'uso di una determinata zona.

Method	Simulation of climatic impact, °C / duration				Relative humidity, %	Observation of deterioration during/after the test	Equivalence to natural ageing	
	UV	Rain	Cold	Heat				
NT Built 495	+35 ± 5/1h +50 ± 5/1h +75 ± 5/1h	Spray 1/ (m ² h) (suggested) 15 ± 2/1h	-20 ± 5/1h	+23 ± 5/1h	50 ± 10	Visual evaluation	Not estimated	
J. Bochen	+60/1h	Spray with gusts/4h	-20/4h	with UV	-	open porosity and average pore radius of render	100 cycles equivalent to 1.5–2.7 years	
J. Bochen	+50/1h	Spray/0.25h	-20/1h	with UV	-	open porosity and average pore radius of render	100 cycles equivalent to 2 years	
B. Daniotti	Short-term	5 ± 2/1h Spray 1 l/(m ² h)	-20 ± 2/3h	+70 ± 2/1h	60 ± 5	Microscope analysis Water absorption Water vapour permeability Tensile bond strength of adhesive and base coat to insulator Render strip tensile IRT, SINA, SINb, TI CON RHst, degradation survey photos	Not estimated	
	Long-term							Should be developed
ETAG 004	Heat-rain cycles (80cycle)	-	+15 ± 5/1h Spray 1 l/ (m ² min)	-	+70 ± 5/3h	30	Impact resistance Bond strength Water vapor permeability	The whole service life
	Heat-cold cycles (5 cycles)	-	-	-20 ± 5/16h	+50 ± 5/8h	10	Visual evaluation	
	Freeze-thaw (30 cycles)	-	Immersion +23 ± 2/8h	-20 ± 2/16h	-	-	Bond strength Visual evaluation	

Tab.9 - Metodi accelerati secondo diversi studi

Su queste considerazioni, l'università di Kaunas ha definito un metodo di invecchiamento accelerato attraverso dati specifici del clima della zona, desunti dalla stazione meteorologica.

In laboratorio sono stati realizzati quattro campioni di ETICS, di dimensioni $200 \times 200 \times 50 \text{ mm}$, con differenti rivestimenti, uno acrilico, uno silicato, uno minerale e uno siliconico. Durante l'invecchiamento naturale, umidità relativa, radiazioni UV, velocità del vento e temperature sono state misurate da sensori, presso la stazione meteorologica dell'Institute of Architecture and Construction. Attraverso la modellazione della pioggia, durante i test di assorbimento, è stata misurata l'intensità di assorbimento dell'acqua e le curve di assorbimento dei vari campioni mostrano che dopo l'immersione dei provini di ETICS nell'acqua, l'intensità dell'assorbimento inizia a rallentare dopo circa 24 ore. Come mostra il diagramma di seguito i diversi rivestimenti hanno gradi di assorbimento d'acqua differente.

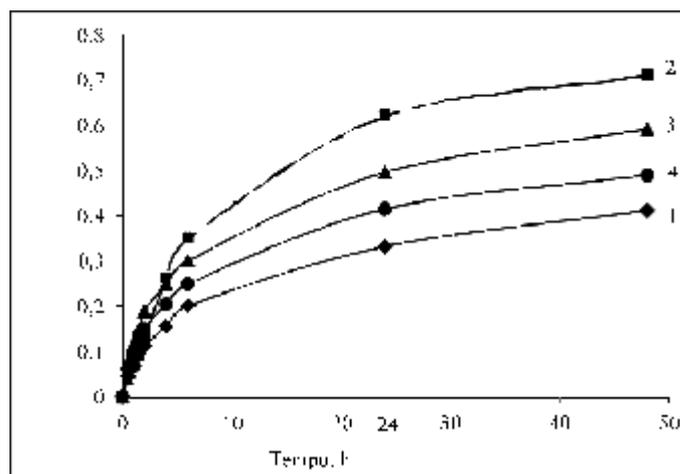


Figura 21 – Tassi di assorbimento superficiale d’acqua dei campioni ETICS: 1 – con rivestimento acrilico, 2 – con rivestimento in silicato, 3 – con rivestimento minerale, 4 – con rivestimento in silicone.

Successivamente sono stati modellati i cicli di invecchiamento accelerato sulla base dei dati climatici registrati in Lituania, dove le piogge hanno una durata media di circa 7 ore che si ripetono in media 16 volte all’anno.

Si è quindi scelto di riprodurre l’impatto della pioggia sui campioni di ETICS creati in laboratorio per una durata di 7 ore.

Sulla base della raccolta dei dati relativi alle variazioni di temperatura invernale del contesto ambientale e sulla base dei relativi impatti che questi hanno sul degrado degli ETICS, per la modellazione dei cicli freddi sono stati riprodotti 18 cicli di congelamento, ciascuno della durata di 7 ore con temperatura dell’aria a -12°C .

Per quanto riguarda invece la modellazione dei cicli caldi, in base ai dati climatici registrati, la temperatura riprodotta in questa fase di riscaldamento è di $+40^{\circ}\text{C}$. In seguito è stato valutato anche l’impatto delle radiazioni UV, che nonostante in Lituania corrispondano al solo 6% dell’intera radiazione solare, produce comunque un degrado durante le ore di maggior radiazione.

Le simulazioni di pioggia battente, di congelamento, di riscaldamento e di radiazioni UV appena descritte sono state raggruppate per creare dei cicli di invecchiamento accelerato e quindi ripetute 16 volte per riprodurre l’invecchiamento corrispondente ad un anno naturale.

Per definire la durata dell’ETICS sono stati scelti 4 indicatori di valutazione, ossia analisi microscopica, tasso di assorbimento dell’acqua, resistenza meccanica adesiva e monitoraggio visivo, in quanto sufficienti per la valutazione della durata del sistema perché più efficaci rispetto ad altre tecniche di valutazione offerte da altri studi.

La riproduzione dei cicli di invecchiamento accelerato fin qui analizzati non riescono, tuttavia, a collocare l’evoluzione del degrado in un’ascissa temporale. Ciò che rende interessante uno studio di questo tipo è la previsione dell’evoluzione delle performance e del degrado nel tempo, comparando il numero di cicli di invecchiamento riprodotti in laboratorio ad un numero di anni reali di esercizio dell’ETICS. Su questa tematica, uno dei massimi esperti è il

Professor Daniotti del politecnico di Milano, il quale prendendo spunto dalla norma ISO 15686-2 riesce a valutare la proporzione precisa tra l'esposizione negli anni reali ed il numero di cicli di invecchiamento necessari. Prima della proporzione che vede comparare i campioni invecchiati a quelli esposti a reali condizioni climatiche naturali esterne, gli studi del professor Daniotti [30] dimostrano un notevole approfondimento sul contesto climatico e sugli eventi di stress in grado di sviluppare un degrado sull'elemento di facciata studiato, ovvero sull'ETICS.

In un primo studio, infatti, il team del politecnico di Milano ha sviluppato importanti studi per analizzare le condizioni climatiche di "riferimento" da simulare per riprodurre l'invecchiamento degli ETICS in laboratorio tramite camera climatica.

I dati climatici statistici degli ultimi anni del contesto di Milano sono stati considerati per determinare le condizioni climatiche più severe rilevanti per gli aspetti di durabilità degli ETICS per ottenere i dati relativi ad un anno di riferimento ("reference year").

Si sono considerati gli eventi di shock termico estivi e invernali in grado di produrre degrado sugli ETICS per definire le temperature, le condizioni termoigrometriche e le durate di tutti i cicli di invecchiamento. Le condizioni di pioggia, congelamento e raggi UV sono state definite tenendo conto della loro ricorrenza statistica e il rapporto tra ciclo estivo e ciclo invernale è stato definito sulla base della probabilità statistica di tali eventi. Da questo primo step si è proceduto così ad impostare il ciclo di invecchiamento accelerato per ETICS sulla base dei suddetti dati climatici [30].

Questa analisi ha permesso di ottenere cicli di invecchiamento di laboratorio calcolati sulla base di dati statistici per le condizioni climatiche e geografiche di riferimento considerate. Tutto ciò è stato utile per il team di ricerca del gruppo Durability of Building Components Group (DBCg) che ha potuto così confrontare i risultati dell'invecchiamento accelerato in laboratorio con il degrado dell'esposizione di reali casi studio. Il merito del gruppo è stato quello di compiere un grosso sforzo per scoprire la correlazione nel tempo tra il degrado dei componenti dell'involucro edilizio e il clima esterno. Per fare ciò, il programma sperimentale (condotto in collaborazione tra BEST e University of Applied Sciences of Southern Switzerland) sviluppa da un lato un test di invecchiamento accelerato di laboratorio a breve termine, e dall'altro un'esposizione all'aperto a lungo termine, al fine di verificare la possibilità di individuazione di un re-scaling factor.

La ricerca condotta nelle condizioni ambientali di Milano e Lugano su diverse soluzioni di vernici esterne ha permesso di ottenere informazioni sui diversi meccanismi di degrado registrando i danni visibili nel tempo e confrontandoli con l'esame in laboratorio dei campioni invecchiati artificialmente con la ripetizione di appositi cicli di invecchiamento.

L'importanza di tale ricerca è relativa al re-scaling factor, utile per creare una corrispondenza temporale tra i cicli di invecchiamento accelerati e l'esposizione

naturale all'aperto nelle due città [31] [32].

Partendo dal suddetto bagaglio di studi effettuati in Italia ed in altri paesi, nonostante i diversi materiali isolanti e le condizioni alle quali i campioni vengono sottoposti, tanto le problematiche che le modalità di degrado risultano essere comuni a tutti gli ETICS: crescita di muffa, fessurazione sui giunti dei pannelli isolanti (zone di accostamento), rigonfiamenti dovuti a shock termici estivi, anomali assorbimenti d'acqua in presenza di pioggia battente.

In sintesi, i problemi più rilevanti si verificano in presenza di acqua, che influisce su tutte le prestazioni degli elementi isolanti.

Da questa consapevolezza, nell'attività di laboratorio sono stati eseguiti diversi studi sulla trasmissione del calore e sulla presenza di umidità per valutare la risposta all'umidità degli ETICS.

Gli ultimi progressi della ricerca condotta dal Prof. Daniotti presentano diversi risultati che sono volti ad analizzare l'evoluzione della resistenza termica e l'aumento del contenuto di umidità del campione di ETICS durante la vita utile del sistema tramite dei cicli di invecchiamento accelerato riprodotti in laboratorio con la camera climatica. Per questa ricerca, i cicli d'invecchiamento accelerato sono stati definiti analizzando i fattori e i meccanismi di degrado e le modalità di guasto (intesa come parte non più funzionante correttamente) relative agli ETICS; in base a queste analisi sono stati riprodotti in laboratorio agenti che influiscono maggiormente sul decadimento prestazionale del sistema d'isolamento termico. Pertanto, i cicli di invecchiamento proposti sono stati:

- shock termici estivi e invernali;
- cicli di congelamento-scongelo;
- pioggia battente; radiazioni UV;
- variazioni cicliche di temperatura e umidità relativa.

Decisi gli agenti da includere nel protocollo, per considerare con quale intensità e frequenza applicarli, la ricerca ha fatto riferimento a dati climatici relativi al contesto milanese. L'obiettivo dell'utilizzo dei dati meteorologici è quello di creare una proporzione tra gli anni reali di esposizione e i cicli di invecchiamento accelerato così da ottenere lo stesso livello di decadimento in laboratorio. Tale procedura che prende spunto da studi precedenti ([30] [31]) consiste nel filtrare eventi critici che si verificano durante l'anno e comprimerli in una serie di cicli di invecchiamento di frequenza e intensità reale (*Fig. 28*).

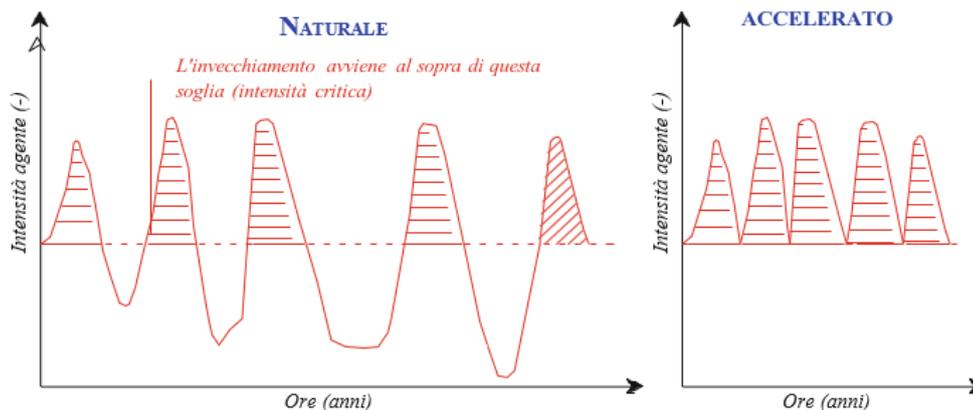


Figura 22 – Agente dannoso su scale Reale (Sinistra); Agente dannoso Compresso (Destra)

I cicli che sono stati eseguiti in questa ricerca sono frutto del re-scaling factor di cui ai precedenti studi e dell'attento studio del contesto climatico relazionato al degrado riscontrato su campioni reali di ETICS; nella figura di seguito sono riportati i suddetti cicli di invecchiamento accelerato.

Cycle	Times	Phase	T _{air,chamber} (°C)	RH _{chamber} (%)	T _{air,lab} (°C)	RH _{lab} (%)	Duration (min)
UV	25	UV	35	15 ± 2	20 ± 2	50 ± 5	60
Winter	10	Rain	15 ± 2	100	20 ± 2	50 ± 5	60
		Freeze	-20 ± 2	-	20 ± 2	50 ± 5	180
		Winter heat	30 ± 2	50 ± 5	20 ± 2	50 ± 5	60
Summer	25	Dry heat	70 ± 2	15 ± 2	20 ± 2	50 ± 5	60
		Rain	20 ± 2	100	20 ± 2	50 ± 5	60

Figura 23 – Tabella riassuntiva dei cicli di invecchiamento proposti per la ricerca

Per ogni ciclo completo CX si eseguono 25 cicli UV, 10 cicli invernali e 25 cicli estivi; la proporzione non è causale ma frutto dell'analisi climatica presa in esame. I cicli completi di invecchiamento CX sono quindi assemblati in gruppi da cinque in modo da ottenere un macro-ciclo TX. La durata complessiva del macro-ciclo TX, composto da 125 cicli UV, 125 cicli di shock termico estivo e 50 shock termici invernali (ossia cicli di gelo-disgelo), è di circa un mese.

Per lo studio sono stati utilizzati quattro tipi di campioni costruiti su parete in muratura come substrato, EPS come isolante e malta rasante con additivo polimerico; le malte scelte e analizzate sono costituite da resina acrilica (per due 2 campioni) e da resina vinilica (per i restanti 2 campioni), e per ogni tipo uno con rivestimento di finitura spesso e uno con pittura acrilica. Per ciascuno di questi, un campione è stato invecchiato ed uno è stato lasciato come riferimento di campione non invecchiato.

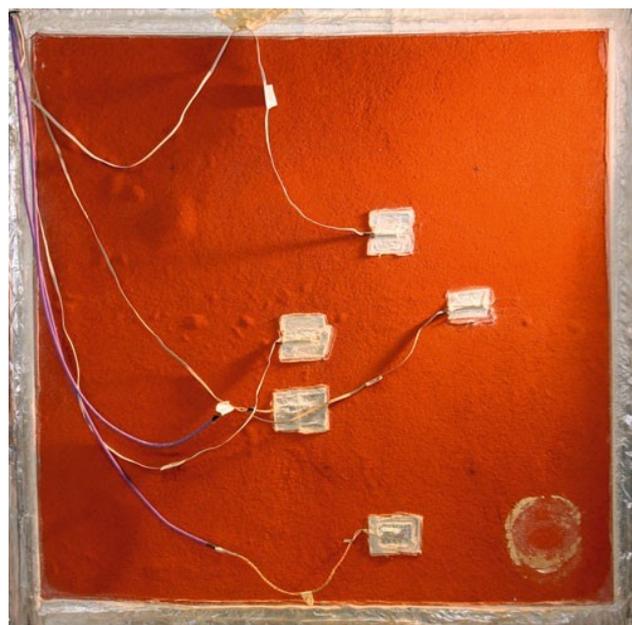


Figura 24 – Sensori applicati sui campioni di ETICS

Durante tutto il tempo di invecchiamento accelerato, grazie a diversi sensori sono state costantemente monitorate temperature, umidità relativa ed il flusso di calore; dopo ogni macro-ciclo sono stati eseguiti test di caratterizzazione del campione al fine di valutare i cambiamenti nella resistenza termica, le proprietà di trasferimento del calore, l'assorbimento dell'umidità, la risposta termica dinamica con il tempo di sfasamento ed il fattore di attenuazione. Inoltre per effettuare una analisi dell'evoluzione del degrado riscontrato sono stati anche realizzati un rilievo termografico e test non distruttivi di assorbimento d'acqua per capillarità tramite il metodo Karsten. Parte dei test sono illustrati di seguito a titolo esemplificativo.

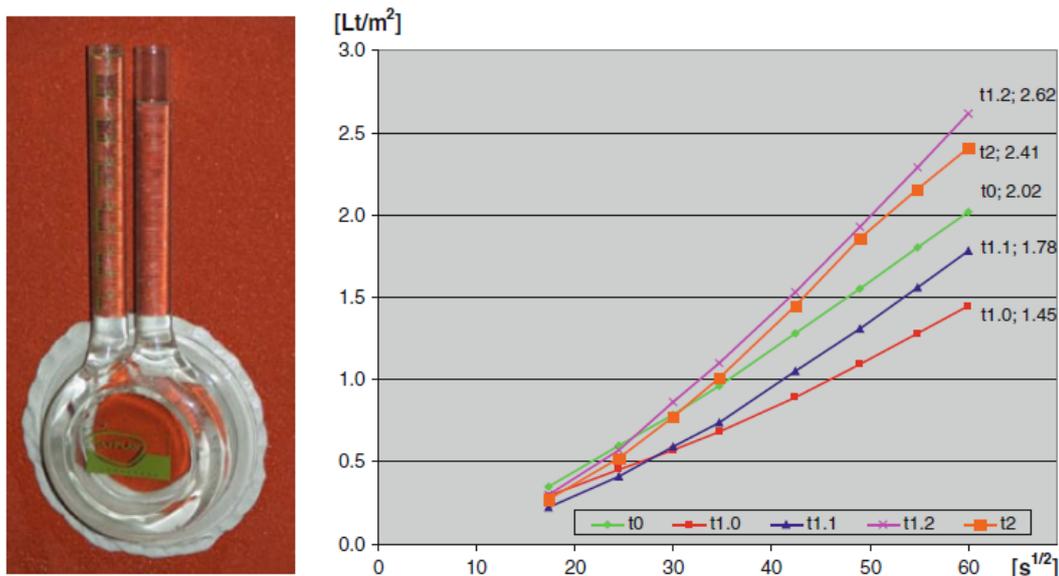


Figura 25 – Apparecchi di rilievo d'assorbimento d'acqua per capillarità (sinistra); Risultati della prova d'assorbimento d'acqua (destra)

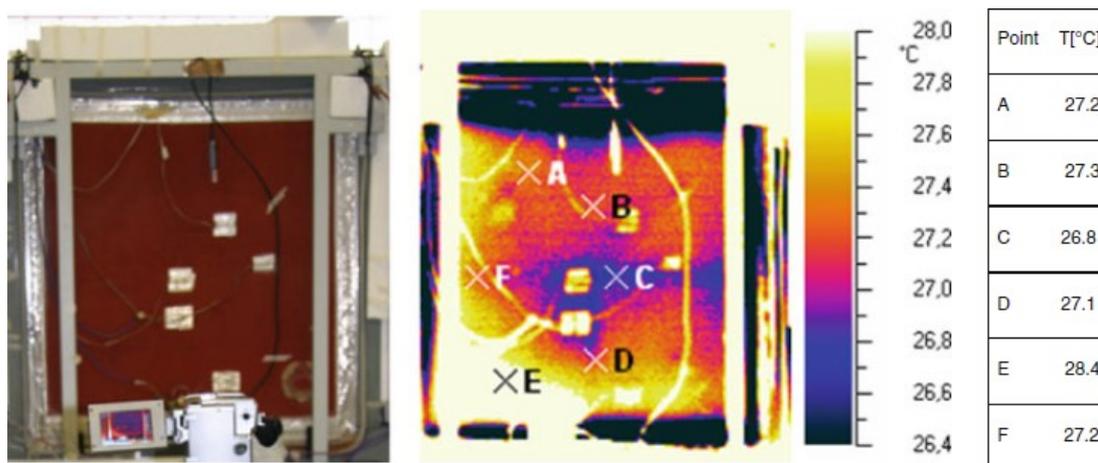


Figura 26 – Termografia ad infrarossi

Le forme di degrado riscontrabili a causa delle tipologie di cicli di segito riportati

Si è evidenziata anche lo stretto legame riscontrabile tra i cicli/stress climatici e la forma di degrado che ne scaturisce:

- Cicli UV; il degrado dovuto ai raggi UV causa un aumento della fessurazione capillare e della profondità di penetrazione degli stessi UV nel legante polimerico della finitura alterandone il colore della finitura;
- Cicli invernali; lo strato di rasatura e la finitura sono soggetti alla forza di tensione superficiale, la larghezza delle fessure capillari aumenta e la profondità di penetrazione dell'acqua in fase di pioggia è elevata, il che provoca il dilavamento. L'intonaco bagnato ha una ridotta resistenza alla trazione e durante i cicli di gelo e disgelo contribuisce al degrado della matrice cementizia.
- Cicli di shock termico estivo; lo strato di rasatura e la finitura sono soggetti a compressione e a una crisi di adesione tra i due strati. A causa di questo fenomeno la finitura si deforma e l'accumulo di umidità in questi strati causa la formazione di bolle nel sistema di finitura.

Per quanto riguarda le prestazioni igrotermiche la diminuzione della resistenza termica è dovuta all'aumento del contenuto d'acqua causato dalla penetrazione della pioggia.

Infine, notevoli sforzi sono stati compiuti per misurare il tempo di sfasamento ed il fattore di attenuazione delle tamponature con ETICS studiate.

Per valutare queste due caratteristiche è stato necessario riprodurre una campione di ETICS con la retrostante muratura delle dimensioni della porta della cella climatica. Il procedimento da cui prende spunto anche la ricerca che si è portata avanti vede riprodurre all'interno della cella climatica la curva giornaliera dell'onda termica della temperatura della parete esterna stimata durante la giornata più calda dell'anno, nella località di Milano.

Con sensori di temperatura sulla superficie interna e sulla superficie esterna del

campione, sono stati misurati i tempi di risposta ed i picchi di temperatura raggiunti e confrontati a quelli di riproduzione dell'onda termica analizzando così il fattore di attenuazione e il tempo di sfasamento [33].

Capitolo 5: L'EAD 040083-00-0404 per lo studio di durabilità degli ETICS

5.1 Procedure di rilascio dei prodotti da costruzione sul mercato Europeo secondo il CPR305/2011

L'obiettivo principale che si pone il CPR305/2011 – “Regolamento prodotti da costruzione (UE)” è quello di abbattere le barriere tecniche al commercio dei prodotti da costruzione all'interno del Mercato Unico Europeo. Per raggiungere l'obiettivo, il CPR305 si avvale di quattro elementi principali:

- un sistema di specifiche tecniche armonizzate;
- un sistema concordato di valutazione della conformità per ogni famiglia di prodotti;
- una rete di organismi notificati;
- la marcatura CE dei prodotti.

Il Regolamento prodotti da costruzione riguarda tutti i prodotti (materiali, manufatti, sistemi, ecc.) che sono realizzati per diventare parte permanente di opere di costruzione (edifici ed opere di ingegneria civile). Questi prodotti devono rispettare requisiti e prestazioni relazionate ai sette requisiti essenziali dell'opera da costruzione:

1. resistenza meccanica e stabilità;
2. sicurezza in caso di fuoco;
3. igiene, sicurezza e ambiente;
4. sicurezza in uso;
5. protezione contro il rumore;
6. risparmio energetico;
7. uso sostenibile delle risorse naturali per la realizzazione delle costruzioni.

All'interno del Regolamento Prodotti da Costruzione (CPR), inoltre, vengono definite tre diverse procedure di rilascio dei prodotti da costruzione nel mercato Europeo, che possono avvenire nel seguente modo secondo 3 categorie di prodotto:

- prodotti appartenenti ad una norma armonizzata;
- prodotti che non sono completamente coperti da una norma armonizzata, ovvero esiste una norma armonizzata per almeno una delle caratteristiche essenziali del prodotto, ma si verifica che: il metodo di valutazione non è appropriato, e quindi non esiste un metodo di valutazione;
- i prodotti non coperti da norma armonizzata.

Questa divisione in categorie si è resa necessaria, specie negli ultimi anni, data la repentina evoluzione tecnologica e l'immissione sul mercato di nuovi prodotti e materiali. Per cui viene offerta un'alternativa, a tutti quei prodotti non coperti da norme armonizzate, attraverso l'introduzione di diversi organi e documenti che hanno obiettivi comuni con quelli definiti dal regolamento dei prodotti da

costruzione (ossia i 4 obiettivi principali sopra citati).

 ENTE DI CERTIFICAZIONE - n° 1654		Marcatura di conformità CE Numero di identificazione dell'organismo notificato
13 Produttore S.r.l. - via dell'Artigianato 24 35127 Padova (PD) Pietrisco 4/8 - Lotto 5/13 N. 135/2013 EN 12620:2002+A1:2008 Aggregati per calcestruzzo		Ultime due cifre dell'anno in cui la marcatura CE è stata apposta per la prima volta Nome e indirizzo della sede legale del fabbricante o marchio di identificazione del fabbricante (logo con indirizzo) Codice unico di identificazione del prodotto-tipo Numero di riferimento della Dichiarazione di Prestazione Riferimento alla specifica tecnica armonizzata applicata Uso previsto di cui alla specifica tecnica armonizzata applicata
Forma, dimensione e massa volumica dei granuli Dimensione aggregato Coefficiente di appiattimento Indice di forma Massa volumica dei granuli Pulizia Contenuto di conchiglie Polveri ...	0/4 G _p 85 G ₇ 17,5 FI ₁₅ SI ₁₅ 2,78 g/cm ³ SC ₁₀ f ₄ ...	Livello o classe della prestazione dichiarata

Figura 27 – Esempio di marcatura CE secondo la Direttiva CPD ed a seguito dell'entrata in vigore del Regolamento CPR

5.2 Regolamento CPR305/2011 – Prodotti coperti da norme armonizzate

Nel momento in cui un prodotto è coperto da norma armonizzata (pubblicata all'interno della *gazzetta ufficiale dell'Unione Europea*), il fabbricante per il rilascio della marcatura CE è obbligato a redigere la *Dichiarazione di prestazione (DoP)*. Questa dichiarazione deve contenere informazioni sull'impiego previsto, sulle caratteristiche essenziali pertinenti all'impiego previsto e deve includere i risultati delle performance di almeno una delle sette caratteristiche essenziali, per tutti questi requisiti e prestazioni dichiarate il fabbricante si assume la responsabilità. Quando un parametro della norma armonizzata viene espresso con differenti metodi di verifica o con diverse unità di misura non è permesso dichiarare validi tali risultati. Una copia della dichiarazione di prestazione di ciascun prodotto è messa a disposizione sul mercato, in forma cartacea o su supporto elettronico. Laddove necessario, la dichiarazione di prestazione dovrebbe essere accompagnata da informazioni sul

contenuto di sostanze pericolose nel prodotto da costruzione.

La marcatura *CE* è apposta solo sui prodotti da costruzione per i quali il fabbricante ha redatto una dichiarazione di prestazione. Di conseguenza apponendo o facendo apporre la marcatura *CE*, i fabbricanti dichiarano di assumersi la responsabilità della conformità del prodotto da costruzione alla dichiarazione di prestazione e della conformità a tutti i requisiti stabiliti nel *Regolamento Europeo 305/2011*. La dichiarazione di prestazione riporta le informazioni, sotto qualsiasi forma, sulla prestazione del prodotto da costruzione in relazione alle caratteristiche essenziali, così come definito dalla specifica tecnica armonizzata applicabile, e possono essere fornite solo se comprese e specificate nella dichiarazione di prestazione. Per ogni caratteristica essenziale, la prestazione che si desidera dichiarare deve essere espressa in livello o classe o da una descrizione relativa. Si sottolinea che la marcatura *CE* del prodotto non garantisce l'idoneità all'uso, ma garantisce che il prodotto è caratterizzato dalle prestazioni riportate in *DoP*, e inoltre garantisce che il Fabbricante mette in campo un sistema di verifica e di valutazione continua, per monitorare la costanza di prestazione del suo prodotto. Quindi il fabbricante assicura che la produzione in serie conservi le prestazioni dichiarate nella *DoP*. A tal proposito, il *CPR305/2011* prevede cinque differenti sistemi di valutazione e verifica della costanza della prestazione (*AVCP*) con gradi di coinvolgimento degli Organismi terzi differenti nella valutazione della costanza di prestazione del prodotto, che varia in base alla pertinente specifica tecnica. Una volta effettuate le attività previste dal sistema di valutazione e verifica della costanza di prestazione del prodotto, il fabbricante redige la *DoP* e marca *CE* il prodotto. I fabbricanti conservano la documentazione tecnica e la dichiarazione di prestazione per un periodo di dieci anni a decorrere dall'immissione del prodotto da costruzione sul mercato.

Dichiarazione di Prestazione (in accordo al regolamento UE No 305/2011)		Caratteristiche essenziali		Prestazione		Specifiche tecniche armonizzate	
No. AMEB-2/01-CPR-13-1		Angolari		EN10056-2			
Codice tipologia del prodotto: 1.0038		Profili I e H		EN 10034			
1) Tipo: Sections/Bars S235JR secondo EN 10025-2		Profili I ad ali inclinate		EN 10024			
2) Uso o usi previsti del prodotto da costruzione, conformemente alla relativa specifica tecnica armonizzata, come previsto dal fabbricante:		UPE, UPN		EN 10279			
Da utilizzarsi per strutture saldate, bullonate o rivettate		Piatti / Quadri / Tondi / Profili T		EN 10058/EN 10059/EN 10060/EN 10055		EN 10025-1:2004	
3) ArcelorMittal Belval and Differdange S.A Site of Esch-Belval Boulevard Charles de Gaulle L-4008 Esch-sur-Alzette (G.D. of Luxembourg) Tel: +352 5820 2870 www.arcelormittal.com/sections		Spessore nominale (mm)		Valori (MPa)			
Sistema o sistemi di valutazione e verifica della costanza della prestazione del prodotto da costruzione: Sistema 2+		>		min			
L'organismo di certificazione No. 0769 KIT abilitato al controllo di produzione aziendale ha provveduto all'ispezione iniziale dello stabilimento di produzione e del sistema di controllo, di supervisione, di valutazione e di classificazione della produzione, e pertanto rilascia il certificato di conformità al sistema di controllo della produzione aziendale.		16		235			
La prestazione del prodotto di cui ai punti 1 e 2 è conforme alla prestazione dichiarata in tabella.		≤		max			
Si rilascia la presente dichiarazione di prestazione sotto la responsabilità esclusiva del fabbricante di cui al punto 3.		16		225			
Firmato a nome e per conto di:		40		215			
Roland Bastian Site Manager Esch-Belval		63		195			
Christophe Houyoux Quality Manager		80		360			
		100		510			
		140		500			
		Spessore nominale (mm)		Valori (%)			
		>		min			
		=3		26			
		40		25			
		63		24			
		100		22			
		140		22			
		Spessore nominale (mm)		Valori (J)			
		>		min			
		140		27 a +20°C			
		Spessore nominale (mm)		Valori (%)			
		>		max			
		30		0,35			
		40		0,35			
		140		0,38			
		Spessore nominale (mm)		Valori (%)			
		>		max			
		140		C* : 0,17			
				Cu : 0,55			
				Mn : 1,40			
				S : 0,040			
				P : 0,040			
				N** : 0,012			
				* Per spessori nominali > 40mm: C = 0,20% max. Per spessori nominali > 100mm: Contenuto di C da concordare.			
				** Il valore massimo per l'azoto non si applica nel caso la composizione chimica evidenzii il contenuto minimo totale di Al pari a 0,02% oppure scarto sufficienti altri elementi leganti N.			

Data: 01.07.2013

Figura 28 – Esempio di *DoP* dichiarazione di prestazione del prodotto, per profilati in acciaio secondo la norma armonizzata EN 10025

5.3 Valutazione tecnica Europea ETA – Prodotti non coperti da norme armonizzate

L'*European Technical Assessment (ETA, Valutazioni Tecniche Europee)* è un'alternativa per i prodotti da costruzione non coperti da una norma armonizzata. La procedura è stabilita nel regolamento sui prodotti da costruzione, il *CPR305/2011*, e offre ai fabbricanti un modo per redigere la dichiarazione di prestazione (*DoP*) e apporre il marchio *CE*, così da garantire la libera circolazione dei prodotti da costruzione e la creazione di un mercato unico forte. La procedura consiste:

- Un produttore richiede la valutazione tecnica europea (*ETA*) per un prodotto da costruzione che non è coperto o non è completamente coperto da una norma armonizzata. La richiesta è indirizzata all'organismo di valutazione tecnica (*TAB*) per la rispettiva area di prodotto;
- L'organismo di valutazione tecnica rilascia la valutazione tecnica europea sulla base di un documento di valutazione europea (*EAD*) adottato dall'Organizzazione europea per la valutazione tecnica (*EOTA*);
- Un elenco aggiornato di riferimenti per gli *EAD* finali viene pubblicato dalla Commissione nella Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.

Il documento di valutazione europeo (*EAD*) equivale ad una tecnica armonizzata, sviluppata dall'*European Organisation for Technical Assessment (EOTA, Organizzazione Europea per le Valutazioni Tecniche nell'area dei materiali da costruzione)*. Attraverso questo documento vengono stabilite le procedure per richiedere le valutazioni tecniche Europee (*ETA*), ovvero una valutazione documentata delle prestazioni del prodotto da costruzione. Quindi l'*ETA* in combinazione con l'*EAD* fornisce ai produttori una via per il rilascio del marchio *CE*, valido per tutti quei prodotti da costruzione non coperti da una norma europea armonizzata (*hEN*) ai sensi del *regolamento sui prodotti da costruzione UE 305/2011*. Quindi un nuovo *EAD* può essere sviluppato in tutti i casi in cui la valutazione di un prodotto da costruzione non è o non è completamente coperta da una specifica tecnica armonizzata, vale a dire una norma armonizzata (*hEN*) o da un *EAD* già disponibile. L'elaborazione di nuovi *EAD*, o la modifica di quelli esistenti, è di solito attivata da una richiesta di *ETA* da parte di un fabbricante.

Se il fabbricante desidera far valutare la prestazione di una caratteristica essenziale del prodotto per la quale non esiste ancora un metodo di valutazione armonizzato appropriato l'*EAD* esistente sarà modificato o ne sarà sviluppato uno nuovo mediante un organismo di valutazione tecnica (*TABS*) scelto dal produttore per il progetto *ETA*. Dal punto di vista del produttore, lo sviluppo dell'*EAD* è gestito dall'Organismo di Valutazione Tecnica che ha scelto come partner per il progetto *ETA* a suo nome. Inoltre, una rete di esperti di valutazione tecnica altamente qualificati, la rete *EOTA* e diversi altri attori, entrano in gioco per portare avanti ogni *EAD*.

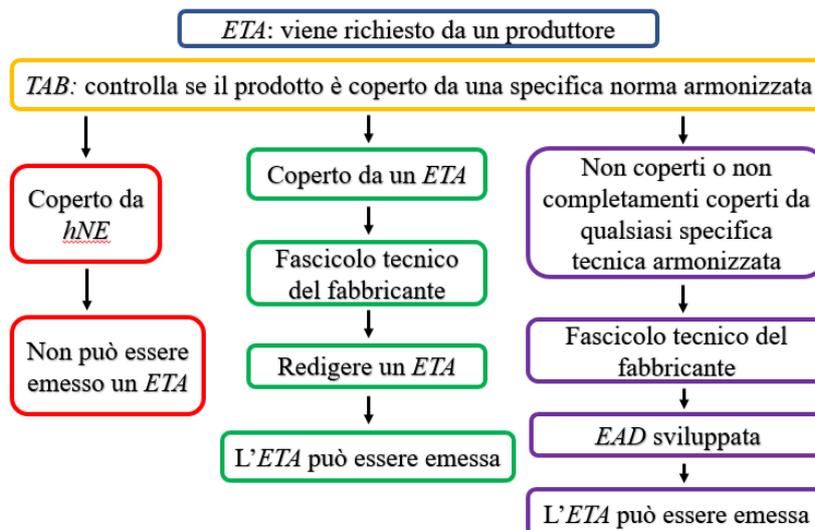


Figura 29 – Diversi scenari per lo sviluppo di un EAD

Dallo schema in figura XX si evince che redigere l’ETA non è obbligatorio per i produttori o assemblatori. Per gli ETICS infatti, i produttori non sono obbligati a redigere l’ETA per il sistema commercializzato, diversamente da quanto avviene in Germania ed Olanda dove invece è obbligatorio.

Dall'entrata in vigore del CPR fino alla fine del 2019, l'EOTA ha sviluppato 439 EAD sulla base dei quali i TAB hanno rilasciato 7708 ETA. Di solito si distinguono otto fasi di sviluppo dell'EAD in base all' allegato II del regolamento sui prodotti da costruzione UE n 305/2011.

5.4 Struttura dell’EAD 040083-00-0404

I contenuti di tutti gli EAD sono strutturati in 3 capitoli principali:

- descrizione generale del prodotto da costruzione e del suo uso previsto (*cap. 1*);
- l’elenco delle caratteristiche essenziali rilevanti per l’uso previsto e i metodi e i criteri di valutazione delle prestazioni del prodotto (*cap. 2*);
- i principi per l’attuazione del sistema di valutazione e verifica della costanza della prestazione (*cap. 3*).

Il capitolo 1 del EAD 040083-00-0404 al paragrafo 1.1 definisce “Questo EAD si applica ai sistemi compositi di isolamento termico esterno (ETICS) con intonaco (sistema di intonaco) da applicare come isolamento termico esterno sulle pareti degli edifici. Le pareti sono in muratura (mattoni, blocchi, pietre...) o in calcestruzzo (gettato in opera o come pannelli prefabbricati) con o senza sistemi di finitura”.

Il capitolo primo prosegue con una precisa definizione della stratigrafia e delle relative caratteristiche degli elementi che compongono i kit ETICS; vengono, inoltre, descritti i metodi di fissaggio del pacchetto sul supporto murario con relative descrizioni della resistenza meccanica dei supporti metallici, le caratteristiche e l’area d’incollaggio dell’adesivo da impiegare e un elenco dei

requisiti minimi alla quale deve rispondere il pacchetto nella sua interezza in termini di prestazioni e resistenze.

Secondo quanto definito dall'*EAD*, gli ETICS possono essere utilizzati su pareti verticali di edifici nuovi o esistenti, su superfici orizzontali o inclinate che non sono esposte alle precipitazioni. L'ETICS dà alla parete dell'edificio a cui è applicato un isolamento termico supplementare e una protezione dagli effetti degli agenti atmosferici. Inoltre si tratta di elementi di costruzione non portanti e quindi non contribuiscono direttamente alla stabilità della parete dell'edificio su cui sono installati.

Nel secondo capitolo vengono definite le caratteristiche essenziali del prodotto, e riferendoci ad un kit ETICS questo non dovrà garantire tutti i 7 requisiti previsti dal CPR regolamento prodotti da costruzione. Inoltre per i requisiti definiti, saranno associate una serie di caratteristiche essenziali, al quale corrispondono dei metodi di valutazione con relativi risultati espressi in livelli, classi o descrizioni. Tali requisiti, che interessano il cappotto termico, sono:

- requisito 2: sicurezza in caso d'incendio;
- requisito 3: igiene, salute ed ambiente;
- requisito 4: sicurezza e accessibilità nell'uso;
- requisito 5: protezione contro il rumore;
- requisito 6: economia energetica e conservazione del calore.

No	Caratteristica essenziale	Metodo di valutazione	Tipo di espressione delle prestazioni del prodotto (livello, classe, descrizione)
<i>Lavori di base Requisito 2: sicurezza in caso di incendio</i>			
1	<i>Reazione al fuoco</i>	2.2.1	
	<i>- reazione al fuoco di ETICS</i>	2.2.1.1	<i>classe</i>
	<i>- reazione al fuoco del materiale di isolamento termico</i>	2.2.1.2	<i>classe</i>
	<i>- reazione al fuoco dell'adesivo in schiuma PU</i>	2.2.1.3	<i>classe</i>
2	<i>Prestazioni al fuoco della facciata</i>	2.2.2	<i>descrizione</i>

Tabella 10 – Stralcio di tabella 1 Requisito 2 tradotta “EAD 040083-00-0404 paragrafo 2.1”

Quindi, all'interno del capitolo due, in funzione del requisito sono elencati e divisi in paragrafi tutti i metodi per valutare le prestazioni del prodotto, attraverso il richiamo di norme *UNI* e allegati posti in fondo alla norma. Alle corrispondenti caratteristiche essenziali vengono descritte le procedure di prova da seguire, i requisiti di inserimento dei provini, i valori da rispettare e come esprimerne i risultati.

Nell'ultimo capitolo dell'*EAD* viene definita la classe di riferimento per i sistemi di valutazione e verifica della costanza della prestazione.

L'*EAD* al *paragrafo 3.1* definisce “*Il sistema AVCP (Assessment and Verification of Constancy of Performance) applicabile è 2 + per qualsiasi uso, eccetto per gli usi soggetti alle norme sulla reazione al fuoco. Per gli usi soggetti alle norme di reazione al fuoco, i sistemi AVCP applicabili in materia di reazione al fuoco sono 1 o 2 +*”. Su queste valutazioni e verifiche si sviluppa l'intero capitolo, definendo per ogni elemento che compone il kit ETICS, i metodi, i criteri, il numero dei campioni e la frequenza con il quale effettuare questi controlli, al fine di garantire le performance e la filiera di produzione costanti ed invariate nel tempo, dimostrando che le caratteristiche coincidono con quelle definite al momento del rilascio della certificazione di conformità CE.

5.5 I cicli di invecchiamento accelerato previsti nell'EAD 040083-00-0404

L'*EAD 040083-00-0404* al suo interno propone una serie di prove che sottopongono il campione ad un invecchiamento accelerato. Rispettare e seguire i “cicli standard” previsti dalla norma significa testare un componente edilizio per il rilascio di un'approvazione (come nel caso dei cicli dell'*EAD*) o per il rilascio di un certificato.

Per quanto riguarda l'*EAD 040083-00-0404*, la corretta procedura d'invecchiamento del kit ETICS viene descritta all'interno del capitolo 2. Questo procedimento rappresenta la metodologia per simulare la stagionatura di un kit ETICS, e su questo vengono stabilite le risposte nei confronti di alcune caratteristiche essenziali al variare del tempo, come ad esempio le resistenze meccaniche e la forza di adesione. I test che sono stati presi come riferimento, per invecchiare artificialmente i campioni in laboratorio, sono i cicli igrometrici e i cicli di gelo-disgelo.

I cicli igrometrici vengono riportati nel *paragrafo 2.2.6 del EAD 040083-00-0404*, e si compongono di: ***ciclo caldo-pioggia*** e ***ciclo caldo-freddo***. Per il ciclo *caldo-pioggia* la norma prevede una serie di 80 cicli così divisi:

- una fase di riscaldamento a 70°C (aumento per 1 ora) e mantenimento a $(70 \pm 5)^\circ\text{C}$ e dal 10 al 30% di UR per 2 ore (totale di 3 ore);
- successivamente spray per 1 ora dell'acqua $(+ 15 \pm 5)^\circ\text{C}$, quantità d'acqua $1 \text{ l/m}^2 \text{ min}$;
- fase drenante in cui lasciare per 2 ore a riposo.

Per il ciclo *caldo-freddo* la norma prevede un primo step di almeno 48 ore di condizionamento a temperature comprese tra 10 e 25°C e un'umidità relativa minima del 50%, successivamente sugli stessi campioni viene applicato una serie 5 cicli caldo/freddo di 24 ore che comprendono:

- esposizione a $(50 \pm 5)^\circ\text{C}$ (aumento per 1 ora) e massimo 30% RH per

7 ore (totale di 8 ore),

- esposizione a $(-20 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ (caduta per 2 ore) per 14 ore (totale di 16 ore).

Durante i test, come suggerito dal *EAD*, devono essere eseguite alcune osservazioni ad occhio nudo, relative al cambiamento di caratteristiche o prestazioni dell'intero ETICS e dei singoli elementi che compongono il kit. Le osservazioni, riportate dalla norma, sono:

- controllo della finitura superficiale dell'ETICS per stabilire la presenza di crepe, la presenza di eventuali crepe vanno misurate e registrate;
- la superficie deve anche essere controllata per qualsiasi vescica o screpolatura, la posizione e l'estensione devono essere nuovamente registrate;
- i profili devono essere controllati per qualsiasi danno/degradazione insieme a qualsiasi crepa associata alla finitura. Anche in questo caso, la posizione e l'estensione devono essere registrate.

Altri test presi come riferimento, per accelerare l'invecchiamento dei campioni, sono i **cicli gelo-disgelo** riportati al paragrafo 2.2.7 del *EAD 040083-00-0404*, in cui vengono definiti una serie di 30 cicli composti dalle fasi:

- immersione in acqua per 8 ore alla temperatura iniziale di $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ con il metodo descritto in 2.2.5.1 (test di capillarità);
- congelamento a $(-20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ (abbassamento della temperatura per 5 ore sulla superficie del campione e per 2 ore d'aria condizionata) per rispettivamente 11 e 14 ore (totale di 16 ore).

Capitolo 6: Metodologia di laboratorio

La ricerca tratta l'evoluzione del degrado degli ETICS al cui interno l'unica variabile è il materiale con funzione di isolante termico e non il rivestimento esterno. In questo modo si valuta il degrado del rivestimento esterno comunemente impiegato negli ETICS ma soprattutto il degrado dei più comuni materiali da isolamento termico, ovvero: poliuretano, sughero, lana di roccia, lana di vetro, EPS e fibre di legno. In altri termini, variando gli isolanti termici nel sistema ETICS si analizza la durabilità, ovvero la vita utile, dell'intero sistema, studiandone quanto incide l'isolante termico e soprattutto comparando i materiali dal punto di vista della durabilità.

Come definito nel codice UNI 11156, la vita utile è il periodo, dopo l'installazione, durante il quale l'edificio o le sue parti mantengono livelli di prestazione superiori o uguali ai limiti di accettazione.

6.1 Approccio sperimentale

L'iter dell'intero processo di ricerca segue i binari della norma UNI 11156 (trasposizione italiana della norma ISO 15686). In questa norma, al terzo capitolo si presenta il metodo per la valutazione della vita utile di componenti per l'edilizia, sintetizzato nel diagramma della figura seguente (figura 30), che si compone dei seguenti punti:

- **definizione:** descrizione delle esigenze degli utenti e dei requisiti tecnologici connotanti l'elemento tecnico, del contesto sollecitante (tipo e intensità degli agenti), delle prestazioni richieste, caratterizzazione dei materiali, ecc;
- **preparazione:** identificazione dei meccanismi di degrado e degli effetti, scelta dei criteri di misurazione per le caratteristiche funzionali e delle prestazioni tecnologiche, ricerca bibliografica, ecc.;
- **prove preliminari:** per valutare le metodologie di prova e le tecniche di misurazione per le caratteristiche funzionali;
- **esposizione e misurazione:** la fase durante la quale si svolgono le prove d'invecchiamento, sia naturale sia accelerato e durante la quale si misurano gli effetti degli agenti sui componenti edilizi (degradi);
- **analisi ed interpretazione dei risultati:** momento in cui, analizzando i risultati ottenuti con la sperimentazione (in termini di andamento delle prestazioni nel tempo), viene valutata la vita utile di un componente, in determinate condizioni di sollecitazione

figura 1 Metodologia per la previsione della vita utile di un componente

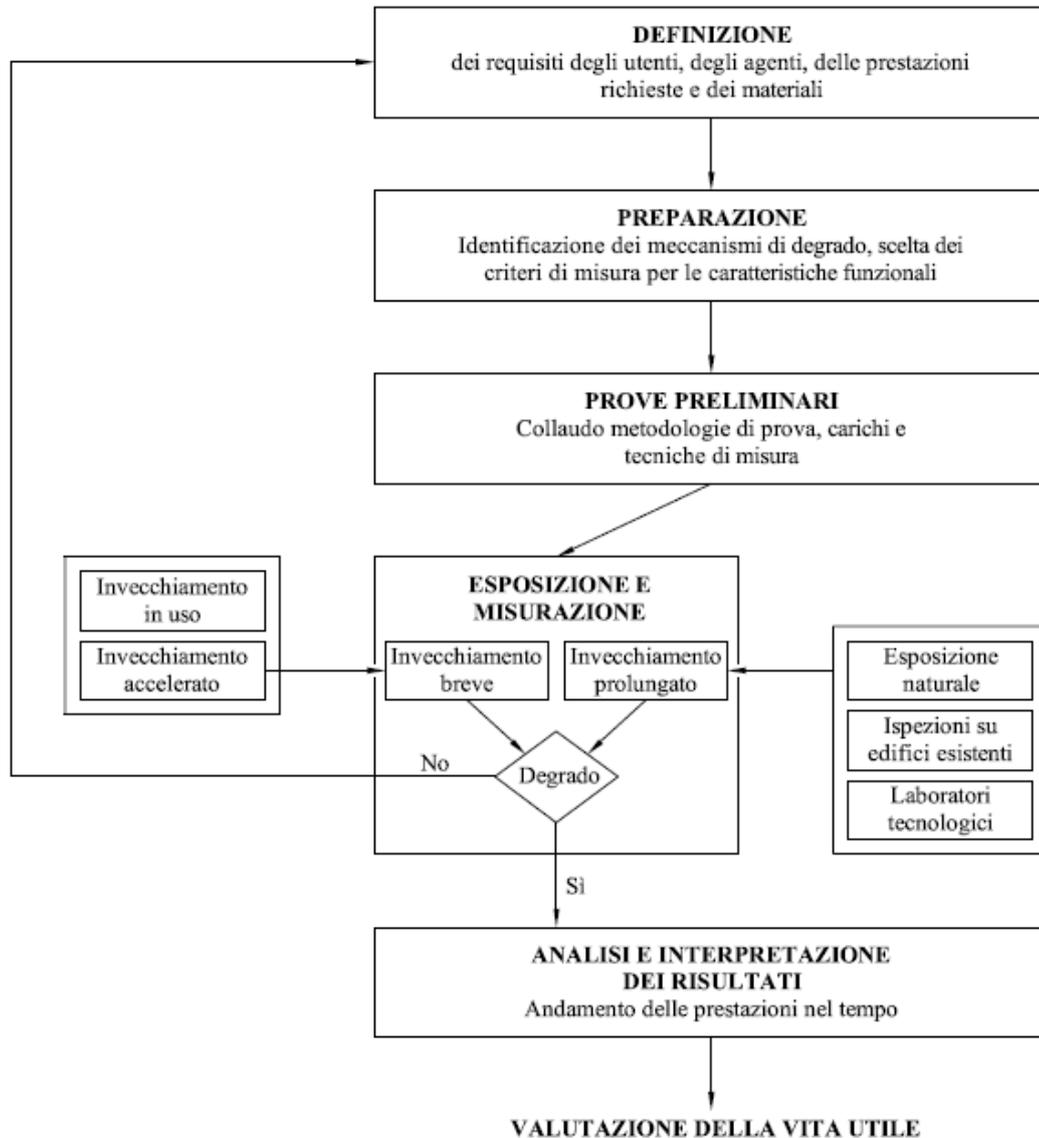


Figura 30 – Stralcio di figura 1 della UNI 11156-3 - Metodologia per la previsione della vita utile di un componente

L'iter di processo di sperimentazione, ben specificato al capitolo 3 della suddetta norma (UNI 11156-3), si articola quindi nei suddetti punti.

Questo approccio analizza il meccanismo di degrado in base ai requisiti del singolo componente del sistema ed analizza i relativi decadimenti delle prestazioni.

Seguendo la suddetta UNI, si analizzano gli studi che identificano le modalità di degrado delle prestazioni del componente edilizio oggetto di studio (l'ETICS).

Per prima cosa si è andati a studiare il comportamento durante la vita utile del componente studiato, con lo scopo di analizzare la comparazione del degrado riscontrato in situ o in campioni naturalmente invecchiati con quelli invecchiati artificialmente in laboratorio. La norma UNI, infatti, ha il merito di suggerire

un valido metodo per la comparazione di campioni “invecchiati” con metodi diversi, ovvero artificialmente e naturalmente. Lo stesso processo è stato seguito negli studi del Prof. Daniotti [30] [31] [33] il quale ha seguito una sperimentazione di comparazione fra degrado naturale e degrado “artificiale” ottenuto in laboratorio.

Il metodo seguito nella ricerca ripercorre gli stessi binari della norma, come fatto in precedenza nei suddetti studi del Prof. Daniotti ma ampliando l’indagine statistica dei campioni ETICS indagati.

6.2 Confronto invecchiamento accelerato e invecchiamento naturale

Con il suddetto metodo, descritto nella norma UNI 11156-3 si è portata avanti una indagine statistica per valutare il re-scaling factor tra invecchiamento accelerato riprodotto in laboratorio e invecchiamento naturale di edifici reali esistenti.

Durante questa fase della ricerca si è valutato lo stato di degrado di facciate con ETICS invecchiati naturalmente dai 5 anni ai 25 anni.

Tra i diversi interventi di efficientamento energetico analizzati, mediante sistema di isolamento termico a cappotto, si riportano qui di seguito a titolo esemplificativo e non esaustivo alcune foto del complesso residenziale presso via de Meis a Ponticelli (Napoli) dove è stato monitorato il degrado delle facciate dal 2010, anno di costruzione ed applicazione del sistema ETICS.





Figura 31 – Foto delle facciate del complesso residenziale dell’Istituto Autonomo Case Popolari di Napoli in via De Meis – Ponticelli (NA).

L’ampiezza della superficie analizzata (25.000 mq di facciate) sul suddetto complesso, unitamente alle indagini termografiche ed al continuo monitoraggio, ha permesso di registrare ed approfondire il degrado superficiale degli ETICS. Da tali analisi si è registrato il confronto con i campioni ETICS invecchiati artificialmente in laboratorio tramite cicli di invecchiamento accelerato, restituendo così un rescaling-factor tra invecchiamento accelerato riprodotto in laboratorio ed invecchiamento naturale di edifici reali.

L’analisi di confronto portata avanti analizza il degrado superficiale degli ETICS degli edifici di interesse e registra un fattore di scala tra questi e i cicli

di invecchiamento accelerato ricreati in laboratorio corrispondenti a 9-10 anni. Il degrado superficiale registrato nei casi studio di edifici reali non presenta un reale deterioramento visibile se non per piccole anomalie localizzate. Di seguito, in figura 32, infatti si riportano a titolo esemplificativo alcune delle anomalie localizzate riscontrate nel complesso di Ponticelli. Le anomalie e le criticità sono tutte determinate da difetti puntuali di applicazione e/o di posa i opera ovvero errori nelle procedure di applicazione del ciclo ETICS ove non sono state rispettate regole previste nella norma UNI EN 11715.





Figura 32 – Foto di anomalia a) accostamento non perfetto dei pannelli isolanti in corrispondenza della varianza di colorazione della linea orizzontale b) crepe localizzate in corrispondenza di un punto triplo ed errato gocciolatoio

6.3 Confezionamento materiali

Per tale ricerca si è proceduto con l'impiego di una camera climatica in grado di "invecchiare" artificialmente il componente edilizio indagato tramite la ripetizione di cicli di invecchiamento accelerato.

Prima dell'inizio della sperimentazione attraverso le prove di invecchiamento accelerato, si è provveduto alla scelta dei materiali da confezionare ed alla loro caratterizzazione, partendo dai materiali isolanti.

Lo studio si è concentrato su 6 campioni di ETICS, in cui l'unica variabile è lo strato di isolamento termico, ovvero:

- EPS grigio;
- fibra di legno;
- lana di vetro;
- lana di roccia;
- poliuretano;
- sughero.

La scelta di questi sei isolanti, rispetto a quelli presenti in commercio, è frutto di un'attenta analisi di mercato in cui sono stati considerati isolanti di utilizzo più frequente in edilizia. Anche in tempi di superbonus 110, si conferma un trend di scelta crescente per materiali sintetici e cellulari come EPS e poliuretano, materiali di origine minerale come le lane minerali (lana di roccia e lana di vetro), e materiali di origine "naturale" come sughero e fibra di legno. Passaggio importante, prima dell'assemblaggio, è stato quello di definire per i diversi kit caratteristiche termiche più o meno simili, il che ha comportato l'utilizzo di spessori diversi in funzione della tipologia di isolante. L'obiettivo è quello di ottenere 6 kit ETICS tra di loro comparabili, in caratteristiche termiche, così come già svolto in altri studi precedenti [34] ed evidenziato in tabella 11.

A tal fine, quindi, ci si è imposta una trasmittanza target di $0,55 \text{ W/m}^2\text{K}$ a cui tenderanno tutte e 6 le tipologie di ETICS studiati, ovviamente con tutti i limiti del caso, dovuti agli spessori commercializzati dagli stessi produttori di isolanti. Si ipotizza l'applicazione di tali tipologie di ETICS su una muratura a cassa vuota composta da 1 cm di intonaco interno, 8 cm di laterizio forato, 5 cm di camera d'aria, 25 cm di laterizio forato, 1 cm di intonaco esterno.

Come in precedenti studi [34] [35] la trasmittanza target è stata scelta in base al rispetto della trasmittanza limite prevista dal Decreto interministeriale del 26 giugno 2015 - Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici.

Tabella 11. Caratteristiche termiche dei campioni ETICS con i diversi pannelli isolanti.

Isolante:	Spessori s [mm]	Denominazione sistema <i>INVAS</i>	Conduktività termica λ [W/mk]	Trasmittanza termica $U = \sum \frac{\lambda}{s}$ [W/m ² k]	Resistenza termica $U = \sum \frac{s}{\lambda}$ [m ² k / W]
Poliuretano	50	Termok8 Slim	0,028	0,56	1,79

EPS	60	Termok8 classico 33	0,033	0,55	1,82
Fibra di legno	80	Termok8 Wood	0,043	0,54	1,86
Lana di roccia	60	Termok8 Minerale LR	0,036	0,58	1,71
Lana di vetro	60	Termok8 Minerale LV	0,034	0,57	1,76
Sughero ambrato	80	Termok8 Minerale SU	0,040	0,50	2,00

Prima dell'inizio della preparazione dei campioni ETICS e del successivo invecchiamento accelerato dei campioni rivestiti con le finiture ed il supporto, si è proceduto alla caratterizzazione di tutti i materiali isolanti; questa procedura si è vista necessaria per confrontare i materiali isolanti prima dell'inizio della campionatura e prima dell'invecchiamento accelerato. Infatti, non tutti i materiali campionati presentano caratteristiche perfettamente corrispondenti a quelle da scheda tecnica; cosa normale considerando che a seconda dei metodi di prova ci sono tolleranze ascrivibili all'accuratezza stessa del metodo e che gli stessi valori dichiarati secondo i metodi di prova delle UNI EN ISO ammettono una probabilità, seppur minima, di misurazioni fuori dell'intervallo di tolleranza statistica; questa possibilità residua spiega la differenza tra i dati dei produttori dei soli isolanti e quelli misurati nei test di laboratorio della ricerca.

Caratterizzare il materiale con tutte le prestazioni di maggior interesse per la ricerca vuole dire conoscere le prestazioni di partenza del materiale isolante, prima ancora di essere confezionato con rivestimenti e supporti.

In questo modo, misurando tutte le caratteristiche prestazionali dei singoli materiali isolanti, sarà possibile fare un confronto con i risultati attesi nei campioni rivestiti al tempo T0 (pre invecchiamento) ed infine al tempo T1 (post invecchiamento).

6.3.1 Poliuretano espanso rigido

Uno dei materiali oggetto di ricerca è il poliuretano, un polimero estremamente versatile che permette di ottenere una vasta gamma di prodotti con proprietà isolanti e di diverso impiego. Nel nostro quotidiano molti oggetti indispensabili sono realizzati utilizzando i numerosi componenti della famiglia dei poliuretani, ma di questi, solo il poliuretano espanso rigido è il materiale isolante termicamente per eccellenza che, a parità di spessore, garantisce le migliori prestazioni.

Il suo valore di conducibilità termica stabile nel tempo è compresa tra 0,022 e 0,028 W/mK in funzione del tipo di schiuma, dello spessore e del tipo di rivestimento.

Questa eccellente prestazione permette di ottenere elevatissimi livelli di isolamento termico con spessori significativamente ridotti rispetto a quelli necessari utilizzando gli altri materiali isolanti tradizionali; scegliendo il poliuretano si può quindi risparmiare energia anche con volumi ridotti.

Nel caso in esame, il poliuretano espanso rigido (vedi figura 33) ha le seguenti caratteristiche tecniche come dichiarato da scheda tecnica (vedi tabella seguente).



Figura 33 – Foto del pannello isolante in poliuretano espanso rigido

Tabella 12. Scheda tecnica del poliuretano espanso rigido utilizzato



PRINCIPALI CARATTERISTICHE E PRESTAZIONI - rilevanti ai fini della marcatura CE [UNI EN 13165]

- **Conducibilità Termica Dichiarata - λ_0 [W/mK]**
UNI EN 13165 Annessi A e C
Valore determinato alla temperatura media di 10° C
v. tabella valori in funzione dello spessore
- **Resistenza Termica Dichiarata - $R_0 = d/\lambda_0$ - [m²K/W]**
v. tabella valori in funzione dello spessore
- **Trasmittanza Termica Dichiarata - $U_0 = \lambda_0/d$ [W/m²K]**
v. tabella valori in funzione dello spessore
- **Reazione al fuoco**
EN 13501-1, EN 11925-2, EN 13823
EUROCLASSE E
- **Resistenza alla compressione al 10% di schiacciamento - σ_{10} [kPa]**
EN 826
> 150 codice etichetta CE [CS(10/Y)150]
- **Resistenza a trazione perpendicolare alle facce - σ_{nt} [kPa]**
EN 1607
> 80 codice etichetta CE [TR80]
- **Fattore di resistenza alla diffusione del vapore - μ**
EN 12086
56 ± 2 codice etichetta CE [MU56]
- **Assorbimento d'acqua per immersione parziale, breve periodo [kg/m²]**
EN 1609
< 0,2 codice etichetta CE [WS(P)0,2]
- **Assorbimento d'acqua per immersione totale, lungo periodo [% in peso]**
EN 12087
<2 per d < 120 mm codice etichetta CE [WL(T)2]
<1 per d ≥ 120 mm codice etichetta CE [WL(T)1]
- **Planarità dopo bagnatura da una faccia [mm]**
EN 13165
≤ 10 mm codice etichetta CE [FW10]
- **Planarità S_{max} [mm]**
EN 825
≤ 5

d mm	λ_0 W/mK	R_0 m²K/W	U_0 W/m²K
20	0,028	0,71	1,40
30		1,07	0,93
40		1,43	0,70
50		1,79	0,56
60		2,14	0,47
70	0,026	2,50	0,40
80		3,08	0,33
100		3,85	0,26
120	0,025	4,80	0,21
140		5,60	0,18
160		6,40	0,16
180		7,20	0,14
200		8,00	0,12

- **Stabilità dimensionale [Livello]**
EN 1604
48 h, 70° C, 90% UR
3 per d < 40 mm codice etichetta CE [DS(70,90)3]
4 per d ≥ 40 mm codice etichetta CE [DS(70,90)4]
48 h, -20° C
2 codice etichetta CE [DS(-20,0)2]
- **Tolleranze [mm]**
EN 13165
Lunghezza e Larghezza
± 5 < 1000 mm codice etichetta CE [T2]
± 7,5 da 1001 a 2000 mm codice etichetta CE [T2]
- **Spessore [mm]**
± 2 < 50 mm codice etichetta CE [T2]
± 3 da 50 a 75 mm codice etichetta CE [T2]
+ 5/-2 ≥ 75 mm codice etichetta CE [T2]

ALTRE CARATTERISTICHE E PRESTAZIONI

- **Massa volumica pannello - ρ [kg/m³]**
Valore medio comprensivo del peso dei rivestimenti
35 ± 1,5
- **Calore Specifico - C_p [J/kg° K]**
Valore medio
1464
- **Resistenza alla compressione, 2 % di schiacciamento - σ_2 [kg/m²]**
EN 826
> 5000
- **Resistenza Pull through - [N]**
EN 16382
> 750
- **Fattore di sicurezza per resistenza al carico di vento - γ_m**
EN 13165
1,5
- **Modulo al taglio [kPa]**
EN 12090
1656
- **Resistenza al taglio [kPa]**
EN 12090
109
- **Resistenza alla diffusione del vapore d'acqua - Z [m³hPa/mg]**
EN 12086
4,2 - 8,0
- **Stabilità dimensionale - [% variazione dimensionale]**
EN 1604
48 h, 70° C
< 1
- **Stabilità dimensionale - [% variazione dimensionale]**
EN 1603
28 giorni, 23° C e 50 % UR
≤ 0,01
- **Percentuale in peso di materiale riciclato - [%]**
Valore medio
2,57

CERTIFICAZIONI & RAPPORTI DI PROVA AGGIUNTIVI

- **Certificazioni aziendali di sistema:**
 - Sistema di gestione qualità UNI EN ISO 9001:2015,
 - Sistema di gestione ambientale UNI EN ISO 14001: 2015,
 - Sistema di gestione a tutela della Sicurezza e della Salute dei Lavoratori OHSAS 18001: 2007
- **Benessere tecnico Europeo EOTA - ETAG 04**
ETICS - Sistema a cappotto:
 - ETA 09/0060
 - ETA 10/0027
 - ETA 12/0377
 - ETA 13/0320
 - ETA 13/0871
- **Dichiarazione Ambientale di Prodotto EPD verificata da Ente terzo**
ISO 14025 e EN 15804
- **Fonoisolamento acustico a parete - R_w [dB]**
UNI EN ISO 140-3, UNI EN ISO 717-1
52
I dati relativi alla stratigrafia valutata sono riportati nel Quaderno Tecnico "Isolamento Acustico"
- **Emissioni di composti organici volatili**
UNI EN ISO 16000
Classe Francese A



Nella seguente tabella (tabella 13) si evidenziano tutte le caratteristiche prestazionali misurate in laboratorio con le relative norme di riferimento messe a confronto con le caratteristiche dichiarate da scheda tecnica.

Tabella 13. Pannello isolante in poliuretano: confronto tra caratteristiche dichiarate da scheda tecnica e caratteristiche misurate in laboratorio nel poliuretano.

<i>Caratteristiche:</i>		Dichiarati¹	Misurate²	U.M.	Norme di riferimento:
<i>Dimensioni</i>	d x L x L	50 x 120 x 60	50,1 x 120,3 x 60,1	cm	
<i>Conducibilità</i>	Λ	0,028	0,023	W/m ² K	UNI EN 13165
<i>Massa volumica</i>	P	35 ± 1,5	34,4	Kg/m ³	
<i>Resistenza a trazione perpendicolare alle facce</i>	Media	-	82	kPa	EN 1607
	Dev. St.	-	2	kPa	
	Minimo	80	80,56	kPa	
<i>Resistenza a compressione al 10% di schiacciamento</i>	Media	-	189	kPa	EN 826
	Dev. St.	-	16	kPa	
	Minimo	> 150	172	kPa	
<i>Assorbimento d'acqua per immersione parziale a breve periodo</i>	W _{1h}	< 0,2	0,04	Kg/m ²	EN 1609
	W _{24h}		0,11	Kg/m ²	
<i>Stabilità dimensionale a -20°C</i>	d ³		- 0,12	%	UNI EN 1604
	L ₁		- 0,04	%	
	L ₂		- 0,08	%	
<i>Stabilità dimensionale a +70°C e 90% UR</i>	d ³		+ 0,82	%	UNI EN 1604
	L ₁		+ 0,26	%	
	L ₂		+ 0,44	%	
<i>Euroclasse di reazione al fuoco:</i>	spread	E < 15 cm	2,94	cm	EN 13501

Caratteristiche del pannello isolante, 1 = dichiarate da scheda tecnica o dichiarazione di prestazione (DoP), 2 = misurate in laboratorio; d³ = variazione di spessore in percentuale; L₁ = variazione percentuale della lunghezza del pannello; L₂ = variazione percentuale della larghezza del pannello;

Osservando i valori dichiarati da scheda tecnica rispetto a quelli misurati in laboratorio, è possibile osservare che il materiale campionato nelle successive prove sperimentali corrisponde per tutte le caratteristiche fisiche misurate a meno della conducibilità termica. Si registra infatti una conducibilità termica ($\lambda_M = 0,023 \text{ W/m}^2\text{K}$) più bassa di quella dichiarata ($\lambda_D = 0,028 \text{ W/m}^2\text{K}$), risultato in linea ciò che ci si attende.

Il caso del poliuretano è un fenomeno noto, in quanto la conducibilità dipende dalla composizione gassosa all'interno delle celle contenute in una lastra; in una lastra di poliuretano prodotta di recente risulta prevalentemente composta dall'agente espandente, più efficace dell'aria in termini di conducibilità termica; ne consegue un valore di conducibilità misurato sensibilmente inferiore rispetto al valore dichiarato.

Come è noto, infatti, nelle schiume di poliuretano espanso rigido la conducibilità termica aumenta nei primi anni a causa della di una parte degli agenti espandenti, in particolare la CO_2 , contenuti nella schiuma a celle chiuse verso l'esterno, parzialmente sostituita dall'aria.

Con l'invecchiamento la composizione gassosa si modifica per la diffusione dell'aria all'interno delle celle fin tanto che quest'ultima non avrà occupato il volume lasciato libero dall'agente espandente [36] [37]; l'equilibrio di fase può essere raggiunto anche dopo qualche decennio, ne consegue una capacità isolante in continua evoluzione nei primi anni.

Per valutare questo fenomeno, le norme tecniche hanno previsto, nel testo della norma EN 13165 - allegato C, due metodi che possono essere utilizzati dal costruttore. Durante entrambe le procedure, il produttore dovrà aggiungere al valore ottenuto un fattore di correzione statistica che garantisca un'adeguata corrispondenza del valore con quello della prestazione dichiarata dopo 25 anni. Le norme specifiche armonizzate per i prodotti poliuretanic (allegati A e C della norma UNI EN 13165) forniscono le metodologie applicate per la determinazione del valore dichiarato di conducibilità termica, λ_D , che è il valore medio di conducibilità termica del prodotto per 25 anni di vita utile. Questo è il motivo per cui il PU mostra una conducibilità termica misurata inferiore alla conducibilità termica dichiarata, come mostrato in altri studi [38].

Infatti, i materiali sottoposti a marcatura CE espongono in etichetta il valore di λ_D che corrisponde al valore medio per 25 anni di esercizio riscontrabile sul 90% della produzione con il 90% della confidenza statistica e valutato alla temperatura di prova di 10°C ; in questo modo la λ_D tiene già conto di questa variabilità della conducibilità, dichiarando direttamente la λ media misurata nei 25 anni.

È stato importante valutare questo fenomeno perché questo scostamento sarà riportato anche nei risultati delle prove di resistenza termica oggetto di studio, ovvero al tempo T0 (pre invecchiamento) e T1 (post invecchiamento).

I risultati indicano quindi che il poliuretano ha una conducibilità termica inferiore a quella dichiarata durante la vita utile: ciò si spiega in quanto nelle fasi successive alla produzione, si registrano incrementi del valore di

conducibilità termica (in particolare nei primi anni) che determina una conducibilità dichiarata da scheda tecnica come il valore medio della prestazione isolante per 25 anni di esercizio, considerata anche dalla relativa norma armonizzata UNI EN 13165 nel calcolo della conducibilità termica.

6.3.2 EPS grigio

Un altro materiale oggetto di sperimentazione nei campioni ETICS, è il polistirolo espanso grigio, un materiale che appartiene alla categoria degli isolanti cellulari plastici.

Comunemente detto EPS, il polistirene o polistirolo espanso è composto da carbonio, da idrogeno e per il 98% d'aria presentandosi quindi come un materiale rigido ma dal peso ridotto.

Il polistirene, o polistirolo espanso, si ottiene attraverso la polimerizzazione dello stirene, un monomero ricavato dal petrolio, che si presenta sotto forma di piccole perle trasparenti, le quali si espandono fino a 20-50 volte il loro volume iniziale al contatto con il pentano (idrocarburo gassoso) e con il vapore acqueo a 90°-120°. All'interno delle perle viene a formarsi una struttura a celle chiuse che trattiene aria; di conseguenza le ottime caratteristiche d'impiego dell'EPS come isolante termico.

Negli ultimi anni, in aggiunta al classico materiale di EPS, si è poi iniziato ad additivare con grafite che conferisce il caratteristico colore grigio.

L'addizione di polveri di grafite all'interno della materia prima aiuta ad abbassare il contributo dell'irraggiamento alla trasmissione del calore attraverso la lastra. Infatti le particelle di grafite all'interno del polimero permettono di assorbire e riflettere gli infrarossi, neutralizzando l'effetto dovuto all'irraggiamento del calore, riducendo il passaggio di calore e aumentando così le proprietà isolanti del materiale.

La norma che caratterizza gli EPS, trattando delle caratteristiche e prestazioni dei prodotti in EPS, è la UNI EN 13163.

Nel caso in esame, il materiale scelto per l'EPS grigio ha le seguenti caratteristiche tecniche misurate e riportate come da scheda tecnica (vedi tabella 14).



Figura 34 – Pannello isolante in EPS grigio

Tabella 14. Pannello isolante in EPS grigio: confronto tra caratteristiche dichiarate da scheda tecnica e caratteristiche misurate in laboratorio.

<i>Caratteristiche:</i>		Dichiarati¹	Misurate²	U.M.	Norme di riferimento:
<i>Dimensioni</i>	d x L x L	6 x 60 x 60	5,92 x 60,3 x 60,4	cm	
<i>Conducibilità</i>	λ	0,031	0,034	W/m ² K	UNI EN 12667
<i>Massa volumica</i>	ρ		10,3	Kg/m ³	
<i>Resistenza a trazione perpendicolare alle facce</i>	media	-	69	kPa	EN 1607
	Dev. St.	-	13	kPa	
	minimo	> 150	55	kPa	
<i>Resistenza a compressione al 10% di schiacciamento</i>	media	-	42	kPa	EN 826
	Dev. St.	-	1	kPa	
	minimo	> 100	41	kPa	
<i>Assorbimento d'acqua per immersione parziale a breve periodo</i>	W _{1h}	< 0,5	0,11	Kg/m ²	EN 1609
	W _{24h}		0,14	Kg/m ²	
<i>Stabilità dimensionale a -20°C</i>	d ³	*	+ 0,16	%	UNI EN 1604
	L ₁		- 0,07	%	
	L ₂		- 0,15	%	
<i>Stabilità dimensionale a +70°C e 90% UR</i>	d ³	*	+ 0,54	%	UNI EN 1604
	L ₁		- 0,02	%	
	L ₂		+ 0,19	%	
<i>Euroclasse di reazione al fuoco:</i>	spread	E ≤ 15	4,50	cm	EN 13501

*Caratteristiche del pannello isolante, 1 = dichiarate da scheda tecnica o dichiarazione di prestazione (DoP), 2 = misurate in laboratorio; d³ = variazione di spessore in percentuale; L₁ = variazione percentuale della lunghezza del pannello; L₂ = variazione percentuale della larghezza del pannello; * = la classe di stabilità dimensionale. a -20° C non è prevista dalla norma di prodotto,*

Nella caratterizzazione di tutti i parametri fisici di interesse del materiale isolante, sono stati misurati alcuni valori di poco differenti da quanto indicato da scheda tecnica. Questo avvenimento può essere in linea con le tolleranze di misura della norma EN 13172 seguita dai produttori di materiali isolanti.

Tra le differenze riscontrate la resistenza a compressione al 10% dello schiacciamento, la resistenza a trazione perpendicolare alle facce, la conducibilità termica. Per esempio, sul caso della conducibilità termica, si può osservare una differenza tra la conducibilità dichiarata dei pannelli isolanti e quella misurata; la spiegazione può essere trovata nel codice EN 13172 [43], codice seguito dai produttori di materiali isolanti, che introducono le tolleranze di misura come segue in formula (4):

$$\tau = k \cdot s \quad (4)$$

τ = tolerance specified in the product standard

k = factor related to the number of available test results

s = deviazione standard

Questa tolleranza nella misura della conducibilità produce una piccola differenza dal valore medio di conducibilità. Secondo il codice, la conduttività dichiarata è calcolata come segue nella formula 5:

$$\lambda_D = \lambda_M + \tau \quad (5)$$

λ_D = conducibilità termica dichiarata del pannello isolante

λ_M = conducibilità termica misurata del pannello isolante

Quindi, secondo l'intervallo di tolleranza statistica della norma EN 13172, il fattore K è un indice statistico di riduzione delle prestazioni che riduce all'1% la probabilità di misurare il valore di conducibilità al di fuori dell'intervallo di tolleranza statistica. Quindi questa possibilità residua potrebbe spiegare la differenza tra i dati dei produttori e quelli dei test di laboratorio di questa ricerca.

In questa sperimentazione è stato fondamentale misurare tutte le caratteristiche fisiche principali, per poter poi comparare i risultati con quelli ottenuti con l'invecchiamento accelerato dell'intero sistema ETICS.

Caratterizzare bene il materiale ci ha consentito di non fare un confronto con i generici materiali così come descritti da scheda tecnica, ma con i materiali testati nelle loro caratteristiche principali e soprattutto con gli stessi apparati di misura.

6.3.3 Lana di roccia

La lana di roccia è un silicato amorfo ricavato da un mix di rocce e altri materiali inerti, estremamente versatile, utilizzato come materiale isolante in edilizia ed in ambiti navali e industriali.

Il composto, formato per il 95-97 % da diabase, basalto e dolomite, i quali subiscono una fusione a temperature che si attestano sui 1400°, viene filato in fibre minerali artificiali. Per uso industriale, la lana di roccia viene essenzialmente impiegata sotto forma di pannelli, ed in edilizia sotto forma di pannelli isolanti per le sue particolari peculiarità termiche, acustiche e di incombustibilità.

La lana di roccia, in inglese detta “rock wool”, è uno dei materiali noti come fibra minerale, in inglese “mineral wool” e la norma che tratta delle caratteristiche e prestazioni dei prodotti in lana minerale senza fare alcuna distinzione tra lana di roccia, lana di vetro etc., è la UNI EN 13162.

Nel caso in esame, il materiale scelto per la lana di roccia (vedi figura seguente) ha le seguenti caratteristiche tecniche misurate e riportate come da scheda tecnica (vedi tabella seguente).



Figura 35 – Pannello isolante in lana di roccia

Tabella 15. Pannello isolante in lana di roccia: confronto tra caratteristiche dichiarate da scheda tecnica e caratteristiche misurate in laboratorio nella lana di roccia.

<i>Caratteristiche:</i>		Dichiarati¹	Misurate²	U.M.	Norme di riferimento:
<i>Dimensioni</i>	d x L x L	6 x 100 x 60	6,0 x 99,6 x 59,9	cm	
<i>Conducibilità</i>	λ	0,036	0,035	W/m ² K	UNI EN 13162
<i>Massa volumica</i>	ρ	100	89,2	Kg/m ³	
<i>Resistenza a trazione perpendicolare alle facce</i>	media	-	2,1	kPa	EN 1607
	Dev. St.	-	0,3	kPa	
	minimo	> 10	1,8	kPa	
<i>Resistenza a compressione al 10% di schiacciamento</i>	media	-	10,5	kPa	EN 826
	Dev. St.	-	3	kPa	
	minimo	> 20	7,5	kPa	
<i>Assorbimento d'acqua per immersione parziale a breve periodo</i>	W _{1h}	< 1	1,42	Kg/m ²	EN 1609
	W _{24h}		3,50	Kg/m ²	
<i>Stabilità dimensionale a -20°C</i>	d ³	*	- 1,0	%	UNI EN 1604
	L ₁		- 0,18	%	
	L ₂		- 0,32	%	
<i>Stabilità dimensionale a +70°C e 90% UR</i>	d ³	*	+ 0,35	%	UNI EN 1604
	L ₁		- 0,45	%	
	L ₂		+ 0,29	%	
<i>Euroclasse di reazione al fuoco:</i>	spread	A1**	2,6	cm	EN 13501**

*Caratteristiche del pannello isolante, 1 = dichiarate da scheda tecnica o dichiarazione di prestazione (DoP), 2 = misurate in laboratorio; d³ = variazione di spessore in percentuale; L₁ = variazione percentuale della lunghezza del pannello; L₂ = variazione percentuale della larghezza del pannello; * = la classe di stabilità dimensionale a -20°C non è prevista dalla norma di prodotto; ** = il test è stato realizzato solo nella modalità di piccola fiamma previsto dalla EN13501.*

Nella caratterizzazione di tutti i parametri fisici di interesse del materiale isolante, sono stati misurati alcuni valori di differenti da quanto indicato in scheda tecnica. Questo avvenimento può essere in linea con le tolleranze di misura della norma EN 13172 seguita dai produttori di materiali isolanti.

Tra le differenze riscontrate la resistenza a compressione al 10% dello schiacciamento, la resistenza a trazione perpendicolare alle facce, la conducibilità termica, la densità e l'assorbimento d'acqua.

Tra queste alcuni parametri come la conducibilità misurata è anche più bassa di quella dichiarata da scheda tecnica, mentre altri dei suddetti parametri hanno performance misurate dai test di laboratorio peggiori rispetto a quelle dichiarate; è per questo che è stato importante misurarle per permettere una fotografia del materiale misurato con gli apparecchi di misura di laboratorio.

In questa sperimentazione è stato fondamentale misurare tutte le caratteristiche fisiche principali, per poter poi comparare i risultati con quelli ottenuti con l'invecchiamento accelerato dell'intero sistema ETICS.

Caratterizzare bene il materiale ci ha consentito di non fare un confronto con i generici materiali così come descritti da scheda tecnica, ma con i materiali testati nelle loro caratteristiche principali e soprattutto con gli stessi apparati di misura.

6.3.4 Lana di vetro

La lana di vetro è un materiale isolante, creato artificialmente, portando a fusione ad una temperatura di 1300-1500°C, una miscela di vetro (di solito riciclato) e sabbia, successivamente trasformata in fibre grezze con l'aggiunta di materiale legante composto da resine termoindurenti per aumentarne la coesione.

Le fibre nella sua struttura creano piccole sacche o celle di aria che la rendono un ottimo isolante termico perché i gas come l'aria, al contrario dei liquidi e dei solidi, sono cattivi conduttori termici, e quindi creano un buon materiale isolante se possono essere "intrappolati".

In edilizia è usata per le sue ottime proprietà di isolamento termico, isolamento acustico e di resistenza al fuoco.

Questo materiale appartiene alla categoria di materiali fibrosi, in inglese definito come "glass wool".

Nel caso in esame, il materiale scelto (di seguito in figura) per la lana di vetro ha le seguenti caratteristiche tecniche misurate e riportate come da scheda tecnica (vedi tabella seguente).



Figura 36 – Pannello isolante in lana di vetro

Tabella 16. Pannello isolante in lana di vetro: confronto tra caratteristiche dichiarate da scheda tecnica e caratteristiche misurate in laboratorio nella lana di roccia.

<i>Caratteristiche:</i>		Dichiarati¹	Misurate²	U.M.	Norme di riferimento:
<i>Dimensioni</i>	d x L x L	6 x 120 x 60	5,8 x 120,1 x 60,3	cm	EN 823**
<i>Conducibilità</i>	λ	0,034	0,033	W/m ² K	UNI EN 13162
<i>Massa volumica</i>	ρ	-	69,8	Kg/m ³	

<i>Resistenza a trazione perpendicolare alle facce</i>	media	-	5,5	kPa	EN 1607
	Dev. St.	-	1,3	kPa	
	minimo	> 7,5	3,7	kPa	
<i>Resistenza a compressione al 10% di schiacciamento</i>	media	-	15,5	kPa	EN 826
	Dev. St.	-	0,5	kPa	
	minimo	> 15	15	kPa	
<i>Assorbimento d'acqua per immersione parziale a breve periodo</i>	W _{1h}	< 1	0,09	Kg/m ²	EN 1609
	W _{24h}		0,3	Kg/m ²	
<i>Stabilità dimensionale a -20°C</i>	d ³	*	+ 0,36	%	UNI EN 1604
	L ₁		- 0,8	%	
	L ₂		+ 0,05	%	
<i>Stabilità dimensionale a +70°C e 90% UR</i>	d ³	*	+ 1,50	%	UNI EN 1604
	L ₁		+ 0,15	%	
	L ₂		- 0,60	%	
<i>Euroclasse di reazione al fuoco:</i>	spread	A2,s1,d0 ***	2,7	cm	EN 13501 ***

*Caratteristiche del pannello isolante, 1 = dichiarate da scheda tecnica o dichiarazione di prestazione (DoP), 2 = misurate in laboratorio; d³ = variazione di spessore in percentuale; L₁ = variazione percentuale della lunghezza del pannello; L₂ = variazione percentuale della larghezza del pannello; * = la classe di stabilità dimensionale. a -20° C non è prevista dalla norma di prodotto, ** = la norma EN 823 stabilisce le tolleranze dimensionali di spessore di 1 mm. *** = il test è stato realizzato solo nella modalità di piccola fiamma previsto dalla EN13501.*

Nella caratterizzazione di tutti i parametri fisici di interesse del materiale isolante, sono stati misurati solo due valori differenti da quanto indicato in scheda tecnica. Questo avvenimento può essere in linea con le tolleranze di misura della norma EN 13172 seguita dai produttori di materiali isolanti. La conducibilità termica misurata è anche migliore di quella dichiarata, mentre la resistenza a trazione perpendicolare alle facce registra dei valori anche più bassi di quelli già dichiarati.

Misurare tutte le prestazioni del singolo campione ha permesso di scattarne una fotografia con gli apparecchi di misura di laboratorio uniformando così il metodo utilizzato per poter poi comparare i risultati con quelli ottenuti dall'invecchiamento accelerato dell'intero sistema ETICS.

Caratterizzare bene il materiale ci ha consentito di non fare un confronto con i generici pannelli così come descritti da scheda tecnica, ma con i materiali testati nelle loro caratteristiche principali e soprattutto con gli stessi apparati di misura.

6.3.5 Sughero

Il sughero è un materiale di origine naturale, che deriva da tessuti vegetali di rivestimento per fusti e radici di alberi come la quercia ed in particolar modo le sughere, le quali non subiscono alcun danno dalla decortica, rigenerando il tessuto suberoso ogni 9 anni.

Il tessuto è composto da cellule che, quando muoiono, vengono sostituite da aria creando cellule, spazi e cavità cellulari contenenti aria, a forma di poliedri sfaccettati, il cui numero varia dai trenta ai quaranta milioni per cm: si viene quindi a creare un materiale molto arioso e leggero, elastico e compatto.

Sebbene questa struttura farebbe pensare ad un materiale assolutamente naturale, biocompatibile e riciclabile al 100%, il sughero bruno viene poi trattato con leganti chimici per unire i singoli poliedri di cui è composto ed infine tagliato in pannelli; i classici leganti chimici impiegati hanno natura tutt'altro che naturale perchè realizzati con scarti della produzione del petrolio. Il materiale scelto però, è uno degli unici sugheri che invece prevede un processo industriale che porta all'agglomerazione del pannello tramite processo termico volgarmente detto di "tostatura" conferendo realmente quella caratteristica "naturale" al pannello.

La struttura conferisce al sughero impiegato per pannelli isolanti una elevata elasticità, una notevole resistenza alle sollecitazioni fisiche e chimiche, eccezionali proprietà di isolamento termico ed acustico, resistenza al fuoco e traspirabilità.

Secondo la norma EN 13170, il sughero utilizzato come isolante termico in edilizia è anche indicato con l'acronimo ICB che sta per insulation cork board. La norma che caratterizza il sughero espanso, trattando delle caratteristiche e prestazioni dei prodotti in sughero, è la UNI EN 13170.

Nel caso in esame, il materiale scelto (di seguito in figura) ha le seguenti caratteristiche tecniche misurate e riportate come da scheda tecnica (vedi tabella seguente).



Figura 37 – Pannello isolante in lana di vetro

Tabella 17. Pannelli isolante in sughero: confronto tra caratteristiche dichiarate da scheda tecnica e caratteristiche misurate in laboratorio nella lana di roccia.

<i>Caratteristiche:</i>		Dichiarati¹	Misurate²	U.M.	Norme di riferimento:
<i>Dimensioni</i>	d x L x L	8 x 100 x 50	8,08 x 100 x 50,3	cm	EN 823**
<i>Conducibilità</i>	λ	0,040	0,039	W/m ² K	UNI EN 13162
<i>Massa volumica</i>	ρ	110	97,3	Kg/m ³	
<i>Resistenza a trazione perpendicolare alle facce</i>	media	-	31,4	kPa	EN 1607
	Dev. St.	-	5,2	kPa	
	minimo	-	25,2	kPa	
<i>Resistenza a compressione al 10% di schiacciamento</i>	media	-	78,3	kPa	EN 826
	Dev. St.	-	5,8	kPa	
	minimo	> 100	74,3	kPa	
<i>Assorbimento d'acqua per immersione parziale a breve periodo</i>	W _{1h}	< 0,5	0,21	Kg/m ²	EN 1609
	W _{24h}		0,5	Kg/m ²	
<i>Stabilità dimensionale a -20°C</i>	d ³	*	+ 1,00	%	UNI EN 1604
	L ₁		+ 0,91	%	
	L ₂		+ 0,95	%	
<i>Stabilità dimensionale a +70°C e 90% UR</i>	d ³	*	+ 1,44	%	UNI EN 1604
	L ₁		+ 0,63	%	
	L ₂		+ 0,10	%	
<i>Euroclasse di reazione al fuoco:</i>	spread	E	3,1	cm	EN 13501-1

*Caratteristiche del pannello isolante, 1 = dichiarate da scheda tecnica o dichiarazione di prestazione (DoP), 2 = misurate in laboratorio; d³ = variazione di spessore in percentuale; L₁ = variazione percentuale della lunghezza del pannello; L₂ = variazione percentuale della larghezza del pannello; * = la classe di stabilità dimensionale. a -20°C non è prevista dalla norma di prodotto, ** = la norma EN 823 stabilisce le tolleranze dimensionali di spessore di 1 mm.*

Nella caratterizzazione di tutti i parametri fisici di interesse del materiale isolante, sono stati misurati solo 2 valori differenti da quanto indicato in scheda tecnica, ovvero la massa volumica e la resistenza a compressione al 10% dello schiacciamento. Questo avvenimento può essere in linea con le tolleranze di misura della norma EN 13172 seguita dai produttori di materiali isolanti.

Misurare tutte le prestazioni del singolo campione ha permesso di scattarne una fotografia con gli apparecchi di misura di laboratorio, uniformando così il metodo utilizzato per poter poi comparare i risultati con quelli ottenuti dall'invecchiamento accelerato dell'intero sistema ETICS.

Caratterizzare bene il materiale ci ha consentito di non fare un confronto con i generici materiali così come descritti da scheda tecnica, ma con i materiali testati nelle loro caratteristiche principali e soprattutto con gli stessi apparati di misura.

6.3.6 Fibra di legno

La fibra di legno è un materiale di origine vegetale derivante dagli scarti di lavorazione del legno. Il processo produttivo di tale materiale vede i residui di segheria essere frantumati e scomposti in fibre di legno, che vengono compattate e trasformate in pannelli.

Nel caso dei pannelli isolanti scelti, per compattare le fibre, queste vengono trattate con leganti o resine a base di legante MDI polimerico, ovvero difenilmetano diisocianato polimerico, legante sintetico impiegato per la realizzazione di materiali a base di legno privi di formaldeide come l'OSB; questi leganti rendono il materiale non interamente di origine naturale.

Nota anche come "lana di legno", considerando la struttura, la fibra di legno è un prodotto appartenente alla categoria dei materiali isolanti fibrosi, la cui norma di prodotto, la UNI EN 13171, indica con l'acronimo "wood fibre" (WF). I pannelli in fibra di legno si contraddistinguono per le qualità termoisolanti, l'isolamento acustico, la biodegradabilità, il basso impatto ambientale, la traspirabilità e la resistenza al fuoco.

Nel caso in esame, il materiale scelto (di seguito in figura) ha le seguenti caratteristiche tecniche misurate e riportate come da scheda tecnica (vedi tabella seguente).



Figura 38 – Pannello isolante in fibra di legno

Tabella 18. Pannelli isolante in fibra di legno: confronto tra caratteristiche dichiarate da scheda tecnica e caratteristiche misurate in laboratorio nella lana di roccia.

<i>Caratteristiche:</i>		Dichiarati¹	Misurate²	U.M.	Norme di riferimento:
<i>Dimensioni</i>	d x L x L	8 x 125 x 60	7,96 x 122,5 x 55,8	cm	EN 823**
<i>Conducibilità</i>	λ	0,040	0,045	W/m ² K	UNI EN 13162
<i>Massa volumica</i>	ρ	145	143,2	Kg/m ³	
<i>Resistenza a trazione perpendicolare alle facce</i>	media	-	11,2	kPa	EN 1607
	Dev. St.	-	1,4	kPa	
	minimo	> 15	9,6	kPa	
<i>Resistenza a compressione al 10% di schiacciamento</i>	media	-	106,2	kPa	EN 826
	Dev. St.	-	3,9	kPa	
	minimo	> 80	103,2	kPa	
<i>Assorbimento d'acqua per immersione parziale a breve periodo</i>	W _{1h}	1	0,20	Kg/m ²	EN 1609
	W _{24h}		1,05	Kg/m ²	
<i>Stabilità dimensionale a -20°C</i>	d ³	*	+ 0,39	%	UNI EN 1604
	L ₁		- 0,11	%	
	L ₂		- 0,06	%	
<i>Stabilità dimensionale a +70°C e 90% UR</i>	d ³	3	+ 2,89	%	UNI EN 1604
	L ₁		+ 0,02	%	
	L ₂		+ 0,62	%	
<i>Euroclasse di reazione al fuoco:</i>	spread	E	3,4	cm	EN 13501

*Caratteristiche del pannello isolante, 1 = dichiarate da scheda tecnica o dichiarazione di prestazione (DoP), 2 = misurate in laboratorio; d³ = variazione di spessore in percentuale; L₁ = variazione percentuale della lunghezza del pannello; L₂ = variazione percentuale della larghezza del pannello; * = la classe di stabilità dimensionale a -20°C non è prevista dalla norma di prodotto, ** = la norma EN 823 stabilisce le tolleranze dimensionali di spessore di 1 mm.*

Nella caratterizzazione di tutti i parametri fisici di interesse del materiale isolante, sono state misurate alcune differenze da quanto indicato in scheda tecnica. Ciò può essere in linea con le tolleranze di misura della norma EN 13172 seguita dai produttori di materiali isolanti.

Tra le differenze riscontrate la resistenza a trazione perpendicolare alle facce, la conducibilità termica e le dimensioni fisiche del pannello.

Per quanto riguarda le dimensioni del pannello, è possibile osservare una leggera differenza sulle dimensioni misurate e sulla presentazione del materiale

che dovrebbe essere a spigoli vivi (così come dichiarato da scheda tecnica); come è possibile osservare nella figura si vedono gli spigoli che non mantengono le caratteristiche, probabilmente i pannelli, sensibili al trasporto, perdono tale caratteristica.

Per quanto riguarda conducibilità termica, si può osservare una differenza tra la conducibilità dichiarata dei pannelli isolanti e quella misurata; la spiegazione può essere trovata nel codice EN 13172 [43], codice seguito dai produttori di materiali isolanti, che introducono le tolleranze di misura come segue in formula (4):

$$\tau = k \cdot s \quad (4)$$

τ = tolerance specified in the product standard

k = factor related to the number of available test results

s = deviazione standard

Questa tolleranza nella misura della conducibilità produce una piccola differenza dal valore medio di conducibilità. Secondo il codice, la conduttività dichiarata è calcolata come segue nella formula 5:

$$\lambda_D = \lambda_M + \tau \quad (5)$$

λ_D = conducibilità termica dichiarata del pannello isolante

λ_M = conducibilità termica misurata del pannello isolante

Quindi, secondo l'intervallo di tolleranza statistica della norma EN 13172, il fattore K è un indice statistico di riduzione delle prestazioni che riduce all'1% la probabilità di misurare il valore di conducibilità al di fuori dell'intervallo di tolleranza statistica. Quindi questa possibilità residua potrebbe spiegare la differenza tra i dati dei produttori e quelli dei test di laboratorio di questa ricerca. In questa sperimentazione è stato fondamentale misurare tutte le caratteristiche fisiche principali, per poter poi comparare i risultati con quelli ottenuti con l'invecchiamento accelerato dell'intero sistema ETICS.

Caratterizzare bene il materiale ci ha consentito di non fare un confronto con i generici materiali così come descritti da scheda tecnica, ma con i materiali testati nelle loro caratteristiche principali e soprattutto con gli stessi apparati di misura.

Misurare tutte le prestazioni del singolo campione ha permesso di scattarne una fotografia con gli apparecchi di misura di laboratorio, uniformando così il metodo utilizzato per poter poi comparare i risultati con quelli ottenuti dall'invecchiamento accelerato dell'intero sistema ETICS.

Caratterizzare bene il materiale ci ha consentito di non fare un confronto con i generici materiali così come descritti da scheda tecnica, ma con i materiali testati nelle loro caratteristiche principali e soprattutto con gli stessi apparati di misura.

6.4 Preparazione dei provini

Per quanto riguarda la campionatura delle 6 tipologie di ETICS si è proceduto con l'acquisizione di tutti i materiali accessori necessari (rasante/collante, rete in fibra di vetro, tasselli meccanici, rasante e finitura superficiale).

Considerando la scelta dei materiali è stato selezionato, come partner di ricerca per la fornitura, una società che fornisca l'intero sistema ETICS certificato, ovvero una società non produttrice di isolanti ma di tutto il kit accessorio per la posa degli isolanti.

La fornitura dei diversi materiali proviene, quindi, dall'industria IVAS di San Mauro Pascoli (Forlì), leader internazionale che opera nel settore delle finiture edilizie, offrendo prodotti, soluzioni, sistemi, tecnologie integrate nel mercato delle costruzioni.

Tale società produce tutti i materiali accessori, ovvero rasante/collante, rete in fibra di vetro, fissaggi meccanici, rivestimento a spessore, e assemblandoli tra loro con il pannello isolante di diverse società produttrici, certifica la l'intero kit di sistema ETICS secondo quanto previsto dall'EAD 040083-00-0404.

Di seguito in figura 39, a titolo esemplificativo e non esaustivo, una delle tipologie di certificazioni ETA per l'intero pacchetto di sistema ETICS, qui denominato con il nome commerciale "Termok8 slim Stiferite Class Sk".



**Istituto per le Tecnologie
della Costruzione**
Consiglio Nazionale delle Ricerche
Via Lombardia 49 - 20098 San Giuliano Milanese - Italy
tel. +39-02-9806.1 - Telefax: +39-02-98280088
e-mail: info@itc.cnr.it

☆ ☆ ☆

☆ Designato in accordo ☆
con l'Articolo 29 ☆
del Regolamento (EU) ☆
☆ N° 305/2011. ☆
☆ ☆ ☆

Membro EOTA



www.ecfa.eu
European Organisation for
Technical Assessment
Organisation Européenne pour
l'évaluation technique

Valutazione Tecnica Europea **ETA 09/0060 del 16/07/15**

(Versione in lingua Italiana; è disponibile la versione in Inglese)

PARTE GENERALE	
Nome commerciale	"TERMOK8 SLIM STIFERITE CLASS S K" "TERMOK8 SLIM STIFERITE VV"
Famiglia di prodotto a cui il prodotto appartiene	Sistema Composito di Isolamento Termico Esterno di facciata con intonaco destinato all'isolamento termico esterno delle murature degli edifici
Produttore	Stiferite S.r.l. viale Navigazione Interna, 54 I - 35129 Padova (PD)
Impianto di produzione	Stiferite S.r.l. viale Navigazione Interna, 54 I - 35129 Padova (PD)
Questa Valutazione Tecnica Europea contiene:	11 pagine
Questa Valutazione Tecnica Europea è rilasciata in accordo con il Regolamento (EU) N° 305/2011, sulla base della Linea Guida:	ETAG 004 Edizione 2013, utilizzata come EAD (European Assessment Document – Documento di Valutazione Europea)
Questa Valutazione Tecnica Europea sostituisce il:	Benestare Tecnico Europeo N° 09/0060 rilasciato in data 10.06.2013

Figura 39 – Esempio di certificazione ETA (valutazione tecnica europea) relativa al sistema di isolamento termico a cappotto ETICS completo, in cui sono accoppiati i prodotti accessori della IVAS al pannello isolante STIFERITE CLASS SK

I materiali accessori utilizzati per l'applicazione dei campioni ETICS a regola d'arte sono di seguito identificati e descritti:

- Rasante/collante = KLEBOCEM minerale, un adesivo/rasante minerale eco-compatibile in polvere particolarmente indicato nei rivestimenti a cappotto di tipo minerale e per isolanti bio-compatibili. Si tratta di un collante a base di cemento bianco, sabbie silicee, inerte calcareo e additivi specifici.

Così come classificato dalla norma UNI 8681, il Klebocem risulta definito come un Adesivo/rasante minerale in polvere monocomponente a base di resine (copolimeri vinilici), sabbie selezionate e cemento Portland ad alta resistenza specifico per l'incollaggio e la rasatura di pannelli isolanti idoneo sia per interno ed esterno.

Il materiale viene miscelato aggiungendo il 22-24 % in peso di acqua e viene utilizzato come collante (in media 3 mm di spessore in quantità pari a 4-4,5 Kg/mq per incollare; lo stesso procedimento è stato eseguito per rasare applicando il materiale in due strati con interposta una rete di tessuto di vetro mentre; la quantità per rasare è pari a 4-4,5 Kg/mq. La rasatura è stata applicata con un frattazzo metallico in modo da ottenere una superficie sufficientemente omogenea. Sulla malta ancora fresca sono posati i teli in rete di filo di vetro tessuta Armatex (IVAS), ben tesi, annegandoli con l'aiuto di un frattazzo o di una spatola, avendo cura di sovrapporre i teli per almeno 10 cm ed avendo cura di evitare e/o di eliminare l'eventuale formazione di bolle e piegature. La rete è stata completamente ricoperta dalla malta e comunque non visibile.

- Rivestimento/strato di finitura = così come classificato dalla norma UNI 8682, il rivestimento scelto, il RIVATONE PLUS G12, è un rivestimento acrilico a spessore a base di resine vinil-acriliche in dispersione, additivi che ne facilitano l'applicazione, graniglie di marmo e sabbie quarzifere ad assorbimento controllato. Tale rivestimento forma un film resistente all'attacco di alghe, funghi e muffe certificato dal Fraunhofer-Institut für Bauphysik di Monaco. Il prodotto è verificato secondo le norme UNI EN15824 e ETAG n. 004 per l'uso del marchio CE ed è specifico per esterno; l'effetto visivo è ad effetto compatto, ha basso assorbimento ed una conducibilità termica pari a 0.93W/(mK). Il materiale è stato applicato con frattazzo metallico ottenendo uno strato omogeneo e poi è stato compattato e rifinito con frattazzo in plastica effettuando movimenti in senso rotatorio con una resa per ogni ciclo di applicazione di 1 mano pari a 2.2kg/ mq.
- Rete in fibra di vetro = IL MATERIALE UTILIZZATO è l'ARMATEX C 1 della IVAS, una rete di armatura per sistemi di isolamento a cappotto in fibra di vetro con apprettatura antialcalina per sistemi ETICS, provvista di certificato di conformità secondo EAD 040016-00-0404 con

sormonti quadrettati per una posa corretta. La rete di armatura in fibra di vetro va completamente annegata nello strato di malta rasante, steso sopra i pannelli isolanti. Si procede srotolando i rotoli di rete annegandoli con l'aiuto di un frattazzo o di una spatola, avendo cura di sovrapporli per almeno 10 cm, evitando la formazione di bolle o piegature; la rete utilizzata ha una maglia 4,5 x 4,7 mm, una altezza pari a 1,1 m e un peso di 160 g/m².

- Tasselli meccanici = si è utilizzato un tassello IVAS H3 a percussione specifico per il fissaggio di pannelli isolanti su calcestruzzo (A), laterizi pieni (B) e forati (C) con zona di espansione in HDPE (Polietilene ad alta densità) e perno in PAGF 50 (Poliammide rinforzata con fibra di vetro al 50%) premontato. Il tassello è provvisto di certificato di conformità secondo EAD 330196-01-0604 e finito sulla sommità con piattello telescopico per avere un fissaggio preciso, basculante (nel caso di fori inclinati), sottile e ad alta rigidità. La dimensione del perno è di 8 mm per cui la conducibilità termica puntuale è ininfluenza. La profondità del fissaggio è stata di 25 mm; è stato scelto un fissaggio prodotto in materiale sintetico in modo da ridurre la trasmissione termica. In cantiere sono spesso chiamati anche funghi dai posatori e dai professionisti del settore.

Dopo la consegna in laboratorio, è stata effettuata una fase di assemblaggio degli elementi, attraverso l'utilizzo dei sopraindicati collanti, rasanti, isolanti, reti, tasselli meccanici ecc., secondo le procedure di posa in opera che vengono descritte dalla *UNI/TR11715*, simulando una reale installazione dei kit in cantiere.



Figura 40 – Trasporto pannelli isolanti

La scelta e la successiva standardizzazione dimensionale dei pannelli 55x60 cm, è il risultato di 3 aspetti:

- adeguamento alle dimensioni dello sportello della cella climatica (per questo si raggiungono delle dimensioni che non possono superare quelle della porta della cella climatica);
- un attento studio delle prove distruttive che si vuole realizzare;
- attenzione ad alcune peculiarità di degrado del sistema; più in particolare il caso di punto triplo, in cui si sviluppano maggiormente tipologie di degrado come cavillature, ecc.

Lo schema di taglio dei provini si è previsto come nella seguente figura, consentendo così l'inserimento di tutte le prove necessarie per la prova. Infatti ogni prova distruttiva ha delle dimensioni minime, con provini che hanno dimensioni dai 5 x 5 cm delle prove di adesione ai 20 x 20 cm delle prove di assorbimento d'acqua.

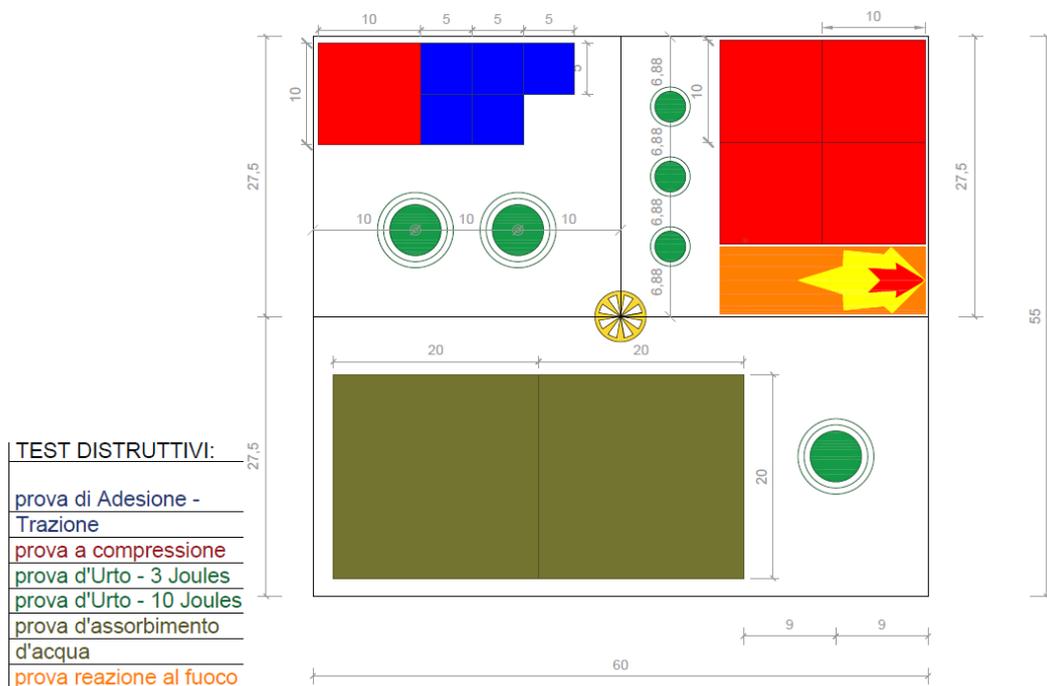


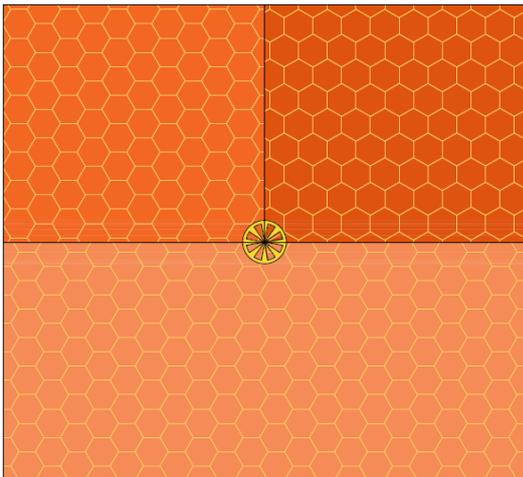
Figura 41 – Schema di taglio dei provini 55x60 cm in funzione della prova, in diversi colori sono indicate tutte le tipologie di test distruttivi, in giallo al centro giunto a T, accostamento di 3 pannelli isolanti

La fase di confezionamento che segue tutti i passaggi di seguito elencati, è stata eseguita da un posatore esperto, coinvolto per la realizzazione dei provini del presente progetto di ricerca allo scopo di garantire una costanza di posa in opera in tutti i campioni realizzati ed una lavorazione a regola d'arte secondo le

suddette norme.

Per quanto riguarda la fase di confezionamento di ogni campione 55 x 60 cm si è proceduto con le seguenti fasi assemblaggio del sistema (numerati di seguito in ordine alfabetico):

- a) taglio di 3 pannelli isolanti, girati ed uniti tra loro prima della successiva fase di incollaggio; in questa fase i pannelli isolanti vengono tagliati e, prima di essere uniti tra loro, sono stati girati per evitare la perfetta coincidenza dei tagli (casistica irrealizzabile in cantiere dato che solitamente sono pannelli diversi uniti tra loro); come si vede dalla prima delle seguenti figure si vedono i 3 pannelli con i 3 giunti al centro e con il tassello meccanico al centro del campione;
- b) incollaggio con rasante/collante Klebocem, materiale appositamente studiato per tale impiego e precedentemente descritto, dei suddetti 3 pannelli isolanti al supporto;
 - inserimento del tassello meccanico disposto in corrispondenza dell'unico incrocio dei pannelli isolanti;
- d) incollaggio della prima mano di rasante sui pannelli isolanti; durante tale fase si è rivestito anche i lati del campione
- e) l'interposizione della rete in fibra di vetro, girata anche sui lati del campione;
 - incollaggio di una seconda mano di rasante in modo da ottenere una superficie liscia ed uniforme, di spessore minimo di 1 mm.
- f) al completo indurimento del rasante, si applica il rivestimento di finitura, il Rivatone della IVAS con l'utilizzo di spatola.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 42 – (a) Schema di accostamento dei pannelli isolanti con al centro il fissaggio meccanico in giallo; (b) Foto della fase di incollaggio del pannello, tagliato e girato (c) Foto dei pannelli appena incollati al cartongesso; (d) Foto del campione con sopra lo strato di rasante di base appena incollato; (e) Foto del campione con la rete in fibra di vetro e il secondo strato di rasante in fase di applicazione; (f) Foto del campione appena realizzato con l'ultimo strato di finitura.

Nell'ultima figura, a completamento di tutte le fasi di costruzione del singolo campione, è possibile osservare come si presenta ogni campione finito e costruito.

Inoltre, per quanto riguarda questa fase di campionatura dei provini è stato creato un apposito supporto necessario per trasportare ed inserire in maniera stabile i campioni come porta della cella climatica impiegata.

Per questo motivo il suddetto supporto è stato creato con una sovrapposizione di un pannello in OSB (Oriented Strand Board) di 2 mm incollato tramite lo stesso rasante/collante Klebocem su un supporto meccanicamente più resistente in cartongesso da 12,5 mm (tutto ciò a causa dell'elevato peso di ogni singolo campione). Non è stato possibile usare un supporto in laterizio o riproporre il modello costruttivo che era stato previsto per il calcolo delle resistenze termiche

a causa di problemi di peso e trasporto dei singoli campioni da movimentare nelle varie fasi di sperimentazione.

I provini così confezionati sono stati testati e successivamente sottoposti ai processi d'invecchiamento.

6.5 Procedure di invecchiamento accelerato eseguite in laboratorio

Le prove di invecchiamento accelerato sono state eseguite tramite dei cicli di invecchiamento accelerato. In laboratorio sono stati eseguiti i cicli proposti dall'EAD, ovvero i cicli igrometrici e i cicli di gelo-disgelo (visti nel paragrafo 4.5). Le fasi di questi test, però, sono state modificate, esasperando ed incrementando alcuni valori di stress, dato che l'obiettivo principale è quello di stressare maggiormente i campioni per valutare la durabilità di un componente edilizio, il decadimento delle prestazioni complessive e l'evoluzione del degrado. Infatti seguire e superare le procedure standard previste dall'EAD significherebbe rendere i campioni conformi e pronti all'idoneità d'uso, ma essendo materiali oggetto di sperimentazione già conformi agli standard commerciali non ci interessa rispettare quanto definito dall'EAD, ma ci interesserebbe espandere l'orizzonte di indagine incrementando i parametri di stress termoigrometrico proposti dall'EAD.

A tal proposito i campioni sono stati esposti all'intero processo di test di cicli di invecchiamento accelerato proposti dall'EAD integrando con ulteriori fasi di invecchiamento, per ottenere così dei cicli di maggior sollecitazione per i campioni.

In laboratorio per procedere all'invecchiamento sono state utilizzate 3 differenti camere climatiche, in grado di riprodurre agenti atmosferici capaci di indurre meccanismi e fattori di degrado per l'ETICS. Processi che simulano eventi che normalmente un cappotto termico subisce durante la sua vita utile.

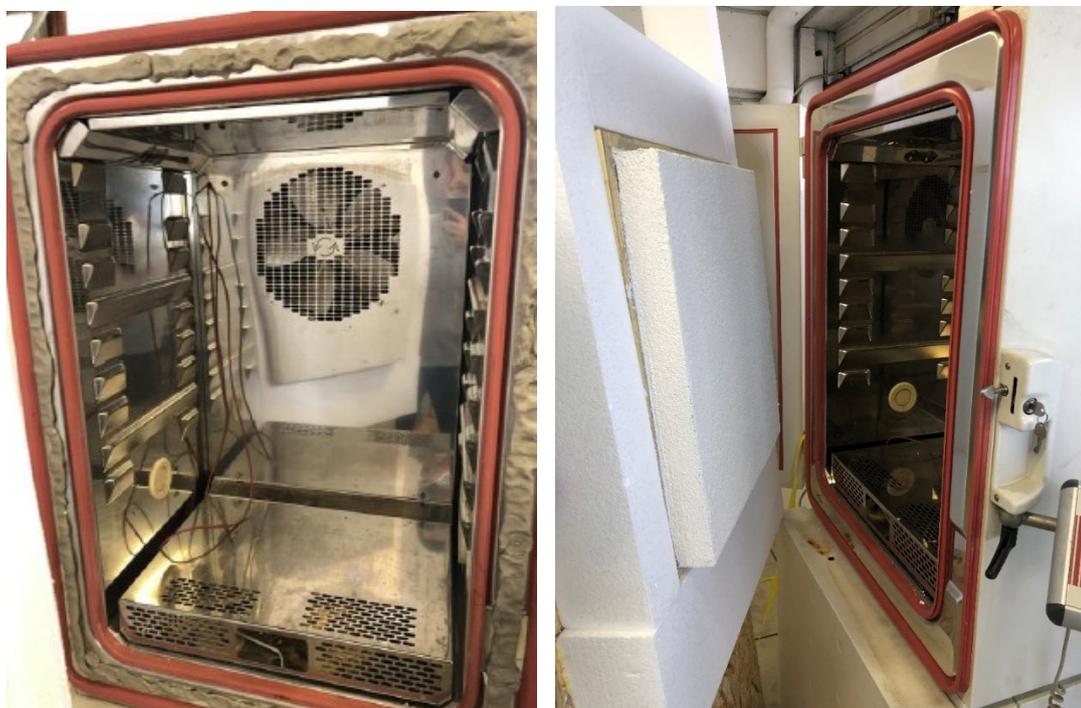


Figura 43 – Foto della camera climatica utilizzata ed applicazione del campione come portella della cella

Per il ciclo **caldo-pioggia** la sola differenza, rispetto a quanto previsto dall'EAD, è l'utilizzo di una cella climatica che prevede cicli più intensi grazie

a temperature massime di 80 °C in fase di caldo. Per cui per questa prova si sono sottoposti i kit a 80 cicli che comprendevano le seguenti fasi:

- riscaldare a 80 °C (per 1 ora) e mantenere a $(70 \pm 5)^\circ\text{C}$ e dal 10 al 30% di UR per 2 ore (totale di 3 ore);
- spruzzare per 1 ora “pioggia” a temperatura di $(+ 15 \pm 5)^\circ\text{C}$ e quantità d'acqua $1 \text{ l/m}^2 \text{ min}$;
- lasciare per 2 ore, fase di drenaggio.

La durata complessiva di questi passaggi richiede 6 ore, che ripetuto per un numero di 80 cicli porta ad una durata di circa 20 giorni per la conclusione di questo test applicato ad 1 kit ETICS.

Si riporta di seguito in figura 44 la tipologia di ciclo riprodotto a titolo illustrativo.



Figura 44 – ciclo caldo-pioggia

In laboratorio la prova è stata condotta su 2 campioni contemporaneamente, il che ha richiesto un tempo di circa 2 mesi e mezzo per completare tutti i cicli su i 6 kit ETICS assemblati.

Successivamente lo stesso banco di prova viene esposto a 7 cicli **caldo/freddo** di 24 ore che comprendono le seguenti fasi:

- esposizione a $(70 \pm 5)^\circ\text{C}$ (aumento per 1 ora) e massimo 30% RH per 7 ore (totale di 8 ore),
- esposizione a $(-10 \pm 5)^\circ\text{C}$ (caduta per 2 ore) per 14 ore (totale di 16 ore).

In questo caso il numero di cicli e i valori di temperatura e umidità relativa scelti per la prova sono ben più severi, se confrontati con quelli riportati dal EAD. La durata complessiva del singolo ciclo su un generico campione è di 24 ore, che moltiplicato per il numero di cicli e per il numero di campioni porta ad una durata complessiva di circa 1 mese e mezzo di prova.

Si riporta di seguito in figura 45 la tipologia di ciclo riprodotto a titolo illustrativo.

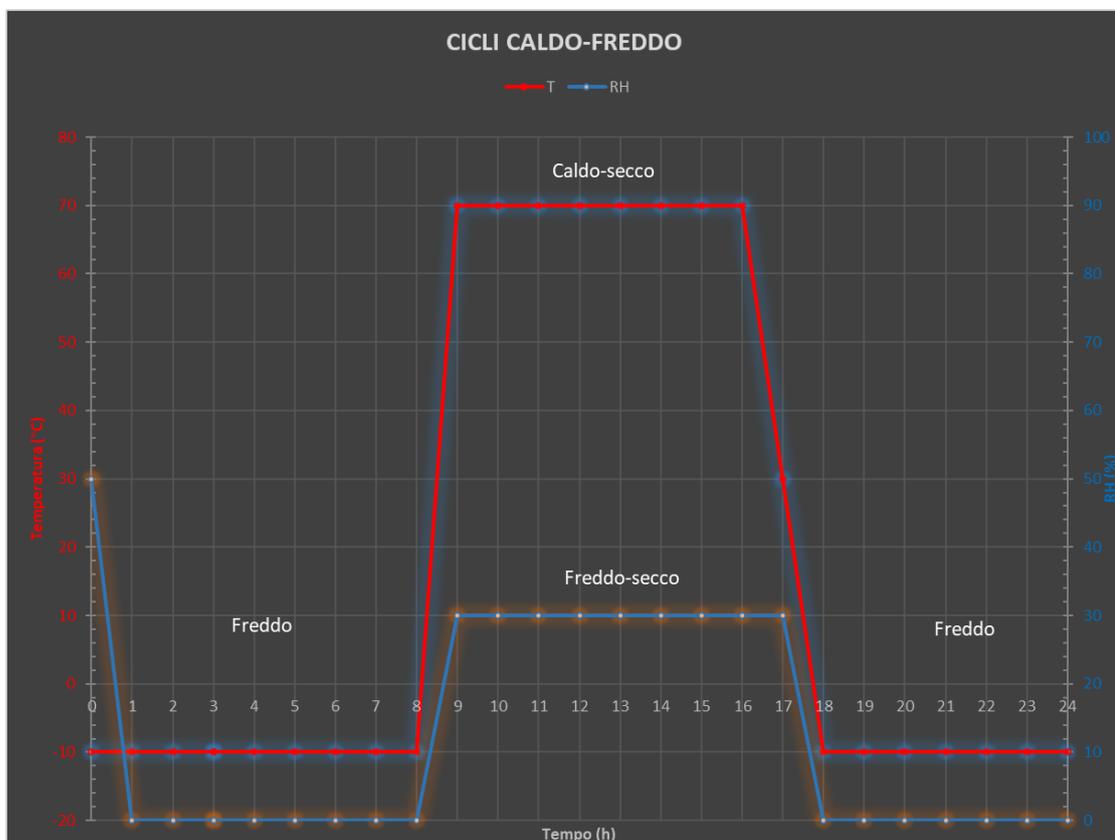


Figura 45 – ciclo caldo-freddo

La successiva prova riguarda il comportamento **gelo-disgelo**, in cui i campioni sono sottoposti a molti meno cicli rispetto a quelli previsti dall'EAD, ovvero una serie di 15 cicli che comprendono:

- esposizione all'acqua per 8 ore alla temperatura iniziale di $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ mediante immersione dei campioni, resa rivolta verso il basso, in un bagno d'acqua, con il metodo descritto in 2.2.5.1 (Test di capillarità);
- congelamento a $(-20 \pm 2)^\circ\text{C}$ (caduta per 5 ore sulla superficie del

campione e per 2 ore nell'aria condizionata) per rispettivamente 11 e 14 ore (totale di 16 ore).

- shock termico, attraverso una stufa che consente il passaggio di temperature del campione da $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Si riporta di seguito in figura 46 la tipologia di ciclo riprodotto a titolo illustrativo.

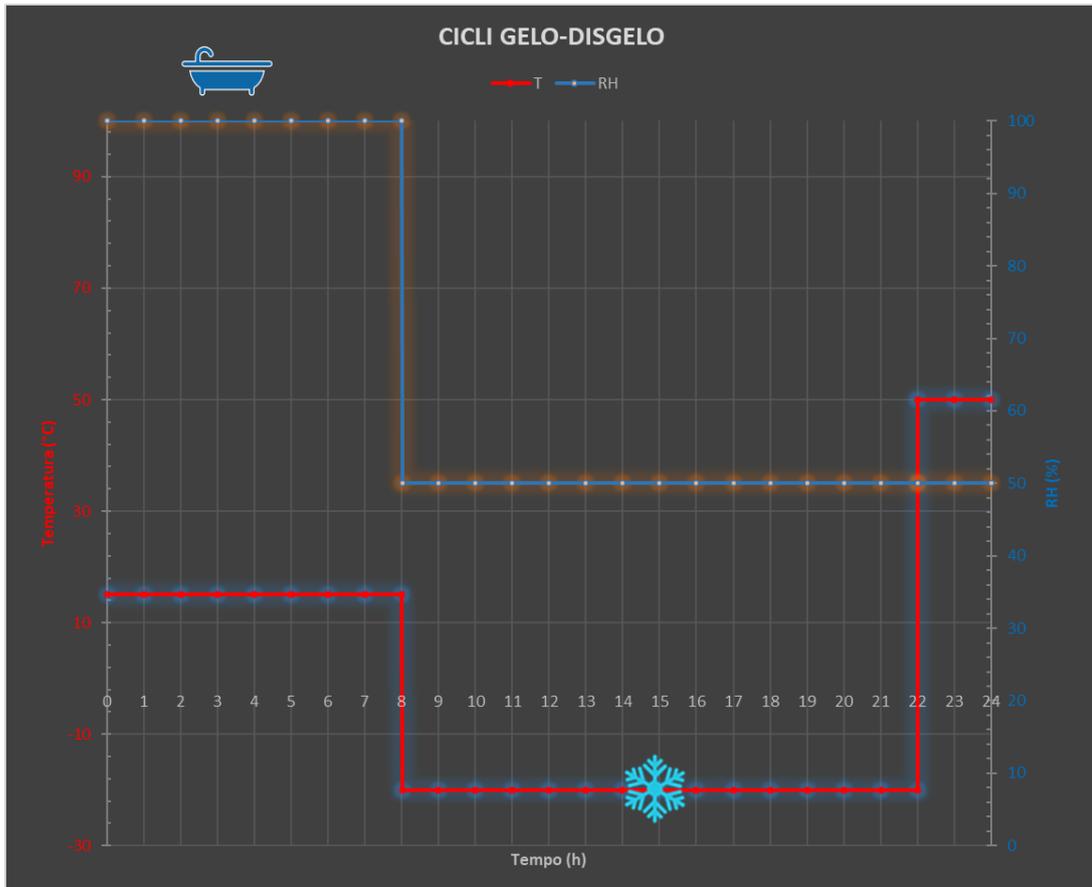


Figura 46 – ciclo gelo-disgelo

La durata complessiva di questi passaggi, compresa la fase di shock termico, richiede 24 ore che moltiplicato per il numero di cicli e per il numero di campioni vede una durata complessiva della prova di circa 2 mesi e mezzo per la conclusione di questa prova.

6.6 Prove di prestazione sui campioni

Una volta terminati i cicli di invecchiamento dei campioni in laboratorio sono stati eseguiti tutti i test di performance necessari per valutare i campioni pre e post invecchiamento. I test di seguito descritti sono quindi stati eseguiti prima dell'invecchiamento accelerato e dopo l'invecchiamento accelerato appena esposto. Tali test di performance consentiranno la caratterizzazione del degrado dei campioni di ETICS analizzati, valutando lo stato degli ETICS durante la sua vita utile.

6.6.1 Degrado Superficiale

Il primo metodo di valutazione non può essere descritto come un vero e proprio test di performance ma come una valutazione ottica del degrado dei rivestimenti. La procedura e la quantificazione corretta del degrado superficiale viene definita dalla ISO 4628 – “designazione della quantità e della dimensione dei difetti e della intensità nelle alterazioni uniformi dell'aspetto”.

La ISO 4628, composta da una serie di capitoli atti a valutare ogni forma di degrado superficiale, fornisce standard di valutazione dei difetti e delle anomalie e altri mezzi per valutare particolari difetti. Queste analisi vengono eseguite attraverso degli schemi di valutazione, forniti dalla norma, confrontati con lo stato di fatto rilevato sul campo. Nella prima parte, ovvero nel capitolo 1 della ISO 4628, viene definito in che modo quantificare e valutare ciò che viene osservato, attraverso l'utilizzo di scale numeriche. Come citato nel titolo della norma ciò che viene misurato è la quantità e la dimensione dei difetti e l'intensità dei cambiamenti. Per tutte e tre le misurazioni, la norma, fornisce una scala numerica che va da 0 a 5, dove il valore 0 rappresenta l'assenza di difetti o cambiamenti, mentre il valore 5 denota la presenza di difetti o cambiamenti gravi. Le altre valutazioni, corrispondenti ai numeri 1, 2, 3 e 4, sono definite in modo da dare una discriminazione ottimale su tutta la gamma della scala. Inoltre viene consentito anche l'uso di categorie intermedie, nella scala dei valori da 0 a 5, per avere un rapporto più dettagliato sui difetti o sui cambiamenti osservati. Oltre alle valutazioni, la norma prevede che siano indicate le dimensioni approssimative dell'area interessata oggetto di studio, o la proporzione dell'area interessata rispetto alla superficie totale, espressa in percentuale. In tale caso l'area di studio è l'intera superficie del campione 55 x 60 cm.

La prima scheda di valutazione fornisce la definizione della quantità di difetti, intesi come discontinuità o altre imperfezioni locali nel rivestimento, che vengono rilevate sull'area di prova. Le valutazioni devono essere espresse come numero intero, salvo diversa indicazione, tenendo in considerazione quanto proposto all'interno della tabella 1 della ISO 4628 (tabella 19):

Valutazione	Quantità del difetto
0	nessuno, cioè nessun difetto rilevabile

1	pochissimi, cioè un numero ridotto e poco significativo di difetti
2	pochi, cioè un numero piccolo ma significativo di difetti
3	numero moderato di difetti
4	un numero considerevole di difetti
5	modello denso di difetti

Tabella 19 – Schema di valutazione per designare la quantità di difetti da ISO 4628

La successiva scheda di valutazione fornisce la definizione della dimensione media (in ordine di grandezza) dei difetti. La valutazione di questo aspetto viene fatta considerando la tabella 2 della ISO 4628 (tabella 20):

Valutazione	Dimensione del difetto
0	non visibile sotto l'ingrandimento x10
1	visibile solo con un ingrandimento fino a x10
2	appena visibile con visione normal corretta (<i>fino a 0,2 mm</i>) ^b
3	chiaramente visibile con visione normal corretta (<i>maggiore di 0,2 mm fino a 0,5 mm</i>)
4	più grande di 0,5 mm <i>fino a 5 mm</i>
5	più grande di 5 mm

Tabella 20 – Schema di valutazione per designare la dimensione dei difetti da ISO 4628

Se un'area di prova presenta difetti di varie dimensioni, viene indicata la dimensione dei difetti più grandi, specie se abbastanza numerosi da essere tipici dell'area di prova. La dimensione del difetto deve essere riportata usando la designazione S_n , dove S indica la dimensione e n è il numero di classificazione. L'ultima tabella di valutazione fa riferimento all'intensità dei cambiamenti nell'aspetto del rivestimento, come ad esempio i cambiamenti di colore (l'ingiallimento). Le valutazioni di questo aspetto vengono definite dalla tabella 3 della ISO 4628 (tabella 21):

Valutazione	Intensità del cambiamento
0	invariato, cioè nessun cambiamento percepibile
1	molto leggero, cioè appena percettibile cambiamento
2	leggero, cioè un cambiamento chiaramente percepibile
3	moderato, cioè un cambiamento molto chiaramente percepibile
4	cambiamento considerevole, cioè pronunciato
5	cambiamento molto marcato

Tabella 21 della ISO 4628 – Schema di valutazione per designare l'intensità dei cambiamenti da ISO 4628

Definite le scale di valutazione con le relative descrizioni è possibile, a seconda del tipo di difetto, indicare la quantità presente (vedi *tabella 1*) e la sua dimensione (vedi *tabella 2*), espressi come indicato nel seguente esempio:

- ✓ degree of *blistering* 2 (S_2), in cui 2 sta ad indicare la quantità dei difetti e S_2 indica che la dimensione del difetto è 2; va inoltre indicata la dimensione della superficie interessata, o la sua proporzione rispetto alla

superficie totale, espressa in percentuale. Se il difetto lo contempla, va poi indicato il tipo di cambiamento e la sua intensità (vedi *tabella 3*), che viene espressa come indicato nel seguente esempio:

✓ *chalking* (sfarinamento) 4;

sempre indicando le dimensioni approssimative della superficie interessata.

I rimanenti 9 capitoli della *ISO 4628* descrivono 9 differenti tipologie di degrado, con i relativi schemi e modi di valutazione di intensità, di caratteristiche qualitative e misura del difetto.

Facendo riferimento, ad esempio, al capitolo 2 della *ISO 4628*, si definisce il metodo per valutare il grado di formazione del blistering dei rivestimenti attraverso un confronto con standard pittorici. La norma considera solo blister nelle dimensioni 2, 3, 4 e 5 (*tabella 1*) e nelle quantità 2, 3, 4 e 5 (*tabella 2*), in quanto dimensioni al di sotto di *S1* di blister non sono visibili correttamente ad occhio nudo ma solo con un ingrandimento x10. Quando parliamo di valutazione di blistering stiamo facendo riferimento alla presenza di bolle sul rivestimento (in termini di quantità e dimensioni). Quindi la valutazione avviene in forma quantitativa attraverso la scala numerica indicata nella *ISO 4628-1*, con il supporto di figure fornite dalla *ISO 4628-2*. La *ISO 4628-2*, infatti, si compone di una raccolta di immagini in cui vengono indicati i quattro schemi di quantità del blister, al crescere della dimensione *Sn*.

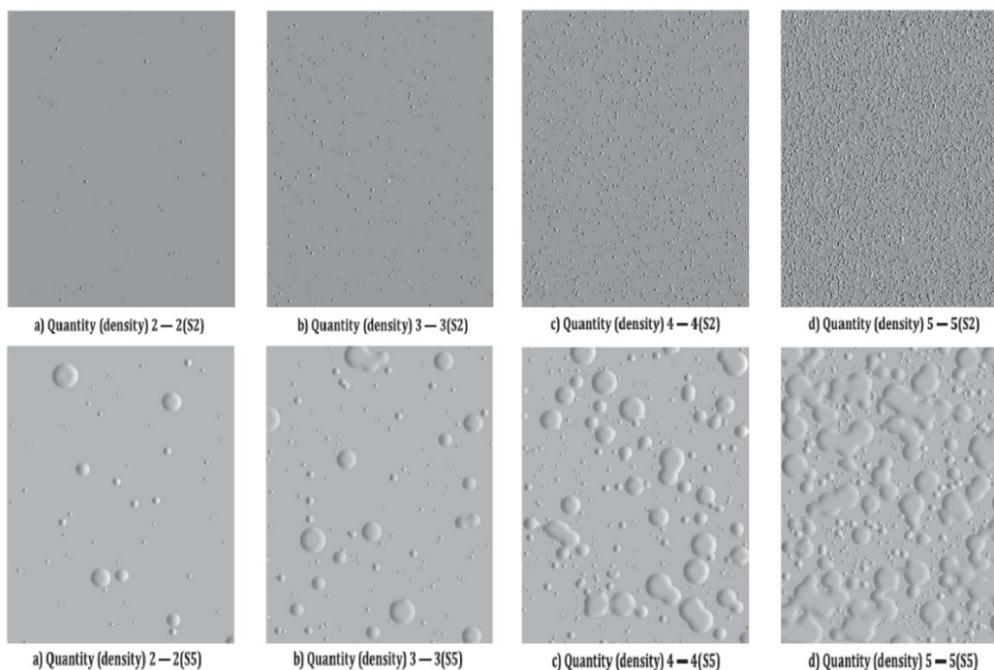


Figura 47 – *ISO 4628-2* “Figure 1” Esempio di blisters *S2* (sopra); “Figure 4” Esempio di blister *S5* (sotto)

Con la stessa struttura sono definiti i capitoli successivi, con l’unica differenza che riguarda il difetto superficiale:

- *UNI EN ISO 4628-2:2016* – Valutazione del grado di formazione di bolle (blistering);

- *UNI EN ISO 4628-3:2016* – Valutazione del grado di ossidazione (rusting) del rivestimento;
- *UNI EN ISO 4628-4:2016* – Valutazione del grado di screpolatura;
- *UNI EN ISO 4628-5:2016* – Valutazione del grado di esfoliazione;
- *UNI EN ISO 4628-6 e 7:2008* – Valutazione del grado di sfarinamento;
- *UNI EN 4628-8:2013* – Valutazione del grado di sfogliamento e corrosione attorno a un incisione o altro difetto ottenuto artificialmente;



Figura 48 – Stato di fatto provini invecchiati (foto laboratorio)

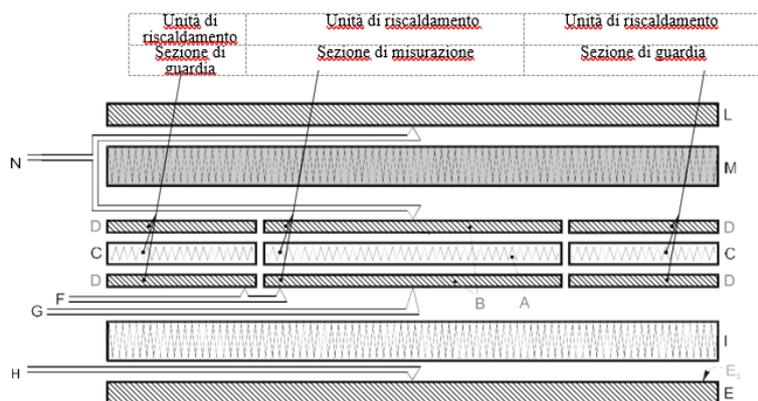
6.6.2 Resistenza termica

Per la corretta procedura, della prova di misurazione della resistenza termica, si è fatto riferimento alla UNI EN 12667 – Prestazione termica dei materiali e dei prodotti per l'edilizia. Determinazione della resistenza termica con il metodo della piastra calda con anello di guardia e con il metodo del termoflussimetro. Inoltre sono state seguite anche le indicazioni riportate al Capitolo 2.2.23 (Resistenza termica e trasmittanza termica degli ETICS) dell'EAD 040083-00-0404. Questa norma fornisce informazioni generali sull'apparecchiatura, su tutti i limiti obbligatori per la progettazione e il funzionamento dell'apparecchiatura e sulla specifica procedura di prova per i campioni. Le informazioni fornite da questa norma sono equivalenti a quelle definite dai due capitoli iniziali della ISO (ISO 8301:1991 e ISO 8302:1991). Questa norma, quindi, specifica i principi e le procedure di prova per determinare, per mezzo dei metodi della piastra calda di guardia o del flussometro di calore, la resistenza termica dei provini. Sia l'apparecchio a piastra calda che l'apparecchio di misurazione del flusso di calore hanno lo scopo di stabilire all'interno di campioni, omogenei con facce piane e parallele, una densità unidirezionale costante e uniforme di flusso di calore. La parte dell'apparecchio in cui questo avviene con una precisione accettabile è intorno al suo centro; l'apparecchio è quindi diviso in una sezione di misurazione centrale in cui vengono effettuate le misurazioni, e una sezione di guardia circostante.

In laboratorio è stata condotta la prova di tipo A, ovvero quella che vede l'utilizzo della piastra calda. In commercio esistono due tipi di apparecchi a piastra calda, che sono conformi al principio di base delineato nella clausola 4 e sono:

- con 2 campioni e un'unità di riscaldamento centrale;
- con un solo campione (utilizzato per l'esperimento in laboratorio).

Come indicato nella figura 50 l'apparecchio è composto da un'unità di riscaldamento centrale che consiste in una piastra in cui è possibile concentrare una densità unidirezionale costante e uniforme della portata di calore, circondata da una sezione di guardia separata da uno spazio stretto. Sempre nella parte centrale è presente la sezione di misurazione del provino delimitata dalla linea centrale della fessura dell'unità di riscaldamento. Infine sono presenti le unità di raffreddamento, che devono avere dimensioni almeno pari a quelle dell'unità di riscaldamento, e sono costituite da piastre metalliche mantenute a una temperatura costante ed uniforme.



b) **Apparecchio a campione singolo**

A	Sezione di misurazione calore	G	Termocoppie di superficie dell'unità di riscaldamento
B	Piastre di superficie della sezione di misurazione	H	Termocoppie di superficie dell'unità di raffreddamento
C	Riscaldatore della sezione di guardia	I	Campione di prova
D	Piastre di superficie della sezione di guardia	L	Piastra di protezione
E	Unità di raffreddamento	M	Isolamento della piastra di protezione
E _s	Superficie dell'unità di raffreddamento	N	Termocoppie differenziali a piastra di guardia
F	Termocoppie differenziali		

Figura 49 – Fig.1 della norma UNI EN 12667 (tradotta) – Caratteristiche generali dell'apparato a piastra calda ad un provino

All'interno di questo apparecchio viene inserito il campione preso sottoforma di lastra e posizionato nella parte centrale dentro l'anello di guardia, per poi eseguire le seguenti misurazioni:

- la quota di flusso di calore che attraversa l'area A del campione per determinare la densità di quota del flusso di calore (utilizzando termoflussimetri posizionati a contatto con il campione)
- il Δt (utilizzando sensori di temperatura sulle superfici del campione).

Attraverso queste misurazioni (densità del flusso di calore e la differenza di temperatura attraverso i campioni) è possibile calcolare la resistenza termica R :

$$R = \frac{T_1 - T_2}{\Phi} A$$

O il fattore di trasferimento λ (conduttività termica):

$$\lambda = \frac{\Phi d}{A (T_1 - T_2)}$$

Dove:

T_1 è la temperatura lato caldo del provino;

T_2 è la temperatura lato freddo del provino;

Φ è la potenza media fornita alla sezione di misurazione dell'unità di riscaldamento;

A è l'area di misurazione;

d è lo spessore medio dei provini.

Nella misurazione della resistenza termica o conseguente conducibilità termica dei soli materiali isolanti (isolanti vergini, non ETICS), l'EAD definisce “Il valore più alto calcolato o valutato sperimentalmente della resistenza termica dell'ETICS, espresso in $(m^2K)/W$, deve essere dichiarato”. Questo dato è molto utile nella valutazione delle misurazioni effettuate dei materiali isolanti vergini.

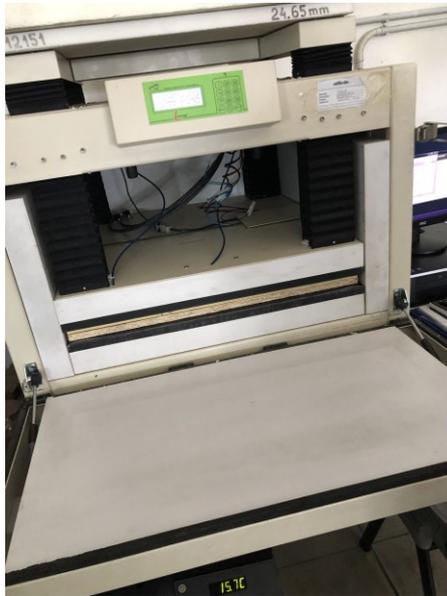


Figura 50 – Macchinario utilizzato per la suddetta misurazione della resistenza termica

Come illustrato nella seguente immagine i campioni di dimensioni 55x60 sono stati inseriti nell'apposito macchinario per la suddetta prova della UNI EN 12667.



Figura 51 – Test di Resistenza termica su uno dei campioni ETICS

Per completezza è stata anche effettuata una prova di resistenza termica secondo il codice EN 12667 sull'intera stratigrafia necessaria per il confezionamento del campione, ossia OSB, cartongesso, rasante e rivestimento di finitura (spessore totale = 30,32 mm) senza il materiale isolante termico (in figura XX l'inserimento del campione senza isolante all'interno del macchinario prima dell'inizio del test di misurazione); i valori di trasmittanza termica e di resistenza termica sono risultati rispettivamente 3,78 W/m²K e 0,26 m²K/W.

6.6.3 *Fattore di attenuazione e sfasamento*

Dopo aver valutato la resistenza termica, la conducibilità termica e la trasmittanza termica, si è proceduto con la determinazione delle altre due prestazioni termiche necessarie per completare la caratterizzazione del sistema di isolamento termico: sfasamento e fattore di attenuazione.

Prima di definire la procedura che vede il calcolo di queste due caratteristiche, andiamo a definire il significato di fattore di attenuazione e sfasamento termico, proprietà estremamente importanti per quantificare l'efficienza energetica di un componente opaco di un edificio.

La differenza temporale Φ tra il picco della temperatura superficiale esterna ed il picco di temperatura superficiale interna prende il nome di sfasamento della parete, ed è espresso in *ore*. Valori ottimali di sfasamento sono di 8 -12 ore. Per capire meglio questo concetto immaginiamo di trovarci in regime estivo, in cui una parete è soggetta ad una elevata variazione solare durante il giorno. Nelle prime ore del mattino la temperatura superficiale esterna della parete si riscalda, fino ad un picco registrato intorno alle ore 14:30 per esempio. La sera la temperatura scende ad un picco minimo, probabilmente questo accadrà di notte, e il giorno successivo riaumenterà. Volendo descrivere graficamente questo comportamento all'interno di un piano cartesiano, avremo una sinusoide rappresentativa della temperatura esterna della superficie della parete. Applicando lo stesso ragionamento sul comportamento della temperatura superficiale interna della parete avremo anche in questo caso una sinusoide, che però sarà caratterizzata da uno "sfalsamento" rispetto alla curva precedentemente descritta. Quindi la superficie interna si riscalda, ma con un certo ritardo rispetto a quella esterna, e il picco che raggiunge è un po' più basso rispetto a quello della superficie esterna. Per cui lo sfasamento temporale della parete rappresenta la differenza, espressa in ore, di questi due picchi di temperatura.

Attraverso questa proprietà possiamo trarre alcune osservazioni sul comportamento dinamico degli involucri edilizi. Infatti, mentre la resistenza termica misura una caratteristica in regime stazionario, l'attenuazione e lo sfasamento registrano l'attitudine della parete ad accumulare e rilasciare calore in regime termico dinamico.

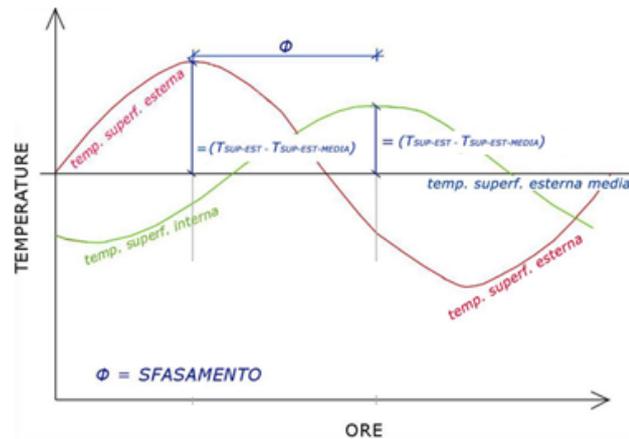


Figura 52 – Esempio andamento T-h componente opaco

Il secondo parametro da definire è il *fattore di attenuazione*, pari al rapporto tra la differenza tra la temperatura superficiale interna di picco massimo e la temperatura esterna media e la differenza tra la temperatura superficiale esterna di picco massimo e la temperatura esterna media (indicati con i 2 segmenti blu nella figura precedente). L'obiettivo nella progettazione è avere la differenza tra la temperatura superficiale interna di picco massimo e la temperatura esterna media quanto più bassa possibile, perché questo significherebbe dire che in estate la temperatura superficiale interna è aumentata di pochissimo, a fronte di un grande aumento della temperatura superficiale esterna avendo, quindi, un surriscaldamento interno molto ridotto. La situazione ideale sarebbe quella di avere un valore pari a zero, condizione nella quale la parete internamente non si riscalda, neanche ad elevate temperature esterne. Essendo questa una condizione ideale, nella realtà i valori auspicabili sono nell'ordine di 0,1 – 0,2. Questi 2 parametri appena esposti sono molto importanti e strettamente legati alla trasmittanza termica periodica. Infatti più bassa è la trasmittanza periodica, migliori sono sfasamento ed attenuazione, viceversa più alta è la trasmittanza periodica e peggiori sono i valori di sfasamento e attenuazione.

Comunemente queste proprietà consentono di valutare il comportamento estivo dell'involucro edilizio studiato e materiali con un elevato peso (densità elevate) presentano ottimi valori di attenuazione e sfasamento.

Definite queste proprietà andiamo a descrivere la procedura per la misurazione del fattore di attenuazione e sfasamento sui campioni. A supporto è stata considerata la metodologia seguita al politecnico di Milano nello studio del Prof. Daniotti [33].

Per la riproduzione di questa onda termica sinusoidale, in laboratorio è stato eseguito un procedimento abbastanza complesso in cui i vari campioni di ETICS sono stati tagliati nelle dimensioni del portello della cella climatica. Infatti per riprodurre due ambienti climatici differenti, interno ed esterno, sono stati sostituiti al portello della cella climatica i vari campioni di ETICS, in questo modo la faccia interna del campione simula l'irraggiamento del sole nelle ore calde e attraverso dei sensori di rilevamento della temperatura sulla faccia esterna (lato laboratorio) è stato possibile misurare i valori di sfasamento ed

attenuazione.

Una fase preliminare ha interessato lo studio della sagoma (mista in legno e poliuretano), delle guarnizioni (in lana di roccia) e dei cavalletti (cerniere) al fine di creare un contorno stabile in cui inserire i vari campioni di ETICS, così da formare un “tappo” aderente alla cella climatica (ricreando così il portellone).



Figure 53 – Costruzione della sagoma del campione prima dell'inserimento come portello della cella climatica



Figure 54 – Campione inserito come portello della cella climatica prima dell'inizio del test per sfasamento ed attenuazione

In seguito sono stati inseriti i sensori di temperatura necessari per la registrazione delle temperature superficiali (vedi figura 55).

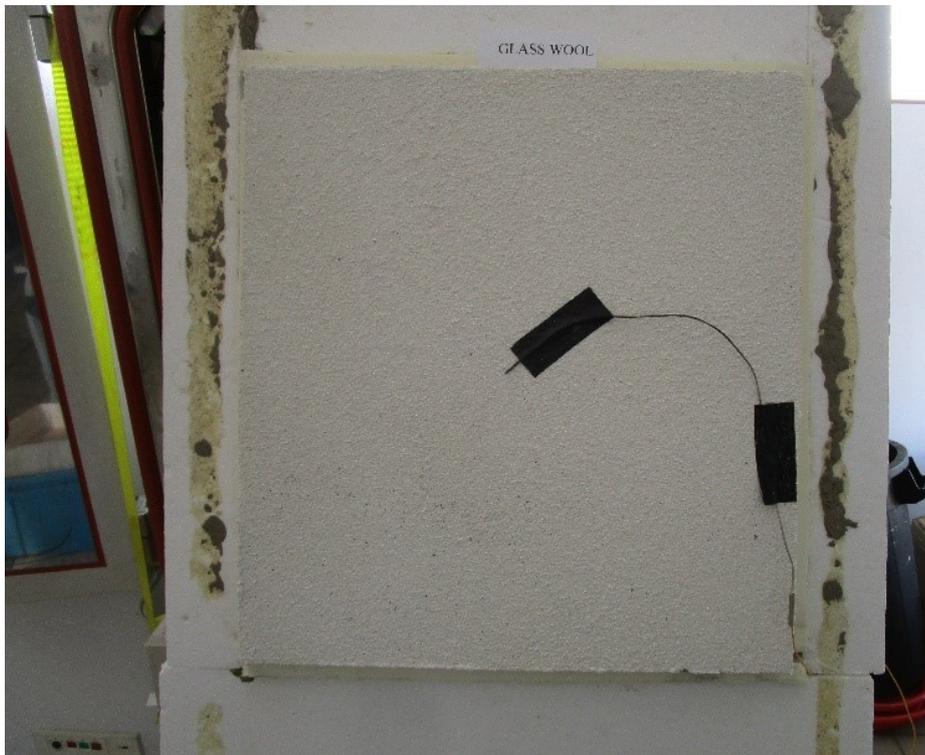


Figura 55 – Sensori di temperatura sul campione prima di essere posizionato come portella della cella climatica

Per valutarli, secondo alcuni studi recenti [31] [33], è possibile analizzare il fattore di sfasamento temporale e decremento mediante un'onda sinusoidale che riproduce la curva termica della temperatura superficiale esterna sugli

involucri verticali in condizioni di picco a Milano (21 luglio, ai sensi del codice UNI 10349).

All'interno della camera climatica la curva dell'onda termica giornaliera della temperatura superficiale esterna viene riprodotta secondo la seguente procedura: all'interno della cella climatica si è riprodotta la curva giornaliera dell'onda termica della temperatura della parete esterna stimata durante la giornata più calda dell'anno, nella località di Milano.

Per farlo si è tenuto conto di precedenti studi [30] [31] [33] i quali tengono conto dell'analisi dei dati meteorologici; in questi studi si raccolgono i valori giornalieri di temperatura e irraggiamento solare nella città di Milano e i dati relativi all'impiego degli ETICS sotto tali condizioni ambientali.

In base a tali dati, è stata simulata nel giorno più caldo dell'anno la variazione di temperatura del 21 luglio nel contesto di Milano. Durante la vita utile la temperatura più alta raggiunta dalle chiusure verticali di un involucro edilizio con vernice bianca è stata stimata essere circa 65 C [33]; come tale, l'obiettivo di temperatura di picco durante l'onda termica riprodotta è 65 C.

Questa procedura è possibile a causa della posizione del campione, posto come porta della camera climatica. Così, il campione divide la parte interna della camera, che simula l'esposizione all'esterno, dall'esterno della camera climatica, che simula l'interno dell'edificio (vedi Figura precedente).

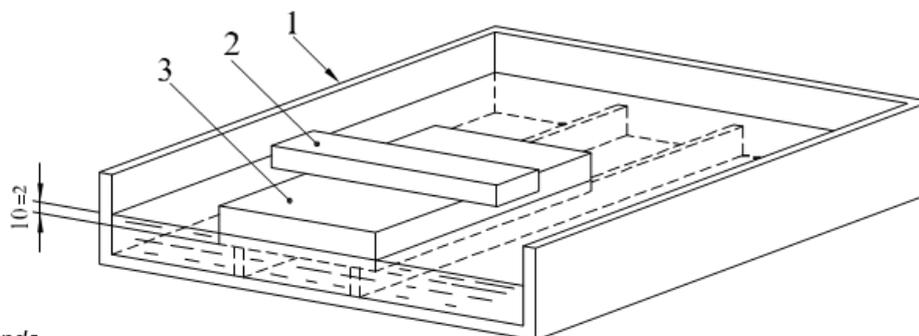
Per valutare questi due importanti parametri termici, i sensori hanno misurato: la temperatura sulla superficie interna e sulla superficie esterna del campione; i tempi di risposta ed i picchi di temperatura raggiunti e confrontati a quelli di riproduzione dell'onda termica.

Un altro sensore di temperatura, posto nella stanza del laboratorio dove si trova la camera climatica è servito per il monitoraggio della temperatura dell'aria del laboratorio, un ambiente climatizzato con una temperatura dell'aria registrata più o meno stabile per tutto il periodo gennaio-aprile a 20 ± 3 C.

Inoltre per garantire una corretta lettura dei dati è stato rivestito il campione con un ulteriore isolante in poliuretano di 8 cm per garantire che la sonda di temperatura della superficie esterna alla cella climatica non risenta della temperatura ambientale.

6.6.4 Assorbimento d'acqua

Per la corretta procedura, della prova dell'assorbimento d'acqua, si è fatto riferimento alla UNI EN 1609, che determina l'assorbimento d'acqua a breve termine attraverso immersione parziale, ed alle indicazioni riportate al capitolo 2.2.5 – Assorbimento dell'acqua – dell'EAD 040083-00-0404.



Legenda

- 1 Bacinella per l'acqua
 - 2 Peso per tenere il provino in posizione
 - 3 Provino
- Dimensioni in millimetri

Figura 56 – Esempio di dispositivo per l'immersione parziale da UNI EN 1609

La norma *UNI EN 1609* fa parte di un insieme di norme (pacchetto CEN/TC 88) che fissano metodi di prova per la determinazione delle dimensioni e delle proprietà dei materiali e prodotti isolanti termici. Al suo interno viene riportato, oltre al procedimento da seguire, anche la specifica apparecchiatura da utilizzare. Il procedimento deve essere fatto su 3 campioni a sezione quadrata di almeno 20×20 cm, ricavati in modo da non compromettere la struttura del prodotto originale e senza includere i bordi. Questo ha creato non pochi problemi nell'individuazione dello spazio necessario per il taglio dei provini necessari per l'esecuzione della prova.

Come descritto dalla UNI 1609, prima e durante la prova, i provini sono mantenuti per 6 ore a temperature di $(23 \pm 5) ^\circ C$. In queste condizioni è possibile procedere con la prova, che si articola nelle seguenti fasi:

- rilevazione del peso del provino con determinazione della massa iniziale m_0 ;
- inserimento del provino in una bacinella vuota ed applicazione di un peso per tenerlo parzialmente immerso;
- aggiunta di acqua nella bacinella finché la faccia inferiore del provino si trovi (10 ± 2) mm sotto la superficie, costante per tutta la durata della prova;
- immersione del campione per una durata di 1 ora e 24 ore e quindi farlo sgocciolare per 10 min ponendolo verticalmente su una rete,

- nuova rilevazione del peso del provino per determinare la massa m_1 e m_{24} .

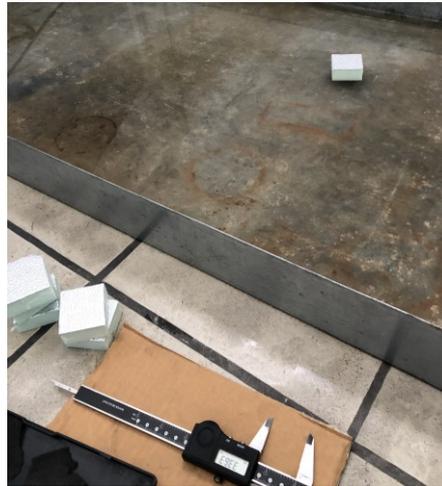


Figura 57 – Attrezzatura per prova in laboratorio di assorbimento d'acqua

Lo scopo di questa prova è misurare l'assorbimento d'acqua per metro quadrato di 3 provini dopo 3 ore e 24 ore, simulando l'assorbimento d'acqua degli isolanti soggetti ad una giornata di pioggia di 1 ora e 24 ore. Per calcolare l'assorbimento d'acqua, per breve periodo, con immersione parziale W_p , si usa la seguente equazione:

$$W_p = \frac{m_{24} - m_0}{A_p}$$

Dove:

m_0 è la massa iniziale del provino, in *kg*;

m_{24} è la massa del provino dopo l'immersione per 24 ore, in *kg*;

A_p è l'area della superficie inferiore del provino, in m^2 ;

W_p è l'assorbimento d'acqua, in kg/m^2 .

I suddetti test di assorbimento d'acqua a 1 ora e 24 ore, così come appena descritti, sono stati realizzati su campioni 20 x 20 cm su 2 tipologie materiali:

- provini 20 x 20 cm di solo materiale isolante (isolanti “vergini”) per tutte le tipologie di pannelli isolanti studiati
- provini ETICS (sistemi ETICS rivestiti con tutti gli strati di finitura); i provini vengono tagliati 20 x 20 cm, prelevati dai campioni 55 x 60 cm (pre e post invecchiamento), e rivestiti sui lati dei provini da un sigillante impermeabile per impedirne l'infiltrazione dell'acqua (vedi figura 56); l'assorbimento d'acqua registrato potrà avvenire solo dalla superficie principale di dimensioni 20 x20 cm, evitando assorbimenti sui lati.

Questa procedura di sigillatura dei lati dei campioni è fondamentale perché gli ETICS si presentano sempre rivestiti da strati di finitura negli edifici reali, e proprio tali rivestimenti li difendono dall'infiltrazione d'acqua.

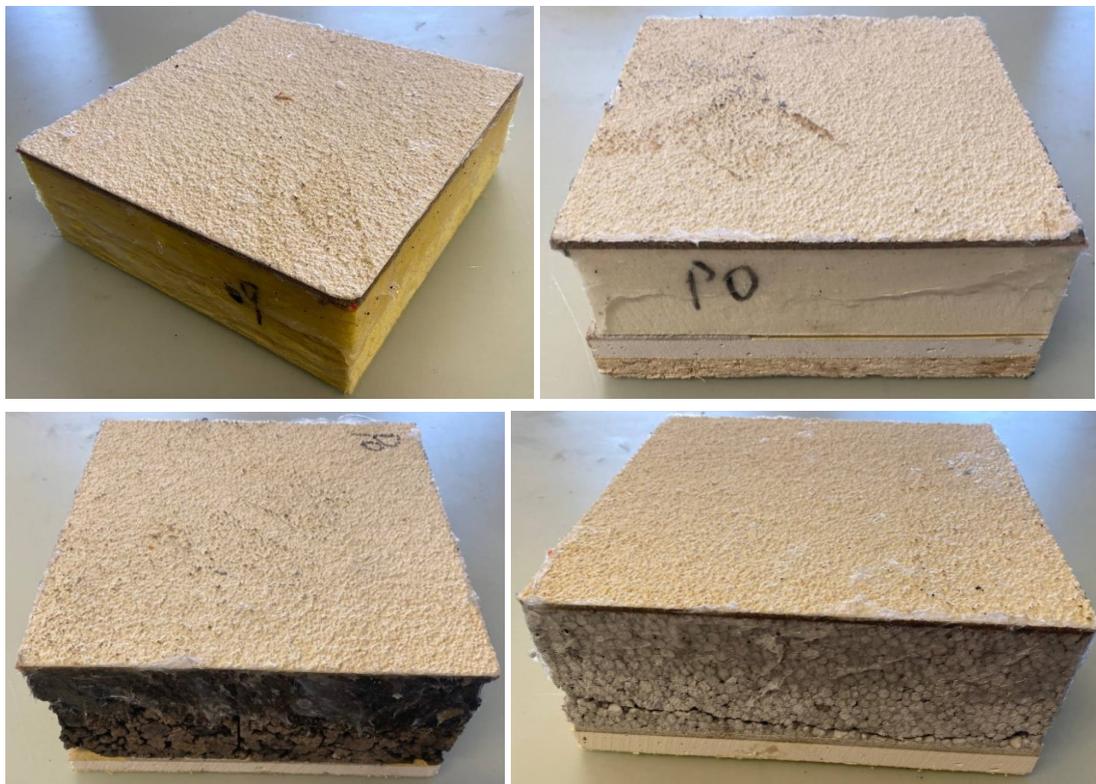


Figura 58 – Foto provini rivestiti con sigillante poliuretano

6.6.5 Adesione – prova a trazione perpendicolare alle facce

Per la corretta procedura della prova a trazione si è fatto riferimento alla UNI EN 1607 che determina la resistenza a trazione perpendicolare alle facce degli isolanti termici per l'edilizia ed alle indicazioni riportate al capitolo 5.1.4.1 dell'ETAG 004 che è il metodo valido per i campioni di ETICS.

L'apparecchiatura utilizzata per la prova è una macchina a trazione, adatta a lavorare con vari range di forza, composta da piastre rigide perfettamente allineate, per evitare una distribuzione irregolare della sollecitazione a trazione durante la prova.

La dimensione dei campioni di prova varia prevede l'impiego di 5 provini di dimensione 5 x 5 cm. I provini ricavati sia dagli isolanti "vergini" (non rivestiti) che dai campioni ETICS sono stati utilizzati in modo che la base del provino sia perpendicolare alla direzione della forza di trazione.

Determinata l'area della sezione trasversale del provino, si applica il procedimento descritto dalla norma che consiste nell'incollaggio del provino (figura 59) tra le 2 piastre della macchina. Successivamente, incollato il provino, avviene il fissaggio alla macchina per mezzo di blocchi di metallo.



Figura 59 – Procedimento in laboratorio

A questo punto si applica una forza di trazione, in direzioni opposte, con velocità costante fino a portare alla rottura il provino (a titolo esemplificativo vedi figura 59).

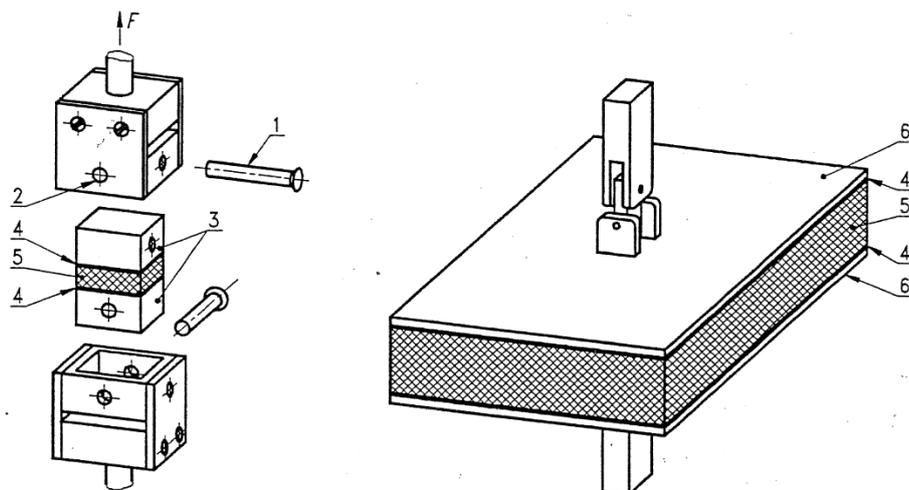


Figura 60 – Schema di incollaggio provini alle piastre

Infine si registra la forza massima in corrispondenza della rottura del provino, misurata ed espressa in kilonewton. Importante annotare, anche, il modo con cui avviene la rottura del materiale isolante e/o degli strati di finitura.

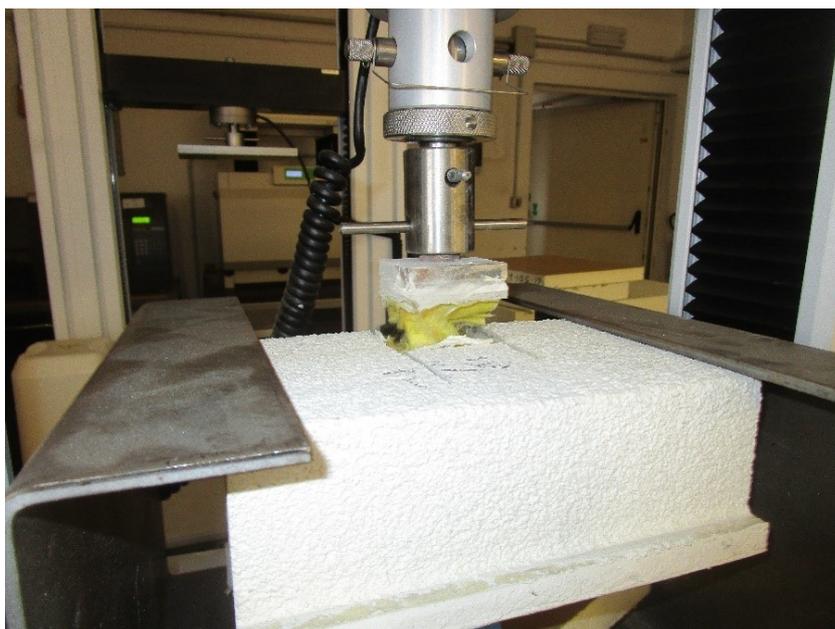


Figura 61 – Foto della prova di trazione perpendicolare alle facce sul campione di ETICS con lana di vetro

La norma prevede che siano considerati nulli tutti i test in cui la rottura si è verificata totalmente o parzialmente tra il provino e la piastra rigida, caso non rilevato a causa della scelta del collante resistente.

La forza massima di trazione viene indicata con F_m e attraverso questa è stato possibile calcolare la resistenza a trazione del provino con la seguente formula:

$$\sigma = \frac{F_m}{A}$$

Dove:

σ è la resistenza a trazione, in kPa

F_m è la forza di trazione massima registrata, in *kN*;

A è l'area del provino, in m^2 ;

Il risultato sarà espresso in *kilopascal* come valore medio delle varie misurazioni, e trascritto con almeno due cifre significative.

6.6.6 Resistenza a compressione

La resistenza a compressione è stata valutata attraverso la norma europea che specifica l'attrezzatura e le procedure per determinare il comportamento a compressione degli isolanti termici, ovvero la *UNI EN 826 – Isolanti termici per l'edilizia; Determinazione del comportamento a compressione*.

La macchina per prove di compressione è caratterizzata dal simulare una gamma di forze e di spostamenti in questione, attraverso due piastre rigide parallele, levigate, quadrate o circolari, la cui lunghezza di un lato o il cui diametro è almeno pari al lato o alla diagonale del provino da provare. Una delle piastre è fissa mentre l'altra è mobile e fissata ad un giunto sferico posizionato centralmente per garantire che la forza sia perfettamente assiale.

I campioni di prova devono avere lo spessore originale del campione e la larghezza dei provini non deve essere inferiore al suo spessore, inoltre bisogna rispettare e garantire la planarità delle facce. I provini devono essere tagliati in modo che la base del provino sia normale alla direzione di compressione del prodotto nelle normali condizioni d'uso. Inoltre, sempre durante la fase di taglio, i provini devono essere tagliati senza modificare la struttura del prodotto originale. Con questi requisiti si procede con la prova, in cui il campione viene inserito centralmente tra 2 piatti paralleli, uno dei quali si abbasserà fino a raggiungere un abbassamento x del 10% ($x_{10\%}$) della deformazione relativa o fino al cedimento del provino (yielding). Quindi la prova misura lo sforzo di compressione al 10% di deformazione relativa $\sigma_{10\%} \rightarrow \epsilon_{10\%}$. La norma impone che le dimensioni dei provini debbano essere quelle suggerite dalla norma di prodotto pertinente, in questo caso $10 \times 10 \text{ cm}$. Per i soli campioni di lana di roccia e lana di vetro, come previsto dalla norma di riferimento si applica un precarico di 50 kPa in fase di inizio prova. Successivamente è possibile calcolare la compressione attraverso la seguente formula:

$$\sigma_{10} = 10^3 x \frac{F_{10}}{A_0}$$

Dove:

A_0 è l'area del provino ($10 \times 10 \text{ cm}^2$)

F_{10} è la forza registrata alla deformazione al 10% ($x_{10\%}, \epsilon_{10\%}$)



Figura 62 – Macchinario per la compressione dei provini, test su provino ETICS in poliuretano

6.6.7 Resistenza d'impatto

La procedura della prova alla resistenza d'impatto viene definita dall'UNI ISO 7892 – “Prove di resistenza agli urti. Corpi per urti e metodi di prova”; inoltre sono state seguite le indicazioni riportate al Capitolo 2.2.8 – resistenza agli urti dell'EAD 040083-00-0404 che è più specifica per il sistema studiato.

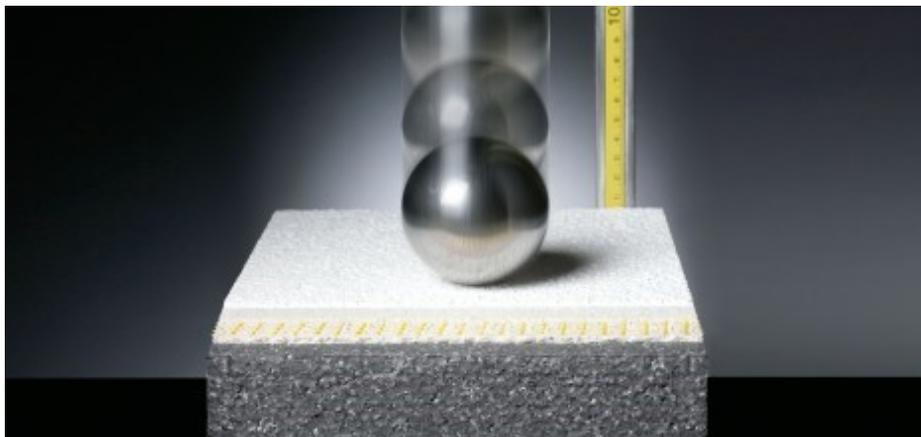


Figura 63 – Esempio della prova d'urto realizzata in laboratorio

La prova è stata eseguita sui campioni ETICS, come previsto dalla suddetta norma, utilizzando un corpo rigido sferico, con due differenti metodologie:

- l'impatto a 10 Joule viene eseguito su 3 campioni con una palla d'acciaio del peso di 1 kg e da un'altezza di 1,02 m.
- l'impatto a 3 Joule viene eseguito su 3 campioni con una palla d'acciaio del peso di 0,5 kg e da un'altezza di 0,61 m.



Figura 64 – Foto dei test d'urto effettuati su un campione ETICS in poliuretano pre-invecchiamento (T0) con vicini i corpi rigidi utilizzati, a sinistra il corpo rigido da 0.5 kg e a destra il corpo rigido da 1.18 kg

I punti d'impatto sono scelti tenendo conto delle varie modalità di comportamento delle pareti e dei loro rivestimenti, variando a seconda che il punto d'impatto sia o meno situato in una zona di maggiore rigidità. In seguito alle due tipologie di prove ad impatto si misurano il diametro dell'impatto, e si rileva la presenza di qualsiasi crepa sul punto di impatto e sulla circonferenza. A seguito dei valori definiti, in aggiunta, l'EAD definisce 3 categorie di resistenza d'impatto e i possibili utilizzi in ambito edilizio di questi sistemi:

<i>Categoria</i>	<i>Descrizioni di possibili usi</i>
I.	Una zona facilmente accessibile al pubblico a livello del suolo e vulnerabile agli impatti con i corpi duri, ma non soggetta a un uso anormalmente brusco.
II.	Una zona suscettibile di impatti da oggetti lanciati o calciati, ma in luoghi pubblici dove l'altezza dell'ETICS limiterà la dimensione dell'impatto; o a livelli più bassi dove l'accesso agli edifici principalmente a quelli con qualche incentivo a esercitare cura.
III.	Una zona non suscettibile di essere danneggiata da impatti normali causati da persone o da oggetti lanciati o calciati.

Tabella 22 – EAD 040083-00-0404 “Tabella 2 - Categorie di resistenza all'impatto ed esempi di utilizzo”

6.6.8 Reazione al fuoco

La procedura seguita per testare la reazione al fuoco dei campioni è quella definita dalla *UNI 8457– Materiali combustibili suscettibili di essere investiti dalla fiamma su una sola faccia. Reazione al fuoco mediante applicazione di una piccola fiamma*. Sono state, inoltre, seguite anche le indicazioni riportate al *Capitolo 2.2.1.1 – Razioni al fuoco di ETICS dell’EAD 040083-00-0404*.

Il procedimento riportato nella norma consiste nell’applicazione sui provini di una piccola fiamma per 15 secondi, prova che evidenzia la reazione al fuoco dei materiali.

Le prove sono state eseguite sugli isolanti vergini in quanto i campioni ETICS (rivestiti) non presentavano alterazioni in seguito all’esposizione a piccola fiamma.

L’obiettivo in questo test è un confronto tra i materiali isolanti attraverso la misurazione della parte carbonizzata dei provini di isolante testati.

Le misurazioni che si prendono in considerazione sono l’altezza, la larghezza e la profondità (le 3 dimensioni) della parte carbonizzata in seguito al test di piccola fiamma. Sommando le suddette 3 dimensioni si è indicato un indice di misurazione utile a valutare la reazione al fuoco dei materiali.



Figura 65 – Test di reazione al fuoco di piccola fiamma su sughero (a sinistra) e EPS grigio (a destra).

Capitolo 7: Risultati e discussioni

Nel presente capitolo sono riportati i risultati delle prove eseguite finora in laboratorio, secondo i riferimenti normativi elencati precedentemente (*capitolo 6*).

I risultati di seguito analizzati punto per punto evidenziano un livello di degrado molto lieve nel sistema ETICS, spesso quasi impercettibile.

L'analisi sperimentale di un articolato sistema come gli ETICS dà ovviamente luogo anche a diverse interpretazioni dei risultati che in alcuni casi vanno quindi contestualizzati in base alle condizioni al contorno.

Ogni caratteristica analizzata è stata quindi valutata anche in modo relativo con l'obiettivo di individuare le correlazioni tra i diversi materiali isolanti.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti e le interpretazioni che ne scaturiscono.

7.1 Valutazione del degrado superficiale

Per quanto riguarda i risultati derivanti dall'osservazione dello stato superficiale del degrado dei campioni di ETICS si possono riscontrare piccolissime variazioni di degrado superficiale.

Come è possibile osservare dalle seguenti foto pre e post invecchiamento dei campioni, non risultano difetti riscontrabili ad occhio nudo seguendo la norma ISO 4628.

Di seguito a titolo esemplificativo e non esaustivo alcune delle immagini del rilievo fotografico da cui si evince che probabilmente utilizzando la ISO 4628 non si è in grado di rilevare alcun difetto o degrado della superficie.

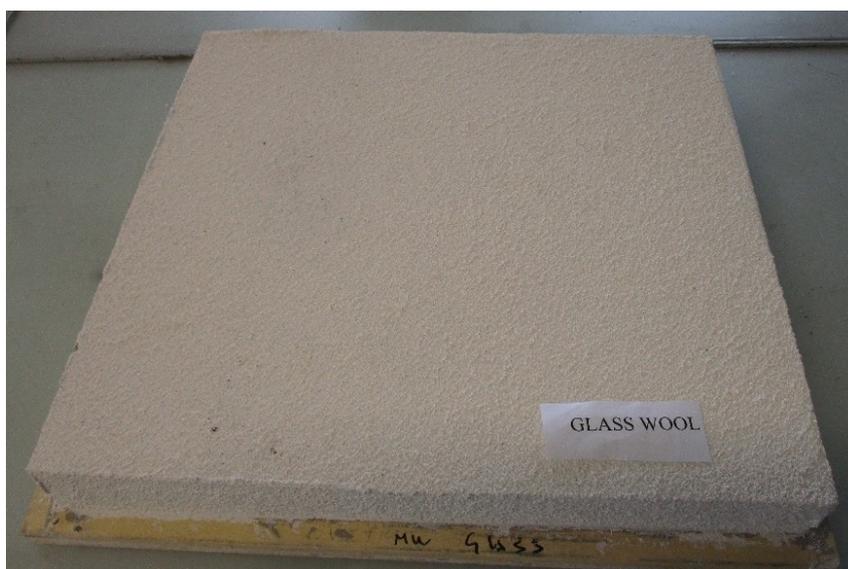


Figura 66 – Campione ETICS in lana di vetro (GW) pre invecchiamento (T0)



Figura 67 – Campione ETICS in fibra di legno (WF) post invecchiamento (T1)

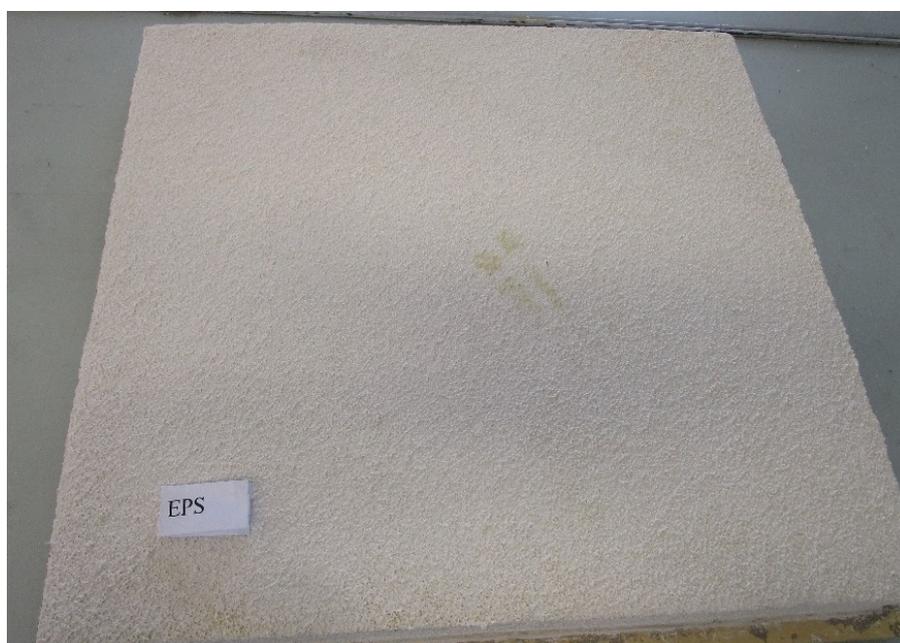


Figura 68 – Campione ETICS in EPS grigio pre invecchiamento (T0)



Figura 69 – Campione ETICS in EPS grigio post invecchiamento (T1)



Figura 70 – Campione ETICS in lana di roccia pre invecchiamento (T0)

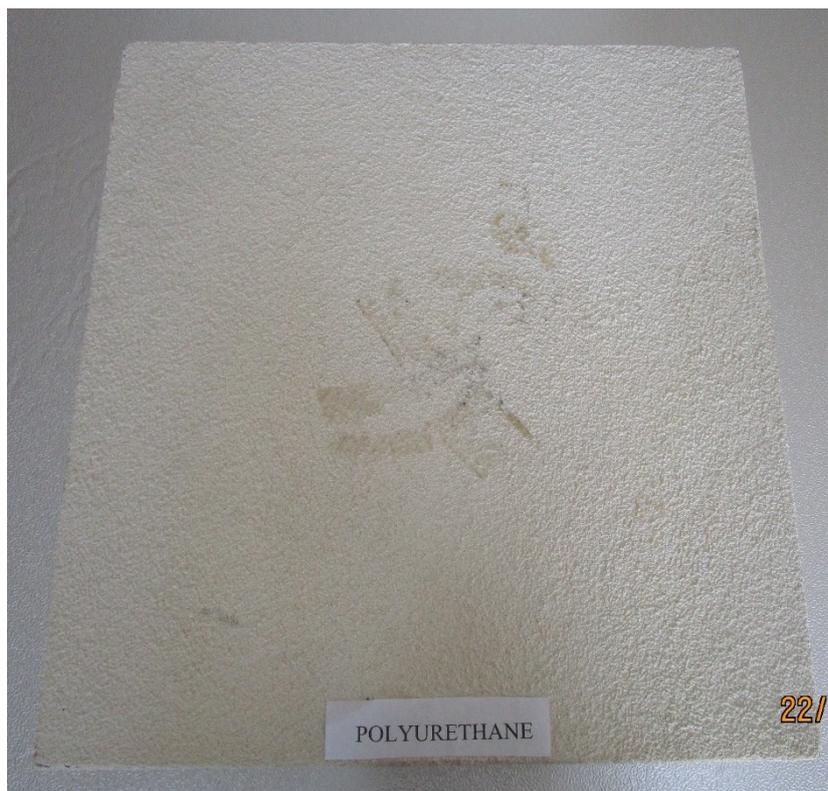


Figura 71 – Campione ETICS in poliuretano (PU) post invecchiamento (T1)

Anche i seguenti ingrandimenti (vedi figura 73) o tagli dei campioni (vedi figura 72) non evidenziano alcun degrado, segno che se la realizzazione e la posa in opera del sistema è avvenuta a regola d'arte, non presentano alcuna forma di degrado superficiale.



Figura 72 – Taglio del campione ETICS in EPS grigio post invecchiamento con a confronto un pannello isolante vergine non invecchiato



Figura 73 – Ingrandimento del campione ETICS in WF post invecchiamento

In conseguenza della assenza di osservazioni concrete di un degrado percepibile, si è deciso di approfondire lo stato di degrado superficiale. Se si operasse solo seguendo la norma ISO 4628, si rivelerebbero dati assolutamente trascurabili per qualsiasi tipologia di difetto sia in relazione alla densità di accadimento sia in relazione alla grandezza di ogni difetto rilevato.

Per tale motivo si è deciso di esaminare con un maggior livello di dettaglio il degrado superficiale attraverso un microscopio x50-x1000 e si è osservato lo stato di rivestimento di finitura pre e post invecchiamento.

Nella documentazione fotografica a seguire è possibile osservare il dettaglio al microscopio con zoom x50 da cui si evince il livello di degrado non assente ma appena percepibile. Mentre con la ISO 4628 non si riscontra alcun difetto o anomalia riconducibile al degrado superficiale, al microscopio ottico invece, con zoom x50-x1000 si osservano alcune micro fessurazioni sul rivestimento (vedi figure 74-85 catturate al microscopio di seguito presentate).



Figura 74 – Foto ingrandimento al microscopio ottico 50x dei campioni ETICS in EPS grigio pre invecchiamento (T0)

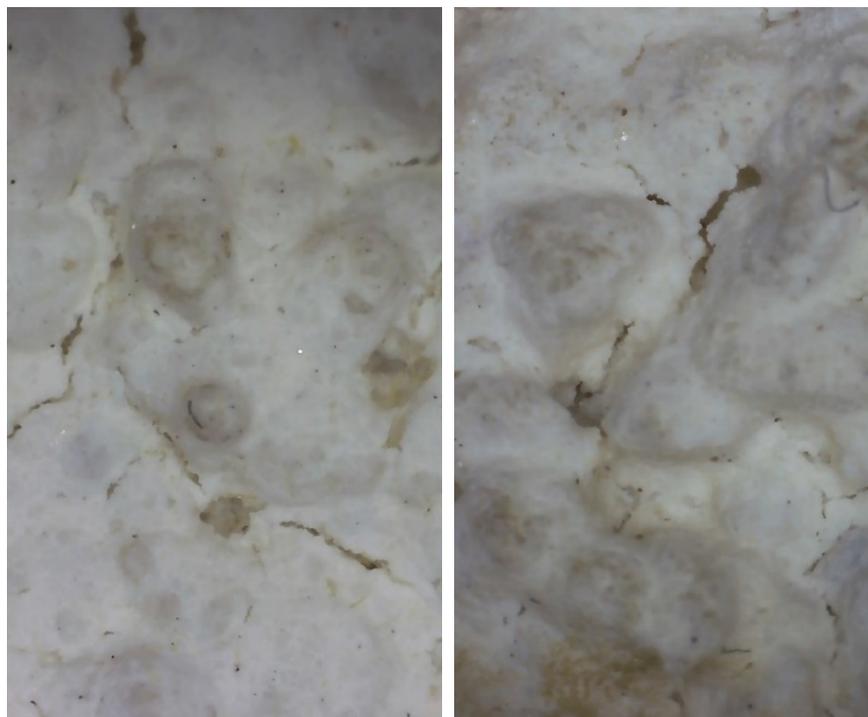


Figura 75 – Foto ingrandimento al microscopio ottico 50x dei campioni ETICS in EPS grigio post invecchiamento (T1).

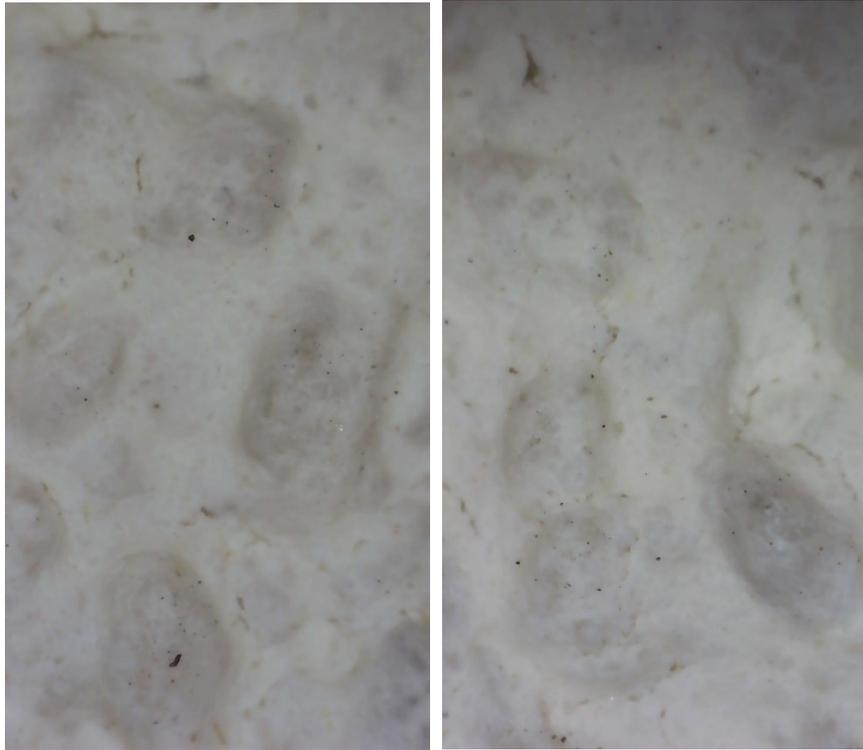


Figura 76 – Foto ingrandimento al microscopio ottico 50x dei campioni ETICS in PU pre-invecchiamento (T0)

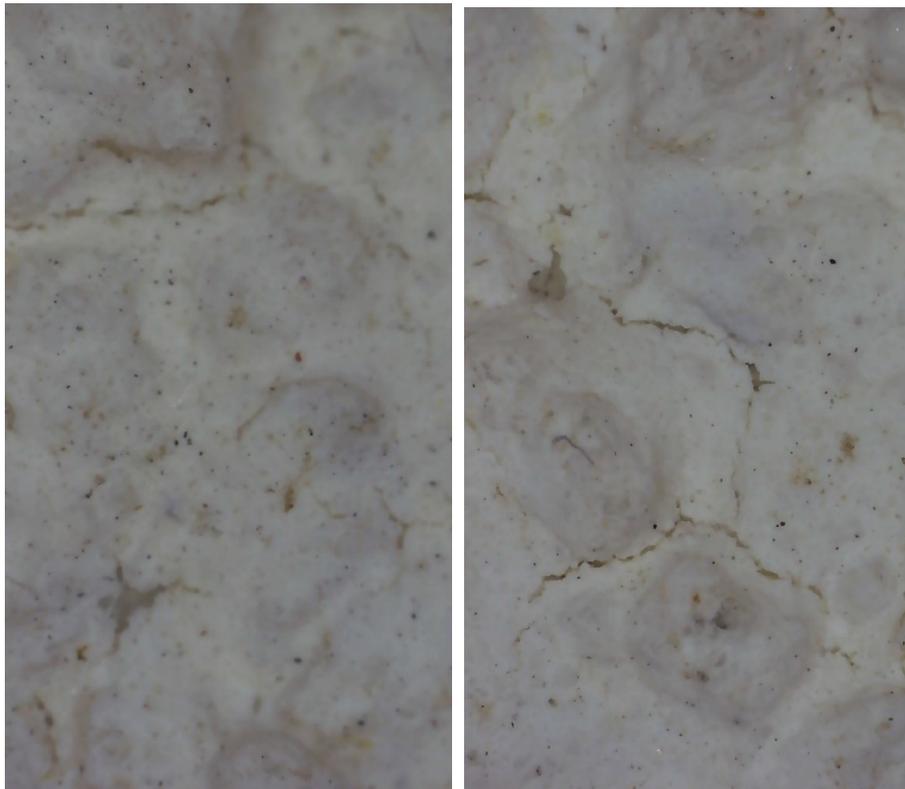


Figura 77 – Foto ingrandimento al microscopio ottico 50x dei campioni ETICS in PU post-invecchiamento (T1)

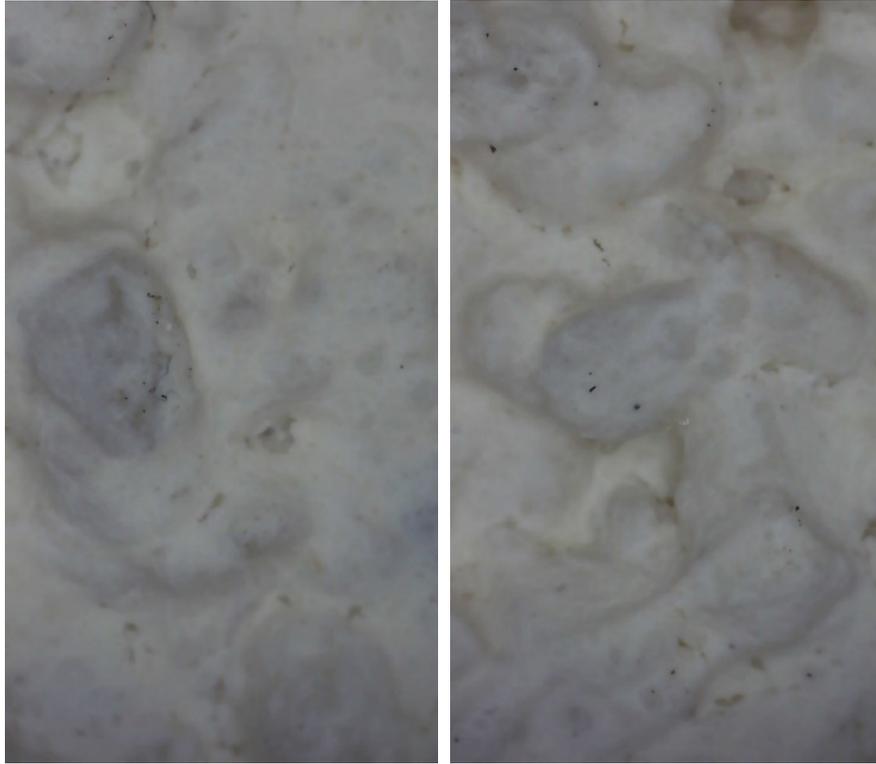


Figura 78 – Foto ingrandimento al microscopio ottico 50x dei campioni ETICS in lana di vetro pre-invecchiamento (T0)



Figura 79 – Foto ingrandimento al microscopio ottico 50x dei campioni ETICS in lana di vetro post-invecchiamento (T1)

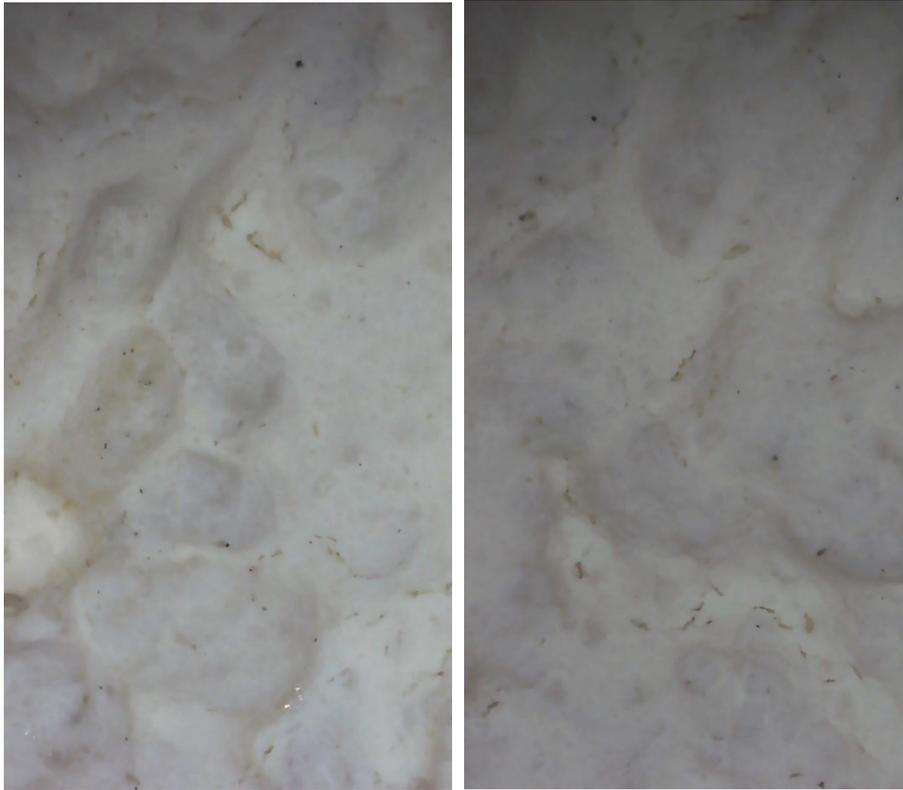


Figura 80 – Foto ingrandimento al microscopio ottico 50x dei campioni ETICS in lana di roccia pre-invecchiamento (T0)



Figura 81 – Foto ingrandimento al microscopio ottico 50x dei campioni ETICS in lana di roccia post-invecchiamento (T1)

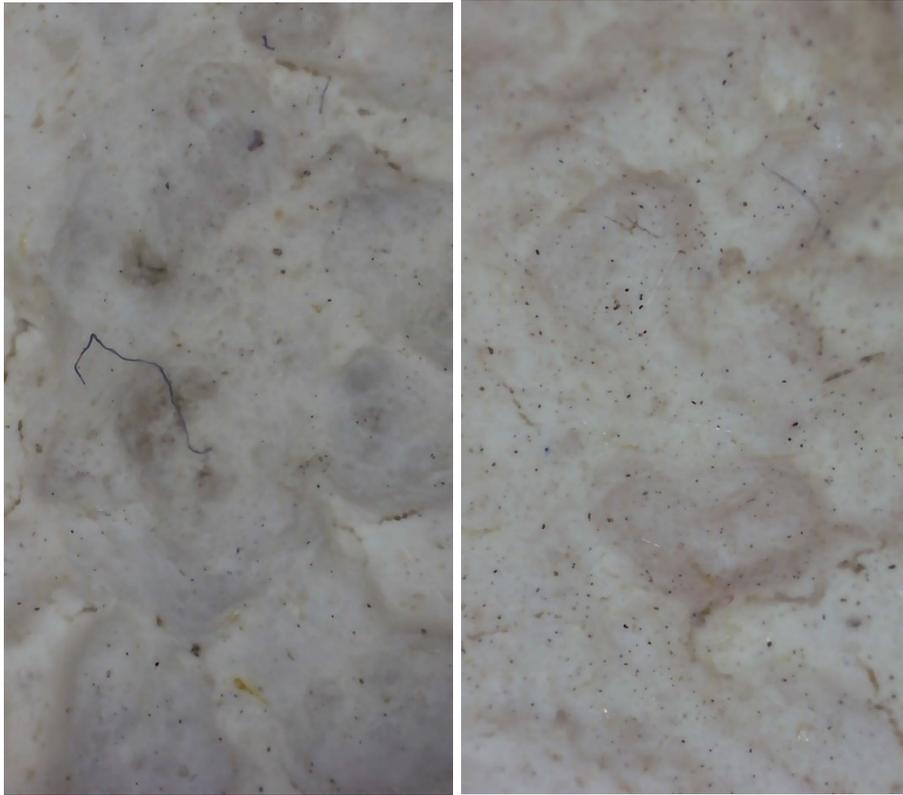


Figura 82 – Foto ingrandimento al microscopio ottico 50x dei campioni ETICS in fibra di legno pre-invecchiamento (T0)



Figura 83 – Foto ingrandimento al microscopio ottico 50x dei campioni ETICS in fibra di legno post-invecchiamento (T1)

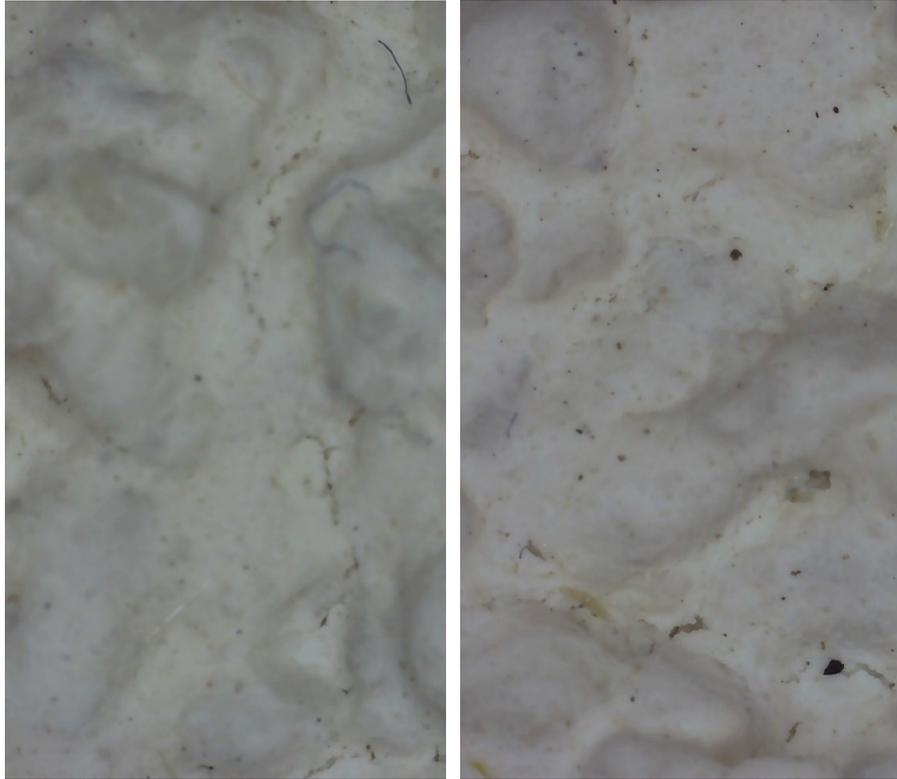


Figura 84 – Foto ingrandimento al microscopio ottico 50x dei campioni ETICS in sughero pre-invecchiamento (T0)

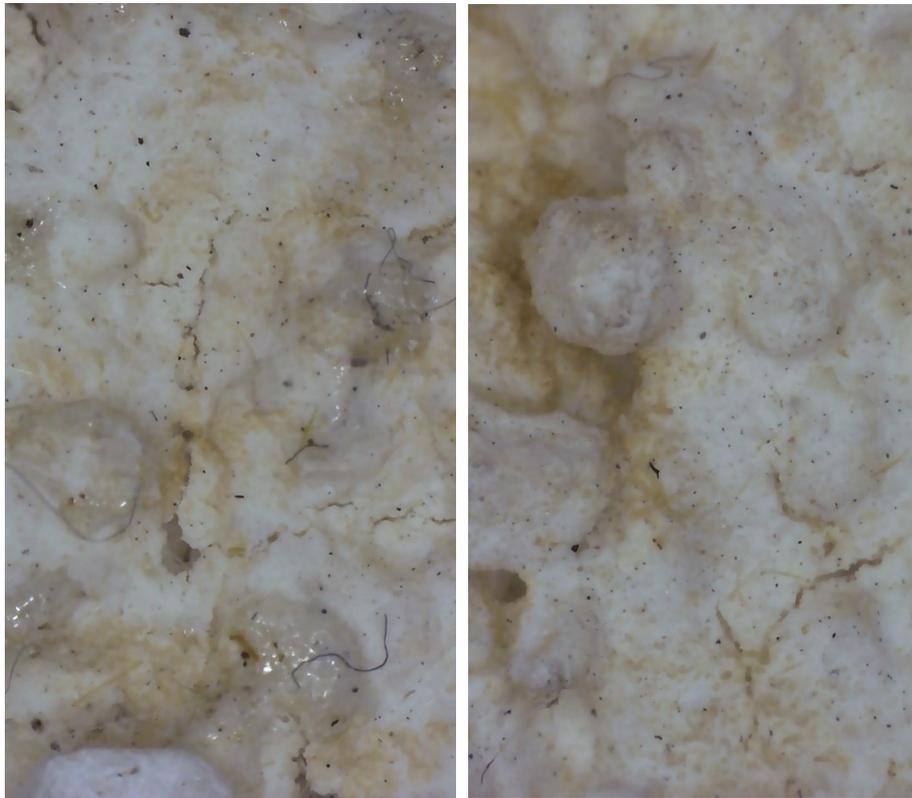


Figura 85 – Foto ingrandimento al microscopio ottico 50x dei campioni ETICS in sughero post-invecchiamento (T1)

Con l'inizio delle prove distruttive è stato possibile osservare anche lo stato della **sezione** dei campioni ETICS analizzati. Nel taglio dei campioni si osserva la sezione da cui è possibile analizzare lo spessore del materiale isolante e dello strato del rasante.

Analizzando questi aspetti pre e post invecchiamento non si evidenziano variazioni percepibili nell'aspetto se non per alcune lane che diventano lievemente più scure e per alcune variazioni di spessore di rasante.

Tabella 22. Rilievo dell'aspetto della sezione delle tipologie di ETICS, pre invecchiamento accelerato (T0) e post invecchiamento accelerato (T1)

ETICS con pannello isolante in:	ASPETTO (T0) PRE-invecchiamento	ASPETTO (T1) POST-invecchiamento
PU	<ul style="list-style-type: none"> • Spessore isolante e rasatura regolari • Lo spessore della rasatura varia di <2 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Spessore isolante e rasatura regolari • Lo spessore della rasatura varia di <2 mm • Non si notano delle differenze nell'aspetto pre e post invecchiamento
EPS grey	<ul style="list-style-type: none"> • Spessore Isolante e rasatura regolari • Lo spessore della rasatura varia di <2 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Spessore Isolante e rasatura regolari • Lo spessore della rasatura varia di <2 mm • Non si notano delle differenze nell'aspetto pre e post invecchiamento
MW glass	<ul style="list-style-type: none"> • Spessore isolante e rasatura variano di diversi millimetri (5-7 mm) lungo la sezione dell'ETICS 	<ul style="list-style-type: none"> • Spessore Isolante e rasatura variano di diversi millimetri (5-7 mm) lungo la sezione dell'ETICS • MW glass si presenta di colore giallo scuro
MW ROCK	<ul style="list-style-type: none"> • Spessore isolante e rasatura variano di diversi millimetri (5-6 mm) lungo la sezione dell'ETICS 	<ul style="list-style-type: none"> • Spessore isolante e rasatura variano di diversi millimetri (6-7 mm) lungo la sezione dell'ETICS • MW rock si presenta di colore più scuro
FW	<ul style="list-style-type: none"> • Spessore isolante e rasatura variano di diversi millimetri (2-5 mm) lungo la sezione dell'ETICS 	<ul style="list-style-type: none"> • Spessore isolante e rasatura variano di diversi millimetri (2-5 mm) lungo la sezione dell'ETICS • Non si notano delle differenze nell'aspetto pre e post invecchiamento
ICB	<ul style="list-style-type: none"> • Spessore isolante e rasatura variano di diversi millimetri lungo la sezione (fino a 10 mm) dell'ETICS. Ciò è dovuto agli interstizi tra le celle di sughero. 	<ul style="list-style-type: none"> • Spessore isolante e rasatura variano di diversi millimetri lungo la sezione (fino a 12 mm) dell'ETICS. Ciò è dovuto agli interstizi tra le celle di sughero. Non si notano delle differenze nell'aspetto pre e post invecchiamento.



Figura 86 – Foto della sezione del campione ETICS in lana di vetro pre invecchiamento (T0)



Figura 87 – Foto della sezione del campione ETICS in lana di vetro post invecchiamento (T1)



Figura 88 – Foto della sezione del campione ETICS in lana di roccia pre invecchiamento (T0)



Figura 89 – Foto della sezione del campione ETICS in lana di roccia post invecchiamento (T1)



Figura 90 – Foto della sezione del campione ETICS in fibra di legno pre invecchiamento (T0)



Figura 91 – Foto della sezione del campione ETICS in fibra di legno post invecchiamento (T1)

Nel dettaglio anche attraverso le foto, si possono rilevare piccole variazioni di spessore del rasante lungo la sezione. In particolare, i prodotti sintetici, essendo più rigidi, riescono ad essere più facilmente lavorabili come si evince dall'inferiore variazione di spessore dello strato rasante che risulta modesta o addirittura trascurabile (≤ 2 mm).

Diversamente per i materiali isolanti fibrosi, ovvero lana di roccia e lana di

vetro, un posatore esperto, durante la fase di applicazione del rasante sul pannello isolante, nel garantire una superficie planare del sistema, dovrà operare su superfici facilmente comprimibili che si possono danneggiare facilmente durante le movimentazioni e le lavorazioni; questo comporta una maggiore difficoltà di posa ed un minor controllo dello spessore dello strato rasante.

La variazione di spessore registrata nell'isolante può arrivare fino al 5% e, per mantenere planare il sistema ETICS, la variazione di spessore dello strato rasante posato può essere significativa (vedi tabella). Fa eccezione la fibra di legno che è molto più densa, meno comprimibile e, quindi, più facilmente lavorabile (variazione di spessore dello strato rasante 2 mm). Il sughero è costituito da granuli coesi e vuoti d'aria di dimensioni pari ai granuli stessi; la variazione di spessore dello strato rasante è quindi data dal rasante che può inserirsi nei vuoti esistenti tra i granuli superficiali.

In conclusione, anche nell'analisi delle sezioni dei campioni ETICS, non si sono registrati degradi percepibili di particolare entità se non in maniera relativa in piccole valutazioni di confronto tra i materiali isolanti.

Nonostante l'assenza di degradi, la maggiore variazione di spessore rasante su alcuni materiali può essere un fattore critico nel lungo periodo perché potrebbe dare luogo a fenomeni termoigrometrici non omogenei con conseguenti formazioni puntuali di alghe, o muffe o microcavillature.

Questi aspetti non sono valutabili dai test realizzati in laboratorio a causa dei lunghi tempi di maturazione dei degradi biologici ma sono aspetti che si verificano negli ETICS soggetti a maggiori disomogeneità di spessore rasante.

7.2 Valutazione della Resistenza Termica

In seguito alle procedure effettuate relative alle prove di resistenza termica dei campioni ETICS e dei campioni dei materiali isolanti si riportano in questo capitolo tutti i risultati ottenuti.

Nella prima tabella sono riportati i valori delle misurazioni sulle tipologie di campioni ETICS registrate al tempo T0 (non invecchiati), attraverso le procedure descritte nel capitolo 6.6.2 dei metodi:

Tabella 23. Caratteristiche di differenti campioni ETICS con 6 tipologie di materiali isolanti prima dell'invecchiamento accelerato, ovvero al tempo T0.

Pannelli isolanti	Caratteristiche del pannello isolante				Caratteristiche dell'intero ETICS			
	d _D (mm)	d _M (mm)	λ _D (W/mK)	λ _M (W/mK)	U _C (W/m ² K)	R _C (m ² K/W)	U _M (W/m ² K)	R _M (m ² K/W)
PU	50	50,2	0.028	0.025	0.51	2,05	0.44	2.29
EPS	60	58,9	0.031	0.034	0.47	2,20	0.49	2.03
MW	60	56,6	0.036	0.042	0.53	2,03	0.59	1.70
GW	60	60,2	0.034	0.038	0.51	1,94	0.54	1.86
ICB	80	80,8	0.040	0.043	0.46	2,26	0.47	2.11
WF	80	79,6	0.043	0.045	0.54	2,13	0.49	2.05

¹ I valori calcolati sono determinati in base alla conducibilità dichiarata dei materiali. Le misurazioni sono effettuate secondo la norma EN 12667, prima dell'invecchiamento accelerato. d_D = spessore del pannello isolante da scheda tecnica (mm); d_M = spessore misurato del pannello isolante (mm); λ_D = conducibilità termica dichiarata del pannello isolante; λ_M = conducibilità termica misurata del pannello isolante; U_C = trasmittanza termica calcolata dell'intero sistema ETICS; R_C = resistenza termica calcolata dell'intero sistema ETICS; U_M = trasmittanza termica misurata dell'intero sistema ETICS; R_M = resistenza termica misurata dell'intero sistema ETICS.

Nei primi risultati riportati in tabella si evidenziano delle differenze di misurazione con le schede tecniche dei materiali isolanti.

La procedura adottata (EN 12667) valuta la resistenza termica, dalla quale viene calcolata la conducibilità termica λ_M dei singoli materiali della stratigrafia.

La colonna delle λ_M deriva dalle misurazioni effettuate sull'intero pacchetto ETICS, da cui si è proceduto a ritroso per calcolare le conducibilità misurate dalla formula della resistenza termica indicata nella norma EN 6946:

$$R = \frac{1}{h_i} + \sum \frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{1}{h_e}$$

La tabella 23 indica i dati forniti da scheda tecnica dal produttore (nella tabella con il pedice *D*) e ciò che viene realmente misurato in laboratorio (nella tabella con il pedice *M*).

La differenza i termini di resistenza termica può essere stimata mediamente con valori peggiorativi pari al 5-10% del valore calcolato dai valori nominali.

Fa eccezione il poliuretano che invece ha una conducibilità termica inferiore al valore nominale di circa il 20 %.

Il caso del poliuretano è un fenomeno noto come si evince da approfondimenti di letteratura scientifica [38] del settore in quanto la conducibilità delle schiume

poliuretaniche rigide dipende dalla composizione gassosa all'interno delle celle che in una lastra di recente produzione risulta prevalentemente composta dall'agente espandente, più efficiente dell'aria nell'isolamento termico; ne consegue un valore di conducibilità sensibilmente inferiore al valore dichiarato [36].

Infatti la schiuma poliuretanicca rigida durante l'invecchiamento modifica la composizione gassosa presente nelle celle chiuse soprattutto lungo i bordi [37]. Questo processo che dura diversi anni vede l'aria occupare parte del volume lasciato libero dall'agente espandente fino a quando non si raggiungerà un equilibrio di fase, anche dopo qualche decennio.

Per valutare questo fenomeno, la stessa norma di prodotto, la EN 13165, nell'allegato C fornisce due metodi che possono essere utilizzati dai fabbricanti per valutare questo fenomeno. Durante entrambe le procedure, il produttore dovrà aggiungere una correzione statistica al fattore di valore ottenuto che garantisca un'adeguata corrispondenza del valore con quello della prestazione dichiarata dopo 25 anni. Le norme specifiche armonizzate per i prodotti poliuretanicci (allegati A e C della norma UNI EN 13165) forniscono le metodologie applicate per la determinazione del valore dichiarato di conducibilità termica, λ_D , che è il valore medio di conducibilità termica del prodotto per 25 anni di vita utile. Questo è il motivo per cui il PU mostra una conducibilità termica misurata al tempo inferiore alla conducibilità termica dichiarata, come evidenziato in altri studi [38].

I nostri risultati indicano che il PU ha una conducibilità termica inferiore a quella dichiarata durante la vita utile, e la spiegazione è che questo materiale ha una variazione iniziale già valutata dalla norma armonizzata (UNI EN 13165) che determina la conduttività dichiarata da scheda tecnica come valore medio di conducibilità termica del prodotto per 25 anni di vita utile.

Per cui, nei test di laboratorio effettuati, il PU apparentemente presenta nei primi anni di vita utile una capacità isolante misurata maggiore rispetto alla medesima dichiarata; questo vantaggio tende però a perdersi dato che la conducibilità nel tempo tende asintoticamente verso il valore di conducibilità termica dichiarata da scheda tecnica in circa 25 anni (vedi seguente formula sintetica) ma resta comunque la conducibilità più bassa.

$$\lim_{t \rightarrow 25 \text{ anni}} \lambda_M(t) = \lambda_D$$

Alcuni degli altri materiali isolanti presentano invece valori di resistenza termica misurata (e quindi di conducibilità) minori di quelli dichiarati. Il caso è attribuibile a due tipologie di cause:

- valori di conducibilità termica disattesi; secondo il calcolo della conducibilità termica previsto dalle norme armonizzate di prodotto, il valore dichiarato rappresenta il 90% dei prodotti con un grado di confidenza del 90%. Il valore dichiarato dovrebbe inoltre essere calcolato dalla media, determinata su una quantità di campioni, a cui è

sommato un ulteriore fattore statistico che incorpora l'approccio statistico del 90 percentile. Quindi, secondo i principi della probabilità e statistica, si ha una elevata probabilità di misurare valori di conducibilità uguali o inferiori al valore dichiarato. Non si ha quindi l'assoluta certezza che ciò accada sempre. Per cui, in alcuni materiali il valore misurato è superiore al valore dichiarato.

La spiegazione è fornita dalla norma armonizzata EN 13172, seguito dai produttori di materiali isolanti, che introduce tolleranze di misura:

$$\tau = k - s$$

Dove:

τ = tolleranza specificata nella norma di prodotto

k = fattore legato al numero di risultati di prova disponibili

s = deviazione standard

Questa tolleranza nella misurazione della conducibilità produce una piccola differenza del valore medio della conducibilità. Secondo il codice, la conducibilità dichiarata è calcolata come segue:

$$\lambda_D = \lambda_M + \tau$$

Dove:

λ_D = conduttività termica dichiarata del pannello isolante

λ_M = conduttività termica misurata del pannello isolante

Quindi, secondo l'intervallo di tolleranza statistica della norma armonizzata, il fattore K è un indice statistico di riduzione delle prestazioni che riduce all'1% la probabilità di misurare il valore di conducibilità fuori dall'intervallo di tolleranza statistica. Questa possibilità residua potrebbe spiegare la differenza tra i dati dei produttori e le prove di laboratorio di questa ricerca.

- valori dello spessore disattesi; in taluni casi lo spessore misurato è inferiore al valore nominale. Questo aspetto è previsto dalle norme armonizzate che ammettono per qualunque materiale isolante una tolleranza di spessore. Il valore della tolleranza dipende dalla tipologia isolante e dallo spessore specifico. I valori possono essere anche del 10-15% differenti rispetto al valore nominale. Per averne contezza in tabella 4 è stata condotta un'analisi sugli spessori, evidenziando come i prodotti fibrosi siano prodotti con minore accuratezza per ciò che concerne gli spessori misurati rispetto agli spessori nominali. MW glass ha, ad esempio, una variazione dello spessore pari al 5,5%.

Inoltre le caratteristiche della metodologia utilizzata presentano un'incertezza del metodo. In particolare in tutte le fasi della sperimentazione si evidenziano alcune incertezze generate da fenomeni non controllabili neanche in laboratorio:

- la realizzazione dei campioni oggetto di studio, applicati con una posa in

opera ed una lavorazione a regola d'arte realizzata manualmente non è di facile costanza e ripetibilità nel confezionamento dei 18 campioni ETICS realizzati in laboratorio.

Alcune delle prove sono influenzate in minima parte dalla preparazione dei campioni nella fase di applicazione del collante, del rasante, della rete e del fissaggio. Tali operazioni sono ripetitive, uguali per tutti i campioni, ma sono comunque lavorazioni eseguite manualmente, seppur da operatori specializzati, e quindi ne scaturiscono risultati che possono essere diversi tra loro. La manualità applicata durante le suddette fasi influenza la ripetizione perfettamente identica dei campioni che possono presentare:

- minime variabilità di spessore nella stesura dei collanti tra supporto e pannello, questo genera dove vi è meno collante delle mini camere d'aria di maggiori dimensioni (si ricorda che l'aria è un ottimo isolante diversamente dal collante);
- minime variabilità nello spessore del rasante più esterno, che aumentano in particolare in corrispondenza del tassello meccanico;
- pannelli isolanti in fibre minerali (lana di roccia e lana di vetro) tendono a comprimersi durante diverse fasi sia di posa che di test di performance effettuati. Questo aumenta la variabilità degli spessori dell'isolante stesso e del rasante.
- misurazione di piccole concavità/convessità sui pannelli invecchiati; la superficie non perfettamente parallela può, seppur di poco, influenzare la prova di resistenza termica.

L'incertezza del metodo si rifletterà sull'accuratezza dei risultati che si è stimato avere una tolleranza del 5%.

La tabella successiva riporta i risultati del test di resistenza termica relativi ai campioni ETICS confrontati al tempo T_0 e al tempo T_1 (post invecchiamento accelerato):

Tabella 24. Resistenza termica dei campioni ETICS con 6 tipologie di materiali isolanti misurata prima dell'invecchiamento accelerato, ovvero al tempo T0, misurata dopo l'invecchiamento accelerato, ovvero al tempo T1 e calcolata a partire dalla conducibilità termica dichiarata (pedice D).

ETICS	R _D	R _{T0}	Tolleranza al 5%		R _{T1}	Tolleranza al 5%	
			max	min		max	min
con pannello:	m ² K/W	m ² K/W			m ² K/W		
PU	2,05	2,29	2,40	2,17	2,21	2,32	2,10
EPS	2,20	2,03	2,13	1,93	2,03	2,13	1,93
GW	2,03	1,86	1,95	1,76	1,85	1,94	1,76
MW	1,94	1,70	1,78	1,61	1,87	1,97	1,78
ICB	2,26	2,11	2,22	2,01	2,17	2,28	2,07
WF	2,13	2,05	2,15	1,95	2,13	2,24	2,03

R_C= resistenza termica calcolata dell'intero ETICS; R_{T0}= resistenza termica dell'intero ETICS misurata al tempo T0 prima dell'invecchiamento accelerato; R_{T1}= resistenza termica dell'intero ETICS misurata al tempo T1 dopo l'invecchiamento accelerato

I valori di resistenza termica pre e post si ritengono mediamente coerenti considerando una incertezza del metodo di misura pari al 5 %. Fa eccezione il dato sulla lana minerale che sembra sensibilmente migliore rispetto al valore atteso relativamente alla prestazione pre invecchiamento. La causa è da attribuire alla sensibile diversità tra i 2 campioni di muro utilizzati durante il test per la comparazione pre e post invecchiamento; evidentemente il campione di lana aveva una sensibile difformità non quantificabile nella tolleranza del 5% che deve aver condizionato il test.

In conclusione, per quanto riguarda i test di resistenza termica, si può dire che i campioni ETICS studiati, non hanno subito grosse variazioni; si può dire che non si registra un degrado percepibile in più o meno tutti gli ETICS.

Questi risultati suggeriscono quindi che gli ETICS, durante la vita utile, subiscono un decadimento prestazionale della resistenza termica quasi nullo, garantendo costanti nel tempo le prestazioni energetiche in uso del cappotto termico.

Queste considerazioni non devono però far credere ad un sistema infallibile che nella pratica presenti sempre simili comportamenti. Infatti anomalie o patologie particolari possono compromettere l'efficacia del sistema e quindi anche della prestazione termica.

7.3 Fattore di Attenuazione e Sfasamento

Dopo aver valutato la resistenza termica, la conducibilità termica e la trasmittanza termica, si è proceduto con la determinazione delle altre due prestazioni termiche considerate che tengono conto dell'inerzia termica del campione in regime estivo.

I risultati della prova descritta nel capitolo 6.6.3 si presentano sotto forma di curve sinusoidali che raccolgono tutte le temperature interne ed esterne alla cella climatica

Di seguito le seguenti immagini riportano l'andamento delle temperature interne ed esterne del campione di lana di roccia, del campione di lana di vetro e del campione di lana di roccia sughero al tempo T_0 :

Figura 92. Onde termiche che riproducono la temperatura superficiale esterna sull'ETICS (linea rossa) con lana di roccia come materiale termoisolante, la temperatura superficiale interna sull'ETICS (linea blu) e la temperatura esterna media (linea verde) nel giorno più caldo dell'anno di riferimento (21st Luglio).

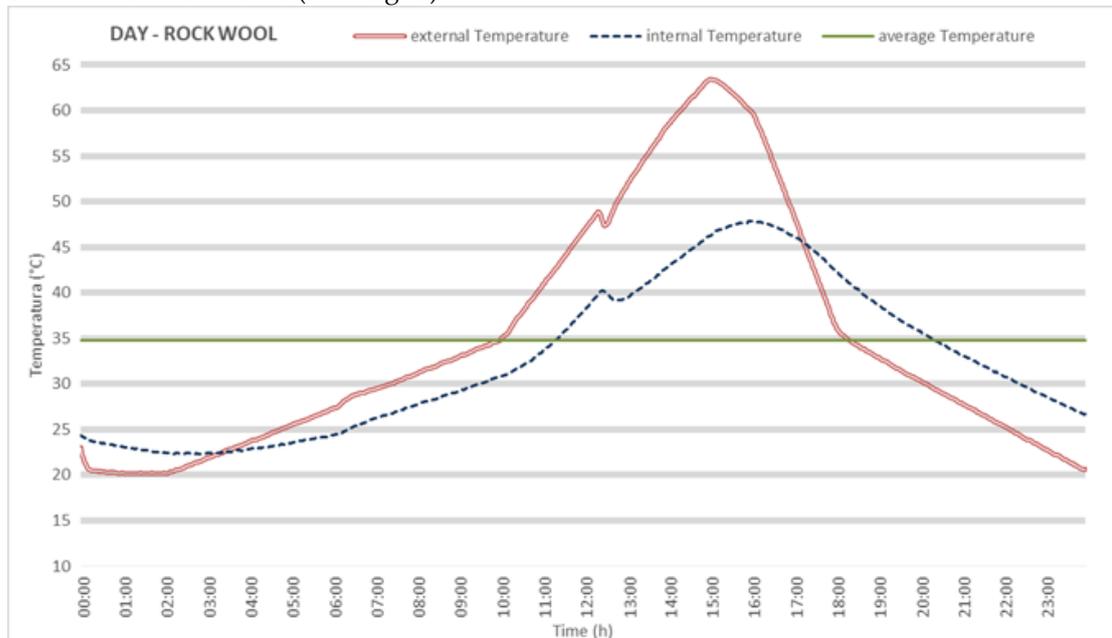


Figura 93. Onde termiche che riproducono la temperatura superficiale esterna sull'ETICS (linea rossa) con lana di vetro come materiale termoisolante, la temperatura superficiale interna sull'ETICS (linea blu) e la temperatura esterna media (linea verde) nel giorno più caldo dell'anno di riferimento (21st Luglio).

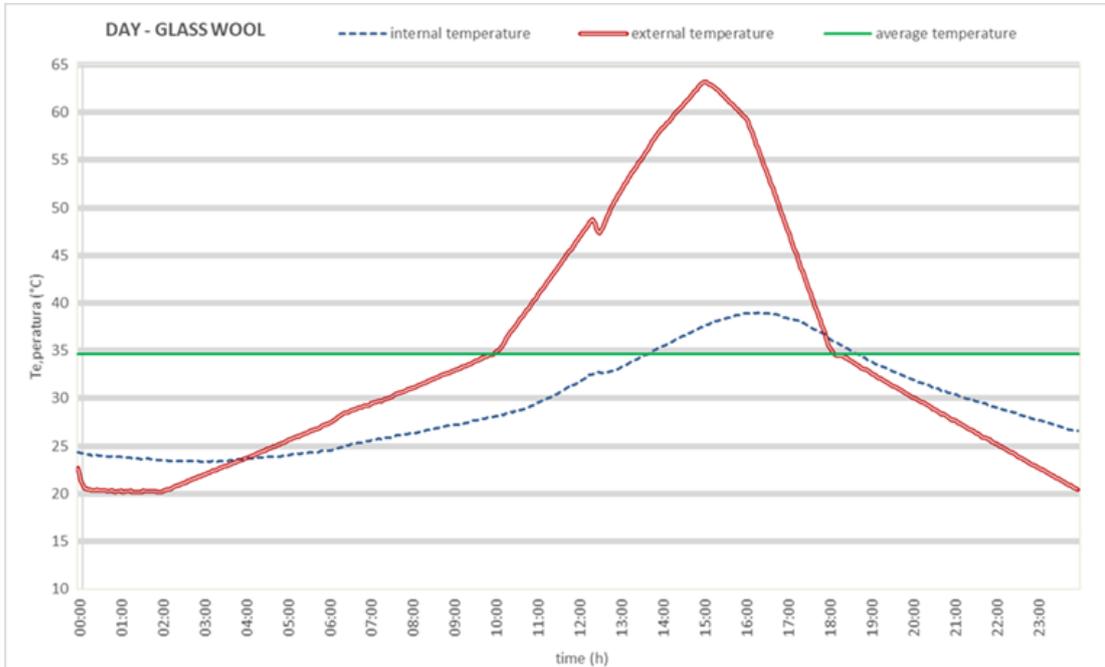
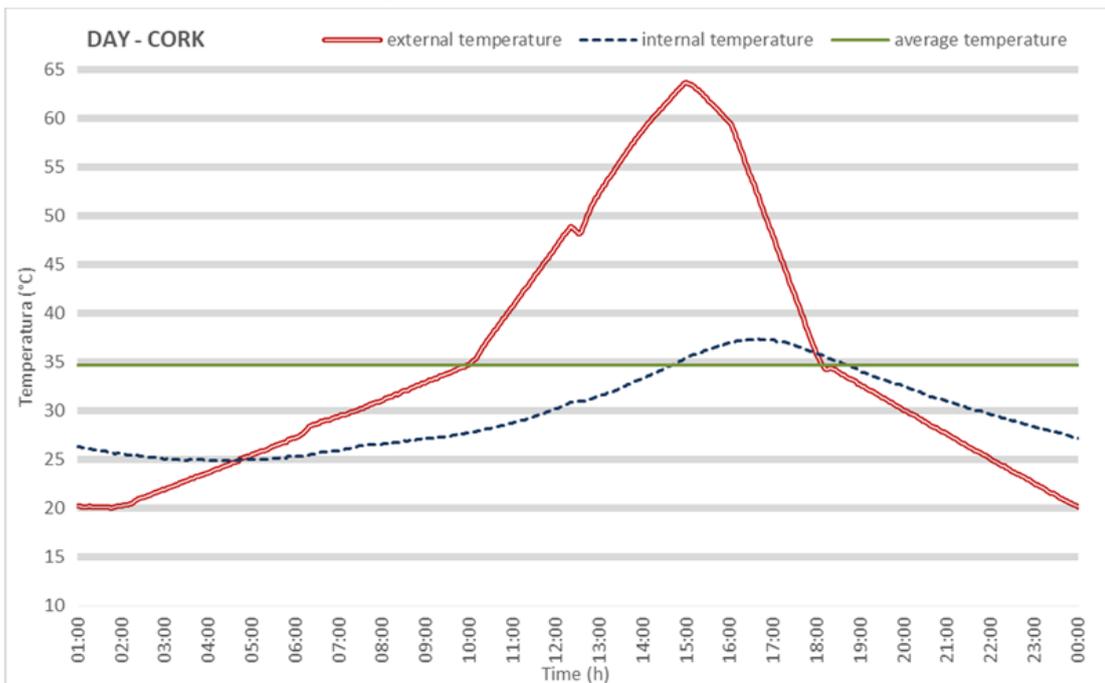


Figura 94. Onde termiche che riproducono la temperatura superficiale esterna sull'ETICS (linea rossa) con sughero espanso come materiale termoisolante, la temperatura superficiale interna sull'ETICS (linea blu) e la temperatura esterna media (linea verde) nel giorno più caldo dell'anno di riferimento (21st Luglio).



La tabella successiva riporta i valori della prova eseguiti sui campioni di Lana di vetro, Sughero e Poliuretano al tempo T_0 , prima dell'invecchiamento accelerato:

Tabella 25. Performance misurate di fattore di attenuazione e tempo di sfasamento pre invecchiamento accelerato (al tempo T_0) e post invecchiamento accelerato (al tempo T_1) con I materiali ordinati in ordine crescente di resistenza termica.

Materials / characteristics:		UM:	GW	ICB	PU
spessore	d	mm	60	80	50
Resistenza termica	R_{T0}	m^2K/W	1.86	2.11	2.29
Fattore di attenuazione	$f_{a,T0}$	adimensional	0.1529	0.0927	0.0381
Tempo di sfasamento	Δt_{T0}	min	70	98	62

La tabella successiva riporta il confronto dei valori di sfasamento al tempo T_0 e al tempo T_1 , evidenziando la perdita in percentuale di questo parametro:

Tabella 26. Performance misurate di fattore di attenuazione e tempo di sfasamento pre invecchiamento accelerato (al tempo T_0) e post invecchiamento accelerato (al tempo T_1) di campioni ETICS con lana di vetro (GW), sughero espanso (ICB) e poliuretano (PU).

Time shift / Materials:	T0	T1	Decreasing percentage
	before accelerating ageing test	after accelerating ageing test	
GW	70 minutes	52 minutes	25.71 %
ICB	98 minutes	70 minutes	28.57 %
PU	62 minutes	60 minutes	3.23%

Lo scopo delle prove era quello di raggiungere la stessa resistenza termica con tutti i materiali isolanti, adottando diversi spessori per isolante in modo inversamente proporzionali alla loro conducibilità termica, al fine di valutare l'inerzia termica su una base omogenea; non è stato possibile ottenere gli stessi identici valori di resistenza termica in quanto i materiali sono disponibili solo in spessori corrispondenti a multipli di centimetri con conseguenti differenze tra i valori di resistenza termica dei campioni, seppure molto piccole.

Questi sono elencati nella tabella 6 in ordine crescente di resistenza termica evidenziando che materiali con una maggiore resistenza termica presentano maggiori fattori di attenuazione. Questo trend sarebbe confermato anche per i tempi di sfasamento a meno del poliuretano che essendo un materiale più leggero presenta dei tempi di sfasamento inferiori.

I primi risultati che si possono osservare dalla tabella 6 durante questi test sperimentali per valutare sfasamento ed attenuazione evidenziano un degrado delle prestazioni dei tempi di sfasamento. Questa forma di degrado è una delle uniche forme di deterioramento di performance apprezzabili.

Ulteriori valutazioni, derivanti da future misurazioni delle prestazioni, sono

necessarie perché, anche se le osservazioni sul degrado superficiale e sulle altre performance misurate non sembrano suggerire alcun decadimento prestazionale, questo output mostra invece che ci sono delle variazioni percepibili per questa prestazione termica dinamica.

In ogni caso, le prime considerazioni che si possono ricavare riguardano risultati in linea con ciò che ci si attendeva, ossia che pannelli isolanti con una maggiore resistenza termica o densità più elevate (sughero e lana di vetro) hanno maggiori tempi di sfasamento mentre materiali più leggeri come il poliuretano presentano prestazioni inferiori. Tuttavia gli ETICS con isolante poliuretano presentano un ottimo fattore di attenuazione, trend confermato da alcuni articoli sull'isolamento estivo pubblicati dall'ANIT.

In conclusione, l'analisi delle prestazioni relative alla vita utile degli ETICS studiati evidenzia che, nonostante altre performance non presentino un effettivo degrado percepibile, un cambiamento decrescente di tale performance è stato rilevato nell'ordine del 3,5% – 28%.

7.4 Assorbimento d'acqua

Un'altra prova effettuata per valutare le prestazioni degli ETICS è la prova di assorbimento dell'acqua, che costituisce una delle prove più importanti dato che, come si è rivelato già da precedenti studi, l'acqua è una dei maggiori responsabili delle anomalie che si riscontrano sull'involucro edilizio; i problemi più rilevanti si verificano in presenza di acqua, che influisce su tutte le prestazioni degli elementi isolanti. Infatti, un maggiore assorbimento dell'acqua durante la vita utile comporta:

- il rischio che le prestazioni termiche possano peggiorare, in quanto l'acqua è un ottimo conduttore termico
- il rischio di causare sollecitazione sulle zone di adesione e sui giunti di accostamento dei pannelli per le dilatazioni lineari dovute ai cicli di assorbimento e di asciugatura ed ai cicli di gelo e disgelo.

Questo tipo di test simula una pioggia battente di 1 ora e di 24 ore. Di seguito si riporteranno i risultati della prova di assorbimento d'acqua, dapprima testati solo sui pannelli isolanti (tabella 27) e poi sull'intero campione ETICS (tabella 28) come descritto nel capitolo 6.6.4.

Le medie delle misurazioni per ogni tipologia di campione con diversi materiali termoisolanti mostrano un assorbimento d'acqua crescente nelle prove effettuate per 1 ora ed effettuate per 24 ore.

La prima tabella fa riferimento all'assorbimento d'acqua su pannelli non rivestiti con lo strato di rasatura e finitura, secondo le procedure descritte dalla UNI EN 1609:

Tabella 27. Assorbimento d'acqua media di 3 provini per ogni materiale isolante espresso in kg/m², misurato dopo immersione parziale per 1 ora e per 24 ore.

Materiale isolante:	Mass 1 h Kg/m²	Mass 24 h Kg/m²
PU	0.05	0.11
EPS	0.11	0.14
GW	0.09	0.28
MW	1.42	3.48
WF	0.20	1.05
ICB	0.21	0.57

Le sigle riportate in tabella fanno riferimento ai 6 campioni di ETICS scelti: *PU* poliuretano; *EPS* polistirene; *GW* Lana di vetro; *MW* Lana di roccia; *WF* Fibra di legno; *ICB* Sughero.

Dalle prime considerazioni sull'osservazione dei risultati evidenziati sui materiali isolanti non rivestiti (campioni "vergini"), appare evidente come gli isolanti cellulari sintetici abbiano degli assorbimenti d'acqua trascurabili in entrambi i casi. Diversamente i materiali fibrosi, fatta eccezione per la lana di vetro, sono invece soggetti ad assorbimenti maggiori. Questo risultato è perfettamente in linea con ciò che ci si attendeva, considerando la natura dei materiali e considerando che, nella pratica degli edifici isolati con un sistema di

isolamento termico a cappotto, i materiali isolanti saranno sempre rivestiti con degli strati di rasatura e finitura che non consentono all'acqua di essere assorbita. Gli unici problemi potrebbero nascere nella pratica di cantiere durante la fase di stoccaggio ed applicazione del sistema se sottoposti a precipitazioni meteoriche.

Nella seconda tabella vengono riportati i risultati relativi ai campioni di ETICS (sistema ETICS completo):

Tabella 28. Assorbimento d'acqua media di 3 provini ETICS per ogni materiale isolante espresso in kg/m^2 , misurato dopo immersione parziale per 1 ora e per 24 ore, pre invecchiamento accelerato (T0) e post invecchiamento accelerato (T1).

Assorbimento d'acqua	Mass 1 h		Mass 24 h		Variazione assorbimento 24h -1h	
	Kg/m ²		Kg/m ²			
ETICS con/al tempo:	T0	T1	T0	T1	T0	T1
PU	0.17	0.35	0.98	0.87	0.81	0.52
EPS	0.18	0.35	0.83	0.74	0.65	0.39
GW	0.35	0.34	1.17	0.59	0.82	0.25
MW	2.19	2.06	2.88	3.70	0.69	1.64
WF	0.48	0.61	1.71	2.05	1.23	1.44
ICB	0.30	0.40	1.10	0.95	0.8	0.55

Le sigle riportate in tabella fanno riferimento ai 6 campioni di ETICS scelti: *PU* poliuretano; *EPS* polistirene; *GW* Lana di vetro; *MW* Lana di roccia; *WF* Fibra di legno; *ICB* Sughero.

Alcune osservazioni sui risultati possono indicare gli ETICS hanno visto un lieve aumento d'assorbimento d'acqua in seguito ai cicli di invecchiamento accelerato.

Nonostante l'applicazione dell'impermeabilizzante ai lati dei campioni, alcune tipologie di pannelli sono maggiormente suscettibili ad un maggior assorbimento d'acqua, causato probabilmente non tanto dall'assorbimento superficiale ma dall'infiltrazione dell'acqua sui lati impermeabilizzati dei campioni.

Questo fenomeno, inizialmente non previsto, ha evidenziato che probabilmente in determinati stati temporali, dove i fenomeni di degrado iniziano a svilupparsi (fessurazioni, blistering, ecc.), tali sistemi presenteranno corsie preferenziali di infiltrazione dell'acqua, che potrebbero portare al danneggiamento dell'ETICS. Possiamo quindi affermare che materiali a celle chiuse, seppure con il passare del tempo iniziassero a fessurare (tra i pannelli o a contatto con giunti o in corrispondenza dei fissaggi meccanici), non sono soggetti ad importanti valori di assorbimento d'acqua in seguito alle precipitazioni, mentre alcuni materiali fibrosi (lana di roccia e fibra di legno) mostrano più alti assorbimenti d'acqua (vedi tabella 28); ciò fa intendere che i materiali fibrosi in coincidenza di anomalie, possono registrare aumenti di assorbimento d'acqua maggiori rispetto ai materiali a celle chiuse.

7.5 Valutazione della Resistenza a Trazione perpendicolare alle facce

In seguito ai test di performance non distruttivi effettuati sui campioni ETICS, si è proceduto con i test distruttivi tra i quali la resistenza a trazione perpendicolare alle facce. Questo test è utile a valutare sia la resistenza dei collanti/rasanti tra supporto ed isolante sia l'intera resistenza a strappo per sollecitazioni da vento che negli angoli degli involucri edili possono raggiungere anche forze molto elevate.

La procedura seguita è illustrata al capitolo 6.6.5.

Entrambi i metodi utilizzati (la EN 1607 per gli isolanti e l'ETAG 004 per l'intero sistema ETICS) presentano una elevata variazione dei risultati di una misura ripetuta sullo stesso tipo di campione, a causa della natura dei medesimi. Si riportano di seguito i valori medi.

Tabella 29. Resistenza a trazione perpendicolare alle facce media di 3 provini di solo isolante, dell'intero sistema ETICS pre invecchiamento (T0) e dell'intero sistema ETICS post-invecchiamento espresso in kN/m².

Con isolante in: kN/m ²	Solo isolante	ETICS T0	ETICS T1
PU	82,27	126,06	97,18
EPS	69,18	63,11	66,63
GW	5,23	8,7	4,98
MW	2,09	6,42	5,75
WF	11,25	10,5	10,39
ICB	31,40	42,02	50,43

Le sigle riportate in tabella fanno riferimento ai 6 campioni di ETICS scelti: *PU* poliuretano; *EPS* polistirene; *GW* Lana di vetro; *MW* Lana di roccia; *WF* Fibra di legno; *ICB* Sughero.

In tabella sono riportati i valori delle misurazioni effettuate sugli isolanti non rivestiti ("vergini"), sui campioni ETICS registrate al tempo T0 (non invecchiati) e sui campioni ETICS registrate al tempo T1.

Come già previsto ed anticipato nelle prime considerazioni, relativamente alle resistenze a trazione perpendicolare alle facce, si individuano due tendenze prestazionali ben definite: i fibrosi che hanno valori di resistenza modesti, mentre i cellulari che hanno valori di resistenza più alti.

Il medesimo andamento si osserva anche per i sistemi ETICS, dove non si individua una variazione significativa tra il valore pre e post invecchiamento. Evidentemente la sollecitazione termoigrometrica superficiale non comporta una significativa modifica delle prestazioni meccaniche dell'isolante. Fa eccezione il poliuretano dove si osserva una significativa variazione tra i sistemi ETICS ed il valore misurato sul pannello isolante. In realtà si ritiene che tale variazione sia in linea con la variazione che è possibile misurare su più provini ripetuti di un medesimo campione. Il poliuretano sottoposto a misura presenta una certa disomogeneità della schiuma isolante che appare prodotta a fasce larghe circa 20 cm. Poiché la sezione della cella di misura è 5x5cm, si è notato che qualora la piastra sia posizionata al centro di una fascia o in prossimità dei bordi le variazioni possono essere comparabili alle differenze tra la media dei valori misurati sui campioni pre e post invecchiamento. Ciò nonostante i valori

misurati sono maggiori a 80 kN/m^2 dichiarati da scheda tecnica.

I sistemi a base di isolanti fibrosi mantengono dei valori di adesione modesti ($5\text{-}12 \text{ kN/m}^2$); mentre, i sistemi a base di isolanti sintetici hanno dei valori particolarmente elevati se messi in relazione alla tipica forza di estrazione al vento, calcolata in accordo all'Eurocodice I, nel territorio Italiano ($0,8\text{ - }2,2 \text{ kN/m}^2$). L'uso dei materiali cellulari sintetici garantisce di fatto un fattore di sicurezza pari a 1 ordine di grandezza superiore rispetto alla resistenza al vento offerta dai materiali di natura fibrosa. Si raccomanda di valutare la scelta del sistema ETICS in relazione alla propria resistenza di estrazione al vento e alla forza del vento che dipende dalla zona climatica, dall'altezza, dalla forma e conformazione dell'edificio.

A seguire si riportano le foto relative alle rotture registrate durante le prove a trazione perpendicolare alle facce.

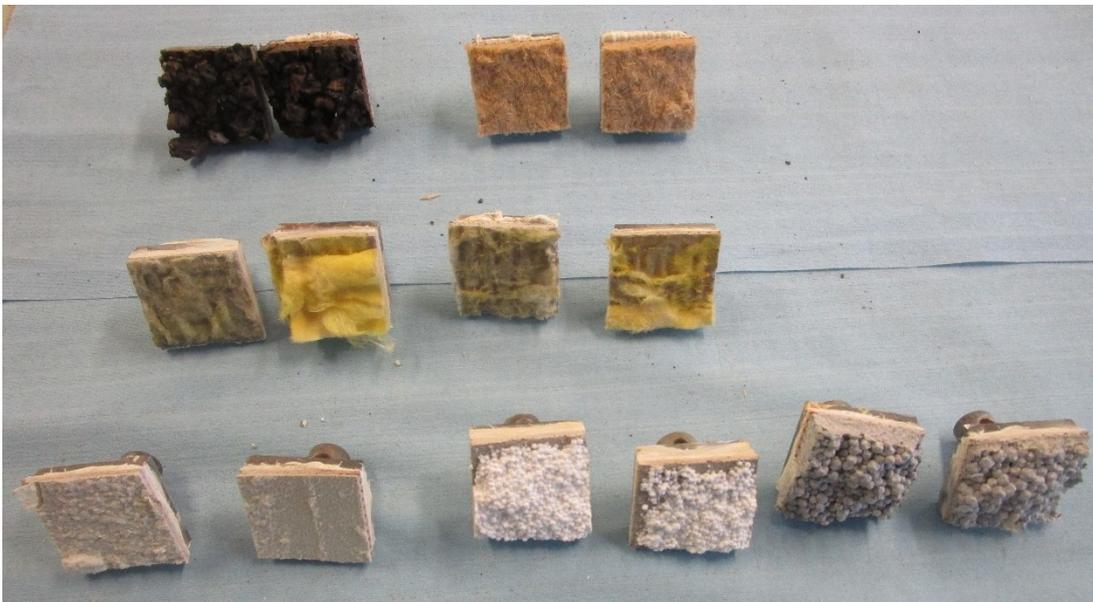


Figura 95 – Foto dei provini ETICS appena sottoposti a trazione pre-invecchiamento (T0)



Figura 96 – Foto dei provini ETICS appena sottoposti a trazione post-invecchiamento (T1)

7.6 Valutazione della Resistenza a compressione

Un'altra prova distruttiva effettuata è la prova a compressione, eseguita seguendo le procedure illustrate al capitolo 6.6.6; a titolo esemplificativo si illustra in figura 97 uno dei provini testati secondo tale procedura:

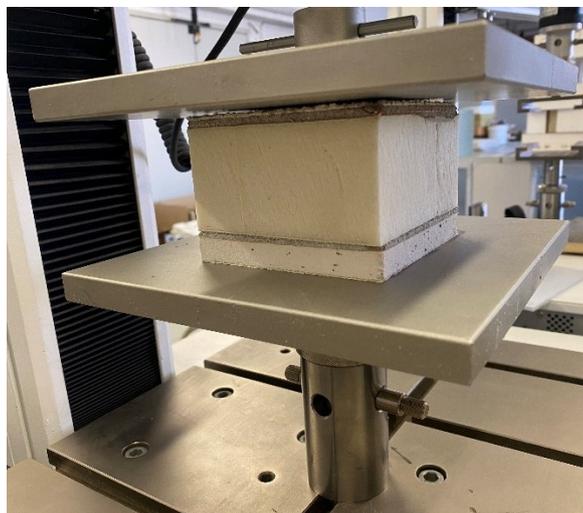
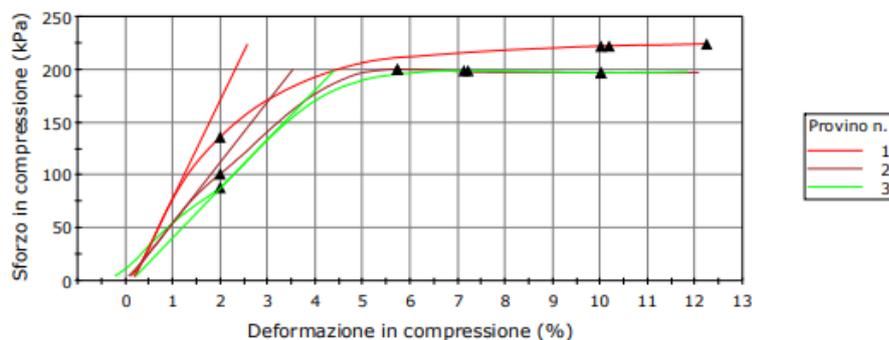


Figura 97 – Foto del test a compressione eseguito su un provino 10 x 10 cm di ETICS in poliuretano

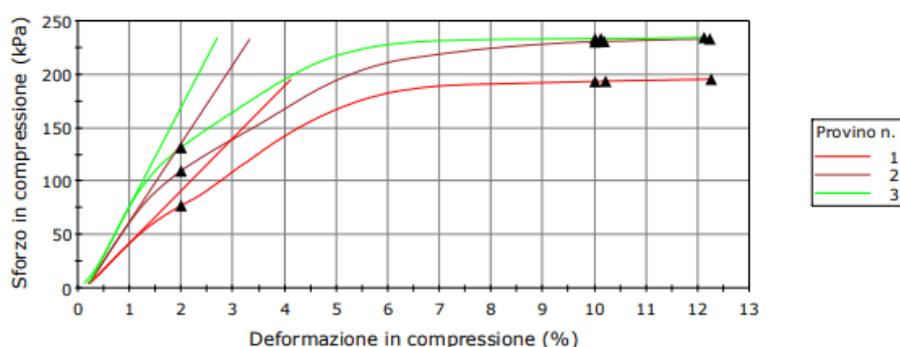
La tipologia di risultati o output dei test eseguiti, restituisce dei grafici che si riportano nelle figure 98 e 99 a titolo esemplificativo e non esaustivo in entrambe le fasi, ossia pre e post invecchiamento.



	Resistenza a compressione al 2% di deformazione (kPa)	Resistenza a compressione punto cursore (kPa)	Modulo (Modulo di Young automatico) (MPa)	Resistenza a compressione al 10% di deformazione (kPa)
1	136,24	222,03	9,24585	221,82
2	101,46	200,12	5,74176	196,72
3	88,48	198,70	4,65323	196,93
Media	108,73	206,95	6,54694	205,16
Deviazione standard	24,69779	13,08	2,39985	14,43232
Massimo	136,24	222,03	9,24585	221,82
Minimo	88,48	198,70	4,65323	196,72

	Resistenza a compressione (kPa)
1	223,92
2	200,12
3	198,74
Media	207,59
Deviazione standard	14,15561
Massimo	223,92
Minimo	198,74

Figura 98 – Foto del grafico di output del macchinario che esegue i test a compressione sui provini in poliuretano non invecchiati (ovvero al tempo T0)



	Resistenza a compressione al 2% di deformazione (kPa)	Resistenza a compressione punto cursore (kPa)	Modulo (Modulo di Young automatico) (MPa)	Resistenza a compressione al 10% di deformazione (kPa)
1	77,59	193,54	4,89223	193,33
2	109,93	230,57	7,31869	230,21
3	131,81	233,19	9,23562	233,16
Media	106,44	219,10	7,14885	218,90
Deviazione standard	27,27333	22,17	2,17667	22,19400
Massimo	131,81	233,19	9,23562	233,16
Minimo	77,59	193,54	4,89223	193,33

	Resistenza a compressione (kPa)
1	195,39
2	232,97
3	234,17
Media	220,84
Deviazione standard	22,05125
Massimo	234,17
Minimo	195,39

Figura 99 – Foto del grafico di output del macchinario che esegue i test a compressione sui provini in poliuretano invecchiati (ovvero al tempo T1)

In seguito, si riportano di seguito i risultati registrati, includendo anche valori medi registrati, valori minimi e deviazione standard.

Tabella 30. Resistenza a compressione espressa in kN/m², come media, valore minimo e deviazione standard di 3 provini di solo isolante, dell'intero sistema ETICS pre invecchiamento (T0) e dell'intero sistema ETICS post-invecchiamento.

Compresione	Al 2%						Al 10%					
	T0			T1			T0			T1		
Isolanti:	media	min	Dev.st.	media	min	Dev.st.	media	min	Dev.st.	media	min	Dev.st.
EPS	18,18	17,47	1,0	16,95	15,65	1,2	53,41	53,15	0,4	49,82	48,39	1,26
PU	108,73	88,48	24,7	106,44	77,59	27,3	205,16	196,72	14,4	218,90	193,33	22,22
MW	7,29	6,70	0,6	5,97	5,28	1,0	25,19	24,78	0,5	16,42	13,52	2,97
GW	5,58	5,40	0,2	5,78	5,56	0,3	22,60	21,24	1,4	17,30	15,33	2,69
WF	29,72	28,59	1,8	23,65	21,97	1,5	88,53	86,33	2,7	104,04	102,25	1,57
ICB	29,27	26,66	3,1	28,67	22,32	6,5	99,00	94,10	4,6	94,70	72,00	9,08

Le sigle riportate in tabella fanno riferimento ai 6 campioni di ETICS scelti: *PU* poliuretano; *EPS* polistirene; *GW* Lana di vetro; *MW* Lana di roccia; *WF* Fibra di legno; *ICB* Sughero.

Le considerazioni sui risultati riguardano le differenze apprezzabili in termini di resistenza a compressione tra la maggior parte dei materiali e quelli fibrosi in lana di roccia e lana di vetro. Come ci si attendeva, questi ultimi due materiali, a causa proprio della natura fisica fibrosa presentano resistenze inferiori. Le differenze erano in parte apprezzabili osservando le schede tecniche dei

materiali studiati.

Dopo le prove di trazione, anche nella compressione il poliuretano presenta variazione dei risultati appena maggiore rispetto a quella di altri come dimostrato dalla deviazione standard registrata. In realtà si ritiene che tale variazione sia in linea con la variazione che è possibile misurare su più provini ripetuti di un medesimo campione. Il poliuretano sottoposto a misura presenta una certa disomogeneità della schiuma isolante che appare prodotta a fasce larghe circa 20 cm. Poiché la sezione della cella di misura è 10 x10 cm, si è notato che qualora la piastra sia posizionata al centro di una fascia o in prossimità dei bordi le variazioni possono essere comparabili alle differenze tra la media dei valori misurati sui campioni pre e post invecchiamento. Ciò nonostante i valori misurati sono maggiori ai 150 kN/m² dichiarati da scheda tecnica.

Nonostante la suddetta deviazione standard registrata nel poliuretano sembri maggiore rispetto a quella verificata per altri campioni, non è sempre stato possibile fare 3 compressioni per ogni isolante; soprattutto i fibrosi (lana di roccia e lana di vetro) nel taglio dei campioni tendevano spesso a rompersi riducendo il numero di prove effettivamente realizzate (da 3 a 2 prove).

Nell'interpretazione complessiva dei risultati illustrati in tabella 30 si osserva che per i sistemi ETICS non si individua alcuna variazione tra il valore pre e post invecchiamento. Evidentemente le sollecitazioni termoigrometriche superficiali non comportano una significativa modifica delle prestazioni fisiche e meccaniche dell'isolante e dell'intero sistema ETICS, esattamente come già evidenziato dalla prova a trazione perpendicolare alle facce.

7.7 Valutazione della Resistenza d'impatto

Un'altra prova distruttiva effettuata è la prova di resistenza all'urto da corpo rigido, eseguita seguendo le procedure illustrate al capitolo 6.6.7. Questo test è importante per i cappotti soprattutto in corrispondenza dei paramenti degli sviluppi verticali in corrispondenza dei quali possono verificarsi casualmente degli impatti violenti ed accidentali; le reti di rinforzo in fibra di vetro servono anche ad evitare e/o ridurre questa tipologia di anomalia.

Per verificare quanto incide la presenza della rete nella resistenza meccanica dell'ETICS, si è proceduto all'attuazione di un test senza rete in fibra di vetro; in tale circostanza è stato effettuato un test sul ciclo non completo in cui è stata omessa la posa della rete. Di seguito in figura 100 e 101 è possibile osservare rispettivamente il confronto tra il test realizzato rispettivamente con e senza rete.



Figura 100 – Foto dei test provini ETICS appena sottoposti a trazione post-invecchiamento (T1)



Figura 101 – Foto dei provini ETICS appena sottoposti a trazione post-invecchiamento (T1)

Si riportano di seguito in tabella i risultati misurati e le osservazioni qualitative della tipologia di fessura o crepa osservata sullo strato di finitura esterno.

Tabella 31. Prove di resistenza all'urto con corpo rigido da 0.5 kg e 1.18 kg: misurazioni delle circonferenze degli impatti registrati, ed osservazioni sulle crepe e fessurazioni lasciate sul rivestimento di finitura, pre invecchiamento accelerato (T0) e post-invecchiamento accelerato.

Test di resistenza all'urto	Materiali	Pre invecchiamento accelerato (T0)			Post invecchiamento accelerato (T1)		
		Impact dimension (mm)	Cracks on finishing coat	Depht (mm)	Impact dimension (mm)	Cracks on finishing coat	Depht (mm)
0.5 kg	EPS	24x23	yes	2.44	30x30	Deep cracks	8.39
	PU	30x30	Yes	3.72	24x25	yes	4.53
	MW	65x62	Complete ropture	14.02	27x30	yes	3.84
	GW	25x 26	Complete ropture	4.27	30x25	yes	3.00
	WF	30x229	Yes	3.69	24x25	yes	3.99
	ICB	24x23	yes	3.52	22x22	yes	3.24
1.18 kg	EPS	53X51	YES	2.27	55x60	Deep cracks	5.25
	PU	35X35	YES	3.19	32x32	yes	4.53
	MW	90X70	Deep cracks	1.34	49x49	Deep cracks	1.44
	GW	69X55	Deep cracks	2.36	40x40	Yes	2.81
	WF	32X27	yes	3.40	45x62	yes	1.78
	ICB	30X35	yes	2,58	33x35	yes	2.26

Dai dati emersi si evince un degrado quasi non percepibile dato che nel complesso i dati sulla circonferenza e i diametri d'impatto lasciati sui campioni non hanno subito grandi variazioni tra pre e post invecchiamento.

Le crepe e le fessurazioni lasciate sul rivestimento di finitura superficiale, essendo di minima entità non sono da considerarsi anomale ma perfettamente in linea con i risultati previsti da questa tipologia di prova.

Per completezza sono state registrate anche le profondità d'impatto, ma questo è un dato che la norma non prescrive di registrare, non ritenendolo significativo o di facile rilevazione, per cui la maggiore variazione registrata sulle profondità d'impatto non è considerata come indicativa.



Figura 102 – Foto dei test d'urto con il corpo rigido da 0.5 kg e 1.18 kg effettuato sui campioni ETICS; a sinistra le prove eseguite pre-invecchiamento (T0), a destra le prove eseguite post-invecchiamento (T1); rispettivamente dall'alto verso il basso di campioni ETICS in lana di vetro, EPS grigio, sughero.

7.8 Reazione al fuoco

Nella tabella vengono indicati i risultati relativi alla prova al fuoco con piccola fiamma, eseguita su tutti i campioni di pannelli isolante oggetto di sperimentazione:

Tabella 32. Misurazione in millimetri dell'impronta carbonizzata del materiale isolante.
L1 = abbassamento, L2 = altezza, L3 = larghezza; $\Sigma L = L1 + L2 + L3$

PROVE DI REAZIONE AL FUOCO PICCOLA FIAMMA - Misure della parte carbonizzata, non la fuliginata					
ISOLANTE:	L 1 (Abbassamento)	L 2 (altezza)	L 3 (larghezza)	unità di misura	Indice reaz. fuoco piccola fiamma = ΣL
GREY EPS	50,21	45,03	103,20	mm	198,44
POLYURETHANE	6,03	29,38	67,14	mm	102,55
GLASS WOOL	10,42	27,05	49,12	mm	86,59
ROCK WOOL	7,32	26,01	38,69	mm	72,02
CORK	8,09	31,14	58,84	mm	98,07
WOOD FIBER	3,76	33,37	83,68	mm	120,81

Attraverso questo test è possibile verificare la reale reazione al fuoco dei materiali, con un metodo unico ripetuto in modo sempre identico nella stessa giornata.

Questo test di piccola fiamma può darci indicazioni su elementi che possono incidere nell'utilizzo dei pannelli isolanti, dando informazioni se un materiale è più o meno infiammabile se sorgessero complicazioni nelle fasi di trasporto, imballaggio, stoccaggio di cantiere, movimentazione all'interno del cantiere, posa in opera e le eventuali fasi di rimozione, demolizione e smaltimento.

Attraverso l'impiego di un indice come la sommatoria delle 3 dimensioni della parte carbonizzata si possono avere informazioni anche sull'idoneità e sulla sicurezza di utilizzo dei materiali che potrebbero richiedere maggiore attenzione durante la posa in opera.

Da tali prove si riesce a stabilire se un materiale è adatto ad esser messo in copertura sotto guaina o se il materiale può essere investito da una fiamma per pochi secondi (incidenti sul cantiere). Dalla tabella si evince che materiali come l'EPS sono altamente sconsigliabili per questa caratteristica, mentre altri materiali registrano indici molto più bassi.

Questi indici evidenziano un comportamento reale che avviene in natura, ossia che gli altri materiali con un test di piccola fiamma di 15 secondi non bruciano ma carbonizzano solo il primo film di strato sottile, restando inalterati per lo spessore sottostante.

Questo comportamento di reazione al fuoco registrato per i materiali isolanti, potrebbe cambiare per test di fiamma di maggiore entità: si prevede che le lane minerali continueranno a mantenere un ottimo comportamento anche con test diversi mentre materiali come EPS sublimeranno interamente ed i gas prodotti possono contribuire all'incendio.

Una considerazione a parte merita il poliuretano, materiale erroneamente associato all'EPS per la reazione al fuoco, il registra un indice di reazione al fuoco non tanto superiore alle lane, suggerendo un discreto comportamento alla piccola fiamma.

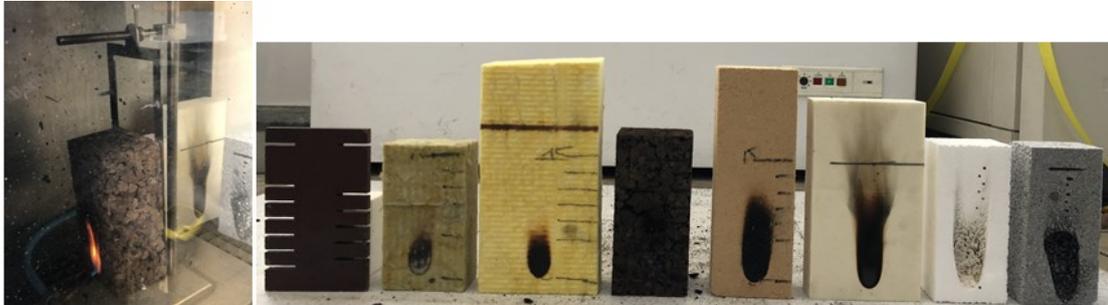


Figura 103 – Sinistra Prova al fuoco di piccola fiamma – Destra Provini dopo la prova

Capitolo 8: Conclusioni e sviluppi futuri

Questo studio con la relativa sperimentazione ha il merito di verificare la durabilità del sistema cappotto attraverso una comparazione del degrado dei più comuni materiali di isolamento termico impiegati per gli ETICS.

A tale scopo sono stati utilizzati sei pannelli di materiale di natura totalmente differente l'una dall'altra ma aventi la medesima trasmittanza termica e la medesima resistenza termica.

Questa ricerca parte da studi precedenti che hanno trattato diversi metodi per valutare il decadimento delle prestazioni degli ETICS al fine di progettare un nuovo metodo più completo per definire una strategia adeguata alla manutenzione degli edifici.

Questo nuovo approccio sperimentale fornisce un confronto del ruolo svolto dal materiale isolante stesso nel determinare la durata di un ETICS.

I sei campioni ETICS di isolamento a cappotto, cioè polistirene espanso, poliuretano espanso, lana di vetro, lana di roccia, sughero espanso e fibra di legno sono stati preparati con identico kit da cappotto così come da norma UNI 11715 e secondo quanto richiesto dalla norma vigente (EAD 040083-00-0404 ex ETAG 004): ogni campione è stato trattato con identico collante, identico rasante identica rete, ed identico tipo di fissaggio; tutto il kit presenta caratteristiche perfettamente uguali per ogni campione predisposto ed è stato fornito dal medesimo produttore di sistema certificato secondo le linee guida redatte dell'EOTA (European Organization for Technical Approval) a norma UNI 11715. In questo modo la scelta di una varietà relativamente ampia di materiali isolanti ha permesso di studiare la relazione esistente tra le diverse proprietà dell'isolante con gli altri strati funzionali del sistema.

La limitata scelta dei campioni studiati è stata condizionata dal lento processo a cui sono sottoposti per l'invecchiamento; per valutarne il comportamento nel tempo in un arco temporale ragionevole si è reso necessario ridurre la campionatura analizzata che risulta comunque essere molto più ampia rispetto alle ricerche fino ad oggi sviluppate; tuttavia per un'analisi più completa sarebbe necessaria una indagine statistica più ampia e approfondita: per ottenere risultati più precisi si potrebbero compiere ulteriori progressi utilizzando un maggior numero di campioni prendendo in esame altri isolanti di natura diversa, in questa fase non valutati (resina fenolica, vetro cellulare, legno mineralizzato, polistirene estruso espanso ecc.).

Dalle prove di laboratorio che hanno simulato l'invecchiamento si è potuto constatare che il sistema cappotto ETICS non ha avuto percepibili mutamenti o grosse forme di degrado.

I requisiti del sistema, testati in laboratorio attraverso prove termiche, fisiche e meccaniche, hanno subito variazioni insignificanti in seguito all'azione dell'invecchiamento accelerato.

Queste prime misurazioni sperimentali indicano interessanti risultati relativi all'evoluzione della resistenza termica, in quanto mostrano un piccolo aumento dopo i cicli di invecchiamento accelerato, e non mostrano alcun degrado

superficiale. Tali risultati suggeriscono che, dopo l'invecchiamento naturale, le prestazioni termiche di un ETICS non sono soggette a variazioni significative durante la loro vita utile per i primi 9/10 anni analizzati.

Da tali osservazioni (osservazione del degrado della superficie e della sezione) e da tali prove (prova di resistenza termica, prova di sfasamento ed attenuazione, prova di assorbimento d'acqua, prove di trazione perpendicolare alle facce, prove di compressione e prove d'urto) si è potuto rilevare che i campioni ETICS non presentano accenni di degrado dello strato di finitura finale; ne scaturisce che la durabilità del cappotto è ottimale ed è dimostrata anche per i campioni utilizzati andando a confrontare con i casi studio reali invecchiati naturalmente per circa 9/10 anni.

Altre considerazioni relativamente agli isolanti hanno dimostrato che gli ETICS con maggiore resistenza termica e/o densità ottengono un migliore sfasamento dell'onda termica sinusoidale del ciclo giornaliero e che gli isolanti più efficienti hanno comunque un elevato potere attenuante.

Inoltre gli ETICS hanno avuto un lieve aumento d'assorbimento d'acqua in seguito ai cicli di invecchiamento accelerato. In particolare, si è osservato che quelli che mostrano più alti assorbimenti di acqua a breve termine sono i materiali a base fibrosa, ovvero, lana di vetro e lana di roccia, rivelando che tali materiali, in coincidenza di anomalie possono registrare maggiori aumenti di assorbimento d'acqua a breve termine.

Questo tipo di test simula la pioggia battente e l'aumento dei livelli di decadimento legati alla presenza di acqua negli ETICS. Un maggiore assorbimento dell'acqua durante la vita utile comporta sia il rischio che le prestazioni termiche possano peggiorare (in quanto l'acqua è un ottimo conduttore termico) sia il rischio di causare sollecitazione sulle zone di adesione e sui giunti di accostamento dei pannelli per le dilatazioni lineari dovute ai cicli di assorbimento e di asciugatura.

Altri risultati delle prove hanno evidenziato una differenza tra la conducibilità dichiarata dei pannelli isolanti e quella misurata. La spiegazione si può ritrovare nella norma EN 13172, in quanto la norma consente una leggera tolleranza statistica per la determinazione del valore di conducibilità dichiarato in base alle misurazioni; anche se la probabilità è bassa, la differenza tra i valori della ricerca e quelli dichiarati potrebbe essere spiegata in questo modo oppure con un grado di incertezza del metodo pari al 5% nelle tolleranze e nelle differenze di spessori nominali e misurati.

Da questa sperimentazione si può concludere che l'assenza di decadimento delle prestazioni sui campioni avvalorava un'elevata durata intrinseca degli ETICS. Infatti, tutti i campioni sono stati correttamente imballati secondo una specifica norma, la UNI 11715, che definisce le direttive per la corretta progettazione e realizzazione di sistemi di isolamento termico all'esterno di edifici nuovi ed esistenti, e secondo la specifica certificazione ETA.

L'eventuale degrado può essere causato in prima battuta da difetti della posa in opera nella fase di cantiere e in secondo ordine da eventi atmosferici e/o naturali di carattere eccezionale.

Nella pratica operativa di cantiere, in caso di edifici reali, si possono presentare risultati differenti e un maggiore deterioramento a causa della presenza di possibili criticità e difetti determinati durante l'esecuzione dell'isolamento termico a cappotto; esempi, per citarne alcuni, possono essere l'errata applicazione della rete in fibra di vetro direttamente posata sui pannelli isolanti (non ben inglobata all'interno della rasatura), spessore insufficiente degli strati di finitura, fissaggi meccanici non idonei e non ben posizionati, in numero insufficiente e/o con una bassa profondità di ancoraggio, pannelli non ben accostati tra di loro e non sfalsati correttamente.

Futuri sviluppi nella metodologia adottata potrebbero includere l'attuazione di cicli di invecchiamento stressanti e lungamente accelerati, al fine di stimare i valori di prestazione anche intermedi in momenti diversi durante la vita utile dell'ETICS. La metodologia delineata e utilizzata nel presente documento costituisce un passo essenziale nella definizione dei principali parametri da considerare e delle loro valutazioni perché riesce ad analizzare il comportamento dei sistemi ETICS nei primi 9/10 anni di vita utile.

Altro possibile sviluppo di questa ricerca potrebbe essere un'indagine prestazionale delle altre soluzioni ETICS mancanti attraverso test di invecchiamento accelerato in una camera climatica.

Tale ricerca potrebbe essere ampliata impostando una analisi del decadimento delle prestazioni misurate durante ulteriori fasi intermedie dell'invecchiamento accelerato, valutando le stesse prestazioni di cui si è tenuto conto, ossia resistenza termica, tempo di sfasamento, fattore di attenuazione, assorbimento di acqua, resistenza alla trazione perpendicolare alle facce, comportamento a compressione, resistenza all'impatto, degrado superficiale ed in sezione.

Le curve prestazioni-tempo sono realizzate in termini sia di cicli (in quanto questi miravano a confrontare le soluzioni scelte) sia di tempo naturale. Mettendo in relazione lo stato di decadimento dei campioni invecchiati artificialmente in laboratorio con gli ETICS realizzati su edifici invecchiati naturalmente, si valuta la riduzione delle prestazioni con un'ascissa di tempo reale, in questa fase corrispondente a 9/10 anni reali di vita utile. Sarebbe interessante ampliare i cicli di invecchiamento accelerato per valutarne un orizzonte temporale maggiore.

Un'altra metodologia di valutazione potrebbe consistere nell'analizzare non solo fisicamente i campioni, come fatto finora, ma anche chimicamente mediante il metodo della "spettroscopia a trasformata di Fourier" (analisi FTIR) da cui è possibile osservare le variazioni delle proprietà chimiche dei materiali.

I futuri obiettivi della ricerca potrebbero essere:

1. un confronto tra tutti i materiali isolanti più comuni e più performanti utilizzati come componenti di isolamento termico nelle chiusure verticali

degli edifici, in particolare per quanto riguarda la loro vita utile al fine di prevederne e quantificarne la durata e pianificare correttamente la manutenzione con il futuro obiettivo di una valutazione dell'intero ciclo di vita (analisi LCA e LCC). Tali indagini potrebbero comportare interessanti implicazioni nella valutazione del ciclo di vita dell'ETICS. In particolare l'individuazione delle modalità di decadimento delle prestazioni di ETICS ci consentirà di prevedere tempi e tipi di manutenzione pianificata, evitando sia costi imprevisti sia il guasto degli ETICS. Questo principio comporta implicazioni interessanti anche per l'impatto ambientale, poiché mantenere le prestazioni termiche al di sopra dei minimi di normativa e prolungare la vita utile di un edificio sono elementi positivi nel contesto di un'analisi di LCA. In questo senso, sarà necessario determinare le curve prestazioni-tempo per i diversi tipi di ETICS, al fine di individuare le coordinate appropriate per la strategia manutentiva più adatta nell'ambito della manutenzione programmata.

2. un'indagine sulla durabilità dell'ETICS attraverso la stima della vita utile per mezzo di un fattore di re-scaling, integrando un maggior numero di cicli di invecchiamento accelerato accompagnato da un'indagine statistica più ampia che metta in relazione lo stato di decadimento misurato nei campioni invecchiati artificialmente con un maggior numero di casi reali invecchiati naturalmente. In tal modo si potrebbe ampliare l'orizzonte temporale indagato (da 9/ 10 anni ad un obiettivo molto più ampio di 30/40 anni): simulando i cicli di invecchiamento degli edifici reali, si potrebbe determinare in modo sempre più preciso il decadimento delle prestazioni valutandone l'evoluzione nel tempo così come previsto nella norma Iso 15686-7.
3. una analisi sugli effettivi consumi energetici di edifici trattati con sistemi di isolamento termico a cappotto nell'intero arco di vita utile, analizzando l'eventuale variazione di trasmittanza della parete durante la vita reale dell'edificio. Ampliando la registrazione di tutti i parametri e verificandone le prestazioni in un tempo molto ampio infatti, è possibile registrare ad intervalli di tempo definiti le possibili variazioni di conducibilità termica, di trasmittanza e di resistenza termica dei pannelli isolanti utilizzati e delle pareti perimetrali verticali valutando l'eventuale aumento di consumi energetici.

Bibliografia

- [1] G. Di Napoli, Metodologie di pianificazione energetica applicate alle relazioni Russia – UE, tesi di dottorato Università degli studi Federico II, Napoli, 2010.
- [2] World Green building Council (World GBC), «New report: the building and construction sector can reach net zero carbon emissions by 2050,» 2019. [Online]. Available: <https://www.worldgbc.org/news-media/WorldGBC-embodied-carbon-report-published>. [Consultato il giorno 28 December 2020].
- [3] Global Status Report for Buildings and Construction, «Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector,» 2019. [Online]. Available: <https://www.unenvironment.org/resources/publication/2019-global-status-report-buildings-and-const>.
- [4] European Commission, «Energy performance of buildings directive,» 2020. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en#:~:text=Buildings%20are%20responsible%20fo. [Consultato il giorno 28 December 2020].
- [5] Building Performance Institute Europe, «97% of buildings in the eu need to be upgraded,» 2018. [Online]. Available: https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2017/12/State-of-the-building-stock-briefing_Dic6.pdf. [Consultato il giorno 17 April 2021].
- [6] T. Gallauziac e D. Fedullo, Manuale pratico dell'isolamento termico e acustico, Sistemi editoriali, 2011.
- [7] I. Oberti, L'isolamento termico dell'edificio, dal materiale alla messa in opera del prodotto, Maggioli, 2011.
- [8] G. Sardella, Manuale dell'isolamento a cappotto, Legislazione Tecnica Editore, 2019.
- [9] S. Stingl de Freitas e V. Peixoto de Freitas, «Crack on ETICS along thermal insulation joints: case study and a pathology catalogue,» *Department of Civil Engineering – Laboratory of Building Physics, Universidade do Porto*, 2016.
- [10] B. Amaro, D. Saraiva e J. de Brito, «Statistical survey of the pathology, diagnosis and rehabilitation of the ETICS in walls,» *Department of Civil Engineering, Architecture and Georesources, Technical University of Lisbon*, 2014.
- [11] V. Sulakatko, I. Lilla e E. Witt, «Methodological framework to assess the significance of External Thermal Insulation Composite System (ETICS) on-site activities,» *Tallinn University of Technology, Estonia; Technische Universität, Berlin, Germany*, 2016.
- [12] V. Sulakatko, E. Liisma e E. Soekov, «Increasing Construction Quality of External Thermal Insulation Composite System (ETICS) by revealing on-site Degradation Factors,» *Tallinn University of Technology, Estonia; Technische Universität, Berlin, Germany*, 2017.

- [13] E. Barreira e V. P. de Freitas, «Importance of thermography in the study of ETICS finishing coatings degradation due to algae and mildew growth,» *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, 2005.
- [14] R. Landolfi, A. Pino e M. Nicoletta, «Evaluation of the Effects of Environmental Exposure on the Performance Decay of ETICS -,» in *15°esima conferenza internazionale del Durability of Building Materials and Components (DBMC)*, Barcellona, 2020.
- [15] J. Bochen, «Durability assessment of durability materials exposed to atmosphere agents by testing in simulated environment,» *Architecture Civile Enrining and environment (ACEE)*, vol. 6, p. 17–25, 2013.
- [16] J. Bochen, S. Gil e J. Szwabowski, «Influence of ageing process on porosity changes of the external plasters.,» *Cem. Concr. Compos*, vol. 27, p. 769–775, 2005.
- [17] J. Bochen e S. Gil, «Study on the microstructure of thin-layer facade plasters of thermal insulating system during artificial weathering,» *Construction and Building Materials*, vol. 23, p. 2559–2566., 2009.
- [18] J. Bochen, «Properties of pore structure of thin-layer external plasters under ageing in simulated environment,» *Construction and Building Materials*, vol. 23, p. 2958–2963, 2009.
- [19] R. Norvaišienė, A. Burlingis e V. Stankevičius, «Durability Tests on Painted Facade Rendering by Accelerated Ageing,» *Materials Science*, vol. 16, pp. 80-85, 2010.
- [20] T. Kvande, N. Bakken, E. Bergheim e J. V. Thue, «Durability of ETICS with Rendering in Norway - Experimental and Field Investigations,» *Department of Civil and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway*, 2018.
- [21] K. R. Lisø e T. Kvande, «Climate adaption of buildings,» in *Sintef*, Oslo, Norvegia, 2007.
- [22] K. R. Lisø, «Building envelope performance assessments in harsh climates: Methods forgeographically dependent design,» Ph.D. thesis, Department of Civil and Transport Engineering, Norwegian University of Science and Technology, 2006.
- [23] B. Jelle, «Accelerated climate ageing of building materials, components and structures in the laboratory,» *Materials science*, vol. 47, p. 6475–6496, 2012.
- [24] B. Jelle, «The Role of Accelerated Climate Ageing of Building Materials, Components and Structures in the Laboratory,» in *7th Nordic conference on Construction Economics and Organisation*, Trondheim, Norway, June, 2013.
- [25] K. R. Lisø, L. Myhre, T. Kvande, J. V. Thue e V. Nordvik, «A Norwegian perspective on buildings and climate change,» *Building Research & Information*, vol. 35, pp. 437-449, 2007.
- [26] N. Espoo, «Building materials and components in vertical position: exposure to accelerated climatic strains,» *Finland*, 2000.
- [27] I. Samuelson e Jansson, «ETICS on Framework Walls,» *Technical Research Institute of Sweden, Borås, Sweden*, 2009.

- [28] J. L. Parracha, G. Borsoi, I. Flores-Colen, L. Nunes e R. Veiga, «Impact of natural and artificial ageing on the properties of multilayer external wall thermal insulation systems,» *Construction and Building Materials*, vol. 317, 2022.
- [29] J. L. Parracha, G. Borsoi, R. Veigaalnés, I. Flores-Colen, L. Nunes, A. R. Garcia, L. M. Ilharco, A. Dionísio e P. Faria, «Effects of hygrothermal, UV and SO₂ accelerated ageing on the durability of ETICS in urban environments,» *Building and Environment*, vol. 204.
- [30] B. Daniotti, S. L. Spagnolo e R. Paolini, «Climatic Data Analysis to Define Accelerated Ageing for Reference Service Life Evaluation,» in *11th International conference on Durability of Building Materials and Components*, Istanbul, 2008.
- [31] B. Daniotti e P. Iacono, «Evaluating the Service Life of External Walls: a Comparison,» in *10DBMC International Conference On Durability of Building Materials and Components*, Lyon, France, 2005.
- [32] B. Daniotti e P. Iacono, «Evaluating the Service Life of External Walls: A Comparison between Long-Term and Short-Term Exposure,» in *Durability of Building Materials and Components*, , Lyon, France, 2005.
- [33] B. Daniotti, . R. Paolini e F. Re Cecconi, «Effects of Ageing and Moisture on Thermal Performance of ETICS Cladding,» in *Durability of Building Materials and Components; Building Pathology and Rehabilitation;*, Berlin, Freitas, Vasco Peixoto de and Delgado, J.M.P.Q., 2013, pp. 127-171.
- [34] R. Landolfi, A. Pino e M. Nicolella, «Comparative evaluations of sustainability, durability and resilience of external envelopes for environmentally efficient buildings,» in *Sbe19 Conference- Resilient Built Environment for Sustainable Mediterranean Countrie*, Milano, 2019.
- [35] R. Landolfi, «Valutazioni Life Cycle Assessment per l'isolamento a cappotto di pareti: confronto fra diversi materiali; L'impatto ambientale di diversi interventi di isolamento a cappotto: poliuretano, EPS, lana di roccia e sughero,» *Ingenio*, 2019.
- [36] W. Albrecht, «Change over Time in the thermal conductivity of ten-year-old PUR rigid foam boards with diffusion-open facings,» *Cell. Polym.*, p. 161–172, 2004.
- [37] L. Glicksman e J. Stewart, «The Measurement of the Morphology of Closed Cell Foams Which Control the Overall Thermal Conductivity,» in *Third Conference Insulation Materials: Testing and Applications*, Quebec City, QC, Canada, 1997.
- [38] A. Stefani, «Stabilità nel Tempo delle Prestazioni Isolanti,» *Poliuretano, Associazione Nazionale Poliuretano Espanso rigido (ANPE): Vicenza, Italy.*, p. pp. 8–10, Luglio 2003.
- [39] G. Gričiute, R. Bliudzius e R. Norvaišienė , «The Durability Test Method for External Thermal Insulation Composite System Used in Cold and Wet Climate Countries,» *Kaunas University of Technology*, 2013.
- [40] R. Norvaišienė, A. Burlingis e V. Stankevičius, «Durability Tests on Painted Facade Rendering by Accelerated Ageing.»

Riferimenti normativi

- ♦ *UNI/TR 11715:2008* – Isolanti termici per l’edilizia - Progettazione e messa in opera dei sistemi isolanti termici per l’esterno (ETICS);
- ♦ *UNI 8290-1:1981* – Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia.
- ♦ *ETAG 004:2013* – Linee guida tecniche europee per Sistemi Isolanti a Cappotto per esterni con intonaco;
- ♦ *EAD 040083-00-0404:2020* – External thermal insulation composite systems (ETICS) with renderings;
- ♦ *ISO 15686 - Buildings and constructed assets, Service life planning*
- ♦ *UNI 11156* - Valutazione della durabilità dei componenti edilizi
- ♦ *UNI EN ISO 4628:2016* – Pitture e vernici - Pitture e vernici - Valutazione del degrado dei rivestimenti;
- ♦ *UNI EN 1609:2003* – “Isolanti termici per edilizia - Determinazione dell’assorbimento d’acqua dimensionale a breve termine: prova attraverso immersione parziale”;
- ♦ *UNI ISO 7892:1990* – Edilizia. Prove di resistenza agli urti. Corpi per urti e metodi di prova;
- ♦ *UNI EN 1607:2013* – Isolanti termici per edilizia; Determinazione della resistenza a trazione perpendicolare alle facce;
- ♦ *UNI EN 826:2013* – Isolanti termici per edilizia; Determinazione del comportamento a compressione;
- ♦ *UNI EN 12667:2002* – Prestazione termica dei materiali e dei prodotti per edilizia; Determinazione della resistenza termica con il metodo della piastra calda con anello di guardia e con il metodo del termoflussimetro - Prodotti con alta e media resistenza termica;
- ♦ *ISO 8301:1991* - Thermal insulation — Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Heat flow meter apparatus;
- ♦ *UNI EN ISO 13786:2018* – Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche, Metodi di calcolo;
- ♦ *UNI 8457:2010* – Prodotti combustibili suscettibili di essere investiti dalla fiamma su una sola faccia; Reazione al fuoco mediante applicazione di una piccola fiamma;
- ♦ *UNI EN 13165 - Isolanti termici per edilizia - Prodotti di poliuretano espanso rigido (PU) ottenuti in fabbrica – Specificazione;*
- ♦ *UNI EN 12667* - Prestazione termica dei materiali e dei prodotti per edilizia - Determinazione della resistenza termica con il metodo della piastra calda con anello di guardia e con il metodo del termoflussimetro - Prodotti con alta e media resistenza termica
- ♦ *EN 13172: 2012* – Isolanti termici - Valutazione della conformità;
- ♦ *EN 823* – *Isolanti termici per edilizia - Determinazione dello spessore;*