

Politecnico di Torino

Tesi di Laurea Magistrale

Architettura per il Progetto Sostenibile

Anno Accademico 2018-2019

Prof. Roberto Giordano & Prof.ssa Elena Montacchini

La Parete Vegetata VS La Parete Ventilata

Confronto Tra Due Tecnologie Di Facciata

Tesista: Stefano Montaldo



GRAZIE

Se questo lavoro è riuscito dopo molti anni a vedere finalmente la sua conclusione è soprattutto grazie alla pazienza di chi lo ha seguito dal punto di vista tecnico e dei contenuti ed alla perseveranza di due persone speciali che hanno aiutato l'autore a conciliare, seppur con molte difficoltà, lo studio ed il lavoro.

SOMMARIO

<i>Sommario</i>	5
PARTE 1 - Introduzione	9
1 Caratteristiche delle chiusure verticali	12
1.1 Requisiti di progettazione.....	12
1.1.1 Requisiti di esercizio.....	13
1.1.2 Requisiti di produzione e montaggio	14
1.1.3 Requisiti di manutenzione.....	14
1.2 Le prestazioni di riferimento	15
2 La parete ventilata	16
2.1 Origini e sviluppo della tecnologia	16
2.2 Classificazioni delle tipologie di parete ventilata	16
2.3 Stratificazione funzionale	17
2.3.1 Strato di regolarizzazione.....	18
2.3.2 Strato resistente	19
2.3.3 Strato isolante.....	19
2.3.4 Camera di ventilazione.....	20
2.3.5 Sistema della sottostruttura.....	21
2.3.6 Strato di rivestimento	22
2.4 Vantaggi e debolezze	23
3 La parete vegetata	27
3.1 Origini e sviluppo della tecnologia	27
3.2 Classificazione delle tipologie di parete vegetata	29

3.2.1 BYBOX® e REVIWALL®	30
3.2.2 Ibridazione tecnologica e componenti del sistema	32
3.2.3 Specie vegetali testate	38
PARTE 2 – Introduzione	40
4 Massa superficiale	42
4.1 Peso di una parete ventilata.....	43
4.1.1 Parete ventilata leggera	43
4.1.2 Parete ventilata di peso medio	45
4.1.3 Parete ventilata pesante	46
4.2 Peso del sistema parete GRE_EN_S.....	47
4.3 Conclusioni sul raffronto	49
5 Spessore	50
5.1 Lo spessore della parete ventilata	51
5.1.1 Parete ventilata sottile	51
5.1.2 Parete ventilata di medio spessore	54
5.1.3 Parete ventilata spessa	55
5.2 Spessore del sistema GRE_EN_S.....	56
5.3 Conclusioni sul raffronto	57
6 Comportamento termico invernale	59
6.1 Gli scambi di massa e di energia	59
6.2 Quadro normativo	63
6.2.1 Zone climatiche	63
6.2.2 Trasmittanza termica limite	64
6.2.3 Condensazioni superficiali ed interstiziali.....	64
6.2.4 Prestazione energetica per la climatizzazione invernale.....	65
6.2.5 Certificazioni energetiche	65

6.3	Comportamento termico invernale di parete ventilata.....	66	8.5	Comportamento acustico della parete ventilata	90
6.3.1	Parete ventilata a norma del D.Lgs. 311/2006.....	67	8.6	Comportamento acustico del sistema GRE_EN_S	93
6.3.2	Parete ventilata a norma del D.M. 26/01/10	68	8.6.1	Coefficiente di fonossorbimento.....	94
6.4	Comportamento termico invernale GRE_EN_S.....	69	8.6.2	Coefficiente di isolamento acustico del sistema GRE_EN_S..	98
6.5	Conclusioni del raffronto	71	8.7	Conclusioni al raffronto	99
7	Comportamento termico estivo.....	73	9	Posa in opera.....	100
7.1	L'effetto Isola di Calore (Heat-Island Effect).....	74	9.1	Posa in opera "a umido"	101
7.2	Quadro normativo.....	75	9.2	Posa in opera "a secco"	103
7.3	Comportamento termico estivo di parete ventilata	76	9.3	Posa in opera della parete ventilata	104
7.3.1	Parete ventilata a norma del D.M. 26/01/01	76	9.3.1	Posa dello strato resistente.....	104
7.4	Comportamento termico estivo GRE_EN_S	78	9.3.2	Posa dello strato di regolarizzazione	106
7.5	Conclusioni del raffronto	81	9.3.3	Posa della camera di ventilazione	107
8	Comportamento acustico	83	9.3.4	Posa della struttura di aggancio del rivestimento esterno ..	108
8.1	Il suono	83	9.3.5	Posa dello strato isolante	111
8.1.1	Il mezzo di propagazione	84	9.3.6	Posa del rivestimento esterno.....	112
8.1.2	Il ricettore sonoro	84	9.4	Posa in opera del sistema GRE_EN_S	113
8.1.3	La sorgente sonora.....	85	9.4.1	Posa del telaio portante	113
8.2	Il rumore	85	9.4.2	Posa dello strato isolante	114
8.2.1	Rumori aerei	86	9.4.3	Posa della finitura interna	114
8.2.2	Rumori di origine impattiva.....	87	9.4.4	Posa della lastra in cemento	114
8.2.3	Rumori del sistema impiantistico.....	87	9.4.5	Posa in opera del telaio di ancoraggio dei moduli vegetati..	114
8.3	Parametri del comportamento acustico di un sistema di chiusura verticale.....	87	9.4.6	Posa dei moduli vegetati	114
8.3.1	Assorbimento acustico.....	88	9.5	Conclusioni del raffronto	115
8.3.2	Isolamento acustico	88	10	Fine vita.....	116
8.4	Quadro normativo.....	89	10.1	Quadro normativo	118
			10.2	Requisiti di riciclabilità	119
			10.2.1	Prodotti riciclati.....	119

10.2.2	Disassemblaggio.....	119	11.7	Conclusioni del raffronto.....	145
10.2.3	Prodotti con elevato potenziale di riciclabilità.....	120	12	Assorbimento inquinanti.....	147
10.3	Indicatori di riciclabilità.....	120	12.1	Elementi inquinanti e polveri sottili.....	147
10.3.1	Indicatore di disassemblabilità.....	121	12.1.1	Diffusione del particolato.....	148
10.3.2	Indicatore di riciclabilità.....	121	12.1.2	Metodo di identificazione.....	149
10.4	Fine vita di una parete ventilata.....	122	12.1.3	Effetti sulla salute.....	149
10.4.1	Fine vita di parete ventilata (primo esempio).....	122	12.1.4	Effetti sull'ambiente.....	151
10.4.2	Fine vita di parete ventilata (secondo esempio).....	124	12.2	Quadro normativo.....	151
10.5	Fine vita del sistema GRE_EN_S.....	125	12.3	Processo fotocatalitico.....	152
10.5.1	Utilizzo di prodotti riciclati.....	125	12.3.1	La fotocatalisi.....	154
10.5.2	Disassemblabilità del sistema GRE_EN_S.....	126	12.3.2	Il biossido di Titanio, TiO ₂	155
10.5.3	Riciclabilità del sistema GRE_EN_S.....	126	12.3.3	Purificazione dell'aria.....	156
10.6	Conclusioni del raffronto.....	127	12.4	Assorbimento inquinanti di una parete ventilata.....	157
11	Impatto ambientale.....	128	12.4.1	Materiali assorbenti non fotocatalitici.....	157
11.1	Effetto serra.....	128	12.4.2	Materiali fotocatalitici.....	158
11.2	Quadro normativo.....	130	12.4.3	La parete ventilata fotocatalitica.....	159
11.3	Contenuto di energia primaria.....	131	12.5	Assorbimento inquinanti del sistema GRE_EN_S.....	160
11.3.1	Indicatore per la valutazione del contenuto di energia primaria di un prodotto da costruzione.....	132	12.5.1	Capacità dei vegetali di assorbire inquinanti.....	160
11.4	Contenuto di CO ₂ ed altri gas ad effetto serra.....	132	12.5.2	Capacità di assorbimento inquinanti di un VGS.....	162
11.4.1	Requisiti per la valutazione del contenuto di CO ₂	134	12.5.3	Capacità di assorbimento del sistema GRE_EN_S.....	164
11.4.2	Indicatori per la valutazione del contenuto di CO ₂	136	12.6	Conclusioni del raffronto.....	168
11.5	Valutazione di impatto ambientale di pareti ventilate.....	137	13	Durata.....	171
11.5.1	Parete ventilata ad alto impatto ambientale.....	138	13.1	Degradamento ed obsolescenza.....	172
11.5.2	Parete ventilata a medio impatto ambientale.....	139	13.2	Manutenzione.....	173
11.5.3	Parete ventilata a basso impatto ambientale.....	140	13.2.1	Quadro normativo.....	174
11.6	Impatto ambientale del sistema GRE_EN_S.....	142	13.3	Affidabilità.....	175
			13.3.1	Concetto di guasto.....	175

13.3.2	Tasso di guasto.....	176
13.3.3	Dependability.....	177
13.4	Manutenibilità.....	178
13.5	Parametri di durata delle chiusure verticali.....	179
13.6	Durata di una parete ventilata	181
13.7	Durata del sistema GRE_EN_S.....	183
13.8	Conclusioni del raffronto	186
	<i>Conclusioni finali.....</i>	188
	<i>Bibliografia</i>	195

PARTE 1 - INTRODUZIONE

Nel 1997 la conferenza ONU sui cambiamenti climatici darà vita al Protocollo di Kyoto, il trattato che ha dato l'incipit ad una vera e propria rivoluzione nel modo di pensare e di attuare dell'uomo.

Il protocollo sarà firmato in un primo momento da 180 paesi ma entrerà in vigore solo nel 2005. Da quel momento in avanti, come detto, la storia cambia definitivamente e con essa, il modo di fare architettura.

Il primo obiettivo a delinearsi chiaramente è quello del risparmio energetico che dà vita agli studi ed alla progettazione di involucri a mano a mano più efficienti nel permettere la diminuzione dei consumi da parte degli impianti di climatizzazione, la cosiddetta casa passiva.

In parallelo si lavora anche all'ottimizzazione del consumo elettrico, attraverso lo sviluppo di elettrodomestici sempre più efficienti, del consumo di acqua e della produzione di rifiuti.

La produzione di energia da sorgenti rinnovabili diventa la priorità per il settore e cominciano i grandi investimenti nei campi del fotovoltaico, dell'eolico, dell'idroelettrico e del termosolare.

Diminuzione di consumi ed emissioni, produzione di energia pulita, riciclaggio dei rifiuti, depurazione dell'aria e dell'acqua, la nuova sensibilità nei confronti dell'ambiente dà il largo a nuove necessità e pertanto a nuovi mercati.

Nel 2018 ogni nuovo prodotto rilasciato deve passare attraverso quello che si è chiamato un Life Cycle Assessment (LCA) che permetta stimare l'impatto ambientale del prodotto durante il suo ciclo di vita, dalla produzione allo smaltimento.

Questo discorso vale anche per l'architettura però in questo ambito il prodotto è l'edificio o il complesso edificato ed il suo impatto ambientale deve essere minimo dal momento della costruzione al momento della demolizione e smaltimento dei suoi componenti.

Come accennato, questo nuovo quadro generale ha lanciato lo sviluppo di una notevole varietà di nuove soluzioni di disegno (cosiddette appunto "passive") e nuove tecnologie volte a diminuire l'impatto ambientale del costruito. Ed ecco dunque che ogni singolo elemento di quel sistema complesso che chiamiamo edificio inizia ad essere studiato per svilupparsi in questa direzione, dalla stessa forma del costruito all'interno del contesto urbanistico, alle lampadine con tecnologia LED.

Ed è perciò all'interno di questo panorama di sviluppo "ambientale" che si colloca il presente elaborato.

Nel 2010 il Dipartimento di Architettura e Design (ex Dipartimento Scienze e Tecniche per i Processi di Insediamento del Politecnico di Torino) lancia il progetto "GRE_EN_S – GREen_ENvelope_System" per la realizzazione di un "Sistema Parete Verde riciclato e ad alto contenuto tecnologico da utilizzare come elemento di involucro in architettura" (Giordano, 2010).

L'obiettivo del progetto è sviluppare un sistema di parete vegetata costituito in prevalenza da elementi riciclati o riciclabili, non solo a basso impatto ambientale ma bensì in grado di contribuire in positivo all'ambiente, neutralizzando parte dell'impatto di altre attività antropiche. Per raggiungere il proprio obiettivo, il DAD lancia delle collaborazioni con un alcuni partner selezionati che parteciperanno con la propria conoscenza ed alcune delle proprie risorse allo sviluppo dei vari workstream del progetto.

Alcuni di questi partner saranno CEIT di Ruscalla Bruno, il Dipartimento Energia (ex Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino, DENERG), AGRO.SELVI.TER - Dipartimento di Agronomia, Selvicoltura e Gestione del Territorio dell'Università degli Studi di Torino, 13 RICREA di Cristina Merlo e SAFI-TECH di Giorgio Tasca.

Il percorso di sviluppo del nuovo sistema parete si articola in varie fasi, iniziando dallo studio e dalla definizione dei prodotti e componenti che andranno a costituire il sistema (componenti tecnologici, agronomici, materiali), includendo un'analisi delle prestazioni effettive delle materie prime seconde che si intende utilizzare.

Una volta completato il primo workstream, il passo successivo è stato la progettazione esecutiva e la realizzazione dei primi prototipi per verificare alcuni degli indicatori prestazionali. In seguito si è curata la definizione degli indicatori utili alla verifica prestazionale del prototipo del sistema parete GRE_EN_S, nonché lo sviluppo di un protocollo di raccolta dati e di analisi per il monitoraggio delle sue prestazioni termiche ed ambientali.

La quarta fase del progetto è stata la la realizzazione di un modulo insediativo "campione" al fine di monitorare le prestazioni termiche e ambientali e valutare l'efficacia del sistema parete GRE_EN_S. Suddiviso in due parti indipendenti, una sezione del campione è stata realizzata con il sistema parete GRE_EN_S, mentre l'altra è stata costruita per mezzo di tipiche tecnologie di rivestimento leggere.

La valutazione delle prestazioni monitorate sul prototipo e sul modulo insediativo "campione" e della fattibilità tecnica ed economica della filiera di recupero dei prodotti e dei componenti tecnologici del sistema parete hanno successivamente permesso di studiare gli

“aspetti chiave” relativi alla progettazione e alla realizzazione del sistema GRE_EN_S.

In parallelo agli studi di sviluppo del nuovo sistema, il gruppo di ricerca ha deciso nel 2014 di lanciare uno studio di comparazione tra le prestazioni sinora monitorate per il nuovo sistema e quelle dei sistemi classici già presenti sul mercato e largamente diffusi nel costruito attuale. Per permettere una comparazione adeguata, si è deciso che il termine di paragone dovessero essere i sistemi di parete ventilata, in quanto tra le soluzioni “classiche” rappresentano quella che per caratteristiche e funzionamento maggiormente si avvicina al sistema GRE_EN_S.

Con l’obiettivo dunque di determinare in quale posizione si colloca il sistema GRE_EN_S in confronto alle più comuni soluzioni di parete ventilata, si è lanciato questo studio.

Il presente documento si articola in due sezioni principali. Nella prima parte si presentano in primo luogo i requisiti generali che per legge devono essere rispettati dai sistemi di parete ed in seguito le due soluzioni di sistema di parete esterna: la parete ventilata e la parete vegetata, rappresentata in questo contesto dalla soluzione proposta dal sistema GRE_EN_S. Nella seconda sezione di questa relazione si definiscono le dieci caratteristiche principali attraverso le quali si realizza la comparazione obiettivo della trattazione, presentando per ciascuna le prestazioni di entrambe le soluzioni e terminando con raffronto conclusivo. L’ultimo capitolo della trattazione presenta le conclusioni generali sul raffronto operato in base alle dieci caratteristiche analizzate.

1 CARATTERISTICHE DELLE CHIUSURE VERTICALI

1.1 REQUISITI DI PROGETTAZIONE

Per facilitare la progettazione, la produzione e la messa in opera di tutte le componenti di un sistema di parete verticale, la norma UNI 7959 definisce una serie di requisiti, ovvero delle condizioni qualitative che devono essere rispettate nel corso dei suddetti processi. Queste richieste sono dunque rivolte a tutti i sistemi o singoli componenti che vengono impiegati nella produzione del sistema parete e devono essere rispettate al fine di rispondere alle esigenze degli utenti finali. È importante notare come queste richieste siano di tipo funzionale e dunque qualitativo.

A fronte di questi requisiti, ogni singolo prodotto presenta delle caratteristiche prestazionali che definiscono la risposta quantitativa che lo differenzia dagli altri presenti sul mercato. In questo modo, ogni prodotto, a seconda della morfologia, dei materiali utilizzati e delle altre variabili che lo caratterizzano, risponde in maniera univoca alle richieste qualitative avanzate dalla normativa, fornendo un'indicazione precisa della sua affidabilità nel soddisfare le esigenze degli utenti. Questo sistema permette così di confrontare le varie opzioni in maniera semplificata, al fine di raggiungere sempre il miglior risultato possibile.

All'interno della normativa sulle chiusure verticali, vi è poi una serie di prestazioni specifiche che devono essere soddisfatte in particolare dai sistemi di facciata. Poiché fanno riferimento sempre alle esigenze dell'utente, i requisiti si differenziano anche in base a queste ultime. A loro volta, le esigenze variano durante le varie fasi del ciclo di vita

dell'elemento: la produzione, il montaggio, l'esercizio, la gestione e la manutenzione.

1.1.1 Requisiti di esercizio

- **Stabilità** – Ogni sistema di facciata deve essere in grado di sopportare le sollecitazioni statiche e dinamiche che agiscono su di esso senza subire deformazioni tali da comprometterne la stabilità e la sicurezza nel tempo.
- **Resistenza al vento** – La facciata deve essere in grado di sopportare le sollecitazioni dovute a situazioni di pressione e depressione d'aria causate dal vento, senza subire sfondamenti o deformazioni tali da comprometterne la stabilità e sicurezza nel tempo.
- **Resistenza agli urti** – Il sistema deve essere in grado di sopportare le sollecitazioni derivanti da urti di vario genere, previsti e definiti a seconda della localizzazione della facciata.
- **Resistenza e reazione al fuoco e contenimento della tossicità dei fumi** – Ogni chiusura verticale deve impedire la propagazione degli incendi. Particolare attenzione a questo frangente deve essere posta nella progettazione di sistemi di facciata ventilata poiché l'effetto camino può essere mezzo di propagazione delle fiamme. I materiali componenti il sistema devono possedere caratteristiche definite di reazione al fuoco e non dare origine a prodotti di combustione che siano dannosi per la salute umana.
- **Sicurezza alle intrusioni** – Ogni chiusura verticale esterna deve obbligatoriamente essere resistente a possibili tentativi di intrusione dall'esterno.
- **Sicurezza dai fenomeni elettrici o magnetici** – I sistemi di facciata devono essere in grado di controllare gli effetti dei fenomeni elettromagnetici, garantendo lo scarico diretto a terra delle correnti elettriche ed impedendo il verificarsi di scariche laterali che potrebbero essere causa di incendi.
- **Permeabilità all'aria** – I sistemi di facciata devono garantire un certo grado di ventilazione riducendo contemporaneamente al minimo la dispersione di calore verso l'ambiente esterno.
- **Tenuta all'acqua** – Le caratteristiche del sistema di facciata devono garantire che l'acqua proveniente dall'esterno non sia in grado di penetrarlo in maniera tale da comprometterne l'efficienza.
- **Controllo della condensazione interstiziale** – La stratigrafia del sistema di facciata deve essere studiata in maniera tale da impedire il verificarsi di fenomeni di condensazione del vapore acqueo all'interno della stessa, con particolare attenzione al salto termico in presenza dello strato isolante.
- **Isolamento termico** – I sistemi di facciata devono opporsi alla dispersione di calore dagli ambienti interni a quello esterno, in modo da garantire il comfort interno riducendo i costi energetici.
- **Emissione di odori da parte dei materiali** – Il sistema di facciata deve essere costituito da elementi che non siano in grado di emettere odori dannosi o sgradevoli per gli utenti.¹
- **Non emissioni di gas, polveri o radiazioni nocive** – Le chiusure verticali devono essere composte da materiali che non siano in

¹ Questo requisito interessa soprattutto i materiali di finitura interna ed esterna poiché si trovano a diretto contatto con gli utenti.

grado di emettere gas, polveri o radiazioni nocive alla salute degli utenti.

- **Isolamento dai rumori aerei esterni** – I sistemi di facciata devono poter isolare gli ambienti interni dai rumori provenienti dall'esterno per garantire il comfort acustico.
- **Isolamento dai rumori interni** – Capacità della facciata di assorbire la propagazione dei rumori provenienti dagli ambienti interni attigui a quello in esame.
- **Comportamento acustico nei confronti degli agenti atmosferici** – Capacità del sistema di facciata di prevenire l'intrusione di rumori provenienti dall'esterno dovuti a pioggia, grandine o vento (quali per esempio urti, sibili, vibrazioni o scricchiolii).
- **Planarità** – I sistemi di facciata devono possedere un certo grado di planarità limitando al minimo eventuali difetti locali o di insieme.
- **Regolarità delle finiture** - Non devono essere presenti difetti superficiali particolarmente evidenti o rilevanti (quali ad esempio macchie, gobbe, fessure, ecc...).
- **Omogeneità di colore, brillantezza e insudiciamento** – Tutte le aree della stessa superficie di un singolo sistema di facciata devono presentare colore, grado di brillantezza e attitudine all'insudiciamento il più possibile omogenei.
- **Benessere tattile** – I sistemi di chiusura verticale devono presentarsi gradevoli al tatto per non rendere sgradevole l'interazione degli utenti.
- **Attrezzabilità** – I sistemi di facciata devono essere in grado di sopportare carichi appesi, sia all'interno che all'esterno (mensole, tende, insegne, apparecchi di illuminazione, ecc...).

- **Mantenimento delle prestazioni al cambiamento delle condizioni ambientali esterne** – Tutti i sistemi di facciata devono sempre essere in grado di garantire il mantenimento delle proprie prestazioni nonostante i cambiamenti climatici che possano verificarsi, sopportandone le conseguenti sollecitazioni (si escludono i fenomeni naturali straordinari, classificati come calamità).

1.1.2 Requisiti di produzione e montaggio

Per rendere più efficienti le fasi di produzione e di montaggio dei componenti che andranno a costituire i sistemi di facciata, vengono stabiliti alcuni requisiti che questi dovrebbero possedere. In questo caso non si parla più di obbligo normativo ma piuttosto di una serie di consigli atti a rendere più efficienti le suddette fasi operative.

- **Massa** – Componenti dalla massa contenuta permettono di facilitare le fasi di trasporto e posa in opera.
- **Ingombro** – Componenti dalle dimensioni contenute facilitano il trasporto e la posa in opera da parte degli operai.
- **Immagazzinamento** – La facilità di immagazzinamento permette di ridurre lo spazio necessario allo stoccaggio dei materiali, diminuendo i costi di produzione e trasporto.
- **Montaggio** – La facilità di montaggio permette l'utilizzo di manodopera non qualificata ed un minore dispendio di tempo nella posa in opera.

1.1.3 Requisiti di manutenzione

Anche per quanto riguarda la manutenzione, non si fa obbligo di garantire la riparabilità dei componenti o dei sistemi ma si vuole sottolineare come rispettando questi requisiti si possano ottenere

numerosi vantaggi, sia da un punto di vista economico, che di prestazioni in genere.

- **Pulibilità** – Un elevato grado di pulibilità permette di mantenere facilmente le chiusure verticali in stato di decoro anche per periodi prolungati.
- **Riparabilità** – La riparabilità è requisito essenziale per garantire il mantenimento nel tempo delle prestazioni dei sistemi di facciata.

Nella normativa ognuno dei requisiti citati è accompagnato, quando necessario, da una descrizione che chiarisce a che cosa faccia riferimento la richiesta in oggetto; in seguito, vengono fornite le specifiche di prestazione che delineano i risultati pratici che si devono raggiungere; vengono prescritte le prove di laboratorio che devono essere eseguite in fase di progettazione e che il prodotto deve necessariamente superare; successivamente vengono indicate le verifiche di progetto che vanno applicate prevedendo un utilizzo in condizioni definite per stimare in proiezione la verifica del requisito ed infine sono proposte delle verifiche in opera, cui spetterà il compito di confermare che le richieste siano state effettivamente soddisfatte. A seconda del tipo di requisito alcuni di questi parametri possono non essere elencati poiché ritenuti non necessari od addirittura impossibili da definire.

1.2 LE PRESTAZIONI DI RIFERIMENTO

Per essere certo di rispettare i requisiti imposti dalla legge e per evidenziare la convenienza nell'adozione della propria soluzione progettuale, il progettista fa riferimento ad alcune caratteristiche proprie dell'elemento o sistema che sta progettando, ossia come accennato in precedenza, deve tenere sotto controllo i dati

quantitativi del proprio prodotto, in modo tale da garantirne i necessari standard qualitativi. Le prestazioni del sistema di facciata costituiscono dunque i dati quantitativi a cui fare riferimento.

Per poter analizzare correttamente un sistema di facciata, dunque, anche in questa sede si farà riferimento a delle caratteristiche comuni a tutti i tipi di parete verticale che possono darci delle indicazioni dirette o indirette sulla qualità della nostra soluzione progettuale e contemporaneamente, ci permettono di comparare facilmente tra loro le prestazioni offerte da soluzioni differenti.

Le caratteristiche che abbiamo deciso di prendere in considerazione sono:

- Il peso;
- Lo spessore;
- La posa in opera;
- Il comportamento termico invernale;
- Il comportamento termico estivo;
- La durata;
- Fine vita;
- L'impatto ambientale;
- Assorbimento inquinanti;
- Comportamento acustico;
- Altri valori aggiunti;
- Prezzo.

2 LA PARETE VENTILATA

2.1 ORIGINI E SVILUPPO DELLA TECNOLOGIA

Nonostante solo nella seconda metà del novecento il dibattito tecnico che stava cominciando ad affrontare seriamente le problematiche ambientali cominciò ad esaminare formalmente la soluzione della parete a ventilazione naturale, conferendole la nomenclatura che utilizziamo ancora oggi, sappiamo come questa fosse una tecnologia già conosciuta e presente in svariate forme in diverse parti del mondo.

Si tratta infatti di una tecnica costruttiva ereditata dall'architettura spontanea, a cui non sono attribuibili un progettista od un autore in particolare. Si costituiva fondamentalmente di un rivestimento esterno, generalmente composto da materiali di origine naturale, agganciato meccanicamente ad una struttura di supporto, normalmente in materiale ligneo, a sua volta fissata meccanicamente alla parete esterna.

In origine questa era una tecnica che veniva utilizzata principalmente per proteggere la parete esterna dall'azione degli agenti atmosferici e dalla eccessiva radiazione solare. Al di là delle considerazioni sul comfort termico, dunque, la questione era proteggere la muratura per allungarne la vita. Era già stato compreso infatti come l'intercapedine d'aria agisse da filtro naturale contro le infiltrazioni d'acqua e permettesse al vapore acqueo di sfogare all'esterno, invece di condensare all'interno della parete.

A partire dagli anni '70, '80 il sistema di parete ventilata comincia ad essere studiato metodicamente e varie soluzioni tecnologiche vengono sviluppate sfruttando le nuove possibilità in termini di materiali e sistemi costruttivi. Le strutture di supporto in legno vengono sostituite

da strutture in metallo, di acciaio o in alluminio, più leggere, meno ingombranti e più performanti a livello statico. All'intercapedine d'aria viene affiancato uno strato di materiale isolante, collocato in aderenza alla muratura. Infine, viene implementata una moltitudine di nuove soluzioni tecnologiche per ciò che concerne il rivestimento esterno: sistemi modulari di pannellature di vario genere e di svariati materiali vengono proposti sul mercato per garantire contemporaneamente la migliore resa energetica ed estetica.

2.2 CLASSIFICAZIONI DELLE TIPOLOGIE DI PARETE VENTILATA

Esistono numerose classificazioni del sistema di parete ventilata, fondamentalmente riferite alle caratteristiche tecniche a cui di volta in volta si vuole far riferimento. Incontreremo dunque classificazioni in funzione di:

- ❖ Tecnica di montaggio:
 - Sistema puntuale;
 - Sistema strutturale;
- ❖ Tipo di ventilazione:
 - Fughe aperte;
 - Fughe chiuse;
 - Naturale;
 - Forzata;
- ❖ Peso, spessore, ecc.
- ❖ Stratificazione funzionale.

Mentre la tecnica di montaggio e le singole caratteristiche tecniche come peso, spessore ecc. saranno oggetto di analisi nei prossimi paragrafi, il tipo di ventilazione è relativamente di poco interesse ai fini della presente trattazione e dunque non verrà trattato.

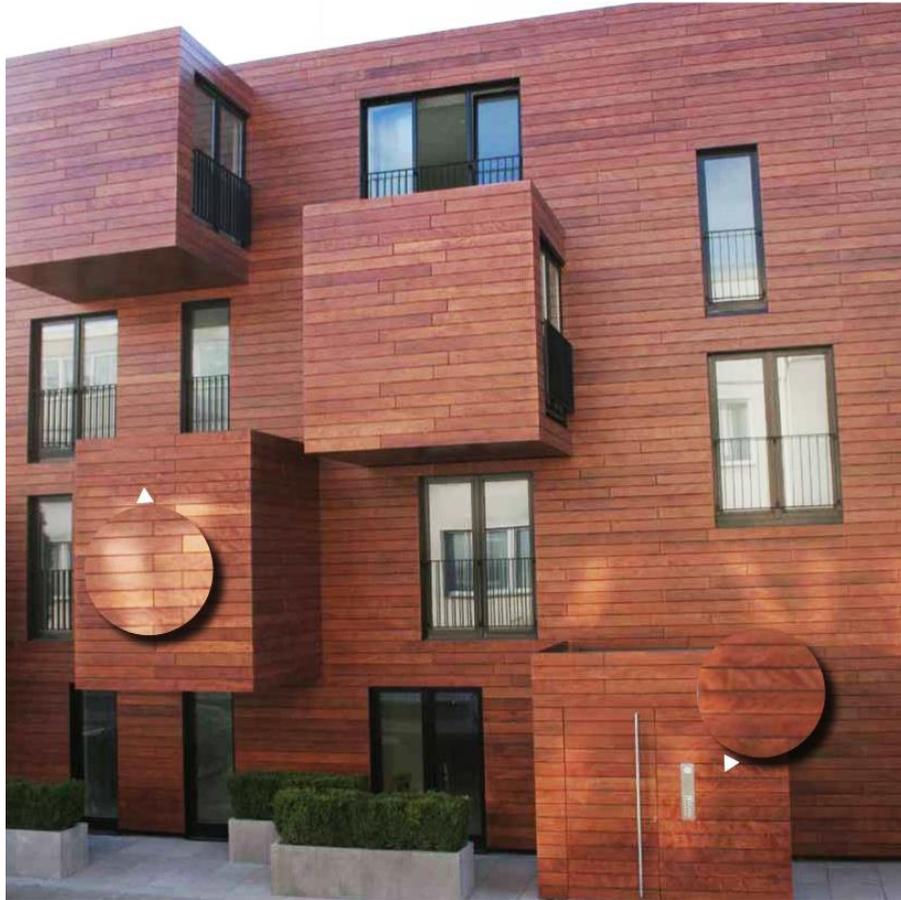


Figura 1 – Esempio di parete ventilata con rivestimento in legno.

L'aspetto su cui invece andremo concentrandoci in questo paragrafo sarà quello dell'organizzazione della stratificazione da un punto di vista funzionale che ci permetterà di comprendere come si struttura un sistema di parete ventilata. Questo approccio sarà utile anche per comprendere per quale motivo tale sistema sia stato scelto come termine di paragone con il sistema GRE_EN_S.

2.3 STRATIFICAZIONE FUNZIONALE

Nel presentare il metodo di funzionamento del sistema di parete a ventilazione naturale, dobbiamo innanzitutto andare ad elencare e definire quali siano gli elementi che lo compongono, analizzandolo dunque strato per strato, in base alla funzione di ognuno di questi. Per questo motivo, parliamo di stratificazione funzionale.

Poiché diversi autori si sono già cimentati nel lavoro di classificazione che vogliamo intraprendere e dato che questo non rappresenta l'obiettivo di questa trattazione ma piuttosto un punto di partenza da cui proseguire il lavoro, riteniamo opportuno affidarci in questa fase al lavoro compiuto dall'architetto Frida Bazzocchi e dai suoi collaboratori, pubblicato nel 2002 in "Facciate Ventilata. Architettura, Prestazioni e Tecnologia." da Alinea Editrice.

Bazzocchi presenta dunque un diagramma riassuntivo che cataloga tutti gli strati componenti una parete ventilata in base al proprio funzionamento che riportiamo qui sotto:

- ❖ Strati resistenti:
 - Elemento resistente portante;
 - Elemento resistente portato;
 - Elemento di irrigidimento;
- ❖ Strati di collegamento:
 - Strato di collegamento;
 - Strato di regolarizzazione;
- ❖ Strati di tenuta:
 - Strato di barriera al vapore;
 - Strato di tenuta all'acqua;
 - Strato di tenuta all'aria;
- ❖ Strati di isolamento:

- Strato di isolamento termico;
- Strato di isolamento acustico;
- ❖ Strati di ventilazione:
 - Strato di ventilazione;
 - Strato di diffusione del vapore;
- ❖ Strati di rivestimento:
 - Strato di rivestimento interno;
 - Strato di rivestimento esterno;
- ❖ Strati di protezione al fuoco.

Tuttavia, questa schematizzazione è fin troppo dettagliata per il tipo di analisi che abbiamo intenzione di intraprendere in questa sede. Per questo motivo andremo ad attuare una serie di semplificazioni che ci permetteranno di trarre delle conclusioni di massima sul funzionamento del sistema costruttivo apportando alcune minime approssimazioni.

Dunque analizzeremo una stratigrafia semplificata del sistema, procedendo dallo strato più interno (strato di finitura rivolto verso l'ambiente interno di un'ipotetica struttura) in direzione di quello più esterno (lo strato a diretto contatto con gli agenti atmosferici), così composta:

- Strato di regolarizzazione;
- Strato resistente;
- Strato isolante;
- Camera di ventilazione;
- Sistema della sottostruttura;
- Strato di rivestimento esterno.

2.3.1 Strato di regolarizzazione

È il primo strato che incontriamo immediatamente al di sotto della finitura interna della parete ed è, nella maggior parte dei casi, composto da una miscela di intonaco che viene applicato sulla muratura, in modo da proteggerne la superficie e renderla uniforme per agevolare trattamenti di finitura superficiale successivi, come la pittura.

Questo strato viene realizzato mediamente con uno spessore variabile tra i 2 ed i 3 centimetri. Per questo motivo, nonostante sia oggi presente sul mercato una gran varietà di prodotti con caratteristiche tecniche molto differenti tra loro, la scelta del prodotto da utilizzare per la realizzazione di questo strato non è destinata ad influenzare pesantemente il comportamento del sistema parete.

La caratteristica tecnica cui riteniamo bisognerebbe porre più attenzione in fase di progettazione, al momento di operare una scelta su quale prodotto impiegare, è quella relativa alla resistenza alla diffusione del vapore acqueo: una scelta sbagliata in questo senso potrebbe causare la formazione di condensa all'interno del sistema, vanificando di fatto il suo impiego.

Bisogna sottolineare che potrebbe risultare necessaria, a seconda della tipologia di muratura che si andrà a realizzare per costituire il successivo strato resistente, l'applicazione di un secondo strato di regolarizzazione sulla superficie esterna dello stesso per agevolare la posa in opera del successivo strato isolante.

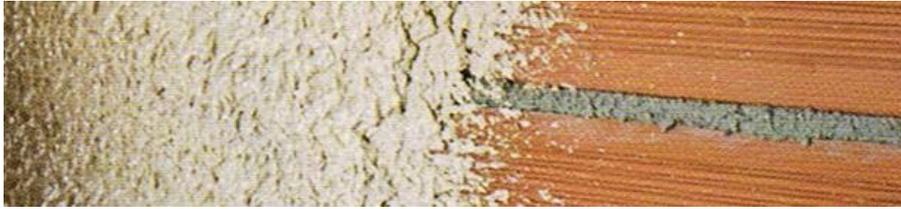


Figura 2 – Esempio di strato di regolarizzazione applicato su muratura in laterizio.

2.3.2 Strato resistente

Parlando di strato resistente facciamo riferimento al componente che si occupa di portare i carichi propri ed accidentali del sistema di parete ventilata, oltre ai carichi dovuti agli effetti di pressione e depressione del vento.

Distinguiamo due tipologie principali di strato resistente in base al suo comportamento statico: lo strato continuo e quello non continuo. Nel primo caso trattiamo di un sistema edificio costituito da murature portanti; nel secondo caso ci riferiamo invece ad un sistema dove la struttura dell'edificio è costituita da un telaio di travi e pilastri, dove le murature saranno esclusivamente di tamponamento.

In questa sede è nostro interesse considerare lo strato resistente in quanto muratura di tamponamento, appartenente pertanto ad un sistema non continuo. Circoscriviamo la nostra analisi a questa casistica per due fondamentali ragioni. La prima è che il sistema con cui andremo a confrontarci è progettato per essere una soluzione di tamponamento; la seconda è che questo tipo di sistema rappresenta la maggioranza delle soluzioni ad oggi in progettazione. Le strutture a muratura portante sono infatti oggi meno comuni.

Poiché consideriamo solo soluzioni di tamponamento, l'ancoraggio dei sostegni della sottostruttura della parete ventilata sarà delegato al telaio strutturale e non sarà dunque a carico dello strato resistente che

dovrà quindi occuparsi esclusivamente di accogliere l'ancoraggio dei fissaggi di ritenuta del rivestimento esterno.

Secondo la norma EN 1996 le murature possono essere realizzate esclusivamente utilizzando elementi che appartengano a sei categorie di seguito specificate:

- Elementi in laterizio;
- Elementi di silicato di calcio;
- Elementi di calcestruzzo vibrocompresso;
- Elementi di calcestruzzo aerato autoclavato;
- Elementi di pietra artificiale;
- Elementi di pietra naturale a massello.

La serie di norme EN 771 ne controlla sia la produzione che le specifiche.

2.3.3 Strato isolante

È lo strato coibente che si occupa prettamente di fornire l'isolamento termico (ed eventualmente acustico) necessario affinché il sistema possa garantire il comfort termico negli ambienti interni che delimita. Per questo motivo, la scelta del materiale da impiegare nella costituzione di questo strato è fondamentale in quanto determinerà le prestazioni termiche dell'intero sistema.

Viene posto a diretto contatto con lo strato resistente, attraverso aggancio meccanico e/o incollatura, formando un vero e proprio rivestimento a "cappotto" dell'edificio che permette di minimizzare i ponti termici.

Bazzocchi sottolinea come alcuni parametri fondamentali che devono guidare la scelta del materiale in modo che questo risulti:

- ❖ A basso valore di trasmittanza termica;
- ❖ Idrofilo;
- ❖ Con reazione al fuoco tale da non propagare la fiamma;
- ❖ Non deperibile e non alterabile;
- ❖ Autoportante e con sufficiente resistenza meccanica.



Figura 3 – Alcune tipologie di prodotti per l'isolamento termico (fonte: ristrutturazionaiello.it).

È dunque consigliabile che, qualunque sia il materiale scelto, esso sia disponibile in forma di pannelli modulari, in modo da facilitare la posa in opera di questo e degli strati successivi.

Lo spessore dello strato isolante varia fondamentalmente in base ai requisiti di prestazione termica che si vogliono soddisfare ed al potere isolante del materiale scelto.

2.3.4 Camera di ventilazione

Lo strato di ventilazione è l'elemento fondamentale del sistema e viene predisposto tra lo strato isolante ed il rivestimento esterno. Deve essere progettato in modo tale da creare un effetto camino a convezione naturale di tipo esterno-esterno dove l'aria viene prelevata appunto dall'esterno e non entra mai in comunicazione né con l'ambiente interno, né con il sistema impiantistico. Il ruolo fondamentale di questa intercapedine d'aria è quello di evacuare il vapore acqueo proveniente dall'interno evitando il fenomeno di condense interstiziali e di eliminare gli effetti negativi di possibili infiltrazioni d'acqua provenienti dall'esterno.

Questo tipo di camera d'aria fornisce un grande contributo termico soprattutto durante il periodo estivo, diminuendo la quantità di calore in ingresso nell'edificio. La radiazione solare, infatti si infrange sul rivestimento esterno e tramite il fenomeno di conduzione arriva fino alla camera d'aria, dove i moti ascendenti lo trasportano verso le bocche d'uscita e quindi nuovamente verso l'esterno.

Nel periodo invernale, a parte risolvere il problema della condensa, può apportare benefici di tipo termico solo se opportunamente sigillata tramite un sistema di controllo di tipo manuale o automatico che riduca al minimo lo scambio d'aria, senza però trasformarla in una camera ermetica che eliminerebbe l'effetto camino e conseguentemente i suoi benefici.

È importante sottolineare come il funzionamento della camera d'aria sia strettamente correlato alle condizioni ambientali al contorno, alla composizione della parete ed alla morfologia dell'edificio. Se quindi la sezione minima adeguata per la realizzazione di questo camino è di 4 centimetri, bisogna però considerare in fase di progettazione anche

l'eventuale presenza di elementi che possano turbare la circolazione dell'aria.

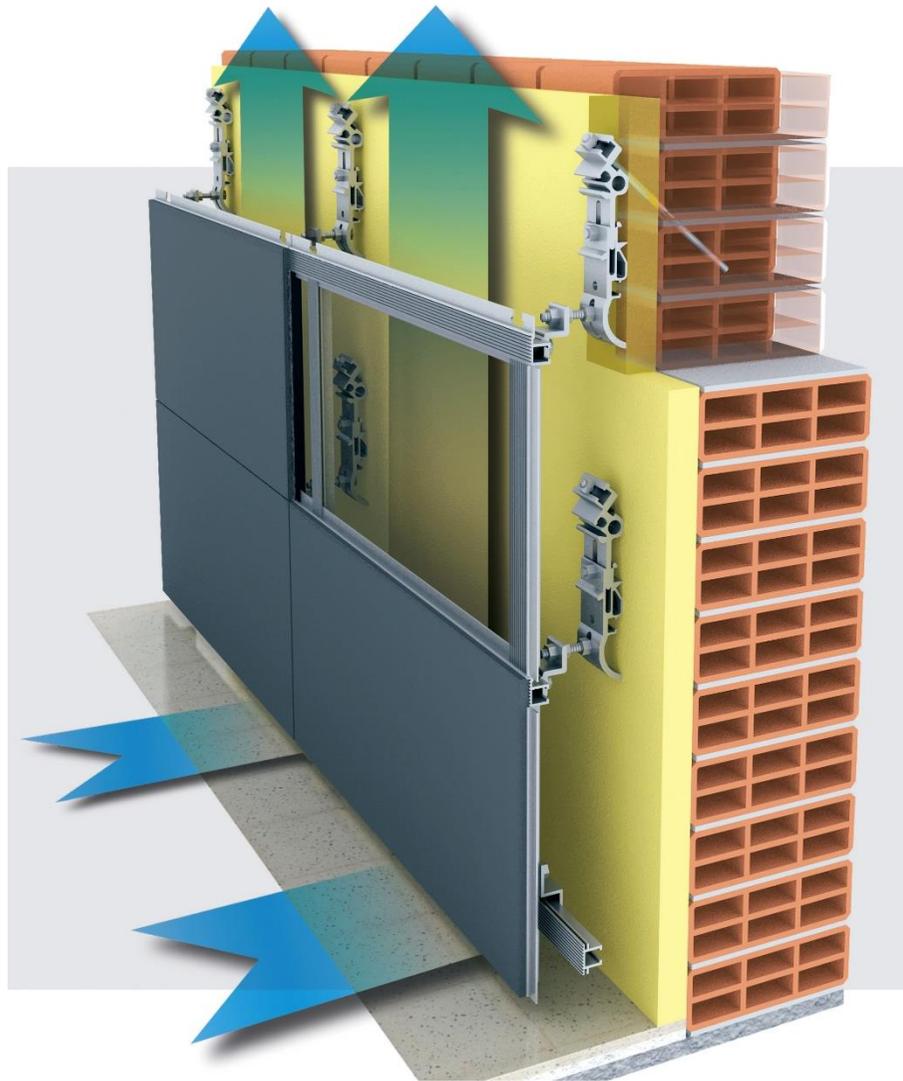


Figura 4 – Schema di ventilazione naturale di un sistema di facciata ventilata. (Fonte: fratellivitali.com).

A questo proposito risultano fondamentali la corretta scelta e collocazione del sistema di sottostruttura che ivi verrà situato; allo stesso tempo, è importante mantenere una buona regolarità di sezione del camino a partire dalle aperture d'entrata dell'aria, proseguendo verso quelle d'uscita. È altresì indispensabile evitare la collocazione di elementi orizzontali che interrompano il flusso d'aria ascensionale, in quanto questo annullerebbe chiaramente l'effetto camino. Lo strato di ventilazione ed il sistema di sottostruttura vanno quindi assolutamente progettati di pari passo. Data la complessità di questo sistema, è possibile che si riveli necessario in molti casi ripartire in più parti la camera di ventilazione, in base soprattutto alla morfologia dell'edificio, all'alternarsi di pieni e vuoti, ecc.

2.3.5 Sistema della sottostruttura

Il sistema della sottostruttura viene ancorato direttamente al telaio portante dell'edificio, in modo da poter supportare o trattenere, tramite gli elementi di fissaggio, il rivestimento esterno. È composto quindi da due sottosistemi principali: le strutture di supporto ed i sistemi di fissaggio.

Le strutture di supporto, nel caso di murature di tamponamento, sono generalmente costituite da sistemi diffusi a profilo continuo. Possono essere a montanti (direzione verticale) od a traversi (direzione orizzontale) o, più generalmente, costituiti da una maglia a due livelli di orditura. Al primo livello abbiamo normalmente un sistema a montanti, su cui viene ancorato meccanicamente il secondo livello, a traversi. In questo caso i montanti in particolare hanno anche il compito di distanziare il rivestimento esterno dallo strato isolante, in modo da creare la necessaria camera di ventilazione. La struttura orizzontale, infatti, benchè generalmente provvista di fori per permettere la circolazione dell'aria nella camera, potrebbe generare

turbolenze che ostacolano l'effetto camino desiderato e per questo motivo o non viene collocata (sistema a montanti) o viene installata come secondaria per agevolare i flussi areici.

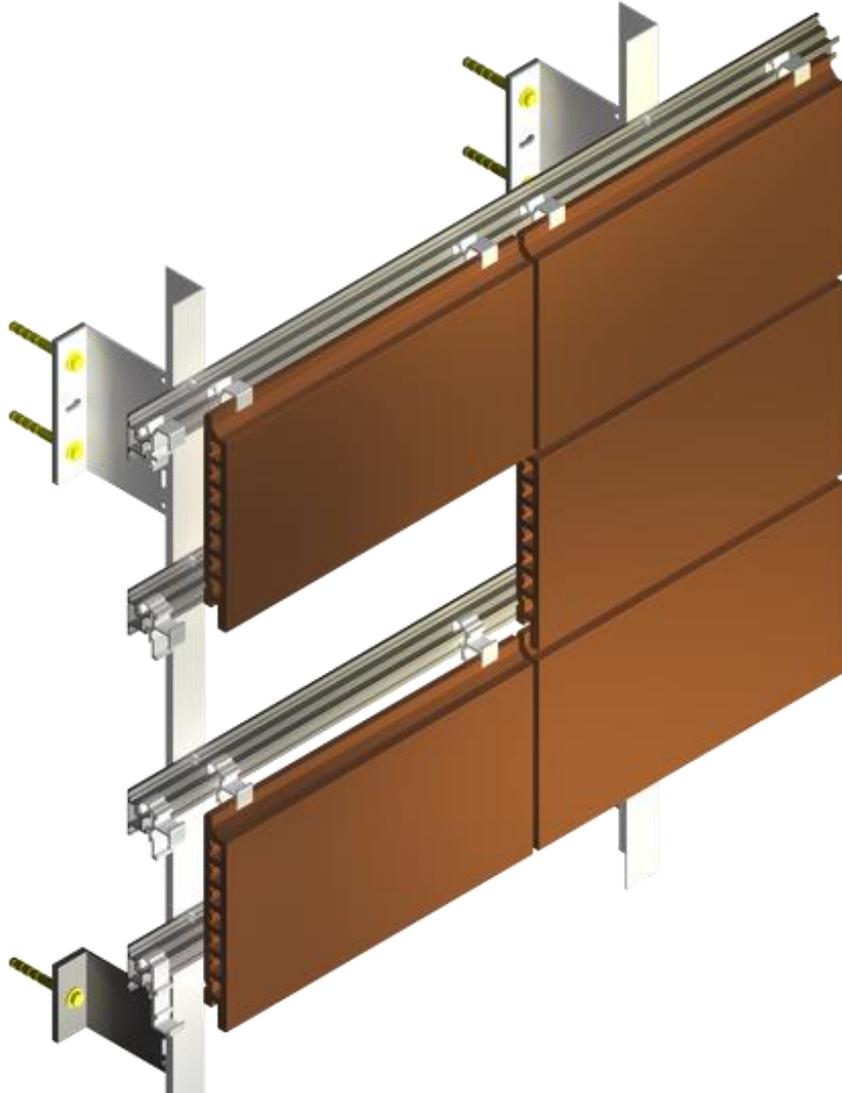


Figura 5 – Esempio di sistema di sottostruttura con ancorati pannelli in cotto.

Sulla struttura di supporto, vengono poi agganciati meccanicamente i sistemi di fissaggio che andranno ad ancorare gli elementi del rivestimento esterno. Sul mercato è oggi disponibile una grande varietà di tipologie di elementi di fissaggio, i quali sono spesso abbastanza flessibili da permettere ciascuno l'ancoraggio di diversi tipi di rivestimento. Per questo motivo, per la scelta dell'appropriato sistema di fissaggio è necessario in primo luogo determinare la tipologia di rivestimento esterno ed in seguito andare a verificare quali sono i sistemi disponibili.

Il progetto del sistema della sottostruttura dipende quindi principalmente da tre fattori: le condizioni di carico della facciata, le proprietà del tipo di rivestimento scelto e il risultato estetico che si vuole ottenere. A differenza dei primi sistemi citati nell'architettura spontanea, oggi i materiali utilizzati per le sottostrutture sono principalmente l'acciaio inox, l'acciaio zincato e l'alluminio, soprattutto per via del loro ottimo comportamento statico a fronte di dimensioni e peso ridotti.

2.3.6 Strato di rivestimento

Lo strato di rivestimento rappresenta l'ultimo elemento del sistema di parete ventilata, quello a contatto con l'ambiente esterno. Anche in questo caso, esiste una grande varietà di prodotti sul mercato che si presta alla realizzazione di questo elemento. Generalmente si tratta di sistemi di pannellature modulari di dimensioni e materiali variabili. A prescindere dai materiali utilizzati, i pannelli vengono sempre ancorati meccanicamente agli elementi di fissaggio della sottostruttura, andando a costituire la seconda superficie della camera di ventilazione (ricordiamo come la prima sia costituita dallo strato isolante).

Le particolari caratteristiche tecniche dei prodotti per rivestimenti esterni, generalmente dal ridotto spessore, non permettono a questo strato di dare un particolare apporto energetico al sistema parete, se non quello dovuto alla creazione della camera di ventilazione. Anche per questo motivo, la scelta del tipo di prodotto da impiegare per il rivestimento sarà dettata da esigenze diverse rispetto a quelle utilizzate per gli altri strati. In particolare, si andranno a verificare le seguenti caratteristiche:

- Sistema di fissaggio;
- Aspetto esteriore;
- Resistenza agli agenti atmosferici ed alla radiazione solare;
- Durabilità;
- Facilità di pulizia;
- Resistenza ai graffi;
- Resistenza al fuoco;
- Manutenzione.



Figura 6 – Rivestimento in acciaio Corten. (fonte: archiexpo.it)

2.4 VANTAGGI E DEBOLEZZE

Come già visto in precedenza, sono molteplici i vantaggi che presenta un sistema di parete ventilata, a partire dalla elevata qualità architettonica. La scelta del rivestimento esterno, con le sue caratteristiche estetiche e di pregio è sicuramente una componente decisiva a riguardo. La cura dei dettagli costruttivi non risulta solamente in una migliore performance del sistema ma può assumere una eventuale connotazione estetica quando la progettazione si pone l'obiettivo di donare agli elementi costruttivi il decoro proprio degli elementi architettonici (Monestiroli, 2002). Anche la cura della posa in opera è elemento di qualità architettonica ed è resa più agevole dalla modularità degli elementi e dalla posa a secco.

L'elevata flessibilità compositiva rappresenta certo un altro pregio di questo sistema. La presenza della sottostruttura permette una notevole flessibilità nella scelta del rivestimento esterno, consentendo al progettista di variare sia sui materiali che sulle dimensioni dei singoli componenti. Questa flessibilità permette di minimizzare la comparsa di eventuali difetti in fase di posa in opera, come ad esempio incompatibilità dimensionali o di materiali tra un componente e l'altro.

La presenza di uno strato isolante continuo, permette al sistema di raggiungere una notevole prestazione termica invernale mantenendo ridotto lo spessore della parete. La diretta conseguenza di questa continuità di isolamento è la riduzione dei ponti termici, la cui presenza non solo danneggerebbe la prestazione energetica dell'edificio ma potrebbe essere causa di fenomeni di condensa.

La presenza della camera di ventilazione permette alla parete di dimostrare una bassa sensibilità all'acqua piovana. Le piogge che si infrangono sullo strato di rivestimento non possono infatti penetrare

oltre all'interno della stratigrafia (come accade per esempio nelle murature tradizionali), in quanto la lama d'aria, realizzando una discontinuità fisica, provvede non solo a fermare le infiltrazioni all'interno della struttura ma anche, tramite l'effetto camino, all'evaporazione dell'acqua infiltrata, mantenendo così costante il tasso di umidità dello strato isolante e la relativa performance termica.

La lama d'aria si costituisce tuttavia in primis come metodo di controllo della diffusione al vapore e dei fenomeni di condensa interstiziale e superficiale. Anche in questo caso, il vapore acqueo che diffonde dall'ambiente interno verso l'esterno viene lasciato sfogare fino al raggiungimento della camera di ventilazione, dove l'effetto camino lo raccoglie e lo convoglia direttamente verso l'esterno, evitando pericolosi fenomeni di condensa interstiziale all'interno del sistema. In questo modo tutti gli elementi della stratigrafia possono mantenere più a lungo una condizione di perfetta operatività, mantenendo inalterata nel tempo la loro performance ed allungando di fatto la vita del sistema.

La presenza di un rivestimento esterno separato da una camera d'aria ventilata concede, nel periodo estivo, la riduzione dei carichi termici superficiali. Questi due strati infatti "permettono un lavaggio termico del supporto murario" (Poli, De Angelis, & Fiori, 2009), ossia diminuiscono l'impatto dei flussi termici in entrata dall'esterno. Questa capacità è particolarmente influente in caso di sistemi debolmente isolati od in condizioni termiche estreme.

La stratigrafia si occupa anche di proteggere lo strato resistente, ovvero la muratura di tamponamento e la struttura portante da eventuali sbalzi termici sia nel corso della giornata che durante l'anno, proteggendola dall'irraggiamento diretto. In questo modo vengono ridimensionati i fenomeni di dilatazione termica e si possono

prevenire eventuali lesioni o dissesti che questa altrimenti potrebbe causare. La maggiore quiete termica così ottenuta, agisce a sua volta positivamente sulla vita del sistema.

Il potere fonoisolante del sistema di facciata può essere incrementato lavorando, in fase di progettazione, sulla scelta dei materiali da impiegare. Lo strato isolante in primis è quello che può garantire l'azione più efficace di fonoisolamento. In seguito, anche la scelta del tipo di supporto murario e di rivestimento esterno può contribuire ad un miglioramento delle prestazioni in merito. È importante sottolineare che già la discontinuità materica tra rivestimento esterno e strato isolante fornita dalla camera di ventilazione rappresenta un elemento che incide positivamente sulla permeabilità della struttura ai rumori.

La già citata flessibilità di progetto consente anche un certo grado di controllo sul potere di riduzione della riflessione sonora in ambiente esterno che il sistema parete può fornire. In questo caso la performance dipende fondamentalmente dal potere fonoassorbente del materiale scelto per il rivestimento esterno. Contribuiscono in questo senso anche le geometrie dei giunti e le dimensioni delle fughe.

La possibilità di assemblaggio a secco del rivestimento esterno, quando la posa in opera viene progettata a tal scopo, permette di semplificare la sostituzione dei singoli pezzi riducendo così notevolmente i costi di manutenzione del rivestimento. Poiché il rivestimento esterno è lo strato a diretto contatto con gli agenti atmosferici e quindi più soggetto a deperimento, la facilità di manutenzione risulta essere un aspetto chiave anche nel calcolo dei costi di gestione del sistema.

Le diverse tipologie di assemblaggio a secco previste dai vari sistemi di sottostruttura presenti sul mercato, permettono una valutazione piuttosto precisa dei tempi di posa in opera che, escludendo soluzioni di particolare complessità progettuale, sono generalmente molto più brevi di quelli di una muratura tradizionale. Lo stesso si può dire per quanto riguarda i sistemi di aggancio del rivestimento esterno alla sottostruttura.

La presenza di un'intercapedine favorisce l'alloggiamento del sistema impiantistico non esigendo la creazione di tracce apposite all'interno della muratura. Bisogna tuttavia sottolineare come l'inserimento di impianti per la gestione degli ambienti interni nella camera di ventilazione debba essere valutato con estrema attenzione, poiché molti sono i problemi che questa soluzione potrebbe provocare in fase di gestione².

Infine, è importante menzionare che i rivestimenti destinati alla realizzazione di pareti ventilate posseggono caratteristiche fisico-tecniche per le quali non sono soggetti ai fenomeni di degrado quali fessurazione e distacco che sono invece comuni nei rivestimenti normalmente applicati direttamente al sistema murario.

Abbiamo dunque avuto diverse occasioni di ribadire quali sono i pregi di una soluzione di parete ventilata ma è doveroso ricordare anche come questa possa presentare delle criticità soprattutto per via di possibili errori nel corso delle diverse fasi, dalla progettazione alla posa in opera e gestione.

² L'inserimento di elementi all'interno della camera di ventilazione può provocare turbolenze d'aria e danneggiare l'efficacia dell'effetto camino; inoltre, il posizionamento degli impianti in uno strato così esterno potrebbe diminuirne il rendimento.

Nonostante la progettazione preveda la continuità dello strato isolante, lo strato isolante è composto da elementi che andranno uniti gli uni agli altri in fase di montaggio e tutto lo strato deve essere fissato allo strato resistente. I punti di fissaggio e di unione sono per definizione punti di discontinuità e potrebbero causare l'insorgenza di ponti termici se non adeguatamente progettati ed eseguiti. Il sistema della sottostruttura dovrà essere vincolato a sua volta allo strato resistente, penetrando attraverso l'isolante. Anche in questo caso una corretta definizione dei dettagli costruttivi dovrà assumersi l'incarico di evitare i ponti termici che altrimenti andranno a formarsi.

Un altro problema che si può manifestare molto facilmente, soprattutto in fase di montaggio è relativo ai difetti di planarità dello strato di rivestimento. I difetti di planarità possono essere imputati a molteplici fattori, uno dei quali può essere l'incapacità dei sistemi di aggancio di permettere un adeguato controllo sulle tolleranze dimensionali. Questi difetti non solo possono creare irregolarità geometriche ma addirittura attivare sollecitazioni inaspettate e potenzialmente fuori controllo.

Un difetto prettamente di tipo estetico è dato dalla differenza di colore tra i singoli elementi del rivestimento esterno. Nonostante i produttori garantiscano un certo livello di uniformità dei prodotti, uno scorretto piano di approvvigionamento od un incorretto stoccaggio possono portare alla presenza di elementi di colori significativamente diversi.³

³ In alcuni casi questo effetto viene appositamente ricercato per dare al rivestimento un carattere particolare.

Proprio per via della sua composizione, la parete ventilata non si caratterizza come una soluzione particolarmente resistente agli urti in quanto il rivestimento esterno è normalmente molto sottile ed è chiamato a proteggere il sistema da solo (all'interno, come ricordiamo, vi è la camera d'aria che non può fornire alcuna protezione). Tuttavia si fa riferimento in questo caso ad urti accidentali non previsti dalla progettazione. Per quanto riguarda la resistenza agli urti da agenti atmosferici, il progettista dovrà far riferimento alle caratteristiche tecniche dei prodotti impiegati per il rivestimento.

La parete ventilata non è una soluzione tecnica di facile applicazione su geometrie complesse. Per questo motivo, viene generalmente utilizzata per la realizzazione di grandi superfici regolari.

Poiché abbiamo già detto quale importanza rivesta una corretta posa in opera sull'efficienza dello strato di rivestimento, sarà necessaria della manodopera specializzata per garantire che il processo venga eseguito a regola d'arte. Eventuali errori in questa fase potrebbero essere causa di guasti e danni prematuri alla struttura, nonché di un minor rendimento energetico della soluzione.

Anche il comportamento acustico del sistema nei confronti degli agenti atmosferici può essere un problema: il vento, la pioggia battente e la grandine possono generare delle vibrazioni del rivestimento esterno che a loro volta genererebbero rumore e dunque discomfort. Anche questa eventualità deve quindi essere presa in considerazione in fase di progetto della struttura e scelta dei materiali in modo da minimizzare tali effetti negativi.

3 LA PARETE VEGETATA

Dopo aver brevemente presentato quali sono i principali requisiti di legge a cui un sistema di facciata deve rispondere, e quindi le caratteristiche da prendere in considerazione per verificare che tali requisiti vengano rispettati, abbiamo presentato la parete ventilata ossia il sistema parete che sarà oggetto di comparazione con il vero protagonista di questo studio: il sistema di parete vegetata GREen ENvelope System.

3.1 ORIGINI E SVILUPPO DELLA TECNOLOGIA

Utilizzare la vegetazione come elemento di design architettonico è una strategia di progettazione che si è sviluppata sin dagli anni Settanta, di pari passo con l'aumentare della consapevolezza riguardo la necessità di salvaguardare l'ambiente. Contemporaneamente allo sviluppo di nuove tecnologie ad alto rendimento e bassi consumi energetici, si è andato sviluppando un nuovo modo di fare progettazione che prevede lo sfruttamento della morfologia architettonica ed ambientale per favorire l'abbattimento del consumo energetico degli edifici e la valorizzazione delle fonti di energia rinnovabili, con l'obiettivo di creare la casa passiva: un edificio in grado di mantenere le condizioni di comfort interno avvalendosi del minor quantitativo possibile di energie non rinnovabili. In quest'ottica, la vegetazione gioca un ruolo chiave nel condizionamento climatico sia a livello architettonico che a livello urbanistico.

Se dunque la vegetazione può essere sfruttata in molteplici modi, sia a scala architettonica che urbana, per facilitare la progettazione energetica degli edifici, più recentemente la ricerca scientifica le ha attribuito anche altre importanti funzioni di natura economico-sociale,

legate alla possibilità di coltivare in verticale e di natura psicoperceptiva, relative alla riduzione dello stress ed al miglioramento della salute degli utenti.

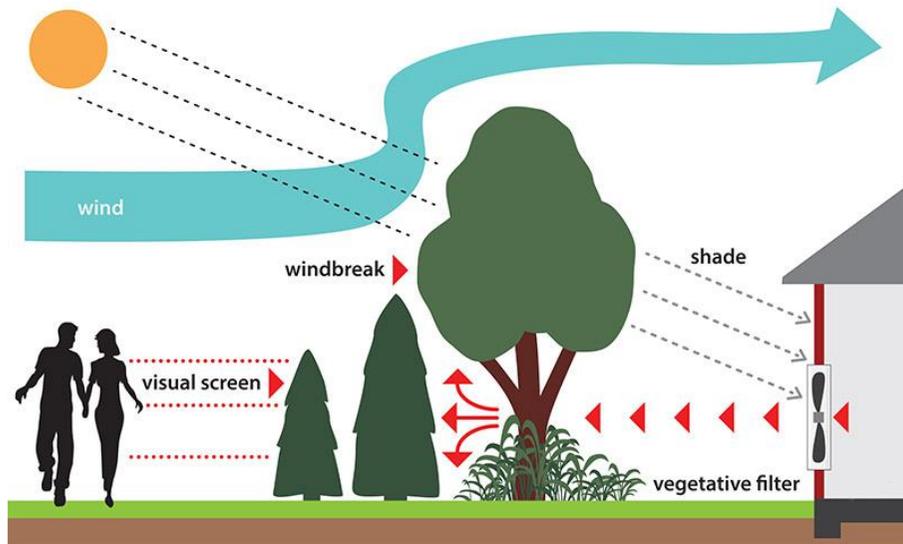


Figura 7 – Molteplici benefici dell'utilizzo della vegetazione nella progettazione. (Fonte: windbreaktrees.com)

In questo panorama, una delle possibili tipologie di intervento è rappresentata dai cosiddetti Vertical Greening Systems (VGS), anche chiamati Living Wall Systems (LWS). Si tratta fondamentalmente di un'evoluzione della tecnologia utilizzata per la creazione dei tetti verdi, dove solitamente un manto erboso viene posato come rivestimento esterno di tetti di edifici. Il concept del tetto verde, rimodellato per soddisfare maggiori esigenze, è stato applicato alla realizzazione di superfici verticali.

⁴ Con il termine "idroponica" si definisce una coltivazione fuori suolo per la quale la terra viene sostituita da un substrato inerte e la pianta è alimentata tramite

Nonostante la tecnologia dei tetti verdi avesse a suo tempo rappresentato una soluzione interessante per le proprie performance sia a livello fisico che ambientale, da sola non poteva tuttavia risolvere completamente il problema della riduzione dei consumi energetici degli edifici (basti pensare al fatto che il tetto rappresenta solo una piccola porzione dell'involucro di un edificio).

L'utilizzo di facciate vegetate permette di ottenere molteplici benefici sia di tipo energetico che ambientale, quali riduzione del carico energetico per i sistemi di condizionamento, riduzione dell'effetto di isola termica, abbattimento dell'inquinamento acustico, riduzione delle emissioni di anidride carbonica e assorbimento di particolato atmosferico nonché sviluppo della biodiversità.

La natura ci fornisce una grande varietà di soluzioni che possono essere adottate per la realizzazione di pareti vegetate: sono infatti molteplici le specie vegetali in grado di crescere lungo superfici verticali, che non necessitano di grandi quantità di suolo per attecchire e che sono in grado di prosperare nelle più svariate condizioni climatiche.

La prima formulazione di un sistema di parete vegetata si attribuisce a Patrick Blanc, biologo francese che, lavorando al fianco di architetti del calibro di Jean Nouvel e Herzog & de Meuron, introduce il "Mur végétal", una coltivazione idroponica ⁴ che viene integrata nell'involucro esterno di edifici come il Caixa Forum di Madrid (Figura 8).

l'irrigazione di una soluzione che le fornisce tutte le sostanze nutritive di cui ha bisogno.

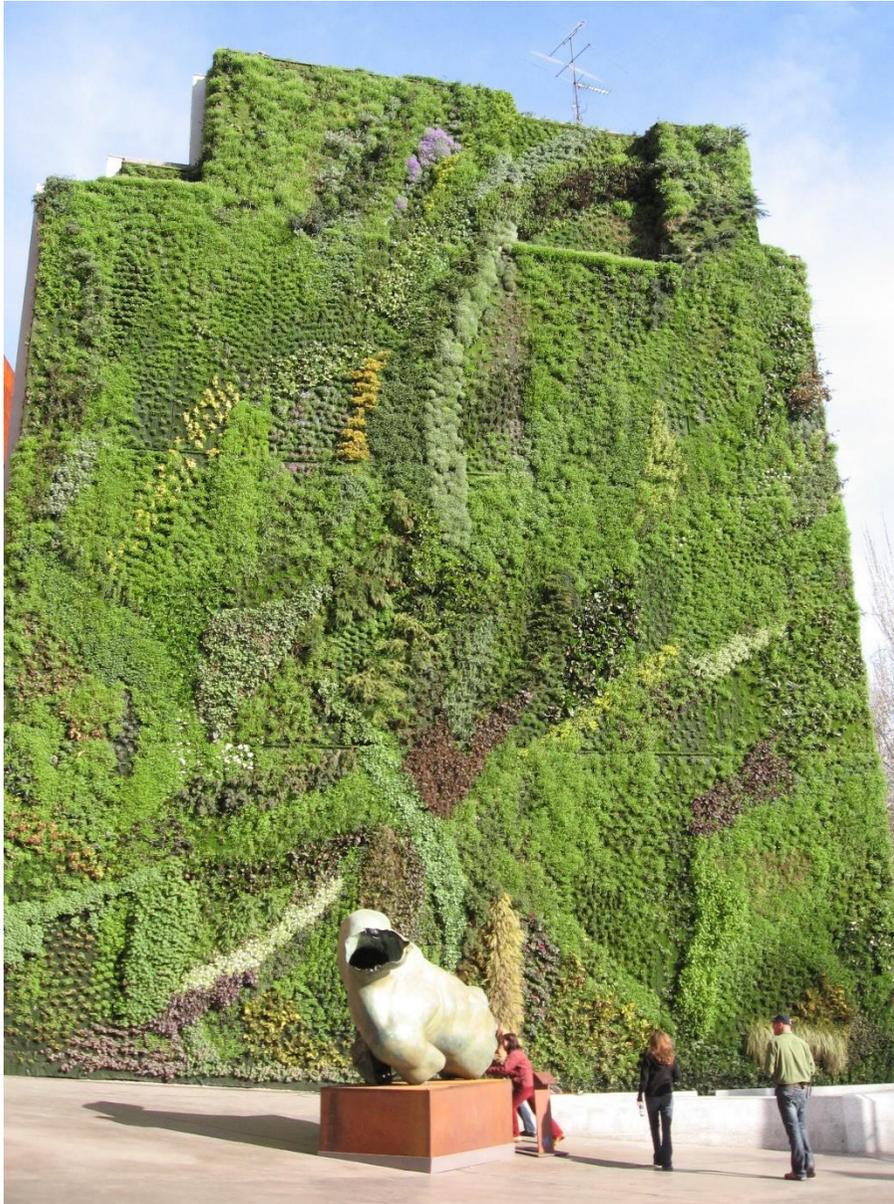


Figura 8 – La parete vegetata di Patrick Blanc per il Caixa Forum di Madrid (wikipedia.org).

A partire dall'esperienza di Blanc, diversi sistemi di parete vegetata sono stati sviluppati negli anni successivi, portando alla formazione di due diverse tipologie di sistemi: uno è il già citato sistema idroponico, l'altro è un sistema di tipo modulare.

Tra i sistemi di tipo modulare possiamo menzionare il sistema a cassettoni, dove si prevede che un contenitore vuoto, normalmente polimerico o metallico, venga riempito di una miscela di ingredienti che compongono il substrato su cui far crescere una varietà di specie vegetali. Anche degno di menzione è il sistema a celle multiple che utilizza ancora dei contenitori polimerici o metallici che a loro volta inglobano delle celle ospitanti il substrato.

Nonostante siano molteplici i benefici che le pareti vegetate possono apportare al progetto architettonico e urbanistico, tuttavia gli studi basati su dati sperimentali sono piuttosto limitati ed i loro risultati non possono essere generalizzati, in quanto le performance di questo tipo di tecnologia dipendono strettamente dal tipo di contesto in cui sono inserite. La variabilità della performance rende maggiormente difficoltoso comprendere in quali termini le facciate vegetate costituiscano una scelta efficace o meno.

L'effettiva ecologia dei VGS può essere stabilita solo tramite un processo di studio di tipo LCA (Life Cycle Assessment) che prenda in considerazione tutti gli aspetti positivi e negativi che caratterizzano il sistema durante la sua vita, a partire dai processi di produzione dei singoli componenti fino al loro smaltimento.

3.2 CLASSIFICAZIONE DELLE TIPOLOGIE DI PARETE VEGETATA

Il processo di ricerca che è stato alla base della nascita del sistema prevede dunque lo sviluppo ed il monitoraggio di una soluzione che

permetta di rimpiazzare i materiali da costruzione convenzionali con un involucro vegetale che garantisca alte prestazioni sia a livello componentistico, di singoli materiali utilizzati, che a livello sistemico, di performance generale della parete e dell'edificio.

La soluzione che andiamo a presentare è così il frutto di un progetto che ha studiato il design, la produzione e la possibile prestazione di un sistema di parete vegetata, ponendo un'attenzione particolare ai vantaggi dal punto di vista energetico ed ambientale.

Con questo obiettivo, il sistema GRE_EN_S è stato studiato in termini di inquinamento dovuto all'estrazione delle materie prime, ai processi di lavorazione, trasporto e produzione, nonché in termini di risparmio energetico ed impatto ambientale durante la sua vita utile e dopo lo smaltimento a fine vita.

Il progetto si è dunque articolato in tre fasi principali, cominciando dalla selezione dei materiali per i componenti del sistema, attraverso la progettazione con relativa produzione di campioni, fino allo studio delle prestazioni in opera. In questo modo è stato possibile andare oltre i requisiti di efficienza energetica, considerando anche le necessità di produzione, manutenzione e smaltimento.

Il risultato di questo studio prevede l'ibridazione tecnologica ed il miglioramento prestazionale di due prodotti già esistenti: una struttura modulare per pareti assemblate a secco (brevetto BYBOX® di CEIT) e un pannello modulare per facciate verdi (brevetto REVIWALL® del vivaio REVIPLANT di Revigliasco, Torino).

3.2.1 BYBOX® e REVIWALL®

Il sistema BYBOX è un metodo costruttivo per pareti prefabbricate modulari autoportanti ad elevate prestazioni. Telai rettangolari in

acciaio zincato rullato da 50x100cm costituiscono il sistema, consentendo di realizzare strutture verticali continue, sulle quali possono essere montate pannellature a secco oppure pannelli compositi in CELENIT e EPS, rifinibili con intonaco.

Il potere termoisolante della parete può essere incrementato dalla collocazione di un isolante a materassino flessibile in fibra di polietilene riciclato all'interno dei vuoti tra i telai.



Figura 9 – Esempio di sistema Bybox posato in opera (bybox.it).

La produzione fuori opera del sistema velocizza le operazioni di installazione mentre la modularità consente di adattarsi facilmente a qualsiasi esigenza dimensionale.

La caratteristica di essere facilmente disassemblabile permette di agevolare le operazioni di manutenzione e facilita il riutilizzo dei componenti in seguito allo smantellamento. Inoltre, la presenza di un'intercapedine consente l'alloggiamento degli impianti e la realizzazione di pareti attrezzate prive di canalizzazioni a vista.

All'interno del sistema GRE_EN_S, il BYBOX rappresenta il supporto strutturale sul quale si vanno a installare dei pannelli ispirati al brevetto di REVIWALL®.

Il pannello REVIWALL® sfrutta un telaio in alluminio riciclato di misure 40x50x3 cm per contenere al proprio interno una geostuoia, a sua volta realizzata in fibre di Polipropilene e avvolta da teli radicabili caratterizzati da diverse finiture.

La geostuoia viene saturata con fibra di cocco idratata e polimeri idroretentori⁵, inoculati di consorzi micorrizici⁶ e batterici per favorire la radicazione e lo sviluppo delle piante (Siragusa).

Sulla superficie del modulo sono ricavate le tasche per la messa a dimora delle specie vegetali, scelte in base al microclima del luogo in cui verrà realizzato l'intervento.

L'irrigazione della parete vegetale avviene per mezzo di pompe ad iniezione comandate da centraline e da sensori di conducibilità, per soddisfare le effettive esigenze delle piante: l'impianto può essere alimentato ad energia solare e riutilizzando acque grigie o piovane.

⁵ Generalmente gli idroretentori si presentano sottoforma di granuli che rilasciano una dose d'acqua a cessione controllata. Possono anche essere miscelati in precedenza con concimi. I polimeri si rigonfiano ad un nuovo contatto con l'acqua e rimangono attivi nella loro funzione di assorbimento e rilascio, normalmente per almeno 3 anni.



Figura 10 – Il pannello REVIWALL.

La parete vegetale può essere supportata da una struttura a sé stante, eventualmente ancorata ad una parete preesistente, oppure venire integrata all'involucro edilizio, con notevoli risultati energetici ed estetici.

La collaborazione con il vivaio REVIPLANT per lo sviluppo del sistema GRE_EN_S ha dunque permesso agli sviluppatori di ottenere svariati

⁶ Per "micorriza" si intende un particolare tipo di associazione simbiotica tra un fungo ed una pianta superiore, localizzata nell'ambito dell'apparato radicale del simbionte vegetale.

vantaggi in termini di disponibilità di materiali (le piante, il mix di fibra di cocco e micorrize, la struttura brevettata REVIWALL® per la realizzazione dei moduli, l'impianto di fertirrigazione, etc) e di know-how nella gestione del progetto.

3.2.2 Ibridazione tecnologica e componenti del sistema

A partire dai brevetti BYBOX e REVIWALL®, lo sviluppo del sistema GRE_EN_S ha compreso lo sviluppo tecnologico sia dei componenti strutturali, che dei materiali e di tutto il sistema di assemblaggio.

Il processo di progettazione del modulo di parete verde GRE_EN_S ha dunque dovuto passare attraverso varie fasi di modifica ed adattamento, durante le quali si è andato allontanando definitivamente dall'originale pannello REVIWALL®, per esempio passando dalle dimensioni di 40x50 cm a quelle di 50x50 cm, che meglio corrispondono alle dimensioni del modulo standard della struttura portante di BYBOX® di 100x50 cm.

Il GREn ENvelope System è dunque un sistema modulare studiato per la realizzazione di pareti vegetate esterne (Vertical Greening Systems). Il sistema è composto da una stratigrafia che prevede l'integrazione del rivestimento vegetale esterno con l'orditura metallica, gli strati di isolamento termoacustico e lo strato di finitura interno.

I moduli sono precoltivati con diverse varietà di specie vegetali selezionate in base alla loro adattabilità a molteplici condizioni climatiche ed esposizioni. Tuttavia, a seconda delle condizioni ambientali, il rivestimento vegetale può essere cambiato selezionando le specifiche specie vegetali che meglio si adattino ai requisiti locali.



Figura 11 – Un modulo di parete del sistema GRE_EN_S

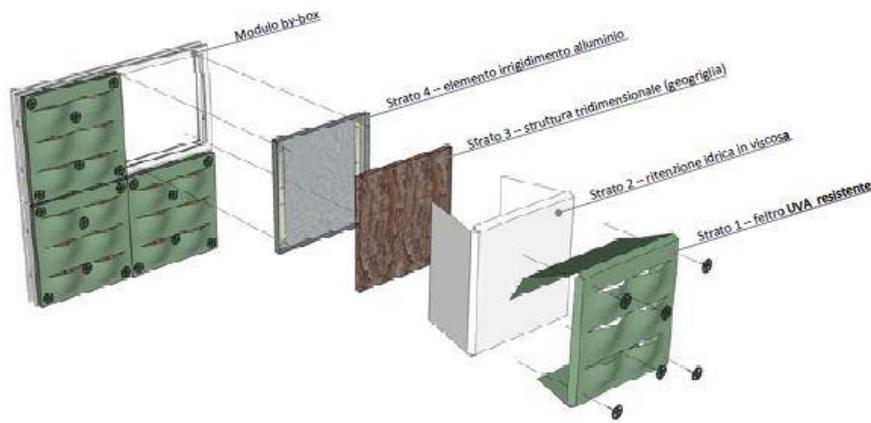


Figura 12 – Concept progettuale del sistema GRE_EN_S.

Il sistema parete è dunque costituito dai seguenti elementi:

- Finitura interna con doppia lastra in gesso rivestito, con barriera al vapore;
- Telaio a montanti in acciaio zincato;
- Strato isolante in sughero riciclato;
- Lastra in cemento fibrorinforzato;
- Telaio di ancoraggio dei moduli vegetati in acciaio zincato;
- Moduli vegetati.

L'evoluzione dello strato isolante. La soluzione di termoisolamento proposta originariamente de BYBOX è costituita da un pannello di XPS. Tuttavia, la progettazione del sistema GRE_EN_S si è basata sulla metodologia LCA, per cui si è reso necessario cercare un modo per realizzare uno strato isolante che mantenesse alte prestazioni coibentanti, garantendo però al contempo maggiori prestazioni da un punto di vista LCA. A tal fine sono state condotte svariate sperimentazioni atte a sviluppare un nuovo componente isolante che

si potesse realizzare in forma di materassini, a partire da materiali che garantissero come detto anche alte prestazioni in termini di LCA.

Il materiale principale scelto a questo scopo è stato il sughero riciclato dagli scarti di produzione di solette per scarpe. Gli scarti del ciclo produttivo delle solette sono stati frantumati in scaglie di circa 10mm di diametro (Figura 13 - Elaborazione dello scarto della produzione di solette per la realizzazione dei pannelli Figura 13 e Figura 14).



Figura 13 - Elaborazione dello scarto della produzione di solette per la realizzazione dei pannelli

Il sughero, una volta ridotto in "grani" è stato miscelato con altri materiali di scarto di origine industriale quali sughero spalmato con un'orditura in lana merinos (Figura 15), microfibra di poliestere spalmata con schiuma di lattice (Figura 16) e cuoio rigenerato ridotto a scaglie di diametro pari a circa 10mm (Figura 17).



Figura 14 - Creazione componenti in sughero di forma regolare.

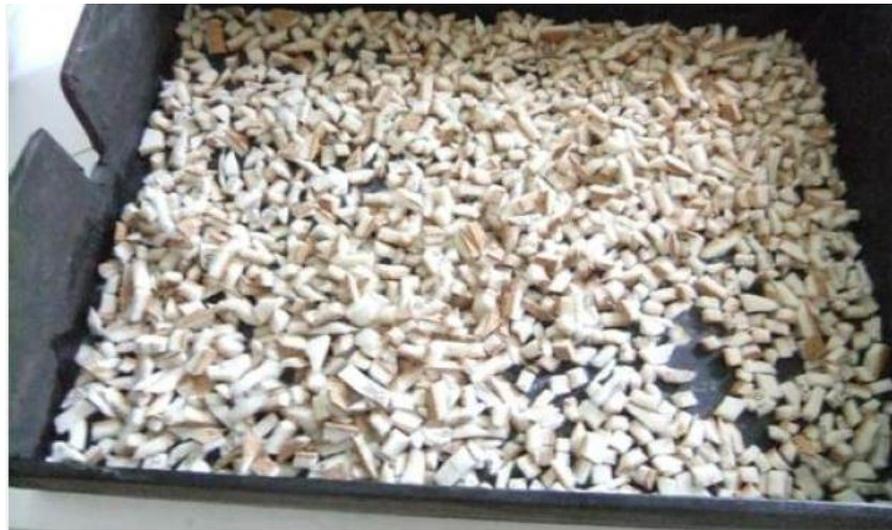


Figura 15 - Grani sminuzzati di sughero e lana Merinos



Figura 16 - Grani sminuzzati di microfibra in Poliestere e schiuma di Lattice spalmata.



Figura 17 - Scaglie di cuoio rigenerato.

Una volta conclusa la produzione dei grani dai differenti materiali, sono stati sperimentati diversi leganti in grado di assemblare i componenti per ottenere un pannello. Finalmente, la metodologia adottata per la preparazione del legante necessario per unire insieme tutti i componenti menzionati fa riferimento alla tecnica di produzione

del coccio pesto (*opus signinum*). Si è proceduto dunque a produrre una miscela costituita da calce idraulica, sabbia e acqua, sostituendo però al coccio pesto i grani di scarti industriali precedentemente preparati (Figura 18).

La composizione che migliori risultati ha presentato in fase di sperimentazione dell'“impasto” è data da colla naturale alla caseina (c.a. 5%) con aggiunta di un 30% di gesso, più un 20% d'acqua, gli scarti di sughero microfibrato e cuoio. In aggiunta, piccoli quantitativi di ossido di rame e di acido salicilico in qualità di conservante hanno permesso di evitare la formazione di muffe durante il processo di essiccazione.



Figura 18 - Tecnica “coccio pesto” con aggiunta di grani di sughero e colla.

Una volta perfezionato l'impasto è stato realizzato il pannello isolante, di dimensioni ridotte, per ottimizzare i materiali in fase di sperimentazione (Figura 19 e Figura 20).



Figura 19 - Processo di formatura finale del pannello isolante.



Figura 20 - Elemento finale di pannello isolante.

Le misurazioni della conducibilità termica dei pannelli così realizzati hanno restituito un valore di $\lambda = 0,062 \text{ W/mK}$.

L'orditura metallica. Il telaio di ancoraggio in acciaio zincato del sistema BYBOX ha anche lo scopo di distanziare il rivestimento esterno dagli strati più interni, generando una camera d'aria che migliora la prestazione termoisolante del sistema.



Figura 21 – Prova di aggancio del pannello Reviwall al sistema portante Bybox.

Un impianto di irrigazione e fertilizzazione interno integrato al telaio permette di fornire alle piante le necessarie sostanze nutritive in maniera autonoma ed automatica, limitando gli interventi di

manutenzione e senza impattare sull'estetica della facciata, risultando finalmente invisibile dall'esterno una volta installati i moduli vegetati.



Figura 22 - Impianto di irrigazione del sistema GRE_EN_S.

I moduli vegetati. Posseggono a loro volta una stratigrafia propria, realizzata con materiali di origine naturale o riciclati derivanti da scarti di lavorazione industriale, in modo da garantire le prestazioni previamente menzionate da un punto di vista di LCA.

Strato di contenimento del terriccio e delle piante. È un geotessile composito costituito da uno strato superficiale in fibra di poliestere accoppiato ad un feltro agugliato termofissato realizzato in fibra di polipropilene riciclata al 70%.

Strato idrofilo. Anche questo è un geotessile composito costituito da uno strato superficiale in fibra di polipropilene termofissato accoppiato ad un feltro agugliato in viscosa idrofila, fibra composta da cellulosa al 100% e quindi totalmente biodegradabile.

Strato drenante di ancoraggio delle radici. È costituito da una geogriglia in filamenti di polipropilene.



Figura 23 – Poliestere e viscosa

Struttura di contenimento e irrigidimento. È realizzata in alluminio microforato pressopiegato con staffe in acciaio. Questa soluzione presenta molteplici vantaggi: da una parte mantiene le vantaggiose caratteristiche del materiale, dall'altra esalta le caratteristiche di resistenza meccanica e di stabilità rispetto alla rete stirata tipica del REVIWALL, a fronte di un aumento relativamente contenuto di peso. Allo stesso tempo, permette di ridurre notevolmente le fasi di montaggio, passando da 14 rivettature manuali ad 1 solo processo di piegatura meccanica. In aggiunta, la struttura permette la giusta traspirabilità e permeabilità all'aria sul lato posteriore, condizione imprescindibile per garantire l'ossigenazione dell'apparato radicale ed evitare il ristagno d'acqua (Figura 25).

Substrato. Si tratta dello strato che accoglie le specie vegetali e fornisce loro i necessari nutrienti, coadiuvato dall'impianto di irrigazione. Nel brevetto REVIWALL® era costituito da una coppia di feltri sintetici che avvolgevano un tessuto tridimensionale in polietilene, all'interno del quale era trattenuto il substrato nutritivo, a sua volta costituito da fibra di cocco, terriccio, polimeri idroretentori,



Figura 24 – Geogrid in filamenti di Polipropilene



Figura 25 - Elemento di irrigidimento in lamiera di alluminio forato.

consorzi micorrizici e concime in granuli. La progettazione GRE_EN_S ha aggiunto a questo modello degli scarti di lavorazione di feltrini sottosedici sminuzzati con l'intenzione di migliorare la idroretenzione del sistema, in coppia con un sistema di fertirrigazione (Figura 26).



Figura 26 – Substrato.

3.2.3 Specie vegetali testate

Le specie vegetali utilizzabili in questo tipo di soluzioni sono molteplici e la selezione dipende dai risultati che si vogliono ottenere sia in termini di prestazioni che di effetto estetico.

Per la realizzazione dei primi modelli di GRE_EN_S sono state scelte tre specie dalle distinte caratteristiche botaniche e di accrescimento. L'obiettivo della scelta è stato quello di poter valutarne il comportamento sulla base dell'esperienza consolidata del vivaista. Le tre specie selezionate sono state dunque la *Lonicera nitida* 'Maugruen', la *Bergenia Cordifolia* e la *Luzula sylvatica*.

Mentre la *Lonicera Nitida* è ormai una specie consolidata nella realizzazione dei VGS, la *Bergenia Cordifolia* è ancora una candidata molto promettente. La *Luzula Sylvatica* è stata invece sperimentata per la prima volta in verticale.

Lonicera nitida 'Maugruen'. Al genere *Lonicera* appartengono decine di specie, sempreverdi, decidue e rampicanti: si tratta di arbusti originari dell'Asia che hanno piccole foglie alterne, di colore verde scuro, lucide e cerosi. Di norma presentano un portamento semiprostrato e forma allargata, con ramificazioni molto disordinate ma dense e compatte. Le foglie piccole e i rami lignificati impediscono un movimento eccessivo con la brezza e trasmettono un senso di rigore geometrico e staticità.

Le potature troppo drastiche diminuiscono la velocità di ripresa. È una specie interessante per la rapida crescita e per il fatto di formare masse vegetali verdi, compatte ed esteticamente essenziali: l'attività vegetativa risulta intensa nel periodo primaverile, con la comparsa di fiorellini tubulari color crema seguiti da bacche blu o viola.

Tabella 1 – Caratteristiche principali della *Lonicera Nitida*.

CARATTERISTICHE	
Resistenza alla Siccità	Forte
Resistenza al Freddo	Forte
Terreno	Ben drenato
Dimensione Fogliame	Minuta
Densità Fogliame	Elevata
Spessore del Cuscino	30 cm
Esposizione	Soleggiata, mezz'ombra
Punti di Forza	Rapida produzione di massa vegetale

La *Bergenia Cordifolia*. È un genere di erbe perenni appartenenti alla famiglia delle *Sassifragacee* e originarie dell'Asia centrale e orientale. Si tratta di un'erba sempreverde con grandi foglie rotondeggianti o cordate. Risulta ideale per bordure con interesse anche invernale, produce a inizio primavera fiori viola campanulati in cime lungamente peduncolate.

La *Heuchera*. È una pianta perenne tappezzante, semi sempreverde, appartenente alla famiglia delle *Sassifragacee*. Ne esistono svariate specie, originarie dell'Europa e del nord America, e moltissime varietà ibride sono state prodotte nel corso dei decenni.



Figura 27 - *L. nitida* (sinistra), *B. cordifolia* (centro) e *L. sylvatica* (destra).

Una volta prodotti i primi moduli di prova, il sistema è stato installato per la realizzazione della parete esterna di un piccolo box presso l'Environment Park di Torino. I pannelli ivi installati sono ora oggetto di monitoraggio al fine di poter definire con maggiore precisione le capacità di performance del sistema sul lungo periodo.

Grazie dunque ai primi dati sperimentali ottenuti da questo campione siamo in possesso di una buona base di dati per analizzare le caratteristiche prestazionali di questa soluzione portando avanti una

prima analisi di confronto tra questa ed un altro tipo di sistema più convenzionale: le facciate ventilate.



Figura 28 – Il prototipo realizzato presso l'Environment Park di Torino

PARTE 2 – INTRODUZIONE

Nella prima parte di questo scritto abbiamo presentato i requisiti che qualunque sistema di parete esterna deve soddisfare e le caratteristiche delle due tipologie di sistema di parete che ci accingiamo a confrontare in questa seconda parte.

Per la realizzazione di questa sezione abbiamo dunque selezionato 10 caratteristiche principali la cui analisi riteniamo di fondamentale importanza al fine di determinare quale sia la tecnologia maggiormente performante.

Ad ognuna delle caratteristiche selezionate abbiamo dedicato un capitolo specifico, nel quale si spiegano l'importanza e rilevanza della caratteristica in questione ed i parametri che la descrivono da un punto di vista qualitativo e/o quantitativo, a seconda del caso.

Successivamente, ogni capitolo presenta un'analisi della prestazione misurata o stimata per entrambi i sistemi di parete presi in considerazione, terminando con una breve conclusione che sottolinea il risultato del raffronto tra le due tecnologie analizzate.

Per quanto riguarda il sistema di parete ventilata, le prestazioni fornite per le varie caratteristiche analizzate sono state ricavate in vari modi a seconda della disponibilità di informazioni. Per le caratteristiche facilmente determinabili a livello teorico, come la massa superficiale, lo spessore, il comportamento termico, si è deciso teorizzare una serie di modelli plausibili di parete ventilata al fine di rappresentare la variabilità delle prestazioni riscontrabile sul mercato e nel costruito.

Si sono create dunque varie proposte di parete ventilata dalle prestazioni distinte, al fine di poter comparare allo stesso tempo gli

intervalli ed i picchi di prestazione con la prestazione unica del sistema GRE_EN_S. Questa metodologia è stata dunque adottata per poter comparare la prestazione del sistema GRE_EN_S con le prestazioni peggiori, medie o migliori che sono in genere garantite dai sistemi di parete ventilata, al fine di visualizzare dove si posiziona il sistema di parete vegetata all'interno del panorama delle pareti ventilate disponibili.

Per la presentazione di quelle caratteristiche le cui prestazioni dipendono in maniera rilevante dalla configurazione del contesto, si è deciso invece di fare riferimento ai dati presentati da studi esterni pubblicamente disponibili (per esempio le schede prodotto) o a banche dati di comprovata attendibilità (come ad esempio la banca dati del Cambridge Engineering Selector per le informazioni sui materiali) o ad analisi di tipo qualitativo, più che quantitativo (come per esempio con la posa in opera).

In alcuni casi, come per esempio le prestazioni di assorbimento inquinanti, è stato necessario fare delle piccole forzature, in quanto praticamente nessun sistema di parete ventilata presenta tale caratteristica, prevedendo l'applicazione di prodotti presenti sul mercato che permetterebbero al sistema di acquisire tale prestazione.

Al contrario, i dati che si presentano per descrivere le caratteristiche e le prestazioni del sistema GRE_EN_S provengono tutti dalla medesima fonte: gli studi condotti dal gruppo di ricerca e sviluppo di GRE_EN_S sui vari prototipi durante le successive fasi di sviluppo.

Il punto di partenza dello sviluppo del sistema GRE_EN_S è stato una metodologia di valutazione del suo ciclo di vita, in inglese Life Cycle Assessment: l'obiettivo e reale punto innovativo dello sviluppo di questo nuovo sistema è quello di dare forma ad un prodotto che

garantisca un impatto ambientale minimo e ottime prestazioni durante tutto il proprio ciclo di vita, a partire dalla scelta delle materie prime seconde fino alle possibilità di smaltimento e riciclo del prodotto a fine vita.

Se dunque la metodologia LCA ha condotto il disegno e lo sviluppo del sistema, possiamo dire che le caratteristiche ambientali dello stesso sono state ricercate appositamente, mentre altre caratteristiche prestazionali di GRE_EN_S, per così dire secondarie, come lo spessore, la massa superficiale o il comportamento acustico sono state misurate come conseguenza di un disegno comunque mirato all'ottimizzazione del suo ciclo di vita.

Quindi, se alcune caratteristiche sono state progettate sin dall'inizio per essere altamente performanti, altre sono state appunto misurate attraverso varie metodologie, a seconda del caso. In generale, le misurazioni sono state condotte in tre maniere distinte: in laboratorio (con varie tecniche a seconda delle necessità), su di un modulo sperimentale per ricreare artificialmente le condizioni previste per la posa in opera e su di un campione a dimensione reale installato a Torino, per le misurazioni finali.

Per ogni caratteristica del sistema GRE_EN_S sono stati presentati i dati forniti dalle misurazioni ritenute più attendibili a seconda del contesto ed in alcuni casi si sono discusse le informazioni restituite da più misurazioni distinte.

Questa seconda parte termina con una sezione di conclusioni finali che presenta il raffronto prestazionale quantitativo e qualitativo tra i due sistemi riassumendo e comparando le prestazioni di entrambi in un unico quadro complessivo, determinando infine quale sistema sia il migliore tra i due.

4 MASSA SUPERFICIALE

Il peso proprio, o massa superficiale, di un sistema di facciata è una caratteristica molto importante sotto diversi punti di vista.

In primo luogo, infatti, questa condiziona il comportamento statico della struttura. In edifici progettati con struttura portante a telaio in calcestruzzo armato o in acciaio, i sistemi di facciata sono a tutti gli effetti delle forze che gravano sulla struttura portante in maniera negativa. Maggiore sarà la massa superficiale di questi sistemi, maggiore sarà l'aggravio di peso che la struttura portante dovrà sopportare a causa loro.

In secondo luogo, il peso di un sistema di facciata ha un'influenza importante sul comportamento prestazionale dell'involucro, soprattutto in merito a prestazioni termiche e acustiche. Ciò si deve prevalentemente al fatto che la massa superficiale sia una diretta conseguenza della densità dei materiali componenti il sistema. A parità di spessore, infatti, materiali più densi offriranno una massa maggiore mentre componenti meno densi garantiranno una massa minore. Come abbiamo visto nei capitoli 5 e 6 a riguardo delle prestazioni termiche e come vedremo nel capitolo 9 per quanto concerne quelle acustiche, la densità dei materiali gioca un ruolo non marginale nella definizione delle prestazioni finali del sistema. Se abbiamo già sottolineato come una maggiore densità possa significare una maggiore conduttività termica e quindi un minor potere termoisolante, vedremo invece in seguito come questo possa anche significare un maggior fonoisolamento.

Infine, un altro aspetto importante è legato alle modalità di posa in opera. Possiamo infatti anche intuitivamente comprendere come

materiali più pesanti rappresentino un problema maggiore quando si tratta di organizzarne il trasporto dalle sedi di produzione a quella di cantiere. Allo stesso tempo, saranno più difficili da manovrare e posare in sede di cantiere, in quanto sarà necessaria una maggiore forza lavoro, se non l'utilizzo di macchinari appositi. Tutti gli svantaggi in termini di trasporto e posa si traducono poi direttamente in un aumento dei costi ad essi relativi e dunque in una parziale insostenibilità economica.

Se per alcuni aspetti progettare un sistema caratterizzato da una massa elevata si presenta quindi come un beneficio, da molti altri punti di vista si tratta di una caratteristica negativa che può rendere più onerosa sia in termini di energie che di denaro che di tempo, la realizzazione esecutiva del progetto.

4.1 PESO DI UNA PARETE VENTILATA

Anche nel caso dell'analisi delle opportunità di progetto di un sistema di parete ventilata con diverse proprietà di massa superficiale, andremo a considerare come oggetto dell'indagine una parete ventilata semplificata, composta da sei strati fondamentali:

1. Strato di intonaco interno;
2. Muratura autoportante;
3. Strato isolante;
4. Camera di ventilazione;
5. Struttura di aggancio per il rivestimento esterno;
6. Rivestimento esterno.

In particolare, per quanto riguarda il punto 5, ossia la struttura di aggancio del rivestimento esterno, è necessario previamente fare delle considerazioni ad hoc: poiché in nessuna delle proposte di

soluzione di parete ventilata che sono state analizzate sono stati condotti una selezione ed un dimensionamento puntuale delle strutture di aggancio, non è dunque possibile determinare precisamente l'influenza di questo apparato caso per caso. Per questo motivo si è deciso, ai fini di questa indagine, di assumere per questo strato un peso medio di 2kg/m^2 che verranno aggiunti di volta in volta ai risultati delle valutazioni condotte sul resto della stratigrafia. In questo modo potremo contare su una valutazione della massa superficiale totale del sistema che non prescindano dalla struttura di aggancio del rivestimento esterno senza però dover indulgere nelle complesse analisi che sarebbero necessarie di volta in volta per dimensionarla correttamente.

Focalizzandoci dunque sulla componente massa superficiale, espressa come abbiamo visto in kg/m^2 , andiamo ad analizzare tre diverse possibilità di progetto, considerando rispettivamente una parete leggera, una di peso medio ed una pesante.

4.1.1 Parete ventilata leggera

Per quanto riguarda la parete leggera andremo dunque a considerare le opzioni per la composizione dei singoli strati in modo da minimizzare il peso del componente finale.

Strato di intonaco interno – Poiché lo strato di regolarizzazione interno è uno dei componenti più sottili che completano la soluzione, per quanto possa variare la sua massa volumica, l'influenza sulla prestazione totale del sistema non sarà particolarmente alta. Per realizzare una soluzione interessante dal punto di vista della trattazione, come già fatto precedentemente, andremo quindi ad optare per uno strato di intonaco in calce e gesso con massa volumica

nella media, ossia con $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$, applicato con uno spessore di 1,5cm.

Muratura di tamponamento – La muratura costituente lo strato resistente della facciata, sarà realizzata a due teste di blocchi in laterizio dello spessore di 12cm ciascuna, separate da 1cm di malta legante, per un totale di 25cm. La massa volumica dei blocchi in uso sarà pari a 600kg/m^3 .

Strato isolante – Nonostante siano presenti sul mercato materiali isolanti molto leggeri, per la corretta analisi di questo componente sarà necessario tenere conto anche di altri fattori. Nel passaggio tra la massa volumica di un materiale e la massa superficiale bisogna infatti tenere conto di un altro fattore: lo spessore di materiale impiegato. Se la massa volumica ci dà una indicazione della densità del materiale, il peso finale sarà determinato dallo spessore che andremo a decidere di applicare. Per questo motivo, un materiale più denso ma maggiormente performante e che quindi possa essere applicato con uno spessore minore potrebbe risultare infine più leggero. Tenendo conto di questo principio, per la soluzione più leggera si è deciso di optare per un materiale più denso ma maggiormente performante, in modo da poterne limitare l'utilizzo ad uno spessore minore. In particolare verranno impiegati pannelli in schiuma poliuretanic (PUR) aventi massa volumica pari a 150 kg/m^3 e $\lambda = 0,03 \text{ W/mK}$. La migliore performance a livello termico di questo prodotto permette di applicare uno spessore di soli 5 cm di materiale, contro gli 8 cm che sarebbero necessari con materiali più leggeri ma meno performanti. È importante sottolineare che, selezionando materiali ancora più performanti da un punto di vista termico, sarebbe possibile ridurre ulteriormente lo spessore e quindi il peso del componente tuttavia, una soluzione basata su materiali ad altissime prestazioni non

representerebbe un valido termine di paragone, costituendosi come un'ipotesi molto ricercata ben al di fuori dello standard di mercato.

Rivestimento esterno – Anche per quanto riguarda lo strato di rivestimento esterno, la soluzione più leggera non sarà rappresentata necessariamente da quella con minor densità ma bensì da quella più sottile. In questo frangente dunque, la soluzione più leggera sarà ottenuta mediante l'impiego di pannelli in alluminio che presentano una densità media di circa 1900 kg/m^3 ma uno spessore di soli 0,4 cm.

Tabella 2 – Stratigrafia di parete ventilata leggera.

Strato	Spessore cm	ρ Kg/m ³	λ W/mK	R m ² K/W
Intonaco calce e gesso	1,5	1800	0,90	/
Blocchi forati in laterizio	25	600	0,22	/
Pannelli PUR	5	150	0,03	/
Camera di ventilazione	6	1	/	0,04
Pannelli alluminio	0,4	1900	1,33	/

Tabella 3 – Componenti massa superficiale della parete ventilata leggera.

STRATO	MASSA SUPERFICIALE
Intonaco calce e gesso	27 kg/m ²
Blocchi forati in laterizio	150 kg/m ²
Pannelli PUR	7,5 kg/m ²
Camera di ventilazione	0,06 kg/m ²
Struttura di aggancio	2 kg/m ²
Rivestimento esterno	7,6 kg/m ²
TOTALE	194,16 kg/m²

Tabella 4 – Caratteristiche prestazionali totali della parete ventilata leggera.

Trasmittanza termica totale U_{tot}	0,334 W/m ² K
Spessore totale	37,9 cm
Massa superficiale totale	194 kg/m²

4.1.2 Parete ventilata di peso medio

Per realizzare una parete ventilata di peso medio andiamo a selezionare componenti caratterizzati da una maggiore massa volumica rispetto a quelli impiegati per la parete leggera o che necessitano di uno spessore maggiore per garantire le necessarie prestazioni minime.

Strato di intonaco interno – Data la poca influenza di questo elemento sulle prestazioni totali della facciata, andiamo a prevedere l’impiego della medesima miscela con $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ utilizzata in precedenza, limitandoci ad aumentarne lo spessore a 2 cm.

Muratura di tamponamento – Per la realizzazione della muratura optiamo nuovamente per il laterizio, questa volta sotto forma di mattoni semipieni, con un $\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$ per uno spessore totale di 25 cm, costituito da due teste di mattoni da 12 cm ciascuna, più uno strato legante di malta da 1 cm.

Strato isolante – Anche lo strato isolante partecipa al peso totale della parete: adottando un materiale meno performante dal punto di vista termico di quello utilizzato in precedenza, saremo costretti a posarlo in opera con uno spessore maggiore. Selezioniamo per questo scopo i pannelli in sughero espanso, passando dal valore di $\lambda = 0,03 \text{ W/mK}$ del poliuretano, ad un valore di $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$. I pannelli sono poi caratterizzati da una massa volumica $\rho = 120 \text{ kg/m}^3$ e dimensionati,

per soddisfare i requisiti di trasmittanza termica, con uno spessore di 8 cm.

Rivestimento esterno – Per il rivestimento esterno ci affideremo a delle tavelle in cotto forato, caratterizzate da massa volumica $\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$, per uno spessore di posa di 5 cm.

Tabella 5 – Stratigrafia di parete ventilata di peso medio.

Strato	Spessore cm	ρ Kg/m ³	λ W/mK	R m ² K/W
Intonaco calce e gesso	2	1800	0,90	/
Mattoni semipieni	25	1300	0,33	/
Pannelli in sughero espanso	8	120	0,04	/
Camera di ventilazione	6	1	/	0,04
Tavelle in cotto	5	1500	0,2	/

Tabella 6 – Componenti massa superficiale di parete ventilata di peso medio.

STRATO	MASSA SUPERFICIALE
Intonaco calce e gesso	36 kg/m ²
Mattoni semipieni	325 kg/m ²
Pannelli in sughero espanso	9,6 kg/m ²
Camera di ventilazione	0,06 kg/m ²
Struttura di aggancio	2 kg/m ²
Rivestimento esterno	75 kg/m ²
TOTALE	447,66 kg/m²

Tabella 7 – Caratteristiche prestazionali totali della parete ventilata di peso medio.

Trasmittanza termica totale U_{tot}	0,339 W/m ² K
Spessore totale	46 cm
Massa superficiale totale	448 kg/m²

4.1.3 Parete ventilata pesante

Anche per realizzare la parete ventilata più pesante, andiamo ad agire sulla scelta dei componenti, ragionando in base a massa volumica di ognuno e spessore necessario per la corretta posa in opera.

Strato di intonaco interno – Anche questa volta, per le ragioni già espresse, utilizzeremo lo stesso intonaco previsto per gli esempi precedenti, caratterizzato da massa volumica $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ e posato in opera con uno spessore di 2 cm.

Muratura di tamponamento – In questo caso per realizzare la muratura opteremo per un materiale differente, il calcestruzzo. Andremo dunque a prevedere la posa di blocchi in CLS, caratterizzati da una massa volumica $\rho = 2100 \text{ kg/m}^3$ mantenendone invariato lo spessore di 25 cm, rispetto alle soluzioni proposte precedentemente.

Strato isolante – Per la realizzazione di questa stratigrafia si decide di mantenere invariate le prestazioni termiche del materiale isolante poiché diminuirle ulteriormente per aumentare forzatamente lo spessore dello strato sarebbe una scelta forzata, controproducente e che non rispecchia la realtà progettuale. Sono molteplici i materiali isolanti caratterizzati da un $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$ disponibili sul mercato anche a prezzi contenuti, per cui adottare un materiale meno performante costituirebbe una scelta illogica. Per questo motivo,

andremo ad impiegare dei pannelli in fibra di legno che presentano le medesime prestazioni termiche già citate ma con $\rho = 160 \text{ kg/m}^3$.

Rivestimento esterno – Per quanto riguarda il rivestimento esterno, in questo caso si opterà per uno spessore ridotto a fronte di una massa volumica molto alta: adotteremo delle lastre in pietra naturale, aventi $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$, per uno spessore in opera di 1 cm.

Tabella 8 – Stratigrafia di parete ventilata pesante.

Strato	Spessore cm	ρ Kg/m ³	λ W/mK	R m ² K/W
Intonaco calce e gesso	2	1800	0,90	/
Blocchi in CLS	25	2100	0,35	/
Pannelli in fibra di legno	8	160	0,04	/
Camera di ventilazione	6	1	/	0,04
Lastre in pietra naturale	1	2300	3,0	/

Tabella 9 – Componenti massa superficiale di parete ventilata pesante.

STRATO	MASSA SUPERFICIALE
Intonaco calce e gesso	36 kg/m ²
Blocchi in CLS	525 kg/m ²
Pannelli in fibra di legno	12,8 kg/m ²
Camera di ventilazione	0,06 kg/m ²
Struttura di aggancio	2 kg/m ²
Rivestimento esterno	23 kg/m ²
TOTALE	598,86 kg/m²

Tabella 10 – Caratteristiche prestazionali totali della parete ventilata pesante.

Trasmittanza termica totale U_{tot}	0,34 W/m ² K
Spessore totale	42 cm
Massa superficiale totale	599 kg/m²

4.2 PESO DEL SISTEMA PARETE GRE_EN_S

Il caso del sistema di involucro GRE_EN_S è analogo a quanto visto in merito alle diverse soluzioni di pareti ventilate. Se infatti nel paragrafo precedente abbiamo visto come questo dipenda dalla scelta dei materiali da applicare nella stratigrafia, allo stesso modo in questa casistica il peso totale del sistema dipenderà dalla scelta dei materiali che si adotteranno.

Avendo già analizzato nel dettaglio la stratigrafia che caratterizza il sistema, sappiamo che questa è composta dai seguenti strati:

- Doppia lastra in gesso rivestito, con barriera al vapore;
- Telaio in acciaio zincato;
- Strato isolante in sughero;
- Lastra in cemento fibrorinforzato;
- Telaio in acciaio zincato;
- Moduli vegetati.

Da questo schema possiamo facilmente notare come tre degli elementi componenti il sistema siano materiali caratterizzati da proprietà fisico-tecniche che permettono di ottenere soluzioni particolarmente leggere (lastre in gesso e telai in acciaio zincato). Le lastre in gesso, con un peso specifico del materiale di 2300 kg/m³, sono realizzate con uno spessore di soli 2,5 cm, costituendosi di fatto come l'elemento più pesante del sistema con 57,5 kg/m².

Per quanto riguarda le strutture in acciaio zincato, possiamo considerare un impiego simile a quello considerato per le strutture di aggancio del rivestimento esterno delle pareti ventilate (in alluminio), ricalcolato in base al peso specifico dell'acciaio (circa 7800 kg/m³), per una incidenza totale di 7 kg/m². Poiché i telai di acciaio zincato sono due, considereremo un peso totale di circa 14 kg/m².

La lastra in calcestruzzo fibrorinforzato, con uno spessore di 1,25 cm, contribuisce al peso del sistema per 22,5 kg/m², considerando il peso specifico di un calcestruzzo leggero da 1800 kg/m³.

Per quanto riguarda la scelta del materiale isolante abbiamo già avuto modo di studiare la soluzione in sughero sviluppata per il sistema GRE_EN_S e possiamo assumere come valore di riferimento il peso di 10,16 kg/m².

C'è dunque un elemento variabile nella stratigrafia del sistema: lo strato di rivestimento vegetato. Come abbiamo già avuto modo di sottolineare, questo è un elemento mutevole (vivo) del sistema e pertanto le sue caratteristiche cambiano a seconda dei suoi cicli vitali e delle condizioni al contorno. Nonostante ciò, possiamo considerare che i moduli vegetati presentino un peso medio di 13,60 kg/m².

Chiaramente, il peso finale del sistema parete dipenderà in modo preponderante dalle specie vegetali che si deciderà di piantare sul rivestimento esterno. Tuttavia, anche determinando la tipologia di pianta che si andrà ad installare sulla facciata, il peso della struttura non sarà mai costante ma varierà nel tempo per via dello sviluppo dei vegetali. A fasi di crescita, durante le quali il peso della struttura andrà aumentando, si alterneranno fasi di maggior leggerezza in seguito alla potatura periodica. Anche l'influenza degli agenti atmosferici costituirà una variabile molto più importante che non nel caso di

materiali inerti. Le piante risponderanno alle condizioni climatiche ed all'alternarsi delle stagioni adattandosi di volta in volta secondo le proprie necessità.

Tabella 11 - Componenti massa superficiale della parete vegetata GRE_EN_S..

STRATO	MASSA SUPERFICIALE
Doppia lastra in gesso rivestito	57,50 kg/m ²
Telaio in acciaio zincato	7,00 kg/m ²
Strato isolante in sughero	10,16 kg/m ²
Lastra in cemento fibrorinforzato	22,50 kg/m ²
Telaio in acciaio zincato	7,00 kg/m ²
Moduli vegetati	13,60 kg/m ²
TOTALE	117,76 kg/m²

Se dunque pare molto complesso dare una stima precisa dell'apporto di massa che questo elemento può dare alla struttura, è altresì importante ricordare il motivo per cui ci interessa osservare il peso del sistema parete: in questa sede non ci interessa tanto sapere quanto l'edificio graverà sul terreno (che pur in altri frangenti può essere una considerazione interessante), bensì ci interessa valutare il peso del sistema per comprendere fattori come per esempio la facilità di trasporto o di posa in opera. A questo proposito dunque, c'è una considerazione interessante da fare: il rivestimento vegetato permette una notevole flessibilità, in quanto si possono prevedere due soluzioni differenti.

Precoltivazione – È possibile preparare il substrato e precoltivare le specie per i moduli GRE_EN_S prima del trasporto in cantiere e della fase di posa in opera, in questo modo si può anticipare la crescita dei vegetali ed ottenere una parete completa in minor tempo, con risultati tecnici ed estetici migliori. Tuttavia, il trasporto e la posa in opera dei

moduli risulteranno leggermente più difficili in quanto questi saranno più pesanti e delicati.



Figura 29 – Precoltivazione dei moduli vegetati. (Fonte: core77.com).

Coltivazione in opera – È la possibilità di preparare il substrato e piantare i vegetali una volta che i moduli siano già stati posati. Questo processo facilita il trasporto dei moduli e la loro posa in opera. Tuttavia la coltivazione dei moduli risulterà più complessa e la facciata impiegherà un tempo maggiore per essere completa e totalmente performante.



Figura 30 – Coltivare le piante per i moduli in seguito alla posa in opera potrebbe presentare numerose difficoltà (gsky.com).

4.3 CONCLUSIONI SUL RAFFRONTO

In questo capitolo abbiamo analizzato l'importanza rivestita dal dato "peso" in fase di progettazione, posa in opera e durante la vita utile di un sistema parete, prendendo in considerazione due casi studio: la parete ventilata ed il sistema GRE_EN_S.

Analizzando tre possibili soluzioni di parete ventilata dalle prestazioni differenti abbiamo potuto sottolineare come la varietà di soluzioni, soprattutto in termini di materiali, possa garantire una certa libertà di design ai progettisti. Abbiamo ipotizzato tre soluzioni di parete ventilata, una leggera, una di peso medio ed una pesante, rispettivamente del peso di 194 kg/m^2 , 448 kg/m^2 e 599 kg/m^2 . Come

condizione iniziale ci eravamo anche posti l'obiettivo di non prevedere l'impiego di materiali ad altissime prestazioni, poiché non avrebbero rispecchiato una situazione di Business as Usual (BAU) falsando così i risultati dello studio.

I tre dati ottenuti ci indicano come nella maggioranza dei casi una parete ventilata posata in opera in modo da rispettare i requisiti di comfort termico per gli ambienti interni, sia in periodo invernale che estivo, presenterà un peso medio di circa 400 kg/m^2 . Inoltre, nonostante gli sforzi fatti per cercare di progettare una parete ventilata che garantisca un peso minimo, il miglior risultato conseguibile tramite l'impiego di tecnologie comuni nel costruito è arrivato ad una massa superficiale pari a poco meno di 200 kg/m^2 . Anche se si tratta di un valore che è meno della metà della media di peso di un sistema di parete ventilata, comunque si tratta di un dato che si pone ben al di sotto delle prestazioni offerte dal sistema GRE_EN_S.

La parete rivestita dai moduli vegetati infatti, senza considerare nuovamente tutte le variabili relative al peso dello strato esterno vegetato, presenta mediamente un peso base di circa 118 kg/m^2 , un valore che a sua volta rappresenta poco più della metà del miglior risultato ottenuto con una parete ventilata.

In termini generali possiamo dunque concludere le nostre considerazioni sul peso di un sistema parete dicendo che il sistema GRE_EN_S è caratterizzato da un peso al metro quadro di molto inferiore a quello di un normale sistema di parete ventilata. Questa caratteristica permette al sistema GRE_EN_S di presentare notevoli vantaggi rispetto ad un involucro tradizionale, facilitando in particolar modo le operazioni di trasporto e di montaggio ed abbattendo i costi ed i tempi di costruzione.

5 SPESSORE

Lo spessore di una parete è una caratteristica fondamentale del componente e ne determina direttamente le prestazioni sotto diversi punti di vista. Progettare una parete più o meno spessa può presentare dunque diversi vantaggi e svantaggi, a seconda dei casi.

In primo luogo lo spessore è importante dal punto di vista strutturale: a parità di condizioni ambientali e di materiali scelti, lo spessore influisce in maniera direttamente proporzionale sulla resistenza statica della parete; è intuitivo infatti, che una parete più spessa sarà tendenzialmente più solida e resistente alle sollecitazioni esterne, quali per esempio pressione del vento e urti di vario genere. Contemporaneamente, soprattutto nel caso di pareti di tamponamento, costituirà però un carico maggiore da sopportare per il telaio strutturale portante.

Da un punto di vista termico, sempre a parità di materiali selezionati, una parete più spessa sarà in grado di proteggere meglio gli ambienti interni dalle variazioni climatiche esterne, garantendo una migliore resistenza R ed una maggiore inerzia termica. Migliori prestazioni saranno garantite non solo nel periodo invernale ma anche in quello estivo. Per avere un esempio pratico si può pensare alle grandi chiese medievali che grazie a spesse pareti di blocchi di pietra presentano un'inerzia termica tale da permettere agli ambienti interni di essere caldi la notte e freschi di giorno.

Anche per quanto concerne le prestazioni acustiche, in generale una parete più spessa garantisce un migliore livello di isolamento acustico dai rumori aerei provenienti dagli ambienti limitrofi, siano interni o esterni. Se avere una parete spessa comporta quindi numerosi

vantaggi in termini di prestazioni, c'è però da dire che può presentare anche degli inconvenienti.

In termini economici, una parete più spessa, a parità di materiali costerà molto di più di una sottile: lo spessore maggiore determinerà maggiori costi d'acquisto dei materiali e maggiori spese di trasporto degli stessi dai magazzini al cantiere. Anche in termini di posa in opera, si dovranno sostenere maggiori oneri in quanto saranno necessari probabilmente più operai e più tempo.

Un altro fattore da tenere in considerazione è la disponibilità di spazio. In ogni progetto infatti, lo spazio a disposizione della nuova costruzione è sempre limitato, costituendosi dunque come una risorsa molto preziosa che non può essere sprecata. Se facciamo riferimento per esempio alla vendita degli immobili, possiamo vedere chiaramente come la superficie calpestabile interna sia uno dei parametri più importanti. Progettare delle pareti perimetrali spesse, a parità di spazio disponibile, significa dunque sacrificare una parte di superficie calpestabile e, di conseguenza, svalutare l'immobile.

Da quanto detto appare dunque chiaro che il progettista quando va a determinare lo spessore del sistema di facciata, deve fare riferimento ai diversi vantaggi e svantaggi in modo tale da ottenere il miglior compromesso possibile. La tendenza di oggi, grazie anche a nuovi materiali altamente tecnologici, è quella di cercare di ottenere prestazioni termiche, acustiche e statiche eccellenti mantenendo lo spessore delle pareti al minimo possibile, ricercando in particolare maggiore leggerezza.

5.1 LO SPESSORE DELLA PARETE VENTILATA

Ribadita l'importanza del fattore spessore nella progettazione dei sistemi di facciata, andiamo dunque a prospettare diverse possibili soluzioni di parete ventilata. In questa analisi decidiamo di mantenere come punto di riferimento la prestazione termica invernale, rappresentata in particolare dal valore limite di trasmittanza termica U , definito dalla normativa italiana tramite il D.lgs. 192/2005, per le zone climatiche di tipo E, entro gli $0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$. Ponendo dunque la U limite come requisito minimo da soddisfare, andremo ad analizzare gli effetti del mutare dello spessore della soluzione, a partire da una parete sottile aumentandone lo spessore fino ad arrivare a quella che possiamo considerare una parete spessa.

5.1.1 Parete ventilata sottile

Di nuovo, consideriamo una parete ventilata standard composta da:

1. Strato di intonaco interno
2. Muratura di tamponamento
3. Strato isolante
4. Intercapedine d'aria
5. Struttura di aggancio per il rivestimento esterno
6. Rivestimento esterno.

Strato di intonaco interno – Lo strato di regolarizzazione con intonaco viene normalmente realizzato con uno spessore che può variare da un 1cm a 3cm, a seconda delle prestazioni che si vogliono ottenere dalla parete. Questo strato infatti, oltre a regolarizzare la superficie della muratura può intervenire sul bilancio termo-igrometrico del sistema. Esistono in commercio numerosissime tipologie di miscele per intonaci che garantiscono prestazioni termiche e igrometriche differenti a seconda delle necessità progettuali: esistono intonaci

traspiranti, idrorepellenti, ad alta resistenza termica e via dicendo. Nel caso di una parete sottile, andremo quindi a supporre l'utilizzo di un generico intonaco dalle medie prestazioni, applicato con un spessore di 1,5cm per assolvere principalmente alla funzione di regolarizzare la superficie interna.

Muratura di tamponamento – Lo strato resistente lo pensiamo realizzato tramite una muratura a due teste di blocchi forati in laterizio di spessore 12cm. I due strati di blocchi successivi danno uno spessore totale di 24cm a cui andiamo ad aggiungere uno spessore di 1cm di malta cementizia che dovrà essere impiegata per solidalizzarli. Anche nel caso dei laterizi, sono molteplici i prodotti presenti sul mercato, caratterizzati ognuno da prestazioni differenti. In questo caso si è optato per un laterizio dalle prestazioni termiche medio-alte per poter mantenere lo spessore murario al minimo, senza tuttavia dover dipendere da prodotti di altissima fascia che limiterebbero i risultati dell'indagine.

Strato isolante – La corretta scelta del materiale isolante da impiegare è il fattore più determinante nella questione. Chiaramente, per poter garantire uno spessore di parete minimo, l'utilizzo di un isolante dalle alte prestazioni è d'obbligo. Tuttavia, anche in questo caso non si è optato per il materiale top della gamma ma si è ritenuta una scelta migliore mantenersi su materiali più di largo utilizzo, maggiore reperibilità e minor costo. Sono dunque stati esclusi dalle possibilità materiali isolanti come i pannelli vacuum o l'aerogel, che possono garantire un elevatissimo isolamento termico anche per spessori minimi e, si è optato per pannelli in Poliuretano (PUR), più comuni ma

comunque garanti di ottime prestazioni.⁷ Nel caso specifico, sempre facendo riferimento alla normativa, è stato dimensionato un isolante con spessore di 5cm.

Intercapedine d'aria – Lo spessore dell'intercapedine d'aria varia fondamentalmente in base al tipo di ventilazione che si vuole realizzare e dipende in una certa misura anche dalla struttura di aggancio del rivestimento esterno che si sceglie di adottare. Affinché l'effetto camino possa attivarsi con successo all'interno della camera di ventilazione, sarà comunque necessario uno spessore non inferiore ai 4cm. Una volta scelto il tipo di struttura di ancoraggio per il rivestimento esterno, si potrà comprendere se sarà necessario ampliare lo spessore dell'intercapedine al fine di evitare che la suddetta struttura interferisca con il flusso d'aria. Un altro fattore rilevante al fine di determinare lo spessore della camera d'aria è costituito dalla planarità delle superfici che la contengono (nel caso specifico lo strato isolante e il rivestimento esterno): maggiore sarà la planarità, minore sarà il rischio di creare turbolenze indesiderate nel flusso d'aria. Nonostante in questa sede si sia deciso di non definire nel dettaglio la struttura di ancoraggio del rivestimento esterno, adotteremo come standard una camera di ventilazione dello spessore di 6cm, al fine di ottenere una prestazione termica adeguata e tenendo sempre presente che potrebbe rivelarsi necessario, in fase di progetto, ampliarne la dimensione.

Struttura di aggancio per il rivestimento esterno – Questa struttura viene installata direttamente in appoggio sul telaio strutturale e/o sullo strato resistente della parete ventilata. La maglia strutturale su

⁷ I materiali isolanti più comunemente utilizzati presentano valori di conducibilità termica intorno ai 0,04W/mK. Materiali come i pannelli vacuum (VIP) o l'aerogel garantiscono valori da 0,004 a 0,014W/mK, rappresentando in tal senso il top di

gamma. Il poliuretano (PUR) presenta un valore di 0,03W/mK, migliore dunque dei più comuni materiali isolanti, senza essere eccessivamente ricercato.

cui poi vengono agganciati gli elementi del rivestimento esterno viene posizionata all'interno dell'intercapedine d'aria. Poiché questa struttura è costituita da elementi puntuali, la sua presenza nella camera di ventilazione non andrà ad impedire l'effetto camino desiderato ma potrebbe creare delle turbolenze al suo interno diminuendone l'effetto.

Come abbiamo già sottolineato, dunque, a seconda della tipologia di struttura che si selezionerà in fase di progetto, si andrà di conseguenza a dimensionare lo spessore della camera d'aria. Nella nostra analisi ipotetica la struttura di aggancio è dunque situata all'interno della camera di ventilazione e non determina nessuno spessore aggiuntivo per il sistema parete.

Rivestimento esterno – Per ottenere lo spessore minimo di rivestimento esterno la scelta migliore cade sui materiali metallici, in quanto sono gli unici che garantiscono le necessarie proprietà di resistenza nonostante spessori molto ridotti.

Sul mercato sono presenti innumerevoli soluzioni per rivestimenti in materiali metallici, dai pannelli a singola lastra, prevalentemente di alluminio e acciaio trattati con varie lavorazioni, ai pannelli sandwich che abbinano al rivestimento metallico un'anima in materiale isolante che li rende più leggeri e ne migliora il comportamento termico.

Lo spessore di queste soluzioni varia principalmente in base alla forma data ai singoli elementi. Pannellature di forma scatolare possono raggiungere diversi centimetri di spessore mentre per le soluzioni a lastra piatta ci si può sempre mantenere su spessori inferiori ai 0,5cm. In questo caso si è dunque scelto di adottare una soluzione di pannellatura sandwich in alluminio a lastra piatta, con uno spessore di 0,4cm.

Tabella 12 – Stratigrafia di parete ventilata sottile.

Strato	Spessore cm	ρ Kg/m ³	λ W/mK	R m ² K/W
Intonaco calce e gesso	1,5	1800	0,90	/
Blocchi forati in laterizio	25	600	0,22	/
Pannelli PUR	5	150	0,03	/
Camera di ventilazione	6	1	/	0,04
Pannelli in alluminio	0,4	1900	1,33	/

Tabella 13 – Apporto di ogni strato sullo spessore totale della parete ventilata sottile.

STRATO	SPESSORE
Intonaco calce e gesso	1,5 cm
Blocchi forati in laterizio	25 cm
Pannelli PUR	5 cm
Camera di ventilazione	6 cm
Pannelli alluminio	0,4 cm
TOTALE	37,9 cm

Tabella 14 – Caratteristiche prestazionali totali della parete ventilata sottile.

Trasmittanza termica totale U_{tot}	0,33 W/m ² K
Massa superficiale totale	194 kg/m ²
Spessore totale	37,9 cm

La parete ventilata così composta, mantenendo il requisito di legge sui valori massimi di trasmittanza termica U, presenta dunque uno spessore complessivo di circa 38cm. Si tratta certamente di uno spessore molto ridotto, soprattutto in funzione delle prestazioni termiche che può offrire. Ribadiamo ancora però che tale spessore

complessivo potrebbe crescere di 1-2cm in base alle necessità di progettazione dettate dalla scelta della struttura di aggancio dei pannelli metallici.

5.1.2 Parete ventilata di medio spessore

Strato di intonaco interno – Anche in questo caso valgono quasi le stesse considerazioni fatte per lo studio della parete sottile. Tuttavia, supponendo ancora l'utilizzo di un generico intonaco dalle medie prestazioni, lo applicheremo questa volta con un spessore di 2cm andando così a rispecchiare la casistica più comune riscontrabile nelle opere già realizzate ed in quelle di nuova costruzione.

Muratura di tamponamento – Lo strato resistente lo realizziamo in questo caso tramite una muratura a singolo corso di blocchi forati in laterizio di spessore unitario pari a 30cm. Per questa soluzione si è optato per un laterizio dalle prestazioni termiche leggermente inferiori a quello proposto per il caso precedente: uno spessore maggiore di muratura, come abbiamo già visto, permette infatti di adottare componenti meno performanti dal punto di vista termico, rispettando comunque i requisiti imposti dalla legge.

Strato isolante – Anche in questo caso la scelta del materiale isolante è fondamentale per determinare lo spessore dello strato corrispondente. Potendo questa volta impiegare uno spessore di materiale maggiore, si è ritenuto opportuno fare riferimento ai materiali più comuni sul mercato dei materiali da costruzione; Anche se nella tabella riassuntiva facciamo riferimento all'adozione di pannelli in Polistirene espanso estruso (XPS), in realtà vi sono sul

⁸ Nella scelta del materiale isolante da impiegare, facciamo riferimento soprattutto al valore di conducibilità termica di ognuno. In questo caso scegliamo di applicare un materiale con λ pari a 0,04W/mK. Oltre al XPS, potremmo dunque adottare molti

mercato numerosi altri prodotti dalle prestazioni analoghe che potrebbero essere impiegati al loro posto, qualora ritenuti più consoni in fase di progettazione⁸. In questa soluzione, dunque, abbiamo dimensionato lo strato isolante con uno spessore di 6cm.

Intercapedine d'aria – Per quanto riguarda il dimensionamento della camera di ventilazione, valgono esattamente le stesse considerazioni fatte nel caso precedente.

Struttura di aggancio per il rivestimento esterno – Anche nel caso della struttura di aggancio, valgono le stesse prescrizioni già menzionate.

Rivestimento esterno – Potendo aumentare un poco lo spessore del rivestimento esterno, in questo caso abbandoniamo i materiali metallici usati in precedenza e ci rivolgiamo verso prodotti di tutt'altra fattura. Volendo posizionare la nostra scelta su componenti dallo spessore medio che oscilli tra 1cm e 3cm, avremmo una vasta gamma di opzioni da considerare. A partire dai classici materiali lapidei quali per esempio la pietra naturale, passando da materiali più ecologici come il legno, fino a materiali sintetici come i polimeri. Dunque, nel caso di una parete di medio spessore, potremmo ragionevolmente prevedere l'impiego di un rivestimento esterno in pietra naturale (spessore di circa 1cm) o per esempio in HPL (High Pressure Laminate) conosciuto anche come Formica, per uno spessore variabile fino a 2cm. Tra queste soluzioni, nell'esempio riportato in tabella abbiamo scelto di adottare una pannellatura in legno, dimensionando lo spessore in 2cm.

altri materiali quali il vetro cellulare, il polietilene, la lana di vetro o di roccia e varie fibre naturali.

Tabella 15 – Stratigrafia di parete ventilata di medio spessore

Strato	Spessore cm	ρ Kg/m ³	λ W/mK	R m ² K/W
Intonaco calce e gesso	2	1.800	0,90	/
Blocchi forati in laterizio	30	600	0,24	/
Pannelli XPS	6	38	0,04	/
Camera di ventilazione	6	1	/	0,04
Pannelli in legno	2	1.350	0,26	/

Tabella 16 – Caratteristiche prestazionali totali della parete ventilata di medio spessore.

Trasmittanza termica totale U_{tot}	0,34 W/m ² K
Massa superficiale totale	247 kg/m ²
Spessore totale	46 cm

Andando dunque ad agire sullo spessore di praticamente tutti gli strati componenti il sistema parete, la nostra soluzione a spessore medio presenta una dimensione finale complessiva di 46cm. Abbiamo dunque incrementato lo spessore della parete di ben 8cm dalla soluzione precedente, garantendo comunque prestazioni termiche invernali pressoché analoghe.

5.1.3 Parete ventilata spessa

Strato di intonaco interno – Poiché è molto raro, soprattutto nei casi di nuova costruzione, veder applicare strati di intonaco di spessore di 2cm, per realizzare la parete spessa si è deciso di non andare ad intervenire sullo spessore dello strato di intonaco, che pertanto verrà mantenuto nei 2cm già proposti nel caso precedente.

Muratura di tamponamento – Anche per quanto riguarda lo strato resistente, non andremo più ad intervenire sul suo spessore, in quanto si ritiene che prevedere una muratura di spessore superiore ai 30cm

non avrebbe particolare significato, da nessun punto di vista. Nonostante si adotti anche in questo caso una struttura di blocchi forati in laterizio a singola testa, scegliamo tuttavia di modificarne la qualità dal punto di vista della prestazione termica. Scegliendo quindi un prodotto dalle minori prestazioni si determina la necessità di aumentare in seguito lo spessore dello strato isolante, al fine di compensare la differenza e soddisfare comunque i requisiti di legge.

Strato isolante – Poiché andare a scegliere un materiale isolante caratterizzato da un valore di λ superiore a 0,04 W/mK avrebbe significato solo in condizioni di progetto molto particolari, abbiamo optato per continuare ad adottare il XPS precedentemente utilizzato. In questa soluzione, la differenza di spessore di materiale isolante applicato è giustificata, come già accennato, dall'impiego contemporaneo di materiali meno performanti nello strato resistente. Per questo motivo, a parità di prestazione termica, sarà necessario in questo caso applicare uno strato di 8 cm di XPS.

Intercapedine d'aria – Di nuovo, sul dimensionamento della camera di ventilazione, valgono le considerazioni già presentate precedentemente.

Struttura di aggancio per il rivestimento esterno – Anche per la struttura di aggancio, ci rifacciamo agli stessi principi già menzionati nei due casi precedenti.

Rivestimento esterno – Tra i materiali più spessi normalmente adottati per la realizzazione dei rivestimenti esterni, abbiamo individuato il cotto. È disponibile sul mercato una varietà di prodotti e componenti dalle forme più svariate, realizzati a tale scopo. Anche qui, analizzando il range disponibile, con pezzi di spessore variabile da 4 a 10 cm abbiamo optato per una soluzione intermedia che potesse

essere considerata verosimilmente impiegabile. Per questo motivo, in questo caso, optiamo per un rivestimento in cotto dallo spessore di 5cm.

Tabella 17 – Stratigrafia di parete ventilata spessa.

Strato	Spessore cm	ρ Kg/m ³	λ W/mK	R m ² K/W
Intonaco calce e gesso	2	1.800	0,90	/
Blocchi forati in laterizio	30	950	0,40	/
Pannelli XPS	8	38	0,04	/
Camera di ventilazione	6	1	/	0,04
Tavelle in cotto	5	1.500	0,2	/

Tabella 18 – Caratteristiche prestazionali totali della parete ventilata spessa.

Trasmittanza termica totale U_{tot}	0,34 W/m ² K
Massa superficiale totale	401 kg/m ²
Spessore totale	51 cm

Per aumentare ulteriormente lo spessore della parete rispetto a quello raggiunto nella soluzione a medio spessore, siamo quindi andati ad intervenire prevalentemente su due strati: lo strato isolante ed il rivestimento esterno. Mantenendo quindi inalterata la prestazione energetica totale del sistema, abbiamo realizzato una soluzione 5 cm più spessa, raggiungendo uno spessore totale di 51 cm.

5.2 SPESSORE DEL SISTEMA GRE_EN_S

Cominciamo le considerazioni sullo spessore del sistema GRE_EN_S ripartendo dallo schema della stratigrafia dei moduli, con i cinque strati principali che intervengono per la determinazione dello spessore

totale riassunti in Tabella 19 – Spessori della stratigrafia del sistema GRE_EN_S.

Tabella 19 – Spessori della stratigrafia del sistema GRE_EN_S.

Doppia lastra in gesso rivestito, con barriera al vapore	2,50 cm
Telaio in acciaio zincato	7,50 cm
Lastra in cemento fibrorinforzato	1,25 cm
Telaio in acciaio zincato	6,60 cm
Moduli vegetati	3,50 cm
TOTALE	21,35 cm

Il dato che emerge dalla tabella è senza dubbio sorprendente, tuttavia questo spessore di soli 21,35 cm non deve trarci in inganno: così come per l'analisi sul peso, anche per questo studio dovremo prendere in considerazione lo spessore aggiunto dovuto alla crescita della vegetazione impiantata nei moduli vegetati.

Lo spessore delle piante è da più punti di vista un elemento fondamentale per le prestazioni del sistema parete, senza il quale questo modulo non potrebbe garantire le performance per cui è stato progettato.

Lo spessore delle piante tuttavia, così come già visto per il loro peso, non è costante ma dipende in larga parte dalla tipologia di vegetali che si andranno ad inserire.

Una volta inserite, queste piante cresceranno in base alle condizioni ambientali ed alle proprie caratteristiche genetiche. A periodi di crescita si alterneranno presumibilmente periodi di potatura in seguito ai quali lo spessore risulterà inevitabilmente minore.

In base anche a queste considerazioni il team di studio che si sta occupando di monitorare le prestazioni del modulo realizzato presso l'Environment Park di Torino ha misurato lo spessore totale del sistema nel caso in cui vengano piantati in facciata esemplari di *Lonicera Nitida*.



Figura 31 – Monitoraggio della crescita dello strato vegetato.

La misurazione così effettuata ha permesso quindi di ottenere un dato più preciso sul reale spessore del sistema, posizionandolo su valori che possono spaziare da circa 34 cm a più di 50 cm.

5.3 CONCLUSIONI SUL RAFFRONTO

In questo capitolo abbiamo analizzato la rilevanza dello spessore in fase di progettazione, posa in opera e durante la vita utile di un sistema parete, prendendo in considerazione due casi studio: la parete ventilata ed il sistema GRE_EN_S.

Analizzando tre possibili soluzioni di parete ventilata dalle prestazioni differenti, abbiamo potuto sottolineare come la varietà di soluzioni,

soprattutto in termini di materiali, possa garantire una certa libertà di design ai progettisti.

Abbiamo descritto tre possibili soluzioni di parete ventilata, una per così dire sottile, circa 38 cm, una di medio spessore, 46 cm ed una di spessore più elevato, 51 cm. Come condizione iniziale ci eravamo anche posti l'obiettivo di non prevedere l'impiego di materiali ad altissima performance, al fine di attenerci alla media dei materiali utilizzati normalmente per il costruito.

I tre dati ottenuti ci indicano come nella maggioranza dei casi una parete ventilata posata in opera in modo da rispettare i requisiti di comfort termico per gli ambienti interni sia in periodo invernale che estivo, presenterà uno spessore medio di circa 45 cm.

Inoltre, nonostante gli sforzi fatti per cercare di progettare una parete ventilata il più sottile possibile, il miglior risultato conseguibile tramite l'impiego di tecnologie comuni è arrivato ad uno spessore pari a poco meno di 38 cm. Nonostante tutto, anche in questo caso la performance della miglior parete ventilata si pone ben al di sotto delle prestazioni offerte dal sistema GRE_EN_S.

La parete a moduli vegetati infatti, presenta uno spessore minimo di 21,35 cm, al quale si dovrà aggiungere lo spessore della vegetazione, la quale, a seconda delle condizioni, potrà portare lo spessore totale perfino al di là dei 50 cm. Nonostante ciò, con una adeguata manutenzione delle piante (potatura) si potrà mantenere il loro spessore intorno ai 16-17 cm, mantenendo così il sistema parete con uno spessore di circa 38 cm, ossia lo stesso dato restituito dalla miglior soluzione di parete ventilata.

In termini generali possiamo dunque concludere le nostre considerazioni sullo spessore di un sistema parete dicendo che il

sistema GRE_EN_S si presenta alla base notevolmente più sottile della miglior soluzione di involucro tradizionale normalmente rintracciabile sul mercato. Tuttavia, la crescita delle piante deve essere tenuta sotto controllo attraverso la potatura, al fine di permettergli di contribuire alle altre prestazioni senza aumentare eccessivamente lo spessore del sistema.

6 COMPORTAMENTO TERMICO INVERNALE

6.1 GLI SCAMBI DI MASSA E DI ENERGIA

Il 57% del consumo di energia in ambito residenziale è destinato al riscaldamento nel periodo invernale. In Italia gli edifici costituiscono la prima fonte di inquinamento antropogenico per CO₂ con un'emissione globale nel 1990 di 519,5 milioni di tonnellate annue. Se il clima fosse temperato e costante, la temperatura interna degli edifici potrebbe essere uguale a quella esterna dell'ambiente. Dato che questo non avviene, si rende necessario controllare i flussi di energia e di massa che continuamente vengono scambiati tra l'ambiente esterno e quelli interni.

Il calore si propaga attraverso tre processi distinti: per conduzione, per convezione e per irraggiamento. Il fenomeno della **conduzione** avviene quando il flusso di calore si propaga per diretto contatto tra materiali che si trovano a temperature diverse. Quando due corpi aventi temperature differenti si trovano a contatto, per raggiungere l'equilibrio termico, quello con la temperatura maggiore tende a cedere energia sotto forma di calore a quello con la temperatura minore, generando così un flusso di calore.

La quantità di calore che si propaga attraverso un corpo dipende dalle sue caratteristiche ed in particolare da quella che si definisce "conduttività termica". Il tempo di propagazione del calore dipende invece principalmente dalla differenza di temperatura tra i corpi: maggiore la differenza, più veloce sarà il fenomeno di conduzione.

Questa fenomenologia è assolutamente rilevante per i sistemi di facciata, in quanto ogni chiusura verticale esterna possiederà sempre una superficie interna ed una esterna che si troveranno

necessariamente in condizioni termiche differenti a seconda del periodo dell'anno. Nel periodo invernale, la superficie interna si troverà ad una temperatura sicuramente maggiore di quella esterna e questo genererà un flusso termico per conduzione dall'interno dell'edificio verso l'esterno. Al contrario, nel periodo estivo il flusso di calore presenterà una dinamica dell'esterno (superficie a temperatura maggiore) verso l'interno.

Parlando di **convezione**, facciamo invece riferimento ad un trasferimento di calore che avviene tra un corpo solido ed uno gassoso. Anche in questo caso la quantità di calore trasmesso dipende dalla differenza di temperatura ma entrano in gioco anche la velocità dell'aria incidente sulla superficie del solido e l'ampiezza della superficie di contatto. Per quanto riguarda i sistemi di facciata, abbiamo scambi per convezione tra le superfici della parete e le masse d'aria interna ed esterna: per fare un esempio, il vento che colpisce una facciata, "assorbe" calore dall'edificio per convezione.

Infine, l'**irraggiamento** è il trasferimento di calore per mezzo di onde elettromagnetiche attraverso l'aria o il vuoto. Così, un sistema di facciata subirà contemporaneamente un flusso di calore per irraggiamento, soprattutto da parte del sole, sulla propria superficie esterna ed in secondo luogo da eventuali fonti di calore interne, sulla propria superficie interna (impianti di riscaldamento, persone, apparecchiature elettriche, ecc...).

Nel periodo invernale tutti i sistemi di facciata tendono quindi a ricevere calore dall'ambiente interno per irraggiamento e convezione ed a trasmetterlo verso l'esterno, prevalentemente per conduzione

lungo la stratigrafia interna e per convezione ed irraggiamento dalla superficie esterna all'ambiente esterno.

Come già accennato, la caratteristica di un materiale che indica la quantità di calore che lo attraversa si chiama "**conduttività termica**" propria e viene indicata con la lettera greca " λ ". La sua unità di misura è il Watt al metro per grado Kelvin (W/mK) ed indica esattamente la quantità energia (sotto forma di calore) che attraversa un metro quadro di materiale spesso un metro (cioè un m³) con una differenza di temperatura di un grado Kelvin tra le superfici, in un determinato intervallo di tempo⁹.

Da questo si evince che più il valore di conduttività termica di un materiale sarà basso, maggiore sarà il suo potere termoisolante. Convenzionalmente si considera dunque come "isolante" un materiale che presenti una conduttività termica $\lambda \leq 0,065$ W/mK.

È importante notare anche come l'aria in quiete, a temperatura ambiente, presenti una conduttività $\lambda = 0,026$ W/mK costituendosi dunque come uno dei migliori materiali isolanti. Contemporaneamente, l'acqua in quiete a temperatura ambiente presenta per lo stesso parametro un valore di 0,6. Questi due dati permettono di fare una considerazione importante: il potere isolante di un materiale varia drasticamente quando questo è asciutto o bagnato, ossia le sue prestazioni isolanti sono inversamente proporzionali al suo grado di umidità.

Dal valore di conduttività termica si può derivare anche il cosiddetto valore di **resistenza termica R**, il quale rappresenta a sua volta la

⁹ La scala Kelvin è una scala di misurazione della temperatura che prevede lo zero, chiamato zero assoluto, ad una temperatura di circa -273 °C (scala Celsius). Poiché

l'intervallo di temperatura tra 1°K e l'altro è il medesimo della scala Celsius, 273°K corrispondono a 0°C e così via.

capacità di un materiale di frenare il flusso di calore che lo attraversa. Per quanto riguarda i materiali omogenei, la resistenza termica sarà dunque uguale al rapporto tra lo spessore del materiale espresso in metri e la sua conduttività termica e verrà espressa in m^2K/W . Chiaramente, maggiore sarà il valore di resistenza termica di un materiale, minore sarà il flusso di calore che potrà attraversarlo per unità di tempo. Il calcolo della resistenza termica R permette di capire, una volta definita la quantità di calore che si è disposti a disperdere¹⁰, quale spessore di materiale sarà necessario per soddisfare tale requisito.

Tuttavia, dato che come abbiamo già visto, la conduzione non è l'unico modo in cui si trasmette il calore, per determinare la resistenza di una parete non basterà sommare le resistenze dei suoi strati costituenti ma bisognerà anche considerare le resistenze termiche sulle due superfici, esterna e interna, dette "resistenze liminari". Come abbiamo visto, nel periodo invernale il flusso di calore passerà per convezione ed irraggiamento dall'aria dell'ambiente interno alla superficie interna e dalla superficie esterna all'aria esterna. Le resistenze opposte dalle superfici della parete al passaggio del flusso termico dall'aria interna e all'aria esterna sono classificate rispettivamente come resistenza superficiale interna ed esterna e vengono indicate come R_{si} e R_{se} . I valori di R_{si} e R_{se} sono stati quantificati e definiti dalla normativa UNI EN ISO 6946 e da lì possono essere estratti per calcolare la resistenza totale di un sistema di facciata.

Al fine però di dare un valore specifico alle prestazioni termiche di un sistema parete viene introdotta la **trasmissione termica U**. Questo

parametro rappresenta la quantità di calore che attraversa un m^2 di parete per una differenza di un grado tra le due superfici, nell'unità di tempo. Viene espressa in W/m^2K e di conseguenza, minore è il valore di U , minore sarà la dispersione di calore verso l'esterno. La trasmittanza viene calcolata a partire dalla resistenza totale della parete, per cui può essere utilizzata indipendentemente per pareti omogenee o eterogenee. Anche per questo motivo, è una grandezza che viene utilizzata per confrontare le prestazioni termiche complessive di sistemi di parete differenti.

A parte gli scambi di calore, tra interno ed esterno degli edifici avvengono continuamente anche scambi di massa, principalmente sotto forma di vapore acqueo. Nel periodo invernale, infatti, l'aria presente negli ambienti interni è più calda ed umida rispetto a quella esterna. Il vapore acqueo che si produce negli spazi interni, comportandosi come un gas si espande occupando tutto il volume disponibile fino a raggiungere le pareti di involucro, attraverso le quali si espande ulteriormente verso l'esterno.

Poiché abbiamo già accennato a quanto l'umidità incida negativamente sulla conduttività termica dei materiali, è di fondamentale importanza che il sistema di facciata sia in grado di permettere al vapore acqueo di uscire senza condensare né sulla propria superficie (condensazione superficiale) né al proprio interno (condensazione interstiziale). Infatti, se durante il proprio processo di vasione, il vapore acqueo incontrasse una superficie "fredda"¹¹ (per esempio uno degli strati costituenti la facciata) allora tenderebbe a condensare al contatto con quella superficie; la condensa appena

¹⁰ In ogni caso una certa quantità di calore verrà dispersa, nonostante una ottima progettazione dell'involucro.

¹¹ In questo caso si fa riferimento alla temperatura di Rugiada, ovvero la temperatura a cui il vapore acqueo condensa in acqua. Il valore di questa soglia dipende principalmente dalla temperatura interna e dall'umidità relativa.

formatasi andrebbe poi a stagnare all'interno del muro favorendo l'insorgere di muffe, abbassando il potere isolante della parete e velocizzandone il degrado (analizzeremo con maggiore dettaglio questo aspetto nel merito dell'analisi sulla durata dei sistemi di parete, fra qualche capitolo).

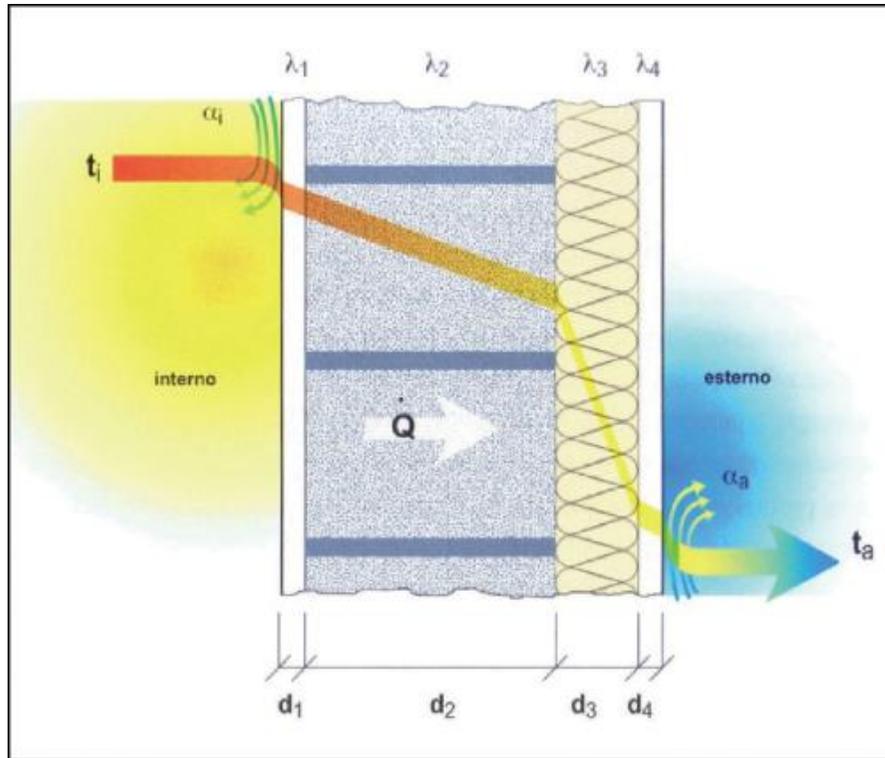


Figura 32 – Dispersione del calore attraverso una parete esterna tramite i fenomeni di conduzione e di convezione. (fonte: fondazioneanmarino.sm).

Per valutare le prestazioni dei singoli materiali in questo frangente, viene dunque introdotto il coefficiente di **resistenza alla diffusione del vapore acqueo** μ . Questo parametro rappresenta la capacità di un materiale di opporre resistenza alla propagazione del vapore acqueo

al proprio interno e si può ricavare dal rapporto tra il fattore di permeabilità al vapore proprio dell'aria e quello del materiale stesso. Si tratta di un coefficiente adimensionale ed un valore di $\mu = 1$ significa che il materiale permette il passaggio del vapore tanto quanto farebbe uno strato d'aria di uguale spessore. Di conseguenza, maggiore sarà il valore di μ per un materiale, minore sarà la quantità di vapore che potrà passarli attraverso, per unità di tempo.

La capacità di una parete di lasciarsi attraversare dal vapore acqueo senza farlo condensare è dunque uno dei suoi requisiti fondamentali e dipende non solo dal tipo di materiali che vengono impiegati per la realizzazione della stratigrafia ma anche dall'ordine in cui questi vengono posati in opera.

In periodo invernale, vista la differenza di temperatura tra ambiente interno ed ambiente esterno, è chiaro che all'interno della parete che li separa la temperatura andrà diminuendo progressivamente, di strato in strato, dall'interno dell'edificio verso l'ambiente esterno. Allo stesso modo la pressione del vapore andrà diminuendo più o meno velocemente a seconda del μ dei vari strati. Ogni strato avrà dunque una propria temperatura ed un valore di pressione di saturazione del vapore.

La stratigrafia deve quindi essere studiata in modo tale che la pressione di vapore, procedendo verso l'esterno, scenda sempre più velocemente della temperatura, riuscendo così a giungere all'esterno senza condensare, disperdendosi nell'ambiente. Qualora invece la pressione di vapore scendesse più lentamente della temperatura (pressione di saturazione del vapore) allora vi sarebbe il rischio di condensazione. La stratigrafia del sistema di facciata deve quindi essere progettata in modo da soddisfare i requisiti di legge per la

trasmissione U, senza però creare problemi di condensazione superficiale o interstiziale.

6.2 QUADRO NORMATIVO

Per fronteggiare in maniera adeguata il problema del crescente inquinamento ambientale ed i conseguenti cambiamenti climatici che ne derivano, sono stati organizzati negli ultimi decenni diversi incontri tra nazioni che hanno avuto come risultato diretto la redazione di documenti in cui i firmatari si impegnavano ad ottenere determinati risultati nella riduzione dell'impronta antropogenica sull'ambiente entro periodi di tempo ivi concordati. Tuttavia, a parte la questione dei livelli di emissioni, un altro importante problema si è affacciato all'attenzione della comunità internazionale: quello dell'imminente esaurimento delle fonti di energia di origine fossile. La presa di coscienza di questo ulteriore problema anche in questo caso ha dato vita alla redazione di documenti nei quali i vari paesi, soprattutto per quanto riguarda l'Unione Europea, si impegnano ad incrementare le fonti di energia rinnovabile ed a promuovere il risparmio energetico.

Dopo aver valutato come il settore edile sia responsabile in Europa del 40% dei consumi di carburante e di quanto ampi siano i margini di riqualificazione energetica cui il settore può essere sottoposto, l'UE decide di aderire alle decisioni già prese a livello internazionale tramite la stesura della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia. Anche l'Italia, seguendo le prescrizioni dell'Europa, recepisce le norme tramite i decreti legislativi 192/2005 e 311/2006.

A seguire saranno poi emanate una serie di direttive, fondamentalmente derivanti dalle prescrizioni a livello europeo, quali:

- D.Lgs. 115 del 30 maggio 2008;

- D.L. 112 del 25 Giugno 2008;
- D.P.R. 59 del 2 Aprile 2009;
- D.M. 26 Giugno 2009;
- Legge 99/2009;
- D.Lgs. 28 del 3 Marzo 2011.

Un capitolo leggermente a parte è rappresentato invece dalla normativa riguardante gli sgravi fiscali, che si pone l'obiettivo di favorire gli interventi edilizi a scopo di riqualificazione energetica finanziandoli parzialmente. A questo proposito citiamo:

- Leggi 296/2006 e 244/2007;
- D.M. del 19 Febbraio 2007;
- D.M. del 7 Aprile 2008;
- D.M. del 11 Marzo 2008;
- D.M. del 6 Agosto 2009;
- **D.M. del 26 Gennaio 2010;**
- Legge 220 del 13 Dicembre 2010.

Per comprendere invece quali prestazioni un involucro edilizio debba garantire per soddisfare i requisiti di legge in merito, dobbiamo entrare nel dettaglio delle prescrizioni indicate della normativa.

6.2.1 Zone climatiche

Poiché le condizioni climatiche sono differenti a seconda delle aree geografiche, non sarebbe logico prevedere di adottare le stesse misure in contesti differenti. Per questo motivo, la normativa si preoccupa di creare una classificazione delle zone geografiche in base

ai gradi giorno¹² di ciascuna località. Vengono dunque definite sei fasce cui corrispondono altrettante zone climatiche. Ogni fascia viene denominata con una lettera identificativa che può variare dalla A alla F, dove la zona A rappresenta l'area climatica più mite, mentre la zona F costituisce l'area più rigida.

Tabella 20 – Prospetto delle zone climatiche e dei relativi gradi-giorno (GG). (art. 2 del DPR 412/1993)

Zona di Riferimento	Valore in Gradi-Giorno
Zona A	GG<600
Zona B	600<GG<900
Zona C	900<GG<1400
Zona D	1400<GG<2100
Zona E	2100<GG<3000
Zona F	GG>3000

6.2.2 Trasmittanza termica limite

Il requisito della trasmittanza termica limite è uno dei più importanti indicatori dell'efficienza energetica dell'involucro. I valori limite che i futuri interventi di costruzione del nuovo e di riqualificazione dell'esistente dovranno osservare sono indicati dalle tabelle dell'allegato I del D.Lgs. 311/2006. I progetti futuri dovranno quindi garantire l'adozione di sistemi con prestazioni termica, definite dal valore di trasmittanza termica U, tali da non superare mai i limiti previsti dalla legge.

¹² I gradi giorno sono definiti come la somma, in tutti i giorni di riscaldamento della località di tutte le differenze tra temperatura dell'ambiente interno (20°C) e temperatura media giornaliera dell'esterno.

Contemporaneamente, il D.M. 26/01/10 prevede dei valori limite ancora più restrittivi affinché coloro che intraprendono opere di costruzione del nuovo e riqualificazione dell'esistente possano usufruire di incentivi fiscali, fino ad un 55% della spesa. Di seguito presentiamo i valori previsti dalla legge per le strutture opache verticali.

Tabella 21 – Requisiti limite di U_{tot} per strutture opache verticali. (D.Lgs. 311/2006, D.M. 26/01/10).

Zona	D.Lgs. 311/2006	D.M. 26/01/10
A	0,62	0,54
B	0,48	0,41
C	0,40	0,34
D	0,36	0,29
E	0,34	0,27
F	0,33	0,26

6.2.3 Condensazioni superficiali ed interstiziali

Una delle previsioni della normativa riguarda il comportamento termoigrometrico dell'involucro, per cui la coibentazione dovrà essere realizzata in modo tale da evitare il formarsi di condensazioni superficiali o interstiziali. In particolare, le condensazioni superficiali non dovranno assolutamente verificarsi, mentre quelle interstiziali dovranno limitarsi alla quantità di vapore che sarà in grado di rievaporare nel tempo, senza quindi arrivare a degradare la chiusura verticale.

Gli studi termoigrometrici devono essere condotti per tutte le categorie di edifici elencate nel D.P.R. 412 in caso di:

- Nuova costruzione;
- Ristrutturazione integrale dell'involucro;
- Demolizione con ricostruzione dell'involucro;
- Ampliamento;
- Ristrutturazioni totali o parziali.

6.2.4 Prestazione energetica per la climatizzazione invernale

Oltre ai valori limite di trasmittanza termica dell'involucro, un altro fattore importante nella determinazione dei consumi energetici di un edificio è rappresentato dal consumo di energia primaria degli impianti per il riscaldamento. Anche in questo caso, la normativa fornisce degli indicatori, gli indici Epi e Epe che vengono espressi rispettivamente in kWh/m² x anno e kWh/m³ x anno. L'Epi rappresenta dunque il quantitativo di energia primaria richiesta per mantenere nel corso di un anno la temperatura di progetto negli ambienti interni. Tuttavia in questo caso, a parità di zona climatica, l'indicatore Epi presenta valori limite differenti a seconda del rapporto di forma dell'edificio, ossia del rapporto tra superficie di involucro e volume da riscaldare (S/V).

La normativa che fa riferimento ai calcoli degli indici di consumo di energia primaria è alquanto complessa e poiché in questa sede non andremo mai a prendere in considerazione tali indicatori, non riteniamo opportuno presentarla in maniera minuziosa.

6.2.5 Certificazioni energetiche

“La certificazione energetica è una procedura che permette di produrre un’attestazione della prestazione energetica dell’edificio

mediante uno o più descrittori di fabbisogno energetico calcolati secondo metodologie normalizzate” (norma UNI/TS 11300-1).

Le certificazioni energetiche sono uno strumento introdotto in Italia per recepire la normativa europea 2002/91/CE che a sua volta era stata redatta in risposta agli impegni presi a livello internazionale nell’ambito del famoso Protocollo di Kyoto. Rappresenta il principale strumento attraverso cui si monitora e censisce l’effettiva efficienza energetica degli edifici ed allo stesso tempo si incoraggia la consapevolezza negli utenti. Con le certificazioni energetiche viene introdotto sul mercato un parametro di valutazione dei consumi energetici che può spaziare da A⁺, per edifici a bassissimo consumo energetico, fino G, per edifici ad alto consumo. Poiché, come accennato, le certificazioni energetiche hanno anche lo scopo di aumentare la consapevolezza nei consumatori, queste devono obbligatoriamente presentare tutti i dati sul consumo energetico dell’edificio nei vari campi (riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria, ecc.) in maniera semplice ma dettagliata, non rinunciando a consigliare quali interventi sostenibili (anche a livello economico) potrebbero essere svolti per migliorare la prestazione rilevata al momento della certificazione.

Data l’importanza che questo nuovo strumento ha assunto, la normativa ha deciso di renderlo un requisito obbligatorio per praticamente qualsiasi intervento che possa modificare, anche minimamente, le prestazioni energetiche di un edificio. Allo stesso tempo, per favorire la consapevolezza degli utenti è stato reso obbligatorio fornirlo come allegato in tutti i contratti di compravendita e locazione di unità immobiliari. A questo proposito l’art. 13 del D.Lgs. 28/2011 rende obbligatorio per le agenzie immobiliari mostrare in

ogni caso l'indice di prestazione energetica negli annunci di compravendita o locazione di unità immobiliari.

Al di là dello strumento reso obbligatorio dalla normativa, vi sono poi altri tipi di certificazioni energetiche facoltative che rappresentano oggi un marchio di qualità aggiuntivo per le unità immobiliari che le ottengono. È il caso di certificazioni quali ad esempio CasaClima, PassivHaus e Minergie.

6.3 COMPORTAMENTO TERMICO INVERNALE DI PARETE VENTILATA

Il comportamento termico di una parete ventilata nel periodo invernale è una delle principali preoccupazioni del progettista, in quanto, come abbiamo visto, si riferisce anche ad alcuni dei più importanti requisiti imposti dalla normativa. È proprio riferendoci alla normativa vigente, dunque, che andremo ad analizzare le possibilità prestazionali di un sistema di parete ventilata.

Possiamo individuare in questo senso tre casistiche rappresentative: la soluzione di parete che rispetti i requisiti del Decreto Ministeriale del 26 Gennaio 2010, un sistema che invece faccia riferimento ai criteri meno restrittivi del Decreto Legislativo 311 del 2006, od un elemento che si ponga al di fuori dei limiti normativi, risultando quindi non a norma ma comunque rappresentativo della maggioranza del costruito in Italia.

In questo caso, il parametro di riferimento per la nostra analisi sarà la trasmittanza termica totale U_{tot} della parete, che come abbiamo accennato rappresenta il requisito fondamentale dal punto di vista della prestazione termica invernale del sistema.

Le pareti ventilate che andremo ad analizzare saranno sempre costituite dai sei strati principali di riferimento presentati

precedentemente: lo strato interno di regolarizzazione, lo strato resistente, lo strato isolante, la camera di ventilazione, la struttura di aggancio del rivestimento esterno ed infine il proprio rivestimento esterno.

Tuttavia, è necessario sottolineare come non tutti gli elementi elencati contribuiscano in maniera significativa alle prestazioni termiche della facciata nel periodo invernale.

Camera di ventilazione – La camera di ventilazione agisce sul comportamento termico della parete soprattutto per quanto riguarda la diffusione del vapore: la ventilazione naturale impedisce il verificarsi di fenomeni di condensazione interstiziale del vapore acqueo. Qualora si trattasse di una camera d'aria sigillata, con aria immobile, questa assumerebbe un comportamento analogo a quello di uno strato isolante, isolando termicamente l'ambiente interno dall'esterno. Poiché tuttavia la camera di ventilazione è per definizione aperta, al fine di raccogliere l'aria esterna e sfruttarne il movimento per migliorare le proprie prestazioni alla diffusione del vapore, questo elemento non esercita una particolare influenza sulla trasmittanza termica totale della parete, per cui lo considereremo ininfluente al fine di soddisfare il requisito.

Struttura di aggancio del rivestimento esterno – La struttura di ancoraggio del rivestimento esterno non fornisce alcun apporto, né positivo né negativo alle prestazioni termiche della parete, per cui sarà considerata a sua volta ininfluente ai fini dell'analisi.

Rivestimento esterno – Anche il rivestimento esterno, separato dal resto della stratigrafia per mezzo della camera d'aria, a sua volta non partecipa in maniera significativa alla definizione delle prestazioni di trasmittanza termica del sistema parete, in quanto il calore disperso

dalla parete viene per gran parte raccolto dall'aria in movimento nella camera di ventilazione e portato all'esterno attraverso le griglie di uscita. Per questo motivo, anche la scelta del materiale di rivestimento della facciata risulta praticamente ininfluenza: qualsiasi materiale venga scelto per il rivestimento esterno, non andrà a modificare il valore di U_{tot} della parete.

6.3.1 Parete ventilata a norma del D.Lgs. 311/2006

Il decreto stabilisce come requisito minimo per le chiusure verticali opache in zona climatica di fascia E un valore di trasmittanza termica $U_{tot} \leq 0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$. Vediamo dunque di seguito un esempio di parete ventilata che può soddisfare questo parametro.

Strato di intonaco interno – Esiste sul mercato una varietà di miscele per intonaco dalle caratteristiche termoisolanti, studiate apposta per migliorare le prestazioni di pareti che non soddisfano i requisiti di legge. L'impiego di questi prodotti è però da considerarsi più adeguato nell'ambito di interventi sul costruito, dove la stratigrafia della parete sia già definita e si rendano possibili solo minimi interventi. Nel caso di nuova costruzione, sarà invece possibile assegnare il compito dell'isolamento termico agli elementi a ciò preposti (per esempio lo strato isolante), permettendo l'impiego di un normalissimo strato di regolarizzazione con conducibilità termica $\lambda = 0,9 \text{ W/mK}$ per uno spessore di 2cm.

Muratura di tamponamento – Lo strato resistente della muratura rappresenta uno degli elementi più importanti dal punto di vista del comportamento termico. In particolare, le caratteristiche più importanti in tal senso saranno la massa volumica e la conducibilità termica. La massa volumica permetterà di ottenere livelli adeguati di inerzia termica (ossia la capacità di sfasare a livello temporale la

diminuzione della temperatura interna rispetto a quella esterna), mentre la conducibilità termica ci dirà quanto calore verrà disperso dall'interno verso l'esterno. Per lo strato resistente opteremo quindi per una normale muratura di tamponamento da 25cm di blocchi forati in laterizio con una conducibilità termica $\lambda = 0,33 \text{ W/mK}$ ed una massa volumica pari a 800 kg/m^3 .

Strato isolante – Lo strato isolante è certamente l'elemento più importante di questa analisi: si tratta infatti del componente che maggiormente influisce sulla prestazione termica della parete. Dovendo ottenere valori di $U_{tot} < 0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$, dovremo fare ricorso a quella fascia di materiali isolanti che attestano il proprio valore di λ intorno agli $0,04 \text{ W/mK}$. Nel caso specifico possiamo fare riferimento a pannelli in polistirene espanso estruso (XPS), posati per uno spessore totale di 8cm.

Tabella 22 – Quadro sinottico di parete ventilata tipo, a norma di D.Lgs. 311/2006.

Strato	Spessore cm	P Kg/m ³	μ	C J/kg°C	λ W/mK	R m ² K/W
Strato liminare interno	/	/	/	/	/	0,13
Intonaco calce e gesso	2	1.800	11	840	0,90	/
Blocchi in laterizio	25	800	10	1.000	0,33	/
Pannelli XPS	8	38	70	1.450	0,40	/
Camera di ventilazione	6	1	1	1.000	/	0,04

Tabella 23 – Caratteristiche prestazionali della parete ventilata a norma di D.Lgs 311/2006.

Spessore minimo parete	41 cm
Peso minimo parete	239 kg/m ²
Trasmittanza termica totale U_{tot}	0,339 W/m²K

6.3.2 Parete ventilata a norma del D.M. 26/01/10

Per quanto stabilito dal Decreto Ministeriale del 26 Gennaio 2010, il valore di U_{tot} della parete ventilata dovrà risultare, in zona climatica di fascia E, uguale o inferiore al limite massimo di 0,27 W/m²K. Vediamo dunque più nel dettaglio come potrebbe configurarsi una soluzione in grado di rispettare tale requisito.

Strato di intonaco interno – Anche in questo caso saranno valide le stesse considerazioni fatte nell'esempio precedente, per cui scegliamo di impiegare nuovamente la medesima miscela di intonaco di calce e gesso, in modo da mantenerci su una linea di prodotti dalle prestazioni abbastanza comuni. Lo strato di regolarizzazione possiederà dunque conducibilità termica $\lambda = 0,9$ W/mK e verrà applicato per uno spessore di 2 cm.

Muratura di tamponamento – Per quanto concerne lo strato resistente, si è scelto di impiegare una soluzione analoga alla precedente, in generici blocchi di laterizio. Tuttavia, dovendo raggiungere migliori livelli di U_{tot} si rende necessario optare per elementi che presentino prestazioni termiche migliori. In questo caso dunque, impieghiamo blocchi più leggeri, dal peso di 600kg/m³ per uno spessore totale di 25cm. Anche la conducibilità termica, che per questi elementi può variare a seconda della miscela di impasto dei blocchi, è stata assunta maggiormente favorevole, con un valore pari a 0,29 W/mK.

Strato isolante – Per questa soluzione, dovendo raggiungere un miglior livello di prestazione termica, rispetto all'esempio precedente abbiamo bisogno di valori di λ minori. Per questo motivo, senza andare ad optare per materiali ad altissime prestazioni, ci rivolgeremo ad un materiale che pur essendo facile da reperire, presenta ottime prestazioni. Lo strato isolante sarà così costituito da pannelli in schiuma poliuretana (PUR) per uno spessore di 8 cm, con conducibilità termica pari a 0,03 W/mK.

Tabella 24 – Quadro sinottico di parete ventilata tipo, a norma D.M. 26/01/10.

Strato	Spessore cm	P Kg/m ³	μ	C J/kg°C	λ W/mK	R m ² K/W
Strato liminare interno	/	/	/	/	/	0,13
Intonaco calce e gesso	2	1.800	11	840	0,90	/
Blocchi in laterizio	25	600	10	1.000	0,29	/
Pannelli in PUR	8	150	5	1.000	0,03	/
Camera di ventilazione	6	1	1	1.000	/	0,04

Tabella 25 – Caratteristiche prestazionali totali della parete ventilata a norma D.M. 26/01/10.

Spessore minimo parete	41 cm
Peso minimo parete	200 kg/m ²
Trasmittanza termica U_{tot}	0,269 W/m²K

Gli esempi fin qui presentati ci permettono di vedere chiaramente quali siano alcuni dei fattori che influenzano le prestazioni termiche di

una facciata. Le due soluzioni precedenti, infatti, a parità di spessore presentano prestazioni di trasmittanza termica ben differenti. Questo dato ci indica come uno dei fattori più influenti nella progettazione sia costituito dalla scelta accurata dei materiali. A questo punto, risulta abbastanza evidente che sarebbe piuttosto semplice prevedere una soluzione di facciata meno performante, applicando materiali e componenti non altrettanto efficaci.

6.4 COMPORTAMENTO TERMICO INVERNALE GRE_EN_S

Per quanto riguarda la valutazione delle prestazioni termiche del VGS applicato su pareti di riferimento, sono state portate avanti ampie campagne di monitoraggio su di una cella di prova esterna, su mock up ed in laboratorio. La cella di prova è stata realizzata a Torino, presso l'Environment Park: si tratta di un box (2x1.8x1.8 m) che presenta una parete sud (2x1.8m) divisa in due porzioni: una parete verde costituita da nove moduli vegetati ed un muro rivestito in listelli di legno convenzionale.

Dopo un anno di misurazioni, si è passati a realizzare un campione di facciata a scala reale (2,5 x 4,0 x 2,9 m), anch'esso realizzato con due moduli distinti: una parte completamente ricoperta da moduli vegetati ed una parete rivestita in listelli di legno convenzionale.

La Tabella 26 – Stratigrafia del sistema parete GRE_EN_S. ci mostra gli strati principali che compongono la frazione di mock-up rivestita dai moduli vegetati utilizzata per le misurazioni.

Il collocamento del campione si è basato su uno studio preliminare al fine di tener conto di alcuni aspetti ambientali fondamentali, come l'orientamento od i venti prevalenti. L'orientamento lungo l'asse Est-Ovest è stato assunto come requisito importante al fine di studiare lo

sviluppo del fogliame e le prestazioni termiche in condizioni estreme, comparando i risultati ottenuti sulla facciata Nord con quelli relativi alla facciata Sud. Un altro requisito imposto per la selezione del luogo è stata la disponibilità di un circondario con pochi ostacoli (edifici e vegetazione), al fine di minimizzare gli effetti mitiganti creati da aree densamente edificate.

Tabella 26 – Stratigrafia del sistema parete GRE_EN_S.

Lastra in gesso rivestito con barriera al vapore	1,20 cm
Telaio in acciaio zincato	7,50 cm
Doppio strato isolante in pannelli di XPS	8,00 cm
Camera di ventilazione	5,00 cm
Telaio in acciaio zincato	6,60 cm
Moduli vegetati	4,00 cm

Diversi parametri sono stati continuamente monitorati:

- le temperature delle superfici interna ed esterna;
- temperature dell'aria interna ed esterna;
- flussi di calore che attraversano le pareti;
- radiazione solare incidente sul piano verticale della facciata.

Per quanto riguarda il comportamento termico invernale dunque, attraverso i dati raccolti durante le due distinte campagne sono state calcolate la trasmittanza termica e la conduttanza della parete.

La camera d'aria. Un aspetto importante di questa tecnologia che, come per le pareti ventilate, consente di ridurre la trasmittanza termica del sistema è la presenza di un'intercapedine tra i moduli vegetati e la parete stessa. Al fine di analizzare in dettaglio gli effetti termici dovuti alla presenza dell'intercapedine, alcune termocoppie

sono state posizionate nella camera d'aria, delimitata dai box modulari su un lato e dallo strato isolante sul lato opposto.

Come mostrato in Figura 33 ed in Figura 34, la camera d'aria può mantenere una temperatura maggiore della temperatura superficiale e la differenza è di circa 8°C per la facciata sud, e 3°C per la facciata nord. L'intercapedine d'aria funziona a tutti gli effetti come uno strato isolante supplementare.

L'isolante. Come già visto in precedenza, oltre all'intercapedine d'aria, il modulo prevede l'inserzione, all'interno della stratigrafia, di un pannello isolante atto a rinforzare la prestazione termica del sistema parete. Come per i sistemi di parete ventilata, si può prevedere l'utilizzo di un qualsiasi tipo di isolante omogeneo che sia disponibile in pannelli o materassini.

Per il monitoraggio delle prestazioni quivi riportate, tuttavia, si è optato per l'utilizzo di pannelli in XPS per uno spessore totale di 8 cm. In seguito si è deciso di sostituire il XPS con pannelli in Sughero per ottenere una prestazione migliore in termini di LCA ma non siamo in possesso dei dati di comportamento termico relativi all'utilizzo di questo materiale.

Lo strato vegetale. Dai dati registrati sulla cella di prova e soprattutto sul mock-up è interessante sottolineare la differenza di trasmittanza e conduttanza rilevata tra le due pareti: i valori riscontrati per il VGS sono nettamente inferiori rispetto a quelli della parete rivestita in legno, il che conferma come la presenza di uno strato vegetale abbia effettivamente una influenza positiva sulla perdita di calore del sistema ed aumenti la resistenza superficiale della parete.

Poiché infatti la resistenza superficiale interna era la stessa sia nel caso della parete normale che del sistema GRE_EN_S (spazi interni identici,

stessa temperatura e medesimo sistema di controllo), la differenza di prestazione risulta attribuibile alla presenza di vegetazione, la quale è in grado di ridurre la velocità del vento e di diminuire notevolmente lo scambio termico per convezione tra la parete stessa e l'ambiente esterno: l'adozione di un VGS consente dunque di ridurre la trasmissione del calore dalla facciata all'ambiente esterno grazie all'aumento della resistenza superficiale esterna.

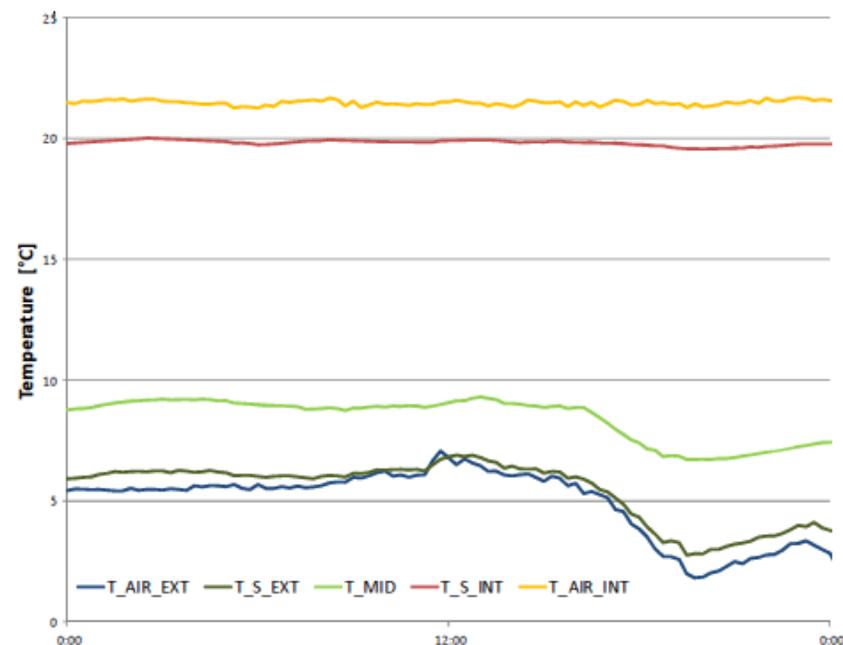


Figura 33 – Temperature del sistema GRE_EN_S esposto a Nord in inverno.

Questi dati indicano come nonostante la presenza di piante possa agire da schermo all'apporto di calore per irraggiamento solare sulla facciata (ombreggiando la facciata), esse allo stesso tempo agiscono da schermo alla dissipazione del calore attraverso la parete.

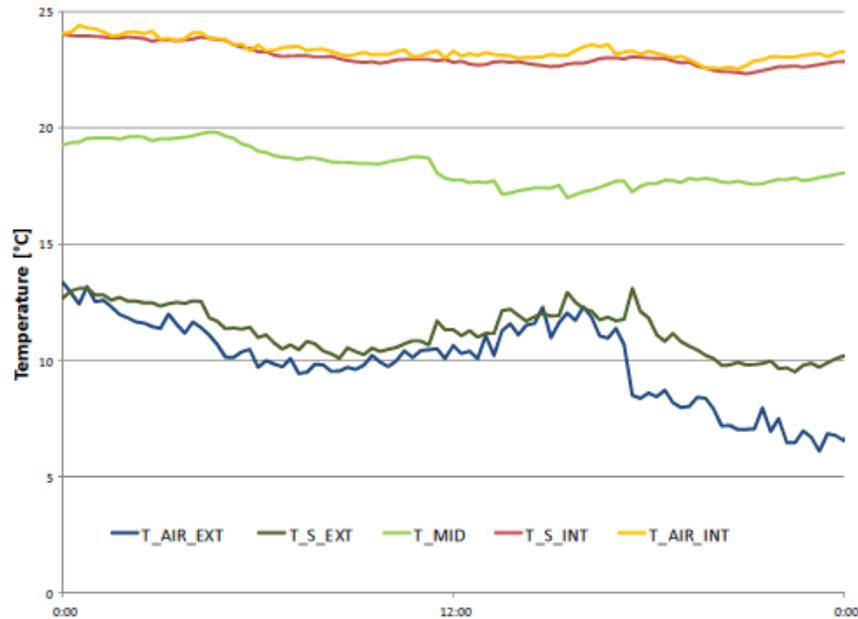


Figura 34 – Temperature del sistema GRE_EN_S esposto a Sud in inverno.

Sorprendentemente, le misurazioni effettuate su due tipi differenti di specie vegetali utilizzate per il rivestimento esterno non hanno rilevato differenze significative in quanto alle prestazioni termiche, nonostante fossero caratterizzate da valori differenti di LAI (Leaf Area Index).

I dati raccolti ci permettono di considerare lo strato vegetale esterno come uno strato isolante omogeneo con coefficiente di conducibilità termica λ pari a 0,04 W/mK, dello spessore di 5 cm.

La prestazione termica viene quindi garantita prevalentemente da tre elementi: lo strato isolante, l'intercapedine d'aria ed i moduli vegetati collocati all'esterno.

Attraverso le misurazioni effettuate sul mock-up, è stato possibile determinare la prestazione termoisolante del sistema GRE_EN_S, quantificata in un $U = 0,29 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Tale valore di trasmittanza termica permette al sistema parete GRE_EN_S di porsi ampiamente al di sotto dei limiti di trasmittanza imposti dalla normativa per la zona climatica considerata.

Tuttavia, la prestazione termica invernale non risulta sufficiente per rispettare il valore limite imposto dal D.M. 26/01/01 per l'ottenimento di finanziamenti governativi a parziale copertura degli oneri di realizzazione.

Tabella 27 - Caratteristiche prestazionali totali del sistema parete GRE_EN_S.

Spessore medio parete	38 cm
Peso minimo parete	118 kg/m ²
Trasmittanza termica U_{tot}	0,29 W/m²K

6.5 CONCLUSIONI DEL RAFFRONTO

Abbiamo visto in questo capitolo come con una progettazione oculata sia possibile realizzare delle pareti ventilate ad alte prestazioni da un punto vista di comportamento termico invernale, in grado di soddisfare i limiti imposti dal D.Lgs. 311.

Tuttavia, non solo è possibile diminuire la dispersione termica al di sotto dei requisiti imposti dal decreto legislativo ma è possibile altresì salire a livelli di prestazione termica tali da consentire ai costruttori di rispettare anche i requisiti imposti per l'ottenimento di finanziamenti di supporto alla realizzazione delle opere.

Durante il periodo invernale, le pareti ventilate possono dunque essere in grado di garantire prestazioni termiche all'altezza dei requisiti di legge e delle necessità degli utenti. Tuttavia, è bene sottolineare come le prestazioni migliori vengano garantite in questi esempi da una parete ventilata costituita da componenti non particolarmente comuni nel panorama del costruito in Italia.

Nonostante le possibili perplessità iniziali sugli effetti della vegetazione in facciata, i dati raccolti sulle prestazioni termiche in periodo invernale del sistema GRE_EN_S mostrano come l'utilizzo in facciata di specie vegetali distinte (devono comunque essere di tipo sempreverde) aumenti spiccatamente la resistenza superficiale della parete, indipendentemente dalla specie impiegata: al cambiare specie vegetale, i valori di conduttanza e trasmittanza del sistema parete non cambiano quasi per nulla. Questo è senza dubbio un dato importante perché permette in fase di progettazione una maggiore flessibilità nella scelta delle specie vegetali da utilizzare, potendo anteporre altre caratteristiche a quella termica, come per esempio la loro capacità di diluire i VOC presenti nell'aria.

Il sistema parete GRE_EN_S garantisce dunque prestazioni termiche che rispettano ampiamente i requisiti imposti dal D.Lgs. 311, non riuscendo però a soddisfare i parametri necessari per l'ottenimento dei finanziamenti.

In termini di prestazioni termiche invernali, dunque, il sistema parete GRE_EN_S presenta delle prestazioni termiche invernali di alto livello, superando nettamente le performance della maggior parte dei sistemi di parete ventilata comuni. Nonostante questo, al giorno d'oggi ancora non permette di raggiungere prestazioni tali da soddisfare il D.M. 26/01/10, aspetto che pertanto penalizza il sistema da un punto di vista quanto meno economico.

7 COMPORTAMENTO TERMICO ESTIVO

Molte delle considerazioni già effettuate nel capitolo precedente sul comportamento termico invernale sono tendenzialmente valide anche per quanto concerne il comportamento termico nel periodo estivo. Se nel caso precedente l'obiettivo di progetto era rivolto a minimizzare i consumi di energia primaria rivolti al riscaldamento degli ambienti interni nel periodo invernale pur mantenendo le condizioni di comfort climatico negli ambienti interni, in questo caso l'obiettivo del progettista sarà dunque quello di minimizzare i consumi di energia primaria dovuti alle necessità di raffrescamento nel periodo estivo.

Differentemente dal periodo invernale, in cui la maggior preoccupazione di un progettista è quella di limitare la dispersione di calore attraverso l'involucro degli edifici, nel periodo estivo l'attenzione sarà rivolta principalmente nei confronti di tre aspetti fondamentali: al contenimento della quantità di calore che raggiungerà gli ambienti interni per effetto della radiazione solare esterna; ad evitare il fenomeno di condensazione interstiziale del vapore acqueo; a diminuire la temperatura superficiale esterna delle soluzioni di facciata, tentando così di contrastare il cosiddetto fenomeno Isola di Calore (Heat-Island Effect).

Per quanto riguarda l'obiettivo di minimizzare l'apporto di calore proveniente dalla radiazione solare estiva, faremo riferimento nuovamente al requisito di trasmittanza termica totale U del sistema parete.

La verifica delle condizioni di permeabilità al vapore è stata invece delegata ad un software specifico che ci dà indicazioni su quale sarà la

performance del sistema parete già durante la progettazione della stratigrafia per il calcolo della trasmittanza.

Infine, andremo ad analizzare il variare delle prestazioni di temperatura superficiale esterna al variare della tipologia di materiali impiegati per la realizzazione dello strato di rivestimento esterno sia nel caso di sistemi di parete ventilata che nel caso del sistema parete GRE_EN_S.

A livello progettuale, non è quindi solamente necessario verificare che l'edificio non disperda eccessivamente nel periodo invernale ma è necessario anche tenere conto di quali apporti termici riceverà nel periodo estivo e prevedere come questi possano essere contrastati, al fine di ridurre al minimo i consumi di energia dovuti all'impiego di impianti per la climatizzazione.

7.1 L'EFFETTO ISOLA DI CALORE (HEAT-ISLAND EFFECT)

Il fenomeno conosciuto come effetto Isola di Calore è stato studiato per la prima volta dagli scienziati più di un secolo fa, in seguito alla presa di coscienza del fenomeno per cui la temperatura dell'aria all'interno di zone urbane ad alta densità risulta più alta rispetto alle circostanti aree rurali.

Il fenomeno è presente e facilmente riscontrabile in tutti gli addensamenti urbani e per questo motivo rappresenta il sintomo più evidente del cambiamento climatico dovuto all'urbanizzazione.

L'effetto isola di calore può presentarsi durante il giorno o durante la notte e la sua intensità è principalmente dovuta al bilancio termico dell'area urbana che a sua volta è influenzato da una serie di condizioni al contorno.

La geometria urbana – La geometria urbana influenza grandemente l'entità dell'effetto isola di calore, in quanto tutti gli edifici e le strade (in generale tutte le superfici) emettono radiazioni infrarosse che vengono assorbite, trasmesse e riflesse da una superficie all'altra. Se normalmente in un ambiente a bassa densità abitativa le radiazioni infrarosse andrebbero disperse verso il cielo, in un ambiente a maggiore densità urbana queste radiazioni vengono appunto catturate e rimandate al suolo dagli edifici circostanti. All'aumentare della densità urbana dunque, non solo si ha un aumento delle superfici sorgenti di radiazioni ma anche una diminuzione della percentuale di radiazioni disperse. L'aumentare della densità abitativa causa dunque un aumento di temperatura maggiore di quanto si potrebbe inizialmente immaginare.

Le proprietà termiche dei materiali – Le proprietà termiche dei materiali usati in costruzione sono fondamentali nella determinazione dell'entità dell'effetto Isola di Calore. Materiali ad alta massa volumica come calcestruzzo, asfalto o pietra assorbono grandi quantità di calore durante il giorno per poi riemetterle in atmosfera durante la notte, alterando così notevolmente la temperatura negli insediamenti urbani.

La riduzione di superfici vegetate – La riduzione della superficie vegetata all'interno degli insediamenti urbani è strettamente legata al discorso precedente sulle proprietà termiche dei materiali. Le piante, come vedremo più avanti, posseggono la capacità di assorbire il calore e trasformarlo in altre forme di energia attraverso il processo di fotosintesi clorofilliana. Inoltre, le loro capacità di traspirazione favoriscono il processo di evaporazione ed abbassamento della temperatura ambientale.

Il calore antropogenico – La maggior parte della attività umana che vengono portate avanti all'interno degli insediamenti urbani generano calore aggiuntivo: il riscaldamento degli edifici, la produzione industriale, il traffico veicolare sono solo tre delle principali sorgenti antropogeniche di calore che contribuiscono al palesarsi dell'effetto Isola di Calore.

L'effetto serra – Sfortunatamente, la produzione di calore da parte delle attività antropiche non è la sola conseguenza e non rappresenta il solo fattore che influenza l'effetto isola. I fumi emessi in atmosfera portano con sé determinate quantità di particolato atmosferico, polveri ed altri elementi inquinanti che contribuiscono al formarsi del cosiddetto effetto serra. Questi elementi sospesi in atmosfera creano uno schermo riflettente che contribuisce a riflettere verso il suolo urbano il calore che altrimenti verrebbe disperso in cielo.

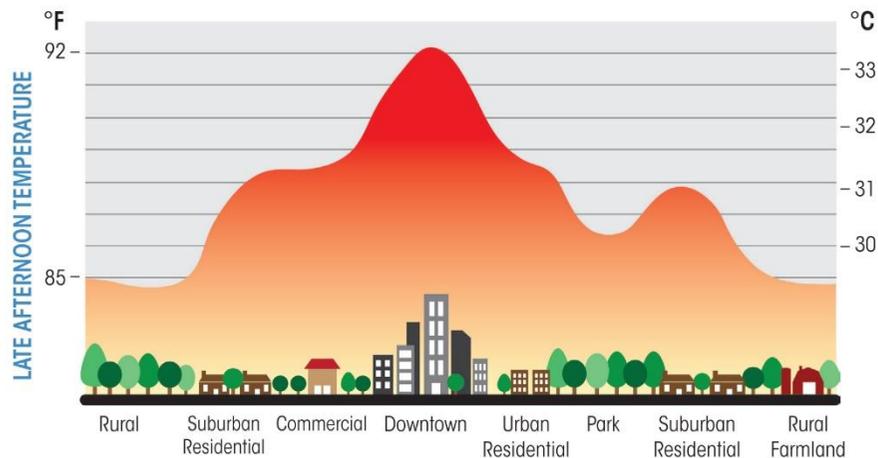


Figura 35 – Variazione della temperatura in rapporto alla densità urbana (c3headlines.com).

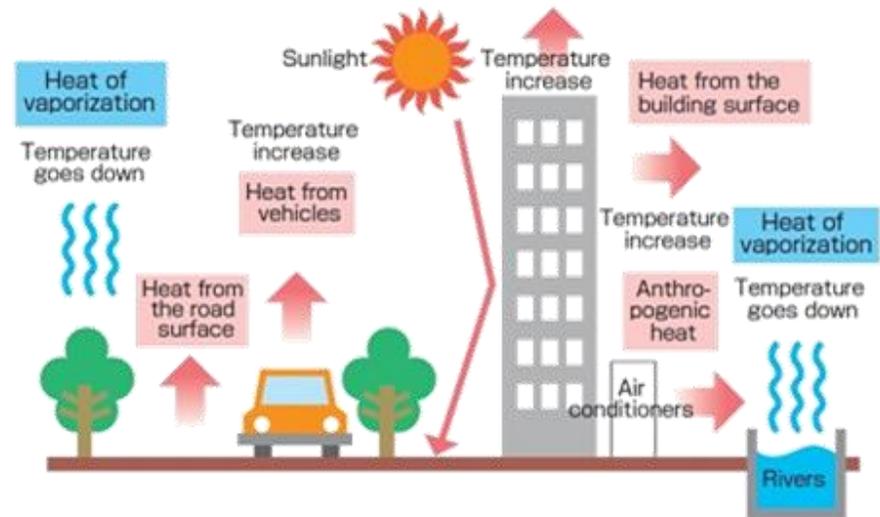


Figura 36 – Le principali cause del fenomeno isola di calore (gardinergreenribbon.com).

Se nel periodo invernale l'effetto Isola di Calore risulta in qualche modo tollerabile poichè mitiga le rigide temperature invernali, il problema diventa quanto mai serio durante il periodo estivo, in cui questo fenomeno può far lievitare le temperature a livelli così alti da causare la morte delle persone più sensibili.

7.2 QUADRO NORMATIVO

Il quadro normativo di riferimento a proposito del comportamento estivo degli edifici è fondamentalmente lo stesso di quello riportato per il comportamento invernale. Anche in questo caso, viene fornito un indicatore per valutare il fabbisogno annuale di energia primaria da destinare agli impianti di climatizzazione (Epe, invol).

Le principali prescrizioni per comfort estivo saranno dunque reperibili negli All. I C. 9 dei già citati DD.Lgss. 192/2005 e 311/2006 e nel D.P.R.

59/2009. Anche qui, il campo di applicazione delle norme riguarderà le categorie di edifici che vengono presentate nel D.P.R. 412.

Il progettista ha a disposizione diverse opzioni di progettazione per far sì che l'edificio in progetto risponda ai requisiti di legge. Potrà valutare e documentare le prestazioni dei componenti del sistema di facciata che concorrono nell'interazione con l'irraggiamento solare, quali elementi schermanti, superfici vetrate, ecc. Altrimenti, potrà puntare sulla massa superficiale MS delle chiusure opache di involucro, la quale non dovrà comunque risultare minore di 230kg/m^2 , al fine di garantire un certo grado di inerzia termica. In alternativa, dovrà accertarsi di impiegare nella progettazione dell'involucro materiali dalle prestazioni tali da garantire comunque l'effetto necessario al raggiungimento del corretto grado di sfasamento e smorzamento dell'onda termica. Un altro accorgimento di cui si potrà avvalere sarà la possibilità di sfruttare le condizioni ambientali esterne per favorire la ventilazione naturale o meccanica.

7.3 COMPORTAMENTO TERMICO ESTIVO DI PARETE VENTILATA

Dopo aver considerato le prestazioni termiche invernali di due possibili varianti di parete ventilata e dopo aver studiato quali siano le problematiche principali legate alla progettazione termica degli edifici per il periodo estivo, possiamo procedere oltre nella nostra analisi prendendo in considerazione anche le prestazioni termiche estive, facendo riferimento ai parametri precedentemente descritti e in un'ottica di smorzamento del fenomeno Isola di Calore.

Poiché in fase di progetto è fondamentale che sia le prestazioni termiche invernali che quelle estive siano contemporaneamente verificate per uno stesso sistema di parete, anche per l'analisi delle prestazioni termiche estive di una parete ventilata faremo riferimento

alla miglior soluzione già analizzata e verificata in merito alle prestazioni invernali, tenendo presente che questa non rappresenta comunque la norma delle soluzioni caratterizzanti il costruito o attualmente in realizzazione.

7.3.1 Parete ventilata a norma del D.M. 26/01/01

Riprendiamo in mano la stratigrafia di cui avevamo già verificato le eccellenti prestazioni invernali ed andiamo ad analizzare quali sono i fattori che incidono sulla prestazione estiva. Ricordiamo quindi che la stratigrafia della parete si compone, da un punto di vista termodinamico, di 7 elementi principali: lo strato liminare interno, lo strato di intonaco calce e gesso, lo strato resistente di blocchi in laterizio, lo strato isolante in pannelli di XPS, la camera di ventilazione, lo strato di rivestimento esterno e lo strato liminare esterno.

Tabella 28 – Stratigrafia di parete ventilata tipo, a norma D.M. 26/01/01.

Strato	Spessore cm	P Kg/m ³	μ	C J/kg°C	λ W/mK	R m ² K/W
Strato liminare interno	/	/	/	/	/	0,13
Intonaco calce e gesso	2	1.800	11	840	0,90	/
Blocchi in laterizio	25	600	10	1.000	0,29	/
Pannelli in PUR	8	150	5	1.000	0,03	/
Camera di ventilazione	6	1	1	1.000	/	0,04
Listelli in legno	2	1.350	110	880	0,26	/
Strato liminare esterno	/	/	/	/	/	0,04

L'unione di questi elementi concorre in molteplici modi a definire le prestazioni termiche del sistema parete nel periodo estivo. Se per quanto riguarda l'analisi delle prestazioni invernali non avevamo preso in considerazione l'apporto del rivestimento esterno, in quanto considerato quasi influente, in merito all'analisi estiva invece il rivestimento esterno gioca un ruolo fondamentale.

Tabella 29 – Prestazioni complessive della parete ventilata a norma D.M. 26/01/01.

Spessore parete	43 cm
Peso minimo parete	225 kg/m ²
Trasmittanza termica U_{tot}	0,269 W/m²K

Isolamento termico. Così come protegge l'ambiente interno durante il periodo invernale, allo stesso modo il coefficiente di trasmittanza termica del sistema parete ci dà un'indicazione precisa della resistenza che l'involucro è in grado di opporre al passaggio dei flussi di calore anche nel periodo estivo.

In questo senso, se la prestazione invernale è eccellente, anche quella estiva sarà di ottimo livello, consentendoci di smorzare efficacemente il carico di calore proveniente dall'irraggiamento solare e garantire così condizioni di comfort termico all'interno dell'edificio anche in questo periodo dell'anno.

Permeabilità al vapore. La permeabilità al vapore è un aspetto che deve essere preso in considerazione a livello progettuale già durante il delineamento delle prestazioni invernali.

Se infatti durante l'inverno abbiamo bisogno di evitare la condensazione del vapore acqueo sulle superfici di parete o all'interno

della stratigrafia, allo stesso modo abbiamo bisogno di ottenere il medesimo risultato durante il periodo estivo.

Il problema si presenta in questo caso, tuttavia, sotto un'ottica leggermente diversa: nel periodo invernale non possiamo assolutamente permetterci che si crei condensa interstiziale poiché con l'abbassamento delle temperature questa potrebbe congelare, aumentando di volume e causando molteplici problemi all'integrità e quindi al funzionamento del sistema parete.

Diversamente, nel periodo estivo non corriamo questo pericolo, poiché normalmente la temperatura non scenderà mai al di sotto dello zero. In questo frangente possiamo dunque essere un poco più elastici nei requisiti ed eventualmente accettare la formazione di condensa a patto che questa abbia la possibilità di evaporare nuovamente ed essere smaltita prima di creare danni al sistema.

Per quanto detto, risulta nuovamente fondamentale la corretta selezione dei materiali da impiegare nella progettazione della stratigrafia di parete. Altrettanto importante si configurerà anche l'adottare il corretto ordine di disposizione dei differenti strati: una successione erronea creerà sbalzi nelle temperature interne che potrebbero causare fenomeni di condensa interstiziale.

Come già detto, la rispondenza a questi criteri per la parete in oggetto è stata verificata al momento di vagliare la validità delle prestazioni termiche invernali tramite un software di calcolo, per cui possiamo affermare che anche questo requisito di prestazione sia stato soddisfatto.

Temperatura superficiale esterna. Se lo strato di rivestimento esterno era quasi influente per quanto riguarda gli altri parametri, lo stesso non si può dire invece per quanto riguarda la temperatura superficiale

esterna che dipende non solo dalle condizioni climatiche al contorno ma anche dalle caratteristiche termiche del materiale utilizzato.

La temperatura superficiale esterna, a differenza dei parametri già presi in considerazione, è un dato estremamente variabile, per stimare il quale non è sufficiente fare solo delle ipotesi ma si rendono necessarie delle misurazioni sul campo.

Per valutare dunque la prestazione di una parete ventilata in questo frangente dobbiamo fare riferimento alle misurazioni effettuate in riferimento al funzionamento del sistema GREE_EN_S. Come possiamo vedere in Figura 37, i rilievi effettuati sul sistema GRE_EN_S hanno previsto come dato comparativo l'esecuzione di misurazioni sul rivestimento di parete in oggetto.

Date le stesse condizioni ambientali al contorno (le due soluzioni sono state realizzate su uno stesso mock-up), la linea rossa del grafico ci mostra l'andamento della temperatura superficiale del rivestimento in legno alle diverse ore del giorno. I dati rilevati ci mostrano chiaramente come il rivestimento esterno in legno sia fortemente influenzato dalla presenza di radiazione solare diretta che incrementa la sua temperatura superficiale di quasi 14°C , dal valore minimo di circa 20°C al picco massimo di circa 34°C .

La superficie esterna di una parete ventilata rivestita in legno presenta dunque una alta suscettibilità alla radiazione solare: mantiene valori alti di temperatura superficiale nelle ore di massimo irraggiamento che diminuiscono molto velocemente nelle ore notturne.

Questo comportamento è, come abbiamo detto, una delle principali cause dell'effetto Isola di Calore.

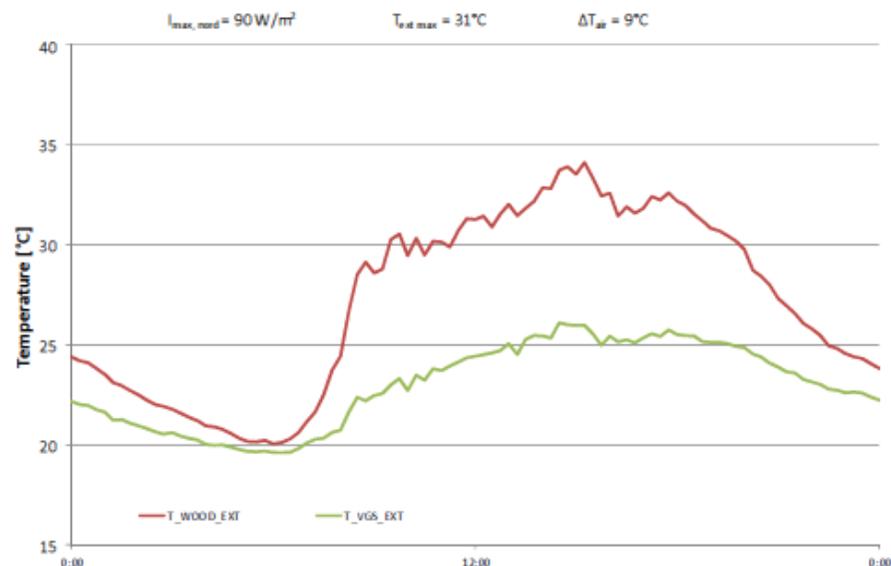


Figura 37 - Temperature superficiali esterne misurate per il sistema GRE_EN_S ed una parete con rivestimento esterno in legno, facciata Nord.

7.4 COMPORTAMENTO TERMICO ESTIVO GRE_EN_S

Abbiamo già avuto modo di constatare nel capitolo precedente l'efficacia delle prestazioni termiche invernali del sistema parete GRE_EN_S. Ebbene, quelle stesse prestazioni di trasmittanza termica che proteggono l'edificio dalle dispersioni di calore in inverno, lo proteggono dal surriscaldamento in estate.

Nel periodo estivo l'intercapedine d'aria può svolgere un ruolo importante solo se correttamente progettata e provvista di ventilazione. Come mostrato in Figura 38 e Figura 39, sulla facciata sud la camera d'aria mostra una temperatura interna abbastanza costante lungo l'intera giornata, il che significa che l'inerzia termica è piuttosto

elevata, ossia il calore immagazzinato durante il giorno è più difficile da rimuovere durante la notte, creando così un effetto negativo.

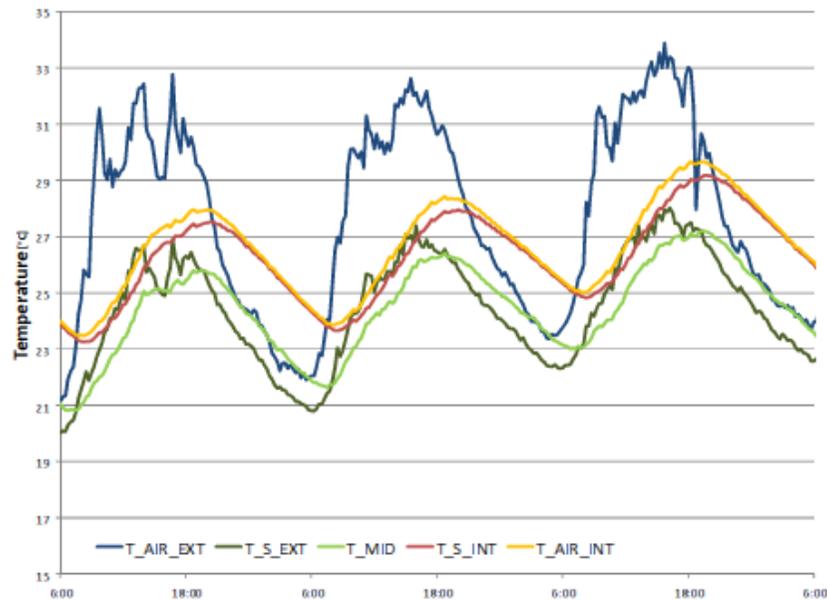


Figura 38 – Temperature del sistema GRE_EN_S esposto a Nord in estate.

Sulla facciata nord all'interno dell'intercapedine si può rilevare circa la stessa temperatura presente sulla superficie esterna.

Per quanto riguarda il tempo di sfasamento dei picchi di calore, è stato osservato che non è molto alto, prevalentemente per due motivi: da un lato, la parete che ospita i pannelli vegetati presenta una massa superficiale molto contenuta che non le permette di avere un'alta inerzia termica; d'altra parte, lo spessore del substrato di crescita è di circa 8 cm ed è costituito da una miscela a bassa densità, quindi la sua capacità di sfasamento del picco termico è trascurabile.

Al contrario di quanto avviene per i tetti verdi, l'inerzia termica del substrato non è sufficientemente rilevante da permettere uno sfasamento del picco termico notevole.

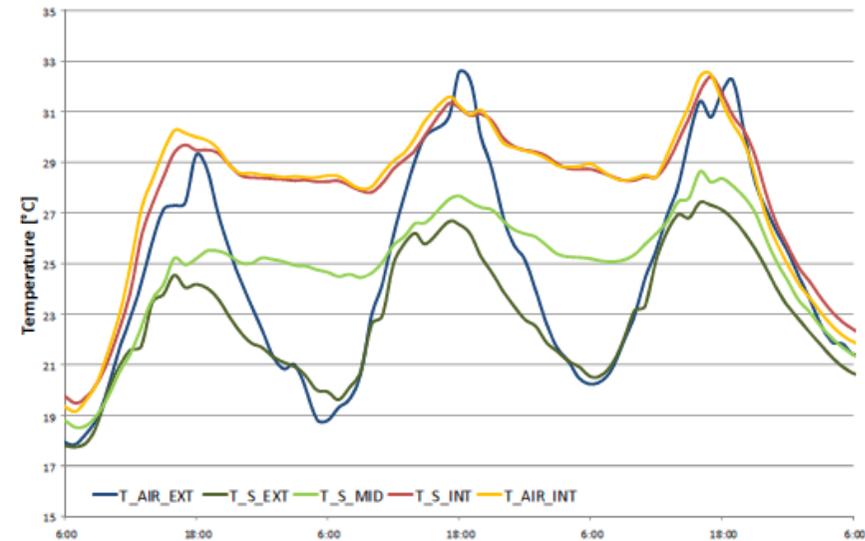


Figura 39 – Temperature del sistema GRE_EN_S esposto a Sud in estate.

Se dunque il sistema GRE_EN_S sembra essere molto efficace nel ridurre le perdite di calore durante la stagione fredda, tuttavia non si presenta altrettanto efficace nell'attenuare e ritardare le sollecitazioni termiche esterne durante la stagione estiva.

Temperatura superficiale. Come abbiamo detto, uno degli aspetti più importanti che riguardano le prestazioni termiche estive di un sistema di parete è la sua efficacia nel ridurre le temperature superficiali esterne, importante per l'abbattimento dell'effetto Isola di Calore. Per valutare questo fenomeno, sono state testate e confrontate le temperature superficiali esterne di tre diversi rivestimenti: il sistema

GRE_EN_S, una parete intonacata ed una parete rivestita con listelli in legno.

Come mostrato in Figura 40 ed in Figura 41, una volta scelta una tipica e comparabile giornata estiva, le temperature misurate sulla superficie di una parete realizzata con il sistema GRE_EN_S sono risultate significativamente inferiori a quelle misurate sulle altre tipologie di rivestimenti. Oltre ad essere inferiori, si presentano anche più costanti in presenza di radiazione solare.

In particolare, la differenza di temperatura superficiale tra il sistema GRE_EN_S ed il picco misurato su di una parete intonacata (facciata sud) può raggiungere un picco di 11°C.

Al contrario sul lato nord, dove le temperature sono state misurate in presenza di sola radiazione solare diffusa, vi è una notevole riduzione del picco di differenza di temperatura tra il sistema vegetato e il rivestimento in legno, pari a circa 6,5°C.

Le piante che compongono il rivestimento, infatti, influenzano in maniera preponderante la dinamica del vapore acqueo del sistema tramite un continuo processo di traspirazione, ossia la perdita di vapore acqueo dalla superficie della pianta a causa dell'evaporazione: basta che l'umidità relativa sia di poco inferiore al 100%, perché il potenziale idrico dell'aria sia molto inferiore a quello fogliare. Il processo di diffusione del vapore acqueo che dagli spazi intercellulari si porta all'esterno richiede energia, identificabile nella radiazione solare.

In conclusione, la traspirazione delle piante dello strato esterno dipende in maniera direttamente proporzionale dal deficit di pressione di vapore (VPD) dell'atmosfera (che a sua volta dipende

dalla temperatura e dall'umidità relativa) ed in maniera inversamente proporzionale dallo stato idrico della pianta (e del terreno) e dal vento.

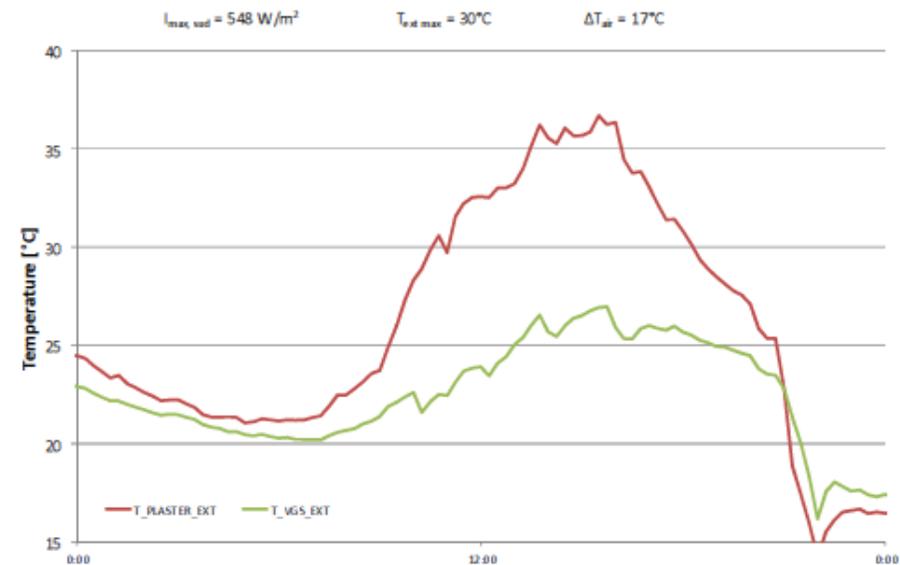


Figura 40 – Temperature superficiali esterne misurate per il sistema GRE_EN_S ed una parete intonacata, facciata Sud.

Anche la temperatura della superficie fogliare dipende, come la traspirazione, dalle condizioni ambientali al contorno (temperatura, quantità di luce, umidità relativa, ecc.). Le piante, a differenza degli inerti, regolano il proprio metabolismo in base alle condizioni ambientali esterne: l'irraggiamento solare, con conseguente aumento della temperatura, innesca il processo di fotosintesi clorofilliana che trasforma l'energia termica ricevuta dal sole estivo.

Questo processo permette alle piante di regolare costantemente la propria temperatura superficiale mantenendola maggiormente costante in prossimità di un intervallo che può spaziare tra circa 15°C e 30°C.

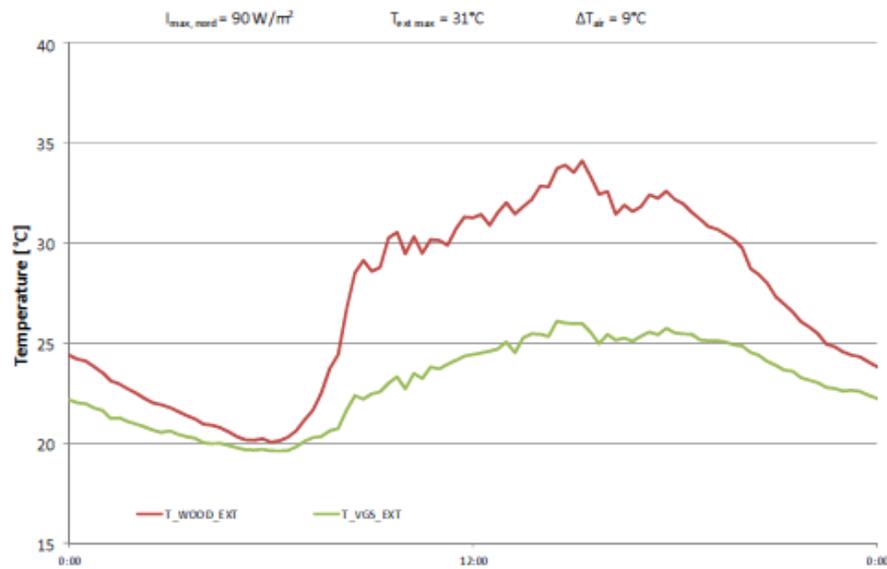


Figura 41 - Temperature superficiali esterne misurate per il sistema GRE_EN_S ed una parete rivestita in legno, facciata Nord.

È importante considerare anche che quando la temperatura atmosferica scende al di sotto di circa 15°C (il valore esatto dipende dalla specie vegetale), la fotosintesi non può essere attivata e la temperatura superficiale non cala ulteriormente.

In seguito alle considerazioni precedenti possiamo dunque stimare la temperatura superficiale del sistema parete GRE_EN_S in un valore medio di 20°C.

Tabella 30 – Valore di temperatura superficiale media sistema parete GRE_EN_S.

TEMPERATURA SUPERFICIALE MEDIA GRE_EN_S

LONICERA NITIDA

Circa 20°C

7.5 CONCLUSIONI DEL RAFFRONTO

Mettendo a confronto le caratteristiche delle due soluzioni appena analizzate possiamo dunque trarre una serie di conclusioni sulle rispettive prestazioni. Per quanto riguarda i flussi di calore che attraversano le due soluzioni di parete, già abbiamo visto come entrambi i sistemi presentino prestazioni eccellenti.

Se invece mettiamo a confronto la capacità dei due sistemi di parete di sfasare i picchi termici durante le giornate estive, allora notiamo che il sistema GRE_EN_S, presentando un substrato di spessore molto ridotto, non è in grado di ritardare l'onda termica in maniera adeguata, mentre al contrario, l'alta massa superficiale di una tipica parete ventilata presenta una capacità di sfasamento maggiore. Questo significa che gli ambienti interni protetti dal sistema GRE_EN_S saranno caratterizzati da picchi di temperatura nelle ore più calde del giorno, mentre quelli riparati da una parete ventilata presenteranno un ampio sfasamento del picco termico interno.

Per quanto concerne invece l'aspetto legato alla temperatura superficiale esterna, bisogna sottolineare come il rivestimento testato per la parete ventilata presenti delle prestazioni ampiamente inferiori a quelle garantite dal sistema GRE_EN_S.

Spostando un attimo la nostra analisi da un livello architettonico ad un livello urbanistico, possiamo dunque affermare che l'adozione del sistema GRE_N_S come rivestimento esterno permette una notevole riduzione delle temperature superficiali esterne in periodo estivo, che se per materiali convenzionali presentano valori di picco di quasi 40°C, nel caso del sistema GRE_EN_S si attestano su valori medi di circa 20°C.

Una parete ventilata ben progettata può dunque fornire prestazioni leggermente migliori in termini di comfort ambientale estivo (sfasamento e smorzamento dell'onda di calore).

Tuttavia il sistema GRE_EN_S mantiene le temperature esterne delle facciate a valori decisamente più bassi rispetto a qualunque parete ventilata, contribuendo così attivamente alla riduzione dell'effetto Isola di Calore.

Per quanto concerne dunque il comportamento termico estivo, il sistema GRE_EN_S presenta prestazioni molto buone di comfort per gli utenti e prestazioni eccellenti di riduzione passiva dell'inquinamento ambientale.

8 COMPORTAMENTO ACUSTICO

Uno dei requisiti fondamentali di ogni sistema di chiusura verticale è la capacità di proteggere gli ambienti interni dai rumori, sia di origine interna che provenienti dall'esterno. Oggi il rumore viene considerato infatti una vera e propria forma di inquinamento e non è insolito sentir parlare di "inquinamento acustico".

All'interno di un edificio, oltre ai rumori del traffico provenienti dalla strada, gli utenti sono soliti lamentare anche la presenza di rumori generati all'interno, in ambienti attigui o nello stesso ambiente. Il rumore si costituisce dunque come un elemento di discomfort al pari di un'errata temperatura interna e quindi necessita di essere attentamente valutato in fase di progettazione.

8.1 IL SUONO

Il suono è *"una perturbazione prodotta da una vibrazione meccanica che, propagandosi in un mezzo elastico, provoca una variazione di pressione tale da poter essere rilevata da un ricettore"* (Martorana & Becherini, 2006). Per comprendere meglio questa definizione possiamo specificare che la vibrazione può essere creata da un qualsiasi corpo in grado di generare vibrazioni, solitamente con il movimento, mentre il mezzo elastico può essere un qualsiasi elemento, sia esso allo stato liquido, gassoso o solido¹³. Un ricettore è qualsiasi mezzo in grado di captare le vibrazioni.

¹³ Nel vuoto che caratterizza lo spazio aperto, l'assenza di un mezzo elastico di trasmissione impedisce la presenza di qualsiasi tipo di suono.

8.1.1 Il mezzo di propagazione

Il moto di propagazione del suono si caratterizza come un susseguirsi di oscillazioni delle particelle che compongono il mezzo, ossia si tratta di un moto ondoso.

Le modalità e la **velocità di propagazione** dell'onda sonora dipendono dalle caratteristiche del mezzo che questa deve attraversare. A seconda dello stato fisico del mezzo e della sua temperatura, la velocità di propagazione del suono può aumentare sensibilmente. È interessante notare come il suono si propaghi nell'acque cinque volte più velocemente che nell'aria. La sua velocità di propagazione può aumentare ancora notevolmente all'interno di mezzi solidi, soprattutto se metallici.

A parte lo stato fisico, un altro fattore che determina la velocità di propagazione del suono è la temperatura del mezzo: infatti all'aumentare della temperatura, diminuisce la sua densità, agevolando la propagazione delle onde sonore. Da questa proprietà fisica possiamo dunque dedurre che il periodo invernale il suono si propagerà più velocemente negli ambienti interni di un edificio (a temperatura maggiore) rispetto agli ambienti esterni (a temperatura inferiore).

Poiché facciamo riferimento ad un moto ondoso, a parte la velocità vi sono altre componenti che dobbiamo prendere in considerazione per analizzare il fenomeno, come la frequenza, il periodo e la lunghezza d'onda.

La **frequenza "f"** definisce il numero di oscillazioni cui sono sottoposte le particelle del mezzo elastico nell'unità di tempo e viene misurata in Hertz (Hz). All'ampiezza della frequenza si associano le tipologie di

suoni: una persona può normalmente udire suoni che spaziano da 20 a 16000 Hz, cui corrispondono rispettivamente i suoni gravi e acuti.

Il **periodo "T"** rappresenta invece il tempo che le particelle del mezzo impiegano per compiere un'oscillazione. Si tratta fondamentalmente della grandezza inversa della frequenza e dunque sarà definito dalla relazione $1/f$ e misurato in secondi.

La **lunghezza d'onda "λ"** è la distanza percorsa da quest'ultima durante un'oscillazione completa, si misura in metri ed è direttamente legata alla velocità di propagazione ed alla frequenza.

Analizzando queste caratteristiche fisiche possiamo dedurre che nell'ambiente interno di un edificio, nel campo dell'udibile, la lunghezza d'onda dei suoni può variare da 17m a 22mm. Questo significa che qualora il suono, propagandosi nell'ambiente, incontri un ostacolo di dimensioni maggiori della propria lunghezza d'onda, non sarà in grado di oltrepassarlo e si creerà una zona d'ombra dietro l'ostacolo. Tuttavia, qualora l'oggetto sia più piccolo della lunghezza d'onda del suono, questo potrà oltrepassarlo senza problemi.

8.1.2 Il ricettore sonoro

Tuttavia, la definizione stessa che abbiamo riportato all'inizio del capitolo stabilisce che senza un ricettore, il suono non esiste. Dunque le proprietà del suono non dipendono esclusivamente dalle sue caratteristiche fisiche ma anche dalle modalità con cui il ricettore le percepisce.

Poiché le onde sonore si propagano grazie ad una variazione di pressione del mezzo, nel caso dell'aria possiamo verificare che le variazioni sono comprese tra 20 microPascal (μPa) e 10 kiloPascal (Kpa). Rapportando dunque il valore di pressione di un'onda con

quello base di $20 \mu\text{Pa}$ in una scala logaritmica, si ottiene il **livello di pressione sonora** L_p , espresso in decibel (dB).

Quando le particelle di un mezzo oscillano tutte con una frequenza ben definita possiamo parlare di suono “puro” o “armonica”. In realtà nella maggior parte dei casi, la variazione di pressione sonora è determinata da un insieme di suoni puri di frequenze diverse sommati fra loro. Lo **spettro sonoro** rappresenta il livello di pressione di ogni armonica e solitamente viene suddiviso in intervalli chiamati “bande”.

8.1.3 La sorgente sonora

Così come per il mezzo di propagazione e per il ricettore, anche la sorgente del suono è uno dei tre elementi imprescindibili per la sua esistenza. Caratterizzare la sorgente serve per valutarne l’influenza sul comfort acustico di un ambiente.

A questo proposito, la misura dell’energia irradiata nell’unità di tempo, nello spettro, da una sorgente sonora viene definita come **livello di potenza sonora** e si misura in dB su scala logaritmica. Poiché sia la pressione sonora che la potenza sonora sono espresse tramite una scala logaritmica, in caso di presenza di due sorgenti che emettano contemporaneamente, il livello totale non è determinato dalla semplice somma algebrica delle due ma da una relazione logaritmica. In questa sede non analizzeremo nel dettaglio le relazioni che governano questi fenomeni però sarà importante comprenderne gli effetti a livello pratico. Per cui, sommando i livelli di due sorgenti di pari potenza si avrà un incremento di 3dB, mentre se sommiamo i livelli di due sorgenti la cui differenza risulti superiore a 10dB non avremo alcun incremento di livello totale. Questa relazione ci dice quindi che in presenza di due sorgenti sonore agenti contemporaneamente nel medesimo ambiente, la più potente

maschererà la più debole ed i livelli totali corrisponderanno a quelli della sorgente maggiormente influente.

Un’altra grandezza che caratterizza le sorgenti sonore è l’**intensità sonora (I)** che rappresenta la quantità di energia irradiata dalla sorgente e che fluisce per unità di superficie, nell’unità di tempo, nello spettro. Questa grandezza permette di calcolare il livello di potenza sonora direttamente in opera e può essere utile per la progettazione dell’isolamento acustico.

L’ultimo parametro che analizziamo è la **direttività (Q)**. Questa grandezza serve per determinare la direzione in cui viene irradiata l’energia sonora. Per le considerazioni fatte precedentemente sulla lunghezza d’onda, possiamo comprendere come le sorgenti possano essere classificate in due modi: “omnidirezionali” e “direttive”. Se la dimensione fisica della sorgente sarà maggiore della lunghezza d’onda che emette, questa si costituirà come un ostacolo al passaggio del suono e sarà dunque una sorgente direttiva; al contrario, qualora la sua dimensione sia minore della lunghezza d’onda, la sua presenza non costituirà alcun impedimento alla propagazione e si tratterà di una sorgente omnidirezionale. In ultimo, la direttività dipenderà anche dal posizionamento geometrico della sorgente nell’ambiente.

8.2 IL RUMORE

Possiamo definire il rumore come *“un suono non caratterizzato da una frequenza determinata o da vibrazioni regolari”* (Bartoli, 2008).

Per la quantificazione dei rumori, è stata creata una scala del rumore che viene espresso in decibel (dB). Il livello pari a 0dB corrisponde alla soglia di udibilità dell’orecchio umano, 10dB rappresentano un ambiente tranquillo, tra i 40 ed i 50dB si pone una conversazione ed

oltre i 70dB cominciamo a considerare il livello di rumore come fastidioso (infatti il rumore dei trasporti stradali si colloca intorno ai 90dB). Infine, a 120dB troviamo la soglia del dolore che rappresenta il limite di rumore oltre il quale il nostro apparato uditivo comincia a soffrire fisicamente.

Tuttavia è bene sottolineare che la progettazione non può semplicemente basarsi sull'intensità dei rumori ma deve tener conto anche di altri fattori che ne determinano la fastidiosità. Per esempio il tempo di esposizione: un rumore debole prolungato nel tempo viene considerato più sgradevole di uno più forte ma istantaneo. A parte le valutazioni oggettive, è di rilevante importanza anche la componente soggettiva, per cui anche la provenienza influisce sul giudizio: i rumori creati da altri sono sempre percepiti con più fastidio rispetto ai propri.

Per l'isolamento acustico valgono dunque molti dei principi visti per quello termico: devono essere trattate le criticità in modo tale che la tenuta all'aria sia perfetta e così i punti di passaggio da un ambiente all'altro. Tendenzialmente al contrario dell'isolamento termico, è in questi casi è preferibile utilizzare materiali ad alta densità, che a parità di spessore forniscono una schermatura maggiore alle onde sonore.

Per poter organizzare una progettazione efficace in maniera metodica è però necessario classificare i rumori non solo in base alla loro intensità ma anche riferendosi ad altri parametri, come ad esempio le sorgenti. All'interno di un edificio vengono allora distinte quattro tipologie di rumore differenti, in base alla propria sorgente:

- **I rumori aerei esterni** – Sono generati dal traffico stradale, ferroviario e aereo e si propagano nell'aria attraversando l'involucro edilizio.

- **I rumori aerei interni** – Sono generati nell'ambiente interno stesso, per esempio da persone che parlano, dalla televisione, la radio, ecc... Si propagano nell'aria attraversando le pareti verso gli ambienti interni attigui e verso l'esterno.
- **I rumori di origine impattiva** – Sono provocati dal cadere di oggetti, lo spostamento di carichi pesanti o il semplice calpestio degli occupanti e sono soliti trasmettersi prevalentemente attraverso le chiusure orizzontali.
- **I rumori degli impianti** – Sono i rumori creati appunto dal sistema impiantistico, sia esso situato all'interno del locale od all'esterno.

8.2.1 Rumori aerei

Nella progettazione dell'acustica dell'edificio possiamo distinguere due tipi fondamentali di rumori aerei: quelli generati all'interno e quelli provenienti dall'esterno. Nonostante si tratti sempre di rumori aerei, la differenza di provenienza è importante poiché costringe il progettista a prendere misure diverse nei loro confronti.

Quando un'onda sonora incide una parete, questa viene in parte riflessa nell'ambiente di provenienza, in parte assorbita e dissipata in calore, in parte trasmessa direttamente nell'ambiente adiacente alla parete, in parte trasmessa alle strutture ad essa collegata. I rumori aerei dunque si trasmettono attraverso le superfici divisorie degli edifici (muri, soffitti, pavimenti, ecc...) per trasmissione diretta e si propagano attraverso il resto della struttura per trasmissione indiretta, detta anche trasmissione per fiancheggiamento (Martorana & Becherini, 2006).

Come nel caso dell'isolamento termico, eventuali ponti termici si costituiscono anche come ponti di trasmissione del rumore,

soprattutto laddove la tenuta all'aria non sia stata verificata adeguatamente. Questo tipo di trasmissione dei rumori è definito come trasmissione parassita.

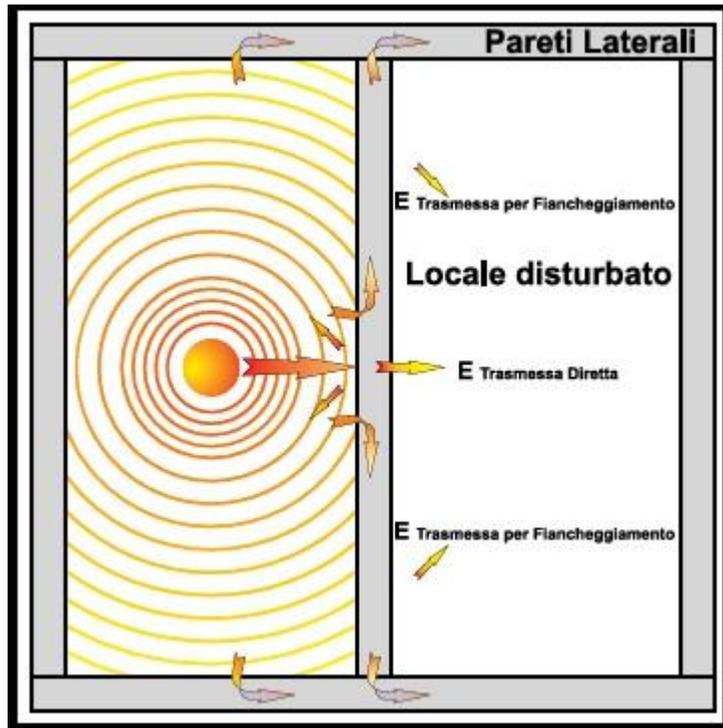


Figura 42 – Trasmissione diretta e indiretta delle onde sonore da un locale ad un altro adiacente (isolamentoacusticomilano.it).

8.2.2 Rumori di origine impattiva

I rumori di origine impattiva sono causati da oggetti che urtano contro le divisioni verticali o orizzontali dell'edificio. Prevalentemente si tratta di rumore da calpestio, ovvero del rumore dei passi degli utenti sul pavimento che "inquinano" gli ambienti sottostanti. In questo caso, la componente maggiormente rilevante è la trasmissione diretta

attraverso il solaio e pertanto non è rilevante ai fini di questa trattazione.

8.2.3 Rumori del sistema impiantistico

I rumori del sistema impiantistico sono per definizione presenti in ogni edificio ove siano installati degli impianti, a prescindere da quali essi siano. Anche in questo caso, la prestazione acustica dipende in gran parte dall'attenzione che è stata posta in fase di installazione e dalla scelta dei prodotti. Mentre per i vari prodotti il comportamento acustico è reperibile sulle schede tecniche dedicate, l'installazione è una componente fortemente arbitraria. Tutti gli impianti devono dunque essere installati prevedendo una soluzione di desolidarizzazione dalle strutture e di isolamento acustico.

8.3 PARAMETRI DEL COMPORTAMENTO ACUSTICO DI UN SISTEMA DI CHIUSURA VERTICALE

In un ambiente interno, per effetto delle molteplici riflessioni che avvengono sulle superfici che lo delimitano, una qualunque sorgente sonora produce in ogni punto due campi sonori che si sovrappongono: un campo diretto ed uno riverberante.

Il campo sonoro diretto è quello che, prodotto dalla sorgente, si propaga nell'ambiente raggiungendo direttamente il ricettore. Il campo sonoro riverberante raggiunge il ricettore solo dopo essere stato riflesso dalle superfici e dagli oggetti presenti nell'ambiente.

Mentre il primo dipende fundamentalmente dalla distanza che separa la sorgente dal ricettore, il secondo è determinato anche dalla geometria dell'ambiente e dall'attitudine delle superfici ad assorbire il suono. Si può quindi dedurre che in prossimità della sorgente prevarrà il campo sonoro diretto, mentre all'aumentare della distanza tra la

fonte e il ricettore andrà aumentando l'importanza del campo riverberante.

8.3.1 Assorbimento acustico

La proprietà di un qualsiasi corpo di assorbire e/o trasmettere all'esterno dell'ambiente l'energia sonora che lo colpisce viene definita assorbimento acustico. Per ogni materiale o manufatto, il relativo **coefficiente di assorbimento acustico** α viene definito in forma analitica dal rapporto tra la sommatoria dell'energia assorbita più quella trasmessa e l'energia incidente.

Il controllo delle prestazioni acustiche di un ambiente interno viene eseguito dunque prevalentemente aumentando l'assorbimento acustico specifico delle sue superfici delimitanti e variandone la geometria.

Per aumentare il valore di fonoassorbimento delle superfici si agisce direttamente tramite la selezione di materiali che presentino alti valori di coefficiente di assorbimento acustico α . Questi materiali, detti fonoassorbenti, possono essere principalmente di tre tipi: materiali fonoassorbenti porosi, pannelli vibranti e pannelli risonanti.

Materiali fonoassorbenti porosi – Si tratta prevalentemente di materiali porosi o fibrosi che presentano quindi una struttura cava che dissipa per attrito l'energia sonora incidente. Le prestazioni sono legate prevalentemente alle frequenze del suono incidente ed allo spessore di materiale impiegato. La struttura del materiale offre elevate prestazioni specialmente alle alte frequenze mentre per migliorare il comportamento alle medio-basse frequenze sarà necessario incrementarne lo spessore.

Pannelli vibranti – Sono costituiti da una superficie di materiale non poroso montata su un telaio che la mantiene distanziata dalla superficie formando una camera d'aria. Colpiti dalle onde sonore, entrano in vibrazione dissipandone l'energia. La massima efficienza si verifica in prossimità della frequenza di risonanza del pannello che per un medesimo materiale, cambia al variare del suo spessore e dello spessore dell'intercapedine d'aria. La massima efficienza si ottiene per le basse frequenze ma è possibile ottenere prestazioni più bilanciate nello spettro, inserendo in intercapedine un materiale fonoassorbente poroso. È doveroso sottolineare come la lavorazione superficiale di un materiale poroso permetta in alcuni casi di combinare le proprietà dell'uno con quelle di un materiale vibrante ottenendo così prestazioni migliori, soprattutto alle medio-basse frequenze.

Pannelli risonanti – Il risonatore di Helmholtz è una cavità di dimensione definita collegata all'esterno da un "collo" anch'esso di dimensioni studiate. È in grado di dissipare per attrito l'energia acustica incidente, alle frequenze che si trovano in prossimità della sua frequenza di risonanza. I pannelli risonanti sono elementi costituiti da un materiale non poroso al quale vengono applicati dei fori di dimensioni definite e che vengono montati ad una certa distanza dalla superficie. Questi pannelli si comportano dunque come una serie di risonatori di Helmholtz, garantendo le migliori prestazioni alle medie frequenze.

8.3.2 Isolamento acustico

Per valutare le prestazioni acustiche di un sistema o di un singolo componente, il progettista deve fare riferimento ad un altro parametro fondamentale: l'isolamento acustico, normalmente espresso in dB.

L'isolamento acustico rappresenta la differenza di livello di pressione sonora tra due ambienti adiacenti (esterno-interno o interno-interno) e si misura producendo un rumore predefinito nel locale considerato di emissione e misurandone il livello sonoro nel locale definito di ricezione. Per valutare la capacità di isolamento acustico (minimizzare la trasmissione del rumore) di un materiale o componente normalmente si fa riferimento all'indice di potere fonoisolante R_w . Può essere fornito dai produttori come dato assoluto o tenendo conto dei termini di adattamento allo spettro (cioè in base a dove viene impiegato il prodotto).

In fase di progettazione di una chiusura verticale possiamo considerare la prestazione sonora sia da un punto di vista urbanistico che da uno architettonico. Se dal punto di vista urbanistico l'obiettivo di progettazione dovrebbe essere quello di aumentare il potere fonoassorbente delle facciate per diminuire l'inquinamento acustico dei centri urbani, da un punto di vista architettonico la capacità fonoisolante delle pareti di facciate permetterà di mantenere il comfort acustico negli spazi interni.

Perseguendo questi due obiettivi, i principali aspetti che si dovrebbero prendere in considerazione per migliorarne la prestazione acustica di un sistema di chiusura verticale sono la sua capacità di assorbimento acustico e l'isolamento acustico che fornisce agli ambienti interni.

8.4 QUADRO NORMATIVO

Anche il comportamento acustico, come le altre prestazioni, è oggetto di una normativa dedicata che definisce dei requisiti prestazionali affinché sia garantito il comfort acustico negli ambienti. I principali riferimenti normativi attuali si possono così elencare:

- La “Legge quadro sull'inquinamento acustico”, n° 447 del 26/10/95 ed i suoi decreti attuativi:
 - DPCM 14/11/97 “Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore” regola i valori limite di immissione e di emissione ed i valori di qualità;
 - DPCM 5/12/97 “Requisiti acustici passivi degli edifici” impone i requisiti minimi d'isolamento acustico di facciata e tra unità abitative, dei rumori di campestio e dei rumori impiantistici;
 - DM Ambiente 11/12/96 Impianti a ciclo produttivo continuo”;
 - DM Ambiente 16/03/98 “tecniche di rilevamento e misurazione” detta le metodologie da seguire per eseguire per i rilevamenti e le misurazioni in modo da standardizzare e rendere univoci i risultati;
 - DPR n°142/04 “Contenimento e prevenzione dell'inquinamento acustico derivante da traffico veicolare”.
- Il DPCM del 01/03/91 “Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno”;
- La direttiva 2002/49 del 25/06/02 “determinazione e gestione del rumore ambientale”.
- UNI EN ISO 717-1
- UNI EN ISO 717-2

Isolamento acustico

- EN 12354-1
- DIN 4109
- UNI TR 11175

Sull'assorbimento acustico

- UNI EN ISO 10534-1: Determinazione del coefficiente di assorbimento acustico e dell'impedenza acustica in tubi di impedenza – Metodo con le onde stazionarie;
- UNI EN ISO 10534-2: Determinazione del coefficiente di assorbimento acustico e dell'impedenza acustica in tubi di impedenza – Metodo della funzione di trasferimento;
- UNI EN ISO 11654: Assorbitori acustici per l'edilizia – Valutazione dell'assorbimento acustico;
- UNI EN ISO 354: Misura dell'assorbimento acustico in camera riverberante.

Tabella 31 – Requisiti acustici passivi degli edifici (D.P.C.M 05/12/97).

Categorie	R_w	$D_{2m,nT,W}$	$L_{n,W}$	L_{ASmax}	L_{Aeq}
Ospedali, cliniche, case di cura	55	45	58	35	25
Residenze, alberghi, pensioni	50	40	63	35	35
Scuole	50	48	58	35	25
Uffici, edifici ricreativi, di culto, commerciali	50	42	55	35	35

8.5 COMPORTAMENTO ACUSTICO DELLA PARETE VENTILATA

Il problema principale della progettazione acustica delle pareti esterne è dato normalmente dalle aperture presenti nel sistema di facciata: in particolare serramenti e aperture di aerazione.

Una parete esterna opaca infatti, nella maggior parte dei casi non presenta particolari problemi di isolamento acustico in relazione ai requisiti minimi di legge.

Anche con l'adozione di stratigrafie differenti, l'indice di valutazione del potere fonoisolante R_w è solitamente comunque superiore ai 50 dB. Tuttavia le pareti opache esterne possono normalmente essere suddivise in tre categorie principali: elementi singoli o monostrato, elementi doppi con interposta camera d'aria ed elementi multistrato (tra i quali figurano le pareti ventilate).

Nel caso di elementi multistrato, possiamo affermare che sono principalmente tre, i modi in cui si può determinare in maniera attendibile il valore di R_w : correlazioni specifiche, relazioni generali e dati di laboratorio (ANIT, 2006).

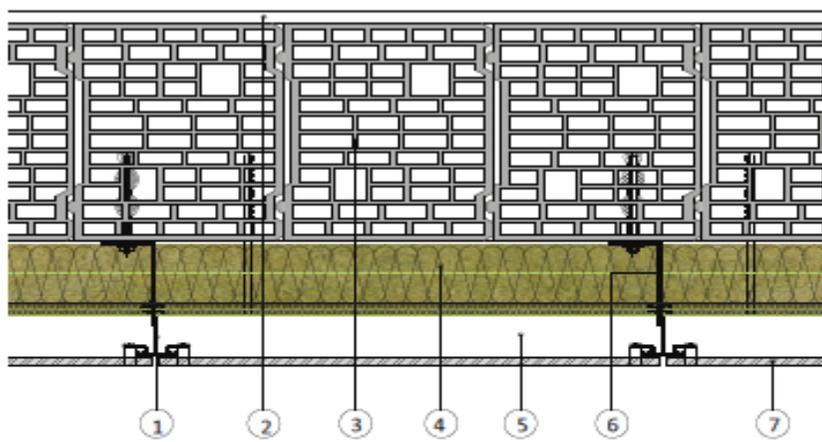
Senza entrare nel merito della descrizione delle tre metodologie di analisi appena menzionate, possiamo affermare che quella che presenta l'attendibilità maggiore per il caso in questione è l'ultima: attingere a dati di laboratorio, nonostante le differenze con le condizioni di cantiere, permette al progettista di avere in mano dei dati più accurati di quelli che otterrebbe attraverso altre metodologie di stima.

Per calcolare dunque il valore di R_w di una parete ventilata, ci affideremo ai dati di laboratorio calcolati e condivisi da Rockwool, una delle aziende leader nella produzione di materiali isolanti (soprattutto in lana di roccia).

Rockwool presenta dati facenti riferimento ad una parete ventilata costituita da una stratigrafia come in Figura 43.

Per il calcolo di R_w , si procede dunque sovrapponendo una curva di riferimento a quella sperimentale, procedendo per intervalli di 1 dB, così che la somma degli scarti favorevoli sia la più grande possibile ma tuttavia non superiore a 32 dB, qualora la misurazione sia riferita a 16

bande da un terzo di ottava, od a 10dB, qualora sia riferita a 5 bande d'ottava (Lucchini, Mazzucchelli, & Stefanazzi, 2017).



1. Profili in alluminio sagomati di dimensioni 3000mm
2. Intonaco tradizionale a base di malta cementizia
3. Blocchi in laterizio sp. 300mm
4. ROCKWOOL VENTIROCK DUO: pannello in lana di roccia a doppia densità sp. 100mm
5. Intercapedine d'aria, spessore medio rilevato 60mm
6. Staffe in alluminio sagomate a forma di "L" di dimensioni 80x115x65mm
7. Lastre piane in gres, dimensioni 600x600x11mm

Figura 43 – Stratigrafia di facciata ventilata per studio di indice R_w (Rockwool.it).

Una volta definito il giusto punto di sovrapposizione tra le curve, il valore alla frequenza di 500 Hz della curva di riferimento corrisponde all'indice R_w del potere fonoisolante dell'elemento (Lucchini, Mazzucchelli, & Stefanazzi, 2017).

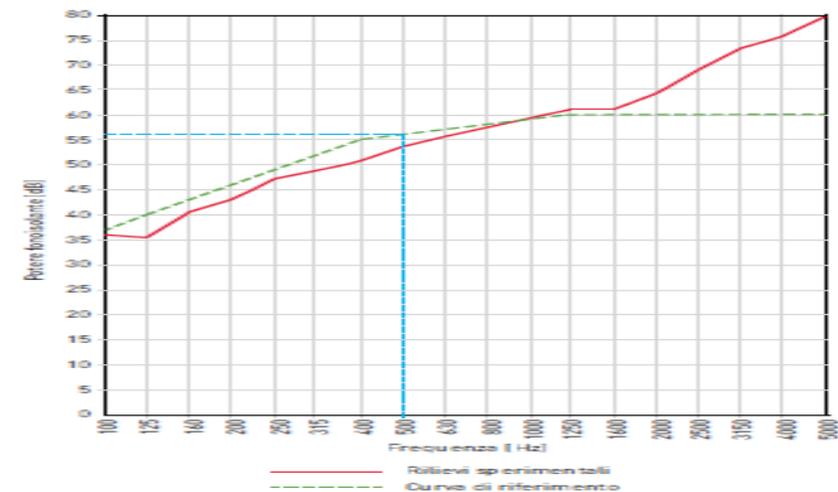
Come possiamo facilmente vedere in Tabella 33, il valore di R_w per la stratigrafia citata, calcolato alla frequenza di 500 Hz è pari a circa 56 dB, un dato che rispetta in pieno le prescrizioni di legge viste in precedenza.

Tabella 32 – Stratigrafia di parete ventilata per calcolo R_w . (Rockwool.it).

Materiali	Spessore
Intonaco a base di malta cementizia	2,0 cm
Muratura in laterizi alveolari	30,0 cm
Materassino isolante in lana di roccia a doppia densità	10,0 cm
Camera di ventilazione	6,0 cm
Gres porcellanato	1,1 cm
TOTALE	49,1 cm

Questo dato ci dà conferma di come le soluzioni di facciata quali la parete ventilata possano contribuire in maniera molto efficace all'abbattimento dei rumori, garantendo adeguati livelli di comfort acustico negli ambienti interni. Il funzionamento dell'intero sistema parete può essere assimilabile a quello di una trappola acustica.

Tabella 33 – Potere fonoisolante di parete ventilata (Rockwool.it).



La riduzione del livello di pressione sonora avviene grazie alla parziale riflessione dell'onda acustica incidente sullo strato di rivestimento esterno ed al parziale assorbimento e dissipazione operato dai singoli elementi. L'intercapedine e lo strato isolante (qualora questo abbia proprietà fonoassorbenti) a loro volta si occupano di garantire una parte dell'assorbimento e smorzamento della pressione sonora incidente.

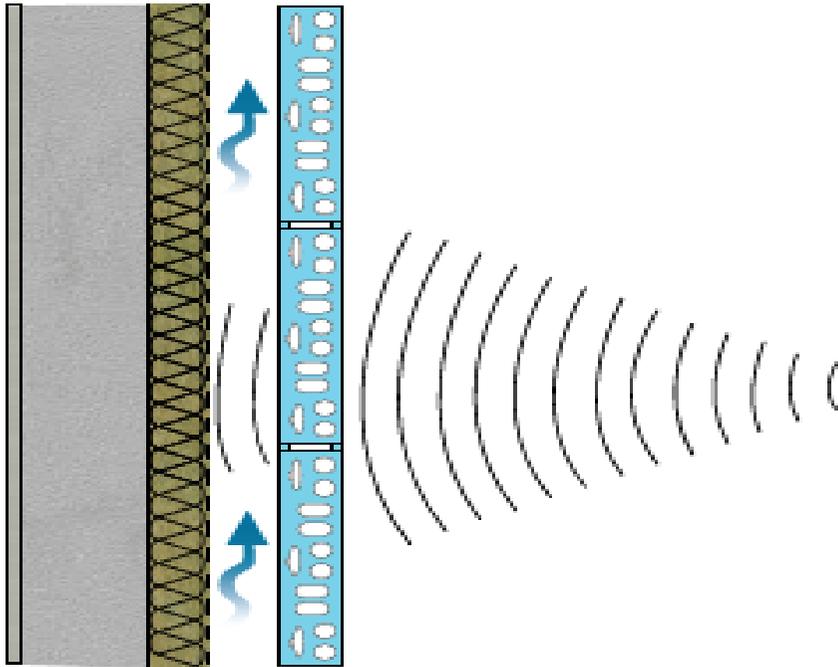


Figura 44 - Comportamento acustico di sistema di parete ventilata (Rockwool.it).

Possiamo dunque dedurre da queste considerazioni come siano principalmente gli strati più esterni del sistema a determinarne la

performance acustica: strato di rivestimento, camera di ventilazione e strato isolante.

A questo proposito, Rockwool consiglia di impiegare un doppio strato isolante in lana di roccia, progettato in modo tale che lo strato a contatto con la muratura abbia una densità minore dello strato a contatto con la camera di ventilazione.

Il materiale utilizzato per il rivestimento esterno, il gres porcellanato, è un elemento altamente riflettente e possiede infatti un coefficiente di fonoassorbimento α di circa 0,02. Per questo motivo, nella stratigrafia il compito di fonoassorbimento viene delegato all'azione congiunta di strato isolante, realizzato in lana di roccia, e camera di ventilazione.

La lana di roccia è un materiale altamente fonoassorbente in quanto possiede, alle basse (250 Hz), medie ed alte (4000 Hz) frequenze, valori di fonoassorbimento α che oscillano in media intorno a 0,90 (su una scala compresa tra 0 e 1).

Dal punto di vista del comfort acustico degli ambienti interni, il sistema di parete ventilata preso in analisi garantisce dunque un buon valore di isolamento acustico per effetto dell'azione combinata tra la camera di ventilazione e lo strato isolante.

Al contrario, analizzando la prestazione da un punto di vista urbanistico di fonoassorbimento dei rumori del centro abitato, il sistema di parete presenta un alto indice di riflessione del suono, non permettendo dunque una reale azione di abbattimento dell'inquinamento acustico esterno, ad esempio il cosiddetto "effetto canyon acustico".

8.6 COMPORTAMENTO ACUSTICO DEL SISTEMA GRE_EN_S

I rilievi portati avanti in termini di comportamento acustico sul sistema GRE_EN_S si sono concentrati prevalentemente sulla misurazione del potere fonoassorbente dei moduli vegetati esterni: un dato importante per la misurazione dell'inquinamento acustico esterno.

Poichè chiaramente le sorgenti di rumore presenti negli spazi aperti non possono essere facilmente isolate, il fattore su cui si può tentare di lavorare è quello del riverbero sonoro: aumentare al massimo la capacità fonoassorbente delle superfici esterne in modo tale che il rumore creato dalle sorgenti non venga amplificato dal riverbero sulle facciate degli edifici.

Mentre i materiali di rivestimento convenzionali presentano normalmente una modesta capacità fonoassorbente ma sono al contrario altamente riflettenti, la particolarità dei moduli vegetati dei VGS sembra proprio quella di avere un alto potere fonoassorbente. Non per niente, le piante costituiscono un elemento di progettazione urbanistica sempre più indispensabile e questa è probabilmente una delle loro caratteristiche più conosciuta e sfruttata.

In particolare il coefficiente di assorbimento acustico è stato misurato in camera riverberante su tre diversi prototipi ed i risultati ottenuti sono stati confermati da una seconda misura effettuata tramite tubo di Kundt¹⁴. All'interno di una camera riverberante l'energia sonora viene uniformemente distribuita attraverso la stanza: si tratta infatti di uno spazio artificiale delimitato da superfici costituite da materiali molto riflettenti, in modo da creare un campo diffuso.

¹⁴ Il Tubo di Kundt è un tubo di vetro parzialmente riempito di sabbie e/o polveri, utilizzato per visualizzare le onde sonore e misurare l'impedenza acustica di alcuni materiali.

Per questa analisi sono stati testati contemporaneamente tre prototipi differenti di pannelli vegetati: il VGMS_1, il VGMS_1 privato degli strati di terriccio e piante ed il VGMS_2.

I VGMS_1 sono pannelli 40x50 cm racchiusi all'interno di una struttura in alluminio microforato che ospita una sacca la quale a sua volta contiene tutti i materiali necessari per l'alloggiamento delle piante. La sezione dei pannelli mostra una stratigrafia come in Tabella 34.

Tabella 34 – Stratigrafia VGMS_1.

1	Rivestimento esterno di feltro in Polipropilene
2	Terriccio
3	Geogriglia doppio strato in filamenti di polipropilene e poliestere per l'ancoraggio delle radici
4	Geogriglia tridimensionale in Polipropilene
5	Substrato standard (fibra di cocco, idroretentori e micorrize)
6	Geogriglia tridimensionale in Polipropilene
7	Geogriglia doppio strato in filamenti di polipropilene e poliestere per l'ancoraggio delle radici
8	Rivestimento esterno di feltro in Polipropilene

Il prototipo VGMS_2 è una elaborazione del VGMS_1, in particolare per quanto riguarda i materiali: tipologie di tessuti e composizione del substrato sono infatti differenti.

Tabella 35 – Stratigrafia VGMS_2.

- 1 Rivestimento esterno in feltro di poliestere resistente agli UV
- 2 Terriccio
- 3 Strato singolo di tessuto in viscosa e Polipropilene
- 4 Geogriglia tridimensionale in Polipropilene
- 5 50% substrato standard e 50% feltro in Polietilene
- 6 Geogriglia tridimensionale in Polipropilene
- 7 Strato singolo di tessuto in viscosa e Polipropilene
- 8 Rivestimento esterno in feltro di poliestere resistente agli UV

8.6.1 Coefficiente di fonossorbimento

Si è proceduto a caratterizzare il coefficiente di assorbimento acustico per i tre sistemi diversi VGMS_1, VGMS_1 privato di piante e del suolo e VGMS_2 attraverso misurazioni effettuate in camera riverberante secondo la norma ISO 354.

Il metodo seguito consiste nel misurare il tempo di riverberazione del suono all'interno della camera riverberante, in funzione della frequenza, con e senza il provino. Dai valori di tempo di riverberazione ottenuti, viene determinata l'area di assorbimento equivalente del campione A_T attraverso la formula di Sabine e successivamente il coefficiente di assorbimento acustico tramite l'Equazione 1.

Equazione 1 – Coefficiente di assorbimento acustico.

$$a = \frac{A_T}{S}$$

Nell'equazione, A_T è l'area di assorbimento acustico equivalente del provino ed S è la superficie del campione. A_T dipende dalla differenza tra la misura dei tempi di riverbero e il volume della camera, la velocità di propagazione del suono e un particolare coefficiente di

attenuazione di potenza che consideri le condizioni climatiche della stanza durante le misurazioni. L'area coperta dal campione è pari a 12m^2 per tutti i sistemi di misura.



Figura 45 – Misurazioni in camera riverberante per i tre campioni di GMS.

Come mostrato in Figura 46, i campioni VGMS_1 e VGMS_2 mostrano tendenze simili di assorbimento acustico. L'influenza delle piante all'interno della prestazione del sistema è osservabile confrontando la curva blu con la grigia, relativa al sistema VGMS_1. Il sistema senza piante è meno performante rispetto al caso con le piante, ma le differenze sono minime; Inoltre deve essere tenuto in considerazione che l'assenza di piante significa contemporaneamente anche assenza di terreno.

I risultati ottenuti mostrano che il ruolo più importante in termini di assorbimento acustico è dovuto principalmente al substrato, piuttosto che alla vegetazione. Tuttavia, la presenza della vegetazione permette di raggiungere prestazioni notevolmente migliori alle basse frequenze, mantenendo pressoché inalterate le performance alle alte frequenze.

I test effettuati sui tre campioni, infatti, ci mostrano come analizzando lo spettro delle frequenze, già a partire da valori prossimi ai 500 Hz (medie frequenze), si possa apprezzare, per i due campioni dotati di piante e terriccio, un potere fonoassorbente α prossimo a 0,8, analogo cioè a quello di materiali considerati altamente fonoassorbenti, come

per esempio la lana di roccia considerata previamente per il sistema di parete ventilata.

Analizzando l'intervallo delle frequenze al di sotto dei 500 Hz (basse frequenze) possiamo invece notare come tale potere fonoassorbente precipiti molto velocemente.

Al contrario, analizzando i valori misurati per frequenze superiori ai 500 Hz, arrivando fino ai 5000 Hz (alte frequenze), il potere fonoassorbente dei moduli vegetati si mantiene pressoché costante, oscillando all'interno di un intervallo di valori compreso tra 0,8 e 0,9. Il picco di massimo si riscontra circa alle frequenze di 600 Hz, con α pari a circa 0,95, mentre il minimo relativo lo troviamo poco al di sopra dei 3000 Hz, con α poco al di sopra di 0,8.

Per esaminare il contributo dei vari strati da cui è formato il sistema del pannello vegetato, si è optato per misurare l'assorbimento del suono in un tubo di Kundt leggermente modificato. Le misure sono state eseguite secondo la norma ISO 10534-2.

Questa tecnica si riferisce alle ricerche di Chung e Blaser che hanno concepito il cosiddetto "metodo a due microfoni": la tecnica si basa sulla misurazione di una funzione di trasferimento tra la pressione sonora misurata da due microfoni all'interno del tubo, quando il tubo viene eccitato da un altoparlante collocato ad un estremo, mentre il campione viene posto all'altro terminale del tubo.

Questa misura esprime la relazione tra pressione sonora totale, a causa di onde progressive e onde riflesse, rilevata nei due punti di misura x_1 e x_2 . Poiché il rapporto tra onde progressive e onde riflesse nei due punti è noto e viene espresso in funzione della distanza s tra il punto medio dei due microfoni, possono quindi essere determinati

prima il coefficiente di riflessione sonora ed in seguito il coefficiente di assorbimento acustico.

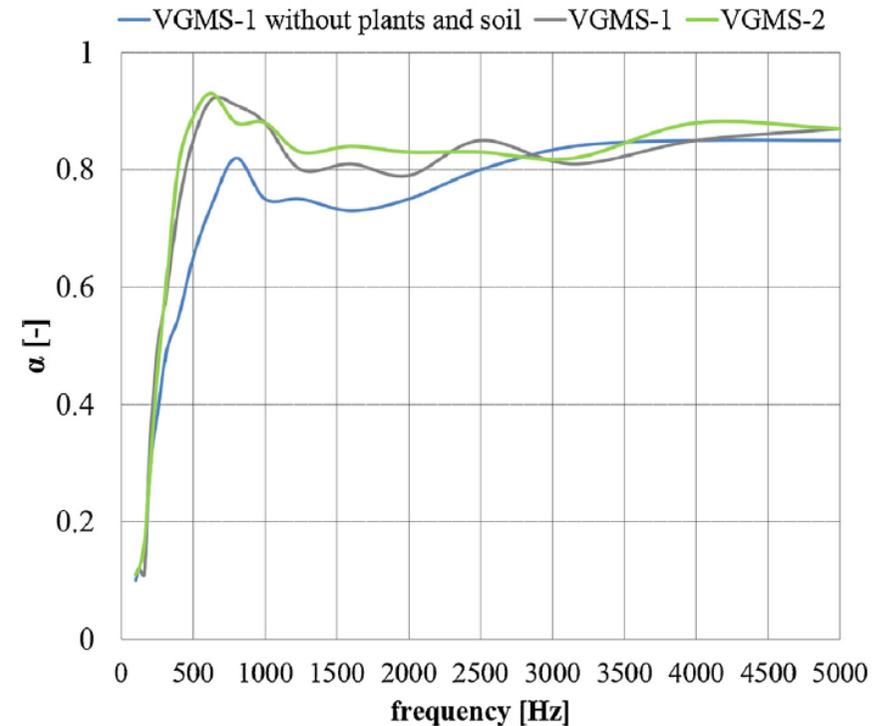


Figura 46 - Coefficienti di assorbimento acustico dei tre campioni di GMS.

Questo metodo si basa sul presupposto che le onde all'interno del tubo siano piane e questa ipotesi è valida fino ad una frequenza limite che dipende dal diametro interno del tubo d , oltre il quale l'ipotesi non è più valida.

Il tubo ad onde stazionarie realizzato a I.N.Ri.M. è stato ottenuto dalla lavorazione di una barra di plexiglass di diametro 60 mm, in modo da ottenere un diametro interno pari a 30 mm. È composto come segue:

un conduttore acustico A, un corpo centrale B (un tubo con diametro interno di 30 mm e lunghezza 305 mm) in cui sono installati i due microfoni C, un prolungamento del tubo D (collegato tramite dado) nel quale è inserita una terminazione rigida mobile E.

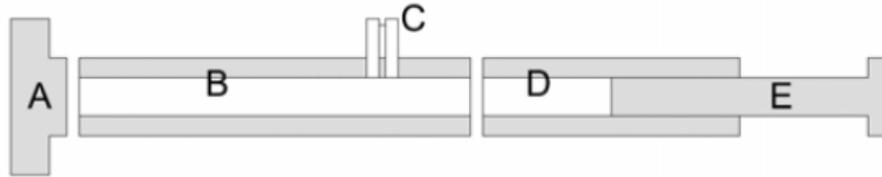


Figura 47 – Schema di funzionamento del tubo di Kundt utilizzato per le misurazioni.

In questo modo, l'analisi può essere condotta fino frequenze di 6,5 kHz. Tuttavia, per questa ricerca, il coefficiente di assorbimento α sarà espresso in un intervallo di frequenza compreso tra i 250 Hz e 5 kHz.

Partendo dunque dallo strato più esterno (il rivestimento in feltro), si è proceduto ad aggiungere uno per uno gli strati successivi al fine di verificare il contributo, in termini di assorbimento acustico, di ogni nuova aggiunta.



Figura 48 – Inserimento degli strati per le misurazioni nel tubo di Kundt.

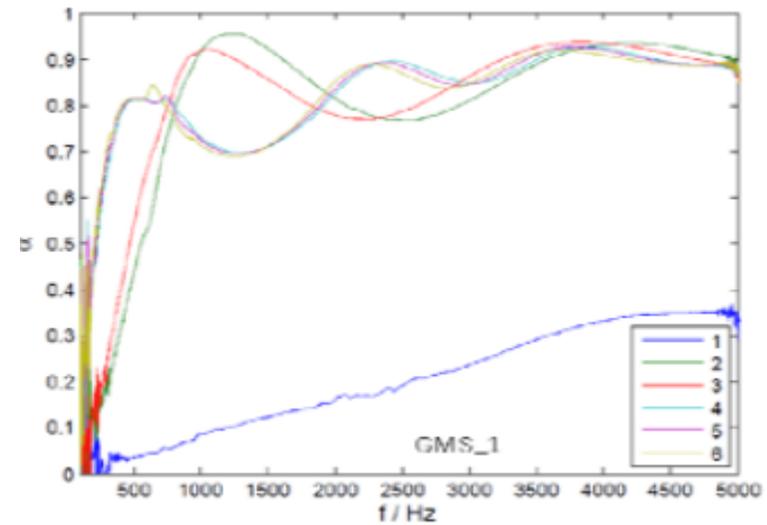


Figura 49 – Comportamenti di assorbimento acustico del VGMS_1.

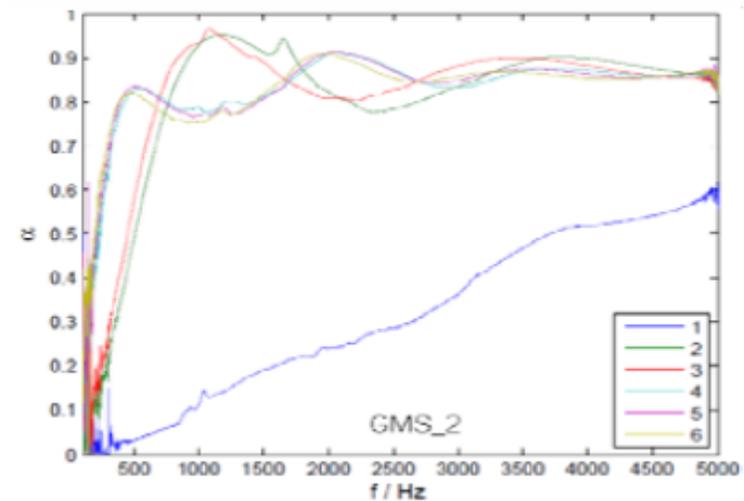


Figura 50 - Comportamenti di assorbimento acustico del VGMS_2.

Nei grafici di Figura 49 e Figura 50 sono raffigurati i comportamenti di assorbimento acustico dei vari campioni testati, in funzione della frequenza.

I risultati ottenuti con le misurazioni effettuate con il tubo di Kundt sono in accordo con le misurazioni effettuate nella camera riverberante.

I valori di assorbimento acustico in funzione della frequenza ottenuti possono essere considerati di rilevante importanza rispetto agli spettri tipici della rumorosità del traffico.

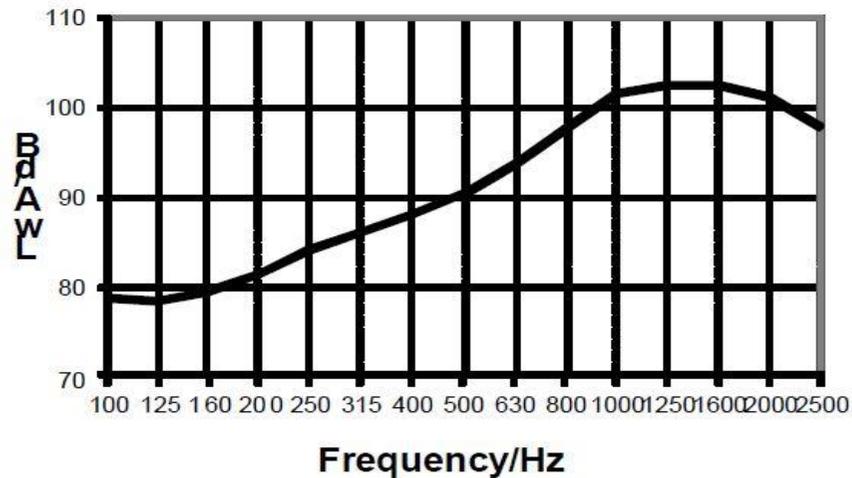


Figura 51 - Spettro del rumore del traffico (EN 1793-3).

Come abbiamo detto in precedenza, le prestazioni acustiche dei VGMS possono essere utili per attenuare, ad esempio, l'"effetto canyon acustico" prodotto dalle riflessioni multiple del suono nelle strade cittadine circondate da edifici.

Tenendo conto della norma europea EN 1793-3, è possibile riconoscere che una quantità rilevante dell'energia sonora è distribuita sopra i 500 Hz ed in generale alle medie ed alte frequenze dello spettro, in cui l'efficienza di assorbimento acustico dei VGMS è più alta.

A questo proposito, risulta dunque fondamentale specificare che i dati precedentemente presentati fanno riferimento a rilievi condotti su campioni rivestiti con Lonicera Nitida. Tuttavia, anche questa prestazione dipende almeno in parte dalle caratteristiche della specie vegetale utilizzata per il rivestimento del sistema e dall'umidità che caratterizza il sistema stesso. Dati relativi alla superficie fogliare specifica delle singole piante o la densità fogliare o la velocità di ricrescita sono fondamentali per poter capire quali specie vegetali saranno in grado di servire meglio allo scopo e quali invece saranno meno adatte.

Come possiamo vedere in Figura 52, la prestazione di fonoassorbimento presenta caratteristiche differenti al variare della specie vegetale utilizzata per il rivestimento esterno. Allo stesso tempo, possiamo anche osservare una diminuzione importante delle prestazioni in caso di sistema bagnato.

Dopo che misure del coefficiente di assorbimento acustico dei VGMS sono state effettuate sia nella camera riverberante che nel tubo di Kundt, i risultati mostrano che il ruolo più importante in termini di assorbimento acustico è dovuto principalmente al substrato, che funge da adattatore di impedenza tra il mezzo di propagazione esterno (l'aria) e il sistema stesso. Questo ruolo è svolto in particolare dal terriccio posto sotto il rivestimento esterno in feltro.

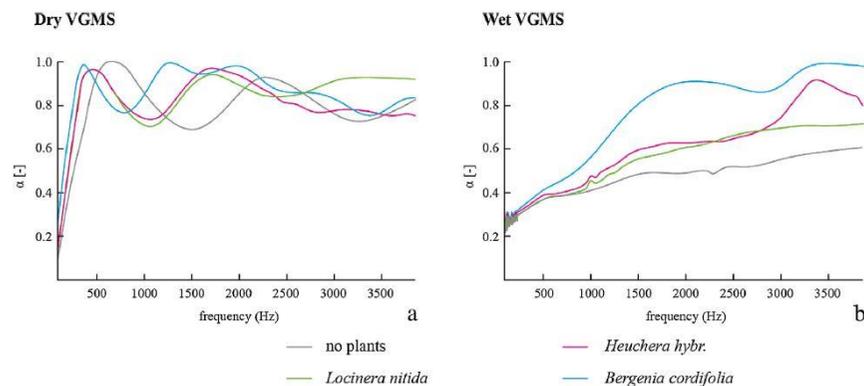


Figura 52 - Coefficiente di fonoassorbimento in condizioni di asciutto e bagnato per diverse specie vegetali.

8.6.2 Coefficiente di isolamento acustico del sistema GRE_EN_S

Il livello di isolamento acustico del sistema GRE_EN_S ($D_{2m,nT}$) è stato invece misurato su un mock-up in scala reale attraverso il metodo intensimetrico (UNI EN ISO 15186-2). Il livello di isolamento acustico è stato misurato per la L. Nitida con il substrato del tipo SF50B.

In Figura 53 possiamo osservare i risultati delle misurazioni del livello di isolamento acustico del sistema GRE_EN_S, comparati ad una parete di riferimento realizzata per lo stesso mock-up.

Dalla figura è possibile osservare che il sistema presenta valori maggiori rispetto alla parete di riferimento sia alle basse che alle alte frequenze. I valori permangono simili per quanto riguarda le medie frequenze.

I valori di livello di isolamento acustico per il sistema GRE_EN_S e la parete di riferimento calcolati sul mock-up si attestano dunque rispettivamente a 43 e 40 dB.

Il valore misurato sul mock-up permette dunque di rispettare i requisiti di comfort acustico passivo imposti dal D.P.C.M 05/12/97 per residenze, alberghi, pensioni, uffici, edifici ricreativi, di culto e commerciali, mentre si trova leggermente al di sotto dei requisiti per quanto concerne ospedali, cliniche, case di cura e scuole.

Come per il caso dell'assorbimento acustico, anche l'isolamento acustico può essere influenzato dalla tipologia di specie vegetali selezionate, dalla tipologia di substrato e dalle condizioni di umidità dei componenti.

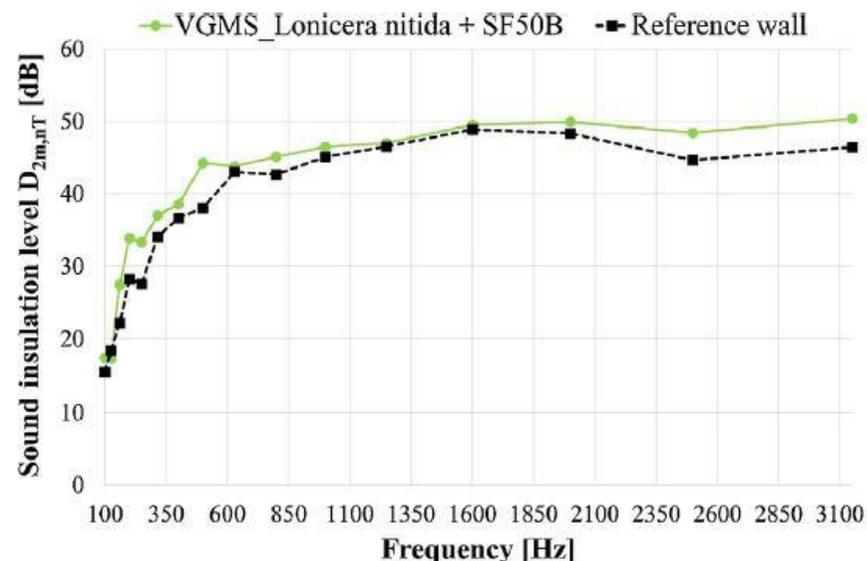


Figura 53 - Prestazione di isolamento acustico del sistema GRE_EN_S.

8.7 CONCLUSIONI AL RAFFRONTO

Come abbiamo visto, la parete ventilata può presentare una capacità di isolamento acustico maggiore, soprattutto grazie alla maggiore massa superficiale ed al maggior spessore degli elementi. Contemporaneamente però, è caratterizzata da prestazioni non all'altezza in termini di fonoassorbimento dei rumori esterni. Questo tipo di soluzione è dunque in grado di garantire un adeguato livello di comfort acustico agli ambienti interni, favorendo però al contempo il riverbero dei rumori esterni e dunque l'inquinamento acustico esterno.

Al contrario, abbiamo visto come il sistema GRE_EN_S sia in grado di garantire un ottimo fonoassorbimento esterno per abbattere l'inquinamento acustico degli ambienti esterni, sacrificando però in parte il livello di comfort acustico interno, presentando un livello di isolamento acustico minore di quello che può garantire un sistema di parete ventilata ma comunque in linea con i requisiti di legge (in questo caso le caratteristiche di spessore e leggerezza non portano benefici alla prestazione).

In conclusione, possiamo affermare che il sistema GRE_EN_S presenta una capacità di assorbimento acustico dei rumori esterni del centro abitato (come per esempio quelli prodotti dal traffico) di gran lunga maggiore a quella fornita da un sistema di parete ventilata. Questa notevole migliona in termini di prestazione a livello urbanistico, necessita però di un piccolo sacrificio a livello architettonico, in termini di comfort acustico degli ambienti interni, causato da una leggera diminuzione del livello di isolamento acustico fornito dal sistema.

9 POSA IN OPERA

Quando parliamo di posa in opera facciamo riferimento al processo costruttivo vero e proprio, all'azione manuale degli operai che costruiscono un edificio, mattone su mattone. Posare in opera significa letteralmente "mettere in funzione", disporre un manufatto in modo tale che possa assolvere al meglio al proprio compito.

La posa in opera rappresenta una delle fasi più importanti del processo costruttivo. Se da un lato la buona progettazione permette di realizzare delle costruzioni di alta qualità dal punto di vista teorico, una buona posa in opera permette di riscontrare la stessa qualità progettuale dal punto di vista pratico. La fase di posa in opera rappresenta di fatto l'esecuzione delle indicazioni progettuali e dal grado di attenzione con cui questa viene eseguita, dipende la efficienza reale del sistema edilizio. Perciò, anche quando un progetto possa sembrare sulla carta altamente efficiente, le sue prestazioni potranno essere garantite solo da una corretta posa in opera. Quando la fase di posa non sarà eseguita a regola d'arte, anche il progetto migliore potrà scoprirsi del tutto inefficiente.

Proprio perché costituisce una delle fasi più importanti del processo di edificazione, la posa in opera rappresenta anche una delle voci di spesa maggiori da prendere in considerazione in fase di progetto. Alla fase di posa saranno infatti da attribuire costi quali trasporto dei materiali dal sito di produzione al cantiere, allestimento del cantiere, affitto delle attrezzature, salario degli operai, ecc. Tutte le spese dovute alla posa in opera saranno poi da considerarsi in funzione del tempo utilizzato per realizzare tutte le azioni necessarie alla conclusione dei lavori. Una posa in opera che necessiti di tempi lunghi costituirà anche una spesa maggiore, in quanto prolungherà nel

tempo determinati costi quali per esempio l'affitto delle attrezzature ed i salari degli operai.

Per sua influenza sulle prestazioni finali dell'edificio e sui costi di costruzione, la facilità di posa in opera deve rappresentare uno dei principali punti di interesse di un progettista accorto. Durante la fase di progettazione, di ogni elemento di cui venga previsto l'impiego si devono studiare le possibilità di posa in opera, tenendo sempre presente le relative difficoltà del processo ed i tempi necessari per ultimarlo. Una reale consapevolezza dei processi di posa in opera permetterà al progettista di non commettere l'errore di prevedere sulla carta l'impiego di elementi che poi non potranno essere resi funzionali nella realtà.

Ultimamente poi, con l'avvento della consapevolezza sull'impatto ambientale del costruito e tramite i requisiti imposti dalle nuove normative per la diminuzione delle emissioni di agenti inquinanti e di tutela ambientale, la fase di posa ha assunto un'importanza tutta nuova per i progettisti. Si è infatti preso coscienza di come la scelta di un sistema costruttivo rispetto ad un altro e delle relative modalità di posa in opera che fanno capo ad ognuno, influenzino il cosiddetto ciclo di vita dell'edificio. Come avremo modo di vedere in dettaglio nei prossimi due capitoli "durata" e "fine vita", le modalità di posa influenzano infatti direttamente sia la durabilità dei componenti adottati, sia la loro riciclabilità a fine vita.

Nel capitolo 11 vedremo come, dal punto di vista della durata dei componenti impiegati, le modalità di posa in opera influenzino direttamente la loro velocità di degradamento fisico e le possibilità di manutenzione dell'edificio, al punto da poter rendere queste operazioni altamente onerose od addirittura impossibili.

Nel capitolo 12, invece, potremo analizzare velocemente gli effetti che questa fase può esercitare sulla futura riciclabilità dei materiali a fine vita e dunque sull'impatto ambientale dell'edificio in termini di smaltimento.

Nonostante per ogni singolo manufatto siano previsti dei procedimenti di posa ad hoc, possiamo dividere tutti questi processi costruttivi in due macrocategorie: la posa in opera "a umido" e la posa in opera "a secco".

9.1 POSA IN OPERA "A UMIDO"

Quando si parla di posa in opera con sistema umido ci si riferisce generalmente a dinamiche di cantiere in cui una parte consistente dei componenti che vengono impiegati viene direttamente prodotta od elaborata in situ. In particolare, la terminologia "a umido" sta ad indicare come la lavorazione di questi materiali preveda lo sfruttamento di processi per cui è necessario l'impiego di acqua.

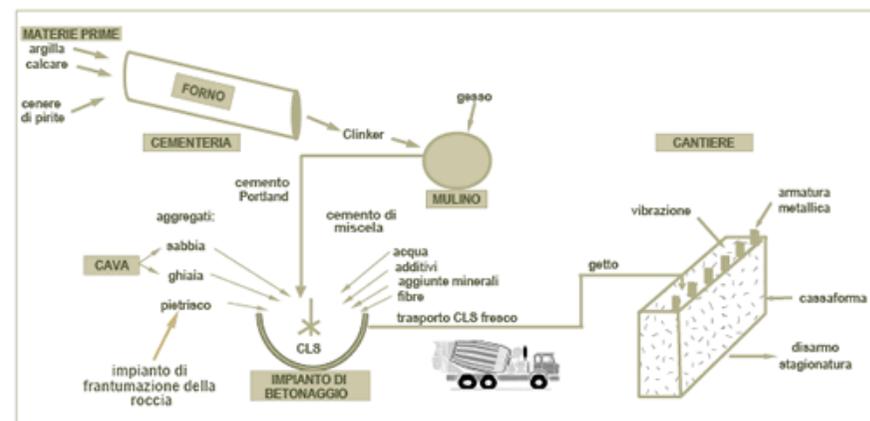


Figura 54 – Ciclo di produzione, trasporto, trattamento e posa del CLS. (fonte: *enco-journal.com*).

La dinamica di cantiere tradizionale del nostro paese prevede infatti la realizzazione di strutture tramite sistemi di elementi che vengono accoppiati e solidarizzati per mezzo di materiali leganti. Strutture in muratura di mattoni in laterizio o blocchi di CLS vengono realizzate appunto legando i componenti tramite l'uso di malte e cementi. Strutture realizzate in CLS gettato in opera sono costituite a loro volta da materiali inerti solidarizzati con l'uso di cementi.

I materiali leganti tipici di questo modus operandi vengono generalmente prodotti sotto forma di polveri per agevolarne il trasporto ed aumentarne i tempi di conservazione. Le polveri vengono poi trasportate in cantiere, dove vengono diluite in opportune quantità di acqua. L'acqua infatti attiva le prestazioni leganti del materiale che diventa così facilmente lavorabile, fintanto che verrà mantenuto un certo livello minimo di umidità. Al seccarsi del conglomerato, questo si consoliderà rendendo praticamente impossibile qualunque ulteriore lavorazione. Per questo motivo, una volta bagnati, questi materiali devono essere immediatamente posati in opera. Dopo una prima fase di posa, viene dato il tempo all'acqua utilizzata negli impasti di evaporare, consentendo così ai vari elementi (per esempio mattoni in laterizio) di solidarizzare in un unico componente.

Data l'importanza di mantenere un corretto grado di umidità dei materiali leganti, anche i manufatti che vengono tramite questi solidarizzati, sono previamente sottoposti a bagnatura, in modo tale da non essere in grado di assorbire l'acqua diluita nel legante.¹⁵ Un altro processo di bagnatura della struttura già solidarizzata viene spesso applicato successivamente alla posa per evitare che questa si

¹⁵ Mattoni e blocchi in laterizio, per esempio, sono in grado di assorbire una discreta quantità di acqua. Per questo motivo è norma bagnarli prima della posa in opera in

secchi troppo rapidamente, perdendo così parte del suo potenziale prestazionale.



Figura 55 – Blocchi in laterizio previamente bagnati vengono solidarizzati con uno strato legante in malta cementizia. (fonte: genitronsviluppo.com).

I processi di posa descritti richiedono un alto livello di organizzazione del cantiere, che deve poter gestire tutte le fasi di preparazione e posa dei materiali in maniera efficiente. Allo stesso tempo, questi processi richiedono anche un grande dispendio di tempo. Alle fasi di preparazione e posa dei materiali, già lunghe di per sé, si aggiunge infatti il tempo di attesa necessario alla loro essiccazione, che come abbiamo accennato, non può essere velocizzata ma al contrario può necessitare di essere rallentata tramite periodica bagnatura. Le

modo che non possano più assorbire l'acqua della malta, che altrimenti perderebbe gran parte delle proprie prestazioni.

prestazioni dei leganti aumentano con il diminuire del tenore di acqua al loro interno: nel caso per esempio di una struttura portante, sarà quindi necessario attendere che essa raggiunga un certo livello prestazionale, prima di poter procedere con la posa degli elementi che da essa saranno mantenuti.

9.2 POSA IN OPERA “A SECCO”

La posa in opera a secco è una tecnica costruttiva conosciuta fin dall'antichità, dai tempi della già menzionata architettura spontanea. In particolare si era sviluppata nei sistemi costruttivi in legno e assimilabili, dove struttura principale e rivestimento venivano realizzati tramite assemblaggio meccanico.

Oggi, quando parliamo di posa in opera a secco, facciamo riferimento prevalentemente a sistemi costruttivi di tipo S/R, ossia Struttura/Rivestimento. Questa metodologia si è sviluppata in tempi recenti soprattutto grazie a due fattori: da un lato l'avvento, dal punto di vista teorico, dell'applicazione della prefabbricazione industriale al campo dell'architettura; dall'altro, da un punto di vista più pratico, grazie all'applicazione di nuove leghe metalliche in campo edilizio. La possibilità di realizzare strutture di ridotte dimensioni ma molto performanti a livello statico, tramite lo sfruttamento delle proprietà intrinseche di materiali quali l'acciaio e l'alluminio, ha spalancato le porte per lo sviluppo di questi nuovi sistemi costruttivi.

A differenza dunque dei sistemi di posa a umido, questo tipo di tecnologia si basa sull'assemblaggio a secco, in situ, di manufatti di origine industriale prodotti in serie. Generalmente viene stratificato secondo una gerarchia ben precisa, in modo da poter garantire un alto livello di prestazioni. La stratigrafia si articola generalmente in quattro parti principali, desolidarizzate e autonome: un involucro interno, una

struttura primaria, una struttura secondaria ed un involucro esterno. Mentre le strutture svolgono le necessarie funzioni statiche del sistema, gli involucri si occupano del controllo delle condizioni termoigrometriche ed acustiche. In questo sistema dunque, ogni singolo strato può essere posato in opera singolarmente, tramite il semplice assemblaggio dei componenti.

Di particolare interesse sono alcuni vantaggi legati all'adozione dei sistemi a secco, in particolare il fatto che consenta di dimezzare i tempi di cantiere; rende più agevole e meno oneroso il trasporto dei materiali dal luogo di produzione sino al sito di posa; elimina i tempi di attesa normalmente necessari ai materiali caratteristici dei sistemi a umido per indurire ed acquisire le caratteristiche prestazionali necessarie al funzionamento del sistema; ridefinisce il sito di cantiere unicamente come luogo di posa e non di produzione e lavorazione dei materiali impiegati.

Il sistema S/R permette inoltre di raggiungere un alto livello di flessibilità in quanto i vari componenti possono essere scelti di volta in volta con caratteristiche differenti a seconda delle necessità. Alcuni dei vantaggi più interessanti che si possono ottenere dall'adozione di sistema S/R fanno riferimento a:

- **Riduzione della massa** – grazie alle ampie possibilità di scelta di prodotti dalle prestazioni più svariate, è possibile abbinare soluzioni diverse in modo tale da ottimizzarne le prestazioni e ridurre così sia gli spessori che la massa del sistema, ottenendo così impianti tecnologici più sottili ed estremamente leggeri.
- **Maggiore specificità** – Per ogni situazione di progetto può essere messo a punto un sistema differente che abbinerà soluzioni ad hoc e fornisca prestazioni adeguate per tutti i

diversi requisiti. Poiché i diversi strati funzionali agiscono indipendentemente gli uni dagli altri, il progettista ha facoltà di comporre per ciascun caso progettuale un pacchetto tecnologico adeguato.

- **Impiantistica** – Anche la progettazione e la posa degli impianti vengono semplificate, in quanto non si rivela più necessario intervenire in maniera invasiva con parziali demolizioni. Le reti impiantistiche potranno infatti essere poste in apposite intercapedini situate tra gli strati funzionali del sistema, facilitandone così non solo l'installazione ma anche gli interventi di manutenzione e sostituzione successivi.
- **Ecocompatibilità** – I sistemi di posa a secco permettono contemporaneamente più vantaggi: da una parte il progettista potrà studiare soluzioni tecnologiche ad alte prestazioni che riducano l'impatto ambientale degli edifici nella fase d'uso sotto diversi punti di vista; dall'altra permetterà di migliorare la riciclabilità dei materiali che, dopo una rigorosa fase di smontaggio (e non di demolizione) possono essere facilmente indirizzati ad un processo di raccolta differenziata, per poi venire riciclati e riutilizzati.

9.3 POSA IN OPERA DELLA PARETE VENTILATA

Trattando della posa in opera di pareti ventilate, stiamo parlando di un aspetto dalle caratteristiche relativamente comuni a tutte le varianti in cui questo particolare sistema di facciata può declinarsi.

La struttura base di parete ventilata che abbiamo sin qui considerato e che continueremo ad utilizzare come riferimento anche nei prossimi capitoli, presenterà caratteristiche di posa in opera costanti, quasi invariate, nonostante l'ampia flessibilità possibile nella scelta dei

materiali. Questo dipende in larga parte dalla natura stessa del sistema, il quale come abbiamo visto, deve possedere determinate caratteristiche per poter garantire le prestazioni adeguate a soddisfare i requisiti di legge.

Per questi motivi, andare a comporre soluzioni di parete ventilata dalle diverse caratteristiche di posa in opera costituirebbe un esercizio prettamente teorico che non sarebbe indicativo dei reali processi di progettazione che devono invece necessariamente tenere conto delle realtà geografiche, economiche e pratiche.

Pertanto, in questo capitolo andremo a presentare una sola soluzione di parete ventilata, caratterizzata da un processo di posa in opera ottimizzato per le necessità di progetto e che dunque si costituisce come il più comune in questo ambito, rappresentando la norma dei processi di posa di pareti ventilate.

Ripartiamo dunque dalla stratigrafia base della nostra parete ventilata ipotetica, costituita dai suoi sei strati principali, dei quali andremo a descrivere nel dettaglio il processo di posa in opera.

9.3.1 Posa dello strato resistente

Lo strato resistente, ossia la muratura in blocchi, è il primo strato, in ordine di tempo, che viene realizzato durante il processo di posa in opera di un sistema di facciata ventilata. Come abbiamo già visto in precedenza, questo strato ha la funzione statica di portare il peso di altri strati del sistema, come lo strato di regolarizzazione e lo strato isolante. La struttura di aggancio del rivestimento esterno nella maggior parte dei casi scarica il proprio peso sulla struttura portante (che nel nostro caso consideriamo costituita da un telaio di travi e pilastri in calcestruzzo armato), tuttavia può necessitare di appoggiarsi anche sulla muratura per garantire la solidarizzazione tra le parti. La

muratura si costituisce dunque in un certo senso come la base del sistema di facciata, senza la quale esso non può essere realizzato.

Indipendentemente dal fatto che la muratura sia realizzata tramite la posa di blocchi in laterizio o in CLS o tramite gettata di cemento in casseforme, nella maggiorparte dei casi si tratterà di un processo di posa “a umido”.¹⁶

Progetto – Per la realizzazione di questo strato dunque, innanzitutto si sceglie il materiale, in base alle necessità di progetto. I due materiali di maggiore diffusione e reperibilità destinati a questo scopo in Italia sono il laterizio ed il CLS. Molto meno frequenti sono oggi le realizzazioni di murature esterne in legno, pietra o terra cruda. La scelta del materiale deve essere compiuta praticamente di pari passo con la scelta della tipologia di componente da impiegare (mattoni pieni, mattoni forati, blocchi, getto in opera, ecc.).

Stoccaggio – Una volta ordinati i materiali necessari, è possibile che questi non vengano impiegati immediatamente nella posa in opera e si abbia quindi la necessità di stocarli in cantiere per un certo tempo. Le condizioni di stoccaggio sono determinanti per la futura resa dei componenti, in quanto uno stoccaggio errato può pregiudicarne le prestazioni una volta posati in opera. Sarà così necessario predisporre un’area di stoccaggio, preferibilmente piana, dove depositare in materiali per il tempo necessario. Un accorgimento importante sarà costituito dal non lasciare i materiali a diretto contatto nè col terreno, nè con gli agenti atmosferici: il depositarsi di sporcizia o l’insorgere di efflorescenze pregiudicheranno le prestazioni degli elementi.

¹⁶ Esistono in commercio delle soluzioni tecnologiche per la realizzazione di murature a secco ma non le prenderemo in considerazione in questa sede poichè

Selezione – In seguito ai processi di produzione, di trasporto e di stoccaggio, alcuni componenti potranno presentare dei difetti di varia natura. A questo proposito tutti i prodotti da costruzione devono essere dotati di “marcatura CE”, come stabilito dalla direttiva 89/106/CEE. Prima della posa sarà comunque compito del direttore dei lavori verificare l’idoneità dei componenti.

Bagnatura – Una volta scartati gli elementi difettosi o danneggiati, quelli ancora idonei vengono sottoposti ad un processo di bagnatura. ogni componente è infatti caratterizzato da un certo grado di porosità che gli permette di assorbire determinati quantitativi d’acqua. Se dei componenti ancora secchi venissero a contatto con la malta legante, questi ne assorbirebbero l’acqua, “bruciandola” e diminuendone le prestazioni. Per questo motivo, è importante bagnare i componenti previamente alla posa del legante, in modo che si trovino in uno stato di saturazione che gli impedisca di assorbire ulteriormente acqua dal legante. La bagnatura a regola d’arte saturerà d’acqua i componenti senza che questa ristagni sulla loro superficie, compromettendone la solidarizzazione degli uni con gli altri.

Disposizione degli elementi – I componenti della muratura vengono quindi disposti per corsi orizzontali, partendo dal livello del piano di appoggio (anch’esso precedentemente bagnato) e procedendo in verticale. Il primo corso in un primo momento verrà predisposto a secco per calcolare lo spessore ottimale dei giunti e verificare la necessità di pezzi speciali. Man mano che gli elementi vengono posati, sono solidarizzati tra loro attraverso la creazione di un giunto costituito generalmente da un sottile strato (0,5 - 1 cm di spessore) di malta legante. Il corretto posizionamento della muratura, così come la

sono generalmente destinate alla posa di partizioni interne e inoltre non rappresentano una casistica comune nella zona geografica di interesse.

planarità verticale ed orizzontale saranno verificati tramite l'impiego di fili tesi da calandri o agganciati al telaio strutturale.

Uno dei fattori più importanti nel processo di posa è rappresentato dallo sfalsamento dei giunti verticali tra i componenti. Questo accorgimento permette di realizzare murature considerevolmente più resistenti, in quanto i giunti si costituiscono come punti di debolezza della struttura e qualora non fossero interrotti da punti di resistenza,

potrebbero causare l'instabilità ed il crollo della stessa. Per la realizzazione del corretto sfalsamento dei giunti verticali, sarà necessario applicare degli elementi di dimensioni ridotte rispetto al modulo base, in modo da colmare i vuoti che verranno a formarsi. In questo caso si potrà procedere alla spaccatura od al taglio degli elementi per crearne di nuovi, oppure prevedere l'acquisto di componenti speciali destinati a questo scopo.

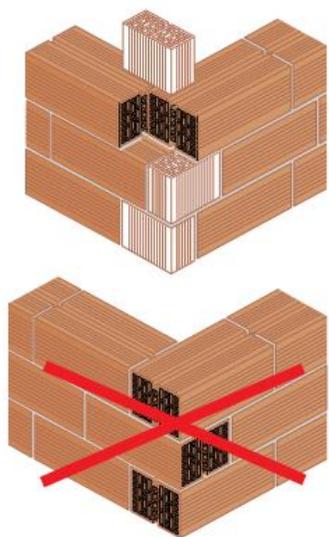


Figura 56 – Esempio di utilizzo di pezzi speciali per lo sfalsamento dei giunti (IUAV.it).

Un altro fattore importante è rappresentato dall'omogeneità dei componenti: è infatti necessario che tutti i componenti utilizzati per la realizzazione del sistema murario presentino le stesse caratteristiche e garantiscano le medesime prestazioni.

9.3.2 Posa dello strato di regolarizzazione

Una volta realizzata la posa in opera della muratura che costituirà lo strato resistente, è il momento di realizzare lo strato di

regolarizzazione che permetterà di livellare le due superfici (interna ed esterna) della muratura, in modo da rendere più agevole la posa dello strato di finitura sul lato interno e dello strato isolante sul lato esterno.

Da quanto appena detto appare dunque chiaro come sia possibile la realizzazione di due strati di regolarizzazione, nonostante fino ad ora la stratigrafia base adottata per lo studio ne prevedesse solamente uno. Mentre lo strato da applicare alla superficie interna della muratura risulta indispensabile, quello per la superficie esterna è opzionale e può essere realizzato nel caso in cui la superficie muraria non sia risultata particolarmente piana. Anche la scelta del materiale isolante da installare, con le proprie relative modalità e necessità di posa in opera, influenza la realizzazione di questo secondo strato di regolarizzazione.

Lo strato di regolarizzazione interno, ed eventualmente quello esterno, saranno costituiti da una miscela di intonaco, posata sempre con sistema a umido. Le miscele possono essere realizzate direttamente in cantiere, altrimenti è possibile acquistare dei prodotti premiscelati a cui sarà necessario solamente aggiungere acqua prima di passare alla fase di posa.

Prima di passare alla posa è necessario bagnare nuovamente la muratura affinché, per gli stessi motivi già descritti in merito alla posa dei leganti, questa non assorba l'acqua della miscela di intonaco, "bruciandola". Parimenti, sarà necessario verificare e tenere sempre presenti le condizioni climatiche in merito a temperatura, umidità relativa, incidenza di radiazioni solari e presenza di vento affinché la miscela di intonaco non asciughi troppo velocemente.

La posa dell'intonaco prevede generalmente la realizzazione di due o tre strati differenti, ognuno con una propria funzione precisa.

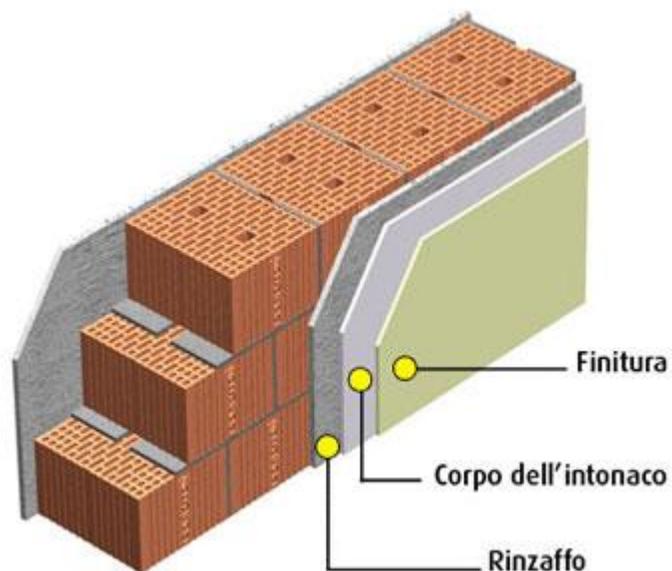


Figura 57 – Stratigrafia di posa in opera di un intonaco tradizionale (poroton.it).

Rinzaffo – Innanzitutto si realizza lo strato di rinzaffo, costituito da inerti di grosse dimensioni uniti da una grande quantità di legante. Questo strato ha la funzione di regolarizzare la superficie della muratura e preparare la superficie di aggrappaggio per gli strati a seguire. È importante avere cura di permettere la corretta maturazione del rinzaffo prima di procedere alla realizzazione degli strati successivi, affinché questo possa garantire prestazioni ottimali.

Arriccio – In seguito, viene realizzato l'arriccio, costituito da inerti di minori dimensioni ed una minore quantità di legante. Questo strato ha funzioni di tenuta ed impermeabilità e costituisce lo spessore principale dell'intonaco (circa 15 mm).

Finitura – Infine, quando necessario viene realizzata la finitura, avente funzione prettamente estetica; è costituita da sabbia fine, calce e cemento, con uno spessore di pochissimi millimetri.

Poichè la planarità dell'intonaco è un fattore di fondamentale importanza, le operazioni di posa dovranno essere ottimizzate in modo da garantire un risultato soddisfacente. Per questo motivo la posa di ogni strato avviene per fasi. In un primo momento si realizzeranno delle linee di riferimento, ossia si intonacheranno delle porzioni verticali di superficie muraria di larghezza pari a circa 20 cm e distanti l'una dall'altra circa un metro, avendo cura di ottenere la massima planarità possibile. Successivamente, si procede con la posa dell'intonaco sulla superficie compresa tra due linee successive. Infine con una staggia si procede dall'alto verso il basso all'eliminazione dell'impasto in eccesso, utilizzando le linee come riferimento di planarità.

Per quanto concerne invece la realizzazione di uno strato di regolarizzazione esterno per favorire la posa dello strato isolante, sarà sufficiente realizzare un sottile strato di rinzaffo per dare maggiore planarità alla superficie muraria. Il contributo di questo strato sottile alle prestazioni del sistema di facciata nel complesso, sarà pressochè nullo, eccetto che per il comportamento igrometrico, ove una scelta errata della miscela potrebbe causare fenomeni di condensazione interstiziale con i relativi problemi già descritti.

9.3.3 Posa della camera di ventilazione

Parlare di posa della camera di ventilazione non è effettivamente corretto, in quanto si tratta di una parte del sistema di facciata ventilata che non può essere posato come gli altri. Come abbiamo visto, la camera di ventilazione è infatti un vano adibito al passaggio

dell'aria, realizzato tra lo strato isolante ed il rivestimento esterno. Pertanto, la realizzazione di una camera di ventilazione dipende fondamentalmente dalla posa in opera dello strato isolante e della struttura di aggancio del rivestimento esterno. È infatti la struttura di ancoraggio del rivestimento che definisce lo spessore della camera di ventilazione, la quale non potrà comunque mai essere inferiore ai 4 cm affinché il fenomeno di ventilazione possa effettivamente innescarsi.

Una volta realizzato dunque lo strato isolante, andiamo a delineare come avviene il processo di installazione della struttura di aggancio del rivestimento esterno, in modo da comprendere contemporaneamente in che modo venga a formarsi la camera di ventilazione.

9.3.4 Posa della struttura di aggancio del rivestimento esterno

Nel capitolo 4 abbiamo già avuto modo di analizzare la morfologia e le possibilità di impiego di una struttura di aggancio all'interno di un sistema di facciata ventilata. Abbiamo visto, dunque che si tratta sempre di un sistema che viene posato a secco, tramite ancoraggi meccanici e fissaggio a incastro. Abbiamo anche già visto come esistano numerose varianti di sistemi di ancoraggio che possono essere suddivise in due categorie principali: i sistemi con ancoraggi di tipo puntuale ed i sistemi con sottostruttura.

Il fattore che indirizza la scelta di un sistema di aggancio rispetto ad un altro è principalmente la posa in opera. Ogni sistema di ancoraggio deve poter realizzare e controllare le tre regolazioni spaziali necessarie per la corretta disposizione di ciascun elemento del rivestimento

esterno rispetto agli altri (distanza dalla facciata¹⁷, quota orizzontale e quota verticale).

I sistemi di tipo puntuale – Presentano punti di fissaggio lungo tutta la superficie di facciata, rendendo così necessaria per ogni punto la capacità di determinare le tre regolazioni spaziali. Questi apparecchi di fissaggio possono essere vincolati alla muratura di tamponamento, tramite tasselli chimici a calza, od alla struttura portante tramite tasselli meccanici. Possono essere di diversa forma: staffe, squadrette, tirantini ed altri componenti a vite, in diversi materiali a seconda delle esigenze, aventi regolazione multidirezionale con tolleranze di circa 1-2 cm.

La posa in opera di questo tipo di supporti richiede grande accuratezza e precisione nelle varie fasi di lavoro: la necessità di posizionare questi elementi in punti pressochè obbligati, rende impossibile collocarli sempre in modo ideale, condizionando così la possibilità di ottenere da ciascuno le prestazioni massime. In questo senso, è fondamentale che la progettazione tenga conto dell'esatto posizionamento degli apparecchi di aggancio nella muratura, in modo da prevedere eventuali difficoltà e relative soluzioni. Applicare soluzioni estemporanee in fase di posa è una soluzione da evitare poichè può creare numerosi altri problemi.

Condizione assolutamente necessaria all'impiego efficace di questo tipo di soluzione, è la planarità e regolarità della superficie muraria, per la quale uno strato di regolarizzazione esterno sarà assolutamente necessario. La corretta esecuzione della posa richiede dunque manodopera specializzata ed una programmazione delle operazioni

¹⁷ La regolazione della distanza dalla facciata (ossia dallo strato isolante) è ciò che determina le caratteristiche della camera di ventilazione.

che tenga conto dei periodi stagionali che possono condizionare anche di molto la velocità di installazione.

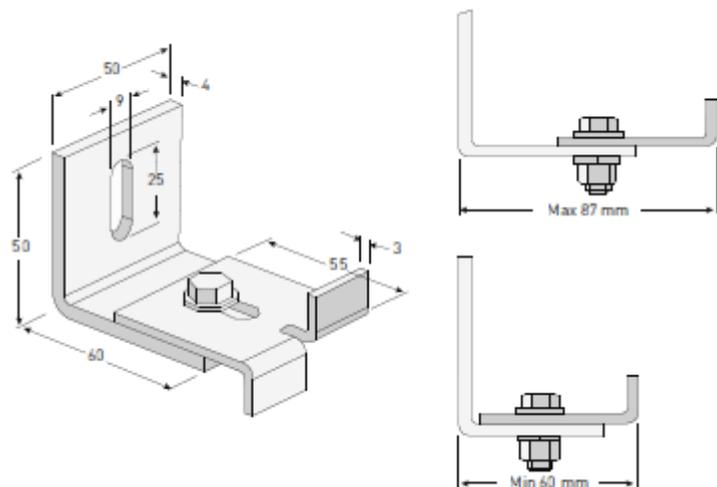


Figura 58 – Esempio di fissaggio tramite squadrette regolabili per quota verticale e distanza dalla parete. (Fonte: materiale informativo Rockwool).



Figura 59 – Dettaglio di sistema di fissaggio puntuale. (Fonte: facade-lab.com).

Date le peculiarità di questo sistema, esso presenta delle problematiche di cui bisogna tenere conto in fase di progettazione:

- Sequenza di montaggio obbligata degli elementi di rivestimento;
- Difficoltà di montaggio o smontaggio di particolari porzioni di facciata;
- Incapacità di assecondare possibili movimenti differenziali dell'edificio senza scaricare tensioni significative al rivestimento;
- Difficile realizzazione della necessaria continuità di isolante, dato l'alto numero di apparecchi di fissaggio;
- Complessità di posa;
- Limitata velocità di posa.

La posa di questo tipo di sistema parte dunque dal tracciamento di una maglia di fili di riferimento che aiuteranno a determinare le linee orizzontali e verticali lungo cui verranno installati gli apparecchi di fissaggio allo strato resistente.

Una volta verificata la corretta disposizione della griglia di riferimento, verranno posizionati gli apparecchi, agendo sulle tolleranze di ognuno per ottenere la necessaria planarità.

Posizionati accuratamente gli apparecchi di fissaggio allo strato resistente sarà possibile procedere con la posa dello strato isolante, prima di fissare il rivestimento esterno.

I sistemi con sottostruttura – I sistemi provvisti di sottostruttura sono invece costituiti da un numero più limitato di punti di fissaggio che vengono disposti prevalentemente in corrispondenza del telaio strutturale (solette interpiano in caso di montanti, pilastri in caso di

traversi), con aggiunta di alcune controventature fissate a 1/3 od a 1/4 della luce al supporto murario di tamponamento.

A questi punti di appoggio viene fissata la sottostruttura che assolve il compito di controllare la planarità della superficie e la distanza dallo strato isolante. Elementi puntuali di ancoraggio del rivestimento esterno sono fissati alla sottostruttura e si occupano di controllare le quote orizzontali e verticali dei componenti di rivestimento.

Si possono avere tre tipologie principali di sottostruttura: quella composta da soli montanti, da soli traversi o quella reticolare con montanti e traversi. Per ognuna di queste tipologie possono essere scelti numerosi materiali, così come per la realizzazione del rivestimento esterno. In generale, la scelta del materiale da utilizzare per la sottostruttura dovrebbe essere armonizzata con la scelta del materiale per il rivestimento.



Figura 60 – Esempio di sistema con sottostruttura a montanti e traversi. (Fonte: fischeritalia.it).

Tutte le tipologie di sottostrutture sono connesse allo strato resistente tramite staffe di ancoraggio che possono essere di varie forme, dimensioni e materiali, dotate di asolature in modo da garantire l'adattabilità nelle tre dimensioni spaziali. Ad ogni tipologia di sottostruttura corrisponde dunque un tipo di staffa di ancoraggio che viene connessa al supporto murario attraverso tassellatura specifica per la tipologia di muratura.



Figura 61 – Installazione di una staffa per l'ancoraggio della sottostruttura allo strato resistente del sistema (hilti.it).

I fissaggi tra le staffe ed i montanti e traversi della sottostruttura possono essere realizzati in maniera tradizionale attraverso viti,

bulloni o rivetti oppure mediante connettori a scatto 18 che velocizzano e semplificano notevolmente le operazioni di posa. Per agevolare tutte le operazioni di cantiere è bene che la lunghezza dei profili componenti la sottostruttura non superi la dimensione di interpiano dell'edificio.

Le operazioni di posa di un sistema di ancoraggio con sottostruttura partiranno nuovamente dal tracciamento della posizione dei punti di ancoraggio sullo strato resistente. Successivamente verranno posizionate le staffe, cui saranno vincolati meccanicamente i componenti della sottostruttura. Ai profili montanti e traversi della sottostruttura saranno poi applicati gli apparecchi di aggancio degli elementi del rivestimento esterno.

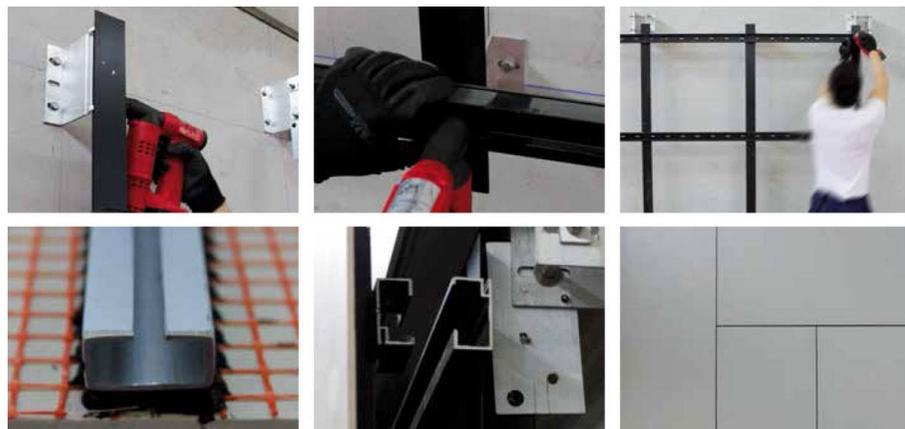


Figura 62 – Fasi di posa di una sottostruttura a montanti e traversi (ariostea.it).

¹⁸ Si tratta di apparecchi che non attraversano gli elementi da fissare insieme ma bensì li uniscono applicando una elevata pressione superficiale, esercitando così un

9.3.5 Posa dello strato isolante

Una volta realizzata la muratura e posizionati gli apparecchi di aggancio della sottostruttura, si potrà procedere con la posa dello strato isolante.

Nonostante la varietà di soluzioni presente sul mercato, per la realizzazione dello strato isolante di una parete ventilata il progettista è tenuto a compiere una scelta a priori che esclude la possibilità di impiegare un gran numero di soluzioni: la necessità primaria infatti sarà quella di scegliere materiali isolanti che siano disponibili sotto forma di materassini o pannelli. L'adozione di materiali che si presentino sotto forma di granuli, schiume, ecc. non sarà possibile in quanto lo strato dovrà essere composto da elementi solidi e coesi, che non si sfaldino.

Lo strato isolante è dunque composto da elementi prefabbricati che, una volta trasportati in cantiere necessitano solamente di essere tagliati nelle dimensioni necessarie e posati.

La posa di questo strato può essere effettuata sia a umido, sia a secco, a seconda del metodo di fissaggio che si intende utilizzare. Nel primo caso, i pannelli di materiale isolante vengono fissati per incollaggio, tramite l'impiego di un sottile strato di colla o leganti di altro genere. Nel secondo caso, al contrario, gli elementi sono fissati allo strato resistente tramite ancoranti meccanici di vario tipo o, meno frequentemente, per mezzo di sistemi a incastro.

I componenti dello strato isolante vengono dunque posti a diretto contatto con lo strato resistente, realizzando un cappotto esterno che

attrito indotto. Gli elementi possono muoversi solo qualora sottoposti ad una sollecitazione maggiore della forza di attrito indotto.

vada a coprire anche la struttura portante, in modo da scongiurare la presenza di ponti termici. Il fattore più importante che riguarda la posa in opera dell'isolante è rappresentato appunto dalla continuità dello strato: eventuali punti di discontinuità creano dei ponti termici che possono danneggiare gravemente la facciata e diminuirne il rendimento. Nonostante una posa a secco sia più semplice e veloce da realizzare e favorisca la disassemblabilità dei componenti facilitando dunque i processi di manutenzione della facciata e riciclaggio dei materiali, essa presenta il problema di creare dei punti di discontinuità laddove gli ancoranti meccanici vengono posizionati per fissare gli elementi.



Figura 63 – Posa in opera di pannelli isolanti per facciata ventilata (iocostruisco.it).

Per poter svolgere la propria funzione, gli ancoranti meccanici devono necessariamente passare attraverso lo strato isolante e forare parzialmente lo strato resistente: si costituiscono dunque come dei perfetti ponti di collegamento tra l'esterno e l'interno della muratura. A ciò si aggiunge il fatto che siano spesso realizzati in materiali metallici, conduttori di calore. Per evitare questo inconveniente, ognuno di questi punti di discontinuità dovrà essere progettato in modo tale da non creare un ponte termico e posato in opera con la necessaria attenzione e competenza.

Al contrario della posa a secco, il processo di incollaggio risulta più semplice da realizzare, in quanto gli unici punti di discontinuità da evitare sono rappresentati dalle giunzioni dei singoli elementi. Per ovviare a questo problema molti prodotti vengono già realizzati con bordature a incastro, in modo da poter essere accoppiati gli uni agli altri evitando l'insorgere di ponti termici.

9.3.6 Posa del rivestimento esterno

Il fissaggio del rivestimento esterno costituisce dunque la fase conclusiva di posa in opera di un sistema di facciata ventilata. Le operazioni necessarie per portare a termine questa fase dei lavori dipendono strettamente dalle scelte precedentemente operate in merito alla posa della struttura di aggancio. I tempi e le difficoltà di posa del rivestimento sono una diretta conseguenza della tipologia di sottostruttura precedentemente installata.

Ad ogni sistema di struttura di aggancio corrisponderanno delle specifiche tipologie di apparecchi di fissaggio del rivestimento esterno che possiamo dividere in due categorie principali: "a vista" e "nascosto". La scelta di una soluzione piuttosto che dell'altra è spesso dettata più da necessità di tipo estetico che da necessità operative.

Poichè gli apparecchi di fissaggio del rivestimento sono già stati installati durante la posa della sottostruttura, il posizionamento del rivestimento esterno richiede semplicemente il fissaggio di ogni singolo componente nella propria specifica posizione.



Figura 64 – Esempio di fissaggio di pannelli esterni con clips a vista (rockwool.com).



Figura 65 – Installazione di pannelli di rivestimento esterno (atlasconcorde.it).

9.4 POSA IN OPERA DEL SISTEMA GRE_EN_S

Come abbiamo visto nel paragrafo 3.2.1, il sistema GRE_EN_S è nato dall'unione di due concetti tecnologici: i sistemi Bybox e Reviwall. Il sistema Bybox ha costituito l'ispirazione per la struttura autoportante della soluzione di parete esterna mentre il modulo rewiwall si è costituito come il punto di partenza per il disegno dei pannelli modulari esterni.

In entrambi i casi, quando parliamo di posa in opera, stiamo parlando fondamentalmente di assemblaggio a secco, già che tutti i componenti del sistema sono studiati e prefabbricati per il montaggio meccanico.

Torniamo dunque a fare riferimento alla stratigrafia presentata nel paragrafo 3.2.2, per presentare la metodologia di posa di ciascuno degli strati funzionali, seguendo il proprio ordine cronologico di posa degli stessi:

- Telaio portante a montanti in acciaio zincato;
- Strato isolante in sughero;
- Finitura interna con doppia lastra in gesso rivestito, con barriera al vapore
- Lastra in cemento fibrorinforzato;
- Telaio di ancoraggio dei moduli vegetati in acciaio zincato;
- Moduli vegetati.

9.4.1 Posa del telaio portante

Trattiamo per prima la posa in opera del telaio portante in acciaio e notiamo come il procedimento non presenti differenze sostanziali dal processo già visto per l'installazione della sottostruttura per l'aggancio dei pannelli di una parete ventilata. Anche in questo caso si tratta di un sistema che viene posato a secco, tramite ancoraggi meccanici e

fissaggio a incastro. In questo caso si tratta di un sistema con sottostruttura a montanti e traversi.

All'interno della struttura viene installato anche il sistema di irrigazione che permetterà di fornire in seguito l'acqua necessaria alle piante che si posizioneranno all'interno dei moduli vegetati.

Oltre a costituire la spina dorsale del sistema del punto di vista strutturale, la struttura permette anche ovviamente di realizzare e controllare le tre regolazioni spaziali che abbiamo detto sono necessarie per la corretta disposizione di ciascun elemento del sistema: distanza dalla facciata, quota orizzontale e quota verticale.

9.4.2 Posa dello strato isolante

Anche il procedimento di posa dello strato isolante in sughero è molto simile a quello descritto in merito allo strato isolante di una parete ventilata. Nuovamente in questo caso, i pannelli in sughero vengono ancorati alla struttura attraverso agganci meccanici.

Si è scelto di evitare l'ancoraggio per mezzo di collanti per questioni di facilità di disassemblaggio e sostenibilità ambientale.

9.4.3 Posa della finitura interna

Una volta posizionati gli elementi più interni del sistema, si può procedere con la posa della finitura interna, costituita da una doppia lastra in gesso rivestito con barriera al vapore.

Anche questo strato viene posato attraverso sistemi di aggancio meccanico, questa volta a scomparsa, per permettere un miglior risultato estetico (è la superficie della parete a vista negli spazi interni) e per garantire certa continuità superficiale.

9.4.4 Posa della lastra in cemento

La lastra in cemento fibrorinforzato è anch'essa un elemento del sistema deputato a garantire maggiore rigidità strutturale.

A differenza della parete ventilata, dove era la muratura gettata in situ a fornire la stabilità strutturale al sistema parete, in questo caso la lastra viene a sua volta prefabbricata, come del resto tutti gli elementi del sistema, e ancorata meccanicamente alla struttura portante in acciaio.

9.4.5 Posa in opera del telaio di ancoraggio dei moduli vegetati

Il telaio di ancoraggio dei moduli vegetati viene prefabbricato in acciaio zincato ed ancorato anch'esso meccanicamente alla struttura di ancoraggio del sistema parete.

Il sistema di ancoraggio a binari nascosti permette di installare il telaio con grande facilità.

9.4.6 Posa dei moduli vegetati

I moduli vegetati sono stati studiati per poter essere installati su un telaio metallico, collegato al sistema con inserti e ancoraggi posti su interruzioni termiche in gomma.

Questa metodologia di assemblaggio rende possibile sostituire la scatola modulare nel caso di malattie delle piante o a seguito di qualsiasi necessità di smontaggio.

La stessa produzione dei singoli moduli vegetati si può definire come una produzione a secco: i moduli si possono confezionare manualmente, avendo a disposizione tutti i componenti.

Partendo dallo strato più esterno, in polipropilene riciclato, si procede con il “riempire” il tessuto con lo strato interno, il “Growing Medium” e si richiude il tutto.



Figura 66 - Il telaio di aggancio per i moduli vegetati con relativo sistema di ancoraggio a scomparsa.



Figura 67 - Dettaglio degli ancoraggi dei moduli vegetati.

Una volta realizzato “l’involucro”, per ogni pannello si realizzano sei tagli nello strato esterno, all’interno dei quali si posizioneranno le piante che andranno a ricoprire la facciata. I tagli costituiranno allo stesso tempo i punti di accesso del sistema di irrigazione.



Figura 68 - Fasi di assemblaggio di un pannello.

9.5 CONCLUSIONI DEL RAFFRONTO

Nel tirare le conclusioni sul raffronto tra le due metodologie di posa in opera, torniamo a focalizzarci sul concetto che avevamo analizzato per primo e che è anche il principale: la differenza tra posa a secco e a umido. Per quanto la maggior parte del processo di posa in opera di una parete ventilata sia a secco, tuttavia la realizzazione della muratura portante sarà sempre realizzata a umido e ciò comporterà immancabilmente una serie di svantaggi.

Come abbiamo visto nel paragrafo 9.1 infatti, la posa in umido comporta diversi problemi quali un processo di posa più complesso, maggiore difficoltà negli interventi di manutenzione, impossibilità di riciclaggio dei componenti che devono necessariamente essere smaltiti come inerti, etc. Al contrario, la posa in opera completamente a secco del sistema GRE_EN_S permette non solo evitare i problemi suddetti ma anche approfittare di alcuni vantaggi aggiuntivi, come per esempio la possibilità di ricambiare i componenti con elementi maggiormente performanti, senza necessariamente smantellare l’intera struttura.

Ricapitolando, in questo ambito possiamo concludere che il sistema GRE_EN_S, rispetto ad una parete ventilata qualsiasi, possiede i seguenti vantaggi: maggiore semplicità di posa in opera, manutenibilità completa senza necessità di demolizione e possibilità di riciclaggio e corretto smaltimento della totalità dei suoi componenti.

10 FINE VITA

Quando parliamo di fine vita ci riferiamo ad una delle fasi del cosiddetto ciclo di vita di un prodotto, in particolare alle modalità di smaltimento. Terminata la propria “vita utile”, un prodotto potrà essere destinato allo stoccaggio in discarica od al riciclaggio nella produzione di altri prodotti.

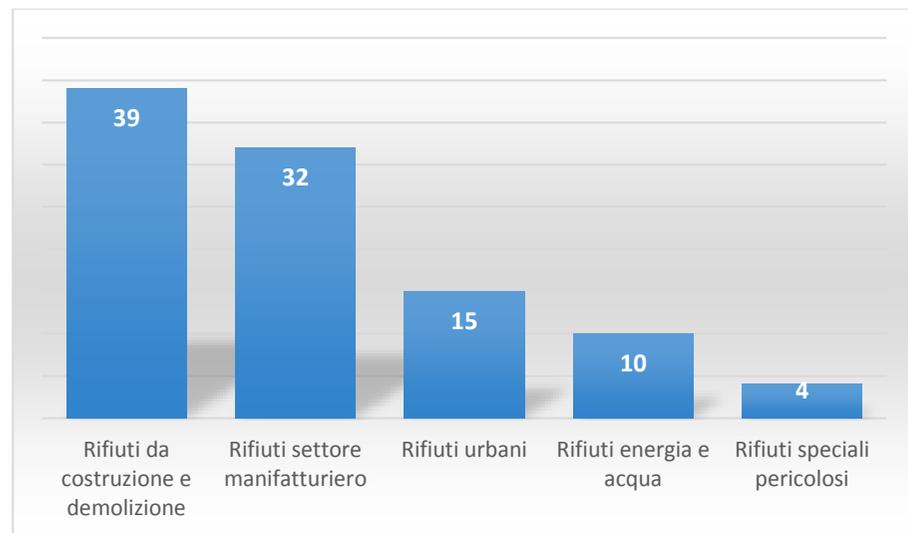
L’attenzione che si pone in fase di progettazione a questo aspetto è l’effetto della “recente” preoccupazione e presa di coscienza in merito all’impatto ambientale causato dall’uomo con le proprie attività. Ci si è infatti resi conto che per essere ecocompatibile, un sistema edilizio non può limitarsi semplicemente a rispondere a determinati requisiti prestazionali in fase d’uso ma altresì non deve costituire un “peso” per l’ambiente una volta che la sua utilità sarà terminata; in breve, deve poter essere riciclato nella misura maggiore possibile, se non nell’insieme, almeno nei propri componenti.

La valutazione della riciclabilità di un prodotto non è tuttavia un processo semplice, poiché oltre alla classificazione delle caratteristiche prestazionali del rifiuto e dell’eventuale prodotto riciclato, si richiede l’analisi di diversi fattori, quali le modalità di classificazione e gestione dei rifiuti da costruzione e le tecniche costruttive che permettono di mantenere i prodotti, ed eventualmente i sistemi stessi, riciclabili.

La produzione, la gestione e lo smaltimento dei rifiuti presentano numerose difficoltà che sono già ben note, sia a livello pratico, che burocratico, dove sono sempre presenti interessi contrastanti da parte dei differenti organi coinvolti. Sulla totalità dei rifiuti di origine antropica, quelli derivanti dai processi di costruzione e demolizione ne

rappresentano ben il 39%, ossia 1126 kg per abitante (dati APAT del 2006).

Tabella 36 – Produzione percentuale europea di rifiuti (APAT 2006).



Data la grandissima varietà di materiali che vengono utilizzati in edilizia, anche la qualità dei rifiuti è molto variabile. Dai rapporti dell'Associazione Nazionale Produttori Aggregati Riciclati (ANPAR) si legge che la maggior parte dei rifiuti che arrivano ai centri di trattamento è costituita da rifiuti misti. Al secondo posto troviamo terre e rocce da scavo, seguite a loro volta da miscugli e scorie di cemento, mattoni e ceramiche. All'ultimo posto troviamo i rifiuti derivati da miscele bituminose. Sappiamo tuttavia che vi sono altre tipologie di rifiuti che vengono prodotte dai cantieri ma che non risultano arrivare nei centri poiché finiscono mischiate ai rifiuti provenienti da altre attività.

Comprese le quantità e la provenienza dei rifiuti da costruzione, resta ancora un aspetto importante da definire per capire come affrontare

il problema: l'origine. Si stima infatti che in Italia ben il 90% dei rifiuti prodotti dai processi di costruzione e demolizione provenga dalle microdemolizioni, interventi di demolizione e ricostruzione puntuali, eseguiti dai privati per apportare piccole modifiche agli immobili. Questo è un dato significativo perché contribuisce a spiegare lo scarso successo della raccolta differenziata in Italia: le microdemolizioni producono una grande frammentarietà dei rifiuti e sono caratterizzate da oggettive difficoltà, da parte dei privati, di allestire degli spazi per la raccolta differenziata. Risulta inoltre molto complesso, per gli organi competenti, andare a verificare la natura dei rifiuti ed imporre la relativa corretta gestione.

Le ricerche dell'ANPAR hanno stimato che in Italia solo il 10% dei rifiuti da costruzione e demolizione viene riciclato mentre la restante quota viene smaltita come inerte nelle discariche. Tuttavia, il dato davvero negativo proviene dai rapporti del Corpo Forestale dello Stato che si occupa di monitorare la presenza e attività di discariche abusive sul territorio italiano. I dati contenuti nei rapporti indicano come la superficie delle discariche abusive sia in continua crescita e che il tasso di rifiuti da costruzione e demolizione sia una costante piuttosto rilevante. Questi due punti ci chiariscono dunque lo scenario attuale dello smaltimento rifiuti da costruzione e demolizione: il 90% dei rifiuti prodotti non viene riciclato ma smaltito in discariche, buona parte delle quali sono abusive e situate in aree naturali protette.

Nonostante lo scenario attuale non sia particolarmente incoraggiante, è giusto fare presente come l'industria del riciclo stia attraversando da diversi anni una fase di rapido sviluppo che permette già in molti settori di realizzare prodotti ad alto contenuto di materie prime secondarie. Così, anche in ambito edile, si stanno recentemente sviluppando diversi programmi finalizzati al riciclo ed all'impiego di

materiali riciclati, soprattutto grazie alle normative imposte in merito dall'Unione Europea.

10.1 QUADRO NORMATIVO

Il Codice Ambiente, Decreto Legislativo 152 del 04/04/06 è il principale riferimento normativo in materia di rifiuti da costruzione e demolizione. Il decreto dà una definizione di "rifiuto", descrive come deve essere riconosciuto e trattato e presenta gli obblighi a cui il proprietario deve attenersi. Il codice è stato creato con l'intenzione di riunire in un unico strumento normativo tutti i punti inerenti la tutela dell'ambiente e per questo motivo, oltre al tema dei rifiuti, si occupa anche di dettare le regole della Valutazione di Impatto Ambientale, della Valutazione Ambientale Strategica, dell'inquinamento atmosferico, della gestione delle acque, della difesa del suolo e del sistema di risarcimento dei danni ambientali. Nonostante l'obiettivo del codice fosse quello di accorpare tutta la normativa in materia di ambiente in un corpus unico, sono già numerosi i Decreti Legislativi creati per modificarne alcuni articoli poiché la situazione normativa italiana non può prescindere da quella europea che a sua volta si evolve di pari passo con la crescente consapevolezza degli esperti in materia. Nonostante tutte le correzioni, le priorità imposte dal Codice rimangono le stesse: riduzione, riutilizzo, riciclo.

Nonostante l'articolo 184 del D.Lgs presenti una classificazione dei rifiuti secondo origine e pericolosità, i metodi del procedimento erano stati già prescritti da una direttiva del 2002 del Ministero dell'ambiente e della Tutela del Territorio che a sua volta migliorava il catalogo europeo dei rifiuti precedentemente presentato dal Decreto

¹⁹ Per "stoccaggio" il DM intende un deposito temporaneo di rifiuti destinati agli impianti di smaltimento.

Ronchi, D.Lgs 22/2007. Tuttavia, il D.Lgs 36/2003 ed il Decreto Ministeriale del 03/08/2005 si costituiscono ancora come i principali riferimenti in materia di classificazione dei rifiuti e degli impianti di smaltimento, nonché dei criteri di ammissione dei rifiuti in discarica. In particolare vale la pena sottolineare che il DL 36/2003 permette finalmente di operare una adeguata distinzione tra rifiuti da costruzione e demolizione e rifiuti inerti. Infatti se i rifiuti inerti sono sempre materiali da costruzione, questi al contrario non sono sempre rifiuti inerti. Questa importante distinzione permette finalmente di identificare quei rifiuti che, considerati inerti venivano smaltiti in maniera non idonea.

In attesa delle successive modifiche, il DL 152 prevedeva che venissero ancora seguite le prescrizioni del Decreto del Ministero dell'Ambiente del 05/02/1998 e delle successive modificazioni col 161 del 12/06/2002 e col 186 del 05/04/2006, che tra le altre cose prescriveva le modalità di azione per le attività di stoccaggio¹⁹ e deposito temporaneo²⁰. I rifiuti che si trovino in condizione di deposito temporaneo devono essere smaltiti ogni tre mesi indipendentemente dalle quantità presenti in deposito oppure non appena raggiungano le quantità di 10m³ per i "pericolosi" e di 20m³ per "non pericolosi".

Esiste ancora una legislatura che regola l'utilizzo e la diffusione delle materie prime secondarie: la UNI EN 13242:2008 prevede il riciclaggio di calcestruzzi e laterizi per reimpiego nella realizzazione di nuove opera civili e strade; il DM 203 del 2003 prescrive che il fabbisogno di manufatti delle aziende pubbliche sia costituito da prodotti ottenuti da materie prime secondarie in misura non inferiore al 30%.

²⁰ Con "deposito temporaneo" il DM definisce l'accumulo temporaneo dei rifiuti nell'area dove sono prodotti, prima della raccolta.

10.2 REQUISITI DI RICICLABILITÀ

Anche nel caso del riciclaggio dei prodotti da costruzione, possiamo andare a definire un quadro di requisiti per una progettazione ecocompatibile:

- Utilizzo di prodotti riciclati;
- Uso di tecniche costruttive che prevedano il disassemblaggio;
- Impiego di prodotti con elevato potenziale di riciclabilità.

10.2.1 Prodotti riciclati

Per quanto riguarda la possibilità di utilizzo di prodotti riciclati nella progettazione architettonica, sono diverse le problematiche da affrontare. Al momento, infatti, non risulta particolarmente diffusa tra i progettisti la tendenza a scegliere materiali riciclati da impiegare nella costruzione di nuove opere. Tale comportamento si può imputare in gran parte al fatto che ancora oggi il ricorso a materiali riciclati è considerato un approccio eccessivamente virtuoso e poco praticabile.

In realtà, la presenza sul mercato di prodotti ottenuti dalla lavorazione di materie prime secondarie è già piuttosto diffusa ed il loro impiego non risulta, da un punto di vista operativo, particolarmente più oneroso di quello di manufatti analoghi prodotti da materie prime.

Un altro aspetto fondamentale da prendere in considerazione, è il consumo di energia dovuto alla produzione di manufatti ottenuti da materie prime secondarie. È necessario infatti comprendere se produrre un manufatto utilizzando materie prime secondarie consumi maggiore energia della produzione di un medesimo prodotto per mezzo delle convenzionali materie prime.

A questo proposito, un rapporto stilato da Ambiente Italia nel 2005 stima la riduzione dei consumi energetici relativi alle operazioni di riciclaggio in un range compreso tra i 14,7 ed i 18,2 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio (TEP) a fronte di un consumo nazionale annuo di 190. Anche in termini di emissioni di biossido di carbonio, il rapporto stima in un 10% la riduzione ottenibile grazie all'impiego di materiali riciclati.

10.2.2 Disassemblaggio

Quando ci riferiamo a tecniche costruttive che prevedano il disassemblaggio, stiamo parlando fondamentalmente di tecniche “a secco”. Costruire a secco significa progettare soluzioni costituite da sistemi assemblati in maniera meccanica, escludendo l'utilizzo di collanti e malte. In questi sistemi ogni componente viene prodotto in serie ed assemblato successivamente in cantiere. Questo processo permette ai vari elementi di mantenere una certa indipendenza, caratteristica che renderà possibile il disassemblaggio in fase di fine vita o di manutenzione. La possibilità di disassemblare i componenti di un sistema edilizio è molto importante perché facilita il recupero delle materie prime, che sono così facilmente separabili le une dalle altre.

Purtroppo in Italia il mercato edile è caratterizzato da una grande tradizione in materia di sistemi “umidi” e le aziende che si occupano della produzione dei relativi componenti possiedono il sufficiente potere economico per imporsi sulle scelte dei progettisti. Anche i sistemi umidi possono garantire un adeguato livello di riciclabilità, qualora siano costituiti da elementi monomaterici che non presentino quindi eterogeneità di materiali. È però necessario sottolineare come questa eventualità non rappresenti al momento una costante dello stato di fatto italiano. Ciononostante, il successo nell'impiego di sistemi a secco all'estero ha attratto l'attenzione anche dei progettisti

italiani che sempre maggiormente stanno iniziando ad adottare questa tipologia di soluzione.

10.2.3 Prodotti con elevato potenziale di riciclabilità

Nonostante le aziende produttrici di manufatti per l'edilizia presentino la tendenza a presentare come riciclabile qualunque tipologia di prodotto, la realtà dei fatti è più complessa. Le reali possibilità di riciclare un prodotto dipendono infatti da moltissimi fattori di tipo "ambientale": da come il prodotto è stato posto in opera, dalle possibilità di demolizione consentite dal sito, dall'ubicazione geografica e relativa disponibilità di centri in grado di realizzare le operazioni necessarie al riciclaggio e così via.

Un altro fattore non trascurabile è la sostenibilità economica delle operazioni necessarie al riciclaggio dei prodotti. Qualora le spese di raccolta, stoccaggio e trattamento dei rifiuti, nonché di produzione di nuovi manufatti da materie prime secondarie non siano economicamente convenienti rispetto all'acquisto di prodotti non riciclati, allora sarà improbabile che gli attori coinvolti nel processo siano interessati ad agire in tale direzione.

Per le varie categorie di prodotti è inoltre necessario comprendere se il riciclaggio permetterà di riottenere manufatti caratterizzati da prestazioni analoghe o meno. Nel caso in cui da un manufatto riciclato si possa riottenere tramite riciclaggio un prodotto dalle prestazioni analoghe, potremo parlare di riciclaggio chiuso. Al contrario, qualora si ottengano dal prodotto riciclato prestazioni inferiori a quello di partenza parleremo di riciclaggio aperto.

Le operazioni di trattamento tramite cui si possono ottenere prodotti riciclati sono raggruppabili in due categorie principali: il riciclaggio meccanico e quello chimico. Il riciclaggio meccanico viene eseguito

trattando i rifiuti con processi meccanici quali separazione dei componenti del rifiuto, lavaggio del rifiuto, triturazione e macinazione per ridurlo in granuli o scaglie. Il riciclaggio chimico consiste invece in un processo di "*degradazione termica*" (Giordano, 2010) atto a scomporlo per produrre risorse energetiche alternative.

Appurata l'incertezza che aleggia intorno alla reale possibilità di riciclare un prodotto da costruzione, il quesito a cui dobbiamo rispondere è: "come determinare la reale riciclabilità di un prodotto?". A questo proposito è necessario fare una serie di verifiche. Innanzitutto bisogna determinare se il rifiuto, data la disponibilità o meno di una filiera, può essere effettivamente sottoposto ad un processo di riciclaggio; in secondo luogo, si deve accertare se la tipologia di rifiuto consentirà di avviarlo ad un riciclaggio chiuso o aperto; infine, è necessario comprendere se dovrà essere trattato tramite riciclaggio meccanico o chimico e se darà dunque vita ad una materia prima secondaria, nel primo caso, o ad una materia prima secondaria di tipo energetico nel secondo caso.

10.3 INDICATORI DI RICICLABILITÀ

Per tutti i requisiti citati si possono individuare degli indicatori che determinino in modo univoco se questi siano stati rispettati o meno. Quindi in merito all'adozione di tecniche che facilitino il disassemblaggio può corrispondere un indicatore che valuti il livello di disassemblabilità dei componenti che costituiscono l'elemento tecnico. Allo stesso modo, per il requisito che richiede l'impiego di materiali ad alto tasso di riciclabilità può corrispondere un indicatore che valuti le possibilità di riciclaggio degli strati costituenti l'elemento tecnico. Per quanto riguarda l'ultimo requisito, invece, si può fare

riferimento direttamente alle caratteristiche dichiarate dei prodotti in merito a contenuto di energia primaria e di emissioni di CO².

10.3.1 Indicatore di disassemblabilità

Come già spiegato, la disassemblabilità è un requisito che fa riferimento alla possibilità di separare gli strati funzionali di un elemento tecnico in fase di demolizione. Per valutare il livello di disassemblabilità si deve seguire una procedura particolare che prevede innanzitutto di identificare gli strati di cui è composto un elemento tecnico ed, in secondo luogo, di determinare per ciascuno strato una modalità di posa in opera prevalente²¹.

Il Technical Report della UNI 11277:2008 stabilisce che tale livello debba essere calcolato per tutte le chiusure esterne e propone un sistema di valutazione che prevede di assegnare ad ogni classe di unità tecnologica un livello di disassemblabilità pari a quello della maggioranza degli elementi che la compongono. Gli elementi che compongono ciascuna classe sono a loro volta definiti dalla UNI 8290. Si adotta poi lo stesso procedimento per le classi tecnologiche al fine di determinare il livello di disassemblabilità dell'edificio. Nel caso di una chiusura esterna, come un sistema di facciata, si andrà dunque a determinare il livello di disassemblabilità dei singoli strati che la compongono in modo da poter poi determinare quello dell'intera classe tecnologica.

La valutazione avviene sulla base di una classificazione che assegna un valore di disassemblabilità adimensionale che può variare da 0 a 5. Qualora a un elemento tecnico venga assegnato il livello 0, significherà

²¹ Ipotizzando uno strato non omogeneo, la modalità di posa in opera prevalente viene selezionata analizzando ogni singolo elemento costituente per determinare quale sia quella maggiormente utilizzata.

che esso non può essere disassemblato nelle sue parti costituenti. Al livello 5 un prodotto può essere completamente suddiviso nei suoi elementi costituenti ed avviato ai processi di riciclaggio. A questo proposito le modalità di posa in opera degli elementi tecnici vengono divise in tre tipologie prevalenti: quelle solo accostate che possono essere completamente disassemblate, quelle assemblate con tecniche reversibili che consentono un buon livello di separazione e quelle che non consentono alcuna separazione degli strati funzionali.

10.3.2 Indicatore di riciclabilità

Come già accennato, la riciclabilità di un manufatto dipende da due fattori principali: le caratteristiche proprie del prodotto e la disponibilità sul territorio di impianti di riciclaggio che posseggano le tecnologie adeguate. La valutazione della riciclabilità si effettua dunque sullo scenario prevalente potenziale di riciclaggio: si selezionano gli strati principali che costituiscono un elemento tecnico e si attribuisce ad ognuno uno scenario prevalente di riciclaggio, ossia si ipotizza come potrebbe essere riciclato in un futuro mediamente remoto. La scelta degli strati significativi per il risultato dell'analisi dovrebbe concentrarsi sugli strati che presentino un maggior impiego di materiale.

Il TR della UNI 11277:2008 stabilisce che si limiti l'analisi ai 10 strati maggiormente significativi²². Ad ogni strato analizzato viene dunque assegnata una classe di riciclabilità che può variare da 0 a 5. Lo strato in classe 0 può essere destinato solo alla discarica mentre lo strato in classe 5 può essere completamente riutilizzato o si presenta come biodegradabile. La classificazione si basa sul presupposto che siano

²² I rifiuti speciali pericolosi dovranno sempre essere considerati anche se impiegati in quantità minime.

presenti sul territorio impianti adeguati ad operare le operazioni necessarie per il riciclaggio.

Tabella 37 - Sistema di classificazione dello scenario potenziale di riciclaggio (SPPR)

Scenario di smaltimento	Descrizione	SPPR
Discarica rifiuti speciali	Smaltimento di rifiuti classificati come speciali	0
Discarica inerti	Smaltimento di rifiuti classificati come inerti	1
Incenerimento	Luogo di combustione controllata dei rifiuti	2
Riciclabile con bassa capacità prestazionale	Riciclaggio con prestazioni inferiori	3
Riciclabile con alta capacità prestazionale	Riciclaggio con prestazioni quasi identiche	4
Riutilizzabile	Riciclaggio con stessa destinazione d'uso	5
Biodegradabile	Si decompone naturalmente	5

10.4 FINE VITA DI UNA PARETE VENTILATA

Per analizzare i possibili scenari di fine vita di un sistema di parete ventilata, riprendiamo in mano le stratigrafie che avevamo già analizzato in merito alla definizione di un sistema parete sottile e leggero e di uno pesante, in modo tale da poter implementare queste nuove considerazioni sulla base di quanto già visto nei capitoli precedenti.

Poichè abbiamo già analizzato nel capitolo 9 (in merito alla posa in opera) le possibilità di disassemblabilità dei componenti di un sistema parete ventilata, in questa sede, per non ripetere nuovamente le considerazioni già effettuate, ci limiteremo a resituire i dati relativi ai singoli componenti, dando per acquisite le considerazioni precedenti.

10.4.1 Fine vita di parete ventilata (primo esempio)

Ricordiamo dunque che si tratta di un sistema costituito da una stratigrafia che include:

- Strato di intonaco interno;
- Strato resistente in blocchi forati di laterizio;
- Strato isolante in pannelli PUR;
- Struttura di aggancio del rivestimento esterno in alluminio;
- Camera di ventilazione;
- Rivestimento esterno in pannelli in alluminio.

Ai fini di questa indagine trascureremo di prendere in considerazione la camera di ventilazione, per evidenti motivi.

Tabella 38 – Disassemblabilità e riciclabilità di parete ventilata sottile e leggera.

Strato	Spessore cm	Indice di disassemblabilità	Indice riciclabilità
Intonaco calce e gesso	1,5	0	1/3
Blocchi forati in laterizio	25,0	0	1/3
Pannelli PUR	5,0	0/3	0/4
Struttura di aggancio in alluminio	/	3	4
Pannelli in alluminio	0,4	3	4

Intonaco calce e gesso – L'indicatore di riciclabilità per lo strato di intonaco interno prevede due possibili scenari di fine vita: lo smaltimento presso una discarica di inerti od il riutilizzo, sempre come inerte. Nonostante sia riciclabile, la sua bassa capacità prestazionale dopo il processo di riciclaggio lo rende poco appetibile. Il destino più probabile di uno strato di intonaco, una volta demolito, risiede dunque nello smaltimento in discarica. Per questo motivo consideriamo questo strato come avente un tasso di riciclabilità pari a 1.

Blocchi forati in laterizio – Per quanto riguarda lo strato resistente, i blocchi in laterizio hanno possibilità di riutilizzo paragonabili a quelle già analizzate per lo strato di intonaco. Gli elementi in laterizio possono infatti essere riciclati come inerti per la realizzazione di fondi stradali, altrimenti, possono essere frantumati e riutilizzati per la produzione di malte di cocciopesto. Inoltre, gli elementi posati a secco e non deteriorati potrebbero essere riutilizzati tali e quali per altre costruzioni. Nonostante la maggior parte dei prodotti in laterizio venga tutt'oggi ancora smaltita in discariche per inerti, poiché le reali possibilità di riciclaggio sono maggiori di quelle sfruttate, consideriamo questo elemento come un componente riciclabile con bassa capacità prestazionale: tasso di riciclabilità pari a 3.

Pannelli isolanti in Poliuretano espanso – I pannelli in poliuretano espanso rappresentano un caso più particolare rispetto ai due materiali sin qui analizzati. I prodotti in poliuretano sono infatti considerati dei rifiuti speciali e come tali se ne prevede lo smaltimento in una discarica per rifiuti speciali, appunto. Tuttavia questo materiale può anche essere riciclato principalmente attraverso tre tecniche di lavorazione. Il processo di riagglomerazione prevede la ricomposizione delle particelle di schiuma poliuretanicca per mezzo della pressione e di un legante a sua volta poliuretanicco; il processo di polverizzazione

prevede invece l'incorporazione del PUR nel poliolo utilizzato per produrre questo tipo di schiume, in seguito alla riduzione meccanica del materiale in piccole particelle; infine, tramite la glicolisi, si trattano le schiume con glicoli e catalizzatori che, grazie ad alte temperature e pressioni portano alla formazione del suddetto poliolo e di una serie di altri sottoprodotti. Poiché le possibilità di riutilizzo di questo prodotto sono molteplici, considerato anche il metodo di posa in opera a secco che permette un relativamente semplice disassemblaggio, considereremo il PUR come un elemento riciclabile ad alte capacità prestazionali: tasso di riciclabilità pari a 4.

Struttura di ancoraggio e pannelli di rivestimento in alluminio – Poiché la struttura di ancoraggio ed il rivestimento esterno in questo caso sono realizzati con lo stesso materiale, nonostante tecniche di lavorazione leggermente differenti, le considerazioni che possiamo fare in termini di riciclabilità sono praticamente le stesse. Una volta separato da eventuali materiali estranei, l'alluminio è un materiale totalmente riciclabile che non subisce degradazione delle proprietà e non dà origine a scarti. Recuperare e riciclare questo materiale permette di ottenere due importanti risultati: evitare l'estrazione di Bauxite e risparmiare una notevole quota dell'energia richiesta per produrlo a partire dalla materia prima. Per questi motivi, i due elementi suddetti sono classificati come riciclabili ad alta capacità prestazionali: indicatore di riciclabilità 4.

Il quadro delineato in merito alla riciclabilità dei materiali componenti questa soluzione di parete ventilata, ci permette di vedere chiaramente che si tratta di un sistema composto da materiali che al raggiungimento della fine della propria vita utile possono essere più o meno facilmente riciclati e riutilizzati, magari in seguito a nuovi processi di lavorazione. Se dunque può succedere che nella realtà dei

fatti alcuni di questi materiali spesso non vengano avviati ad un processo di recupero, questo è forse da imputarsi più all'inerzia di un sistema abituato al consumo, piuttosto che alle reali capacità dei mezzi impiegati.

Volendo dare un valore di indice di riciclabilità alla soluzione di parete ventilata appena analizzata, dovremmo considerare che nonostante tre elementi presentino un valore pari a 4, lo strato che maggiormente influenza il sistema, almeno in termini di massa, possiede un valore pari a 3. Per non sbilanciarci troppo potremmo allora assegnare un valore intermedio pari a 3.5, a intendere come gli elementi possano essere riciclati con capacità prestazionali più o meno alte.

10.4.2 Fine vita di parete ventilata (secondo esempio)

Tabella 39 – Disassemblabilità e riciclabilità di parete ventilata pesante.

Strato	Spessore cm	Indice di disassemblabilità	Indice di riciclabilità
Intonaco calce e gesso	2	0	1/3
Blocchi in CLS	25	0	1/3
Pannelli in lana di legno	8	3/5	2/3/4/5
Struttura di aggancio in alluminio	/	3	4
Lastre in pietra naturale	1	3	1/3/5

Mentre per quanto riguarda lo strato di intonaco interno e la struttura di aggancio per il rivestimento esterno possiamo fare le stesse considerazioni già portate avanti nell'esempio precedente, per quanto

riguarda gli strati rimanenti può essere interessante andare ad analizzarne le possibilità di smaltimento e recupero a fine vita utile del sistema.

Strato resistente in blocchi di calcestruzzo – Come per il laterizio e per l'intonaco, si tratta di un prodotto inerte che può essere riciclato per la formazione dei sottofondi stradali, previa frantumazione. Anche in questo caso dunque avremo un indice di riciclabilità pari a 1 o 3, qualora il materiale venga semplicemente destinato alla discarica inerti o inviato ai processi di recupero e riutilizzo.

Pannelli isolanti in fibra di legno – Si tratta dell'elemento più interessante sinora analizzato: le possibilità di destinazione a fine vita sono molteplici. È possibile destinare i pannelli ad incenerimento affinché possano essere riciclati come combustibile, qualora non siano bitumati (indice di riciclabilità 2). I resti dei pannelli possono essere lavorati per produrre nuovi prodotti isolanti (indice di riciclabilità 3). I pannelli installati a secco e non deteriorati possono essere direttamente disassemblati e reimpiegati per il medesimo utilizzo (indice di riciclabilità 4). Poiché si tratta di un materiale naturale, qualora siano stati prodotti senza l'aggiunta di collanti, i pannelli in fibra di legno sono biodegradabili (indice di riciclabilità 5).

Lastre in pietra naturale – Il destino a fine vita utile di un rivestimento in lastre in pietra naturale può essere di diversi tipi. Le lastre possono essere destinate a discariche per inerti (indice di riciclabilità 1), possono essere reimpiegate previa frantumazione per la realizzazione dei sottofondi stradali (indice di riciclabilità 3) o possono essere smaltite direttamente in ambiente (qualora non trattate) poiché elementi naturali a tutti gli effetti (indice di riciclabilità 5).

In questo caso possiamo notare come due componenti siano potenzialmente biodegradabili, mentre un componente presenti possibilità di riciclabilità con alte capacità prestazionali ed i rimanenti strati siano caratterizzati da possibilità di riciclo a basse capacità prestazionali. In media, considerando nuovamente i valori di impiego dei singoli materiali, ci sembra appropriato attribuire alla soluzione in analisi nuovamente un valore di 3,5, ad indicare come fondamentalmente tutti i componenti siano riciclabili, con capacità prestazionali altalenanti, anche a seconda delle possibili condizioni al contorno.

10.5 FINE VITA DEL SISTEMA GRE_EN_S

Procediamo, anche per il sistema GRE_EN_S, all'analisi dei tre fattori fondamentali da considerare per una corretta determinazione della riciclabilità della soluzione di facciata:

- Utilizzo di prodotti riciclati;
- Uso di tecniche costruttive che prevedano il disassemblaggio;
- Impiego di prodotti con elevato potenziale di riciclabilità.

10.5.1 Utilizzo di prodotti riciclati

A differenza delle possibili soluzioni di parete ventilata, per le quali in mancanza di riferimenti progettuali diretti non possiamo determinare il reale impiego di materiali riciclati se non riflettendo sulla riciclabilità di quelli impiegati, per il sistema GRE_EN_S siamo in possesso di informazioni più dettagliate al riguardo, in quanto questo è stato uno degli obiettivi principali della progettazione.

Analizzando la stratigrafia ripresentata in Tabella 40, possiamo andare a sottolineare le soluzioni di recupero adottate per alcuni degli

elementi che la compongono, quali i moduli vegetati e lo strato isolante.

Strato isolante – lo strato isolante è stato appositamente realizzato tramite l'impiego di scarti della lavorazione di solette in sughero per scarpe. L'assemblaggio meccanico di questi scarti ha permesso la creazione dei pannelli isolanti.

Strato di accrescimento delle piante – lo strato di accrescimento delle piante è uno dei componenti dei moduli vegetati che rivestono l'esterno della soluzione di facciata. È stato realizzato con gli scarti della produzione di feltrini sottosedie sminuzzati mischiati in percentuali variabili a della fibra di cocco.



Figura 69 – Processo di recupero e riutilizzo degli scarti di produzione di feltrini sottosedie.

Strato di protezione – anche lo strato di protezione fa parte della struttura dei moduli vegetati ed è stato realizzato abbinando della

viscosa ad un feltro in PE, in grado di ridurre lo spessore ed il peso della parete verde.

Strato vegetale – anche se non si può propriamente parlare di prodotto riciclato, è importante menzionare come la creazione di questo strato non preveda nessun tipo di processo produttivo, se non la coltivazione delle specie vegetali necessarie alla realizzazione del muro verde.

10.5.2 Disassemblabilità del sistema GRE_EN_S

Come abbiamo già avuto modo di analizzare nel capitolo 10 in merito alle fasi di posa in opera del sistema, l'indice di disassemblabilità degli elementi che compongono la soluzione è molto elevato per ognuno di essi.

L'intera soluzione è costituita di elementi prefabbricati per i quali è prevista una posa in opera a secco tramite installazione per incastro o serraggio. Questa proprietà garantisce un indice di disassemblabilità degli elementi e della soluzione pari a 3.

Tabella 40 – Disassemblabilità e riciclabilità del sistema GRE_EN_S.

Strato	Spessore (cm)	Indice di disassemblabilità	Indice di riciclabilità
Doppia lastra in gesso rivestito	2,5	3	0/5
Telaio in acciaio zincato	7,5	3	4
Strato isolante in sughero	7,5	3	2/3/5
Lastra in cemento fibrorinforzato	12,5	3	3

Telaio in acciaio zincato	6,6	3	4
Moduli vegetati	3,5	3	4/5

10.5.3 Riciclabilità del sistema GRE_EN_S

Lastre in gesso rivestito – Presentano un valore di riciclabilità piuttosto contraddittorio. La possibilità di riciclare il materiale dipende fondamentalmente dallo stato di usura in cui si trova al momento del disassemblaggio. Le lastre di gesso possono essere completamente riutilizzate per la realizzazione di altre pareti qualora queste si trovino in uno stato accettabile, altrimenti dovranno essere destinate ad una discarica per rifiuti speciali. Indice di riciclabilità 0 o 5.

Telai in acciaio zincato – L'acciaio, come avevamo già visto in precedenza per l'alluminio, una volta rimossa la zincatura può essere totalmente recuperato ottenendo un prodotto riciclato con caratteristiche prestazionali di poco inferiori a quelle di un prodotto ottenuto da sole materie prime. Indice di riciclabilità pari a 4.

Isolante in sughero – Il sughero naturale, qualora trattato senza l'aggiunta di collanti, è riutilizzabile, riciclabile e compostabile. Può essere recuperato per la realizzazione di sottofondi per pavimentazioni o per la produzione di calcestruzzi alleggeriti. Qualora invece sia stato trattato con collanti e resine sintetiche dovrà allora essere smaltito in una discarica per rifiuti speciali (non è questo il caso del sughero utilizzato in questa sede). Può essere anche riutilizzato come combustibile, qualora inviato presso un impianto di incenerimento garantendo un potere calorifico pari a 18,74 MJ/kg. Infine, poiché si tratta di un materiale naturale di origine vegetale, è in grado di biodegradarsi completamente. Indice di riciclabilità pari a 5.

Cemento fibrorinforzato – Per questo elemento valgono le stesse considerazioni già fatte in precedenza in merito al calcestruzzo: può essere recuperato per la creazione di sottofondi stradali o smaltito come inerte: indice di riciclabilità pari a 3.

Moduli vegetati – I moduli sono realizzati con un mix di fibre di origine naturale (vegetali e animali) e di origine artificiale. Una volta separate, le fibre naturali sono biodegradabili mentre le fibre sintetiche potranno essere reimpiegate per altri utilizzi. Avremo dunque un indice di riciclabilità pari a 4 per le fibre sintetiche e pari a 5 per le fibre naturali.

Volendo trarre delle conclusioni sulla riciclabilità del sistema GRE_EN_S nel suo insieme potremmo allora valutarlo con un valore di indice pari a 4,5, volendo così indicare come molti componenti siano di fatto biodegradabili o completamente riutilizzabili, mentre altri siano riutilizzabili a costo di una perdita più o meno importante di capacità prestazionale.

10.6 CONCLUSIONI DEL RAFFRONTO

Per quanto riguarda l'utilizzo di materiali riciclati, possiamo chiaramente vedere come il sistema GRE_EN_S sia ampiamente all'avanguardia: essendo stato studiato e realizzato con una attenzione particolare proprio a questo aspetto, il sistema presenta un comportamento migliore non solo dei sistemi di parete ventilata proposti ma anche della maggior parte dei sistemi di facciata oggi più ampiamente diffusi. I sistemi di parete tradizionali infatti, non prevedono generalmente l'impiego di materiali riciclati per la propria produzione.

Per quanto concerne la disassemblabilità dei sistemi, i componenti del sistema GRE_EN_S risultano completamente disassemblabili, in quanto tutta la posa in opera, come abbiamo visto, avviene a secco, tramite installazione per fissaggio meccanico. Anche i componenti per così dire "indivisibili" (come il substrato o le piante) possono essere completamente riciclati in quanto biodegradabili. La stessa cosa non si può dire invece per quanto riguarda i sistemi di parete ventilata che presentano quasi sempre una porzione della propria stratigrafia realizzata mediante processo umido e che dunque risulta a tutti gli effetti non disassemblabile (se non per demolizione).

Per quanto concerne gli scenari di riciclaggio dei materiali utilizzati, infine, entrambi i sistemi presentano in realtà varie possibilità di recupero e riutilizzo, anche se il sistema GRE_EN_S presenta possibilità nettamente superiori a quelle dei sistemi di parete ventilata.

Per concludere, mentre il mancato impiego di materiali riciclati nella realizzazione dei sistemi di parete ventilata, seppure complesso, è determinato prevalentemente da lacune nella progettazione, le possibilità di disassemblaggio e di riciclabilità dei componenti utilizzati per questi sistemi sono invece chiaramente inferiori a quelle dimostrate dal sistema GRE_EN_S.

Mentre i componenti di una parete ventilata possono essere recuperati parzialmente e ridestinati ad altri utilizzi, generalmente associati con una pesante perdita di prestazione, i materiali impiegati per i moduli GRE_EN_S sono stati studiati per essere riciclati o riutilizzati ad alti livelli di performance. Alcuni di questi componenti sono addirittura biodegradabili e smaltibili direttamente in ambiente.

11 IMPATTO AMBIENTALE

Con il termine “impatto ambientale” normalmente ci si riferisce a tutte le modifiche che l’azione dell’uomo provoca sull’ambiente. Si tratta dunque di una serie di parametri che vanno presi in considerazione simultaneamente per capire in che modo le azioni antropiche provocheranno un impatto sull’ambiente che ci circonda. Tuttavia, data la complessità del concetto, in questa sede le valutazioni di impatto ambientale che condurremo faranno riferimento a due aspetti principali: il contenuto di energia primaria ed il contenuto di biossido di carbonio e di gas ad effetto serra. Prima di addentrarci nella discussione su questi due parametri, chiariremo brevemente a cosa ci riferiamo quando parliamo di effetto serra e qual è il quadro normativo in merito.

11.1 EFFETTO SERRA

Quando parliamo di atmosfera terrestre ci riferiamo ad un insieme di gas, presenti in quantità variabili, che interagiscono tra di loro. Questi gas sono convenzionalmente denominati “gas serra”. Mentre le percentuali di alcuni componenti quali l’ossigeno, l’idrogeno e l’azoto si mantengono relativamente stabili nel tempo, le quantità di altri singoli gas presenti in atmosfera non sono tuttavia fisse ma variano a seconda delle condizioni. Gli elementi che tra questi contribuiscono a trattenere il calore, come il biossido di carbonio, vengono anche chiamati “gas climalteranti”, poiché si ritiene che contribuiscano appunto a modificare il clima. Nonostante la loro quantità sia normalmente ridotta, questi elementi possono perdurare a lungo in atmosfera prima di essere dissolti negli strati più esterni.

Uno dei compiti dell'atmosfera è quello di funzionare come un incubatore che filtra la radiazione solare e la trattiene nello strato più basso dell'atmosfera, la Troposfera. La radiazione solare che oltrepassa l'atmosfera arriva sulla superficie terrestre dove viene in gran parte assorbita e in minor parte riflessa. Anche l'atmosfera assorbe e riflette, grazie alle nubi, percentuali di radiazione solare. L'energia assorbita viene poi ceduta allo spazio sotto forma di radiazione infrarossa: quando il sistema è in equilibrio, le percentuali di radiazione assorbita ed emessa tendono a coincidere.

Una componente fondamentale nella regolazione di questo equilibrio termico è il cosiddetto ciclo del carbonio. Esiste infatti una serie di processi naturali che regolano i flussi di emissione ed assorbimento di biossido di carbonio. L'abilità di autoregolazione di questo ciclo e la capacità del gas di conservarsi a lungo in atmosfera permettono di mantenere sul pianeta una temperatura media relativamente costante.

Tuttavia, la capacità naturale di autoregolazione del ciclo di carbonio non è in grado di controbilanciare le emissioni di origine antropica che vanno prepotentemente ad intaccare l'antico equilibrio.

Nonostante le emissioni di biossido di carbonio non siano le uniche ad influenzare i cambiamenti climatici ed a causare il surriscaldamento del pianeta, esse vengono prese come riferimento normativo, e dunque progettuale, in quanto rappresentano la componente preponderante di emissioni antropogeniche e la causa principale dei cambiamenti climatici.

L'impatto antropico non si riduce solamente all'aumento delle emissioni ma influisce anche sulla capacità della vegetazione di assorbire gli inquinanti (per esempio tramite deforestazione) e

favorisce le stesse emissioni naturali (per esempio tramite l'estrazione del petrolio). Queste considerazioni chiariscono quindi come sia necessario intervenire in due modi distinti per riequilibrare la situazione: da un lato sarà necessario ridurre i consumi di energia e dunque le emissioni antropogeniche, dall'altro ripristinare l'equilibrio del sistema naturale.

Per quantificare l'effetto serra di origine antropica facciamo riferimento a due parametri: il tipo di emissioni che vengono generate e rilasciate in atmosfera e le metodologie per convertirle in effetti ambientali equivalenti. Le emissioni possono infatti essere distinte in due tipologie principali: i rilasci primari ed i rilasci secondari. Con "rilasci primari" ci riferiamo alle sostanze che vengono emesse in atmosfera direttamente dalle fonti. Una volta emesse, queste sostanze possono subire trasformazioni di vario genere, dando origine ai cosiddetti "rilasci secondari". Entrambe le tipologie di rilasci contribuiscono in maniera importante all'effetto serra e la distinzione fra le due pone in risalto il fatto che anche eliminando completamente i rilasci primari, i secondari continuerebbero a sussistere per periodi di tempo anche prolungati, alimentando il surriscaldamento globale. Per diretta conseguenza, la sola eliminazione della componente primaria non basterà a garantire una diminuzione dell'effetto serra nell'immediato ma saranno necessari provvedimenti che prendano in considerazione anche la componente secondaria.

Un altro aspetto da considerare è la metodologia di determinazione di un effetto ambientale equivalente. Abbiamo già detto che il biossido di carbonio è il principale responsabile dell'effetto serra ma che è aiutato anche dalle emissioni di metano, perossido di azoto e gas fluorati. Il consumo di queste altre fonti di inquinamento sta diminuendo molto velocemente ma è ancora tuttora presente. Per

questo motivo per avere un indicatore unico di emissione, si è deciso in ambito scientifico di raggruppare tutti i diversi tipi di emissioni sotto un unico parametro: la emissione di CO₂ equivalente.

Per determinare un effetto ambientale si rende dunque necessario identificare le differenti tipologie di emissioni che partecipano nella sua formazione e ponderarle in termini di emissione equivalente. La metodologia LCA si affida a questo processo nella fase di Life Cycle Impact Assessment (LCIA) per determinare l'effetto serra creato dal singolo processo del ciclo di vita di un prodotto. Il "Climate Change Factors" elaborato dall'IPCC è il principale riferimento nella determinazione dei fattori di conversione, anche perché prende in considerazione determinate tipologie di emissioni che più di altre sono tipiche della produzione di materiali per l'edilizia.

In generale comunque, sono stati creati dei sistemi di norme a livello internazionale e nazionale per tentare di quantificare, monitorare e limitare l'emissione di gas climalteranti. Come per tutti gli altri tipi di prestazioni sin qui presi in considerazione, anche in questo caso avremo quindi la definizione di determinati requisiti normativi a cui dovranno far capo adeguate risposte prestazionali.

Tabella 41 – Fattori di conversione per determinare l'effetto serra equivalente

Effetto Serra Equivalente CO ₂ eq.		
Emissione	Formula	Fattore di conversione
Biossido di carbonio	CO ₂	1,00
Metano	CH ₄	25,00
Perossido di Azoto	N ₂ O	310,00
Perfluorometano	CF ₄	6.500,00

Perfluoroetano

C₂F₆

9.200,00

11.2 QUADRO NORMATIVO

Il decreto legislativo 192/2005 rappresenta attualmente la norma più importante, per quanto riguarda il settore edilizio, in termini di controllo e riduzione delle emissioni di biossido di carbonio e altri gas ad effetto serra. È interessante sottolineare la relativa rapidità con cui il settore edilizio si è mostrato pronto a recepire le nuove normative seguite agli obiettivi del protocollo di Kyoto e del Pacchetto Energia. Questo trend in parte può essere spiegato dalle difficoltà in cui versa il settore a causa della crisi economica: la necessità di nuove prestazioni energetiche porta alla nascita di nuovi campi del mercato e nuove opportunità di lavoro con conseguente movimentazione di capitali.

Tuttavia, la normativa si dimostra per ora ancora lacunosa poiché si concentra prevalentemente sulla diminuzione delle emissioni associate ai consumi di energia nella fase d'utilizzo degli edifici, tralasciando di considerare le altre fasi, altrettanto importanti.

Una delle poche eccezioni è costituita dal Technical Report allegato alla UNI 11277:2008 – Sostenibilità in Edilizia. Il report determina i range di valori con i quali si può misurare l'impatto ambientale della produzione degli edifici, attribuendo al sistema edificio un parametro che può variare tra 0 e 5, costituendo di fatto una valutazione della quantità totale di emissioni inquinanti rilasciate per produrre i diversi componenti del sistema.

Sono importanti in questo ambito anche le norme UNI ISO 14064-1:2006²³ e UNI ISO 14065:2007²⁴, le cui procedure di applicazione vengono definite nella UNI/TR 11286:2008 – Gas ad effetto serra.

11.3 CONTENUTO DI ENERGIA PRIMARIA

Un prodotto da costruzione si definisce ecocompatibile se richiede un ridotto contenuto di energia in diverse fasi del suo ciclo di vita ed in particolare durante il processo di produzione fuori opera (Giordano, 2010).

Il Primo Principio della Termodinamica insegna che l'energia non può essere creata né distrutta ma si trasforma costantemente passando da una forma all'altra. Tuttavia, il Secondo Principio della Termodinamica specifica come le trasformazioni di energia siano "irreversibili" poiché la qualità dell'energia alla fine di una trasformazione sarà inferiore a quella di partenza, ossia, possiederà una capacità minore di compiere un lavoro. Come abbiamo visto nel capitolo precedente in merito al riciclo dei materiali, in seguito al processo di riciclaggio il nuovo materiale possiede delle prestazioni inferiori a quello di partenza. Per questi motivi, in un processo di produzione le modalità con cui l'energia viene trasformata in lavoro sono di fondamentale importanza per valutare l'efficienza del processo.

Quando analizziamo l'ecocompatibilità di un prodotto da costruzione tendiamo ad analizzare il fabbisogno di energia primaria necessario per alimentare il processo produttivo. Tuttavia, il fabbisogno di energia e l'efficienza del processo sono due aspetti fortemente

²³ Gas ad effetto serra – Parte 1: specifiche e guida al livello dell'organizzazione, per la quantificazione e la rendicontazione delle emissioni di gas ad effetto serra e della loro rimozione.

correlati che devono essere considerati contemporaneamente per poter compiere una valutazione significativa.

Alcune risorse energetiche vengono impiegate nei processi produttivi così come si trovano allo stato naturale (combustibili, acqua, risorse rinnovabili) e si definiscono "risorse energetiche primarie". Altre fonti di energia hanno invece bisogno di un processo di trasformazione per poter essere utilizzate e per questo si definiscono "risorse energetiche derivate o secondarie".

Per quanto detto sinora, dunque, l'obiettivo di questa valutazione è quello di confrontare prodotti da costruzione in base alla quantità di energia primaria necessaria per produrli: chiaramente, manufatti che possono essere prodotti utilizzando fonti di energia secondaria o fonti di energia rinnovabili saranno dunque da preferirsi ad altri che invece possano essere realizzati esclusivamente tramite l'impiego di energia primaria.

I requisiti energetici degli edifici devono dunque prendere in considerazione la fase di produzione fuori opera, quantificando i consumi energetici del sistema produttivo, o la loro cosiddetta "embodied energy".

All'interno del contesto di questa analisi, si è deciso dunque di prendere in considerazione come unico requisito per la progettazione ecocompatibile, l'utilizzo di materiali a ridotto contenuto di energia primaria (CEP).

²⁴ Gas ad effetto serra – requisiti per gli organismi di validazione e verifica dei gas ad effetto serra per l'utilizzo nell'accREDITAMENTO o in altre forme di riconoscimento.

11.3.1 Indicatore per la valutazione del contenuto di energia primaria di un prodotto da costruzione

Per poter garantire in fase di progettazione l'utilizzo di materiali a ridotto contenuto di energia primaria, abbiamo bisogno di un indicatore che ci consenta di valutare le componenti energetiche dei principali strati funzionali di un elemento costruttivo.

La valutazione deve inoltre basarsi su un bilancio tra energia primaria proveniente da fonti rinnovabili ed energia primaria ottenuta da combustibili fossili. Il processo di valutazione del contenuto di energia primaria deve quindi seguire tre fasi principali:

1. Selezionare le principali categorie di elementi tecnici che caratterizzano l'edificio;
2. Identificare quali componenti risultano maggiormente rilevanti ai fini dell'analisi del singolo elemento tecnico;
3. Identificare categorie di prodotti in grado di apportare cambiamenti significativi al bilancio complessivo per via di caratteristiche speciali.

L'indicatore determina dunque l'energia primaria applicando i fattori di conversione stabiliti dalla norma UNI EN 15603:2008.

Risulta chiaro tuttavia come l'attendibilità dell'analisi dipenda ancora in larga parte dal criterio di selezione degli elementi da prendere in considerazione: a questo proposito non sarà sufficiente analizzare l'incidenza dei prodotti in base alla massa od al volume ma bisognerà tenere conto anche di altri fattori, come ad esempio metodi speciali di produzione.

Ricapitolando, risulterà fondamentale ai fini dell'analisi, selezionare gli elementi da prendere in considerazione in maniera oculata, tenendo conto di tutte le informazioni a nostra disposizione.

Facendo riferimento al TR della UNI 11277 del 2008, possiamo suddividere la valutazione del contenuto di energia primaria di un sistema parete in due fasi. Per prima cosa si considereranno le componenti energetiche primarie e secondarie dei singoli strati principali componenti un metro quadro di superficie di parete; in seguito, si procederà con la valutazione del CEP totale per unità di superficie (kg/m^2) andando ad eseguire una sommatoria dei valori ottenuti per i singoli strati. Questo procedimento ci restituirà il fabbisogno totale di energia primaria e secondaria necessario per produrre il sistema parete.

La valutazione finale viene eseguita riportando il valore ottenuto dal computo appena descritto all'interno di una tabella di conversione che associa cinque classi di impatto ad altrettanti intervalli di CEP.

Tabella 42 – Classi di impatto riferite al CEP (Giordano, 2010).

Contenuto di energia primaria	Classe di impatto
$CEP > 9000 \text{ Mj/m}^2$	0
$9000 \text{ Mj/m}^2 > CEP > 8000 \text{ Mj/m}^2$	1
$8000 \text{ Mj/m}^2 > CEP > 5000 \text{ Mj/m}^2$	2
$5000 \text{ Mj/m}^2 > CEP > 3000 \text{ Mj/m}^2$	3
$3000 \text{ Mj/m}^2 > CEP > 1600 \text{ Mj/m}^2$	4
$1600 \text{ Mj/m}^2 > CEP$	5

11.4 CONTENUTO DI CO₂ ED ALTRI GAS AD EFFETTO SERRA

“Un prodotto da costruzione si definisce ecocompatibile se rilascia una quantità limitata di emissioni di biossido di carbonio e di altri gas a

effetto serra in diverse fasi del suo ciclo di vita e [...] in particolare durante il processo di produzione fuori opera” (Giordano, 2010).

Questa definizione di prodotto ecocompatibile parte dal presupposto che ogni manufatto sia in grado di rilasciare molteplici tipologie di sostanze che possiamo definire più o meno inquinanti. Ognuna delle sostanze emesse da questi prodotti può produrre numerosi effetti ambientali che possono manifestarsi a scala locale come a scala planetaria.

Il punto focale di un’analisi sulla ecologicità dei prodotti da costruzione è dunque quello di associare quali effetti ambientali vengano prodotti dall’emissione dei singoli inquinanti per definire delle categorie di emissioni per le quali siano ben comprensibili origini ed effetti.

Possiamo dunque definire come gas ad effetto serra tutti quei gas di origine naturale ed artificiale presenti in atmosfera che sono in grado di assorbire le radiazioni infrarosse (il calore) emesse dalle nuvole, dall’atmosfera stessa e dalla superficie terrestre, inclusi quelli di origine antropica.

Per comprendere quali potrebbero essere i cambiamenti climatici associati alle attività dell’uomo sul pianeta ed i loro conseguenti rischi, è stato creato L’intergovernamental Panel on Climate Change (IPCC) che si occupa di studiare non solo la situazione attuale ma anche i probabili scenari futuri e le possibili soluzioni di intervento.

Tra gli effetti sul clima più importanti che IPCC pronostica per i prossimi cento anni, compare l’innalzamento della temperatura

²⁵ Possiamo fare riferimento per esempio all’ormai famoso Protocollo di Kyoto od alla Convenzione Quadro delle Nazioni Unite per i Cambiamenti Climatici.

²⁶ Per esempio, possiamo fare riferimento alle pubblicazioni in merito del Carbon Dioxide Information Analysis Center.

mondiale che a sua volta causerà un’accelerazione del fenomeno di scioglimento dei ghiacciai e dunque un considerevole innalzamento del livello del mare. Anche l’aumento in atmosfera delle percentuali di gas come metano, ossido di azoto e biossido di carbonio contribuirà a rendere il pianeta un luogo meno abitabile. Queste proiezioni vengono realizzate considerando i livelli di emissioni attuali come costanti nel tempo. Tuttavia, bisogna considerare che nonostante le nuove politiche di controllo e riduzione delle emissioni²⁵, alcuni gas inquinanti possono richiedere migliaia di anni per essere smaltiti dall’atmosfera e cessare il proprio effetto di surriscaldamento del pianeta.

A questo proposito, il Libro Verde della Commissione Europea tratta dell’adattamento ai cambi climatici in Europa, identificando delle aree geografiche a maggior rischio e descrivendo gli effetti dei cambiamenti in atto.

Vi sono anche numerosi altri studi²⁶ che si occupano di monitorare e registrare i quantitativi di emissioni di CO₂ dei vari paesi e che dimostrano come queste non siano omogenee a livello geografico. Alcuni studi vengono realizzati a scala mondiale, altri a scala continentale.

A livello mondiale, nel 2014 al primo posto si collocava la Cina, al secondo gli USA, seguiti dall’Unione Europea e dai paesi BRIC²⁷. Per quanto riguarda l’unione Europea, l’Agenzia Europea dell’Ambiente (EEA) pubblica ogni anno una lista delle emissioni annuali di gas ad effetto serra dei singoli stati membri, mostrando anche i trend di

²⁷ BRIC è la denominazione dei primi quattro paesi in forte via di sviluppo e comprende Brasile, Russia, India e Cina.

variazione rispetto all'anno precedente e le percentuali di crescita e decrescita in confronto al periodo iniziale di analisi. Questi dati permettono di verificare l'impegno ed i risultati raggiunti dai singoli paesi membri.

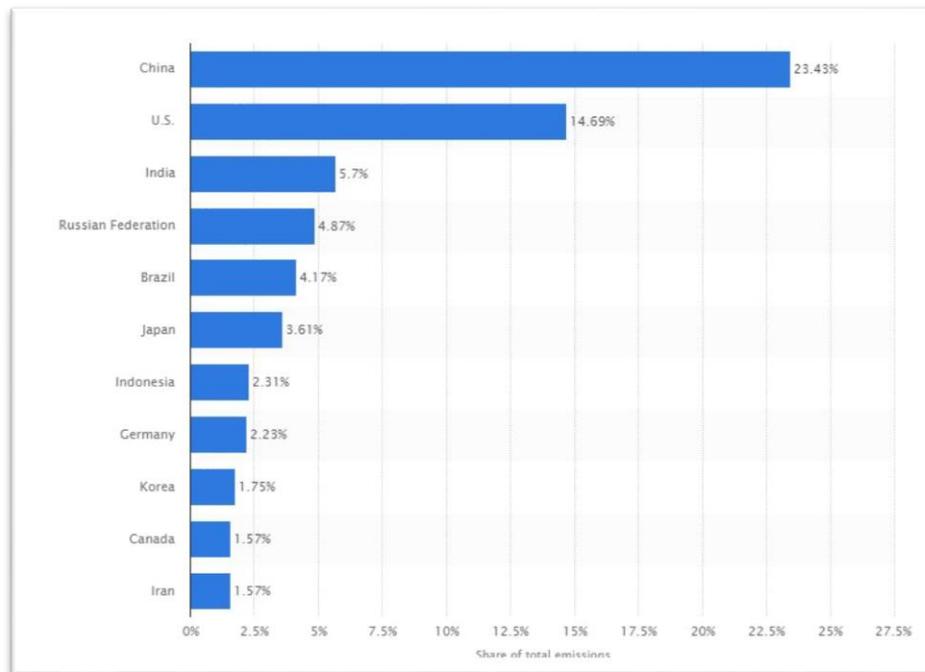


Figura 70 - Grafico dei primi 11 paesi per emissioni annuali di CO₂ nel 2014 ([statista.com](https://www.statista.com)).

Prendendo in considerazione a questo proposito la situazione dell'Italia, si può verificare come l'edilizia sia il primo campo dove un intervento per la riduzione delle emissioni sarebbe da considerare prioritario. Nonostante risulti meno importante il contributo dato dal settore di produzione dei materiali da costruzione, merita particolare attenzione l'ambito della produzione dei cementi, che dalle ricerche risulta non solo maggiormente inquinante in valori assoluti ma appare

anche come un settore in costante crescita. In questo caso, i dati evidenziano dunque l'importanza non solo di rendere meno inquinanti i processi di produzione del cemento ma di diminuire l'impiego stesso del materiale nell'ambito della costruzione edilizia.

11.4.1 Requisiti per la valutazione del contenuto di CO₂

Nonostante i molteplici aspetti che caratterizzano il problema, fino ad ora è stato definito un solo requisito per la cosiddetta progettazione ecocompatibile e fa riferimento fondamentalmente all'uso di "materiali a ridotto contenuto di biossido di carbonio e altri gas a effetto serra". Per quanto riguarda il progettista, quindi, il problema si delinea nel conoscere quale sia il reale ammontare di emissioni che comporta la produzione dei componenti scelti per il progetto. Ma al di là delle emissioni generate dal ciclo produttivo, sono da tenere in considerazione anche quelle relative alla fase d'uso, per cui ad un minor fabbisgno di energia da destinarsi al riscaldamento invernale od al raffrescamento estivo, corrisponde una minor quantità di emissioni. Per valutare le emissioni generate nelle due diverse fasi del ciclo di vita, facciamo riferimento alle risorse energetiche impiegate, che possono essere di due tipi: primarie e derivate. Le risorse primarie sono quelle che vengono impiegate direttamente per la produzione dei componenti, mentre le risorse derivate saranno quelle utilizzate per produrre energia termica nella fase di utilizzo.

Tabella 43 – Coefficienti di emissione specifica di biossido di carbonio dei principali combustibili impiegati nei processi di produzione. (IPCC, 2007).

Vettore energetico	Quantità	Emissioni di CO ₂
Gas liquido	1Kg	3,263 Kg
Benzina		3,359 Kg
Gas naturale		2,303 Kg
Petrolio		3,510 Kg

Gasolio

3,484 Kg

Tabella 44 – Valori di emissione di biossido di carbonio in relazione ai sistemi di generazione di energia elettrica impiegati nei processi produttivi. (IPCC, 2007).

Vettore energetico	Quantità	Emissioni di CO ₂
<i>E.E. da incenerimento rifiuti</i>	1 Kwh	0,940 kg
<i>E.E. da impianto carbone tradiz.</i>		0,900 kg
<i>E.E. da impianto a carbone pulito</i>		0,800 kg
<i>E.E. da impianto termoelettrico</i>		0,650 kg
<i>E.E. da rete nazionale</i>		0,580 kg
<i>E.E. da impianto a gas tradizionale</i>		0,500 kg
<i>E.E. da impianto a ciclo combinato</i>		0,295 kg
<i>E.E. da impianto eolico</i>		0,00 kg
<i>E.E. da impianto fotovoltaico</i>		0,00 kg

Anche la fase di dismissione e smaltimento di un prodotto da costruzione può comportare un impatto ambientale, la cui quantificazione dipende fondamentalmente dal processo di trattamento cui viene destinato. Tuttavia, nella maggior parte dei casi i rifiuti da costruzione sono smaltiti come inerti, per cui le emissioni saranno notevolmente contenute.

Il metodo di smaltimento che maggiormente produce emissioni è l'incenerimento. Anche in questo caso però va registrato che quasi nessun materiale da costruzione viene smaltito in questa maniera in quanto per lo più si tratta di materiali difficilmente infiammabili.

Infine, è possibile anche l'opzione riciclaggio: nella produzione di prodotti da materie prime riciclate è stato registrato un abbattimento

delle emissioni di gas climalteranti di circa il 95% rispetto alla produzione di un medesimo prodotto da materie prime primarie.

Prendendo in considerazione le diverse fasi di vita, dunque, possiamo affermare che la fase più critica dal punto di vista della quantità di emissioni di gas ad effetto serra sia quella della produzione fuori opera. Tale fase dovrà quindi essere la prima e più importante ad essere presa in considerazione al momento della valutazione dell'impatto ambientale dei prodotti e, solo successivamente, sarà determinante una progettazione atta a ridurre al minimo le emissioni durante la fase d'uso e di dismissione.

Tuttavia, la valutazione delle emissioni nella fase di produzione fuori opera non è un processo semplice ma anzi molto complesso e in fase di progettazione non sono quasi mai disponibili dati sufficienti per poter prendere decisioni consapevoli in merito. Per questo motivo, sono stati studiati ed introdotti i marchi di certificazione ambientale che, fornendo alcuni dati sui principali effetti ambientali, permettono di dare una prima caratterizzazione ecologica ai prodotti. Anche in questo caso, però, l'analisi non è semplice in quanto i marchi sono applicati a prodotti specifici mentre i metodi di valutazione dell'ecocompatibilità di un progetto fanno riferimento a materiali "tipo" e non è sempre corretto pensare di poter estendere un marchio che si riferisce ad un singolo prodotto a tutta una categoria. Vi è poi un'altra problematica relativa alla disponibilità di prodotti con marchio di certificazione ambientale presenti sul mercato: progettare una stratigrafia per un sistema di facciata senza possedere i marchi per tutti i materiali significherebbe non essere in grado di valutare la prestazione complessiva del sistema.

Per verificare il requisito risulta fondamentale determinare il quantitativo di emissioni che si verificano durante il processo

produttivo. Queste emissioni possono essere distinte in due gruppi: le emissioni dirette e quelle indirette. Con emissioni dirette si fa riferimento al *rilascio "misurabile" del sistema di produzione* (Giordano, 2010), ossia a quelle emissioni che sono prodotte direttamente dagli impianti di produzione durante il ciclo produttivo. Con emissioni indirette ci riferiamo invece alla somma delle emissioni di produzione e trasporto dell'energia utilizzata in seguito per alimentare gli impianti di produzione. Qualora un produttore ottenga l'energia necessaria alla produzione da fonti rinnovabili, le emissioni indirette saranno nulle.

Un altro aspetto importante è relativo al concetto di credito di biossido di carbonio che è generalmente caratteristica tipica dei materiali appartenenti alla biosfera, come il legno. Quando considereremo le emissioni di questa tipologia di prodotti, dovremo infatti tenere conto della quantità di biossido che il legno ha assorbito da vivo prima di essere impiegato nella produzione. In alcuni casi il credito accumulato da certe specie vegetali può essere maggiore del delle emissioni che verranno rilasciate in fase produttiva. Si tratta di un concetto importante perché la possibilità di sfruttare questo credito è alla base delle azioni di compensazione promosse dal Protocollo di Kyoto che molte industrie ad alto impatto ambientale utilizzano per abbassare od annullare il bilancio delle proprie emissioni. Questo tipo di credito viene considerato nel bilancio generale delle emissioni relative alla produzione di un prodotto come una emissione indiretta con valore negativo e rimane bloccato fino alla fase di incenerimento, quando il biossido viene riemesso in atmosfera.

Nel caso di stoccaggio dei rifiuti in discarica, il bilancio dipenderà dalle modalità: il legno marcendo rilascerà una miscela di biogas che se dispersi in atmosfera costituiranno una emissione, mentre se

recuperati potranno essere riutilizzati per la produzione di energia. Esistono alcuni enti che si occupano di certificare l'ecocompatibilità dei prodotti in legno, come il Forest Stewardship Council (FSC) o il Programme for Endorsement of Forest Certification Schemes (PEFC) attraverso una gestione sostenibile delle foreste.

Riassumendo, per poter calcolare il contenuto di emissioni di biossido di carbonio e di altri gas ad effetto serra di un prodotto edile avremo bisogno di quantificare le emissioni dirette ed indirette e i crediti contenuti nelle materie prime utilizzate.

11.4.2 Indicatori per la valutazione del contenuto di CO₂

Per effettuare una valutazione delle emissioni di un sistema tecnologico bisognerà per prima cosa operare una sua scomposizione in singoli elementi tecnici. Una volta selezionati gli elementi si potrà eseguire una prima ponderazione valutando quali componenti siano più rilevanti nel calcolo in termini di massa o superficie. Successivamente, si potranno poi identificare e considerare nel calcolo anche singoli elementi che presentino delle caratteristiche tali da comportare significative variazioni di bilancio. Infine, si procederà nel calcolare il bilancio tra emissioni dirette e indirette per ognuno di questi.

Poiché tale valutazione non dovrebbe limitarsi al solo calcolo delle emissioni di biossido di carbonio, sarebbe opportuno ottenere dati anche sulle emissioni relative alle altre sostanze inquinanti. In caso questo non sia possibile, si ritiene comunque accettabile la sola valutazione delle emissioni di CO₂, in quanto considerate come la maggiore e principale tra le fonti di inquinamento citate.

I sistemi di chiusura, entro cui rientrano i sistemi di facciata, rappresentano a pieno titolo una delle classi tecnologiche per le quali

il già citato TR della UNI 11277:2008 prevede venga eseguita la valutazione.

Il metodo di valutazione di una parete esterna è suddiviso in fasi. Per prima cosa si scompone il sistema nei suoi strati costituenti e si calcolano le emissioni dirette ed indirette di biossido di carbonio per ognuno di essi²⁸. Una volta computati i valori di emissione dei singoli componenti, si può procedere a determinare il valore di emissioni di CO₂ per unità di superficie della parete.

Ottenuto il livello delle emissioni, lo si rapporta ad un sistema di classificazione che attribuisce una classe di impatto a cinque determinati intervalli di emissione. Le classi possono spaziare appunto da 0 a 5, dove il valore 0 rappresenta una soluzione ad alto impatto ambientale, mentre il valore 5 identifica un sistema a basso impatto.

Tabella 45 – Sistema di classificazione dell'impatto ambientale di un sistema edilizio.

Emissioni medie di CO ₂	Classe di Impatto
$CO_{2(medie)} > 500kg/m^2$	0
$500kg/m^2 > CO_{2(medie)} > 300kg/m^2$	1
$300kg/m^2 > CO_{2(medie)} > 200kg/m^2$	2
$200kg/m^2 > CO_{2(medie)} > 150kg/m^2$	3
$150kg/m^2 > CO_{2(medie)} > 50kg/m^2$	4
$50kg/m^2 < CO_2$	5

²⁸ In caso di componenti a loro volta stratificati, come possono essere per esempio i pannelli sandwich, bisognerà analizzare la stratigrafia anche di questi.

11.5 VALUTAZIONE DI IMPATTO AMBIENTALE DI PARETI VENTILATE

Per determinare l'impatto ambientale di un sistema di parete ventilata andremo dunque ad analizzare i valori totali delle emissioni in atmosfera di biossido di carbonio attribuiti ai suoi vari componenti.

Come per tutte le analisi precedenti, anche in questo caso prenderemo in considerazione un sistema di parete ventilata costituito dai suoi sei strati funzionali principali:

- Strato di regolarizzazione interno;
- Strato resistente;
- Strato isolante;
- Camera di ventilazione;
- Struttura di aggancio del rivestimento esterno;
- Rivestimento esterno.

Come già fatto in precedenza costruiremo alcuni scenari distinti, per avere una visione migliore delle varie possibilità: proporremo una parete ventilata ad alto impatto ambientale, una a medio impatto ed una a basso impatto. Per ognuno di questi modelli considereremo come invariabili tre degli strati funzionali elencati sopra: lo strato di regolarizzazione interno, la camera di ventilazione e la struttura di aggancio del rivestimento esterno. Andremo pertanto ad analizzare la performance dei possibili sistemi, facendo leva soprattutto sulle possibilità dello strato resistente, dello strato isolante e dello strato di rivestimento.

Strato di regolarizzazione interno – Per lo strato di regolarizzazione interno andremo ad adottare un normale intonaco di calce e gesso.

Poiché sono presenti sul mercato diverse soluzioni di intonaci dalle proprietà differenti, si è deciso, per quanto riguarda l'analisi delle emissioni di biossido di carbonio, di adottare un dato medio che tenga conto sia dei prodotti maggiormente performanti (con emissioni pari a 0,13 CO₂/kg) sia dei prodotti più inquinanti (con emissioni pari a 1,17 CO₂/kg). Pertanto, considereremo un intonaco con emissione totale pari a 0,65 CO₂/kg. Prevedendo uno spessore di posa medio di 2 cm ed una massa volumica pari a 1800 kg/m³, potremo quantificare le emissioni di CO₂ per metro quadro di facciata in 23,4 CO₂/m² (dati del Boustead Model²⁹).

Camera di ventilazione – Non rappresenta propriamente un componente, nè un materiale che necessiti di particolari processi di produzione, posa in opera o mantenimento. Poiché la camera di ventilazione si costituisce semplicemente come uno spazio “vuoto” compreso tra lo strato isolante ed il rivestimento esterno, verrà considerata come un elemento a zero emissioni, in quanto nessun processo inquinante è direttamente riferibile alla sua realizzazione.

Struttura di aggancio del rivestimento esterno – In questo caso, adotteremo una semplificazione del quadro di riferimento seguendo le linee guida già adottate in precedenza: considereremo in tutti gli esempi di parete ventilata a seguire, l'utilizzo di una struttura in profili d'alluminio.

Da questo segue che la realizzazione della struttura di aggancio in profili di alluminio contribuirà alle emissioni totali di biossido di carbonio del sistema, per un totale di 15,38 CO₂/kg (lo stesso valore

verrà utilizzato più avanti per la quantificazione delle emissioni del sistema GRE_EN_S, scenario standard). Avendo precedentemente dimensionato il contributo in termini di massa superficiale dato dalla struttura al sistema in 2,00 kg/m², possiamo dunque quantificare le emissioni di biossido di carbonio da imputare alla realizzazione di questo elemento in 30,76 kg di CO₂ per ogni m² di facciata (CO₂/m²).

Tabella 46 – Emissioni di CO₂ della camera di ventilazione e della struttura di aggancio del rivestimento esterno. Dati ricavati dalla banca dati Boustead Model.

	Camera di ventilazione	Struttura di aggancio del rivestimento esterno
Emissioni totali	0 CO ₂ /kg	15,38 CO ₂ /kg
Emissioni per m²	0 CO₂/kg	30,76 CO₂/m²

11.5.1 Parete ventilata ad alto impatto ambientale

Per andare a presentare una soluzione di parete ventilata ad alto impatto ambientale, andremo a costruire un esempio che utilizzi materiali dalle elevate emissioni totali di CO₂, considerando per ognuno la somma delle emissioni dirette e di quelle indirette.

Muratura in CLS – Lo strato resistente sarà realizzato tramite la posa in opera di blocchi in CLS da 25 cm di spessore, per una massa volumica di 2100 kg/m³. I dati sulle emissioni di biossido di carbonio dei blocchi in CLS indicano emissioni dirette per 0,13 CO₂/kg ed emissioni indirette pari a 0,18 CO₂/kg, per un totale di emissioni pari a 0,31 CO₂/kg. Considerando la massa volumica propria del materiale e lo spessore

²⁹ Il Boustead Model è uno strumento di modellazione computazionale che ha lo scopo di analizzare le informazioni sul LCA dei materiali. Include una banca dati sui consumi di combustibili, sulle emissioni inquinanti e sui processi di lavorazione dei

materiali e fornisce informazioni sulle dispersioni di calore, le emissioni in atmosfera e acqua ed i rifiuti solidi generati.

degli elementi adottati, prevediamo emissioni totali pari a 162,25 CO₂/m².

Strato Isolante – Per la realizzazione dello strato isolante, adotteremo una soluzione in pannelli di schiuma poliuretana PUR, per uno spessore di 6 cm ed una massa volumica propria di 150 kg/m³. Le emissioni di CO₂ diretta del PUR risultano pari a 0,39 CO₂/kg, mentre le emissioni indirette sono di 3,01 CO₂/kg, per un totale di 3,40 CO₂/kg. Abbinando i dati sulle emissioni del materiale con lo spessore di posa e la sua massa volumica, avremo un totale di emissioni per metro quadro di facciata pari a 30,60 CO₂/m².

Rivestimento esterno – Anche in merito al rivestimento esterno andremo ad adottare un materiale ad alto grado di emissioni di CO₂, quale è l'alluminio. Prevediamo quindi la posa in opera di un rivestimento esterno in pannelli di alluminio per uno spessore di 4 mm, con una massa volumica propria di 2.700 kg/m³. Come avevamo già indicato parlando della struttura di aggancio del rivestimento esterno, i dati di emissione dell'alluminio indicano emissioni dirette per 0,48 CO₂/kg ed emissioni indirette pari a 3,05 CO₂/kg, per un totale di 3,53 CO₂/kg. Considerando spessore e massa volumica, le emissioni totali del rivestimento esterno per metro quadro di facciata saranno pari a 0,05 CO₂/m².

Tabella 47 – Stratigrafia della parete ventilata ad alte emissioni di CO₂. Dati ricavati dalla banca dati Boustead Model.

Strato	Spessore cm	ρ Kg/m ³	Totale Emissioni CO ₂ CO ₂ /m ²
Intonaco calce e gesso	2	1800	23,40
Blocchi in CLS	25	2100	162,25
Pannelli PUR	6	150	30,60

Camera di ventilazione	6	1	0,00
Struttura di aggancio del riv. esterno	/	/	30,76
Pannelli in alluminio	0,4	2700	0,05

Tabella 48 – Caratteristiche prestazionali totali della parete ventilata ad alte emissioni.

Spessore totale	39,4 cm
Massa superficiale	583 kg/m ²
Trasmittanza termica U _{tot}	0,34 W/m ² K
Emissioni CO₂ totali	247,06 CO₂/m²

11.5.2 Parete ventilata a medio impatto ambientale

Per realizzare una parete ventilata con prestazioni migliori di quelle analizzate nell'esempio precedente, selezioneremo dei materiali caratterizzati da valori di emissioni di biossido di carbonio più nella media, rispetto ai più comuni materiali da costruzione.

Muratura in blocchi forati in laterizio – Riguardo allo strato resistente del sistema, in questo caso andremo a prevedere una soluzione in blocchi forati in laterizio, con una massa volumica di 800 kg/m³ e posati per uno spessore totale di 25 cm. Le emissioni dirette dei blocchi di laterizio saranno minori di 0,01 CO₂/kg ma quelle indirette sono invece pari a 0,14 CO₂/kg, per un totale di circa 0,14 CO₂/kg. Relazionando le emissioni proprie del materiale con la sua massa volumica e lo spessore di posa, avremo emissioni per un totale di 21 CO₂/m².

Strato isolante – Per lo strato isolante scegliamo di adottare una soluzione in pannelli di lana di pecora, con una massa volumica pari a 30 kg/m^3 per uno spessore in opera di 8 cm. I dati di emissione caratteristici per questo tipo di materiale indicano emissioni dirette pari a $0,725 \text{ CO}_2/\text{kg}$ ed emissioni indirette per $0,454 \text{ CO}_2/\text{kg}$, per un totale di $1,179 \text{ CO}_2/\text{kg}$. Unendo nuovamente questo dato con quelli relativi a massa volumica e spessore di posa, avremo emissioni totali pari a $2,83 \text{ CO}_2/\text{m}^2$.

Rivestimento esterno – In questo esempio il rivestimento esterno sarà costituito da uno strato di tavelle in cotto, caratterizzate da massa volumica pari a 1500 kg/m^3 , per uno spessore in opera di 5 cm. Le emissioni di CO_2 del cotto saranno identiche a quelle considerate analizzando lo strato resistente in laterizio, poiché si tratta fondamentalmente dello stesso materiale. Per cui avremo nuovamente emissioni dirette inferiori a $0,001 \text{ CO}_2/\text{kg}$ ed emissioni indirette nell'ordine dei $0,14 \text{ CO}_2/\text{kg}$, per un totale di circa $0,14 \text{ CO}_2/\text{kg}$. Questa volta però, massa volumica e spessore di posa saranno ben differenti rispetto a quanto analizzato per lo strato resistente e dunque le emissioni totali del rivestimento saranno pari a $10,5 \text{ CO}_2/\text{m}^2$.

Tabella 49 – Stratigrafia della parete ventilata a medie emissioni di CO_2 . Dati ricavati dalla banca dati Boustead Model.

Strato	Spessore cm	ρ Kg/m ³	λ W/mK	Emissioni CO_2 CO ₂ /m ²
Intonaco calce e gesso	2	1800	0,90	23,40
Blocchi forati in laterizio	25	800	0,35	28,00

Pannelli in lana di pecora	8	30	0,04	2,83
Camera di ventilazione	6	1	/	0,00
Struttura di aggancio del riv. esterno	/	/	/	30,76
Tavelle in cotto	5	1500	0,20	10,5

Tabella 50 – Caratteristiche prestazionali totali della parete ventilata a medie emissioni.

Spessore totale	46 cm
Massa superficiale	315 kg/m ²
Trasmittanza termica U_{tot}	0,34 W/m ² K
Emissioni CO_2 totali	95,49 CO₂/m²

11.5.3 Parete ventilata a basso impatto ambientale

Quando parliamo di sistemi a basso impatto ambientale stiamo necessariamente considerando delle soluzioni che fanno affidamento su materiali ad emissioni negative. Come abbiamo visto in precedenza, i materiali ad emissioni negative sono quelli che durante il proprio ciclo di vita hanno contribuito ad assorbire biossido di carbonio dall'atmosfera in misura maggiore di quanto non ne abbiano emesso i vari processi di produzione, lavorazione e trasporto del componente edilizio (per esempio corrispondono a questa categoria gli elementi tecnici realizzati in legno).

Muratura in blocchi forati in laterizio – Manteniamo come punto fermo la muratura in blocchi forati in laterizio, con uno spessore totale di 25 cm per una massa volumica di 800 kg/m^3 . Con emissioni dirette

pari a 0,01 CO₂/kg ed emissioni indirette di circa 0,14 CO₂/kg, avremo un valore totale di circa 0,14 CO₂/kg. Il valore di emissioni per metro quadro di facciata sarà nuovamente pari a 28 CO₂/m².

Strato isolante – Lo strato isolante è uno degli elementi per i quali andremo a selezionare un materiale ad emissioni negative: pannelli in sughero. Il sughero è un tessuto vegetale di rivestimento che riveste il fusto e le radici delle piante legnose. Poiché si tratta di un prodotto naturale di origine vegetale, nel computo delle emissioni di CO₂ da esso generate, si tiene convenzionalmente conto anche delle quantità di biossido di carbonio assorbite dalla pianta da cui proviene nel suo ciclo di vita. L’aspetto che in questo frangente rende il sughero ancora più competitivo del legno è il processo di estrazione. L’estrusione del materiale dalla pianta, infatti, non pregiudica la vita della stessa³⁰ che può così continuare ad assorbire CO₂ tramite il proprio naturale processo di respirazione. I valori di emissione diretta di biossido di carbonio saranno dunque inferiori a 0,01 CO₂/kg, mentre le emissioni indirette, per quanto appena detto, saranno di -1,27 CO₂/kg. Considerando uno spessore di posa dei pannelli pari a 8 cm, per una massa volumica di 120 kg/m³, avremo un totale di emissioni al metro quadro di -12,19 CO₂/m².

Rivestimento esterno – Anche nel caso del rivestimento esterno, andremo a scegliere un materiale di origine naturale che ci garantisce un valore di emissioni negativo: il legno. Anche per il legno, come per il sughero, i valori negativi di emissioni sono dovuti al considerare nel computo totale anche le quantità di biossido di carbonio assorbite dalla pianta da cui viene estratto, durante il suo ciclo di vita. I valori caratteristici per pannelli in legno saranno dunque pari a 0 per quanto

³⁰ L’estrusione del legno invece, comporta necessariamente la morte della pianta da cui viene estratto, che quindi cessa di assorbire CO₂ dall’atmosfera. Nonostante

riguarda le emissioni dirette e pari a -1,15 per le indirette. Prevedendo la posa in opera di pannelli dallo spessore di 2 cm per una massa volumica di 540 kg/m³, avremo un valore di emissione totale al metro quadro di facciata pari a -12,42 CO₂/m².

Tabella 51 – Stratigrafia della parete ventilata a basse emissioni di CO₂. Dati ricavati dalla banca dati Boustead Model.

Strato	Spessore cm	ρ Kg/m ³	λ W/mK	Emissioni CO ₂ CO ₂ /m ²
Intonaco calce e gesso	2	1800	0,90	23,40
Blocchi forati in laterizio	25	800	0,35	28,00
Pannelli in sughero	8	120	0,04	-12,19
Camera di ventilazione	6	1	/	0,00
Struttura di aggancio del riv. esterno	/	/	/	30,76
Pannelli in legno	2	540	0,26	-12,42

Tabella 52 – Caratteristiche prestazionali totali della parete ventilata a basse emissioni.

Spessore totale	43 cm
Massa superficiale	256 kg/m ²
Trasmittanza termica U _{tot}	0,34 W/m ² K
Emissioni CO₂/m² facciata	57,55 kg/m²

a seguito dell’estrusione si proceda piantando un nuovo arbusto, la nuova pianta necessiterà di decenni per riprendere ad assorbire le stesse quantità di CO₂.

11.6 IMPATTO AMBIENTALE DEL SISTEMA GRE_EN_S

Per quanto riguarda il GREen ENvelope System, la metodologia del LCA è stata alla base della progettazione stessa del sistema, con l'obiettivo di ottimizzare sia l'energia, che le materie prime, nonché le emissioni inquinanti, tra le quali le emissioni di CO₂ equivalente.

Già nelle prime fasi della progettazione, sono stati selezionati materiali e tecnologie ecocompatibili sulla base di informazioni provenienti da database e schede tecniche. In aggiunta a questi parametri, sono state prese in considerazione anche la disponibilità sul mercato locale e la possibilità di produzione, d'accordo con le tecnologie disponibili.

La selezione finale dei materiali, è stata basata sui risultati del LCA, valutando gli oneri ambientali dei materiali e scegliendo quelli con il minor impatto energetico e ambientale, considerando come migliori indicatori l'Embodied Energy e l'Embodied Carbon.

Una volta determinate le caratteristiche specifiche dei moduli del sistema, un secondo round di ricerca ha permesso di focalizzarsi sull'abbattimento degli effetti ambientali di alcuni dei materiali selezionati originariamente, come per esempio la lega di alluminio.

Nello studio di questa caratteristica, la caratterizzazione ambientale è stata condotta considerando lo standard LCA (ISO 14040 del 2006). Inoltre, nell'inventario dei dati non sono stati dimenticati i terreni di impregnazione (posti nelle tasche), la vegetazione utilizzata (L. Nitida) ed i flussi di materiale necessari per la produzione del sistema.

Per quanto riguarda i crediti di biossido di carbonio, il calcolo è stato eseguito stimando la biomassa arbustiva dai diametri dello stelo

basale, mentre la biomassa sotterranea (le radici) non è stata inclusa nella stima. La biomassa arbustiva è stata dunque stimata in 2,66 kg/m² ed è stata assunta come valore negativo nel bilancio della CO₂eq). Per la stima è stata utilizzata la seguente equazione:

$$Y = aX^b$$

dove Y è il peso asciutto, X è il diametro dello stelo ed *a* e *b* sono variabili che dipendono dal diametro dello stelo (Ohmann, Grigal, & R.B., 1976). L'equazione descrive la relazione tra forma, dimensioni e peso della biomassa del legno. Il diametro dello stelo è stato misurato a 0,25 cm al di sopra del suolo ed è risultato essere di 1,50 cm (valore medio per le piante misurate). I valori *a* e *b* erano rispettivamente di 2.371 e di 0,7265.

Il sistema scatolare era caratterizzato da sei tasche piene di terriccio e in ogni box modulare è stata contata una media di 50 steli. La quantità totale di biomassa è stata determinata come 0,416 chilogrammi (kg). Poiché per realizzare 1m² di parete sono necessari 4 moduli, la quantità di biomassa che ci interessa per questa analisi è di 1,66 kg/m².

In base al valore di biomassa suddetto, sono stati stimati i valori di contenuto di carbonio e di credito di CO₂ secondo il modello seguente (Canada, 2012):

$$1\text{Kg biomassa}_{15\%MC} = 0,45 \text{ KgC} = 1,60 \text{ KgCO}_2\text{eq.}$$

Il contenuto di CO₂eq del legno di Lonicera è stato stimato in 4,85 kg/m², assunto come valore negativo nel bilancio.

Per costruire dunque un metro quadrato di GRE_EN_S sono necessari i seguenti materiali: 0,53 kg di fibra di polipropilene, 1,15 kg di tessuto viscosa, 4,20 kg di terriccio, 2,00 kg di griglia in monofilamento di polipropilene e 3,90 kg di lega di alluminio.

Lo studio realizzato aveva dunque la finalità di determinare le emissioni di CO₂eq e le potenzialità di assorbimento inquinanti del sistema, considerando come orizzonte temporale un periodo di 100 anni e come contesto geografico il quadro energetico italiano.

Si sono presi in considerazione due scenari distinti. Nello scenario standard, si considera il 100% dei componenti ottenuti da materie prime, mentre nel secondo scenario, nel quale si opta per l'utilizzo di alcuni materiali riciclati, si considera un 30% di percentuale di riciclaggio per la lega di alluminio e il polipropilene. In aggiunta, nel secondo scenario si è provveduto a cambiare la composizione del terreno di impregnazione, sostituendo parzialmente il SAP con feltri riciclati a base di nylon. Il nuovo terreno così ottenuto presenta un contenuto di SAP ridotto del 50% ed è così composto: 50% di suolo grezzo, 15% di SAP, 15% di feltro riciclato, un 15% di fibra di cocco e il 5% di muschio di torba. La differenza in peso (kg/m²) delle materie prime rispetto ai materiali riciclati è trascurabile.

Nel primo scenario il valore totale di emissioni di CO₂ del pannello vegetato è stato ottenuto sommando i crediti di CO₂, assunti come valori negativi, e le emissioni di CO₂ di ciascuno degli strati costituenti il sistema. Il valore totale del pannello è stato così calcolato in 55,98 kg/m².

All'interno del bilancio generale, la lega di alluminio è l'elemento con il maggiore impatto sui cambiamenti climatici, con un valore di 60,00 CO₂/m².

I crediti dovuti alla biomassa della Lonicera ed al tessuto di viscosa ammontano a circa 13,13 CO₂/m².

Poiché il tessuto in viscosa è un materiale a base di cellulosa e il contenuto di energia primaria dovuto al legno presente nella cellulosa

è notevole, i suoi crediti di CO₂ sono quasi doppi rispetto a quelli provvisti dalla biomassa dello stelo di Lonicera: 8,28 CO₂/m².

Tabella 53 - Emissioni di CO₂ per lo scenario standard del pannello vegetato.

Materiale	Peso	Emissioni CO ₂
Lonicera Nitida	1,66 Kg/m ²	-4,85 CO ₂ /m ²
Fibra di Polipropilene	0,53 Kg/m ²	4,62 CO ₂ /m ²
Tessuto in Viscosa	1,15 Kg/m ²	-8,28 CO ₂ /m ²
Terreno	4,2 Kg/m ²	0,10 CO ₂ /m ²
Rete geomatica in polipropilene	2 Kg/m ²	4,40 CO ₂ /m ²
Lega di alluminio	3,9 Kg/m ²	60,00 CO ₂ /m ²
TOTALE	13,44 Kg/m²	55,98 CO₂/m²

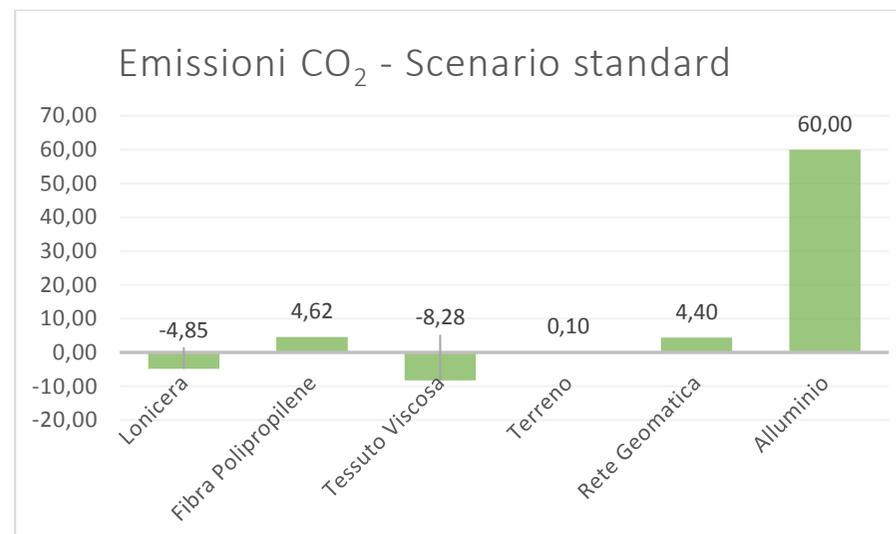


Figura 71 - Emissioni di CO₂ nello scenario standard.

Per quanto riguarda lo scenario di riciclaggio, le emissioni totali di CO₂ del pannello vegetato sono state calcolate per un totale di 20,45

kg/m², ovvero poco più di un terzo del valore determinato nel primo scenario.

La lega di alluminio riciclato continua ad avere il maggiore impatto sui cambiamenti climatici con un valore che si attesta sui 27,00 CO₂/m², ma riduce l'effetto sul cambiamento climatico di oltre il 50% rispetto alla lega di alluminio prodotta con materie prime.

Anche la fibra riciclata e la rete geomatica in polipropilene diminuiscono il loro impatto apportando una differenza di circa 1 CO₂/m². Tale riduzione è tuttavia molto meno notevole della diminuzione di emissioni dovuta al riciclaggio dell'alluminio.

Un altro dato interessante è che l'impatto evitato grazie alla biomassa ed al tessuto di viscosa aumenta notevolmente rispetto alle emissioni totali di CO₂ realizzate dal sistema.

La piccola quantità di terriccio utilizzata in entrambi gli scenari analizzati non influisce in modo significativo sulle emissioni di CO₂. Tuttavia, il confronto tra due miscele dimostra l'importanza di sostituire il SAP con feltri riciclati: la miscela prodotta con SAP presenta valori di emissione ben cinque volte superiori rispetto a quella riciclata: 0,10 CO₂/m² la prima, 0,02 CO₂/m² per la seconda.

Tabella 54 - Emissioni di CO₂ del pannello vegetato per lo scenario con materiali riciclati.

Materiale	Peso	Emissioni CO ₂
Lonicera Nitida	1,66 Kg/m ²	-4,85 CO ₂ /m ²
Fibra di Polipropilene	0,53 Kg/m ²	3,36 CO ₂ /m ²
Tessuto in Viscosa	1,15 Kg/m ²	-8,28 CO ₂ /m ²
Terreno	4,2 Kg/m ²	0,02 CO ₂ /m ²

Rete geomatica in polipropilene	2 Kg/m ²	3,20 CO ₂ /m ²
Legna di alluminio	3,9 Kg/m ²	27,00 CO ₂ /m ²
TOTALE	13,44 Kg/m²	20,45 CO₂/m²

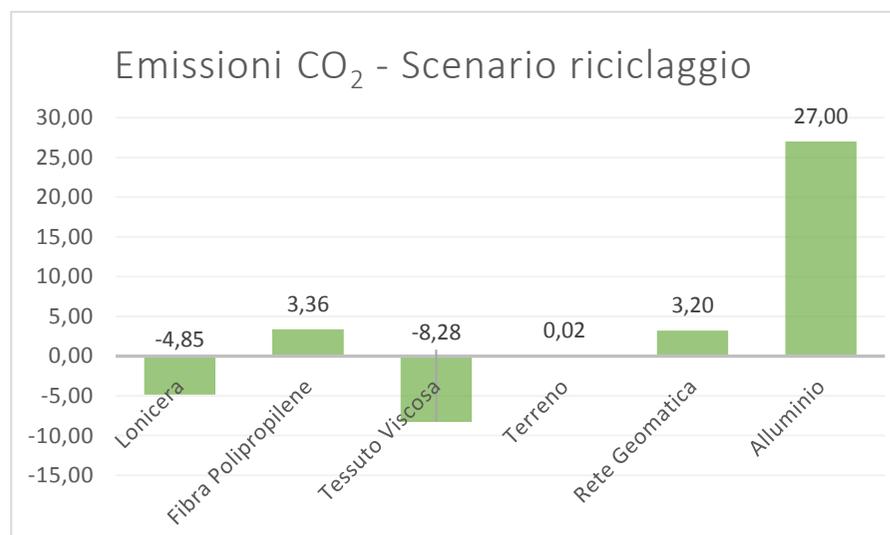


Figura 72 - Emissioni di CO₂ del pannello vegetato nello scenario di riciclaggio.

Una volta analizzate le prestazioni del pannello vegetato, possiamo procedere ad inserirlo nel contesto generale del sistema parete. Torniamo dunque ad analizzare gli stessi dati visti finora, riferiti però questa volta al sistema nella sua totalità. Al valore di 20,45 CO₂/m² appena calcolato per il pannello vegetato, dobbiamo andare dunque ad aggiungere l'apporto degli altri elementi. Recuperiamo dunque la stratigrafia analizzata sinora ed andiamo ad analizzare le emissioni di CO₂ che caratterizzano i vari componenti.

La doppia lastra in gesso rivestito, con una massa superficiale di 57,50 kg/m² è caratterizzata da emissioni pari a -0,22 CO₂/m², delle quali meno di 0,01 CO₂/m² sono emissioni dirette e 0,22 CO₂/m² sono emissioni indirette (dati del Boustead Model).

I due telai in acciaio zincato partecipano al sistema con una massa superficiale di 7 kg/m² ciascuno. Le emissioni calcolate per l'acciaio sono di circa 0,99 CO₂/m², dei quali il 100% è rappresentato da emissioni indirette (dati del Boustead Model).

Lo strato isolante in pannelli di sughero apporta una massa superficiale di 10,16 kg/m² ed il valore di emissioni di CO₂ per questo materiale è stimato in -1,27 CO₂/m² (dati del Boustead Model). Come sappiamo, il valore è negativo poiché si tratta di un materiale naturale, proveniente dal busto di alberi che durante la propria vita hanno partecipato attivamente all'abbattimento dell'anidride carbonica in atmosfera. Le emissioni di CO₂ necessarie per dare forma di pannello al materiale grezzo sono dunque molto minori rispetto all'abbattimento operato dall'albero. Per quanto riguarda il valore calcolato infatti, la quasi totalità delle emissioni che lo compongono sono emissioni indirette negative. I pannelli in sughero partecipano dunque alla prestazione del sistema apportando un valore di emissioni totali pari a -12,90 CO₂/m².

Per calcolare l'impatto della lastra in cemento fibrorinforzato abbiamo fatto riferimento ai dati disponibili per il cemento Portland (Boustead Model), secondo cui l'impatto ambientale sarebbe quantificabile in 1,17 CO₂/m² totali, dei quali 0,56 CO₂/m² sono emissioni dirette e 0,61 CO₂/m² emissioni indirette. Moltiplicando questo valore per la massa superficiale apportata dall'elemento al sistema, otteniamo un valore di emissione totale di 26,32 CO₂/m².

Considerando infine le emissioni di CO₂ per tutti gli elementi del sistema nel loro insieme, possiamo dunque determinare le emissioni del sistema parete GRE_EN_S, pari ad un totale di 35,08 CO₂/m².

Tabella 55 - Emissioni di CO₂ del sistema parete GRE_EN_S nella sua totalità.

Materiale	Peso	Emissioni CO ₂
Doppia Lastra In Gesso Rivestito	57,50 kg/m ²	-12,65 CO ₂ /m ²
Telaio In Acciaio Zincato	7,00 kg/m ²	6,93 CO ₂ /m ²
Strato Isolante In Sughero	10,16 kg/m ²	-12,90 CO ₂ /m ²
Lastra In Cemento Fibrorinforzato	22,50 kg/m ²	26,32 CO ₂ /m ²
Telaio In Acciaio Zincato	7,00 kg/m ²	6,93 CO ₂ /m ²
Moduli Vegetati	13,44 kg/m ²	20,45 CO ₂ /m ²
TOTALE	117,60 kg/m²	35,08 CO₂/m²

Tabella 56 - Caratteristiche prestazionali totali della parete vegetata GRE_EN_S.

Spessore totale	32,3 cm
Massa superficiale	118 kg/m ²
Trasmittanza termica U _{tot}	0,29 W/m ² K
Emissioni CO₂/m² facciata	35,08 kg/m²

11.7 CONCLUSIONI DEL RAFFRONTO

In questo capitolo abbiamo visto che per quanto riguarda le pareti ventilate, come per ogni altro parametro, anche il contenuto di CO₂ equivalente può variare molto a seconda di quali materiali vengano utilizzati per la realizzazione del sistema parete.

In questo contesto, i materiali selezionati per la realizzazione della stratigrafia del sistema GRE_EN_S, nello scenario standard, presentano una prestazione analoga a quella che possono offrire le migliori pareti ventilate.

Per quanto concerne il secondo scenario, che prevede l'utilizzo di materiali riciclati, nonostante non si posseggano in questa sede dati sulle prestazioni degli eventuali materiali riciclati previsti per le pareti ventilate, tuttavia possiamo affermare che anche un sistema di parete ventilata potrebbe avvalersi di tali materiali (ad esempio il sughero o l'alluminio), i quali contribuirebbero ad abbassare il contenuto di CO₂ e dunque l'impatto ambientale dei sistemi di parete ventilata, più o meno in misura analoga a quanto accade per il sistema GRE_EN_S.

In conclusione, per quanto riguarda l'impatto ambientale, definito nel caso specifico dal contenuto di CO₂ dei sistemi di parete a confronto, concludiamo affermando che il sistema GRE_EN_S presenta prestazioni superiori alla maggior parte dei sistemi di parete ventilata normalmente impiegati in edilizia.

Solamente il disegno di pareti ventilate appositamente studiate per alte prestazioni in termini di contenuto di CO₂ può permettere a tali sistemi di presentare prestazioni che si avvicinino a quelle misurate per il sistema parete GRE_EN_S.

Anche in questo frangente dunque, il sistema GRE_EN_S presenta prestazioni ampiamente superiori ad un normale sistema di parete ventilata.

12 ASSORBIMENTO INQUINANTI

Quando parliamo della capacità dei sistemi costruttivi di assorbire elementi inquinanti stiamo facendo riferimento fondamentalmente alle sostanze che si trovano sospese in aria (inquinanti liquidi o solidi, fibre, metalli, particelle carboniose, silice, ecc). Queste sostanze vengono comunemente chiamate con i nomi di polveri sottili, particolato, pulviscolo atmosferico o polveri totali sospese (PTS). Le polveri sottili stanno assumendo un'importanza sempre maggiore nelle analisi di sostenibilità ambientale in quanto vengono considerate come una delle principali fonti di inquinamento dell'aria nelle aree urbane.

12.1 ELEMENTI INQUINANTI E POLVERI SOTTILI

Gli aggregati sospesi in atmosfera possono essere composti da particelle di dimensioni variabili da pochi nanometri fino a mezzo millimetro e la loro origine può essere dovuta a fenomeni naturali od antropogenici. In natura, queste particelle possono derivare da numerose sorgenti: può trattarsi semplicemente di polveri, terra e sale marino alzati e dispersi dal vento, come di microorganismi, pollini o spore. Possono essere il risultato di incendi o eruzioni vulcaniche od ancora l'effetto dell'erosione delle rocce. Infine, può trattarsi persino di polveri cosmiche.

Per quanto riguarda le sorgenti antropogeniche, possiamo citarne diverse che spaziano dalle emissioni dovute ai processi di combustione di motori a combustione interna (autoveicoli), a quelle dovute al riscaldamento degli edifici. Può trattarsi di residui dovuti al semplice logorio dei manti stradali o dei freni e delle gomme degli autoveicoli.

Possono essere emesse da impianti produttivi o di incenerimento rifiuti, dalle coltivazioni agricole, piuttosto che dal fumo del tabacco.

L'incidenza con cui sorgenti naturali e antropiche concorrono alla produzione del particolato dipende fondamentalmente dal luogo di analisi. In generale, è stato stimato che, su un totale di 10 milioni di tonnellate prodotte all'anno, il 94% delle polveri sottili sia di origine naturale (Ferrara & Farruggia, 2007). Tuttavia, questa statistica non è rappresentativa delle aree urbane, dove la produzione antropogenica acquista un peso maggiore.

In generale ogni tipo di combustione produce polveri sottili e la loro dimensione tende a diminuire quanto maggiore risulterà la temperatura di esercizio dell'impianto. Contemporaneamente però, l'innalzamento della temperatura migliora l'efficienza dei processi di combustione, riducendo le quantità di particolato emesse. Alcuni studi effettuati in merito da comitati scientifici dell'Unione Europea³¹, hanno concluso che i maggiori responsabili delle emissioni di polveri sottili di origine antropica siano i processi di combustione, in particolare di veicoli, impianti industriali, carbone, legna da ardere e biomasse.

12.1.1 Diffusione del particolato

La concentrazione nell'aria di queste polveri viene limitata da processi naturali che ne facilitano la deposizione a terra: la forza di gravità fa sì che in stato di quiete i componenti più pesanti tendano a depositarsi autonomamente al suolo; in aggiunta alla gravità, anche le nubi e le piogge svolgono un importante lavoro di rimozione liquida. Grazie a

³¹ Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks: "The appropriateness of existing methodologies to assess the potential risks associated with engineered and adventitious products of nanotechnologies", 2006; Scientific

questi processi naturali di depurazione, possiamo considerare come aria pulita quella che presenti una concentrazione di inquinanti pari a 1-1,5 µg/m³.

Una delle principali problematiche legate a questo fenomeno è data dalle dimensioni degli aggregati, a seconda delle quali possono essere classificati in varie categorie.

Possiamo chiamare con il termine "aerosol" la categoria di particelle di tipo colloidale, solide o liquide, che presentino diametro inferiore a 1µm. Con il termine "esalazioni" indichiamo invece le particelle solide di diametro inferiore a 1µm che sono prevalentemente emesse da processi industriali; le "foschie" sono particolato liquido di dimensione inferiore ai 2µm; le particelle solide di diametro inferiore a 2µm che vengono trasportate dai prodotti di processi di combustione vengono chiamate "fumi"; le polveri sono invece una categoria di particolato solido che può variare dagli 0,25 ai 500 µm; infine abbiamo le sabbie, particelle solide di diametro superiore ai 500 µm.

Gli elementi di maggiori dimensioni, superiori ai 50 µm, saranno normalmente più pesanti e tenderanno dunque a depositarsi al suolo più velocemente, causando fenomeni di inquinamento locale. Per quanto riguarda le particelle di medie dimensioni, invece, il discorso è differente in quanto, essendo più leggere, necessiteranno di un tempo maggiore per depositarsi e saranno più facilmente trasportabili dal vento, causando fenomeni di inquinamento di scala maggiore. Tuttavia anche queste particelle, tramite dinamiche di urti casuali e fenomeni di attrazione reciproca tenderanno a riunirsi insieme,

Committee on Health and Environmental Risks: "New evidence of air pollution effects on human health and the environment", 2005.

acquistando massa maggiore e depositandosi a loro volta al suolo. Per via di questi fenomeni, le polveri cosiddette PM_{10} , così denominate poiché hanno un diametro inferiore ai $10\mu m$, possono rimanere in sospensione fino a 12 ore mentre quelle ancora più piccole, con un diametro inferiore a $1\mu m$, possono impiegare anche un mese per depositarsi.

Possiamo quindi comprendere come le polveri emesse da camini situati ad una certa altezza possano essere trasportate per km prima di depositarsi, per cui l'inquinamento in una determinata area potrebbe anche essere causato dalle emissioni di impianti industriali situati a diversi km di distanza.

12.1.2 Metodo di identificazione

Come abbiamo detto, il particolato sospeso in aria è costituito da un insieme di particelle di origine e caratteristiche differenti. Tuttavia questa "miscela di ingredienti" può essere scomposta nei suoi costituenti, analizzandone la distribuzione dimensionale.

Le varie particelle vengono quindi separate tramite filtri di varie dimensioni e identificate in base al proprio massimo diametro aerodinamico equivalente (d_{ae}). Questo parametro rapporta il diametro delle particelle setacciate con quello di una particella sferica di densità unitaria ($1g/cm^3$) e di uguale comportamento aerodinamico, in medesime condizioni di temperatura, pressione ed umidità relativa. In questo modo si può caratterizzare il comportamento aerodinamico delle particelle che normalmente presentano densità e morfologia molto variabili.

Le particelle più pesanti possono essere rilevate tramite tecniche di misurazione gravimetriche, mentre per le più piccole, che non potrebbero essere rilevate in questo modo, è stato messo appunto un

sistema di "conteggio" laser in grado di determinare il numero di particelle presenti per unità di superficie di deposito.

Il Particulate Matter (PM), seguito dal valore di diametro massimo per ciascuna categoria, è la nomenclatura che identifica l'una rispetto alle altre e può essere così suddiviso:

- **Particolato grossolano** per dimensioni superiori ai $10\mu m$;
- **PM_{10}** per particelle di diametro inferiore a $10\mu m$;
- **$PM_{2,5}$** per particolato fine di diametro inferiore a $2,5\mu m$;
- **PM_1** per aggregati di dimensioni inferiori a $1\mu m$;
- **$PM_{0,1}$** per dimensioni inferiori a $0,1\mu m$;
- **Nanopolveri** per particelle di dimensioni valutabili in nanometri ($PM_{0,001}$).

Da quanto detto possiamo comprendere come il particolato presente in atmosfera sia costituito da sottoinsiemi dimensionali per cui sul totale di PTS, il PM_{10} ne rappresenta una frazione di cui il $PM_{2,5}$ rappresenta un'altra porzione e così via.

12.1.3 Effetti sulla salute

L'aspetto forse più importante della questione è dato dalla composizione del particolato. A seconda di come viene prodotto, la sua composizione chimica può variare molto. Parliamo dunque di particolato "carbonioso" quando ci riferiamo ai prodotti di processi di combustione, siano essi naturali o artificiali, poiché è prevalentemente costituito da particelle di carbonio e prodotti della combustione. Questo tipo di aggregato può essere più o meno nocivo a seconda del materiale bruciato: uno dei più nocivi è quello prodotto dalla combustione dei polimeri plastici, in quanto può facilmente trasportare le sostanze tossiche da essa generate, come per esempio le diossine.

Per quanto concerne i particolati di origine naturale, questi possono essere di diversa origine e quindi presentare livelli differenti di pericolosità per la salute: si possono avere particolati aggressivi che danneggiano le strutture (aerosol), particolati nocivi come pollini e terra o particolati estremamente nocivi, come le polveri di amianto.

Nonostante la maggior parte delle polveri non sia costituita da elementi tossici, gli effetti di livelli eccessivi di particolato sulla salute dell'uomo non sono per nulla positivi.

Normalmente nel processo di respirazione le particelle di dimensioni maggiori di $15\mu\text{m}$, vengono intercettate dal naso che svolge la funzione di un filtro. Tuttavia, tutti gli aggregati di dimensioni inferiori sfuggono all'azione filtrante, riuscendo a penetrare più internamente all'apparato respiratorio e depositandosi dentro le cavità nasali, sulla faringe e sulla laringe. L'accesso delle polveri all'interno del sistema respiratorio può causare gravi stati infiammatori e secchezza delle mucose che pregiudicano la regolare respirazione (Janes, Sheppard, & Shepherd, 2006).

Minori sono le dimensioni delle particelle, maggiore sarà il grado di penetrazione all'interno del sistema respiratorio e maggiore sarà il tempo necessario all'organismo per smaltirle. Le polveri di dimensioni minori possono penetrare fino a raggiungere i bronchi ed i polmoni, aggravando le condizioni di malattie croniche come asma, bronchiti ed enfisemi. Al di sotto degli $0,1\text{mm}$, gli aggregati sono addirittura in grado di entrare per osmosi nel circolo sanguigno, aggravando ulteriormente la pericolosità di tale fenomeno.

Se da un lato dunque il nostro organismo non possiede i mezzi necessari per difendersi completamente dal fenomeno, il risvolto davvero negativo della questione è costituito da un altro fattore: le

particelle in sospensione presentano una morfologia tale da favorirne l'assorbimento di sostanze acide (biossido di zolfo, ossidi di azoto, ecc.) e chimiche cancerogene.

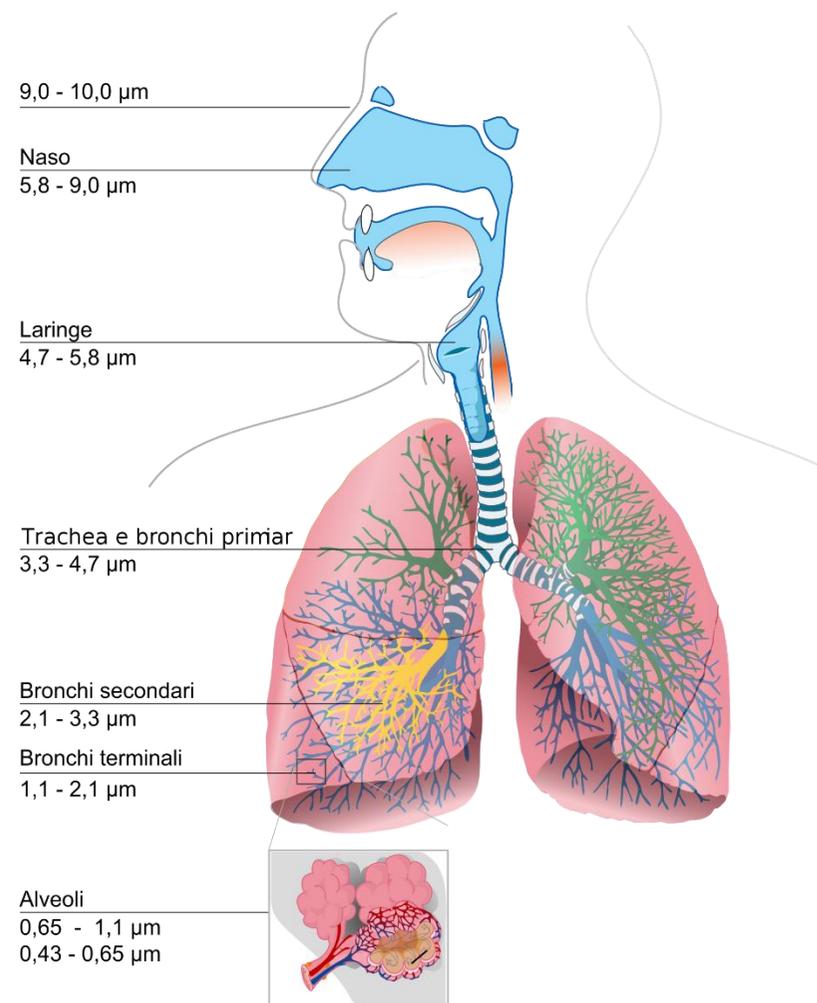


Figura 73 – Gradi di penetrazione del particolato nell'apparato respiratorio in funzione delle dimensioni. (fonte: it.wikipedia.org).

La reale pericolosità delle polveri sottili sta dunque nel fatto che queste possano costituirsi come mezzo di trasporto e sedimentazione all'interno del nostro organismo di sostanze altamente dannose per la salute, amplificandone così gli effetti negativi.

Le persone più vulnerabili a questo fenomeno saranno dunque coloro che già soffrono di problemi respiratori cronici: gli anziani, i bambini e coloro che svolgono attività sportive e lavorative all'aperto con regolarità. L'inalazione prolungata delle suddette sostanze potrà provocare in questi soggetti reazioni fibrose croniche e necrosi dei tessuti dell'apparato respiratorio.

12.1.4 Effetti sull'ambiente

Per quanto riguarda gli effetti sull'ambiente a livello locale, possiamo ipotizzare con un certo grado di approssimazione che gli effetti del fenomeno sulla salute degli esseri umani siano rappresentativi degli effetti che questo produce nelle altre forme di vita.

Più in particolare, si è registrata negli ultimi 50 anni, come effetto di fumi ed esalazioni di origine antropica, una diminuzione della visibilità nei centri abitati che arriva a picchi del 50% nelle zone più colpite. Le particelle tendono infatti ad attrarsi tra loro ed a formare nuclei di condensazione intorno a cui si creano banchi di nebbia e nuvole, dai quali possono scaturire piogge acide. Le piogge acide favoriscono l'erosione e la corrosione dei materiali, soprattutto quelli metallici.

Il particolato che si deposita sulle superfici danneggia i circuiti metallici, sporca gli edifici e accorcia la durata dei tessuti. Depositandosi sulle foglie degli alberi, crea una patina opaca che

ostacola i processi di fotosintesi clorofilliana, indebolendo la salute della vegetazione.

Le analisi sui possibili effetti sull'ambiente a livello globale, sono invece di più difficile interpretazione, in quanto sono stati condotti studi e stime che però non hanno portato a conclusioni definitive. Si immagina pertanto che un'alta concentrazione di particolato in atmosfera possa inibire l'irraggiamento solare, diminuendo la temperatura terrestre; contemporaneamente essa agisce da riflettore della radiazione infrarossa emessa del suolo, mitigando così la diminuzione di temperatura. Alcuni studi condotti in seguito ad eruzioni vulcaniche di grande portata hanno rilevato come in seguito ad un aumento di 4 volte del quantitativo di aggregati in atmosfera, la temperatura sarebbe scesa di 3,5 gradi.

12.2 QUADRO NORMATIVO

Fino al 2008 la normativa relativa al controllo ed alla riduzione di emissioni di polveri sottili prendeva come riferimento i rilevamenti di PM_{10} presente in atmosfera. Nell'aprile del '99 la direttiva europea 1999/28/CE dettava i valori limite di qualità dell'aria ambiente per biossidi di zolfo, biossidi di azoto, ossidi di azoto e particelle di piombo, seguita nel 2000 dalla 2000/69/CE che regolava i medesimi valori massimi di benzene e monossido di carbonio. Queste normative europee erano poi state recepite in Italia attraverso il DM 60 del 2 aprile 2002. Tuttavia, per quanto abbiamo visto a riguardo degli effetti sulla salute, più recentemente è diventato chiaro come la maggiore pericolosità per l'uomo sia data dai $PM_{2,5}$ e PM_1 .

Nel 2006 l'Organizzazione Mondiale della Sanità, riconoscendo la correlazione tra finezza delle particelle ed aumento delle malattie cardiovascolari, ha promosso come indicatore aggiuntivo il $PM_{2,5}$,

abbassando i livelli di concentrazione massimi rispettivamente a 10 e 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per $\text{PM}_{2,5}$ e PM_{10} . Conseguentemente, nell'aprile 2008 l'Unione Europea ha varato la normativa 2008/50/CE che recepisce come nuovo indicatore anche il $\text{PM}_{2,5}$; con il D.Lgs 155/2010 anche la normativa italiana si è adeguata ad i nuovi standard, abrogando numerosi dei precedenti decreti.

Purtroppo limiti di legge particolarmente restrittivi non possono ancora essere applicati, poiché come abbiamo visto le attuali strumentazioni non sono in grado di misurare tutte le emissioni. Le tecnologie necessarie per la misurazione delle polveri inferiori ai $\text{PM}_{2,5}$ sono molto costose, scarsamente disponibili e poco pratiche da impiegare: sarebbe praticamente impossibile eseguire le verifiche prestazionali necessarie per far rispettare le leggi.

Tabella 57 – Valori limite di concentrazione di PM_{10} nell'aria. (Fonte: DM 60/2002).

Valore massimo per la media annuale	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Valore massimo giornaliero	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
N° massimo di superamenti consentiti in un anno	35

Tabella 58 – Valori limite di concentrazione di $\text{PM}_{2,5}$ nell'aria. (Fonte: 2008/50/CE).

Valore Limite	Margine Di Tolleranza	Data di Raggiungimento
25 $\mu\text{G}/\text{M}^3$	20 % all'11/06/08, con riduzione il primo giorno di gennaio successivo e successivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale annua costante fino a raggiungere lo 0 % entro il 01/01/15.	01/01/15
20 $\mu\text{G}/\text{M}^3$		01/01/20

12.3 PROCESSO FOTOCATALITICO

Le soluzioni per ridurre la quantità dei VOC nell'aria esterna od interna degli ambienti costruiti sono molteplici ed ognuna presenta i propri vantaggi e svantaggi. Nell'ambito di questo studio, ci focalizzeremo su due soluzioni in particolare: la fotocatalisi, applicabile alle pareti ventilate, e l'adsorbimento o purificazione botanica, tipica dei vegetali e quindi dei VGS.

Techniques	Principle	By-Product	Advantage	Disadvantage
Botanical purification	Air is passed through a planted soil or directly on the plants. The contaminants are then degraded by microorganisms and/or plants, the precise mechanisms being unclear.	CO ₂ , organic and amino acids	Low cost, no secondary pollution, beautifying the indoor environment	The purification effect is bad for high concentration pollutants
Catalytic combustion	Combustion of VOCs at low temperature with the help of a catalyst.	CO ₂ , H ₂ O	Wide range of application coverage, high efficiency, no secondary pollution	Not suitable for gas containing dust particles and droplets
Bio-filtration	Bio-filtration is a process in which contaminated air is passed through a biological stuffing medium that supports many kinds of microorganisms that biodegrade the VOCs.	Biomass	Little or no energy needs to be added in the form of heat or radiation to support this process	The equipment is big, long residence time, easy to jam
Absorption	Absorption is used to remove VOCs from gas streams by contacting the contaminated air with a liquid solvent.	Wastewater	Product recovery can offset annual operating costs	High demands on absorbent, complex process, high cost
Zeolite based adsorption	Air pollutants are adsorbed onto zeolites, often as filtration post-treatment.	Spent zeolite and collected organics	Effective in more than 90% RH as the adsorbent might be too specific	Pollutant reemission
Activated carbon based adsorption	VOCs are removed from the inlet air by physical adsorption onto the surface of the carbon.	Spent carbon and collected organics	Recovery of compounds, which may offset annual operating costs	They are flammable, difficult to regenerate for high boiling solvents, promote polymerization or oxidation of some solvents to toxic or insoluble compounds, and require humidity control.
Membrane Separation	Pollutants are passed through a membrane into another fluid by affinity separation.	Exhausted membrane	No further treatment, simple process, small energy consumption, no secondary pollution	The stability of the membrane was poor

Figura 74 - Riepilogo delle attuali tecniche di controllo per la rimozione dei VOC (Huang, et al., 2016).

12.3.1 La fotocatalisi

Negli ultimi decenni, la fotocatalisi eterogenea con l'uso di ossidi come TiO_2 , ZnO e WO_3 , attivati dalla luce UV, ha riscontrato molto interesse, in particolare per la rimozione di composti organici e inorganici dai gas e dai sistemi acquosi.

“La fotocatalisi è un metodo catalitico applicato a reazioni fotochimiche, condotto mediante l'ausilio di un catalizzatore che esplica la propria azione quando irradiato con luce di opportuna lunghezza d'onda” (Wikipedia, 2015).

Un processo di catalisi è un fenomeno per cui una sostanza, solo grazie alla propria presenza, è in grado di rendere possibile una reazione chimica e ne modifica la velocità, pur rimanendo inalterata³². Quando i reagenti vengono in contatto con la superficie del catalizzatore, essi vengono adsorbiti, distribuendosi su di essa; successivamente si verificano sulla superficie del catalizzatore delle reazioni di dissociazione delle molecole dei reagenti in atomi e di reazioni tra reagenti. In seguito, i risultati delle reazioni vengono desorbiti dal catalizzatore che si prepara così ad adsorbire nuovi reagenti.

Sono dunque presenti in natura alcune sostanze, dette catalizzatori, che sono in grado di interagire con determinati corpi provocandone la decomposizione e dando così forma a nuovi composti, nella costituzione dei quali, però, essi non sono inclusi. I catalizzatori inducono quindi il fenomeno di catalisi e ne incrementano la velocità, senza però sacrificarsi nel processo.

³² La fotosintesi clorofilliana rappresenta uno dei più importanti ed emblematici fenomeni di catalisi presenti in natura.

Esistono due tipologie principali di catalisi: omogenea ed eterogenea. Si parla di catalisi omogenea quando sia il catalizzatore che i reagenti si trovano nella medesima fase; al contrario, in un processo di catalisi eterogenea, il catalizzatore si trova in una fase differente dai reagenti: ad esempio il catalizzatore può trovarsi in fase solida mentre i reagenti possono trovarsi in fase gassosa.

La radiazione solare, incidendo sulla superficie degli atomi che compongono la materia, li carica di energia supplementare³³ portandoli dallo stato energetico fondamentale ad uno stato elettronicamente eccitato. Una volta guadagnata, questa energia supplementare tende ad essere impiegata immediatamente, attivando specifici processi e reazioni. Detto in un'altra maniera, l'assorbimento di fotoni di luce crea un surplus di energia nelle molecole (stato elettronicamente eccitato) permettendogli dunque di dissiparla tramite una reazione di disattivazione, creando così i vari prodotti della reazione fotochimica (Hoffmann, Scot, Choi, & Bahnemannt, 1995).

Se la radiazione solare è dunque responsabile dei processi fotochimici presenti in natura, è purtroppo anche responsabile della formazione del cosiddetto smog fotochimico. Gli ossidi di azoto NO_x ed i composti organici volatili VOC emessi in atmosfera, da fonti naturali e antropogeniche subiscono una serie di reazioni fotochimiche indotte dalla componente ultravioletta dei raggi solari, rilasciando in atmosfera ulteriori sostanze inquinanti.

³³ Atomi e molecole possiedono determinati stati energetici detti stati fondamentali che dipendono dall'energia degli orbitali in cui si trovano i loro elettroni.

Tuttavia i processi fotochimici naturali possono essere ricreati artificialmente in modo tale da scomporre le molecole di sostanze inquinanti presenti nell'aria e ricomporle in molecole di sostanze utili, in modo da compensare le emissioni inquinanti, ristabilendo il giusto equilibrio dei componenti in atmosfera.

Esiste una molteplicità di materiali che posseggono proprietà di fotocatalisi, come per esempio alcuni ossidi metallici (TiO_2), alcune strutture metallo-organiche (MOF), i plasmonici³⁴ ed alcuni ibridi per applicazioni nella scissione dell'acqua, la riduzione di CO_2 e la rimozione degli inquinanti ambientali dall'atmosfera. Tra questi, il TiO_2 è stato ampiamente studiato per la fotocatalisi nella rimozione di inquinanti ambientali, l'evoluzione di H_2 e la riduzione della CO_2 (Shen, Kronawitter, & Kiriakidis, 2017).

12.3.2 Il biossido di Titanio, TiO_2

Il Titanio è un elemento dalle caratteristiche molto particolari: è un metallo molto resistente alla corrosione che non può essere intaccato né dall'acqua, né dall'acido nitrico; è molto resistente, malleabile e duttile.

La sua alta capacità di resistenza alla corrosione è dovuta principalmente alla formazione di un sottile strato di biossido di Titanio TiO_2 , resistente ed altamente protettivo, in grado di rigenerarsi immediatamente quando consumato o scalfito, qualora si trovi in presenza di acqua o di aria.

Le particolari caratteristiche del biossido di titanio lo rendono utile per diverse applicazioni, tra le quali l'impiego come pigmento bianco e

opacizzante per la produzione di pitture e come fotocatalizzatore, in quanto, essendo un semiconduttore, può essere chimicamente attivato dall'energia luminosa (Van Driel, Kooyman, Van den Berg, Schmidt-Ott, & Dik, 2016).

Le proprietà fotocatalitiche del biossido di Titanio lo rendono un materiale particolarmente utile per la purificazione dei fluidi, ideale per applicazioni sanitarie grazie alle sue proprietà disinfettanti, anti-appannamento e autopulenti.

Il biossido di Titanio si costituisce dunque come fotocatalizzatore di processi di riduzione e ossidazione. Le sue notevoli capacità gli conferiscono anche proprietà di degradazione e idrofilia, ossia lo rendono contemporaneamente in grado di degradare per ossidazione numerosi composti e sviluppare un'elevata affinità con le particelle acquose.

Quando il TiO_2 viene sottoposto a radiazioni luminose ultraviolette, reagisce con il vapore acqueo e l'ossigeno, formando ossigeno attivo e gruppi ossidrilici. L'ossigeno attivo ha la capacità di ossidare e decomporre sia sostanze gassose, che materiale organico e addirittura i batteri. Questa potente proprietà degradativa può dunque essere applicata per purificare aria e acqua. Il processo di decomposizione porta alla formazione e dispersione di CO_2 e H_2O mentre i prodotti decomposti si depositano sulla superficie e possono essere lavati via. La produzione di gruppi ossidrilici da parte dell'attività fotocatalitica permette al biossido di Titanio di raggiungere una elevata idrofilia, per cui l'acqua scorre sulla superficie del materiale formando un velo uniforme e donandogli le proprietà autopulenti già citate.

³⁴ La Risonanza Plasmonica di superficie è il nome dato al fenomeno di eccitazione del plasmone di superficie per mezzo della luce (Wikipedia, 2018).

svolge un ruolo significativo nel processo di fotodegradazione. In assenza di vapore acqueo, la foto-degradazione dei VOC può essere seriamente ritardata poiché la mineralizzazione non potrebbe verificarsi completamente. L'umidità relativa è dunque un altro fattore importantissimo.

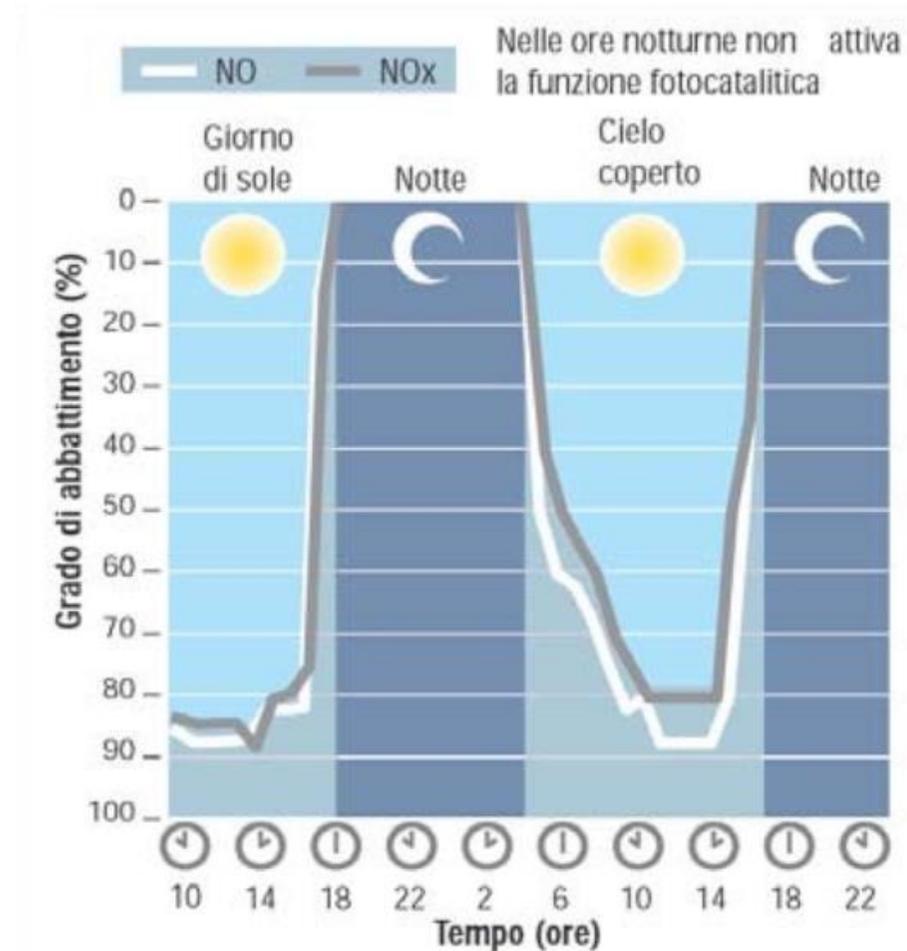


Figura 76 - Prestazione fotocatalitica di abbattimento inquinanti durante una giornata tipo (www.caspanisrl.it).

La durata di un fotocatalizzatore è un altro parametro fondamentale per l'applicazione reale nella rimozione di sostanze inquinanti e dovrebbe includere i processi di disattivazione, rigenerazione, riattivazione o sostituzione. L'attività fotocatalitica eterogenea solido-gas diminuisce con il tempo mentre il numero di siti attivi efficaci sulla superficie del catalizzatore diminuisce di pari passo. La disattivazione avviene quindi a causa dell'accumulo di sostanze intermedie parzialmente ossidate che occupano i siti attivi sulla superficie del fotocatalizzatore. La velocità di ossidazione iniziale è proporzionale alla superficie effettiva del catalizzatore, pertanto, se la superficie del catalizzatore viene occupata da sostanze parzialmente ossidate, la sua prestazione diminuirà proporzionalmente. Quando questo avviene, per il recupero dell'attività fotocatalitica sarà necessario applicare una tecnica di rigenerazione attraverso un trattamento termico che attualmente richiede l'utilizzo di una fornace e pertanto non è realizzabile in situ (Huang, et al., 2016).

12.4 ASSORBIMENTO INQUINANTI DI UNA PARETE VENTILATA

12.4.1 Materiali assorbenti non fotocatalitici

I normali materiali e componenti di una parete ventilata non presentano generalmente particolari proprietà di assorbimento di sostanze inquinanti. Gli unici componenti che talvolta possono fare eccezione sono alcuni materiali isolanti, come per esempio la lana di pecora.

Questo tipo di fibra animale è infatti in grado di neutralizzare i gas tossici NOx e SOx nonché la Formaldeide. Per ottenere questo effetto è sufficiente che il progettista preveda una seppur minima porosità ed

interscambio di aria, cosa che avviene per esempio in presenza di una camera di ventilazione, come nel caso delle pareti ventilate.

La potenzialità di assorbimento è di circa 13 grammi per kg di pannello di lana per la Formaldeide ed in misura leggermente inferiore per NOx e SOx.

Nonostante non si tratti di un processo fotocatalitico, le sostanze assorbite non diventano un deposito tossico all'interno dei pannelli, ma vengono trasformate in sostanze neutre che ne rafforzano le fibre.

Si tratta tuttavia di una soluzione rivolta più alla depurazione dell'aria indoor, inquinata normalmente da sostanze provenienti dalle esalazioni del traffico, delle caldaie, delle sigarette, dei fornelli e da alcune vernici, resine e colle, che non all'inquinamento outdoor, su cui invece vuole concentrarsi questo studio.

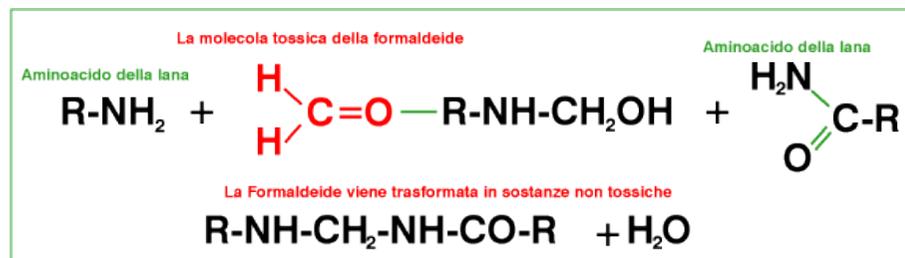


Figura 77 – Processo di trasformazione della formaldeide. (Isolantelanadipecora.it).

12.4.2 Materiali fotocatalitici

Nel settore edilizio, la necessità di materiali fotocatalitici sta crescendo di pari passo con la consapevolezza dei pericoli legati all'inquinamento dell'aria, sia degli ambienti esterni che interni degli edifici.

Il fotocatalizzatore più usato al momento in edilizia è dunque il biossido di Titanio, sotto forma di Anatasio, vista la sua grande reattività alla radiazione luminosa nei campi del visibile e dell'UV.

Poichè per attivare efficacemente i processi fotocatalitici risulta di vitale importanza la natura dell'interfaccia tra catalizzatore e reagenti, le proprietà fotocatalitiche dei componenti edilizi dovranno essere sviluppate prevalentemente sulle loro zone superficiali per le quali sarà previsto il contatto diretto con i reagenti.

Tra le principali categorie di prodotti per l'edilizia trattati con tecnologia fotocatalitica possiamo analizzare i vetri, i materiali leganti ed i rivestimenti.

Vetri fotocatalitici – Per quanto riguarda il settore della produzione di vetri, le due proprietà più interessanti della fotocatalisi sono l'idrofilia e la proprietà ossidativa. I vetri vengono realizzati depositando un sottile film di biossido di Titanio sulla superficie vetrata che permette di ottenere superfici autopulenti e antiappannanti con elevate prestazioni di trasparenza e permeabilità alla luce. Purtroppo non apportano benefici rilevanti in termini di assorbimento di sostanze inquinanti e pertanto non sono rilevanti in questo contesto.

Cementi fotocatalitici – I materiali cementizi fotocatalitici contengono a loro volta biossido di Titanio e quando irradiati dalla giusta luce, acquistano capacità ossidative delle sostanze con cui vengono a contatto. Contemporaneamente, assumono anche caratteristiche autopulenti che gli permettono di mantenere nel tempo il proprio valore estetico. La presenza di ossidi alcalini nella miscela cementizia amplifica la capacità del materiale di attirare e trattenere le sostanze da ossidare, facilitando il processo catalitico. Nonostante le caratteristiche interessanti, i cementi non sono i materiali più

comunemente utilizzati nei rivestimenti esterni di facciate ventilate e pertanto non li consideriamo come indicativi in questa sede.

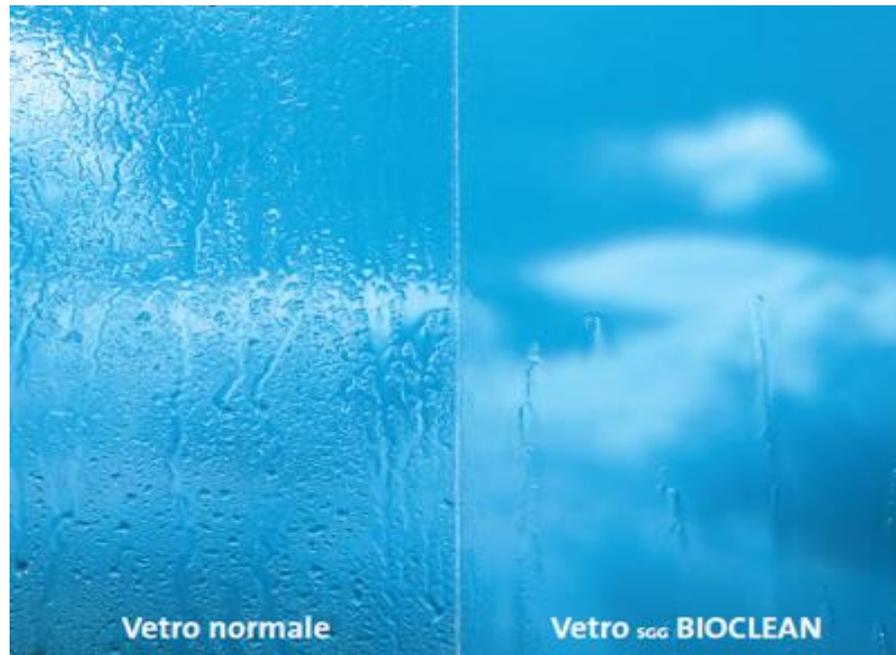


Figura 78 – Comparazione di prestazioni tra un vetro normale ed un vetro fotocatalitico. (lafinfissi.it).

Agenti di rivestimento fotocatalitici – Si tratta di film sottili o soluzioni liquide di fotocatalizzatore, costituiti sempre da biossido di Titanio, che possono aderire in modo omogeneo sulla superficie di una vasta gamma di materiali per l'edilizia. Vengono generalmente applicati alle superfici designate durante il processo di posa in opera delle stesse.

12.4.3 La parete ventilata fotocatalitica

Per quanto concerne la progettazione di pareti ventilate fotocatalitiche, possiamo quindi prendere in considerazione la

possibilità di impiegare i materiali al biossido di Titanio attualmente disponibili sul mercato.

Escludendo dall'equazione i vetri, che non sono mai stati oggetto di questa trattazione, ed i cementi che sono pensati per altri utilizzi, la soluzione più interessante risiede nei già citati agenti di rivestimento fotocatalitici, in particolare le pitture. Questi prodotti presentano le stesse caratteristiche delle normali pitture, ma con l'aggiunta di proprietà fotocatalitiche che le rendono in grado, tra le altre cose, di trasformare le sostanze inquinanti presenti nell'aria in residui innocui.

Il CNR, in una relazione tecnica del 2003, stima che una superficie fotocatalitica di un m² sarebbe in grado di “depurare al 90% un metro cubo di aria in 45 secondi” (CNR, 2003). Per rendere il quadro più chiaro ci fornisce anche altri parametri di comparazione: “Oppure, 1 Km² di superficie attiva potrebbe rimuovere dall'atmosfera ben 32 tonnellate di inquinante per anno.” (CNR, 2003).

E ancora continua sottolineando che “Si tratta di una potenza depurativa molto significativa, sotteso che nel corso di un'ora tale depurazione può essere estesa a $3600/45 = 80 \text{ m}^3$, ossia un metro quadrato di superficie attiva rimuove il 90% dell'inquinamento contenuto in 80 m^3 di aria in appena 1 ora.” (CNR, 2003).

La conclusione finale del Centro di Ricerca è che: “...appare evidente che la disponibilità di superfici con fotocatalizzatori potrebbe determinare condizioni particolarmente favorevoli alla rimozione degli ossidi di azoto fino a livelli compatibili con gli standard di qualità dell'aria.” (CNR, 2003).

Da queste considerazioni possiamo quindi dedurre che una parete ventilata qualsiasi, al netto dei materiali utilizzati per la stratigrafia, grazie all'applicazione di una pittura fotocatalitica sul rivestimento

esterno, acquisirà un potere di abbattimento delle sostanze inquinanti molto elevato: un metro quadro di superficie attiva può arrivare a rimuovere il 90% dell'inquinamento contenuto in 80 m³ di aria in un'ora.

Tabella 59 - Efficienza di conversione di vari tipi di fotocatalizzatori (Huang, et al., 2016).

Catalyst	Preparation Method	HCHO Concentration	Light Source	Conversion Efficiency
Mesoporous TiO ₂	Evaporation-induced self-assembly	30 ppm	UV light	95.8%
Amorphous TiO ₂ film	CVD method	50-55 ppm	UV light	80%
PEG modified TiO ₂ film	Sol-gel method	20 ppm	UV light	95%
TiO ₂ coating on polyester fiber	Spray coating	24.6 ± 2.8 ppm	UV light	90%
UV/TiO ₂ /O ₃	Sol-gel	18 ppm	UV light	79.4%
Ag/TiO ₂	Incipient wet impregnation	500 ppm	UV light	Above 95%
Pt@TiO ₂	Reverse micelle sol-gel	10 ppm	Vis light	98.3%
Ce/TiO ₂	Sol-gel	1 ppb	UV light	Above 70%
Pd-TiO ₂ film	Sol-gel dip coating	500 ppb	UV light	Above 95%
Acrylic-silicon/nano-TiO ₂	Emulsion blend	0.8 ppm	Vis light	83.4%
N-doped TiO ₂ film	Precipitation-peptization	0.24 ppm	Vis light	90%
AC loading TiO ₂	Microwave-assisted synthetic	30 ppm	UV light	58.68%
Pt@SnO ₂	Sol-gel method	—	Vis light	93.2%
α-Bi ₂ O ₃	Calcination of hydrothermally prepared (BiO) ₂ CO ₃	100 ppm	Vis light	62.5%
Nano-ZnO	Mixing-calcination	2.5-25 ppb	UV light	73%
Zr _{0.08} Ti _{0.92} O ₂	Sol-gel method	0.08 ppb	UV-vis light	92%
Zn ₂ SnO ₄	Hydrothermal method	2 ppm	UV-vis light	70%

12.5 ASSORBIMENTO INQUINANTI DEL SISTEMA GRE_EN_S

Anche per quanto riguarda il sistema GRE_EN_S, l'assorbimento inquinanti è una caratteristica che viene delegata ad un elemento del sistema in particolare: la vegetazione. Come abbiamo visto in precedenza, la qualità dell'aria negli ambienti urbani rappresenta una preoccupazione crescente negli ultimi anni e la capacità dei VGS di assorbire o emettere sostanze inquinanti è certamente rilevante non

solo ai fini di questo studio, ma anche in ottica di possibili sviluppi futuri della tecnologia.

12.5.1 Capacità dei vegetali di assorbire inquinanti

Il miglioramento della qualità dell'aria per azione delle piante è principalmente dovuto alla capacità delle loro foglie di trattenere le polveri sottili, i PM_x, e assorbire gli inquinanti gassosi, quali i biossidi di Carbonio, gli ossidi di Azoto ed i biossidi di Zolfo (Miyawaki, 1998). Quando le particelle e le molecole di gas passano vicino a una superficie trasportate dall'aria possono infatti depositarsi sulla stessa. La maggior parte delle piante presenta una grande superficie per unità di volume, aumentando la probabilità che le particelle possano depositarsi, rispetto alle superfici lisce e lavorate normalmente presenti in gran quantità nelle aree urbane.

La dinamica della deposizione³⁵ delle particelle dipende molto anche dalla dimensione delle stesse: le particelle ultrafini, di diametro minore di 0,1 mm, presentano un comportamento simile alle molecole di gas, depositandosi per diffusione, mentre le particelle di diametro tra 1 e 10 mm colpiscono le superfici che si oppongono ai flussi d'aria. Infine, le particelle di diametro maggiore a 10 mm possono cadere a terra per sedimentazione (Hinds, 2012).

Anche i flussi di movimento dell'aria hanno un effetto sulla dispersione di queste particelle nell'ambiente. Nel contesto urbano, il modello che per semplicità si studia più frequentemente in merito ai flussi d'aria è il cosiddetto "Street Canyon", nel quale il vento soffia ad altezza tetto in direzione perpendicolare alla direzione della strada, formando così un vortice discensionale da darà origine ad un altro flusso che si

³⁵ Con il termine "deposizione" ci riferiamo al movimento di una particella solida all'interno di un fluido, da un punto nel fluido (aria) ad una superficie.

muoverà in direzione opposta al precedente. Quando la direzione del vento risulta invece parallela al canyon della strada, questo viene incanalato lungo l'asse stradale. Le altre direzioni del vento sono considerate combinazioni di venti paralleli e perpendicolari. È importante sottolineare come la morfologia degli edifici e la presenza di vegetazione influenzino il reale movimento dei flussi. In questi due casi, la vegetazione presente nel canyon stradale può avere effetti diversi sulla dispersione.

La velocità di deposizione dipende da vari fattori. Per esempio, le superfici umide presentano una maggiore velocità di deposizione rispetto alle superfici secche. Anche la dimensione delle particelle influenza la velocità a cui si depositano sulle superfici: per particelle con diametro inferiore al μm , a mano a mano che il loro diametro diminuisce tendono a depositarsi con una velocità minore. (Petroff, Mailliat, Amielh, & Anselmet, 2008).

La quantità di materiale depositato per unità di superficie e tempo è spesso calcolata utilizzando l'equazione:

$$\text{Quantità depositata (g/m}^2\text{)} = \text{LAI} \times v_d \times C \times t$$

dove LAI è il "Leaf Area Index" (l'indice di area fogliare), cioè la quantità di superficie vegetale per m^2 di superficie terrestre; v_d è la velocità di deposizione, C è la concentrazione dell'inquinante nell'aria e t è il tempo.

Grazie ai flussi di movimento dell'aria, le particelle aerodisperse tendono dunque a depositarsi sulla superficie delle piante con cui entrano in contatto, cosa che le converte in un mezzo assai efficiente per quanto riguarda l'assorbimento inquinanti.

Lo studio "Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls" (Ottel , Van Bohemen, & Fraaij, 2010) aveva come obiettivo lo sviluppo di tecniche di misura della deposizione dei particolati sulle foglie in determinate condizioni ed ambienti. Ottel  et al. analizzano la deposizione di particolato su foglie di Hedera Helix (edera comune) prelevate da due contesti differenti: una barriera acustica installata a lato di una strada trafficata ed il tronco di un albero all'interno di un bosco fuori citt  (Olanda). Lo studio prende in considerazione diversi parametri che potrebbero influenzare la capacit  di assorbimento delle foglie: l'ambiente circostante (urbano o rurale), l'altezza delle foglie dal suolo, la differenza tra superficie superiore o inferiore della foglia, le differenze climatiche tra un giorno e l'altro della stessa stagione. I risultati del conteggio mostrano come le particelle di diametro maggiore ai $10\mu\text{m}$ contate sulle foglie risultano piuttosto rare rispetto alle particelle di diametro inferiore ai $10\mu\text{m}$. Contemporaneamente, la quantit  di particelle contata sui vari campioni ha permesso a Ottel  et al. di osservare diversi fenomeni:

1. La quantit  di particelle depositate sulle foglie aumenta in maniera direttamente proporzionale alla proximit  della sorgente (le foglie raccolte a lato strada presentano un conteggio largamente superiore a quello delle foglie prelevate nel bosco).
2. La superficie superiore delle foglie cattura una quantit  maggiore di particelle rispetto alla superficie inferiore, probabilmente perch  maggiormente esposta ai flussi d'aria (si riscontra sulla superficie superiore una quantit  doppia rispetto alla superficie inferiore).

- Il conteggio effettuato in giorni diversi della stessa stagione presenta differenze minime, pertanto la data non è stata considerata come un parametro influente (anche se una differenza di temperatura importante può agire sui flussi d'aria e di conseguenza probabilmente anche sulla deposizione delle particelle).
- Si è contata una gran quantità di particolato ultra sottile depositato sulle foglie.

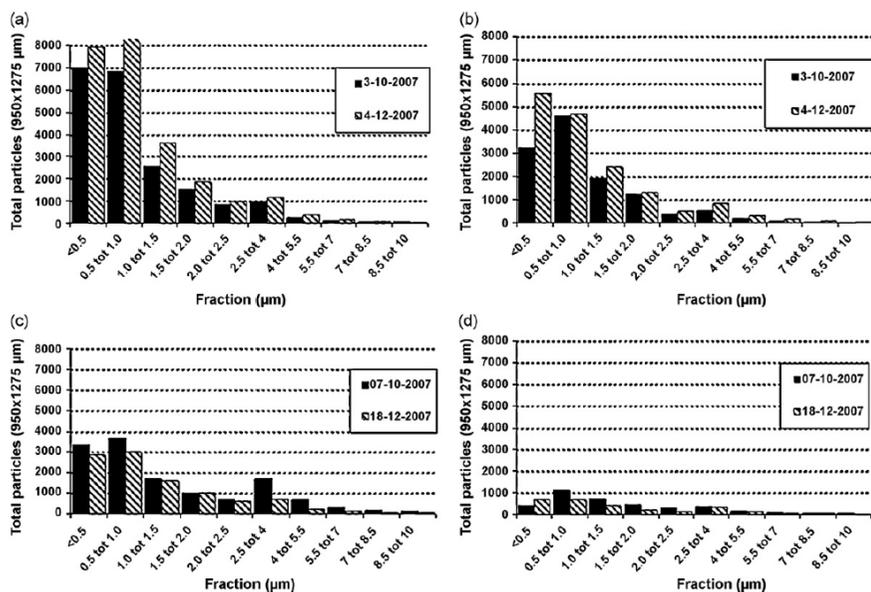


Figura 79 - Distribuzione media delle dimensioni totali delle particelle sul lato superiore (a) e (b) inferiore delle foglie vicino a una strada trafficata, e la media totale del lato superiore (c) e (d) inferiore delle foglie nel bosco (Ottel , Van Bohemen, & Fraaij, 2010).

Pertanto, quando la vegetazione viene posizionata in prossimit  di una fonte di emissione pu  essere vista come un filtro di particelle, ma pu  anche essere utilizzata per abbassare la concentrazione di fondo delle

sostanze inquinanti (nel caso di un VGS, quando per esempio si trova ad una altezza elevata dalla strada).

Tuttavia una volta che le particelle sono depositate sulle foglie, queste non resteranno l  per sempre. Nowak et al. stimano che in periodi particolarmente secchi e ventosi possa verificarsi che una parte (fino al 50%) di queste tornino in sospensione (Nowak, Mcpherson, & Rowntree, 1994). A pari modo pu  accadere anche che le particelle vengano lavate via dalla pioggia o dall'irrigazione: in questo caso le particelle vengono lavate via, generalmente cadendo al suolo, dove vengono riassorbite. Al momento non vi   prova che in seguito alla pioggia le particelle possano tornare in sospensione.

Ottel  et al. concludono stimando che per la strada la quantit  totale di particelle (considerando lato superiore e inferiore) sia di circa $1,47 \times 10^{10}$ particelle per m^2 di area fogliare.

Dovrebbe ormai essere chiaro per il lettore che, per quanto sia stato ampiamente provato, l'assorbimento inquinanti da parte della vegetazione   un fenomeno estremamente complesso e variabile che dipende da moltissimi fattori.

Ad ogni modo, semplificando di molto la questione, possiamo affermare che a parit  di condizioni al contorno, la prestazione di una specie vegetale in termini di assorbimento inquinanti dipender  fondamentalmente dalla sua densit  fogliare, ossia dal suo valore specifico di LAI.

12.5.2 Capacit  di assorbimento inquinanti di un VGS.

Per quanto concerne i VGS, esattamente come per la vegetazione urbana "classica", sono diversi i parametri da prendere in considerazione. In primo luogo, come dedotto dall'analisi sul

rendimento della vegetazione, dobbiamo considerare l'area del fogliame, che possiamo misurare come visto attraverso il LAI. Nel caso di un VGS, è probabile che sia composto da diverse specie vegetali, per cui bisogna considerare il LAI per ogni specie distinta e calcolare il suo valore ponderato per m² di superficie di parete.

In generale, un valore di LAI alto si riferisce a specie vegetali con superfici ampie per l'assorbimento degli inquinanti e l'utilizzo di specie sempreverdi garantirà prestazioni simili sia in inverno che in estate.

A seconda del loro valore di LAI, e non solo, differenti specie di piante presentano prestazioni di cattura dei PM_x distinte. Per esempio, la capacità di assorbimento delle foglie dipende dalla loro morfologia, sia a livello macro che micro. Foglie che presentano micromorfologie differenti, come la cuticola spessa, le cere cuticole o i peli, si sono dimostrate molto efficaci nella ritenzione dei PM_{2.5}.

Possiamo dire che la morfologia, il LAI, la porosità e densità del fogliame (Leaf Area Density, LAD) possono influenzare la deposizione e la dispersione dei PM_x, giocando un ruolo fondamentale in merito alla qualità dell'aria.

Un altro parametro importante è la capacità di una pianta di vivere in un determinato ambiente. Questo determinerà ovviamente la salute della stessa e pertanto inciderà sui suoi parametri di LAI e LAD.

Tuttavia bisogna peraltro considerare anche che gli inquinanti possono danneggiare la morfologia delle piante, nonché la loro fisiologia e biochimica: a seconda della situazione, i PM_x potrebbero essere assorbiti sulla superficie delle foglie o incluso all'interno dell'apparato fotosintetico, danneggiando in entrambi i casi la capacità della pianta di operare la fotosintesi. Allo stesso modo i gas inquinanti possono

accedere all'interno delle foglie attraverso i flussi stomatici e danneggiare gli scambi gassosi delle foglie.

Come abbiamo accennato, anche la dinamica dei flussi aerei può avere un effetto importante sulla concentrazione di inquinanti nell'aria. Alcuni studi sottolineano come le diffuse soluzioni naturali (per esempio gli alberi a lato strada tipici dei viali) potrebbero non solo essere inefficaci ma addirittura dannosi da un punto di vista di qualità dell'aria, aumentando la concentrazione locale dei VOC (Vos, Maiheu, Vankerkom, & Janssen, 2013). Per queste ragioni è necessario mantenere estrema attenzione al momento di pianificare il verde urbano.

Tabella 60 - Principali fattori di influenza nella prestazione di riduzione degli inquinanti di un VGS (Perini & Perez, *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability*, 2018).

	Tipo di VGS	Specie della Pianta	Luogo, Stagione, Clima	Mitigazione degli Inquinanti
Morfologia micro e macro della foglia		x		PM _x
Superficie della foglia	x	x		PM _x e gas
Densità del fogliame	x	x		PM _x e gas
Salute della pianta	x	x	x	PM _x e gas
Struttura e dimensione del vgs e del canyon			x	PM _x e gas

Al contrario, in termini di assorbimento inquinanti, i VGS posseggono caratteristiche uniche rispetto non solo ad altre tecnologie (come ad esempio i tetti verdi) ma anche alle soluzioni naturali: un VGS può portare un piccolo arbusto ad altezze che difficilmente raggiungerebbe in natura, ossia avere caratteristiche geometriche uniche. Per questo motivo, i VGS sono potenzialmente in grado di apportare benefici non solo dal punto di vista dell'inquinamento dell'aria ma anche del cambiamento climatico.

Perini riesce a dimostrare e quantificare la differenza di prestazione nell'assorbimento inquinanti di diverse piante, applicando la metodologia già utilizzata in precedenza da Ottelè (Figura 80).

I risultati del conteggio sottolineano l'importanza di una corretta selezione delle piante al momento della progettazione del VGS. Allo stesso tempo, si può notare come la possibilità di affiancare piante di caratteristiche diverse possa permettere al VGS di garantire prestazioni maggiori di assorbimento inquinanti, in quanto le differenti specie possono ritenere spettri distinti di inquinanti, complementandosi tra loro. In quest'ottica non bisogna perdere di vista il fatto che la scelta di specie vegetali sbagliate potrebbe non solo ridurre la prestazione ma incluso peggiorare la situazione iniziale.

Concludendo, i VGS possono offrire prestazioni importanti nel miglioramento della qualità dell'aria, agendo sulla concentrazione dei gas inquinanti e dei PM_x.

La selezione delle specie vegetali corrette (alto tasso di deposizione, bassa allergenicità, bassi costi di manutenzione e adattamento al clima) è una fase fondamentale del processo di progettazione, affinché queste possano operare da naturali filtri dell'aria.

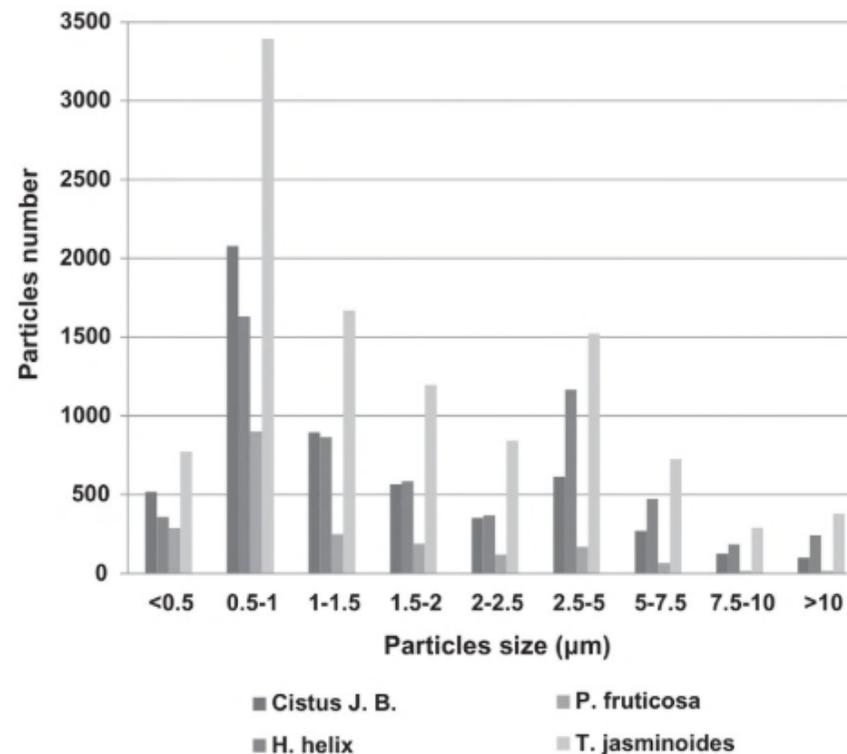


Figura 80 - Numero e dimensione media di particelle depositate per mm² per diverse specie di piante (Perini, Ottelè, Giulini, Magliocco, & Roccotiello, 2017).

12.5.3 Capacità di assorbimento del sistema GRE_EN_S

Insieme agli altri parametri sinora analizzati, lo sviluppo del sistema GRE_EN_S ha previsto anche l'analisi delle prestazioni di diluizione dei contaminanti presenti nell'aria. Il primo passo dell'analisi è stato la selezione dei parametri di riferimento. Come commentato in precedenza il parametro fondamentale è il Leaf Area Index, LAI, che pertanto è stato selezionato anche in questo caso. Nello studio, il valore si riferisca all'indice di area fogliare riferita a ciascun modulo m

del sistema. Al fine di poter determinare in maniera più precisa i possibili scenari prestazionali, si sono misurati i valori delle sei piante selezionate per formare le varie combinazioni specie-substrato previste per le celle.

La formula di riferimento utilizzata per il calcolo del LAI del sistema GRE_EN_S è stata dunque la seguente:

$$LAI_m = \frac{LA_m}{A_m}$$

in cui LA_m rappresenta l'area fogliare totale (mm^2) delle sei piante che crescono in un modulo e A_m è l'area del modulo stesso (mm^2).

Per procedere al calcolo manuale del valore di LAI_m si è proceduto alla rimozione di tutte le foglie da ciascuna delle piante presenti in un singolo modulo. In seguito si è selezionato il 50% del peso in foglie, lo si è posizionato tra due supporti in vetro e scansionato con uno scanner. L'immagine prodotta ha permesso il calcolo di parametri come n° di foglie, la superficie, ecc.



Figura 81 - Supporti in vetro per la scansione delle foglie. Procedura di calcolo del LAI_m .

Come abbiamo visto già in precedenza esistono vari parametri che possono influenzare la crescita delle piante e delle foglie. Nel caso del sistema GRE_EN_S uno di questi è certamente la composizione del substrato. In particolare, si è riscontrato come la presenza dei feltrini accresca il numero delle foglie prodotte dalla Lonicera mentre nel caso della Bergenia questo stesso parametro influisce sulla crescita dell'area fogliare e dunque del valore di LAI_m del pannello dove viene installata.

Tabella 61 - Effetto dei tre substrati (SS, SF50 e SF50B) sulle foglie di *Lonicera nitida* L. e *Bergenia cordifolia* L. $L(n)$ indica il numero di foglie mentre LA è l'area fogliare media per pianta.

	LONICERA NITIDA L.			BERGENIA CORDIFOLIA L.		
	L (n)	LA (mm^2)	LAI_m	L (n)	LA (mm^2)	LAI_m
SS	576,00	156,66	2,73	22,33	2.325,44	9,04
SF50	786,67	166,44	3,97	23,33	13.000,77	9,90
SF50B	761,33	174,93	3,95	24,33	15.614,65	12,76

Una volta definito il metodo di calcolo del parametro base (LAI_m) il gruppo di sviluppo è passato all'analisi dei benefici in termini di abbattimento inquinanti in ambiente confinato, analizzando la concentrazione dei VOC risultante dall'applicazione del sistema GRE_EN_S.

Le attività di ricerca indirizzate alla misurazione delle prestazioni di abbattimento dei VOC del sistema GRE_EN_S si sono sviluppate attraverso tre assi di lavoro. Da una parte si sono realizzate prove in laboratorio in cella di prova, al fine di determinare le prestazioni dei singoli moduli nell'abbattimento dei VOC. Un altro flusso di lavoro è stato costituito dalle prove sul modulo insediativo realizzato per i test, con il fine di misurare la riduzione dei VOC in ambiente confinato per

la sola presenza del sistema parete. Il terzo canale è rappresentato dalle prove sperimentali in ambiente confinato, atte a determinare quale sia la superficie di parete verde minima per raggiungere un determinato obiettivo di abbattimento dei VOC.

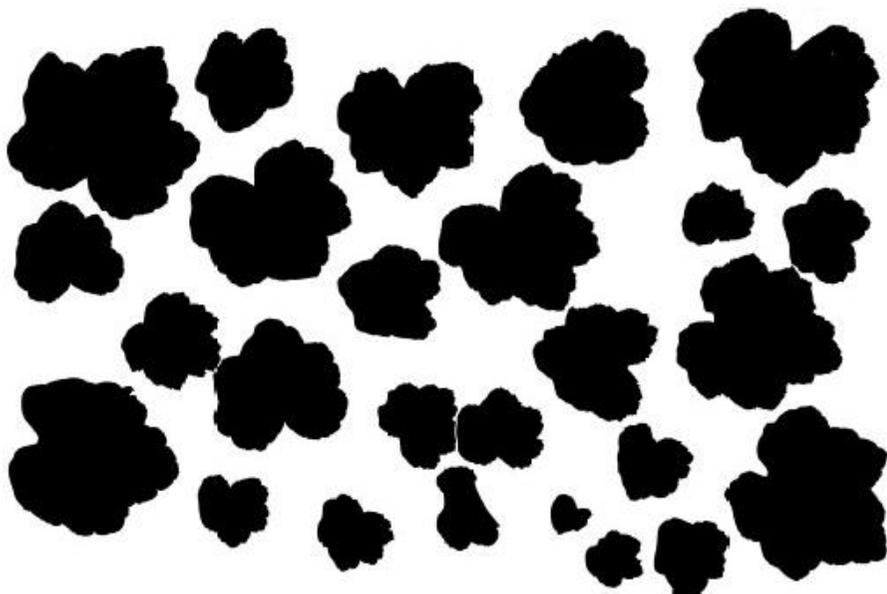


Figura 82 - Scansioni per la misura del LAI su Heuchera.

Mentre i risultati delle misurazioni in cella di prova non sono ancora disponibili, il monitoraggio in ambiente confinato realizzato in due uffici dalle caratteristiche similari (Ufficio A e Ufficio B) ha fornito dei primi dati che effettivamente confermano la capacità di riduzione dei VOC dei moduli del sistema GRE_EN_S.

I grafici presentati in Figura 83 - Risultati delle misurazioni sull'andamento dei quantitativi di VOC durante l'arco della giornata (periodo estivo). e Figura 84 presentano sull'asse delle ordinate i valori di concentrazione dei VOC registrati dagli strumenti e misurati in parti per milione (ppm)

nell'ufficio A. Sull'asse delle ascisse si si presenta invece il periodo di tempo di 24 ore durante il quale è stato effettuato il monitoraggio.

In particolare, il grafico della Figura 83 mostra come la maggior parte dei valori registrati senza la presenza del sistema GRE_EN_S si attestino tra le 10 e le 12 ppm e rimangano pressochè costanti durante l'arco temporale analizzato, le 24 ore.

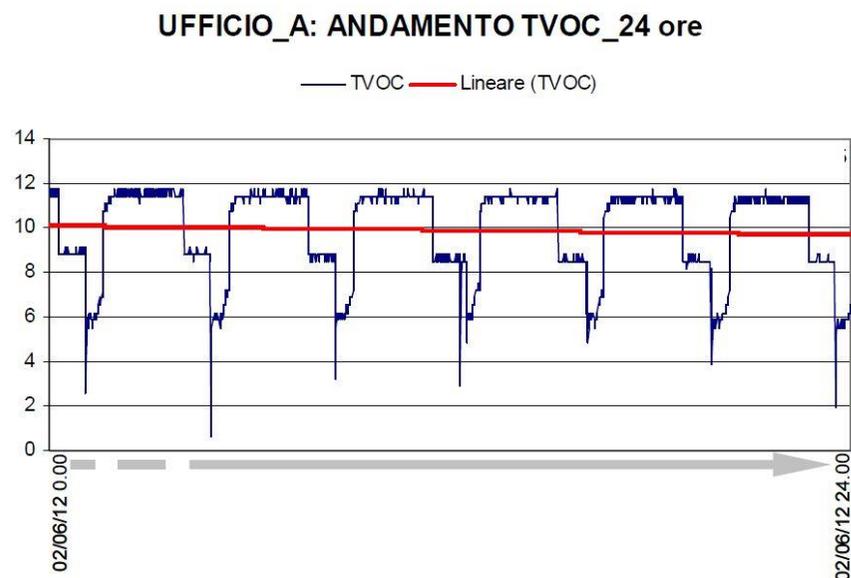


Figura 83 - Risultati delle misurazioni sull'andamento dei quantitativi di VOC durante l'arco della giornata (periodo estivo).

Al contrario, il grafico in Figura 84 mostra come la presenza delle piante apportata dal sistema GRE_EN_S favorisca una decrescita della concentrazione dei VOC nell'aria dell'ambiente.

Le oscillazioni di concentrazione dei VOC che appaiono nei grafici delle due casistiche sono proprie delle caratteristiche degli strumenti

utilizzati per la misurazione ma non inficiano la validità dei dati, come del resto mostra il valore della deviazione standard.

UFFICIO_A: ANDAMENTO TVOC_24 ore_GRE_EN_S

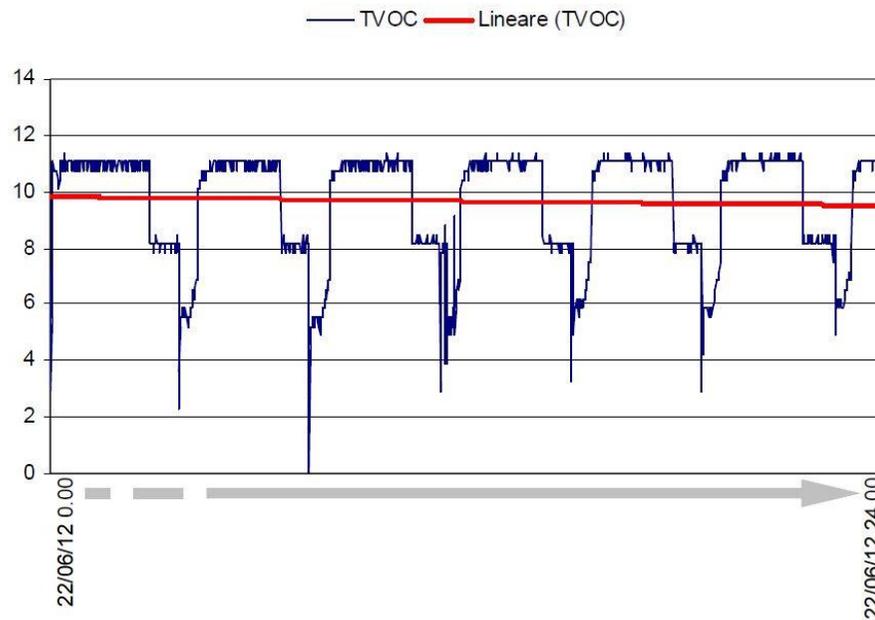


Figura 84 - Risultati delle misurazioni sull'andamento dei quantitativi di VOC durante l'arco della giornata in presenza del sistema GRE_EN_S (periodo estivo).

Tuttavia, poiché i monitoraggi sono stati condotti a distanza di 20 giorni l'uno dall'altro, si è verificata una notevole differenza di temperatura ambiente tra la prima misurazione e la seconda. Nel secondo caso la temperatura si attesta sempre al di sopra dei 26°C, condizione che normalmente comporta un aumento della concentrazione dei VOC negli ambienti confinati. Si stima che in condizioni di temperatura ambiente analoghe l'effetto di diluizione dei VOC da parte delle piante del sistema GRE_EN_S sarebbe stato più significativo.

Le misurazioni effettuate all'interno del secondo scenario (ufficio B), presentano risultati analoghi. Anche in questo caso valgono le considerazioni sulla differenza di temperatura come un elemento che può arrivare ad incidere significativamente sulla prestazione delle piante nella diluizione degli inquinanti.

I risultati di misurazioni analoghe effettuate nel periodo invernale presentano fondamentalmente le stesse caratteristiche. L'effetto delle temperature minori tipiche del periodo invernale si rispecchia in una minore concentrazione di base dei VOC nell'aria.

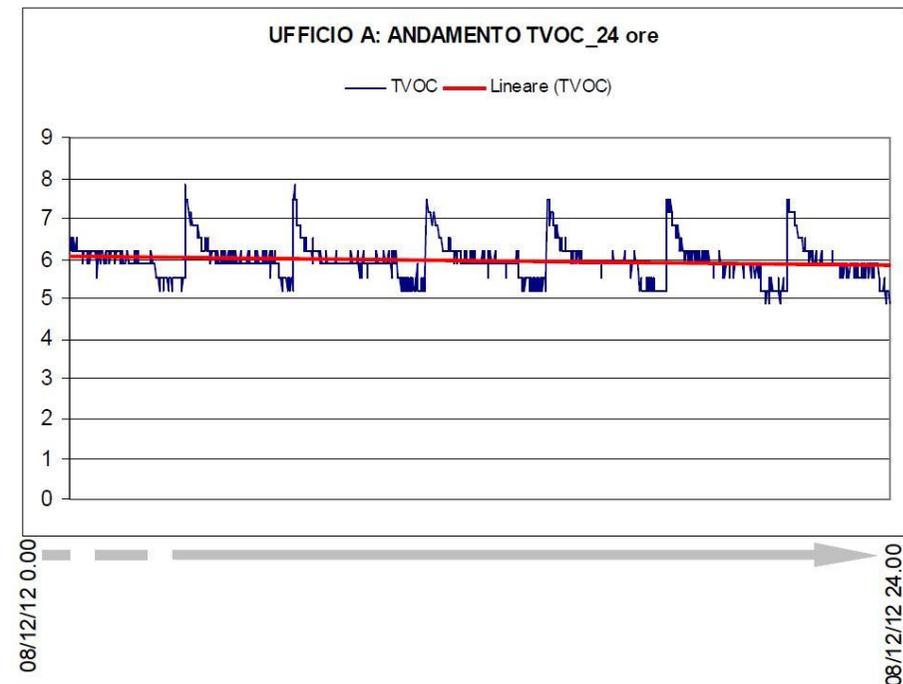


Figura 85 - Risultati delle misurazioni sull'andamento dei quantitativi di VOC nell'aria durante l'arco della giornata (periodo invernale).

Nel caso delle misurazioni effettuate nel periodo invernale, la differenza di una settimana tra una rilevazione e l'altra presenta una oscillazione significativa dell'umidità relativa media: 48% durante la prima rilevazione, 66% durante la seconda.

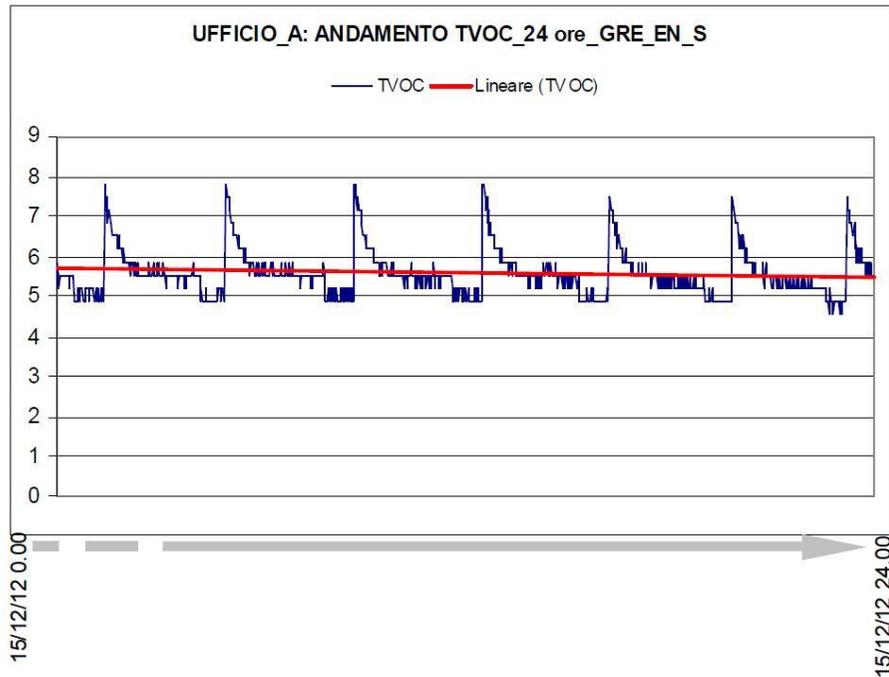


Figura 86 - Risultati delle misurazioni sull'andamento dei quantitativi di VOC durante l'arco della giornata in presenza del sistema GRE_EN_S (periodo invernale).

L'incremento dell'umidità relativa nella seconda misurazione è probabilmente condizionato sia dall'incremento dell'umidità relativa esterna che dalla presenza di materiale vegetale. Di norma, è condizione che comporta un aumento della concentrazione di VOC in ambiente confinato, per cui si stima che anche in questo caso, qualora i valori di umidità relativa fossero rimasti costanti, il miglioramento

della qualità dell'aria dovuto alla presenza del sistema GRE_EN_S sarebbe stato molto più significativo.

Per quanto riguarda la concentrazione dei VOC, i risultati delle analisi riferiscono quindi un moderato miglioramento della qualità dell'aria in presenza dei moduli vegetati GRE_EN_S.

A parte la temperatura e l'umidità relativa, che abbiamo visto essere fattori che influiscono sulla prestazione, anche il rapporto tra la superficie opaca e la superficie vegetata è un parametro importante ai fini delle misurazioni, per cui si stima che potrebbe essere necessario determinare la superficie di parete vegetata minima necessaria per diluire i VOC nella misura desiderata.

Allo stesso modo, come già menzionato in precedenza, anche la corretta selezione delle specie vegetali rappresenta un parametro determinante per le prestazioni del sistema parete. Si stima che l'adozione di un'altra specie vegetale, o di un mix di varie, potrebbe anch'essa migliorare sensibilmente la prestazione del sistema.

I monitoraggi hanno dunque evidenziato una tendenza positiva nella riduzione dei VOC presenti nell'aria in ambienti confinati che non può però essere considerata affidabile come lo sarebbero dei valori assoluti, per i quali bisognerà attendere le attività di monitoraggio in cella di prova, non ancora realizzate per questi parametri.

12.6 CONCLUSIONI DEL RAFFRONTO

Giunti al momento di trarre delle conclusioni sulle prestazioni dei due sistemi nella diluizione degli inquinanti, non siamo in realtà in possesso di dati quantitativi specifici, accurati e comparabili.

Come abbiamo visto, il tema è particolarmente complesso e l'unico modo per poter realmente fare una comparazione quantitativa della prestazione sarebbe quello di allestire la cella di prova già costruita per le rilevazioni del sistema GRE_EN_S con una parete attrezzata con pittura fotocatalitica (parete che dovrebbe avere le stesse dimensioni e orientazione della parte realizzata in moduli vegetati).

Poiché in questa sede non si possiedono i mezzi per realizzare tale analisi sul campo, le nostre conclusioni finali dovranno fermarsi a mere considerazioni generali.

Abbiamo visto come le pitture e malte fotocatalitiche siano una tecnologia relativamente semplice e facile da applicare, la cui prestazione di diluizione degli inquinanti può essere molto significativa (purificazione del 90% dell'aria contenuta in 80 m³ in un'ora).

D'altro canto, abbiamo anche visto come questa tecnologia presenti delle problematiche importanti. Affinchè la pulizia dell'aria possa avvenire sarà necessaria la presenza continua della luce del sole (per attivare la fotocatalisi). Passato un certo tempo, il potere fotocatalitico della superficie si "spegnerà" rendendo necessaria la sostituzione del materiale.

In aggiunta alla diluizione degli inquinanti, una parete fotocatalitica può apportare anche i vantaggi di essere antisporcamento da inquinamento (indoor e outdoor), permeabili al vapore acqueo, non infiammabili, resistenti alle muffe ed alla proliferazione di funghi, antibatteriche e deodorizzanti.

Per quanto riguarda il sistema GRE_EN_S, abbiamo visto come diversi studi certifichino la capacità delle piante di catturare e filtrare diversi tipi di inquinanti presenti nell'aria, sia per quanto riguarda gli spazi interni che esterni. Abbiamo visto che la prestazione di diluizione

dipenderà moltissimo dalle specie vegetali impiegate e dalle condizioni al contorno.

Abbiamo visto che i VGS in particolare, grazie alla possibilità di impiegare piante di specie diverse nello stesso spazio, possono creare dei filtri in grado di catturare un ampio spettro di inquinanti. Tuttavia, a parità di tempo, le piante presentano una efficienza minore nella diluizione di almeno alcuni VOC.

Tuttavia, specie di piante sempreverdi manterranno il loro potere di diluizione degli inquinanti durante tutto l'anno, con alcune variazioni di prestazione (dipendenti dal variare delle condizioni al contorno), sia di giorno che di notte.

La maggior parte dei VOC catturati dalle piante saranno successivamente lavati via dalla pioggia (polveri sottili), mentre alcuni verranno decomposti in sostanze non nocive per la salute, come nel caso della fotocatalisi.

Come sottolineato per le tecnologie fotocatalitiche, anche l'impiego di pareti vegetate presenta numerosi vantaggi "paralleli" alla capacità di diluizione dei contaminanti, molti dei quali già abbiamo menzionato precedentemente in questa trattazione: la capacità di mitigare l'effetto isola termica, il loro potere isolante e fonoassorbente, la totale riciclabilità, il bassissimo impatto ambientale dovuto alla conversione di CO₂ in O₂ durante l'intero ciclo di vita, etc.

Nonostante non siamo stati capaci di fornire una quantificazione precisa delle prestazioni di diluizione degli inquinanti per il sistema GRE_EN_S, possiamo sostenere che mentre per la pareti ventilate la capacità di diluizione degli inquinanti è una caratteristica che deve essere volontariamente ricercata attraverso l'impiego di tecnologie fotocatalitiche, nel caso del sistema di parete vegetata in oggetto si

tratta di una sua caratteristica fondamentale che viene accompagnata da numerosi vantaggi prestazionali riferiti agli altri parametri fondamentali della progettazione di un sistema di parete esterna.

In conclusione dunque, per quanto riguarda le necessità di abbattimento dei VOC presenti nell'aria urbana indoor e outdoor, la tecnologia fotocatalitica sarà un'ottima soluzione per dotare di questa prestazione il costruito già esistente e più antico, tipico del patrimonio architettonico italiano. Per quanto riguarda la progettazione del nuovo invece, l'adozione del sistema GRE_EN_S permetterà di fornire le nuove pareti con una tecnologia di abbattimento inquinanti caratterizzata da prestazioni ambientali a tutto tondo, ossia che si prendono cura dell'ambiente sotto vari punti di vista e durante tutto il ciclo di vita della costruzione.

13 DURATA

La durata è un parametro prestazionale che possiamo associare ad ogni tipo di manufatto e rappresenta il tempo che intercorre dall'inizio della sua vita utile fino al momento in cui smette di funzionare.

Infatti, “per qualsiasi manufatto, contemporaneamente al suo completamento e all'inizio della sua vita utile, si avvia un processo di trasformazione di tipo entropico la cui velocità varia al variare delle **caratteristiche fisiche** del manufatto, del **contesto ambientale** in cui è inserito, dell'**uso** a cui è sottoposto” (Molinari, 2002).

Un sistema complesso è a sua volta affetto dalla trasformazione dei singoli elementi che lo compongono. Quanto maggiore la sua complessità, tanto minore è il grado di trasformazione che può permettersi di subire senza compromettere il proprio funzionamento.

Analizzando dunque la durata di un sistema di facciata, il nostro obiettivo è quello di andare a valutare due aspetti. Da una parte avremo bisogno di determinare i tempi e le modalità con cui il nostro sistema perderà le proprie caratteristiche di funzionalità; dall'altra, dovremo valutare la possibilità di contrastare il processo di trasformazione restituendo al sistema la capacità di funzionamento perduta. In altri termini, il progettista di una chiusura verticale deve sapere in quanto tempo ed in che modo il sistema perderà la propria funzionalità e prevedere un piano per ricostituirla.

Come già accennato, i fattori che condizionano la trasformazione dei manufatti sono principalmente tre: le caratteristiche fisiche proprie di ognuno, più o meno resistente, l'ambiente in cui vengono inseriti, più o meno ostile e le modalità d'uso con cui vengono impiegati. Ciò che

questi fattori vanno a condizionare si definisce come la “qualità funzionale” del manufatto (Molinari, 2002).

Il processo di trasformazione dei manufatti si ricollega dunque principalmente a due fenomeni: il degradamento fisico e l'obsolescenza.

13.1 DEGRADAMENTO ED OBSOLESCENZA

Il **degradamento fisico** è un fenomeno che può essere causato da diversi fattori, come per esempio la presenza di difetti originari, l'usura o l'azione degli agenti atmosferici. Si riferisce ad una dinamica negativa nel tempo della qualità originaria delle prestazioni, ossia ad un loro calo a partire dagli standard imposti all'inizio della sua vita utile. Per valutare il degradamento di un sistema di facciata, il progettista deve prendere in considerazione le conseguenze dell'invecchiamento dei suoi componenti e del sistema nel suo insieme.

Il concetto di **obsolescenza** si basa sul fatto che i requisiti che si richiedono ai manufatti cambino nel tempo diventando maggiormente restrittivi. Di conseguenza, anche le prestazioni che tali componenti dovranno garantire saranno di volta in volta maggiori. Possiamo quindi definire l'obsolescenza come la differenza che si viene a creare nel tempo tra la qualità originaria di un manufatto e la qualità delle prestazioni richieste al momento presente dell'analisi per quel tipo di manufatto. Data questa definizione, si possono riconoscere almeno tre forme di obsolescenza.

L'obsolescenza funzionale si riferisce ai cambiamenti che possono occorrere al livello della domanda di un manufatto o di un sistema. In altre parole, può essere richiesto nel tempo che un determinato

sistema risponda a necessità aggiuntive rispetto a quelle iniziali. Ad esempio potrebbe essere richiesto ad un sistema di facciata di essere in grado di sopportare meglio l'aggressione degli agenti atmosferici a causa di un cambiamento climatico imprevisto in fase di progettazione.

L'obsolescenza di tipo tecnologico si riferisce invece alla concorrenza dovuta all'avvento sul mercato di nuovi manufatti tecnologicamente più avanzati e quindi in grado di rispondere ai nuovi requisiti con prestazioni migliori. Nel caso di un sistema di facciata, una tipologia di serramenti, per esempio, può diventare tecnologicamente obsoleta quando un'altra, maggiormente performante, viene messa sul mercato a prezzi concorrenziali.

L'obsolescenza economica è dovuta a tutti i fattori menzionati precedentemente: il degradamento fisico e gli altri tipi di obsolescenza. Tuttavia può essere determinata anche da cause di tipo strettamente economico come l'andamento dei mercati o l'introduzione di agevolazioni da parte di enti pubblici. Per esempio un sistema di facciata diventa economicamente obsoleto quando vengono introdotti da un governo degli incentivi economici per l'adozione di determinate tecnologie maggiormente performanti.

La differenza fondamentale tra i fattori di degradamento ed obsolescenza sta dunque nel fatto che il primo è un processo intrinseco proprio del singolo prodotto o del sistema, mentre il secondo dipende dalle condizioni al contorno, ossia il contesto sociale, economico, culturale, tecnologico, ecc. Qualunque siano le prestazioni dell'elemento, il mutare delle condizioni al contorno lo renderà prima o poi obsoleto.

Assunto il dato di fatto per cui la qualità di un sistema di facciata, intesa come risposta prestazionale ai requisiti, è in continuo decadimento, sarà compito del progettista fare in modo da diminuire al massimo l'arco di tempo in cui le prestazioni del sistema non soddisferanno i requisiti o, qualora questo non sia possibile, diminuire il più possibile il divario tra i due. Conseguire questo risultato significa aumentare la durata del sistema.

Per riuscire in questo obiettivo si può agire in due modi diversi: contrastando il degradamento fisico ed assecondando l'adeguamento degli elementi ai nuovi requisiti. Contrastare questi processi significa prevedere la possibilità di interventi di manutenzione. In questo frangente, la parola "prevedere" non viene utilizzata in maniera casuale ma è invece fondamentale per la scelta delle strategie operative. L'efficacia di un piano di manutenzione dipende infatti in larga parte dalla prevedibilità dei fenomeni di trasformazione.

13.2 MANUTENZIONE

Quando parliamo di manutenzione stiamo facendo riferimento ad un concetto molto complesso che racchiude dentro di sé una serie di idee e concetti molto importanti.

Innanzitutto è importante notare come la manutenzione sia una combinazione di azioni differenti con un unico scopo. Non si tratta dunque di eseguire una singola operazione ma bensì di organizzare un sistema di attività differenziate per il raggiungimento di un unico obiettivo comune.

L'obiettivo comune a cui le diverse azioni da intraprendere convergono è quello di garantire il più a lungo possibile che un manufatto mantenga adeguate condizioni di funzionamento e livello

di rendimento. Questo tipo di intervento può essere realizzato attraverso due tipologie di azioni: la conservazione ed il ripristino.

L'azione di **conservazione** si riferisce al concetto di mantenimento ed allude ad una manutenzione di tipo preventivo, dove gli interventi vengono eseguiti prima che il funzionamento del manufatto venga compromesso da degradazione od obsolescenza. Al contrario, l'azione di **ripristino** si riferisce ad un tipo di manutenzione correttivo, dove gli interventi vengono compiuti per correggere un problema di funzionamento già esistente.

L'ultimo concetto da comprendere è rappresentato dalle suddette condizioni di funzionamento e significa che deve essere stabilito preventivamente un livello di accettabilità minimo di funzionamento da assumere come obiettivo delle attività di manutenzione, al di sotto del quale il manufatto verrà considerato come non funzionante. Queste "*condizioni accettabili*" (Molinari, 2002) sono però un concetto relativo, poiché bisogna comprendere chi sia il soggetto più adeguato a dare un tale giudizio; contemporaneamente, si tratta anche di un concetto dinamico, poiché come abbiamo visto il fenomeno di obsolescenza può modificare i limiti di accettabilità nel tempo.

Da quanto appena visto possiamo dunque affermare che la manutenzione sia l'insieme di azioni atte a conservare e riportare un manufatto a condizioni accettabili.

Dall'analisi del concetto di manutenzione è possibile intuire come esistano diverse tipologie di manutenzione. In primo luogo, è possibile una **manutenzione preventiva**, ossia quel tipo di interventi che viene eseguito per prevenire il verificarsi di guasti o la degradazione del funzionamento, ad intervalli temporali predefiniti e secondo criteri specifici. Anche questa definizione si apre all'introduzione di nuovi

concetti molto importanti, come la periodicità degli interventi di manutenzione: non basterà intervenire una sola volta ma sarà necessario prevedere un calendario di interventi.

Allo stesso tempo si introduce anche il concetto di probabilità di guasto, che caratterizza le modalità di studio e previsione volte a prevenire i guasti e pianificare gli interventi. Infine, la possibilità di degradazione del funzionamento ci suggerisce che esista una scala di livelli di funzionamento intermedio fra lo stato di funzionamento ottimale e quello di guasto.

La possibilità di ripristinare una condizione precedente, introduce il concetto di **manutenzione correttiva**, ossia quella combinazione di interventi eseguiti a seguito di un guasto al fine di restaurare le condizioni di funzionamento del manufatto.

Vi è tuttavia un altro concetto importante che appartiene alla manutenzione: la possibilità di eseguire migliorie. L'insieme degli interventi atti al miglioramento di un manufatto si definisce **manutenzione migliorativa** e, mentre le altre tipologie di manutenzione erano rivolte soprattutto a contrastare il degradamento fisico, questa rappresenta il tipo di intervento da effettuare per tentare di contrastare almeno parzialmente il fenomeno di obsolescenza.

Infine, è importante notare come l'obiettivo della manutenzione di garantire la funzionalità di un manufatto sottenda direttamente ad un altro obiettivo non di minor importanza: la salvaguardia del suo valore. L'attività di manutenzione permette infatti di conservare, ripristinare o aumentare il valore di un manufatto, inteso sia come valore di funzionamento, legato alla sua utilità, sia come valore economico, dovuto alle possibilità di vendita e locazione.

13.2.1 Quadro normativo

Con la legge n° 457 del 5 Agosto del 1978 “Norme per l'edilizia residenziale”, la normativa italiana introduce le prime considerazioni sulla manutenzione. Questa si limita però a definire le categorie di intervento di recupero, con maggiore attenzione alla delineazione di limiti di applicazione a precise categorie di opere, più che alla definizione di concetti, obiettivi o procedure. La norma distingue quindi tra manutenzione ordinaria e manutenzione straordinaria, assegnando alla prima gli interventi sugli elementi aventi funzioni accessorie e alla seconda le azioni destinate agli elementi il cui funzionamento risulti di primaria importanza.

La prima definizione ufficiale di “manutenzione” viene fornita nel 1990, recependo di fatto quella già delineata dall'International Electrotechnical Commission nello stesso anno, dalla commissione UNI “Qualità ed Affidabilità” in merito alla “terminologia sulla fidatezza e sulla qualità del servizio”. Nel 1993 viene ribadita nuovamente dalla commissione UNI “Manutenzione”. La novità consiste nel fatto che la definizione normativa inserisce all'interno delle attività di manutenzione, oltre a quelle tecniche, anche quelle amministrative e di supervisione.

Nel 1996 la norma UNI 10604 sui “Criteri di progettazione, gestione e controllo dei servizi di manutenzione di immobili” tenta di fissare gli obiettivi di manutenzione di un immobile. In questa sede viene dunque ribadito il duplice obiettivo di garantire l'efficienza funzionale e mantenere il valore dell'immobile nel tempo. Viene inoltre promosso l'adeguamento tecnico e normativo al fine di contrastare il fenomeno di obsolescenza, prescrivendo azioni di tipo conoscitivo, previsionale e programmatico. Nel fare questo, la norma distingue tra “prestazioni iniziali” e “nuove prestazioni”, per cui l'adeguamento

tecnico alle prestazioni iniziali consisterà nell'ottenere le stesse prestazioni a costi minori mentre l'evoluzione tecnica a nuove prestazioni consisterà nell'ottenere prestazioni tali da soddisfare eventuali nuovi requisiti.

13.3 AFFIDABILITÀ

Una volta appurato che ogni sistema edilizio sia incline a perdere nel tempo la propria capacità di funzionamento originaria, il problema da risolvere per il progettista consisterà nella determinazione del tempo necessario affinché ciò avvenga e delle modalità attraverso cui questo processo avverrà. L'affidabilità rappresenta dunque la funzione che permette di misurare la diminuzione delle capacità di funzionamento di un elemento o di un sistema.

Da un punto di vista concettuale, l'affidabilità viene definita come "l'attitudine di un oggetto (componente, sistema, servizio, ecc.) ad adempiere alle sue funzioni specifiche, quando utilizzato nelle condizioni prefissate, ciascuna volta che ne è richiesto e per la durata desiderata" (Molinari, 2002). Passando invece ad una definizione di tipo quantitativo, l'affidabilità di un manufatto si costituisce come "la probabilità che esso adempia alla propria specifica funzione per un tempo determinato e sotto determinate condizioni" (Molinari, 2002).

Considerare l'affidabilità come una grandezza probabilistica ci permette di analizzarla e quantificarla preventivamente da un punto di vista matematico attraverso il calcolo probabilistico. Poiché il concetto di affidabilità associa la durata della vita del manufatto alla qualità prestazionale da questo offerta, sarà necessario identificare dei requisiti di affidabilità. Per poter definire e successivamente controllare il rispetto di tali requisiti prestazionali, sarà tuttavia necessario compiere alcune operazioni. Innanzitutto sarà necessario

stabilire un criterio per decidere quando un manufatto sia da considerarsi funzionante e quando sia definibile guasto; poiché per i sistemi edilizi non è quasi mai possibile limitare l'analisi ad una condizione "funzionante/non funzionante", sarà necessario stabilire dei livelli prestazionali minimi al di sotto dei quali l'elemento sarà considerato non funzionante. Parallelamente andrà definito l'intervallo di tempo durante il quale si prevede che l'elemento debba necessariamente funzionare. Infine dovranno essere stabilite le condizioni di impiego ed ambientali al contorno.

L'affidabilità di un prodotto varia nel tempo ed in base alle modalità di impiego, dipende dalla qualità delle prestazioni richieste e comporta dei costi economici che devono essere valutati sul periodo del suo ciclo di vita.

13.3.1 Concetto di guasto

Quando parliamo di guasto facciamo riferimento prevalentemente a due concetti: l'evento e lo stato. **L'evento di guasto** è la "cessazione dell'attitudine di una entità ad eseguire una funzione richiesta" (Molinari, 2002). **Lo stato di guasto** fa invece riferimento all'avaria, ossia lo "stato di una entità caratterizzato dalla sua inabilità ad eseguire una funzione richiesta" (Molinari, 2002). In generale dunque, in seguito ad un evento di guasto, diremo che l'elemento tecnico è in avaria.

La normativa UNI 9910 del 1991, la IEC 271 del 1974 e la IEC 50 del 1991 ci forniscono alcuni metodi di classificazione delle tipologie di guasti in cui un elemento tecnico può incorrere, in base alla velocità dell'evento, alla consistenza, al ciclo di vita, agli effetti che questo comporta ed alle cause scatenanti l'evento stesso.

Tendendo conto della velocità dell'evento potremo avere guasti graduali o improvvisi; considerando la consistenza del guasto, questo potrà essere parziale o totale; volendo considerare contemporaneamente velocità e consistenza, avremo guasti catastrofici (improvvisi e totali) e guasti per degradamento (graduali e parziali); facendo riferimento al ciclo di vita dell'unità operativa o del sistema, potremo avere guasti nella fase iniziale (rodaggio), guasti nella fase di vita utile e guasti nella fase di degradamento accelerato (usura per invecchiamento); tenere conto degli effetti dei guasti ci permette di distinguere tra guasti minori, significativi, critici e catastrofici; infine, le cause degli eventi di guasto ci permettono di discernere tra guasti primari (non causati dal guasto di un altro elemento), secondari (causato dal guasto di un altro prodotto che non era progettato per supportare quello in esame) e guasti nei comandi (guasto causato da un'altra entità che era stata progettata appositamente per supportare l'attività dell'elemento tecnico in esame).

Se ogni evento di guasto causa un'avaria, al contrario un'avaria può verificarsi anche senza un guasto. Se la classificazione introdotta per i guasti vale anche per le avarie, esiste tuttavia un'altra categoria di classificazione apposita che si riferisce alla loro individuabilità: possiamo dunque avere avarie intermittenti, per cui l'elemento recupera la capacità di svolgere la propria funzione dopo un periodo di tempo senza la necessità di interventi, avarie mobili (intermittenti difficili da individuare), persistenti (il guasto persisterà fino alla realizzazione di un intervento di manutenzione) o latenti (l'avaria è presente ma non può essere riconosciuta).

Infine, riveste un ruolo importante anche il concetto di "difetto": "qualsiasi scostamento di una caratteristica di un'entità dai requisiti

per essa stabiliti, laddove tale scostamento sia superiore ai limiti accettabili in relazione a determinate condizioni di impiego" (Molinari, 2002).

Un difetto non necessariamente provocherà un guasto in quanto non è detto che questo pregiudichi il funzionamento dell'elemento. Tuttavia, un guasto provocherà sempre un difetto, poiché comporterà lo scostamento dalle sue caratteristiche stabilite per l'adempimento del proprio compito. Anche per i difetti vale una parte della classificazione adottata per gli eventi di guasto: potremo avere difetti minori, significativi, critici e catastrofici.

13.3.2 Tasso di guasto

Tenendo sotto osservazione un campione significativo di prodotti per un certo periodo di tempo si può riscontrare come ognuno di essi ad un certo punto della propria vita, si guasterà abbassando il proprio livello di funzionamento al di sotto del livello di accettabilità.

La distribuzione temporale degli eventi di guasto nell'insieme dei prodotti del campione assumerà la forma di una funzione Gaussiana, ossia la maggior parte dei manufatti si guasterà in un periodo di tempo limitato in prossimità della fine del proprio ciclo di vita, mentre pochi altri si erano già guastati prima ed altrettanti sopravvivranno per un periodo di tempo aggiuntivo.

Analogamente si può rappresentare una grandezza molto più interessante, come la distribuzione di frequenza dei guasti, che assumerà lo stesso andamento del numero di guasti e costituirà il modello matematico rappresentativo, per intervalli di tempo infinitesimali e numero di oggetti in campione tendente a infinito, di una funzione di distribuzione nel tempo degli eventi di guasto.

Da questo modello fondamentale si possono estrapolare una serie di altre funzioni interessanti ai fini dello studio analitico del problema: tra queste (Densità di probabilità di guasto, Distribuzione cumulativa di probabilità di guasto, Distribuzione cumulativa di probabilità di funzionamento), il **tasso di guasto** rappresenta una delle funzioni più interessanti in quanto indica la probabilità che un elemento si guasti nell'istante successivo a t , condizionata dal fatto che esso abbia funzionato correttamente fino all'istante t .

Dunque, mentre la densità di probabilità si riferisce ad una popolazione sana all'istante t_0 , il tasso di guasto si riferisce ad una popolazione sana nell'istante t (si tratta perciò in questo caso di una popolazione sana meno numerosa). Poiché analiticamente il tasso di guasto si configura come un inverso del tempo, può essere dunque interpretato come il numero di guasti che avvengono nell'unità di tempo.

Uno dei parametri che più ci interessa determinare è il tempo medio necessario ad un prodotto per guastarsi, o se vogliamo il tempo di durabilità naturale, ossia in assenza di riparazioni.

Il cosiddetto “**Mean Time To Failure**” rappresenta una stima probabilistica della vita utile di un manufatto che corrisponde ad un intervallo di tempo durante il quale il tasso di guasto si mantiene approssimativamente costante.

Associando il tasso di guasto alla vita di un prodotto, possiamo dunque analizzare contemporaneamente due fattori: l'andamento dinamico nel tempo del tasso di guasto del prodotto e le sue fasi del ciclo di vita in relazione ad esso.

In relazione al proprio tasso di guasto, possiamo dire che ogni manufatto presenta un ciclo di vita dividibile in tre fasi: ad una prima

fase di rodaggio seguiranno quella di vita utile vera e propria e quella di usura. Nella prima fase la maggior parte dei guasti accade per via di errori di produzione o posa in opera o a causa di difetti intrinseci dei materiali. In seguito alla rimozione delle unità fallate, il tasso di guasto si manterrà costante durante il periodo di **vita utile**: in questa fase i guasti saranno dovuti principalmente a eventi impreveduti o ad utilizzi errati dei prodotti. Infine nel periodo di **usura** i manufatti andranno incontro a guasti dovuti al loro stesso invecchiamento.

In ognuna di queste tre fasi gli interventi di manutenzione dovranno essere pianificati in maniera tale da ottimizzarne l'efficacia. Nella fase di rodaggio sono inutili interventi di manutenzione preventiva in quanto gli elementi nuovi inseriti non farebbero altro che riportare il tasso di guasto al valore massimo che caratterizza questa fase. Sarà dunque necessario attendere il verificarsi di guasti per poter procedere con le necessarie riparazioni o sostituzioni. Allo stesso modo, durante la vita utile del manufatto sarà possibile intervenire solamente con una manutenzione correttiva, data l'imprevedibilità temporale dei guasti. Solo verso la fine del periodo di tasso di guasto costante, potrebbe valere la pena intervenire con manutenzioni preventive al fine di mantenere il valore costante per un periodo di tempo maggiore. Infine nella fase di usura, sarà consigliabile intervenire tempestivamente con manutenzioni preventive per abbassare ciclicamente il tasso di guasto crescente.

13.3.3 Dependability

Il termine inglese “dependability” si riferisce sempre al concetto di affidabilità di un elemento tecnico. In questo caso però, l'assunzione di un termine differente da quello già utilizzato nella trattazione precedente è giustificata dall'intenzione di considerare l'affidabilità globale dei prodotti. Fino ad ora, infatti, abbiamo considerato dei

manufatti il cui ciclo di vita terminava con il verificarsi del primo guasto, seguendo il parametro del MTTF, senza prendere invece in considerazione l'opportunità di effettuare una riparazione a guasto avvenuto, passando dunque a considerare un nuovo parametro: il **Mean Time Between Failures**, MTBF. In questo caso, nell'analisi dei tempi di funzionamento (Mean Up Time, MUT, tempo medio di disponibilità) degli elementi tecnici sarà necessario prendere in considerazione anche le tempistiche di riparazione (Mean Down Time, MDT, tempo medio di indisponibilità), per cui al tempo di servizio MTTF, sarà utile associare i tempi di fuori servizio relativi alle riparazioni MTTR (Mean Time To Restore).

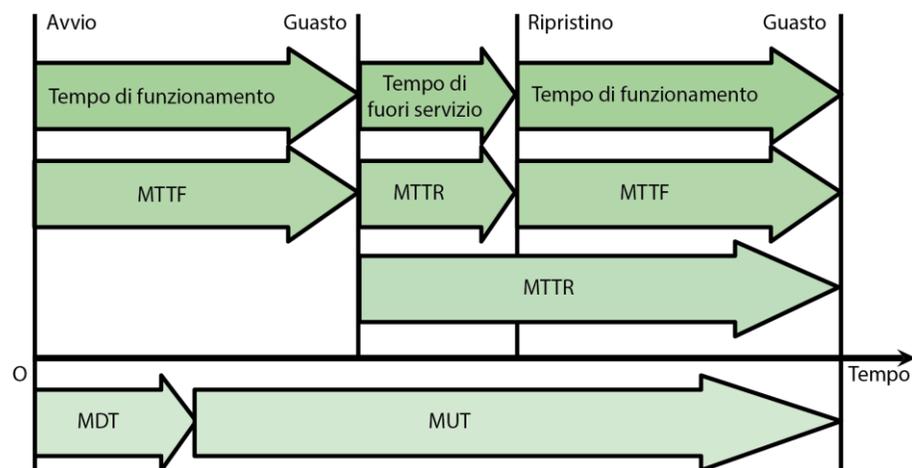


Figura 87 – I rapporti tra i vari tempi.

A questo proposito si rende necessario introdurre dunque un altro parametro che rappresenti contemporaneamente la frequenza dei guasti e dei tempi di ripristino: la disponibilità.

Definiamo “disponibilità”, “l’attitudine di un’entità ad essere in grado di svolgere una funzione richiesta in determinate condizioni a un dato

istante, o durante un dato intervallo di tempo, supponendo che siano assicurati i mezzi esterni eventualmente necessari” (Molinari, 2002).

La disponibilità può dunque rappresentare sia la quantità di tempo di funzionamento di un prodotto sul lungo periodo, sia la probabilità che questo sia funzionante in un determinato momento. È importante sottolineare come la disponibilità degli eventuali mezzi esterni necessari per il funzionamento del manufatto non influenzi la sua.

In definitiva, mentre l’affidabilità teneva conto solo del singolo evento di guasto, la disponibilità considera sia il guasto che gli interventi di manutenzione.

Possiamo dunque affermare che per valutare la probabilità che un elemento tecnico od un sistema sia in grado di svolgere la propria funzione per il tempo necessario, dovremmo fare riferimento alla sua dependability che ci permette di tenere conto contemporaneamente della sua affidabilità, della sua manutenibilità e della probabilità che questo si guasti. La dependability valuterà dunque la probabilità che l’elemento tecnico riesca a svolgere la propria funzione, presupponendone la disponibilità.

La dependability è dunque uno strumento di misura dell’efficienza nel tempo di un sistema operativo e dell’apparato di manutenzione ad esso associato.

13.4 MANUTENIBILITÀ

Quando parliamo di manutenibilità di un’unità operativa, stiamo trattando di elementi tecnici e sistemi riparabili, per i quali dobbiamo considerare congiuntamente l’incertezza dovuta ad affidabilità, durata della vita e tempi di manutenzione.

Il termine “manutenibilità” deriva dall’inglese “maintainability” e fa riferimento ad una attitudine al mantenimento in efficienza, esprimendo la maggiore o minore predisposizione di un sistema tecnologico o di una unità operativa a facilitare le operazioni di manutenzione.

La normativa internazionale definisce qualitativamente la manutenibilità come “la caratteristica di progetto, di costruzione e di installazione riguardante l’attitudine di una entità a conformarsi a specifici requisiti d’uso e di manutenzione” (International Electrotechnical Commission, 1982). Tale attitudine viene valutata quantitativamente come la “probabilità che l’intervento di manutenzione sull’unità operativa (o sul sistema di unità operative) sia condotto a termine entro il tempo t_r ” (Molinari, 2002), dove t_r è un limite di tempo prestabilito in conformità a procedure e risorse prescritte dalla normativa.

La manutenibilità è dunque una caratteristica di progetto fondamentale per la determinazione della durata di un componente tecnico o di un intero sistema ed è caratterizzata da quattro fattori che ne qualificano la gestione temporale:

- Frequenza degli interventi di manutenzione necessari;
- Organizzazione della manutenzione e mezzi di supporto necessari;
- Costi degli interventi;
- Tempo necessario per lo svolgimento degli interventi.

Il primo fattore si ricollega direttamente alle grandezze affidabilistiche viste in precedenza (tasso di guasto, durabilità, etc.) mentre il secondo ed il terzo sottolineano il rapporto tra operazioni di manutenzione e organizzazione logistico-economica: ad ogni livello di manutenibilità

corrispondono livelli precisi di organizzazione logistica necessaria per compiere gli interventi e determinati costi ad essi correlati. Il quarto fattore si riferisce ai contenuti della definizione quantitativa già citata.

Dunque la misura della manutenibilità deve essere riferita contemporaneamente sia ad una specifica unità operativa, sia ad una specifica azione manutentiva condotta sull’unità stessa. Ciò significa che sarà necessario analizzare previamente obiettivi, procedure, tempi e risorse (anche economiche) delle azioni manutentive che potrebbero essere condotte in risposta ad ogni singolo modo di guasto cui l’unità possa essere soggetta.

Determinare da un punto di vista quantitativo la manutenibilità di un sistema edilizio non è altrettanto facile che determinarla per un elemento tecnico. Mentre gli elementi tecnici possono essere prodotti in serie e soggetti a test sperimentali, i sistemi edilizi sono soggetti ad un certo grado di unicità (non sono disponibili certificazione da parte del produttore, strumenti di simulazione attendibili o prototipi già testati), il che rende molto più difficile la predeterminazione quantitativa della loro manutenibilità.

13.5 PARAMETRI DI DURATA DELLE CHIUSURE VERTICALI

Vista la complessità dei concetti relativi alla durata di un sistema di parete, ai fini della nostra trattazione siamo costretti ad operare una semplificazione del tema.

Come abbiamo visto, la definizione della durata del sistema parete dipende dai parametri di funzionamento che si stabiliscano per determinare quando il sistema sta funzionando correttamente.

Nel caso delle chiusure verticali dobbiamo considerare in primo luogo il parametro fondamentale, se vogliamo il più importante, ossia la

resistenza strutturale della facciata, affinché possa adempiere al suo compito primario di chiusura verticale.

La resistenza strutturale è uno dei parametri ai quali si pone maggiore attenzione durante la fase di progettazione dei sistemi di parete che normalmente vengono largamente sovradimensionati in questo aspetto per garantire le prestazioni minime in ogni momento per un intervallo di tempo molto ampio.

Escludendo le condizioni al contorno (condizioni ambientali, uso, etc.) che sono sempre distinte a seconda del caso, la durata delle proprietà strutturali di un sistema di chiusura verticale dipenderà dalla durata dei materiali che costituiscono le sue parti strutturalmente portanti.

Per questo parametro si prenderà in considerazione allora il mean time to failure dei materiali che costituiscono il sistema portante della chiusura, in quanto non sarebbe accettabile l'evento di guasto che causasse la perdita di resistenza strutturale. Conseguentemente gli interventi di manutenzione per questo parametro dovranno essere necessariamente preventivi.

Per quanto riguarda **le prestazioni termiche invernali ed estive**, il fattore determinante per la durata del sistema è soprattutto relativo all'obsolescenza: i nuovi requisiti di legge che continuamente vengono aggiornati per combattere gli effetti dell'inquinamento ambientale rendono obsoleti i sistemi di parete più antichi.

Il mean time to failure dei materiali isolanti, delle barriere al vapore e degli strati di rivestimento esterni saranno i fattori che determineranno il degrado delle prestazioni termiche attraverso l'oscillazione dei valori di umidità e condensa all'interno del sistema parete.

La prestazione acustica del sistema non è normalmente un parametro che si consideri più di tanto, esclusi i casi in cui rappresenta un fattore determinante per l'uso dell'edificio (cinema, teatri, etc.). Poiché la prestazione acustica viene definita in fase di progettazione e dipende dal degrado degli elementi del sistema, in questa sede considereremo che se gli altri parametri (strutturale, termico, etc.) vengono mantenuti in up time (funzionanti) allora anche la prestazione acustica della chiusura verticale sarà garantita di conseguenza. Per quanto riguarda l'obsolescenza, è chiaro che nuovi materiali maggiormente performanti potrebbero migliorare la prestazione secondo le nuove necessità che possano sorgere.

La tecnica di **posa in opera**, come abbiamo visto in precedenza, è un fattore che influenza direttamente la manutenibilità del sistema parete: abbiamo già detto come la posa in opera a secco faciliti notevolmente le operazioni di manutenzione e sostituzione dei singoli componenti, permettendo di combattere degrado e obsolescenza di ciascuno di essi.

Per quanto riguarda la prestazione di **impatto ambientale**, la manutenzione correttiva può combattere l'obsolescenza di un sistema costituito da elementi ad alto impatto ambientale con altri dalle più elevate prestazioni. Per sua stessa natura questa prestazione non è soggetta a fenomeni di degrado.

La prestazione di **assorbimento inquinanti** può essere invece influenzata sia dal degrado che dall'obsolescenza. Di fatto, la maggior parte dei sistemi di parete verticale non possiede una prestazione in tal senso e si trova già in una situazione di obsolescenza. I sistemi che invece la posseggono possono essere comunque soggetti al degrado e la durata della prestazione dipenderà dal degrado stesso dei componenti attivi.

Infine, anche il requisito di **riciclabilità a fine vita** è a sua volta soggetto soprattutto all'obsolescenza piuttosto che al degrado. Questa prestazione deve essere prevista in progettazione e ad oggi, come per l'assorbimento inquinanti, la maggior parte dei sistemi di parete del costruito non la prevede. In questo senso, si può prevedere la manutenzione correttiva dei sistemi sostituendo materiali non riciclabili con altri dalle prestazioni migliori (completamente o parzialmente riciclabili).

Vediamo allora come si configurano i sistemi di parete ventilata tradizionali in comparazione con il sistema GRE_EN_S in quanto a durata stimata del sistema nel mantenimento delle suddette prestazioni.

13.6 DURATA DI UNA PARETE VENTILATA

Per quanto riguarda il degrado della **prestazione strutturale**, abbiamo visto come questa, al netto delle condizioni ambientali esterne e dell'uso improprio del sistema parete, dipenderà fondamentalmente dalle caratteristiche di resistenza al degrado del suo strato resistente autoportante.

La totalità dei modelli di parete ventilata fin qui analizzati presentava uno strato resistente realizzato in blocchi in laterizio o CLS, compattati da malta cementizia.

Sia per i blocchi in laterizio che per quelli in CLS, la durata stimata è maggiore di 70 anni, per tanto stimiamo che la performance di resistenza strutturale di una parete ventilata tipo sarà garantita per almeno 70 anni (mean time to failure).

Per quanto riguarda la **prestazione termica**, i materiali isolanti più comuni sono caratterizzati da una durata media compresa tra i 40 ed i

55 anni (fa eccezione per esempio la lana di pecora, con durata media tra i 56 ed i 70 anni). Tuttavia, a differenza dei materiali isolanti, le membrane normalmente utilizzate come barriere al vapore (ad esempio il Polietilene PE o il Polipropilene PP) presentano una durata stimata media tra gli 11 ed i 25 anni. Un rivestimento esterno a base di intonaco garantisce una protezione agli strati più interni per un periodo in media compreso tra i 26 ed i 40 anni. Se dunque i materiali isolanti presentano una durata media fino a 55 anni, il degrado della barriera dopo i primi 25 e la conseguente alterazione della permeabilità al vapore della stratigrafia del sistema possono indurre un degrado accelerato dei coibenti ed una conseguente diminuzione progressiva della prestazione termica. Possiamo dunque affermare che per garantire la continuità della prestazione termica del sistema si dovrebbe prevedere una manutenzione preventiva delle barriere al vapore con una frequenza minima di 25 anni e dei materiali coibenti con una frequenza di circa 55 anni.

La metodologia di **posa in opera** delle pareti ventilate, come visto, agevola la manutenzione e sostituzione dei componenti dello strato isolante, della struttura di aggancio e dello strato di rivestimento esterno che pertanto possono essere gestiti con relativa semplicità. Per contro, la posa in umido dello strato resistente rende molto complessa la manutenzione e praticamente impossibile la sostituzione dei singoli elementi.

Per quanto riguarda l'**impatto ambientale**, la prestazione può essere migliorata agendo sull'obsolescenza dei materiali isolanti, delle strutture di aggancio e dei rivestimenti esterni, adottando materiali a basso impatto ambientale. Allo stato attuale non si può fare nulla per quanto riguarda lo strato resistente del costruito. Trattandosi di

obsolescenza non possiamo fornire una stima di durata, in quanto dipende da normative che cambiano continuamente.

Lo stesso discorso fatto per l'impatto ambientale riguarda anche il **riciclaggio a fine vita** dei componenti. Strato isolante, struttura di aggancio e rivestimento esterno possono essere facilmente mantenuti o sostituiti per combattere l'obsolescenza tecnologica mentre non si può fare nulla per lo strato resistente.

Per quanto riguarda la prestazione di **assorbimento inquinanti**, sappiamo che le pitture e malte fotocatalitiche utilizzabili in sistemi di parete ventilata hanno una durata limite oltre la quale la fotocatalisi non avviene più, a seguito di un periodo di "spegnimento" progressivo. Pertanto, la prestazione nell'assorbimento inquinanti di una parete ventilata andrà diminuendo progressivamente a partire dalla posa in opera fino alla perdita completa della stessa. Una manutenzione preventiva dovrebbe dunque essere posta in agenda prima che la prestazione scenda sotto una certa soglia. Sfortunatamente in questa sede non siamo a disposizione di una stima della durata media della prestazione fotocatalitica di pitture e malte poiché a parità di prodotto questa dipende fortemente dalle condizioni al contorno (geometria di applicazione, livelli di inquinamento, posizionamento, etc.).

Dal punto di vista delle prestazioni dunque, una parete ventilata presenta una durata media superiore ai 70 anni, durante i quali saranno necessari interventi di manutenzione preventivi ad alcuni elementi del sistema per prevenire la diminuzione o la perdita di alcune prestazioni.

Sarà necessario intervenire mediamente ogni 25 anni sulle barriere al vapore e ogni 55 anni sui materiali isolanti. Sarà altresì necessario monitorare le prestazioni per combattere l'obsolescenza in termini di

impatto ambientale e riciclabilità a fine vita, nonché il degrado delle prestazioni di assorbimento inquinanti per poter sostituire gli elementi attivi prima dello spegnimento della reazione.

Tabella 62 - Quadro sinottico della durata media delle prestazioni di una parete ventilata

TIPO DI PRESTAZIONE	DURATA MEDIA E CONSIDERAZIONI
Strutturale	> 70 anni
Termica	In media tra i 41 ed i 55 anni, con manutenzione ogni 25 anni della barriera al vapore
Acustica	Garantita dal mantenimento delle altre
Manutenibilità (Posa in Opera)	Media, alcuni elementi sono difficili/impossibili da mantenere o sostituire
Impatto Ambientale	Può essere parzialmente sostituito per combattere l'obsolescenza
Riciclaggio a Fine Vita	Può essere parzialmente sostituito per combattere obsolescenza
Assorbimento Inquinanti	Sostituzione necessaria preventivamente allo spegnimento della fotocatalisi

Analizzando la durata di ciascuno strato funzionale di una parete ventilata, possiamo affermare quanto segue.

Lo strato di **rivestimento interno** in intonaco è caratterizzato da una durata media tra i 26 ed i 40 anni, mentre come abbiamo detto lo strato resistente presenta una durata superiore ai 70 anni.

Per quanto riguarda lo **strato isolante**, la durata media sarà tra i 41 ed i 55 anni, con la necessità di effettuare una manutenzione preventiva periodica ogni 25 anni alla barriera al vapore.

La **struttura di aggancio** del rivestimento esterno, in alluminio, presenta anch'essa una durata stimata superiore ai 70 anni, in quanto

l'alluminio non solo è un materiale molto resistente ma è anche riciclabile per altri utilizzi una volta smantellato.

Infine veniamo al **rivestimento esterno**. I materiali più comuni per il rivestimento esterno di facciate ventilate sono generalmente materiali molto resistenti, giacchè come abbiamo visto devono resistere all'azione degli agenti atmosferici, proteggendo gli altri strati funzionali della chiusura verticale. Per questa ragione, materiali come il cotto, il CLS, la pietra, l'acciaio o l'alluminio garantiscono una durata media stimata maggiore di 70 anni. Un po' meno resistenti sono materiali più ricercati come il gres ceramico ed i pannelli in legno, che possono garantire le proprie prestazioni per un periodo di tempo compreso tra i 41 ed i 55 anni.

STRATO FUNZIONALE	DURATA E CONSIDERAZIONI
Rivestimento Interno	Intonaco: 26-40 anni
Resistente Autoportante	> 70 anni
Isolante	In media tra i 41 ed i 55 anni, con manutenzione ogni 25 anni della barriera al vapore
Camera d'aria	/
Struttura di Aggancio	Acciaio o alluminio: > 70 anni
Rivestimento Esterno	Mediamente > 70 anni (Gres e legno compresi tra 41 e 55 anni)

Con una selezione dei materiali votata alla durabilità, alcuni strati funzionali di una parete ventilata possono garantire le proprie prestazioni durante un periodo di tempo mediamente maggiore ai 70 anni. Fanno eccezione in questo quadro solamente il rivestimento interno (facilmente manutenibile) e lo strato isolante, il quale

necessiterà di manutenzioni preventive periodiche ogni 25 anni per la barriera al vapore ed ogni 50 anni circa per lo strato coibente.

13.7 DURATA DEL SISTEMA GRE_EN_S

Per comparare le prestazioni in termini di durata di un sistema di parete ventilata con quelle del sistema GRE_EN_S, andremo ad effettuare la stessa analisi sulle prestazioni e sugli strati funzionali già condotta nel paragrafo precedente.

Per quanto riguarda l'analisi della durata riferita alle prestazioni del sistema, sappiamo che la **prestazione strutturale** della parete è garantita dal sistema BYBOX di montanti e traversi in acciaio zincato (resistente al degrado per ossidazione) che sono caratterizzati da una durata media stimata maggiore di 70 anni. Contemporaneamente, il telaio dei pannelli vegetati ed i mezzi di aggancio al sistema Bybox sono realizzati in alluminio, che a sua volta garantisce una continuità di prestazioni di durata media stimata anch'essa maggiore ai 70 anni.

Le **prestazioni termiche** invernali ed estive oltre che dal materiale isolante sono fortemente influenzate dallo strato vegetale esterno. Come abbiamo visto lo strato isolante viene realizzato in sughero, la cui durata viene stimata in un periodo di tempo tra i 41 ed i 55 anni (valore medio normale per i materiali isolanti). Tuttavia, il sistema utilizza una miscela di sughero con altri materiali e leganti, per cui non possiamo stimare con esattezza la sua durata e ci limiteremo ad utilizzare il dato per il sughero. Il sistema prevede anche l'utilizzo di una barriera al vapore la quale, come nel caso delle pareti ventilate, garantisce le proprie prestazioni per periodi di tempo compresi tra gli 11 ed i 25 anni. Anche se la vita media di piante come la Lonicera Nitida è di circa 20 anni, lo strato vegetale esterno garantisce prestazioni distinte a seconda di vari fattori esterni e del suo proprio

ciclo di vita³⁶. Il rivestimento vegetale, oltre ad essere caratterizzato da una vita media di 20 anni, necessiterà anche di manutenzione regolare attraverso potatura (ogni 2 o 3 anni) e irrigazione. Per le necessità di irrigazione è stato previsto un impianto stabile interno alla stratigrafia. Bisogna inoltre considerare che nonostante la vita media delle piante sia di 20 anni, la loro vita utile, ossia il periodo di tempo per cui possono essere impiegate in facciata con profitto, è in realtà molto minore (pensiamo alla fase di crescita della pianta, per esempio) e per questo motivo stimeremo in questa sede la sua vita utile come pari a circa 10 anni.

Come nel caso della parete ventilata, le **prestazioni acustiche** saranno garantite fintanto che lo saranno anche le altre.

La **posa in opera** completamente a secco aumenta la manutenibilità del sistema agevolando sia la manutenzione ordinaria che la straordinaria, preventiva e correttiva, nonché gli interventi di sostituzione di tutti i componenti della chiusura verticale.

Le prestazioni di **impatto ambientale** del sistema GRE_EN_S sono già all'avanguardia per via della progettazione basata sul LCA ma nonostante questo, l'alta manutenibilità del sistema posato a secco permette la sostituzione futura dei singoli componenti qualora si rendesse necessario migliorare la prestazione a causa di una possibile obsolescenza futura.

La progettazione del sistema basata sulla metodologia del LCA ha previsto la possibilità di **riciclaggio a fine vita** dei componenti del sistema ed anche in questo caso la prestazione potrà solo essere

³⁶ La crescita del fogliame incide molto sulle prestazioni del sistema: scarsità di fogliame garantisce prestazioni del sistema inferiori rispetto alla sua proliferazione.

migliorata con interventi di sostituzione dei componenti per ovviare alla loro possibile obsolescenza futura.

La prestazione **nell'assorbimento degli inquinanti** presenti nell'aria dipende da moltissimi fattori esterni ma il fattore di riferimento per la durata è costituito dalla longevità e salute delle piante installate in facciata. Come abbiamo visto, la vita media della Lonicera nitida è di 20 anni, per cui possiamo affermare che anche la prestazione di assorbimento inquinanti sia della medesima durata (seppur con alti e bassi prestazionali dovuti alle condizioni del contorno). Tuttavia, abbiamo anche visto come la prestazione dipenda dalla salute della pianta: attività di manutenzione come l'irrigazione e la potatura saranno fondamentali per garantire la continuità di prestazioni durante il suo ciclo di vita. A questo dobbiamo anche aggiungere la considerazione fatta precedentemente sulla vita utile delle piante: se infatti potranno essere utilizzate con profitto in facciata solo per circa 10 anni, allo stesso tempo la prestazione di assorbimento inquinanti sarà garantita dal momento stesso della nascita della pianta fino al momento della sua morte. Questo significa che la prestazione sarà attiva durante i 20 anni di vita della pianta però sarà caratterizzata da alti e bassi prestazionali a seconda delle sue condizioni.

Tabella 63 - Quadro sinottico della durata media delle prestazioni del sistema GRE_EN_S.

TIPO DI PRESTAZIONE	DURATA MEDIA E CONSIDERAZIONI
Strutturale	Acciaio zincato e alluminio, > 70 anni
Termica	In media tra i 41 ed i 55 anni, con manutenzione ogni 25 anni della barriera al vapore
Acustica	Garantita dal mantenimento delle altre

Manutenibilità (Posa in Opera)	Elevata, tutti gli elementi sono singolarmente manutenibili e sostituibili
Impatto Ambientale	Può essere completamente sostituito per combattere l'obsolescenza
Riciclaggio a Fine Vita	Può essere completamente sostituito per combattere l'obsolescenza
Assorbimento Inquinanti	20 anni, con manutenzione preventiva frequente. Possibilità di sostituire le piante.

Analizzando la durata degli strati funzionali del sistema GRE_EN_S, dobbiamo tornare a fare riferimento alla struttura semplificata costituita dalla finitura interna formata da una doppia lastra in gesso rivestito con barriera al vapore, dal telaio a montanti in acciaio zincato, lo strato isolante in sughero riciclato, la lastra in calcestruzzo fibrorinforzato, il telaio di ancoraggio dei moduli vegetati in acciaio zincato ed infine i propri moduli vegetati GRE_EN_S.

Per quanto riguarda la **doppia lastra in gesso rivestito**, la sua durata media stimata è di oltre 70 anni. La barriera al vapore che la accompagna presenta invece una durata stimata tra gli 11 ed i 25 anni.

Anche il **telaio a montanti in acciaio zincato** presenta una durata media stimata maggiore di 70 anni. In particolare, il processo di zincatura rende l'acciaio estremamente più resistente all'ossidazione e per tanto allunga notevolmente la sua vita utile.

Non è semplice stimare la durata media dei **pannelli isolanti** sviluppati in laboratorio attraverso l'unione di grani di sughero, cuoio rigenerato, colla naturale alla caseina, gesso e acqua. Ad ogni modo possiamo affermare che la durata di un materiale complesso, composto dalla miscela di vari materiali, presenterà una durata media stimata uguale alla durata media del materiale meno durevole. Nel caso della miscela

che compone il pannello isolante del sistema GRE_EN_S prendiamo dunque come riferimento la durata media stimata per il sughero, tra i 41 ed i 55 anni.

Per quanto riguarda la **lastra in calcestruzzo** fibrorinforzato, sappiamo che la durata media stimata per il calcestruzzo è maggiore ai 70 anni. L'aggiunta di fibre in acciaio zincato all'impasto non dovrebbe incidere su questo valore in quanto anche l'acciaio presenta la medesima durata media.

Infine, prendiamo in considerazione la stima di vita utile che ci aspettiamo dai **moduli vegetati GRE_EN_S**. Poiché si tratta di un elemento composto da vari materiali distinti, dovremo considerare nella stima ciascuno dei suoi componenti, presi singolarmente, per poi trarre conclusioni complessive.

Come detto, per la L. Nitida ci aspettiamo una vita media di 20 anni, tuttavia la sua vita utile (il periodo di tempo durante il quale potrà essere utilizzata con profitto in facciata) sarà notevolmente minore, per cui la possiamo stimare in 10 anni.

Anche per quanto riguarda la fibra di Polipropilene Riciclata, il tessuto in viscosa ed il terreno, la vita utile stimata per ciascuno di essi si aggira intorno ai 10 anni. Più in dettaglio, possiamo affermare che si è deciso di sfruttare il medesimo dato di vita utile delle piante per poter ricambiare con lo stesso intervallo temporale anche gli altri componenti che le accolgono e gli forniscono nutrimento, in modo che le prestazioni si mantengano entro un certo intervallo ottimale.

Per quanto riguarda la rete geomatica in polipropilene, possiamo attenderci una vita utile maggiore, pari a 20 anni, mentre l'elemento sicuramente maggiormente durevole sarà senza dubbio l'alluminio riciclato che come detto costituisce l'elemento "strutturale" del

modulo vegetato. Se dall'alluminio non riciclato ci aspettiamo una vita utile maggiore di 70 anni, per l'alluminio riciclato stimiamo una vita utile di circa 50 anni.

Tabella 64 - Quadro sinottico della stima della vita utile dei componenti del modulo GRE_EN_S (Giordano, Montacchini, & Tedesco, 2014).

Materiale	Vita Utile Prevista
Lonicera Nitida	10 anni
Fibra di Polipropilene Riciclata	10 anni
Tessuto in Viscosa	10 anni
Terreno	10 anni
Rete geomatica in polipropilene	20 anni
Lega di alluminio riciclato	50 anni

Riassumendo dunque, all'incirca ogni 70 anni dovremo preoccuparci di rinnovare gli elementi strutturali del sistema, mentre ogni 50 anni circa sarà necessario rinnovare strato isolante e pannelli vegetati. Più in dettaglio, la posa in opera a secco del sistema ci permetterà dunque di ricambiare il "pacchetto interno" dei moduli vegetati con una frequenza di circa 10 anni.

Tabella 65 - Quadro sinottico della durata stimata per la parete vegetata GRE_EN_S.

STRATO FUNZIONALE	DURATA E CONSIDERAZIONI
Rivestimento Interno	Gesso rivestito: > 70 anni
Resistente Autoportante	Acciaio zincato e alluminio, > 70 anni
Strato Isolante	Sughero: tra i 41 ed i 55 anni
Calcestruzzo fibrorinforzato	> 70 anni
Moduli vegetati GRE_EN_S	Pacchetto interno: 10 anni Telaio in alluminio riciclato: 50 anni

13.8 CONCLUSIONI DEL RAFFRONTO

Prendendo in considerazione le pareti ventilate vediamo dunque come le prestazioni siano in generale garantite per periodi di tempo molto ampi, con ridotte necessità di manutenzione. Tuttavia, dobbiamo sottolineare come la difficoltà di intervenire sul sistema prevenga molto spesso gli interventi di manutenzione preventiva dall'essere effettuati e ritardi quelli di manutenzione correttiva. In questo modo, le prestazioni delle pareti ventilate tendono a diminuire nel tempo senza che si intervenga per contrastarne il degrado.

Il sistema di parete vegetata GRE_EN_S presenta caratteristiche analoghe per quanto riguarda lo strato resistente e lo strato isolante mentre denota la necessità di una manutenzione molto frequente nello strato vegetato (basti pensare solo all'irrigazione delle piante). Anche in questo caso però, è necessario sottolineare come la facilità di intervento sul sistema (per via della posa in opera completamente a secco) permetta non solo di realizzare facilmente interventi di manutenzione preventiva e correttiva contro il degrado ma anche di agire con efficacia contro l'obsolescenza degli elementi, permettendo migliorare le prestazioni del sistema nel tempo, al passo con il mutare delle condizioni al contorno (per esempio la legislazione).

Se dunque la necessità di manutenzione più frequente del sistema GRE_EN_S di per sé si potrebbe considerare uno svantaggio, va però notato come in realtà questo garantisca da un lato il mantenimento di prestazioni che il sistema di parete ventilata non può garantire (per esempio l'abbattimento attivo della CO₂ in atmosfera), dall'altro il miglioramento di altre prestazioni come quella termica o acustica che altrimenti sarebbero minori o addirittura inesistenti (pensiamo all'assorbimento acustico dei rumori esterni od alla riduzione dell'effetto isola di calore).

Al confronto dunque, il sistema GRE_EN_S come molte nuove tecnologie, ha bisogno di maggiori “attenzioni” ma, anche grazie a questo, garantisce prestazioni migliori.

CONCLUSIONI FINALI

Analizzate una per una le caratteristiche che si era deciso prendere in considerazione, in questo capitolo conclusivo della nostra trattazione cercheremo dunque di trarre delle conclusioni generali che prendano in considerazione un poco tutti gli aspetti visti finora. Prendiamoci dunque un momento per ricapitolare quanto visto fino ad ora.

Abbiamo analizzato in primo luogo la **massa superficiale** delle due soluzioni di sistema di chiusura verticale, chiarendo come il sistema GRE_EN_S sia caratterizzato da un peso al metro quadro di molto inferiore a quello di un comune sistema di parete ventilata e come questa caratteristica permetta al sistema GRE_EN_S di presentare notevoli vantaggi rispetto ad un involucro tradizionale, facilitando in particolar modo le operazioni di trasporto e di montaggio e diminuendo i costi ed i tempi di costruzione.



Figura 88 - Raffronto Massa Superficiale

La seconda caratteristica presa in considerazione è stata lo **spessore** dei due sistemi, a proposito del quale abbiamo concluso la nostra analisi sottolineando come il sistema GRE_EN_S si presenti di base notevolmente più sottile della miglior soluzione di involucro comunemente presente sul mercato. Come considerazione aggiuntiva, notavamo come la crescita delle piante debba essere tenuta sotto controllo attraverso la potatura, al fine di permettergli di contribuire alle altre prestazioni senza creare però problemi collaterali.

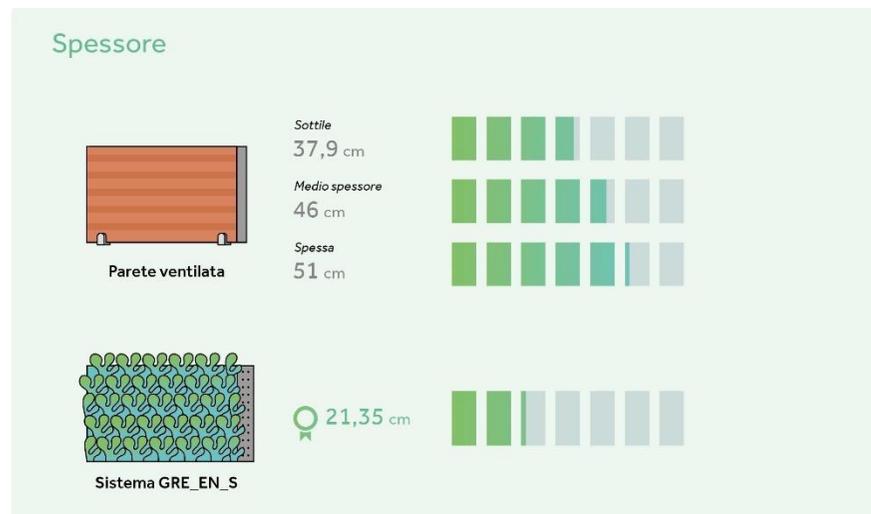


Figura 89 - Raffronto Spessore

In seguito allo spessore, abbiamo analizzato le **prestazioni termiche invernali**, caratteristica fondamentale della progettazione di qualsiasi sistema di involucro. Abbiamo visto come durante il periodo invernale, le pareti ventilate possano essere in grado di garantire prestazioni termiche all'altezza dei requisiti di legge e delle necessità degli utenti. Contemporaneamente, abbiamo anche notato come l'utilizzo in facciata di diverse specie vegetali (di tipo sempreverde) aumenti

spiccatamente la resistenza superficiale della parete e come il sistema parete GRE_EN_S garantisca prestazioni termiche di alto livello, superando nettamente le prestazioni della maggior parte dei sistemi di parete ventilata comuni ma non riuscendo tuttavia a soddisfare i parametri necessari per l'ottenimento dei finanziamenti previsti dal D.M. 26/01/10.

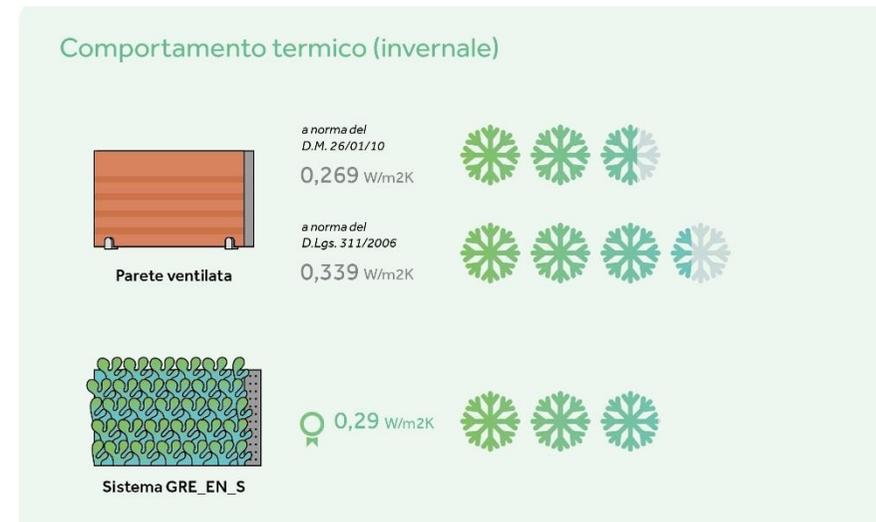


Figura 90 - Raffronto Comportamento Termico Invernale

Per quanto riguarda le **prestazioni termiche estive**, abbiamo preso in considerazione dei parametri distinti: mettendo a confronto la capacità dei due sistemi di parete di sfasare i picchi termici durante le giornate estive, abbiamo notato come il sistema GRE_EN_S, costituito da un substrato di spessore molto ridotto, non sia in grado di ritardare l'onda termica in maniera adeguata, mentre al contrario, l'alta massa superficiale di una tipica parete ventilata presenta una capacità di sfasamento maggiore. Contemporaneamente abbiamo analizzato la questione relativa alla temperatura superficiale esterna, che ha

sottolineato come il rivestimento testato per la parete ventilata presenti delle prestazioni ampiamente inferiori a quelle garantite dal sistema GRE_EN_S: il sistema mantiene le temperature esterne delle facciate a valori decisamente più bassi rispetto a qualunque parete ventilata, contribuendo così attivamente alla riduzione dell'effetto Isola di Calore. Concludiamo l'analisi sulle prestazioni termiche estive dicendo che il sistema GRE_EN_S presenta prestazioni molto buone di comfort interno per gli utenti e prestazioni eccellenti di riduzione passiva delle temperature ambientali esterne.



Figura 91 - Raffronto Comportamento Termico Estivo

Una volta analizzate le prestazioni termiche, abbiamo studiato le **prestazioni acustiche** dei due sistemi a confronto, sottolineando come la parete ventilata possa presentare una capacità di isolamento acustico maggiore, soprattutto grazie alla maggiore massa superficiale ed al maggior spessore degli elementi. Contemporaneamente però, abbiamo visto come sia caratterizzata da prestazioni non all'altezza in

termini di fonoassorbimento dei rumori esterni. Abbiamo visto come la parete ventilata sia in grado di garantire un adeguato livello di comfort acustico agli ambienti interni, favorendo però al contempo il riverbero dei rumori esterni e dunque l'inquinamento acustico esterno. Per quanto riguarda il sistema GRE_EN_S abbiamo visto come sia in grado di garantire un ottimo fonoassorbimento esterno per abbattere l'inquinamento acustico degli ambienti esterni, sacrificando però in parte il livello di comfort acustico interno, presentando un livello di isolamento acustico minore di quello che può garantire un sistema di parete ventilata ma comunque in linea con i requisiti di legge.

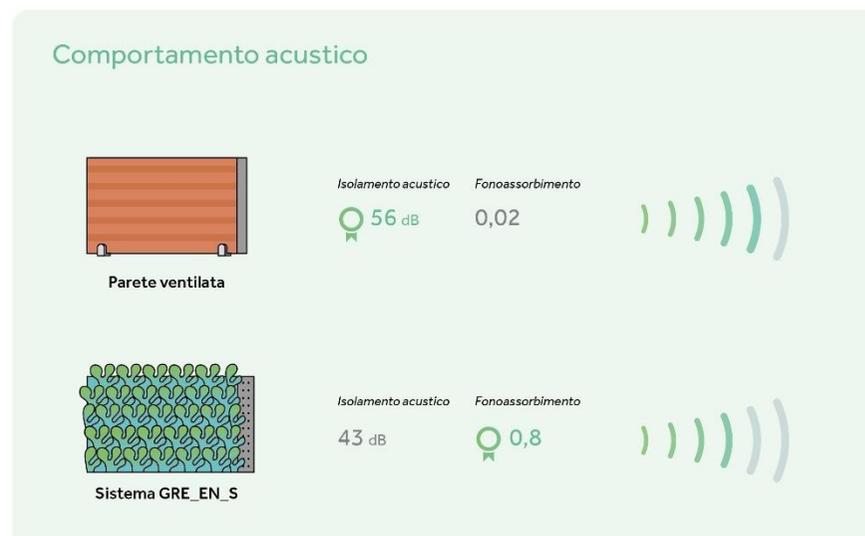


Figura 92 - Raffronto Comportamento Acustico

Successivamente abbiamo analizzato le caratteristiche di **posa in opera**, per la quale facciamo riferimento ad un concetto principale: la differenza tra posa a secco ed a umido. Per quanto la maggior parte del processo di posa in opera di una parete ventilata sia a secco,

tuttavia la realizzazione della muratura portante sarà sempre realizzata a umido e ciò comporterà immancabilmente una serie di svantaggi. Al contrario, la posa in opera completamente a secco del sistema GRE_EN_S permette non solo di evitare i problemi suddetti ma anche di appoggiare di alcuni vantaggi aggiuntivi, come per esempio la possibilità di ricambiare i componenti con elementi maggiormente performanti, senza necessariamente smantellare l'intera struttura. In questo ambito dunque, il sistema GRE_EN_S, rispetto ad una parete ventilata qualsiasi, possiede i seguenti vantaggi: maggiore semplicità di posa in opera, manutenibilità completa senza necessità di demolizione e possibilità di riciclaggio e corretto smaltimento della totalità dei suoi componenti.



Figura 93 - Raffronto Posa in Opera

Una volta analizzata la posa in opera di entrambi i sistemi, ci siamo focalizzati sul momento finale della loro vita, il cosiddetto **fine vita**. In questo caso erano tre i fattori determinanti, l'utilizzo di materiali riciclati per la realizzazione del sistema, la loro disassemblabilità e la possibilità di smaltimento o riciclaggio a fine vita. Per quanto riguarda

l'utilizzo di materiali riciclati, abbiamo visto come il sistema GRE_EN_S sia ampiamente all'avanguardia: il sistema presenta un comportamento ampiamente migliore dei sistemi di parete ventilata proposti che non prevedono l'impiego di materiali riciclati per la propria produzione. Per quanto concerne la disassemblabilità dei sistemi, i componenti del sistema GRE_EN_S risultano completamente disassemblabili: anche i componenti per così dire "indivisibili", come il substrato o le piante, possono essere completamente riciclati in quanto biodegradabili. I sistemi di parete ventilata presentano quasi sempre una porzione della propria stratigrafia realizzata mediante processo umido e che dunque risulta non disassemblabile.

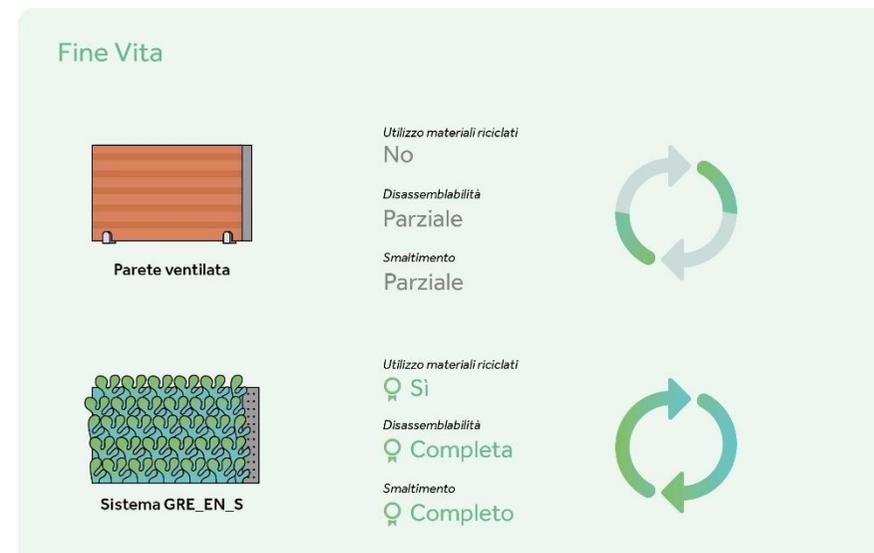


Figura 94 - Raffronto Fine Vita

Per quanto concerne gli scenari di riciclaggio dei materiali utilizzati, infine, abbiamo concluso che entrambi i sistemi presentano varie possibilità di recupero e riutilizzo, anche se il sistema GRE_EN_S

presenta possibilità nettamente superiori a quelle dei sistemi di parete ventilata.

Per quanto riguarda la caratteristica analizzata successivamente, **l'impatto ambientale**, abbiamo preso in considerazione come parametro il contenuto di CO₂ equivalente, in due scenari principali: nello scenario standard, il sistema GRE_EN_S presenta una prestazione analoga a quella che possono offrire le migliori pareti ventilate; per quanto concerne il secondo scenario, che prevede l'utilizzo di materiali riciclati, abbiamo visto che allo stato attuale, il sistema GRE_EN_S presenta prestazioni superiori alla maggior parte dei sistemi di parete ventilata normalmente impiegati in edilizia e solamente il disegno di pareti ventilate appositamente studiate per alte prestazioni in termini di contenuto di CO₂ potrebbe permettere a tali sistemi di presentare prestazioni che si avvicinino a quelle registrate per il sistema parete GRE_EN_S.



Figura 95 - Raffronto Impatto Ambientale

La penultima delle caratteristiche analizzate, **l'assorbimento inquinanti**, è una caratteristica che di per sé le normali pareti ventilate non posseggono. Abbiamo visto come l'unico modo per conferirgli tale caratteristica sarebbe l'utilizzo di una pittura fotocatalitica sul rivestimento esterno. Dunque, per quanto riguarda le necessità di abbattimento dei VOC presenti nell'aria urbana indoor e outdoor, la tecnologia fotocatalitica sarà una soluzione viabile per dotare di questa prestazione il costruito già esistente, tipico del patrimonio architettonico italiano. Per quanto riguarda la progettazione del nuovo invece, l'adozione del sistema GRE_EN_S permetterà di fornire le nuove pareti con una prestazione caratterizzata non solo dall'abbattimento inquinanti ma anche dall'immissione in atmosfera di ossigeno nuovo dovuto alla respirazione delle piante.



Figura 96 - Raffronto Assorbimento Inquinanti

Infine abbiamo terminato con una serie di considerazioni sulla **durata** dei due sistemi: considerando le pareti ventilate abbiamo visto come queste garantiscano le proprie prestazioni per periodi di tempo molto ampi, con ridotte necessità di manutenzione. Tuttavia, abbiamo anche

evidenziato come la difficoltà di intervenire sul sistema prevenga molto spesso gli interventi di manutenzione preventiva dall'essere effettuati e ritardi quelli di manutenzione correttiva. Al contrario abbiamo determinato come il sistema di parete vegetata GRE_EN_S presenti caratteristiche analoghe alle pareti ventilate per quanto riguarda lo strato resistente e lo strato isolante mentre denoti la necessità di una manutenzione molto frequente nello strato vegetato. Anche in questo caso però, abbiamo sottolineato come la facilità di intervento sul sistema permetta non solo di realizzare facilmente interventi di manutenzione preventiva e correttiva contro il degrado ma anche di agire con efficacia contro l'obsolescenza degli elementi.

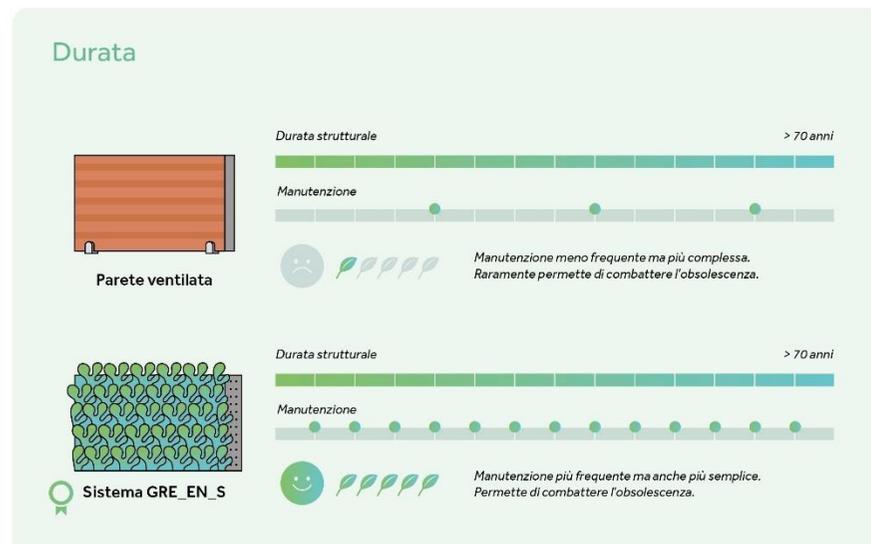


Figura 97 - Raffronto Durata

La nostra conclusione a questo proposito è stata dunque che se la necessità di una manutenzione più frequente del sistema GRE_EN_S di per sé si potrebbe considerare uno svantaggio, in realtà essa garantisce da un lato il mantenimento di prestazioni che il sistema di

parete ventilata non può garantire (per esempio l'abbattimento attivo della CO₂ in atmosfera), dall'altro il miglioramento di altre prestazioni come quella termica o acustica che altrimenti sarebbero minori o addirittura inesistenti. Al confronto dunque, il sistema GRE_EN_S come molte nuove tecnologie, ha bisogno di maggiori "attenzioni" ma, anche grazie a questo, garantisce migliori prestazioni.

Analizzando tutte queste considerazioni insieme, possiamo finalmente determinare come, su 10 caratteristiche e 15 parametri analizzati il sistema GRE_EN_S presenti prestazioni migliori rispetto alle comuni pareti ventilate in ben 12 parametri.

I tre parametri in cui la parete ventilata può superare le prestazioni del sistema GRE_EN_S (allo stato dell'arte) sono la trasmittanza termica totale, lo sfasamento dei picchi termici e l'isolamento acustico.

Nonostante questo, dobbiamo sottolineare come il valore di trasmittanza termica totale del sistema GRE_EN_S sia rappresenti una prestazione assolutamente competitiva rispetto allo scenario generale del nuovo costruito. Lo sfasamento dei picchi termici è un parametro da prendere in considerazione ma allo stesso tempo non è una prestazione fondamentale, soprattutto quando il sistema garantisce un buon livello di isolamento termico (quale è il caso del sistema GRE_EN_S). Infine, per l'isolamento acustico vale lo stesso discorso della trasmittanza termica, la prestazione di alcune pareti ventilate può essere superiore però quella garantita dal sistema GRE_EN_S è comunque una buona prestazione.

In conclusione dunque, come possiamo vedere in Figura 98, il sistema GRE_EN_S supera le prestazioni dei sistemi di parete ventilata nella maggior parte dei parametri mentre presenta buone prestazioni anche nei pochi parametri in cui si dimostra leggermente inferiore.

Scheda riassuntiva



Parete ventilata

	Massa superficiale	Spessore	Comportamento termico invernale	Comportamento termico estivo	Comportamento acustico	Posa in opera	Fine vita	Impatto ambientale	Assorbimento inquinanti	Durata
Parete ventilata	<p><i>Leggera:</i> 194 kg/m²</p> <p><i>Di peso medio:</i> 448 kg/m²</p> <p><i>Pesante:</i> 599 kg/m²</p>	<p><i>Sottile:</i> 37,9 cm</p> <p><i>Spessore medio:</i> 46 cm</p> <p><i>Spessa:</i> 51 cm</p>	<p><i>a norma del D.M. 26/01/10:</i> 0,269 W/m²K</p> <p><i>a norma del D.Lgs. 311/2006:</i> 0,339 W/m²K</p>	<p><i>Temperatura parete esterna:</i> fino a 40°</p> <p><i>Sfasamento picchi termici:</i> Alto</p>	<p><i>Isolamento acustico:</i> 56 dB</p> <p><i>Fonoassorbimento:</i> 0,02</p>	<p>Parzialmente a secco</p>	<p><i>Utilizzo materiali riciclati:</i> No</p> <p><i>Disassemblabilità:</i> Parziale</p> <p><i>Smaltimento:</i> Parziale</p>	<p><i>Emissioni di CO₂:</i> 57,55 kg/m²</p>	<p>Solo con pittura fotocatalitica</p>	<p>> 70 anni</p> <p><i>Manutenzione:</i> Meno frequente</p> <p><i>Obsolescenza:</i> Sì</p>
Sistema GRE_EN_S	118 kg/m ²	21,35 cm	0,29 W/m ² K	<p><i>Temperatura parete esterna:</i> 20° in media</p> <p><i>Sfasamento picchi termici:</i> Ridotto</p>	<p><i>Isolamento acustico:</i> 43 dB</p> <p><i>Fonoassorbimento:</i> 0,8</p>	Completamente a secco	<p><i>Utilizzo materiali riciclati:</i> Sì</p> <p><i>Disassemblabilità:</i> Completa</p> <p><i>Smaltimento:</i> Completo</p>	<p><i>Emissioni di CO₂:</i> 20,45 kg/m²</p>	Sì	<p>> 70 anni</p> <p><i>Manutenzione:</i> Frequente</p> <p><i>Obsolescenza:</i> No</p>

Figura 98 - Raffronto Riassuntivo

BIBLIOGRAFIA

- (NEG-TAP), N. E. (2001). *Transboundary air pollution: acidification, eutrophication and ground-level Ozone in the UK*. Edimburg: UK Department for environment, food and rural affairs.
- 15186-2, U. E. (2010). *Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements using sound intensity – Part 2: field measurements*.
- AA. VV., & Faragò, F. (2008). *Manuale pratico di edilizia sostenibile*. Napoli: Esselibri S.p.A.
- ANIT, A. N. (2006). *Manualetto di acustica edilizia*. Milano: ANIT.
- Associati, A. P. (2010). La corretta esecuzione delle murature in laterizio. *Sezione Murature, 24*.
- Bartoli, B. (2008). *Sostenibile dalla A alla Z. 250 schede per progettare ecologicamente*. Napoli: Esselibri S.p.A.
- Baruffa, R., & Bruschi, A. (2010). *Acustica nei componenti edilizi*. Palermo: Dario Flaccovio Editore.
- Bazzocchi, F. (2002). *Facciate Ventilare: Architettura, Prestazioni e Tecnologia*. Firenze: Alinea Editrice s.r.l.
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A. H., & GhaffarianHoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy, Vol. 115*, 411-428.
- Berge, B. (2009). *The ecology of building materials*. Oxford: Elsevier Ltd.

- Binas, V., Venieri, D., Kotzias, D., & Kiriakidis, G. (2017). Modified TiO₂ based photocatalysts for improved air and health quality. *J Materiomics* 3, 3-16.
- Bortolato, C. (2004). *Cento e Più Rimedi per Difendersi dall'Inquinamento*. Roma: Edizioni Mediterranee.
- Canada, E. (2012). *National Inventory Report 1990-2012: Greenhouse Gas Sources and Sinks in Canada - Executive Summary*. Environment Canada.
- Chiodo, S. (2011). *Estetica dell'architettura*. Roma: Carocci editore S.p.A.
- CNR, I. I. (2003). *MALTE CEMENTIZIE FOTOCATALIZZATE (ECORIVESTIMENTO) per la riduzione dell'inquinamento atmosferico*. Roma: CNR.
- Cocchi, A. (1998). *Inquinamento da rumore*. Rimini: Maggioli Editore.
- Fascia, F., & Iovino, R. (2009). *L'elemento di Fabbrica di Confine*. Tratto da Spizuoco: <http://www.spizuoco.it/documentazione/dispense/Architettura%20Tecnica/PROGETTO%20INVOLUCRO%20maggio%202009.pdf>
- Ferrara, V., & Farruggia, A. (2007). *Clima: istruzioni per l'uso. I fenomeni, gli effetti, le strategie*. Milano: Edizioni Ambiente.
- Gallauziaux, T., & Fedullo, D. (2011). *Manuale pratico dell'isolamento termico e acustico*. Napoli: Gruppo Editoriale Simone.
- Giordano, R. (2010). *I prodotti per l'edilizia sostenibile. La compatibilità ambientale dei materiali nel processo edilizio*. Napoli: Esselibri S.p.A.
- Giordano, R., Montacchini, E., & Tedesco, S. (2014). Eco-innovation based on Life Cycle Assessment and Green-Design. Strategies in designing and manufacturing a Living Wall System. *World SB Barcelona*, (p. 1-10). Barcelona.
- Herzog, T., Krippner, R., & Lang, W. (2004). *Facade Construction Manual*. Basel: Birkhäuser Edition Detail.
- Hinds, W. C. (2012). *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Hoffmann, M., Scot, M., Choi, W., & Bahnemann, D. (1995). Environmental applications of semiconductor photocatalysis. *Chemical Review*, 69-96.
- Huang, Y., Sai Hang Ho, S., Lu, Y., Niu, R., Xu, L., & Cao, J. (2016). Removal of Indoor Volatile Organic Compounds via Photocatalytic Oxidation: A Short review and Prospect. *Molecules*, 21-56.
- Hum, R., & Lai, P. (2007). *Assessment of Biowalls: an overview of plant and microbial-based indoor air purification system*. Queen's University .
- J, P., KL, T., P, T., M, V., T, L., & H, S. (2000). *Exposure and Risk Assessment for Fine and Ultrafine Particles in Ambient Air*. Kuopio: National Public Health Institute of Finland.
- Janes, H., Sheppard, L., & Shepherd, K. (2006). *Statistical Analysis of Air Pollution Panel Studies: An Illustration*. Washington: UW Biostatistics Working Paper Series. Working Paper 300.
- Janhall, S. (2015). Review on urban vegetation and particle air pollution e Deposition. *Atmospheric Environment* 105, 130-137.
- Lucchini, A., Mazzucchelli, E. S., & Stefanazzi, A. (2017). *Rivestimenti a capotto ad alte prestazioni. Teoria e Soluzioni*. Milano: Rockwool Italia S.p.a.
- Martorana, C., & Becherini, S. (2006). *Assorbimento e isolamento acustico negli edifici*. Santarcangelo di Romagna (RN): Maggioli Editore.

- Matheos Santamouris, D. N. (2001). *Energy and Climate in the Urban Built Environment*. Oxford: Earthscan.
- Mayer, P., & Bourke, K. (2005). Durability rankings for building component service life prediction. *10DBMC International Conference On Durability of Building Materials and Components*, (p. TT4-118). Lyon.
- Miyawaki, A. (1998). Restoration of urban green environments based on the theories of vegetation ecology. *Ecological Engineering*, 11, 157-165.
- Molinari, C. (2002). *Procedimenti e metodi della manutenzione edilizia*. Napoli: Esselibri S.p.A.
- Monestiroli, A. (2002). *La Metopa e il Triglifo. Nove Lezioni di Architettura*. Roma-Bari: Edizioni Laterza.
- Morton, J. (2012). *Guida all'Eurocodice 6. Progettazione di Strutture in Muratura: EN 1996-1-1*. Roma: EPC S.r.l.
- Nowak, D., Mcpherson, E., & Rowntree, R. (1994). *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project*. Chicago: United States Department of Agriculture, General Technical Report NE-86.
- Ohmann, L., Grigal, D., & R.B., B. (1976). *Biomass estimation for five shrubs from Minnesota*. St. Paul, MN, USA: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station.
- Ottelè, M., Perini, K., & Haas, E. (2014). Life cycle assessment (LCA) of green façades and living wall systems. *Eco-efficient Construction and Building Materials - Life Cycle Assessment (LCA), Eco-Labeling and Case Studies*, 457-483.
- Ottelè, M., Van Bohemen, H. D., & Fraaij, A. L. (2010). Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls. *Ecological Engineering* 36, 154-162.
- Perago, A. (2006). *Progettare le chiusure verticali*. Santarcangelo di Romagna (RN): Maggioli Editore.
- Perini, K., & Perez, G. (2018). *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Perini, K., Ottelè, M., Giulini, S., Magliocco, A., & Roccotiello, E. (2017). Quantification of fine dust deposition on different plant species in a vertical greening system. *Ecological Engineering*, 100, 268-276.
- Petroff, A., Mailliat, A., Amielh, M., & Anselmet, F. (2008). Aerosol dry deposition on vegetative canopies. Part II: A new modelling approach and applications. *Atmospheric Environment*, Vol. 42, N. 16, 3654-3683.
- Poli, T., De Angelis, E., & Fiori, M. (2009). *Le Pareti Perimetrali Opache*. Santarcangelo di Romagna (RN): Maggioli Editore.
- Pugh, T. A., MacKenzie, A. R., Whyatt, J. D., & Hewitt, C. N. (2012). The effectiveness of green infrastructure to improve urban air quality in urban street canyons. *Environmental Science & Technology*, 46 (14), 7692-7699.
- Shen, S., Kronawitter, C., & Kiriakidis, G. (2017). An overview of photocatalytic materials. *J Materiomics* 3, 1-2.
- Siragusa, L. (s.d.). *Sistemi di Inverdimento Verticale per l'Architettura Urbana*. Tratto da IUAV: <http://www.iuav.it/SISTEMA-DE/Archivio-d/approfondi/progettare/Prodotti-Sistemi-di-inverdimento-verticale.pdf>
- Van Driel, B. A., Kooyman, P., Van den Berg, K., Schmidt-Ott, A., & Dik, J. (2016). A quick assessment of the photocatalytic activity of TiO2

pigments - From lab to conservation studio! *Microchemical Journal* 126, 162-171.

Vos, P. E., Maiheu, B., Vankerkom, J., & Janssen, S. (2013). Improving local air quality in cities: To tree or not to tree? *Environmental Pollution, Volume 183*, 113-122.

Wania, A., Bruseb, M., Blonda, N., & Webera, C. (2012). Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations. *Journal of Environmental Management, vol. 94, issue 1*, 91-101.

Watts, A. (2011). *Modern construction envelopes*. Vienna: SpringerWienNewYork.

Wolter, S., Diebel, J., & Schroeder, F.-G. (2009). DEVELOPMENT OF HYDROPONIC SYSTEMS FOR URBAN FACADE GREENERY. *Proceedings of the International Symposium on Soilless Culture and Hydroponics, Acta Hort.* 393-402.

Yunus, M., & Iqbal, M. (1996). *Plant Response to Air Pollution*. Chichester: Wiley.