

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica
**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Edile**

Tesi di Laurea Magistrale

Utilizzo di Tecnologie d'involucro ad acqua per il miglioramento dell'efficienza energetica e del comfort degli edifici



Relatori

firma del relatore (dei relatori)
prof. Marco Perino
prof.ssa Valentina Serra

Candidato

Martina Morello

Abstract

Nel lavoro di tesi proposto è stato riportata uno studio sui componenti adattivi di facciata, facendo particolare attenzione alle tecnologie che sfruttano l'acqua per ridurre il carico di raffrescamento e di riscaldamento dell'impianto.

Lo studio riporta una spiegazione sui meccanismi di funzionamento delle tecnologia di partizione verticale e di copertura ad acqua (Water Wall e Roof Pond), confrontandone le prestazioni.

Si analizzano due casi di studio sperimentale: una parete ad acqua e un sistema di copertura Roof Pond.

Il primo caso di studio riporta la progettazione per un'analisi prestazionale in laboratorio di un'innovativa partizione verticale in calcestruzzo aerato e si spiega in che modo è stata installata e calibrata la strumentazione che verrà utilizzata in successivo studio nel quale sarà testata l'efficienza del modulo di parete proposto.

Il secondo caso di studio riporta i risultati ottenuti dalla simulazione di un sistema di copertura ad acqua (Roof Pond) attraverso la simulazione sperimentale con il programma di calcolo Energy Plus.

Sono riportati i risultati relativi al confronto tra il sistema analizzato, una copertura tradizionale e un Cool Roof, determinandone i vantaggi in termini di risparmio energetico.

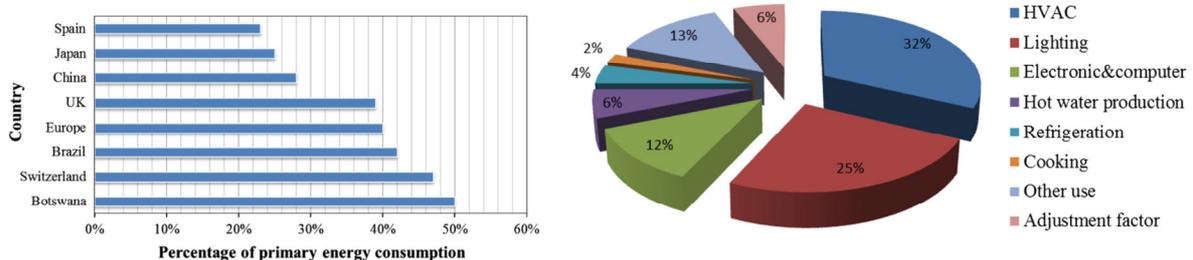
Indice

La Sostenibilità in Edilizia	4
Capitolo 1: Componenti Dinamici e Adattivi di Facciata	8
1.1 Facciate Avanzate Integrate	13
1.2 Attivazione della Massa Termica	17
1.3 Tecnologie di Stoccaggio di Energia Termica	21
1.4 Sistemi di Memorizzazione di Energia Termica del Terreno	27
1.5 Sistemi ad Isolamento Dinamico	29
1.6 Materiali a Cambiamento di Fase	31
Capitolo 2: Tecnologie di Involucro Utilizzanti l'Acqua	36
2.1 Partizioni Verticali	37
2.1.1 Evoluzione Storica della Parete ad Acqua ed Identificazione delle Tecnologie Murarie	37
2.1.2 Pareti ad acqua con involucro opaco	40
2.1.3 Pareti ad acqua con involucro semitrasparente	42
2.1.4 Pareti ad acqua con materiali a cambiamento di fase	44
2.1.5 Pareti ad acqua combinate con altre tecnologie	45
2.1.5.1 Parete ad Acqua combinata con Sunspace	45
2.1.5.2 Parete ad acqua combinata con camino solare	46
2.1.6 Parete evaporativa ad acqua	47
2.2 Partizioni Orizzontali	49
2.2.1 Roof Pond Scoperti	51
2.2.2 Roof Pond Scoperti con Sistema di Spruzzatura	51
2.2.3 Roof Pond Coperti con un Sistema Mobile	52
2.2.4 Roof Pond Coperti con un Sistema Mobile e sistema di spruzzatura	53
2.2.5 Skytherm	53
2.2.6 Energy Roof	54
2.2.7 Cool Roof	56
2.2.8 Roof Pond Calpestabili	56
2.2.8.1 Roof Pond Calpestabili con Isolamento Integrato	57
2.2.8.2 Roof Pond Calpestabili con Circolazione Notturna	57
2.2.9 Roof Pond realizzati con Sacchetti di Iuta	58
2.2.10 Shaded Roof Pond	58
2.2.11 Roof Pond Ventilati	59
2.2.12 Roof Pond con Tetto Chiuso	60
2.2.12 Roof con Collettore solare integrato	60
2.2.13 Varianti alternative di Roof Pond	61
Capitolo 3: Esempi di Edifici Esistenti	63
3.1 Esempi Progettuali di Pareti ad Acqua	63
3.1.1 Abitazione Steve Baer New Mexico	63
3.1.2 Complesso Prisma a Norimberga in Germania	64
3.1.3 Council House (CH2) a Melbourne in Australia	66
3.1.4 EcoBoulevard a Madrid in Spagna	68
3.1.5 La Banca del Territorio di Toyo	70
3.2 Esempi Progettuali di Roof Pond	71
3.2.1 Studio GAD in Turchia	71
3.2.2 Skytherm House	73
3.2.3 Architetture di Servizi del sito Expo Milano	75

Capitolo 4: Realizzazioni e Casi di Laboratorio	76
4.1 Esempi di Studio di Pareti ad Acqua	76
4.1.1 Combinazione con il camino solare e il sistema di WWS	76
4.1.2 Valutazione delle performance di una parete ad acqua opaca in Australia	83
4.1.3 Valutazione delle performance di una parete ad acqua trasparente in Australia	87
4.1.5 Effetto di miglioramento termico delle pareti di raffreddamento passivo	93
4.1.6 Effetto di raffrescamento di una parete di raffreddamento evaporativa in ceramica porosa e capacità	96
4.1.7 Effetto di raffrescamento evaporativo mediante un fil d'acqua esposto alla ventilazione naturale	99
4.2 Esempi di Studio di Roof Pond	101
4.2.1 Prestazioni termiche di diverse configurazioni di un sistema basato sul laghetto per condizioni subtropicali	101
4.2.2 Prestazione di un Roof Pond in clima arido	104
4.2.3 Prestazione di un Roof Pond con sacchi iuta utilizzato per il raffrescamento estivo	107
4.2.4 Prestazione di un Roof Pond psicometrico	110
4.2.5 Confronto prestazionale di sistemi solari passivi	112
4.3 Confronti Critici tra i Sistemi ad Acqua	115
Capitolo 5: Casi di Studio: Partizione Verticale in Calcestruzzo Aerato e Roof Pond	118
5.1 Descrizione dell'Idea e dei Principi di Funzionamento della Partizione Verticale in Calcestruzzo Aerato.	118
5.2 Progetto e Taratura di un Sistema Sperimentale per l'Analisi delle Prestazioni	119
5.2.1 Calibrazione dello Strumento	123
5.3 Descrizione di un modello di Simulazione Sperimentale per l'Analisi Prestazionale di un Roof Pond	127
5.3.1 Descrizione e Analisi Prestazionale Del modello con Copertura tradizionale piana	130
5.3.2 Descrizione e Analisi Prestazionale Del modello con Cool Roof	131
5.3.3 Descrizione e Analisi Prestazionale Del modello con un Roof Pond	132
5.3.4 Confronti Prestazionali fra i Tre Sistemi di Copertura	134
Conclusioni	140

La Sostenibilità in Edilizia

Un quarto del consumo mondiale totale di energia riguarda l' utilizzo di energia negli edifici residenziali e commerciali. Nel 2011 l'energia primaria consumata nel settore era: 23% in Spagna, il 25% in Giappone, il 28% in Cina, il 39% nel Regno Unito, il 40% in Europa, 42% per il Brasile, il 47% per la Svizzera e il 50% per il Botswana. Il consumo di energia nel settore dell'edilizia potrebbe aumentare fino ad eguagliare la somma percentuale dei consumi nel settore industriale e nel settore dei trasporti. La climatizzazione, insieme ai sistemi di ventilazione e riscaldamento (HVAC), consumano quasi la metà dell'energia spesa dagli edifici ed è prevista una crescita di domanda di circa 1,6% entro il 2040. La sostenibilità risulta essere un aspetto tenuto particolarmente in considerazione nel settore edilizio, in quanto l'uomo vuole vivere in un ambiente salubre e confortevole nonostante l'inesauribilità delle risorse del pianeta. L'aumento demografico insieme alla crescente domanda di benessere dei paesi sviluppati hanno portato alla necessità di un'eco-efficienza di circa dieci volte superiore rispetto a quella attuale, ciò significa che dovrebbero essere impiegate solo il 10% delle risorse che vengono utilizzate oggi. In molti paesi caldi, il desiderio di migliorare gli standard di vita e la qualità del lavoro è la causa dell'aumento repentino di domanda di raffrescamento, in Pakistan, ad esempio la domanda supera l'offerta e nel settore edile l'utilizzo di aria condizionata è cresciuto dal 15% al 30% rispetto al 2005. In altri paesi come la Cina, le indagini su edifici per uffici hanno costato che a luglio e agosto, la percentuale va dal 30% al 60% per quattro edifici per uffici ad Hong-Kong, dal 24% al 54% per centocinque a Pechino, del 34,3% per 198 edifici a Shenzhen e 44% per tre edifici a Wuhan. La necessità di ridurre la richiesta di risorse ha permesso di implementare piani di sostenibilità nella progettazione ed ottimizzazione dell'efficienza energetica di un edificio. Il consumo energetico è fortemente influenzato da caratteristiche intrinseche dell'edificio quali: orientamento, materiali e sistemi energetici adoperati. Questi ultimi influenzano significativamente la domanda di risorse al fine di raggiungere la condizione di comfort. Come mostrato in figura, con il 32% di consumo energetico dell'edificio i sistemi HVAC uniti al sistema di illuminazione (25%), spendono più del 50% delle risorse utilizzate dall'interno edificio.



L'impatto ambientale degli edifici dipende dai materiali utilizzati, dal consumo energetico dell'edificio in funzione del clima, del vetro, della ventilazione, infatti, nei climi nordici il carico ambientale è quasi nullo in confronto al consumo energetico operativo che è del 90%, differentemente nei climi caldi, il carico ambientale è un fattore predominante e nelle costruzioni sostenibili influenzerebbe il 90% dell'impatto sull'ambiente.

Esiste un collegamento diretto tra comfort e consumi, infatti, è semplice pensare che maggiore sia il comfort e maggiori siano i consumi. Negli anni sono state studiate misure per ridurre il consumo dei sistemi HVAC mantenendo le condizioni di benessere termo-igrometrico desiderato.

Le soluzioni possono essere individuate intervenendo o sulla gestione dei sistemi, migliorandone l'efficienza, oppure migliorare le prestazioni degli involucri edilizi, i quali svolgono il ruolo di interfaccia tra esterno ed interno e permettono di regolare il guadagno e la perdita di calore mediante strategie passive volte a ridurre la domanda energetica.

La corretta progettazione dei componenti opachi e trasparenti che compongono l'involucro e il suo isolamento è fondamentale nella regolazione dei flussi di calore che attraversano la parete, devono essere progettati correttamente in quanto i consumi legati al fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento ne sono fortemente influenzati. In vista di una progettazione a basso consumo è estremamente importante sviluppare ed adoperare tecniche costruttive nuove che consentano il raggiungimento del benessere e della salubrità dell'ambiente.

Per molti anni si è ritenuto che per migliorare il comportamento prestazionale delle facciate, la soluzione più adeguata fosse l'isolamento, facendo in modo che l'abitazione facesse da scudo, protezione rispetto agli agenti atmosferici, minimizzando le perdite ed i guadagni di calore attraverso le pareti, inoltre, molti architetti, hanno trascurato gli aspetti energetici prediligendo l'estetica degli edifici. A causa di questo modo di operare da parte dei progettisti, sono stati realizzati edifici con facciate dal comportamento prestazionale scadente che necessitavano l'installazione di sistemi HVAC sovradimensionati.

Col crescere dell'urbanizzazione, l'aumento di calore legato alle attività umane e ai cambiamenti nella copertura della Terra hanno generato l'effetto di "isola di calore urbana", a causa dell'effetto di deposito accumulato nelle superfici. Queste, assorbono una grande quantità di calore di giorno facendo in modo che la loro temperatura sia maggiore della temperatura dell'aria esterna durante la notte.

Le problematiche ambientali e l'insoddisfazione degli occupanti, hanno portato alla consapevolezza dei progettisti sulla necessità di studiare dei sistemi d'involucro nuovi, che non combattano contro le condizioni climatiche ma che si adattino e sfruttino fonti rinnovabili.

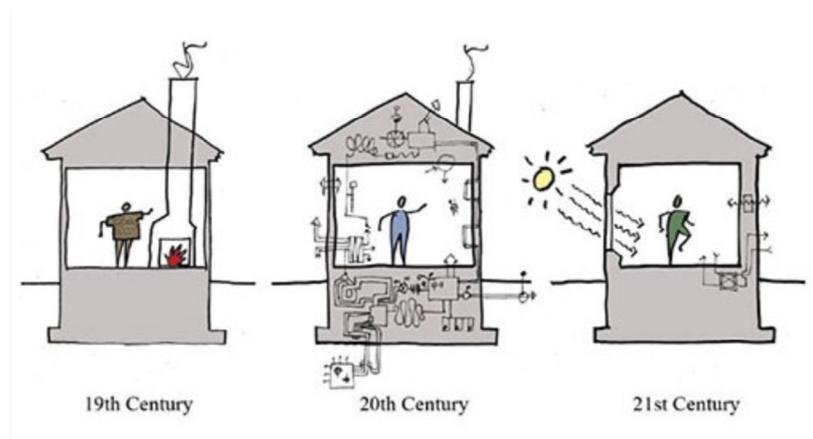
La riduzione di calore assorbito o l'abbassamento delle temperature superficiali dell'involucro sembrano essere due soluzioni chiave per mitigare questo effetto. Per tali ragioni negli ultimi anni è in forte crescita l'interesse per le strategie di efficienza energetica per edifici passivi ecocompatibili che sembrano rappresentare una soluzione alla crisi energetica e all'inquinamento ambientale nel settore, ad Hong Kong, ad esempio, l'implementazione di strategie passive per il raggiungimento dell'efficienza energetica ha consentito un risparmio del 31,4%.



In un periodo storico in cui l'energia primaria prodotta per riscaldamento e raffrescamento rappresenta un terzo dell'energia primaria mondiale prodotta, il protocollo di Kyoto, ha imposto degli obiettivi al fine di ridurre il livello di inquinamento ambientale dei paesi industrializzati. Questi obiettivi, possono essere raggiunti solamente introducendo delle tecnologie con bassa emissione di anidride carboniche nelle costruzioni.

Nasce un concetto nuovo di facciata, le “facciate attive” che attraverso l'utilizzo di elementi responsivi possono integrarsi alle tecnologie bioclimatiche per creare ambienti confortevoli. Questi elementi sono in grado di regolare il proprio rendimento energetico in funzione delle condizioni interne ed esterne, sfruttando ad esempio, le capacità di accumulo di energia solare di alcuni materiali o altre fonti rinnovabili.

Gli edifici diventano degli elementi attivi che sfruttano le variazioni climatiche del clima esterno come risorsa per ottenere benefici in termini di risparmio energetico, limitando la necessità di realizzare grossi ed articolati impianti di riscaldamento e di raffrescamento.



Il nuovo concetto di componente edilizio “attivo” deve soddisfare esigenze differenti rispetto al passato, rendendo insufficienti le caratteristiche dei materiali e delle caratteristiche tecnologiche tradizionali, in particolare devono sfruttare le risorse naturali e regolare il flusso di calore immagazzinando energia successivamente rilasciata nell'ambiente in funzione delle esigenze dell'utente.

Il comportamento reattivo porta ad un aumento di energia significativo migliorando la qualità interna dell'aria avendo un impatto positivo in termini prestazionali che consentono di raggiungere gli obiettivi delle costruzioni “zero energy building”.

Questi edifici, grazie alla progettazione efficiente dell'involucro e l'ottimizzazione dei guadagni termici, permettono di ottenere vantaggi notevoli in termini energetici, riducendo il fabbisogno energetico grazie alla capacità di sfruttare risorse rinnovabili, non inquinanti e a basso costo. Sono abitazioni quasi autosufficienti, il cui bilancio energetico è quasi pari a zero. Questa nuova frontiera impone da un lato di minimizzare i guadagni di calore indesiderati attraverso la realizzazione di involucri isolanti, dall'altro lato, il sistema edilizio deve essere in grado di generare energia sufficiente per la climatizzazione. Una soluzione a queste necessità è la

progettazione di sistemi passivi di riscaldamento e di raffrescamento integrando sistemi attivi di facciata.

È importante in fase progettuale quindi:

- Studiare l'orientamento e l'ombreggiatura;
- Ottenere l'isolamento termico;
- Eliminare i ponti termici;
- Progettare la tenuta d'aria;
- Ottimizzare gli impianti e integrarli alle risorse rinnovabili.

Le facciate attive possono contribuire in maniera sostanziale nelle operazioni di retrofit energetico, per le quali spesso è sufficiente sostituire l'involucro edificio o ancora più semplicemente modificare quello esistente integrando senza stravolgerne la struttura. Quest'operazione di trasformazione di un edificio esistente riqualificando il suo comportamento in termini di efficienza energetica, sembra essere una strategia per limitare lo spreco di risorse energetiche in vista degli obiettivi di sostenibilità imposti.



Componenti finestrate, muri e tetti che fin a qualche anno fa avevo un ruolo passivo nel comportamento dell'edificio, oggi diventano tecnologie attive ed adattative nell'ottica della progettazione di un organismo che reagisce agli eventi. Le caratteristiche termofisiche degli elementi reattivi devono adattarsi alle diverse esigenze sfruttando le capacità di stoccaggio e di trasferimento di calore o aria con lo scopo di riscaldare, raffrescare, ventilare gli spazi abitativi.

Negli anni sono state sviluppate strategie di facciata tra cui: doppia pelle, adattabili, con isolamento dinamico e ventilate, strategie di accumulo energetico che utilizzano in maniera attiva le proprietà dei materiali che compongono la facciata, strategie che sfruttano nuovi sistemi di copertura e sistemi solari attivi.

Tra queste, le pareti ad acqua, sembrano essere un'ottima soluzione per il mantenimento del comfort termico degli edifici riducendone il consumo.

Le pareti ad acqua, hanno diversi vantaggi rispetto ad altri sistemi, in particolare risultano più economiche rispetto ai PCM che adoperano materiali con cambiamento di fas



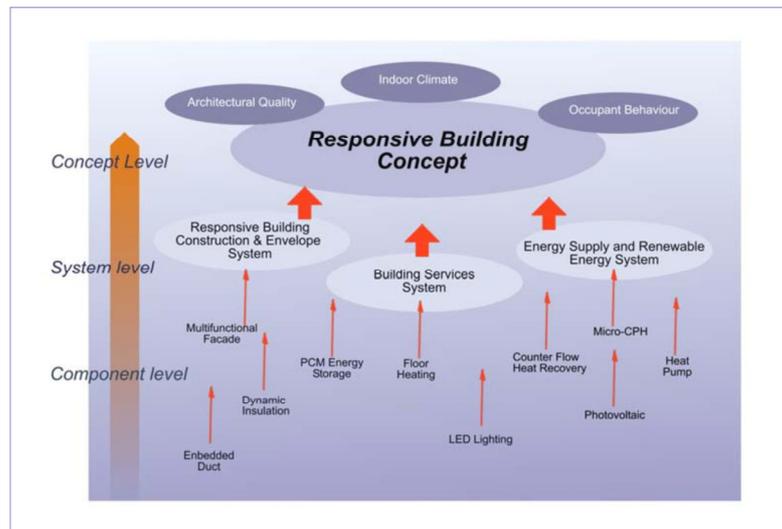
Componenti Dinamici e Adattivi di Facciata

Anticamente uno degli spetti principali da tenere in considerazione in fase di progettazione era il clima, ingegneri ed architetti non improntavano le scelte progettuali per il raggiungimento di uno standard estetico ma indirizzavano il loro studio su delle strategie per massimizzare il comfort attraverso scelte architettoniche e di design dell'edificio stesso. In fase progettuale la forma e le tecnologie adoperate dovevano favorire la diffusione di luce naturale negli ambienti, mentre le scelte relative alla composizione degli spazi e degli involucri dovevano favorire la ventilazione naturale negli spazi. Questo concetto d'integrazione tra edificio e natura, si è nel tempo perso quando nella prima metà del ventesimo secolo i sistemi HVAC si sono sviluppati, dal quel momento, i progettisti hanno iniziato a progettare liberamente ponendo attenzione principalmente al design architettonico e compensando le lacune dal punto di vista del comportamento energetico dei loro progetti installando grossi impianti volti a ristabilire il benessere degli occupanti. La diffusione di edifici alto consumo ha gravato significativamente sull'ambiente, rendendo necessaria un'inversione di tendenza.

Nell'ottica del risparmio energetico sono stati studiati metodi di riscaldamento o raffrescamento passivi e sistemi di stoccaggio di energia termica al fine di massimizzare l'efficienza minimizzando i consumi. La progettazione deve porsi come obiettivo la combinazione tra progettazione passivi e tecnologie attive trasformando le modalità di raggiungimento di benessere desiderato. Di particolare importanza è il controllo del flusso di calore e di aria legato agli agenti atmosferici a cui l'involucro edilizio è sottoposto, per tale ragione l'utilizzo di componenti adattivi sembra essere una soluzione ottimale per il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità fissati. Gli elementi adattivi sono dei componenti edilizi che modificano il loro comportamento in funzione delle condizioni ambientali a cui sono sottoposti, combinano tecnologie differenti e sfruttano le proprie capacità di stoccaggio di energia termica per rilasciarla in ambiente.

L'adattività e la flessibilità di questi sistemi è necessaria per rispondere alle condizioni meteorologiche, che in generale hanno un comportamento del tutto variabile, se i sistemi tradizionali di regolazione della temperatura, prendevano in considerazione la condizione istantanea, regolando la temperatura in base a temperature esterne ed interne, questi sistemi controllano le previsioni meteorologiche e modificano il comportamento della massa termica anticipatamente e gradualmente per le condizioni future. Questa capacità dei sistemi adattivi di modificare il proprio comportamento in funzione delle previsioni climatiche, andando ad analizzare dei dati fissi quali: temperatura, vento, umidità e radiazione solare, permette di ottenere dei vantaggi sostanziali in termini di consumi, infatti la regolazione controllata implica una diminuzione delle fluttuazioni di temperatura e un clima stabile.

I Responsive Building Elements (RBE), sono elementi costruttivi, principalmente parti dell'involucro o della struttura di un edificio come fondazioni, tamponamenti, partizioni, finestre, coperture o pavimenti che vengono progettati in modo tale ridurre i consumi energetici interagendo in maniera diretta con i sistemi di riscaldamento, raffrescamento, raffreddamento e ventilazione. L'installazione di meccanismi di controllo dell'aria e dell'illuminazione in edifici residenziali, sta rendendo sempre più importante l'utilizzo di queste strategie non solo per edifici commerciali ma per le abitazioni. Negli anni il tema della gestione di energie nelle costruzioni, sta diventando un paradigma fondamentale per le scelte progettuali, il comfort e l'efficienza dei sistemi di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione è oggi un requisito fondamentale per la progettazione di qualsiasi edificio. L'adattabilità dei RBE si traduce nella capacità di modificare le proprie caratteristiche termofisiche in funzione non solo delle caratteristiche climatiche ma soprattutto degli occupanti fungendo da riscaldamento, raffrescamento e ventilazione degli ambienti.



Una caratteristica chiave di questi elementi è la loro capacità di autoregolazione in funzione degli stimoli ambientali, attraverso dei sensori raccolgono delle informazioni che rielaborano definendo il loro comportamento. La capacità di controllo è fondamentale per il funzionamento proattivo all'edificio integrato, perché consenta la corretta integrazione del singolo componente con il comportamento degli altri componenti che fanno parte dell'edificio. Integrare diversi elementi costruttivi reattivi nella progettazione di edifici adattivi offre diversi vantaggi, non solo in termini di costi, ma anche i termini di accumulo di energia attiva e passiva, stimola l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili e basso costo e lo sviluppo di nuove tecnologie ed elementi multifunzionali.

I principi di funzionamento e i campi di applicazione di questi elementi sono molteplici:

- Involucri edilizi a trasmittanza variabile;
- Involucri edilizi a permeabilità variabile;
- Componenti in grado di immagazzinare energia;
- Sistemi vetrati con proprietà variabili;
- Elementi che sfruttano il raffreddamento evaporativo;

Questi principi vengono applicati nella realizzazione di:

- Facciate integrate, come facciate a doppia pelle con un sistema di ventilazione integrato;
- elementi costruttivi che sfruttano la propria massa termica per lo stoccaggio di calore e per il raffreddamento
- Giunto di terra di elementi di fondazione e condotti interrati e condotti interrati
- Sistemi di isolamento dinamico nelle pareti, ad esempio pareti di ventilazione che preriscaldano l'aria
- Materiali a cambiamento di fase (PCM) che integrati negli elementi costruttivi ne migliorano la capacità di stoccaggio.

In funzione dell'azione reattiva che questi elementi svolgono all'interno della costruzione vengono classificati in RBE che sfruttano il flusso di calore, la ventilazione o la trasparenza per diffondere luce solare.

Tra i primi è possibile annoverare le facciate a doppia pelle e le facciate con isolamento dinamico che riducono la domanda di raffrescamento e di riscaldamento, variando l'isolamento dell'area dell'involucro opaco o trasparente, in funzione della stagione. Questi possono controllare anche il flusso di calore che attraverso le superfici vetrate entra in ambiente.

La trasparenza dei sistemi vetrati si può regolare con RBE dalla trasparenza variabile che filtrano radiazione e luce solare in funzione delle necessità dell'utente. Esistono diverse tecnologie integrate ai componenti edilizi come si vediamo in figura.

RBE		Responsive Action						Possible type of RBE
		Intervention		Physical behaviour				
Buiding system	Element	Surface	Internal	Heat flux	Thermal storage	Transparancy	Permeability	
Envelope	Wall							AIF(TVF, OVF, PVT, PVO, SC, TM, SA, CA), DI, PCM
	Roof							AIR(TVR, OVR, PVTR, PVOR, SCR, TIMR), TMA(SA, CA) DI, PCM
	Ceiling							TMA(SA, CA), PCM
	Fenestration							AIF (Swindow)
Super structure	Colum/beam							TMA(SA, CA), PCM
	Load bearing wall							TMA(SA, CA), PCM
	Load bearing floor							TMA(SA, CA), PCM
Sub structure	Piles							TMA(CA), EC
	Foundation beams							TMA(CA), EC
Underground structure	Earth to air heat exchangers							EC
Renders and finishes	Partition wall							TMA(SA), EC
	Floor							PMC
	Ceiling							PMC

Gli RBE con capacità di stoccaggio termico, nei periodi in cui si ha un eccesso di calore, immagazzinano energia termica che rilasciano in ambiente nei periodi in cui è richiesto il

riscaldamento riducendo il carico termico. Tra questi i più comuni sono i sistemi di accoppiamento a terra, i sistemi con PCM e i sistemi di attivazione termica della massa.

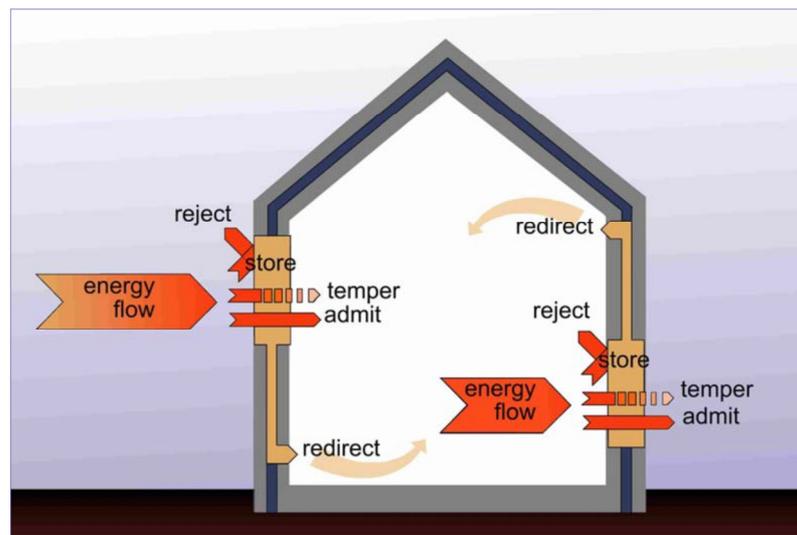
La ventilazione e la permeabilità invece possono essere controllate da RBE con facciate ventilate adattive o con condotti di areazione incorporati che regolano il flusso di calore con l'esterno monitorando la portata d'aria in ingresso e in uscita dall'edificio.

Per ottenere risultati soddisfacenti è necessario che la progettazione sia un processo integrato in cui scelte architettoniche ed impiantistiche si fondono in un unico meccanismo. La progettazione concettuale ha un ruolo fondamentale in queste tecnologie, delle valutazioni errate possono comportare non solo un aumento dei costi di realizzazione, ma anche in termini di costi energetici. Si vuole ritornare ad un approccio antico di progettazione in cui le condizioni climatiche venivano studiate per scegliere la posizione, l'orientamento e le giuste strategie di adattive, che influenzeranno il design architettonico della struttura.

La progettazione integrata è volta ad ottimizzarne la forma, la zonizzazione, applicando tecnologie che sfruttino le caratteristiche intrinseche della massa termica per ridistribuire il calore, ventilare, illuminare gli spazi, sprona a sfruttare fonti di energia rinnovabile sfruttando sistemi a bassa energia, in modo da richiedere delle fonti di energia ausiliare in maniera ridotta ed efficiente gravando sempre meno sull'ambiente.

Per molti anni si pensava di costruire edifici a basso consumo isolando l'ambiente interno dall'ambiente esterno, oggi invece, l'idea di edifici che collaborino con la natura, ha fatto in modo che l'involucro funga da intermediario tra interno ed esterno, da "pelle", rendendo la zona intermediaria una zona ibrida in cui in funzione delle condizioni desiderate, i guadagni termici vengono memorizzati, mitigati, in parte immessi e in parte espulsi dalla zona considerata.

L'involucro edilizio viene pensato come un organismo che "respira" scambia liquidi con l'ambiente, gestisce l'umidità grazie ad una barriera protettiva selettiva che interagisce con l'esterno proprio come in natura meccanismi fisici e biologici proteggono la vita dell'organismo.



Alcune soluzioni in termini di sviluppo del nuovo concetto di progettazione sono le passive house, le case solari che sfruttano l'energia solare passiva ed attiva, le Smart house che controllano la domanda di combustibili e gli edifici adattivi che rispondono alle mutevoli condizioni climatiche.

Le giuste condizioni ambientali possono essere ottenute solo attraverso un adeguato sistema di controllo degli elementi reattivi. Esistono diverse strategie di monitoraggio, la più semplice prevede che l'azione venga svolta senza alcun sistema di intelligenza artificiale, la più avanzata invece,

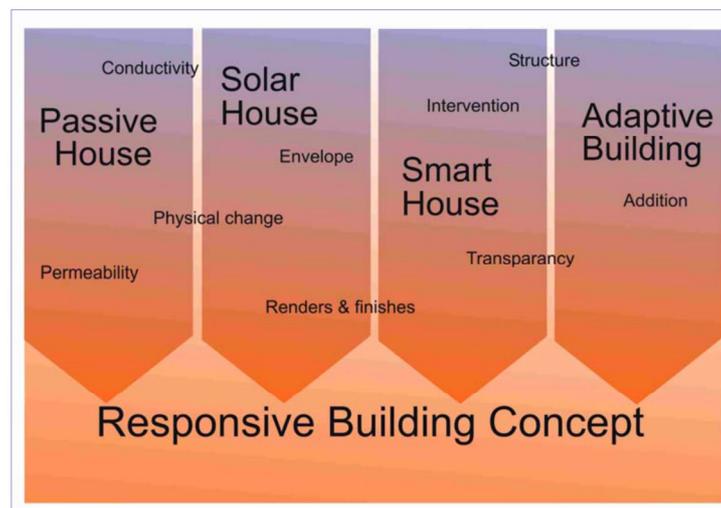
prevede un l'utilizzo del Building Management System, in cui un sistema di supervisione centrale opera senza far intervenire l'utente.

È importante progettare con cura il sistema di controllo, i parametri devono considerare una serie di requisiti variabili in funzione dell'attività del giorno e della preferenza degli occupanti, un cattivo sistema di controllo comporta un inefficiente utilizzo dei sistemi e il disagio degli utenti.

Tra i parametri più comuni includiamo:

- Clima esterno: temperatura, umidità, inquinanti;
- Clima interno;
- Componenti caratteristici della costruzione;
- Sistema di ventilazione: flussi d'aria e sbalzi di pressione;
- Salubrità dell'aria nell'ambiente.

Molte tecnologie di stoccaggio e tipologie di facciate ventilate comunemente utilizzate, sono elementi costruttivi RBE, che a causa della cattiva integrazione e strategia di controllo, ottenevano delle prestazioni energetiche inferiori rispetto a quelle previste. L'isolamento dinamico e altre tecnologie avanzate, invece, sono delle tecnologie RBE testate in laboratorio e ancora non adoperate in progetti reali.

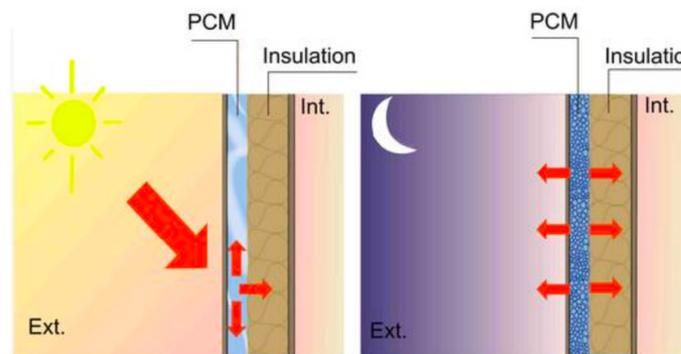


Esistono due tipologie di immagazzinamento di energia termica (TES) in funzione degli strumenti per lo stoccaggio adoperati, in particolare alcuni sistemi immagazzinano calore sensibile, altri calore latente. I primi sfruttano calcestruzzo, mattoni e acqua come sistemi di accumulo e il calore viene rilasciato quando la temperatura del mezzo varia.

I secondi rilasciano il calore durante un processo di cambio di fase mediante l'utilizzo di materiali di modifica della fase (PCM) che necessitano di variazioni temperature inferiori tra fase di immagazzinamento e fase di rilascio.

L'utilizzo di questi materiali permette lo stoccaggio dell'energia termica in eccesso risultante dal bilancio tra apporti solari gratuiti e carichi interni. Questa energia, viene successivamente rilasciata in ambiente, quando si creano delle perdite di calore, che in sistema "classico" si riscaldamento/ raffreddamento, graverebbero sull'impianto idoneo associato. I PCM possono essere sfruttati o per aumentare l'inerzia dell'edificio oppure come sistemi di accumulo rappresentando un mezzo facile d'integrazione tra involucro ed impianti.

L'utilizzo dei PCM permette di ottenere una riduzione delle fluttuazioni e dei picchi di carico.



I PCM hanno degli svantaggi:

- I PCM inorganici sono solitamente corrosivi, instabili e tardano la solidificazione;
- I PCM organici sono infiammabili e capacità di stoccaggio e conducibilità basse;
- I PCM non funzionano correttamente per tutta la gamma di temperature e condizioni climatiche.

1.1 Facciate Avanzate Integrate

Le facciate integrate AIF (Advanced integrated facade) rappresentano una soluzione efficiente di risparmio energetico, adempiendo anche ai compiti di rifugio e sicurezza. Nascono come sistemi architettonici passivi e si evolvono prima in facciate a doppia pelle (DSF) poi come facciate intelligenti che possono rispondere individualmente o cumulativamente alle condizioni climatiche esterne per mantenere comfort con dispendio basso di energia.

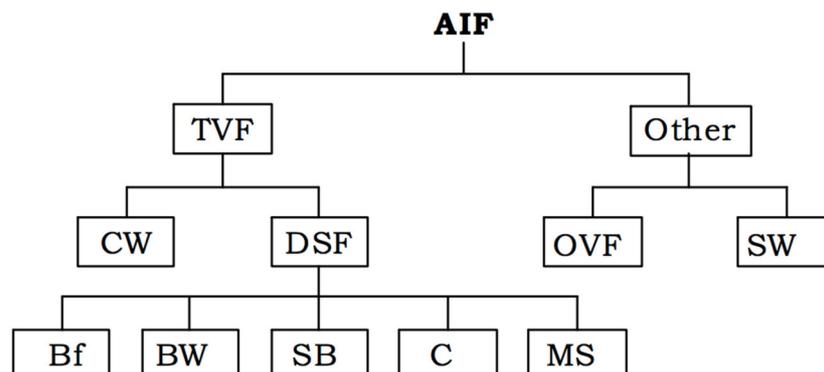
I sistemi AIF stabiliscono una forte connessione tra energia e controllo utilizzando RBE in sintonia con le condizioni ambientali della località in cui viene realizzato il progetto. Questi sistemi devono integrare i concetti di stoccaggio di calore delle facciate a doppia pelle che rendono possibile la ventilazione naturale negli ambienti grazie al flusso d'aria che si genera nella

cavità. Ogni singolo componenti deve essere studiato per lavorare in simbiosi con gli altri per ottenere una progettazione integrata.

La classificazione dei sistemi AIF si basa su tre elementi:

- Configurazione del sistema (facciate ventilate trasparenti, sistemi di finestre avanzati, facciate verticali opache);
- Flussi energetici;
- Tipo di ventilazione (naturale, meccanica, ibrida).

Si identificano sostanzialmente tre concetti di facciate: facciate verticali trasparenti (TVF), facciate verticali opache (OVF) e Swindow (SW), a loro volta questi sistemi sono caratterizzati da tecnologie differenti.



Le facciate ventilate trasparenti (TVF) sono un concetto di facciata parecchio diffuso nell'Europa continentale e nel Giappone, a causa dei climi invernali freddi ed estati miti. Utilizzano un'intercapedine tra i pannelli vetrati per modulare i flussi di calore e ridurre l'impatto termico sull'ambiente dell'edificio. Il comfort igrometrico può essere ottenuto grazie a diversi schemi di ventilazione: naturale, meccanica, ibrida.

Lo schema di funzionamento permette di ottenere risultati in termini di:

- Miglioramento dell'isolamento termico nelle stagioni invernali ed estive;
- Riduzione dei carichi solari e controllo dell'illuminazione naturale;
- Incremento di ventilazione naturale

L'aria interna alla cavità fa in modo da creare una temperatura interna alla cavità superiore rispetto alla temperatura esterna nei mesi invernali in modo tale da preriscaldare l'aria che verrà introdotta per ventilare gli spazi. Nei mesi estivi il funzionamento sarà inverso e l'aria verrà estratta

dall'ambiente interno. In funzione del tipo di pannelli, del tipo di vetri e del sistema di ombreggiamento, la parete è in grado di assorbire dei carichi di radiazione solare differenti.

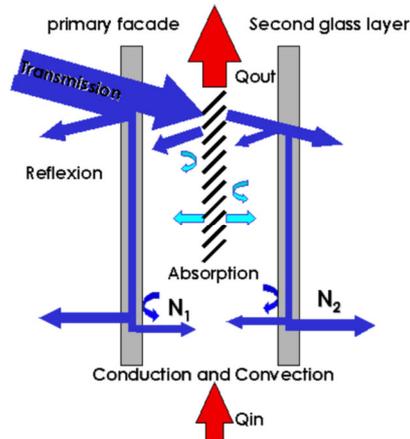


Figura 1 Schema di funzionamento facciate a doppia pelle

In alcuni casi la doppia pelle consente anche il controllo della pressione del vento in modo da ventilare in maniera naturale anche i grattacieli

Le strategie adoperate possono essere varie:

- Notturna con la funzione di rimuovere il calore accumulato da carichi interni;
- Ventilazione ibrida;
- Camini solari;
- Fornitura d'aria dall'intercapedine stessa.

Le tecnologie adoperate dai sistemi TVF possono essere di due tipi: Pareti climatiche (CW) o facciate doppie facciate (DSF).

Le prime sono caratterizzate da un sistema a doppio vetro connesso ad un sistema di ventilazione meccanica. È presente una cavità sotto un pannello che consente all'aria di fluire.

Le seconde invece sono delle facciate a doppia, a differenza della configurazione si distinguono in:

- Buffer (BF): La cavità funge da tampone e viene collegata con l'esterno al fine di essere utilizzata in caso di necessità di bilanciamento della pressione;
- Box window (BW): la facciata è divisa sia verticalmente che orizzontalmente, formando una scatola.;
- Shaft Box: ha una configurazione simile alle BW ma con un albero che scarica l'aria di scarico in una cavità;

- Corridoio (C): attraverso un corridoio, posto sul lato orizzontale delle facciate, l'aria di scarico e di alimentazione non vengono miscelate grazie al posizionamento di bocchette d'aria;
- Muti piano (MS): sono prive di cavità, sono composte da alette esterne che possono essere aperte o chiuse in modo da creare o debellare una doppia pelle.

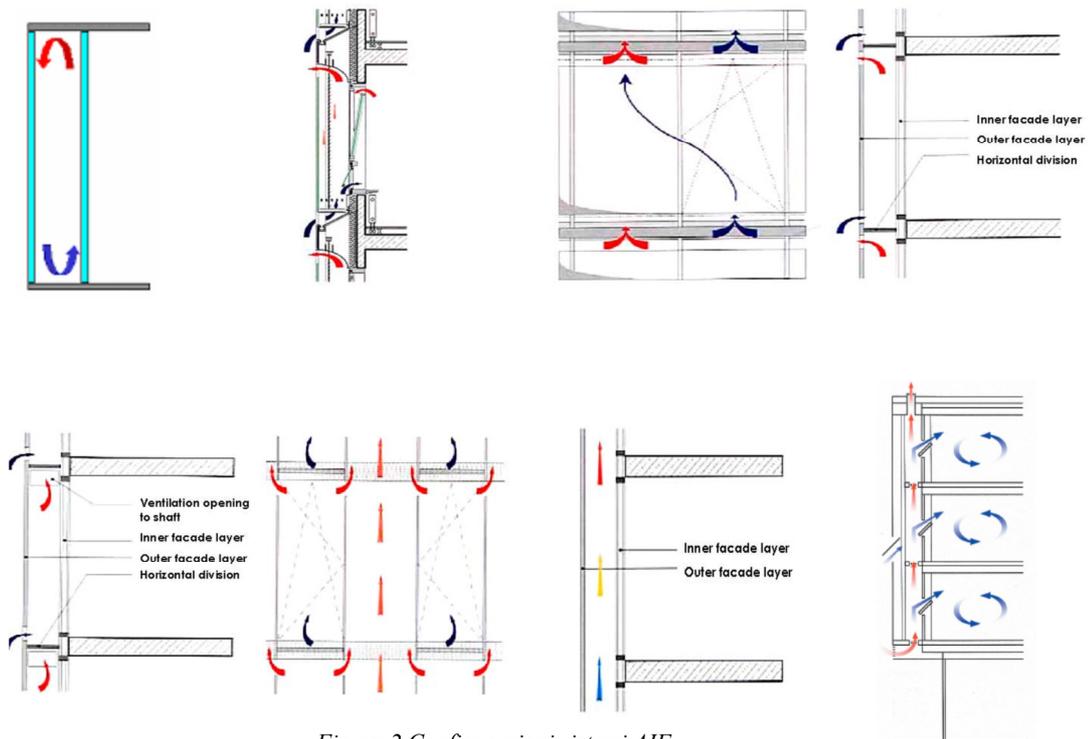
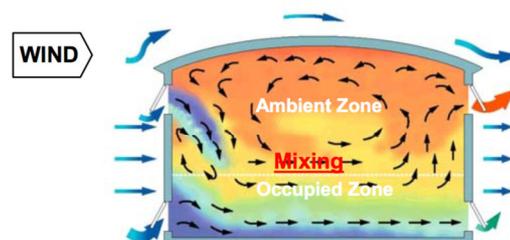


Figura 2 Configurazioni sistemi AIF

Il sistema Swindow (SW) sfrutta delle finestre a funzionamento automatico che con la connessione ai sistemi HVAC permette la ventilazione degli spazi.

Quando il vento è calmo il vetro è posizionato a 45° mentre quando il vento è forte inizia a muoversi limitando l'aria in accesso. I sistemi Swindows situati sul lato sopravvento tendono a diminuire l'angolo di apertura a causa della pressione negativa, quelli sottovento tendono ad aumentare l'angolo di apertura, in questo modo l'aria si miscela con l'ambiente, quella fresca entra in ambiente e quella vecchia viene espulsa in maniera efficiente.



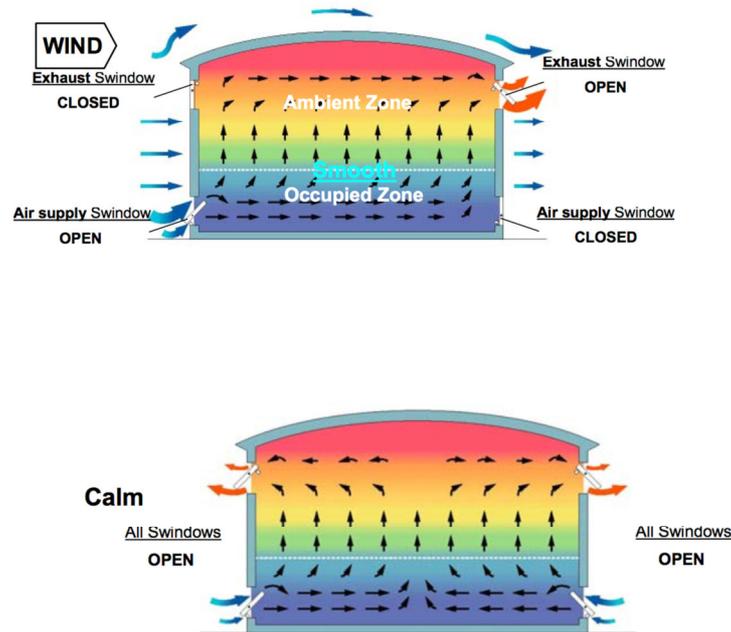


Figura 3 Schemi di flusso d'aria al variare dell'apertura dei sistemi .

Le facciate ventilate opache (OVF) o facciate a doppia pelle opache (ODSF) sono realizzate secondo due schemi differenti, nella prima il funzionamento è simile ad una parete ventilata trasparente, la seconda è simile al muro di Trombe. Quest'ultimo è un grande collettore solare che costituito da una parete realizzata con materiali ad alta captazione solare combinata con una vetrata isolata che forma un'intercapedine d'aria e un sistema di bocchette che regolano la circolazione dell'aria.

Durante la stagione invernale questa configurazione permette di migliorare i guadagni totali e ridurre le perdite immettendo on ambiente l'aria riscaldata all'interno dell'intercapedine in ambiente. Nella stagione estiva, invece, il comportamento è inverso, l'aria circola in modo da ridurre i carichi solari.

1.2 Attivazione della Massa Termica

Un nuovo approccio di raffrescamento e riscaldamento è l'attivazione della massa termica (TMA), è un nuovo approccio che sfrutta le proprietà della massa per gestire in maniera efficiente i flussi di energia. L'applicazione di sistemi di riscaldamento solare passivo, il riscaldamento a stoccaggio termico, raffrescamento a terra o notturno sono delle tecniche passive che negli anni hanno trovato ampia considerazione.

I componenti tipicamente applicati come massa termica sono:

- Involucro edilizio;
- Partizione interna;
- Struttura;
- Arredamento.

Possono essere classificati in massa termica interna ed esterna, la prima è esposta alla temperatura interna dell'aria (interazione indiretta), la seconda alla temperatura esterna (interazione diretta).

L'applicabilità con risultati più soddisfacenti si ha nelle zone con variazioni climatiche significative e clima moderato poiché l'eccessiva umidità crea problemi di condensa e le temperature troppo rigide permette di sfruttare le sole capacità di riscaldamento del sistema.

Le masse termiche possono essere a "farfalla", caratterizzate da leggerezza, sono costituite da materiali leggeri, ad esempio il vetro, sono in grado di rispondere in maniera rapida ai cambiamenti di radiazione solare, luce e temperatura. Differentemente gli edifici con una massa termica più pesante, detti ad elefante, rispondono all'ambiente dopo un certo periodo di tempo.

I componenti termo attivi dell'edificio sono pareti, solai, pavimenti dotati di condotti per il passaggio dell'aria o dell'acqua che generano un effetto direttamente sull'ambiente riducendo il carico di picco nei periodi di occupazione degli spazi in modo da gravare in maniera inferiore sui costi energetici.

Una tra queste tecnologie sono i sistemi aviotrasportati, che utilizzano delle cavità comprese all'interno di lastre di calcestruzzo, per il passaggio di aria che riscalda o raffreddano la massa

oppure che può essere utilizzata come aria di mandata nei locali. tramite un condotto di alimentazione, solitamente posto nel controsoffitto, l'aria arriva ai diffusori delle stanze, mentre tramite delle griglie viene estratta dall'ambiente. Da alcune simulazione svolte da Termodeck, in Europa, il sistema potrebbe ridurre la richiesta di energia per riscaldamento del 40%.

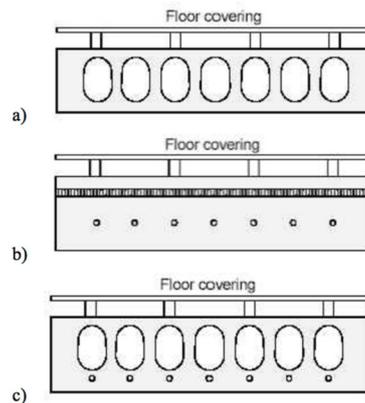


Figura 4 Cavità all'interno del calcestruzzo per il passaggio dell'aria

Nell'Europa centrale sono utilizzati maggiormente i componenti termo attivi ad acqua.

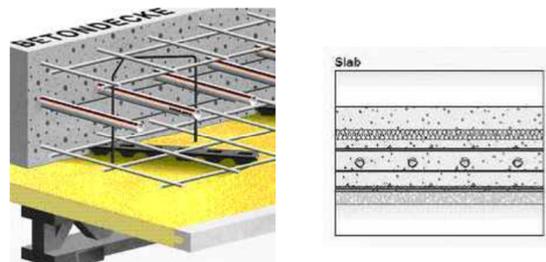


Figura 5 microtubi all'interno della superficie

Possono essere adoperati anche dei micro tubi incorporati sulla superficie interna del soffitto e sullo strato di rifinitura dell'intonaco, possono essere applicati a parete o a pavimento, grazie al piccolo spessore d'ingombro, sono utilizzati spesso nelle operazioni di retrofit energetico.

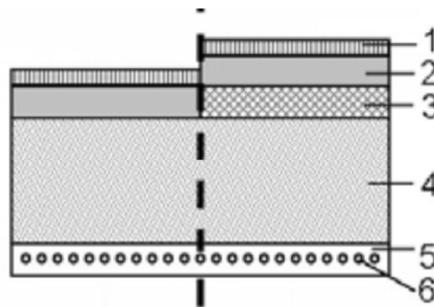


Figura 6 Stratigrafia con microtubi incorporati

Questi sistemi oltre alle capacità di raffreddamento e riscaldamento diretto sono in grado di accumulare energia che poi rilasciano mediante radiazione in ambiente.

La capacità di radiazione di questi elementi è funzione della tipologia di superficie e della tipologia di operazione che svolge. È importante tenere in considerazione anche tra la temperatura dell'ambiente e la temperatura della superficie riscaldata o raffreddata.

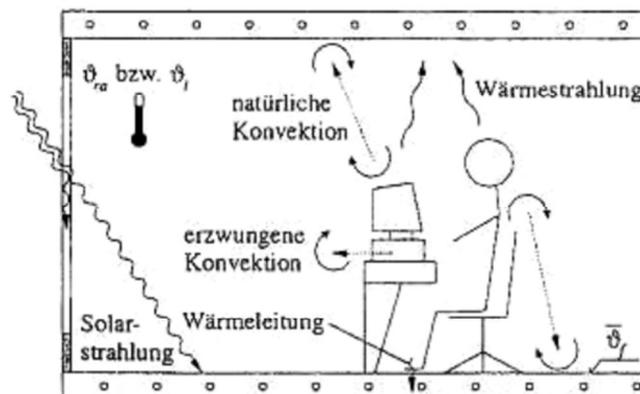


Figura 7 Flussi di calore

In funzione della composizione della massa termica ed in particolare del posizionamento dell'isolante la massa può agire come interna o esterna.

Lo stoccaggio di calore è funzione della capacità di assorbimento del materiale e della capacità termica di materiale. Le capacità di scambio termico sono garantite dai coefficienti di radiazione e convezione che determinano la velocità di trasferimento del calore in ambiente, questa deve essere sufficientemente grande e può essere migliorata adoperando una ventola. Quando la massa termica è posizionata internamente, l'aria esterna entra nell'edificio attraverso forze meccaniche o naturali e successivamente ad una fase di assorbimento rilascia il calore.

Il flusso d'aria può essere guidato da un sistema di ventole opportunamente progettato affinché i costi di attivazione della ventilazione meccanica siano inferiori rispetto ai costi relativi all'energia di raffreddamento.

Quando la massa termica è posta esternamente, in funzione dell'orientamento, le diverse pareti sono in grado di assorbire differenzialmente energia termica, per tale ragione è importante progettare dei ritardi nel trasferimento del calore. Le pareti maggiormente esposte alla radiazione solare giornaliera assorbono più velocemente calore e per tale ragione necessitano di un ritardo inferiore, differenzialmente le pareti meno esposte alla radiazione necessitano di tempi più lunghi.

Per ridurre le perdite calore vengono adottate delle misure d'isolamento secondo tre posizionamenti:

- Prima della massa termica
- Dopo la massa termica
- In mezzo alla massa

Per sfruttare in modo ottimale la massa termica e l'isolamento è importante progettare il posizionamento in funzione delle condizioni climatiche del luogo in cui l'edificio sarà realizzato, in quanto le condizioni climatiche impongono una convenienza rispetto ad un'altra.

La differente posizione dell'isolamento rispetto alla massa termica modifica in maniera differente le prestazioni dell'edificio, infatti, se l'isolamento è posizionato internamente rispetto alla massa termica, il tempo di penetrazione del calore dall'esterno all'interno della stanza viene aumentato, differenzialmente la posizione più esterna dell'isolamento rispetto alla massa termica è vantaggioso per il raffreddamento notturno e per sfruttare la ventilazione notturna, infine il posizionamento intermedio permette di ottenere alcuni vantaggi di una e dell'altra.

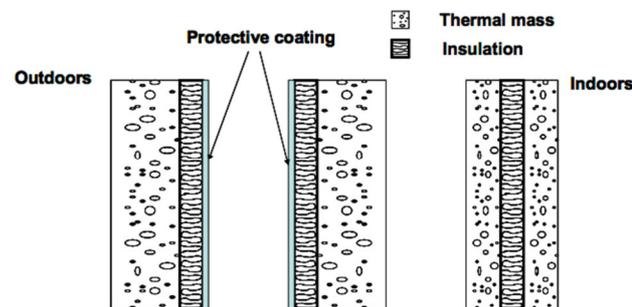


Figura 8 Posizionamento isolante

Il raffreddamento notturno è una delle applicazioni più efficienti di TMA ma può essere applicato solamente in climi in cui le temperature notturne siano sufficientemente basse. In generale l'applicazione della massa termica è utile in climi con grandi sbalzi di temperatura in una giornata.



A differenza dei vecchi sistemi di controllo e regolazione del comportamento degli edifici, queste tecnologie riuscendo a prevedere le condizioni climatiche future il comportamento della massa termica può essere orientato ad un determinato comportamento anticipatamente

1.3 Tecnologie di Stoccaggio di Energia Termica

Le tecnologie di stoccaggio (TMA) e ventilazione (AIF) hanno un grande potenziale di riduzione del consumo di energia, sfruttano la capacità di immagazzinamento di calore, il quale viene rilasciato in un secondo momento.

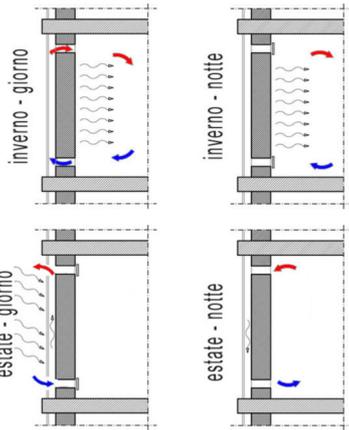
I materiali sensibili di accumulo possono essere utilizzati per TES a breve e a lungo termine, dove i secondi funzionano con un ciclo di rilascio annuale del calore, mentre i primi rilasciano di notte l'energia accumulata di giorno.

Un ottimo sistema di stoccaggio a breve termine di energia termica è la parete ad acqua che ha la capacità di ridurre il carico termico riuscendo ad ottenere il comfort negli spazi abitativi.

La necessità di ridurre il fabbisogno per riscaldamento e raffrescamento ha attirato l'attenzione di molti studiosi che hanno studiato le prestazioni di differenti supporti di memorizzazione, in condizioni climatiche differenti, come ad esempio:

- Trombe wall;
- Camino solare;
- Solar roof
- Transwall
- Water wall
- Pareti solari ibride
- Roof ponds

Il muro di Trombe, ideato da Edward Morse e sviluppato nella sua configurazione nel 1964 da Felix Trombe, è caratterizzato da un materiale ad alta inerzia termica. È composto da una superficie scura, che capta una grande quantità di radiazione solare, e un vetro che separa il muro di accumulo da un dispositivo di oscuramento. Sia il vetro che il muro



sono dotati di finestre in grado in modo tale da ottenere configurazioni differenti nelle diverse stagioni. Il meccanismo di funzionamento è molto semplice, la luce solare dopo aver attraverso il vetro colpisce il muro, il quale accumula calore che successivamente viene diffuso allo interno ed irradiato negli ambienti con un certo ritardo. Il muro riesce a non raffreddarsi in tempi brevi, grazie alla presenza del vetro che funge da protezione dal vento. Grazie alle aperture poste nella parte alta del muro, l'aria calda che si forma nell'intercapedine, può essere convogliata nell'ambiente.

In estate viene attivato un sistema di oscuramento per evitare che il muro di accumulo assorba calore, inoltre vengono aperte le bocchette superiori ed inferiori della parete vetrata per

attivare la ventilazione e fare uscire il calore che si crea nell'intercapedine. Durante la notte le bocchette della vetrata vengono nuovamente chiuse e vengono aperte quelle di circolazione opposto

Figura 9 Schema di funzionamento Trombe Wall

rispetto a quello invernale: l'aria calda interne esce dalle bocchette superiori a contatto con il vetro si raffredda e rientra dalle bocchette inferiori. In questo modo questo sistema è in grado di contribuire al raffrescamento, il muro assorbe calore dalla abitazione e cede calore all'esterno di notte. Per migliorarne l'efficienza, negli anni sono state effettuate diverse ricerche sui fattori che possono influenzarne il rendimento, come dimensione, materiale, larghezza dei canali e spessore del vetro. I canali di aereazione che possono essere isolati termicamente per evitare le dispersioni di calore. Secondo alcuni studi la portata d'aria era fortemente influenzata dall'altezza dei canali, mentre la larghezza è risultata poco influente. Il miglioramento di questa tecnologia offre degli enormi vantaggi per il risparmio energetico e il miglioramento del comfort, infatti, nella stagione di riscaldamento può ridurre del 30% i consumi e ridurre il contenuto di umidità e degli spazi collegati al muro e apportare vantaggi anche negli ambienti adiacenti. Nonostante l'efficienza nell'apporto energetico, il muro di Trombe non ha riscosso molto successo fino ad oggi a causa degli elevati costi sia di realizzazione che di manutenzione.

Il camino solare è un sistema progettato per migliorare la ventilazione naturale nelle abitazioni progettato dai persiani e utilizzato dagli antichi romani che ottimizzarono il suo funzionamento, per catturare anche la luce e successivamente diffonderla negli altri ambienti. Questi camini, detti anche camini termici, presentano una forma a “pozzo e sono composti da tre elementi:

- spazio di raccolta dell'energia solare e del calore generato per irraggiamento;
- pozzo di ventilazione;
- condotti per il flusso dell'aria.

Questo sistema accumula di giorno la luce e il calore solare inducendo dei moti ascensionali che fanno in modo che l'aria calda sale verso l'alto e quella fredda verso il basso rinfrescando gli spazi creando un effetto di galleggiamento termico. In funzione della posizione di installazione del camino, distinguiamo due differenti configurazioni, verticale o inclinato. Il primo è costituito da un canale d'aria rettangolare posto lungo una parete, il secondo invece è posto sul tetto. La copertura, in vetro, del comino può essere integrata con celle fotovoltaiche oppure sostituita da materiali opachi che migliorano la capacità di captazione del calore. Il camino solare ha una particolare rilevanza in estate in cui la ventilazione diventa fondamentale per ridurre l'utilizzo dei condizionatori e dei sistemi di illuminazione. Recentemente sono stati sviluppati diversi studi che evidenziano le potenzialità di questa tecnologia contribuendo positivamente all'utilizzo di questo sistema. Maggiormente adoperati sono quelli verticali a parete costituiti nel lato esterno da una parete vetrata

e nel lato interno da materiali opachi con ottime caratteristiche assorbitive, in questo modo la parete opaca fa aumentare la temperatura superficiale e per convezione riscalda l'aria del canale, a causa della variazione di densità nasce un flusso ascendente, l'aria raggiunge la parte superiore del

camino e viene scaricata all'esterno. Grazie all'isolamento del muro interne il calore che si crea nell'intercapedine non viene trasmesso alla stanza. Il camino a parete può avere tre diverse configurazioni:

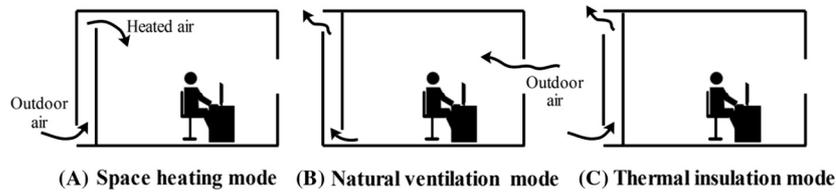


Figura 10 Schema di funzionamento camino solare

Nei climi freddi (caso A) il muro funziona come il muro di Trombe (riscaldamenti passivo), nei climi caldi o moderati (caso B) invece, la cappa viene utilizzata per ventilazione naturale, infine, nei climi caldi (caso C) viene utilizzato come isolamento termico, facendo ridurre l'aumento di calore in una stanza. In alcuni casi, se le richieste architettoniche lo richiedono, i collettori solari possono seguire la pendenza del tetto. Queste due configurazioni possono anche essere combinate

tra loro o con altre tecnologie di raffreddamento e raffrescamento passivo quando un singolo camino non è sufficiente per il raggiungimento del benessere igrometrico. Numerosi studi hanno dimostrato che la progettazione integrata può indurre una portata d'aria maggiore e migliorare la ventilazione naturale e che questi sistemi apportano vantaggi non solo in giorni di sole ma anche in giornate nuvolose.

Il Solar roof è invece un particolare sistema solare termico in cui il manto di copertura è il pannello stesso. Le tegole di vetro collegate ad una batteria powerfull possono essere utilizzate anche per accumulare energia fino a 14KWh. Questi funzionano come dei classici pannelli solari in cui l'energia solare viene trasformata in energia termica che viene trasferita ad un accumulatore termico al fine di produrre acqua calda per i sistemi di riscaldamento e di raffrescamento.

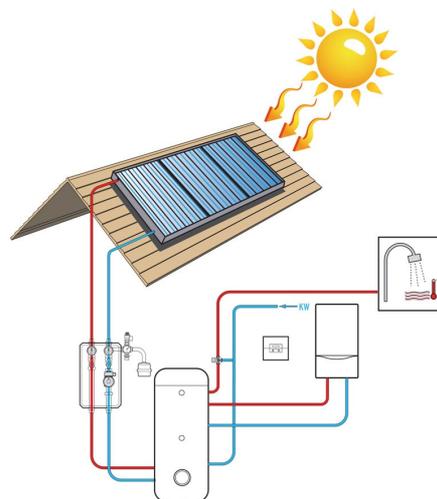


Figura 11 Schema Solar Roof

Il Sunspace è un sistema di guadagno diretto che sfrutta la capacità di captazione solare del vetro.

È costituito da un ambiente simile ad una serra accostato ad un volume edilizio bioclimatico.

I vetri, che fungono da masse termiche, trasferiscono il calore agli ambienti retrostanti. Attraverso moti convettivi, il calore assorbito dalle vetrature per irraggiamento solare, viene successivamente diffuso grazie ai moti convettivi dei flussi di aria calda, in questo modo la temperatura all'interno della serra aumenta sostanzialmente e in funzione della configurazione del sistema trasferisce il calore negli ambienti adiacenti. Il sistema può essere utilizzato anche per il raffrescamento nei mesi estivi generando un sistema di ventilazione naturale.

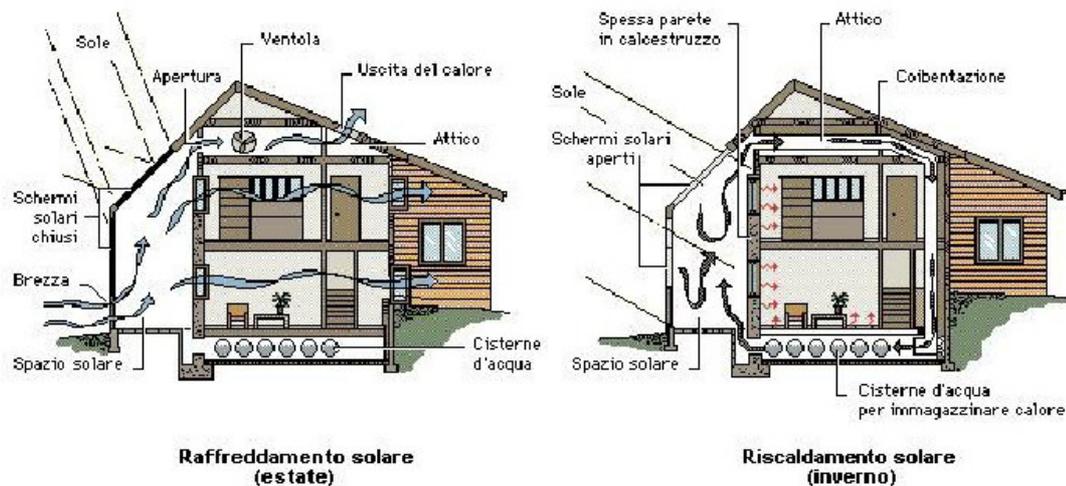


Figura 12 Serra Solare

Il Trombe-water wall è un muro il cui principio di funzionamento è lo stesso del muro di Trombe, dal quale si differenzia per l'utilizzo di acqua per la conservazione del calore. L'acqua, infatti, ha un comportamento migliore nel guadagno di calore indiretto. Questo sistema può essere utilizzato sia per il raffrescamento che per il riscaldamento e segue la stessa configurazione del muro di Trombe, presenta un vetro davanti la parete d'acqua che consente ai raggi di penetrare e riscaldare l'acqua che per radiazione riscaldere l'ambiente. In alcuni casi il muro sarà oscurato nella parte esterna per aumentare le capacità di assorbimento, in altri viene inserito un foglio coibentato nella parte interna della parete per aumentare l'efficienza della parete. Rispetto al muro di Trombe il trasferimento di calore avviene più velocemente dato che è in grado di accumulare più calore rispetto agli altri materiali. Studiando il comportamento del muro con vari spessori si è constatato che il muro presenta risultati migliori se è più spesso, perché aiuta a mantenere la temperatura più calda nei mesi invernali e più fredda in quelli estivi.

Nonostante i risultati positivi, questa tecnologia non è largamente utilizzata a causa delle maggiori difficoltà di contenimento dell'acqua rispetto agli altri materiali.

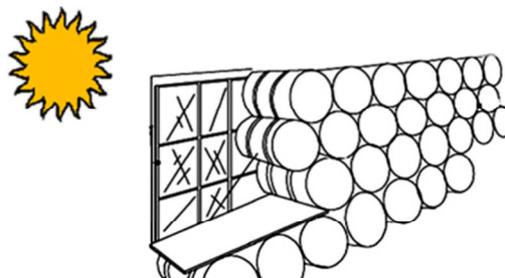


Figura 13 schema watwr wall opaco

I Transwalls sono una particolare configurazione di water wall, sono caratterizzati da moduli trasparenti di vetro retti da una struttura metallica. Al suo interno è presente una piastra assorbente semitrasparente che permette di assorbire energia solare e trasmetterla all'ambiente. Il principio si basa sullo sfruttamento della radiazione solare come guadagno termico. L'efficienza del sistema può essere ridotta a causa del calore convettivo che attraverso deflettori trasparenti può essere limitato, inoltre è necessario aggiungere agenti gelificanti o bioinibenti che riducano la viscosità dell'acqua e la crescita di microrganismi.

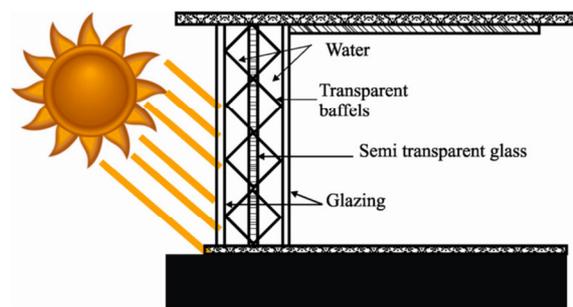


Figura 14 Transwall

Le pareti solari ibride rappresentano un prototipo di muro di raffrescamento evaporativo in ceramica che funziona come un muro solare e il fornisce raffreddamento in estate.

In inverno funziona come un classico muro di trombe mentre in estate la ceramica porosa assorbe una quantità di acqua che garantisce l'abbassamento della temperatura superficiale del muro. L'acqua viene fornita mediante un ugello posto ad esempio sulla parte superiore del muro e viene fornita solo durante la stagione estiva.

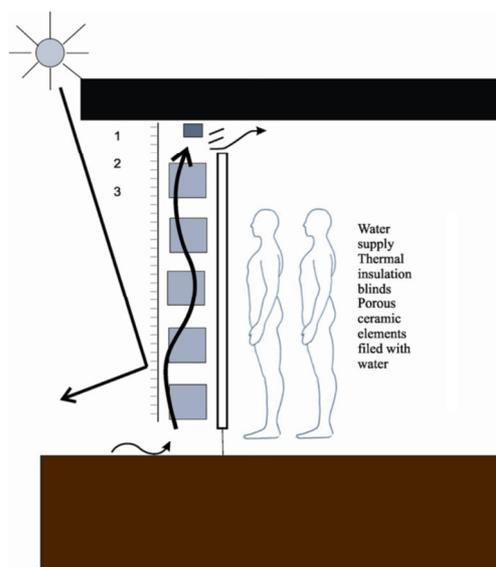


Figura 15 Parete evaporativa

Il Roof Pond è sistema solare passivo inventato negli anni '60 da Harold Hay e successivamente studiato da diversi studiosi per capire le prestazioni delle diverse configurazioni e all'ora del giorno

in cui vengono attivate. Questo sistema utilizza la potenzialità di assorbimento dell'acqua rilascia le radiazioni solare e offre dei benefici sia in termini di riscaldamento che di raffrescamento, anche se fino ad oggi ha riscosso un maggiore interesse per il raffrescamento degli ambienti. Il principio di funzionamento si basa sullo sfruttamento del cambio di fase mediante l'evaporazione dell'acqua che determina la diminuzione della temperatura dell'acqua e dell'umidità, funziona come un dissipatore di calore che assorbe il calore interno e quello che penetra dall'edificio, lo spazio interno è anche raffreddato per radiazione e convezione.

Gli stagni, nel periodo invernale, possono essere usati per ridurre il carico termico per il riscaldamento, durante il giorno, immagazzina energia solare sotto forma di calore sensibile successivamente trasmessa per conduzione e radiazione allo spazio interno.

Il Roof Pond è una specie di piscina sul tetto che si basa sul recupero e sulla fruizione dell'acqua piovana per ottenere benefici in termini di risparmio energetico con un sistema a zero impatto ambientale.

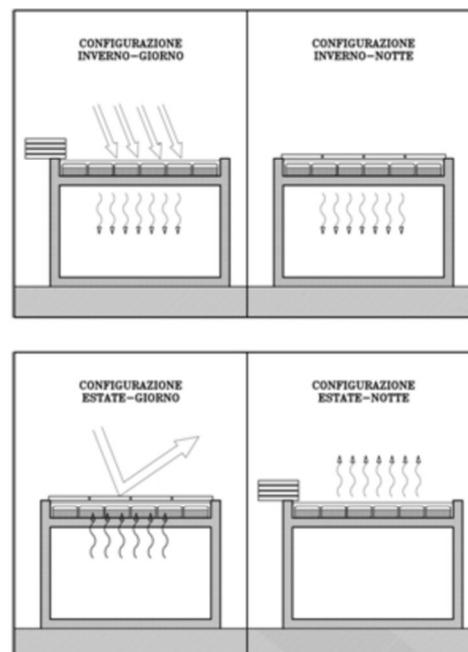


Figura 16 Schemi di funzionamento Roof Pond

Gli elementi base per la realizzazione di un roof pond sono:

- La copertura di protezione (1);
- La vasca contenente acqua (2);
- Un supporto in metallo ad esempio una lamiera grecata (3).

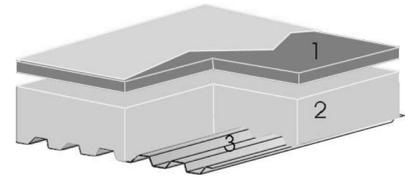


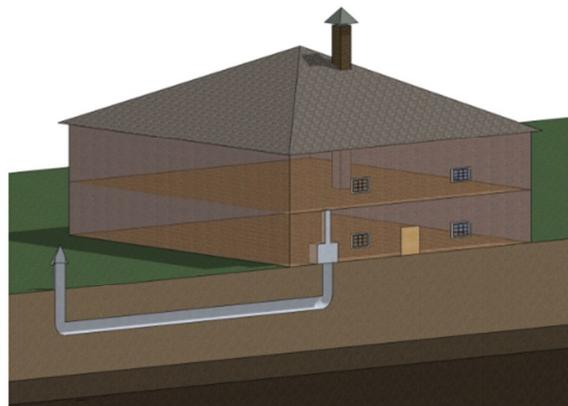
Figura 17 Stratigrafia

Gli studiosi negli ultimi anni, hanno effettuato diversi studi sulle diverse configurazioni di laghetto:

- Senza isolamento mobile;
- Con isolamento mobile;
- Con ombreggiamento;
- Con raffreddamento naturale.

1.4 Sistemi di Memorizzazione di Energia Termica del Terreno

Un 'altro strumento di memorizzazione di energia termica è il terreno, questo ha delle temperature stabili al suo interno, non subiscono modifiche a causa delle fluttuazioni di giornalieri ma vengono influenzata dai cambiamenti stagionali, grazie all'inerzia termica è in grado di smorzare le oscillazioni di temperatura dell'ambiente. Per le sue caratteristiche sono dei sistemi che trovano un'elevata adeguatezza di applicazione anche in climi con grandi sbalzi di temperature giornalieri oppure tra una stagione ed un'altra.



Per utilizzare in maniera efficace le capacità di stoccaggio del suolo, è importante progettare il sistema integrandolo ad un sistema di ventilazione e manutenzione, per tale ragione i sistemi Earth to Air Heat Exchanger (ETAHE) sono coniugati ad un sistema di ventilazione meccanica in cui le ventole creano un flusso d'aria.

Il connubio tra lo sfruttamento dell'aria di ventilazione e il terreno è un'idea già stata studiata anticamente senza trovare ampia applicazione a causa di alcuni dubbi sulla gestione dei flussi d'aria.

Recentemente invece, questi sistemi trovano un ampio utilizzo nelle serre, edifici residenziali, commerciali e anche negli allevamenti.

Le forme di stoccaggio a terra possono essere raggruppate in tre categorie:

- Metodo isolato: sfrutta acqua di falda come mezzo per scambiare energia;
- Metodo diretto: aumenta il contatto diretto tra edificio e terreno;
- Metodo indiretto: utilizza lo stoccaggio del terreno per riscaldare o raffreddare l'aria di ventilazione.

La metodologia prevalentemente diffusa è quella indiretta, infatti i sistemi ETAHE, maggiormente utilizzati, ventilano gli spazi attraverso un sistema di condotti interrati. In questo modo il terreno scalda o raffredda l'aria che successivamente verrà utilizzata per la ventilazione.

Solitamente le temperature del terreno sono sempre inferiori ai 20- 25 gradi, per tale ragione solitamente negli edifici commerciali e residenziali sono prevalentemente utilizzati per il raffreddamento utilizzando tre strategie:

- Ventilazione naturale notturna;
- Ventilazione meccanica notturna;
- Raffreddamento di componenti.

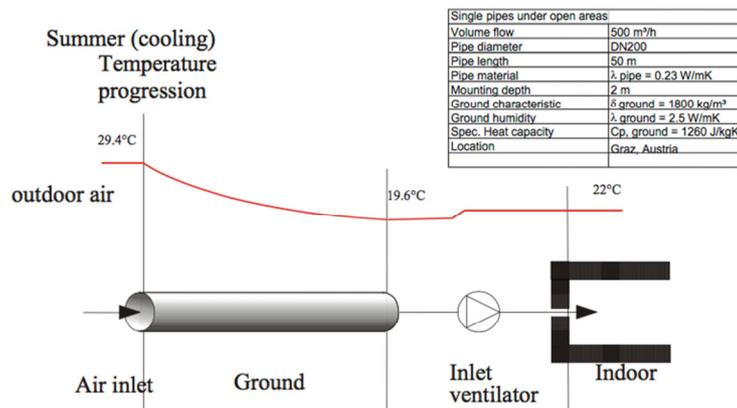


Figura 18 Schema Cooling

Se la temperatura dell'aria è inferiore a quella del terreno, il sistema può essere sfruttato anche per riscaldare l'ambiente, in questi casi solitamente il sistema è accoppiato ad una unità di recupero di calore per prevenire la possibile formazione di ghiaccio.

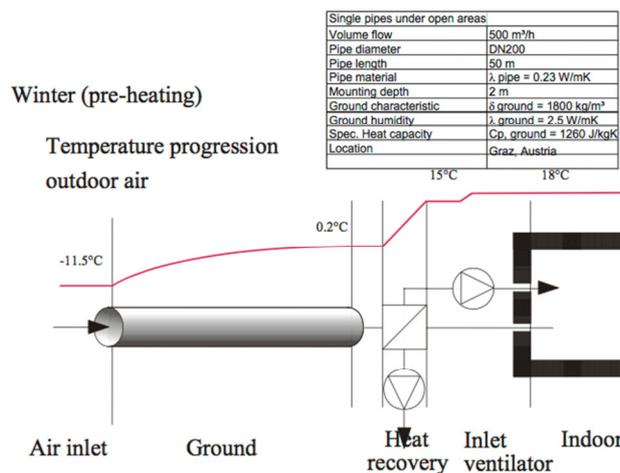


Figura 19 Schema Heating

Il trasferimento di calore che si trova in profondità nel terreno avviene per convezione e radiazione, è stata identificata una zona neutra di 15- 20 m oltre la quale la temperatura del terreno non è più stabile ma cresce man mano che si scende in profondità.

La configurazione degli ETAHE può essere a ciclo aperto o a ciclo chiuso, nei primi l'aria erogata all'interno viene prelevata all'esterno, nei secondi invece, l'aria interna viene fatta circolare all'interno dei condotti.

L' ETAHE viene installato in tipologie differenti di edificio secondo differenti metodologie di posa: nei fossati nel cortile, nel fossato delle fondazioni, sotto le fondazioni o tra le fondazioni. In alcuni casi i tubi sono posti parallelamente, se posti troppo vicino l'efficienza del sistema può risultare limitata, per tale ragione è devono essere posti ad una distanza di circa 1 m. È importante sapere dimensionare correttamente i tubi per ottenere delle buone prestazioni, i tubi infatti avranno una dimensione del diametro differente in funzione del flusso d'aria che devono soddisfare. Nei sistemi dalle piccole dimensioni la velocità di progetto non supera i 2 m/s mentre in quelli di grandi dimensioni la velocità deve essere incrementata a 5m/s.

Questa strategia può essere associata anche alla ventilazione ibrida solo che in questi le dimensioni dei tubi saranno di diametro superiore.

Le prestazioni dipendono dalla variazione di calore che si crea tra la temperatura dell'aria in ingresso e quella in uscita. Un contributo di calore sarà in forma latente, l'altro in forma sensibile, la somma dei due contributi definirà l'efficienza del sistema.



1.5 Sistemi ad Isolamento Dinamico

Un approccio energeticamente efficiente è l'isolamento dinamico (DI), questo filtra l'aria di ventilazione attraverso un involucro dinamicamente permeabile e isolato. I sistemi ad isolamento migliorano la qualità dell'aria e sono in grado di ridurre le perdite di calore.

Il sistema di riscaldamento, ventilazione e climatizzazione accoppiato ad un sistema di un elemento RBE offre vantaggi ambientali con basse emissioni di carbonio, sfruttando energia che altrimenti andrebbe persa, l'aria di ventilazione entra in ambiente raffreddata in estate e riscaldata in inverno.

Esistono due tecnologie adoperate:

- Una parete è dotata di un'intercapedine, funge da scambiatore, il flusso d'aria passa parallelamente alla parete all'interno di una cavità;
- Parete di respirazione, l'aria attraversa un sistema di isolamento permeabile;

Attualmente la maggior parte delle pareti studiate e realizzate utilizzano il sistema di parete di respirazione.

Il comportamento di queste pareti offre diversi benefici in termini di energia spesa, secondo alcune ricerche il suo utilizzo permette di risparmiare il 10% dei consumi. Con la parete respiratoria la ventilazione viene realizzata mediante la parete stessa senza dover installare un sistema di tubi che fanno passare l'aria, inoltre grazie alle sue proprietà è in grado di moderare le perdite di calore utilizzando delle pareti sottili riducendo non solo i consumi ma anche i costi di realizzazione.

La struttura fibrosa che lo caratterizza fa in modo che l'aria entri in ambiente pulita e filtrata regolando non solo il quantitativo d'aria che entra in ambiente ma anche la sua qualità.

A causa della bassa velocità dell'aria nei DI, viene intrappolata attraverso quattro meccanismi: nel primo il moto dell'aria fa deviare la linea di flusso intorno alla fibra, nel secondo le particelle

vengono intercettate ed intrappolate dal filtro, nel terzo le particelle si muovono secondo un movimento browniano, in fine il quarto si fonda sul principio di attrazione di Columbus tra filtro e particelle.

La configurazione base di un DI è composto da 3 sottostrati:

- Sottostrato dell'involucro esterno, che può essere realizzato con una lastra in c.a. o con una lamiera perforata;
- Sottostrato di isolamento dinamico, costituito da materiali che "respirano" che a causa della depressione lasciano entrare aria in ambiente;
- Un terrafermo, invece, funge da separatore tra i due strati.

L'integrazione degli strati di composizione del DI con altri elementi comporta delle prestazioni migliori, ad esempio, la ventilazione può essere coadiuvata da un ventilatore oppure mediante l'utilizzo di un vetro si può aumentare l'energia solare e la temperatura di aria in ingresso, infine l'utilizzo di una pompa potrebbe aiutare a preriscaldare l'aria.

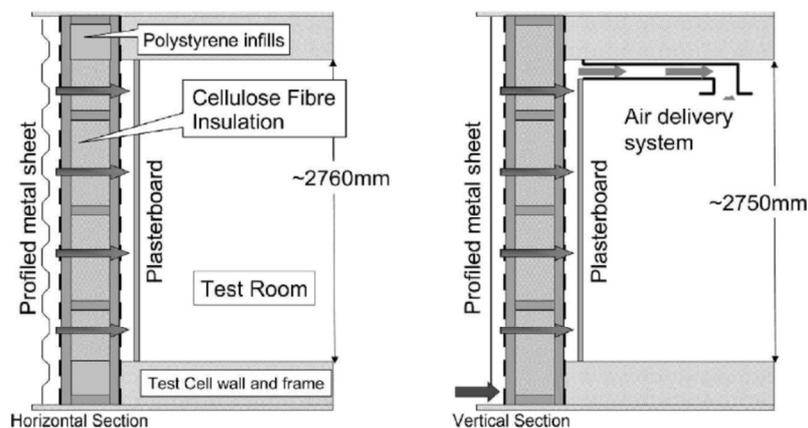


Figura 20 isolamento dinamico

la chiave dell'isolamento dinamico consiste nel determinare lo spessore dell'isolamento ed assicurare la giusta porta d'aria per fornire un flusso d'aria fresca adeguata garantendo uno scambio di calore tra aria ed isolamento riducendo la formazione di condensa.

Se l'aria non viene precedentemente riscaldata, prima che entri nell'isolamento dinamico la perdita di calore per convezione aumenterà in maniera proporzionale al flusso d'aria.

1.6 Materiali a Cambiamento di Fase

Una soluzione per gestire in maniera ottimale le radiazioni solari e i flussi di calore è l'utilizzo di materiali a cambiamento di fase (PCM), questi differentemente dai classici materiali con buone capacità d'immagazzinamento di energia termica, sanno sfruttare le capacità di accumulo sia del calore latente che del calore sensibile. L'energia si trasferisce nel momento in cui il materiale passa dalla configurazione solida a quella liquida cambiando fase, sono in grado di mantenere una

temperatura costante evitando il surriscaldamento degli elementi che li contengono.

I PCM aumentano l'inerzia termica dei materiali in funzione delle proprie capacità termodinamiche, cinetiche e chimiche, questi variano la propria capacità termica che raggiunge l'apice in fase di fusione determinando un comportamento dinamico ai materiali, che si mostrano sensibili alle variazioni climatiche.

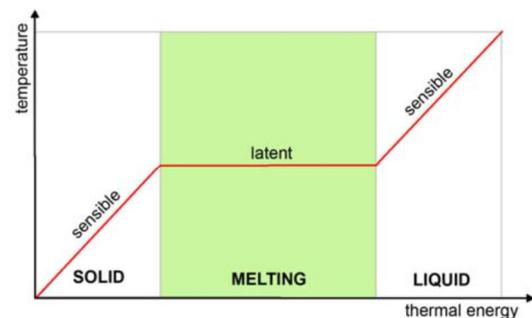
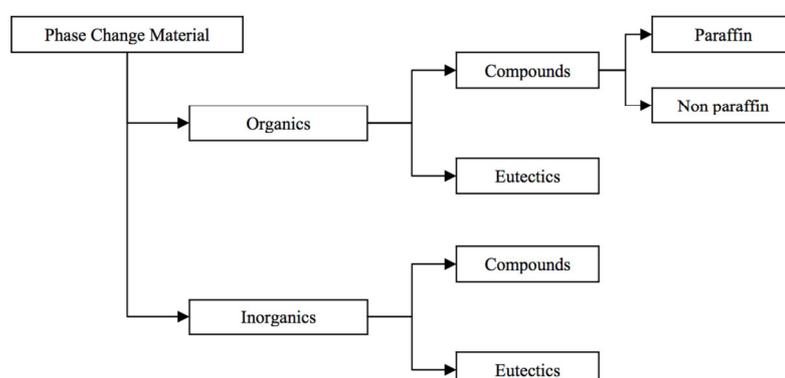


Figura 21 Grafico temperatura - energia termica

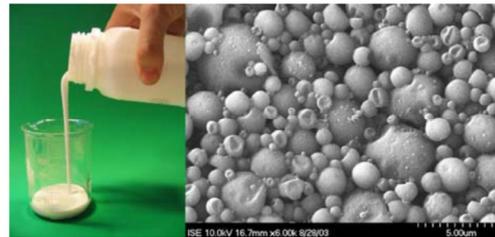
Sono raggruppabili in due tipologie: materiali organici e inorganici. I primi hanno delle caratteristiche maggiormente compatibili con le costruzioni edili, si fondono in maniera congrua e sono auto-nucleari. I secondi nonostante abbiano un calore latente di fusione superiore, a causa dei problemi di decomposizione e super raffreddamento, sono poco utilizzati in campo edile.

I PCM organici si distinguono in paraffine e non paraffine. Le paraffine sono cerosi sotto la temperatura di fusione, si congelano senza sovra raffreddarsi. Le non paraffine, costituite da acidi grassi, hanno un comportamento di fusione e congelamento con poco o nessun super raffreddamento.



I PCM adoperabili in edilizia devono avere determinate caratteristiche termofisiche, cinetiche e chimiche. Tra le prime è sicuramente importante menzionare che la temperatura di fusione deve essere compatibile con la temperatura operativa considerata, il calore latente di fusione quello sensibile devono essere sufficienti per ottenere l'energia richiesta, inoltre è richiesto un piccolo cambiamento di volume ed un'elevata capacità termica. Tra le caratteristiche cinetiche invece, ricordiamo che la velocità di nucleazione deve essere sufficientemente piccola per evitare il super raffreddamento e un elevato tasso di cristallizzazione per garantire la conservazione. Dal punto di vista chimico infine, i materiali non devono essere corrosivi, tossici, infiammabili e avere un ciclo di congelamento e fusione reversibile.

L'uso di energia rigenerativa richiede ottime capacità di accumulo per ottenere buoni risultati, i PCM sono uno strumento che permette di incrementare lo stoccaggio di molti sistemi di riscaldamento e ventilazione. Il materiale viene offerto in commercio o in forma granulata o come piastra, per tale ragione è facilmente collocabile in qualsiasi contenitore murario garantendo ampie aree con alte capacità di scambio termico grazie alle sue capacità fino a cinque volte superiori rispetto ai mezzi classici di accumulo, inoltre consente di avere piccole perdite di pressione.



Gli edifici con una massa termica leggera è portato ad avere notevoli fluttuazioni dell'aria che comportano una richiesta di energia elevata, l'integrazione di PCM in questi edifici consente di migliorarne le prestazioni.

L'integrazione di strategie che utilizzano energia termica solare e fonti di energia rigenerativa oppure l'utilizzo di pompe di calore che sfruttano energia elettrica notturna a tariffa ridotta, unità di stoccaggio del calore latente per sistemi di riscaldamento ad aria, consentono un risparmio energetico significativo.

L'utilizzo di PCM può avere due obiettivi fondamentali:

- Utilizzare il calore naturale per il riscaldamento e l'aria fredda notturna per il raffrescamento;
- Aumentare la massa termica dell'edificio migliorando conseguentemente il comfort e riducendo il consumo di energia.

Negli edifici i PCM possono avere diverse configurazioni:

- PCM nelle pareti degli edifici;
- PCM in soffitti o solai;
- PCM in sistemi di accumulo di calore o freddo.

Nel mercato ci sono molte tipologie murarie che sfruttano degli strati di PCM, nell'applicazione su parete l'archiviazione a contatto con l'ambiente interno, in questo modo aumenta la capacità termica negli ambienti in cui vengono applicati i PCM sfrutta la capacità di accumulo di energia solare per rilasciare l'energia accumulata in ambiente, il PCM quando avverte che la temperatura sta diminuendo rilascia energia per ricreare il comfort igrometrico. Se lo strato di PCM viene

posizionato esteriormente, le prestazioni ottenute saranno più vantaggiose in condizioni di raffrescamento, il materiale garantisce un risparmio sul consumo di energia sufficiente a mantenere il benessere.

I PCM possono essere utilizzati come accumulatori di energia termica se sfruttati nelle pareti solari, questi sono caratterizzati da tre strati: uno strato di vetro, uno opaco e un'intercapedine piena di aria. Nei muri solari con PCM si adoperano in sostituzione dello strato opaco alleggerendone il peso e i costi di realizzazione senza comprometterne l'efficienza. La massa termica dei PCM ha la funzione di accumulatore di calore per una parte della giornata, mentre per l'altra come fonte di energia.

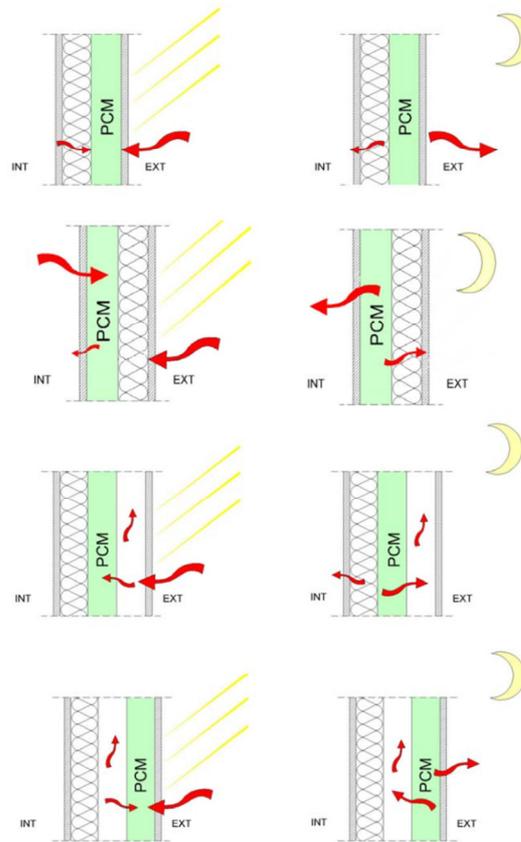


Figura 22 Posizionamento PCM

Un'ulteriore applicazione dei materiali a cambiamento di fase è l'applicazione a pavimento integrata al riscaldamento o raffrescamento radiante, l'energia di accumulo deve essere correttamente gestita grazie ad una stratificazione pensata e studiata appositamente. Un ulteriore vantaggio risiede sulla progettazione della temperatura operativa e la definizione della capacità termica.

Solitamente la pavimentazione viene configurata da due strati con tubi d'acqua integrati fra loro per creare uno scambio con i PCM contenuti in dei sacchetti, la progettazione è volta a mantenere il pavimento ad una temperatura costante, ovvero la temperatura di fusione del materiale evitando il surriscaldamento del pannello radiante. Il PCM è in grado sia di immagazzinare energia in

eccesso che può rilasciare di notte oppure essere eliminata con un sistema idronico, sia di eliminare le fluttuazioni di temperatura.

In edilizia esistono differenti modalità di utilizzo dei PCM a pavimento, un caso frequente è l'integrazione di questi materiali a cambiamento di fase al sistema di riscaldamento. Questa soluzione permette di risparmiare notevolmente i costi energetici (circa il 30%) poiché il PCM immagazzina calore durante la notte, quando i costi delle tariffe elettriche sono basse, questo viene successivamente rilasciato nelle ore del giorno diminuendo il carico termico di riscaldamento a carico dell'impianto.

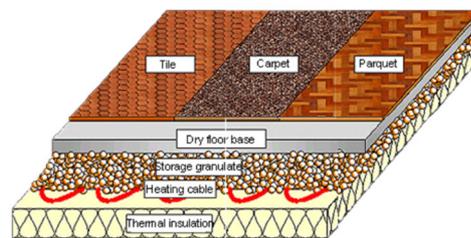


Figura 23 Stratigrafia con PCM

I PCM possono essere integrati a soffitto, in questo caso il materiale non è parte della stratigrafia del solaio e per tale ragione viene installato un adeguato sistema di controsoffittatura, in questo caso la soluzione più convenzionale consiste nell'utilizzare dei sacchetti di PCM facenti parte del sistema di controsoffitti stesso.

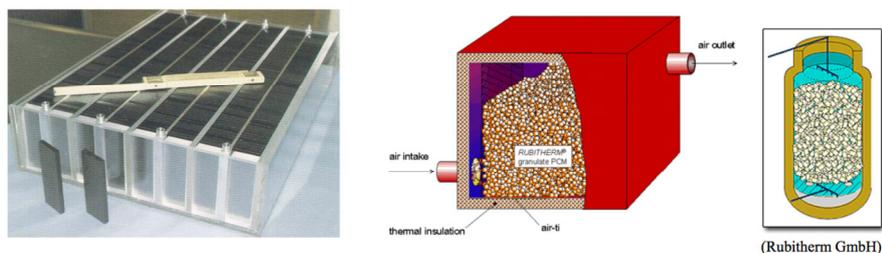
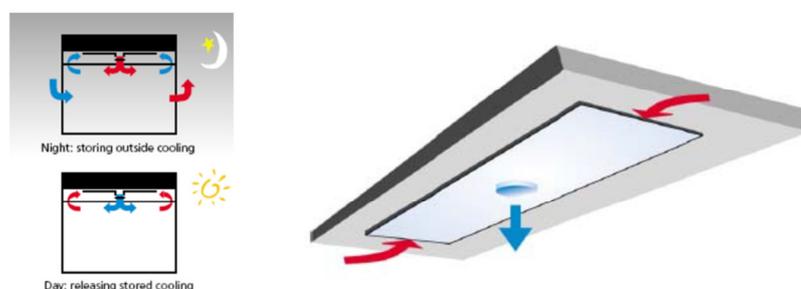


Figura 24 Sacchetti con PCM.

Nella cavità che si crea circola aria grazie all'aiuto di sistemi di climatizzazione oppure di ventilatori, creando un flusso turbolento che incrementa lo scambio termico.

Questa tecnologia che integra PCM ai sistemi di riscaldamento/raffrescamento e i sistemi di ventilazione consente di implementare l'efficienza di accumulo di energia termica e conseguentemente una riduzione dei consumi in tutte le stagioni, invernale ed estiva.





Decenni di ricerche e di sviluppo per rendere sfruttabile il potenziale dei componenti adattivi di facciata, non sono stati sufficienti a rendere comune la loro applicazione in edilizia, probabilmente a causa dell'elevata complessità della loro progettazione. Le facciate adattive necessitano della progettazione di un processo in cui le strategie di controllo e regolazione devono essere studiate con precisione già in fase di pianificazione.

Affinché risultino una soluzione maggiormente presa in considerazione in fase di pianificazione, deve essere pensato un considerevole numero di varianti progettuali a prezzi competitivi, si devono studiare delle strategie di simulazione dei comportamenti di questi elementi adattivi di facciate in modo da prevedere il loro comportamento e facilitare la progettazione dei sistemi integrati. Inoltre è importante anche che vengano integrati nelle librerie della progettazione BIM per rendere più fruibile la sua rappresentazione.

In questo lavoro presteremo maggiori attenzioni ai sistemi che sfruttano l'acqua come mezzo per il raffrescamento e riscaldamento passivo e saranno svolte delle simulazioni che evidenzieranno le potenzialità di una innovativa parete ad acqua che sfrutta l'evaporazione del liquido per ridurre il carico termico per il raffrescamento estivo.

Tecnologie di Involucro Utilizzanti l'Acqua

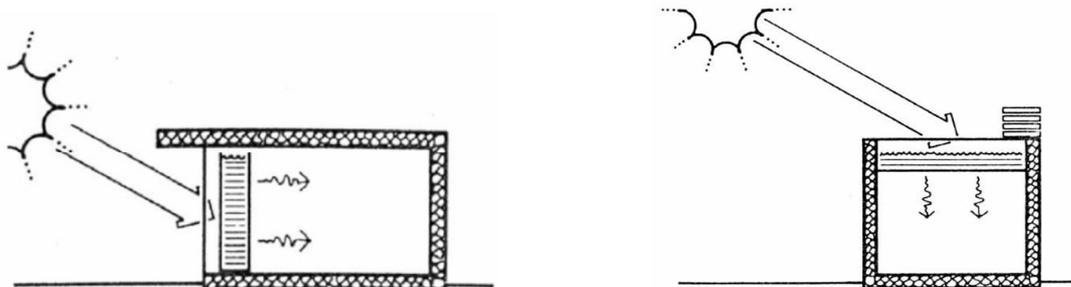
Le tecnologie di involucro che utilizzano acqua, sono delle particolari configurazioni di facciata o di copertura che sfruttano le capacità d'immagazzinamento di energia del materiale, al fine di ridurre il carico termico che grava sull'impianto.

Esistono numerose configurazioni sia per l'involucro verticale, attraverso la progettazione di stratigrafie differenti di pareti ad acqua, sia di copertura, attraverso la realizzazione dei Roof Pond, laghetti d'acqua sul tetto che in funzione della loro progettazione rispondono in maniera differente al clima al quale sono esposti.

In relazione al modo di sfruttare l'acqua nel sistema, in entrambe le configurazioni, si possono pianificare delle strategie di riscaldamento o di raffreddamento, in funzione della stagione, delle caratteristiche climatiche e del luogo in cui la tecnologia deve essere installata.

Le ottime capacità di stoccaggio del calore proveniente dalle radiazioni solari possono essere sfruttate in sostituzione ad elementi di facciate preesistenti o in integrazione ad esse, in fase di riscaldamento, in fase di raffreddamento, l'acqua può essere sfruttata come "barriera" al passaggio di calore in eccesso o come elemento aggiuntivo coadiuvato da un sistema di ventilazione nelle pareti evaporative.

Nell'ottica di realizzazione di edifici Zero Energy Buildings, i sistemi ad acqua rappresentano una soluzione progettuale efficiente ed economicamente conveniente, in quanto sia nei sistemi evaporativi che in quelli di accumulo, l'acqua adoperata può essere quella piovana, adoperando dei contenitori di accumulo che la conservino e la confluiscono ai sistemi quando è necessario.



2.1 Partizioni Verticali

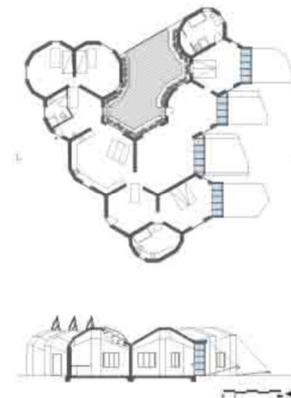
2.1.1 Evoluzione Storica della Parete ad Acqua ed Identificazione delle differenti Tecnologie Murarie

Il primo muro ad acqua fu realizzato da Hoyt Hottel e da un gruppo di suoi studenti presso il Massachusetts Institute of Technology nel 1947 ma a causa dei non buoni risultati ottenuti, il settore edilizio ha preferito utilizzare sistemi più costosi e spesso meno performanti. Questa prima parete era costruita con una serie di lattine verniciate in nero poste dietro un doppio vetro, proprio a causa di un design di isolamento inadeguato e del limitato guadagno solare apportato dalle finestre, i risultati ottenuti sono stati ritenuti inadeguati. Solo negli anni '70 è stato riscoperto un interesse per queste pareti e diversi studiosi, hanno iniziato a sperimentare delle soluzioni migliorative per il muro.

Nel 1972 Steve Baer ha utilizzato l'acqua in una casa solare passiva nel New Messico utilizzando 208 litri d'acqua in fusti al fine di fornire massa termica. Nella casa di Corrales le pareti erano fatte con pannelli sandwich isolati in alluminio, novanta barili sono stati impilati in telai metallici. Come i classici muri di Trombe l'estremità dei barili erano dipinte di nero per aumentare le capacità di stoccaggio del sistema, il calore, infatti, viene assimilato come guadagno solare diretto attraverso un vetro posizionato anteriormente al muro. I risultati ottenuti hanno dimostrato che il sistema ha contribuito all'85% circa del fabbisogno totale di riscaldamento.



Figura 25 Casa Steve Baer



Successivamente sono state progettate pareti ad acqua in edifici residenziali e commerciali e condotte molte ricerche sulla resa termica di questi sistemi. John Hammond e Marshall Hunt hanno realizzato un sistema molto simile a quello di Bear con la variante della parete interrata in California. Questi sistemi sono ancora funzionanti dopo trent'anni. Altri operatori hanno sviluppato ricerche sui contenitori che avrebbero dovuto contenere l'acqua, ad esempio, Danny Long ha progettato diverse tipologie di serbatoi in acciaio, Wayn e Susan Nicolas serbatoi in cemento e successivamente dei contenitori in vinile con telaio in acciaio inossidabile. Tim Maloney invece, ha progettato dei contenitori in plastica con lamiera. Sottili tubi con rivestimento in plastica e cilindri e pannelli in fibre di vetro sono stati progettati rispettivamente dalla *Solar Applications e Research Group* di Vancouver, in California, il *Water Wall engineering Group*, in Ohio e da *Kalwall Corporation* in collaborazione con *Ames Laboratory*. Desta preoccupazione la

possibilità di arrugginimento e del crearsi fenomeni corrosivi in queste pareti, a tal proposito, sono stati aggiunti

degli additivi per il controllo della ruggine nei muri progettati dal San Luis Sustainability Group e non sono stati riscontrati difetti. Negli ultimi decenni, sono state fatte analisi su software per l'analisi del comportamento delle pareti e analisi per velocizzare il processo di aumento della temperatura, ad esempio, al fine di mantenere la condizione di comfort più a lungo. Sono state studiate e migliorate nuove configurazioni di pareti ad acqua sia per il regime invernale che per il regime estivo, nel 2011 sono stati studiati dei nuovi materiali, delle ceramiche porose in grado di assorbire delle grandi quantità d'acqua che consentirà di raffrescare l'ambiente.

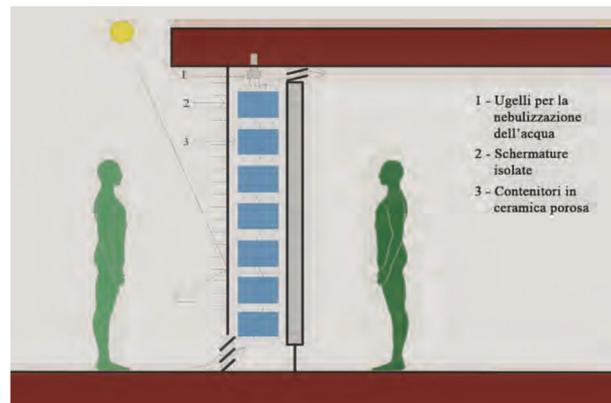


Figura 26 Parete evaporativa

Nel 2013 è stato realizzato un prototipo di water house, questo era realizzato da un involucro multifunzionale costituito da vetri contenenti acqua sorretti da un'intelaiatura in materiale coibentato. I risultati mostrano che questa tipologia di involucro riesce a mantenere una temperatura interna tra i 20 e i 26 gradi azzerando il fabbisogno di energia termo igrometrica. Kengo Kuma, un architetto e designer giapponese, ha progettato la Water-Branch House, esposta al MOMA di New York nel 2008. L'involucro è formato da contenitori di plastica leggeri in cui scorre un fluido che permette la termoregolazione della temperatura dello spazio interno.



Lo studio delle prestazioni delle pareti ad acqua si sviluppa in periodo molto lungo, ma fino agli anni '80, non hanno riscosso molto successo.

Negli anni successivi fino ad oggi l'interesse è cresciuto significativamente, prima basandosi su un modello di bilancio termico, poi nei decenni successivi, sono stati sfruttati nuovi approcci di modellazione che permettono di avere di fare delle indagini con un dettaglio più elevato.

Figura 27 Water Branch House

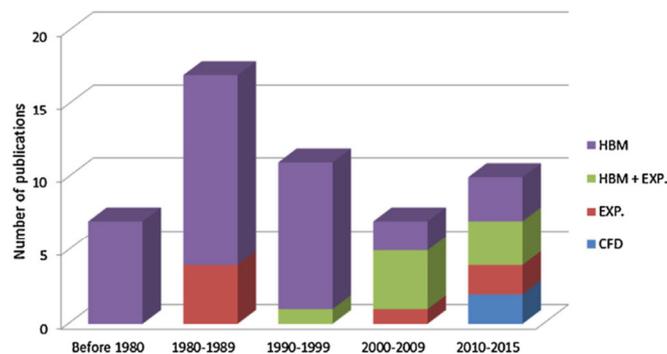


Figura 28 Percentuali Pubblicazioni

Nell'ottica progettuale di oggi, che si concretizza sulla progettazione di zero energy buildings, nell'attenzione verso materiali naturali e soluzioni tecnologiche di tipo sostenibile, le pareti ad acqua hanno un grande potenziale per lo sviluppo dell'edilizia futura grazie alla capacità dell'acqua di essere riciclata all'infinito e alla sua facile reperibilità.

È possibile classificare queste pareti in quattro macro categorie:

- Pareti con involucro opaco;
- Pareti con involucro semitrasparente;
- Pareti con materiali a cambiamento di fase;
- Pareti combinate con altre tecnologie.

2.1.2 Pareti ad acqua con involucro opaco

La configurazione con involucro opaco è la più semplice, è caratterizzata da una parete d'acqua incorporata in un involucro opaco che può essere formato da diversi materiali:

- lastre metalliche;
- tubi in PVC;
- calcestruzzo;
- pannelli isolanti.

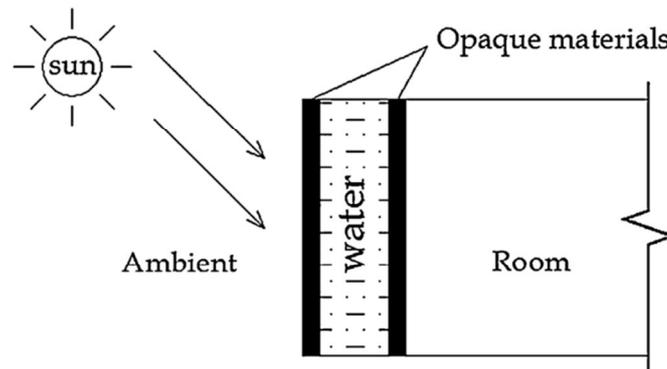


Figura 29 Schema Parete Opaca

L'interesse verso queste nuove tecnologie, volte al risparmio energetico, ha fatto in modo che in tutto il mondo venissero applicate in diversi settori, dal residenziale al commerciale.

Sutton e McGregor, costruirono due case solari passive una costruita con un muro in cemento e un'altra che sfruttava una parete ad acqua come involucro edilizio sul lato nord dell'edificio stesso. Il muro ad acqua era composto da 27 tubi in acciaio zincato contenenti acqua. I risultati mostrano che con questo sistema il consumo annuo di energia è stato dimezzato rispetto al caso di casa convenzionale.

Un'altra applicazione in campo residenziale è stata realizzata da Turner che ha realizzato una parete con tubi di plastica incorporati all'interno della muratura che azionato per un ciclo di 24 ore ha mostrato un aumento interno della temperatura di 2,6° facendo diminuire il carico termico per riscaldamento. In estate, il comfort viene raggiunto per mezzo di una parete attivata da aria fresca durante la notte.

Questa tipologia di involucro può avere delle buone prestazioni non solo in campo residenziale ma anche in altre attività, ad esempio quelle agricole, può essere incorporata alle serre invernali, ad



esempio. Dai risultati ottenuti, si evince un innalzamento della temperatura interna ed una diminuzione delle fluttuazioni di temperatura dell'aria.

Attraverso numerosi studi, sono state confrontate le prestazioni dei diversi componenti opachi che inglobano la parete acquosa in funzione delle condizioni climatiche dei diversi casi studio.

Con un metodo empirico detto "Solar Load Method", Balcomb e McFarland, hanno stimato le prestazioni di una parete di Trombe classica, con una parete ad acqua e verificato che quest'ultima ha una fonte mensile di riscaldamento superiore. I parametri che sono stati analizzati sono: il numero di vetri, i valori di assorbimento e di emissione, il valore di isolamento notturno (R), la capacità di assorbimento ed emissione e la capacità di stoccaggio della parete. Diminuendo il valore di R, del numero di vetri ed aumentando la capacità di stoccaggio termico, l'emissività e la massa aggiuntiva sono state migliorate le performance del muro.

Dalle analisi comparative di tra un muro di Trombe classico, una parete d'acqua con involucro in calcestruzzo, una con pannelli isolanti e un semplice strato d'acqua, Sodha, a Nuova Delhi, ha dimostrato che irradiando una parete e mantenendo costante la temperatura dell'aria dell'altra, il muro d'acqua, in queste condizioni climatiche, con calcestruzzo ha delle prestazioni migliori rispetto alle altre configurazioni. Sodha, ha studiato le prestazioni di stoccaggio dell'acqua e del cemento in una stanza non climatizzata, verificando che le capacità d'immagazzinamento dell'acqua erano migliori rispetto al calcestruzzo nel ridurre la temperatura dell'aria dell'ambiente.

Anche la configurazione della stratificazione del muro influisce sui risultati, infatti in estate sarebbe più auspicabile una configurazione crescente degli strati mentre in inverno decrescente. Imponendo uno spessore costante degli strati, sono state rilevante le minori fluttuazioni di temperatura.

I risultati ottenuti dalle analisi su una parete ad acqua con pannelli isolanti come involucro, sono stati ottenuti dei risultati poco soddisfacenti. Kaushik e Kaul, hanno riscontrato che la temperatura interna utilizzando una parete ad acqua con calcestruzzo fosse più alta di quella ottenuta con la parete con pannelli isolanti come involucro. Hanno valutato le prestazioni delle diverse configurazioni possibili con pannelli isolanti, per capire in che modo l'isolamento possa influire sul funzionamento del sistema, constatando che la configurazione calcestruzzo-acqua-calcestruzzo, a parità di condizione da vantaggi più significativi all'ambiente.

Lo studio di una configurazione con un involucro di ceramica che ingloba un sistema di tubi contenenti acqua è stata realizzato in Turchia, dove è stata comparata con un sistema di riscaldamento a pavimento.

I risultati sono stati monitorati per tre temperature differenti dell'acqua: 30°, 40° e 50°.

Il sistema a pavimento crea una stratificazione dell'aria maggiore rispetto alla parete acquosa, infatti se nella prima, la differenza di temperatura tra il pavimento e l'aria sopra era di 5°, nella seconda, era solamente di 1°, la parete acquosa quindi riesce ad ottenere la condizione di comfort, con una temperatura dell'acqua inferiore rispetto a quella che servirebbe utilizzando il riscaldamento a pavimento.

Per tale ragione si può concludere che le pareti ad acqua hanno una resa termica migliore.

2.1.3 Pareti ad acqua con involucro semitrasparente

L'Involucro all'interno del quale è inglobata la parete acquosa può essere semitrasparente, creando un'alternanza di materiali di materiali plastici o vetrosi sul lato esterno, fluido nella parte centrale e materiale opaco o semitrasparente sul lato interno.

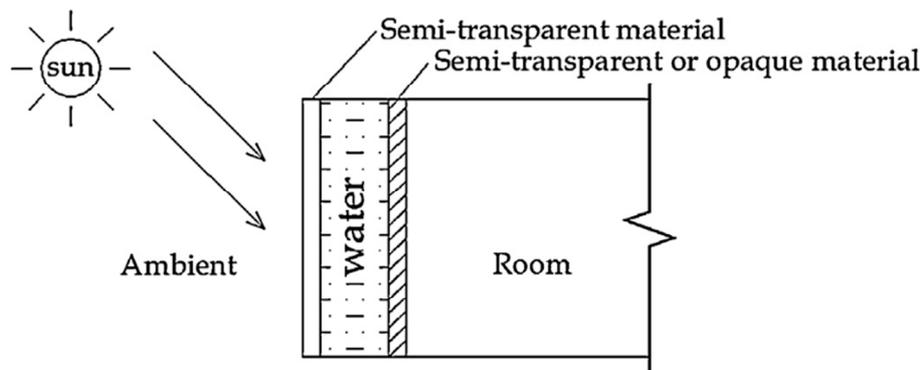
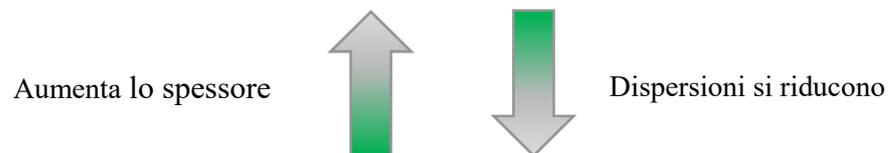


Figura 30 Involucro semitrasparente

La tecnologia trans combina due funzionalità, la funzionalità di guadagno termico diretto e la funzionalità di conservazione dell'energia termica, a differenza dalle pareti tradizionali e delle pareti acqua opache, la radiazione solare viene assorbita al centro della parete ma non sulla superficie frontale. Il trasferimento di calore è rapido e le perdite ridotte.

Se la configurazione del muro è costituita da due colonne d'acqua al centro della quale troviamo un assorbitore, aumentando la larghezza della colonna esterna e mantenendo costante lo spessore dell'assorbitore, aumenta il calore accumulato dalla parete in vetro e si ottiene un livellamento del carico perché si riducono le fluttuazioni.



La più famosa configurazione è il transwall, progettato da Fuchus e McClelland. Il transwall è la configurazione di parete ad acqua più efficace per soddisfare il carico termico invernale ma ha prestazioni inferiori rispetto al muro con involucro opaco se consideriamo: sbalzi di temperatura e lo sfasamento. Il muro progettato da Fuchus e McClelland aveva uno spessore di 15 cm e conteneva al suo interno un deflettore trasparente, dalle analisi di laboratorio, nel periodo di riscaldamento, le prestazioni erano superiori al classico muro di Trombe.

Parte dell'energia viene assorbita dal deflettore, l'altra parte viene trasmessa all'ambiente, nonostante la trasparenza del muro, possiede una capacità termica paragonabile ad un muro di calcestruzzo di 33 cm. Questo è possibile perché l'acqua ha delle capacità d'immagazzinamento dell'energia superiori rispetto al calcestruzzo

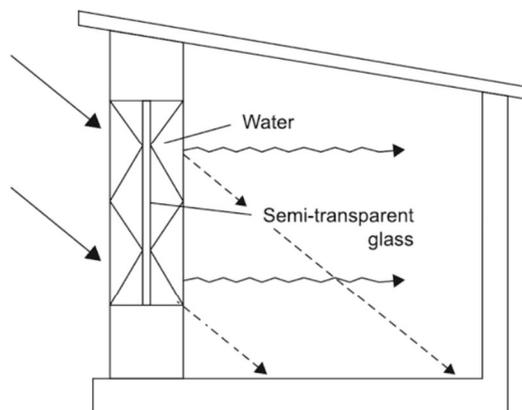


Figura 31 Schema di ripartizione dell'irradiazione solare

La disposizione degli strati del muro è un fattore particolarmente influente sulla resa del muro, è importante capire dove è più conveniente installare la parete di stoccaggio (come parete interne o come parete perimetrale) e secondo quale configurazione (parete di stoccaggio dietro un componente trasparente isolato o non isolato).

Da studi comparativi è risultato evidente che in termini di guadagno solare sono stati ottenuti risultati migliori posizionando la parete di stoccaggio ad acqua dietro un pannello isolato in vetro.

Un ulteriore vantaggio dei transwall è l'illuminazione dell'ambiente, la luce solare illumina lo



spazio sfruttando la radiazione solare giornaliera, però è importante saper regolare il quantitativo di luce attraverso la regolamentazione di schermature fisse o mobili aiutano al raggiungimento del comfort degli utenti.

Un limite del transwall di McClelland era la fluttuazione di temperatura, risultava infatti più elevata rispetto al muro di Trombe con acqua. Questo inconveniente può essere limitato inserendo del materiale "trappola" tra le colonne d'acqua e aumentando lo

spessore delle colonne stesse, in modo particolare se le dimensioni dei tubi di acqua sono uguali prima e dopo il materiale. Alcuni transwall sfruttano dei fluidi contenenti gel o coloranti, in altri, più recentemente sono stati inseriti dei fogli di policarbonato da 0,25 mm per migliorarne le prestazioni.

Oltre alle applicazioni in edilizia, queste pareti hanno attirato l'attenzione nella progettazione di transwall all'interno di una serra e per l'orto cultura avendo dei risparmi intorno al 20% in funzione dell'evaporazione e della traspirazione.

2.1.4 Pareti ad acqua con materiali a cambiamento di fase

Questo tipo di muro integra le caratteristiche di una parete ad acqua con i sistemi di accumulo che sfruttano i materiali a cambiamento di fase (PCM) ottenendo un sistema delle prestazioni ottimali. I PCM possono essere installati prima della parete ad acqua, dopo o su entrambi i lati.

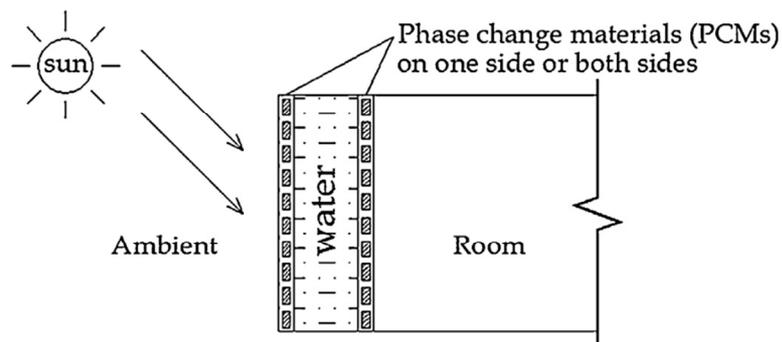
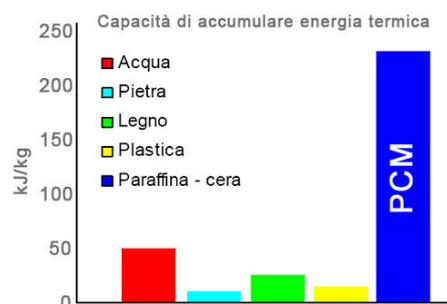


Figura 32 Schema con PCM

I PCM consentono di aumentare l'inerzia termica del sistema d'involucro incrementando lo spessore in maniera ridotta grazie all'utilizzo di pannelli sottili in PCM.

Grazie alle notevoli capacità di accumulo termico di questi materiali, sono in grado di migliorare in maniera radicale l'efficienza dei sistemi di riscaldamento e di raffreddamento dei sistemi edilizi.



Nei muri solari si adoperano in sostituzione dello strato opaco alleggerendone il peso e i costi di realizzazione senza comprometterne l'efficienza. La massa termica dei PCM ha la funzione di accumulatore di calore per una parte della giornata, mentre per l'altra come fonte di energia.

L'energia termica prodotta dal sistema è superiore dal 52,2% - 107% in più rispetto ad un muro tradizionale e dal 16,6% al 59,8% rispetto ad una parete ad acqua che accumula solamente calore sensibile.

Infatti, nonostante le pareti ad acqua fossero il miglior sistema di accumulo di calore sensibile, la loro capacità termica risultava comunque inferiore rispetto ai sistemi di accumulo latente.

Rice ha creato un sistema di riscaldamento che sfrutta contemporaneamente PCM e TES a breve termine, i PCM sono contenuti in tubi di calore che raccolgono il calore e lo trasferiscono al sistema TES. Una piastra assorbente trattiene il calore e lo trasmette ai PCM che passano dalla forma liquida a quella gassosa, entra a contatto con un condensatore e condensa e rilascia il calore latente alla parete.

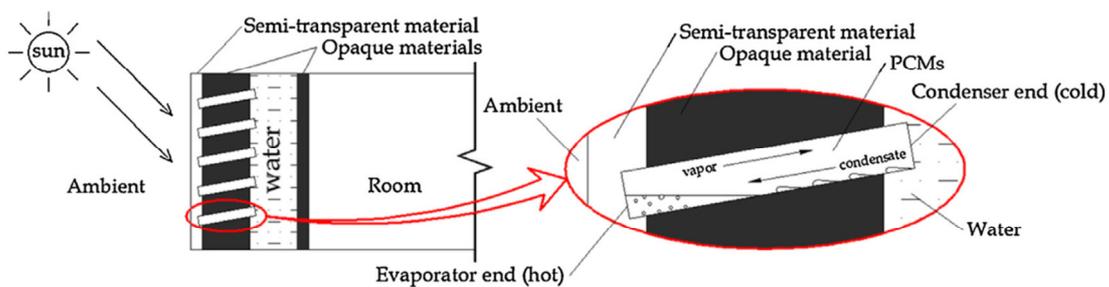


Figura 33 Particolare di installazione PCM

Nel 2013 questo sistema a tubi è stato migliorato aumentando l'isolamento ed esponendo il condensatore in aria, in questo modo i tubi di calore miglioreranno la resa diminuendo le perdite di calore trasmesso al sistema TES collegato.

2.1.5 Pareti ad acqua combinate con altre tecnologie

Per migliorare le caratteristiche del muro ad acqua molti studiosi hanno pensato di combinare questa tecnologia con altre preesistenti. In questo modo, si cerca di compensare i limiti di una e dell'altra strategia.

2.1.5.1 Parete ad Acqua combinata con Sunspace

In questo caso, sono stati compensati due sistemi di natura differente, un sistema di guadagno diretto, Sunspace, con un sistema di guadagno indiretto, water wall. Questa combinazione ha fatto in modo che le fluttuazioni di temperatura fossero ridotte notevolmente. Il collegamento del sunspace con un TES a breve termine con un buon sistema di ventilazione, ha fatto in modo che le prestazioni migliori dei sistemi comportassero anche un aumento del comfort abitativo, sia in estate che in inverno

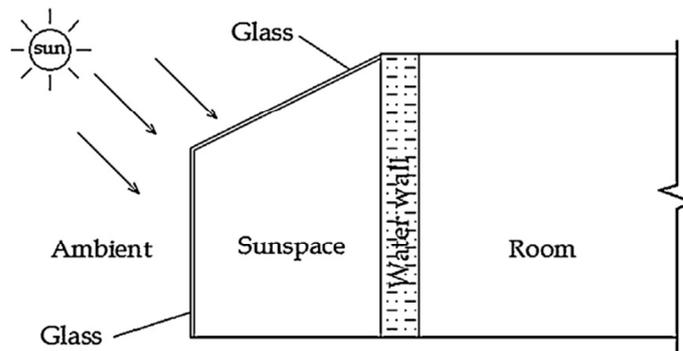


Figura 34 Schema con serra solare integrata

Dagli studi effettuati su diversi sistemi in cui il sunspace era collegato prima al muro ad acqua opaco, poi al transwall, è evidente come le prestazioni migliori siano state ottenute con il transwall. Questo ha prodotto una temperatura interna più alta rispetto al sistema opaco.

2.1.5.2 Parete ad acqua combinata con camino solare

La combinazione di queste due tecnologie fa in modo di migliorare la ventilazione naturale del camino solare, il quale a sua volta, migliora la ventilazione dell'ambiente.

Questo sistema passivo può ridurre fino a 4 ° la temperatura interna ed

aumentarla di 3° in inverno. Secondo uno studio cinese, usando questo sistema, il raffrescamento non era necessario poiché le temperature dell'ambiente nel 90% dei casi sono risultate inferiori alla temperatura limite.

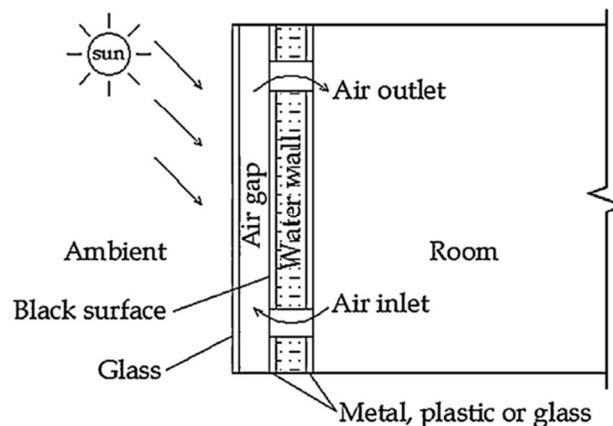
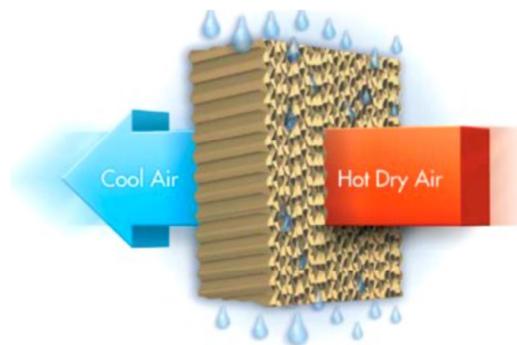


Figura 35 Schema con camino solare integrato

2.1.6 Parete evaporativa ad acqua

È una strategia di raffrescamento che sfrutta una parete solare ibrida e basa il suo principio di funzionamento su un processo evaporativo dell'acqua. Questa parete sfrutta un processo evaporativo adiabatico in cui si genera uno scambio di energia tra acqua e aria, l'aria cede parte della sua energia, in forma di temperatura, per far evaporare l'acqua. La parete evaporativa è un sistema sfruttato per la refrigerazione estiva grazie alla sua capacità di immettere aria nuova nell'ambiente e ad una temperatura anche di 5°-10° più bassa.

L'aria calda passa attraverso una parete bagnata con acqua che permette un abbassamento della temperatura mediante un processo evaporativo e attraverso la ventilazione viene introdotta in ambiente.



Negli anni l'interesse per questa strategie è cresciuto e ha portato alla sperimentazione di tecnologie differenti che sfruttano il principio dell'evaporazione per ridurre la temperatura delle stanze.

L'economicità e la buona resa, li rende efficaci per la climatizzazione di ambienti grandi in cui l'utilizzo di impianti di raffrescamento comporterebbe una spesa elevata di risorse.

I materiali adoperati come "filtro bagnato" tra l'ambiente esterno e quello interno sono molteplici e molteplici sono le modalità di imbibizione della parete.

In letterature sono stati studi relativi a:

- Muro con tubi di ceramica
- Muro con laterizi in ceramica umida
- Muro di Trombe con sistema di spruzzatura

La ventilazione è molto importante per il buon funzionamento del sistema, infatti, se la ventilazione naturale non è sufficiente, è necessario installare estrattori d'aria meccanici che garantiscano il ricambio di aria nell'ambiente.

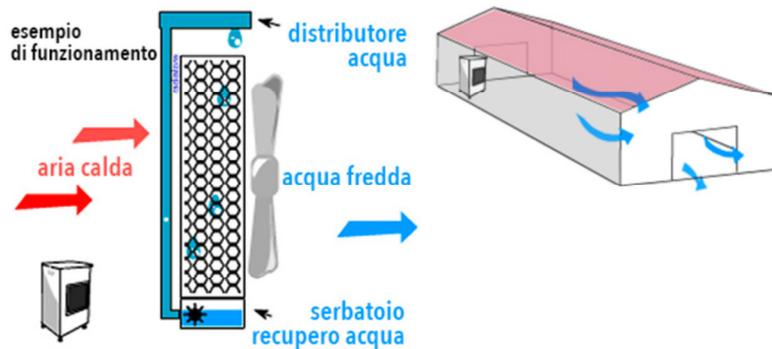


Figura 36 Schema di funzionamento evaporativo

Un aspetto fondamentale di questa tecnologia è la capacità di assorbimento della parete, maggiore è la capacità di assorbimento della parete, migliori saranno le prestazioni di raffreddamento. Per tale ragione, sono state fatte diverse ricerche e studi su materiali porosi e le loro prestazioni all'interno di questo sistema. La parete, deve essere costantemente umida, in modo da rendere possibile l'evaporazione, quindi il raffreddamento, in ogni momento della giornata. È necessario studiare un buon metodo per l'approvvigionamento dell'acqua, un buon sistema di pompaggio, può sfruttare l'acqua piovana accumulata in un serbatoio di accumulo sul tetto, oppure un sistema che garantisca la fornitura d'acqua senza l'utilizzo di una pompa, riducendo ulteriormente l'utilizzo di energia.

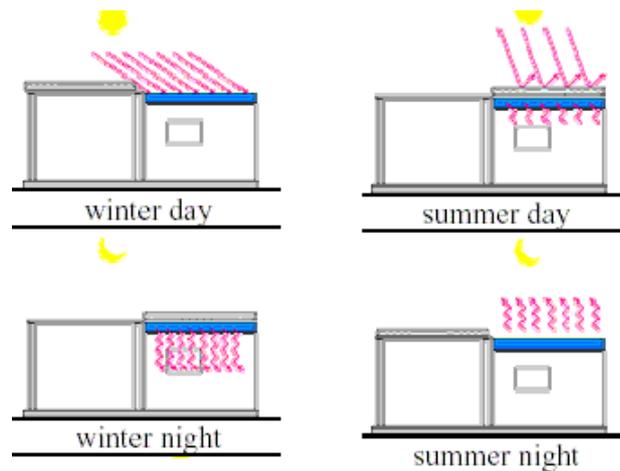
Per tali ragioni le pareti evaporative risultano essere una strategia di raffreddamento particolarmente ecologica ed economica.

2.2 Partizioni Orizzontali

Si definiscono Roof Pond o Tetto ad acqua i sistemi solari che sfruttano le potenzialità di assorbimento delle radiazioni solari come calore per produrre energia. Questa tecnologia consente di regolare la temperatura interna degli ambienti sfruttando le proprietà dell'acqua che può essere prelevata da serbatoio di accumulo dell'acqua piovana.

Il primo a realizzare un tetto con questa tecnologia fu Harold Hay che nel 1960 realizzò uno stagno sul tetto di una casa in California. Il tetto era costituito da una lastra in metallo ondulata sulla quale sono stati posti dei sacchetti di plastica contenenti acqua. Negli anni successivi l'idea di utilizzare il tetto ad acqua come sistema di stoccaggio fu presa in considerazione da altri ricercatori, che idearono delle soluzioni. Per migliorarne le prestazioni.

È una strategia che può essere utilizzata sia in estate che in inverno, con degli accorgimenti sul loro funzionamento, in particolare in estate, la superficie d'acqua è coperta per non assorbire troppo calore mentre di notte viene scoperta per garantire il raffreddamento dell'acqua e rendere confortevoli gli ambienti. In inverno invece il funzionamento è opposto, si apre il sistema a laghetto per ricevere la maggiore radiazione solare possibile in modo da ottenere e catturare la maggiore radiazione solare, riducendo l'evaporazione.



Nell'ottica di realizzazione di edifici con design a emissioni zero i roof pond sono un'ottima soluzione sia per il raffreddamento che per il riscaldamento degli edifici.

Il tetto è il maggiore responsabile del carico termico che grava sui sistemi HVAC, circa il 50% del calore viene assorbito dai tetti. Per tale ragione è importante regolare il calore che attraversa il tetto regolandone l'albedo, l'irradiazione e lo scorrimento dell'acqua.

Esistono differenti varianti di tecnologie di tetto ad acqua ad esempio: laghetti con sacchi di iuta bagnati, stagni sul tetto ombreggiato, stagno ventilati con isolamento mobile.

Nel mantenere il comfort termico nei sistemi di raffreddamento è importante fare delle buone indagini su:

- Profondità dell'acqua del laghetto;
- Condizioni metereologiche;



- Materiale del tetto;
- Spessore dell'isolante.

In entrambi i processi il tetto funge da elemento di scambio, funge da dissipatore che assorbe il calore interno e il calore penetra nell'edificio e il calore interno viene assorbito dal laghetto che poi viene trasmesso per radiazione e convezione nell'ambiente.

Grazie ai benefici che possono essere tratti dall'utilizzo di tecniche passive come i Roof Pond, che permettono di ridurre il carico termico a carico dell'impianto riducendo al minimo l'utilizzo di attrezzi elettrici e meccanici.

La trasmissione termica avviene attraverso la copertura, quindi può essere utile solo per edifici mono piano anche di grandi dimensioni, in alcuni sono dotati di sistemi di copertura per incrementarne le capacità di accumulo di energia termica e quindi l'efficienza.

Esistono varianti economiche per realizzare un Roof Pond racchiudendo l'acqua all'interno di sacchetti di plastica. La chiusura del sistema può essere realizzata con sistemi in poliuretano da 0,05 m rinforzata con trefoli in vetro racchiusi tra pelli in alluminio.

Tra le principali configurazioni di Roof Pond analizzeremo:

- Pond scoperti;
- Pond scoperti e dotati di un sistema di spruzzatura;
- Pond coperti;
- Pond coperti dotati di un sistema di spruzzatura;
- Skytherm
- Energy Roof
- Coolroof
- Pond calpestabili;
- Sacchetti di iuta
- Shaded
- Pond ventilati
- Pond coperti

Dei quali analizzeremo il comportamento e in quali condizioni è più vantaggioso utilizzarne uno rispetto ad un altro.

2.2.1 Roof Pond Scoperti

la categoria più semplice di Roof Pond sono i laghetti scoperti, grazie ai guadagni solari lo stagno scoperto tende ad aumentare la temperatura di circa 5°C. La profondità tipica di questi sistemi non è inferiore a 30 cm, è il sistema che consuma meno acqua proprio per la mancanza d'irradiazione.

Nelle ore diurne parte del calore ottenuto per irraggiamento viene assorbito ed immagazzinato in acqua prima di entrare in ambiente, in questo modo la temperatura di picco viene ritardata nelle ore pomeridiane durante le quali le temperature sono inferiori, in questo modo i sistemi HVAC possono intervenire velocemente nel riportare il comfort in ambiente e consumando un quantitativo di energia elettrica ridotto oppure mediante tecniche passive di ventilazione.

È importante che la ventilazione sia controllata, in particolare è importante controllare la velocità e gli effetti che si riscontrano sulla temperatura interna.

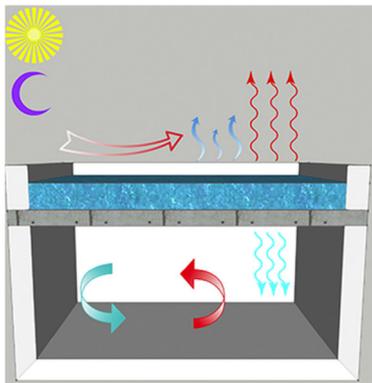


Figura 37 Roof Pond scoperto

Ulteriori vantaggi possono essere ottenuti mediante la tecnica di raffrescamento per evaporazione, con il progredire del processo di guadagni di calore, la temperatura dell'acqua aumenta ed evapora consentendo il raffrescamento notturno, il calore di notte fluisce verso l'esterno dato che la temperatura esterna è più fredda, nelle ore diurne invece funge da dissipatore, assorbe il calore interno e le radiazioni solari.

Nonostante lo stagno aperto privo di un sistema di spruzzatura, sia la configurazione più semplice ma la meno efficace, risulta riportare vantaggi superiori in ambienti con umidità relativa alte (anche 80%) e vantaggi ridotti in ambienti con un tasso di umidità relativamente basso.

2.2.2 Roof Pond Scoperti con Sistema di Spruzzatura

Lo stagno aperto con spray è dotato di una struttura simile al laghetto aperto senza sistema di spruzzature, a differenza di quest'ultimo è regolato da un sistema di irradiazione che funziona sia durante le ore diurne che durante quelle notturne.

Grazie a questo sistema di spruzzatura costante a differenza dei laghetti scoperti semplici la profondità dello stagno d'acqua può essere anche inferiore di 30 cm.

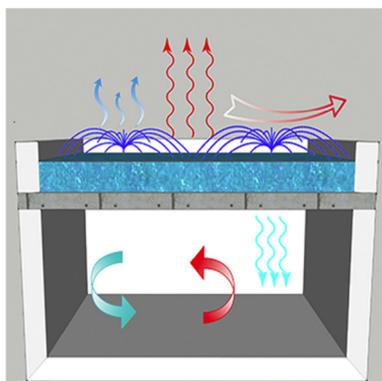


Figura 38 Roof Pond scoperto con spruzzatura

Da alcuni studi è stato riscontrato che il carico di raffrescamento, successivamente all'introduzione di questa tecnologia, è stato ridotto del 40% e differentemente dai sistemi privi di spruzzatura, ha una resa soddisfacente anche nelle zone con clima secco.

Questi sistemi solitamente vengono pensati per essere utilizzati in edifici in cui il carico di raffrescamento è elevato. Le prestazioni non possono essere migliorate in modo significativo aumentando la velocità dell'aria, in alcuni casi, invece, il soffio può essere così inconveniente da creare incrostazioni dovute all'accumulo di foglie, polveri ed insetti.

Da uno studio realizzato in Sudafrica, la temperatura interna dell'ambiente si è ridotta da 34°C a 28,41 °C, comportando quasi un dimezzamento dell'energia termica di raffreddamento.

La metodologia d'irradiazione dei Roof Pond deve seguire alcuni standard:

- Raggio delle gocce compreso tra 0,005-0,010m;
- Velocità del flusso variabile tra 1e 1,5 vol/h;
- Altezza di spruzzatura almeno di 0,5 m.

Sicuramente in confronto ai sistemi semplici privi di spruzzatura, il quantitativo di acqua speso è superiore, per limitare gli sprechi d'acqua l'irradiazione può essere limitata alle sole ore notturne, limitando conseguentemente anche l'efficienza.

Infatti, limitare in funzionamento solamente nelle ore notturne comporta alla temperatura dell'acqua di non oscillare intorno alla temperatura di bulbo secco (WBT), inoltre se l'irradiazione non risulta continua, lo spessore l'altezza dell'acqua non può essere ridotto ad un'altezza inferiore a 30 cm.

2.2.3 Roof Pond Coperti con un Sistema Mobile

Questa variante di Roof Pond è dotato di un isolamento mobile, solitamente opaco, può essere realizzato con diversi materiali: poliestere, poliuretano, polistirolo. Questa consente di proteggere il sistema dalla radiazione solare giornaliera impedendo il surriscaldamento dell'acqua e riducendo le fluttuazioni temperatura all'interno del sistema.

Lo strato di copertura viene rimosso nelle ore notturne per favorire il raffreddamento notturno per evaporazione, riducendo la temperatura esterna anche del 45%-50%.

In inverno, il sistema può essere invertito sfruttando al massimo le proprietà di stoccaggio del calore, che verrà trasmesso nell'ambiente per convezione.

L'efficienza di raffreddamento del sistema consente di ridurre o il carico sull'impianto rimuovendo o immettendo il calore di 465 Wh/m² nei mesi estivi e 577 Wh/m² nei mesi invernali.

Rispetto ai sistemi di Roof Pond scoperti la profondità dell'acqua può essere notevolmente ridotta ad un range di altezza compreso fra un minimo di 10 cm fino ad un massimo di 25 cm.

La capacità di raffreddamento del sistema è inversamente proporzionale alla velocità del vento anche se questo comporta ugualmente una diminuzione della temperatura maggiore in ambiente poiché la componente convettiva di raffreddamento legata al vento è più importante rispetto alla componente convettiva dovuta al guadagno di calore dell'acqua.

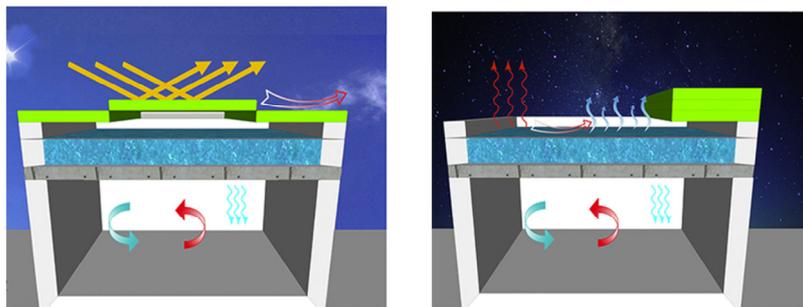


Figura 39 Roof Pond con copertura mobile

2.2.4 Roof Pond Coperti con un Sistema Mobile e sistema di spruzzatura

La configurazione di questo tipo di Roof Pond è simile a quella priva di sistema d'irrorazione con la differenza che durante le ore notturne il sistema di spruzzatura agisce sul laghetto con un meccanismo indipendente dal sistema di copertura. La spruzzatura può essere realizzata anche nelle ore diurne solo nel caso in cui la temperatura esterna è significativamente superiore rispetto alla temperatura della temperatura a bulbo umido. La copertura consente la diminuzione delle fluttuazioni di temperatura mentre il sistema di spruzzatura consente di ridurre la temperatura nelle ore notturne.

Esistono delle varianti per il raffrescamento estivo, in questi sistemi nello spazio che intercorre tra la massa termica e l'isolamento viene canalizzata l'acqua rinfrescata e viene fatta circolare dissipando il calore dallo spazio.

Anche in questo caso, il sistema può essere utilizzato per ridurre il carico termico di riscaldamento e può essere adoperato invertendone il funzionamento.

Tramite delle simulazioni e studi si è dimostrato che la temperatura interna in un clima umido può essere ridotta anche di 6°C, le temperature possono essere ridotte rispetto alla temperatura esterna anche del 45%. Nei climi tropicali, umidi, il carico può essere ridotto del 40%. La velocità del vento influisce in modo inversamente proporzionale sulle capacità di raffrescamento convettivo in ambiente.

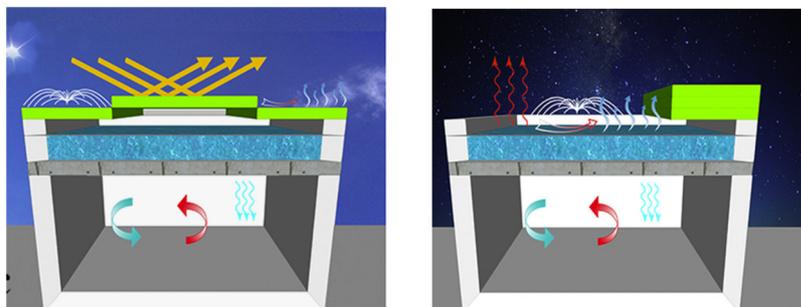


Figura 40 Roof Pond con copertura mobile e sistema di spruzzatura.

2.2.5 Skytherm

Il sistema di Skytherm è diverso dalle altre varianti analizzate fino ad adesso, proprio per la sua conformazione. Fu ideato negli anni '60 da Hay ed è costituito da:

- Supporto metallico;
- Un sistema di sacchetti contenenti acqua che consentono l'evaporazione solo mediante sistemi di spruzzatura.

Le buste d'acqua, solitamente in PVC o in polietilene, vengono raffreddate dalle radiazioni notturne e successivamente trasferiscono "freschezza" attraverso il solaio, opzionalmente può essere aggiunto uno strato d'acqua al di sopra dei sacchetti per migliorare l'efficienza di raffrescamento.

Un'ulteriore variante di Skytherm è stata realizzata con un sistema di perdita di vapore d'acqua, dai test effettuati è stato constatato che la temperatura interna giornaliera può essere mantenuta a 25 °C anche quando la temperatura esterna supera i 40°C. La dispersione di vapore comporta un miglioramento nella capacità del tetto di assorbire calore sensibile e latente di evaporazione.

La struttura metallica migliora l'accoppiamento termico con gli spazi sottostanti e amplifica il raffreddamento notturno.

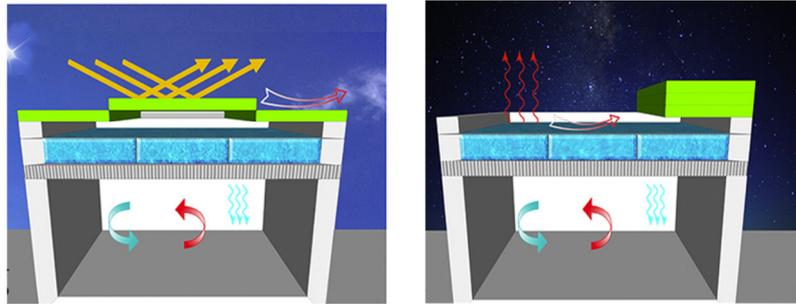


Figura 41 Skytherm

Sono stati realizzati numerosi test in zone climatiche con caratteristiche differenti ed è stato rilevato che:

- In clima aridi le temperature possono essere mantenute sotto i 30°C quando la temperatura a bulbo secco supera i 40°C;
- La domanda di riscaldamento è ridotta dell'86%;
- Clima mediterraneo le temperature interne sono mantenute intorno ai 23°C.

2.2.6 Energy Roof

L'Energy Roof è una tecnologia dotata di pannelli isolanti galleggianti che regolano lo scambio di temperatura con l'ambiente esterno.

Il galleggiante è realizzato con plastica espansa o altri materiali idonei e viene posto superiormente ad una camera d'acqua primaria. Al di sopra dello strato galleggiante è presente uno strato di plastica trasparente e sottile. Il tetto è realizzato in lamiera ed è la base sulla quale si crea una camera d'acqua poco profonda che viene collegata ai pannelli galleggianti mediante l'uso di tubazioni.

Nelle nottate estive, una pompa preleva l'acqua dalla camera e la porta al di sopra del galleggiante, in questo modo la radiazione notturna rinfresca il sistema, la mattina seguente l'acqua viene riportata nella camera d'acqua attraverso delle valvole e rinfresca per convezione gli ambienti. Il sistema d'isolamento galleggiante aiuta a mantenere la temperatura "fresca" dell'acqua.

Un'altra strategia per rinfrescare l'ambiente potrebbe essere anche l'utilizzo di un sistema di spruzzatura che irrori lo strato in plastica trasparente che si trova al di sopra dell'acqua prelevata e posta sopra il galleggiante favorendo il raffreddamento evaporativo.

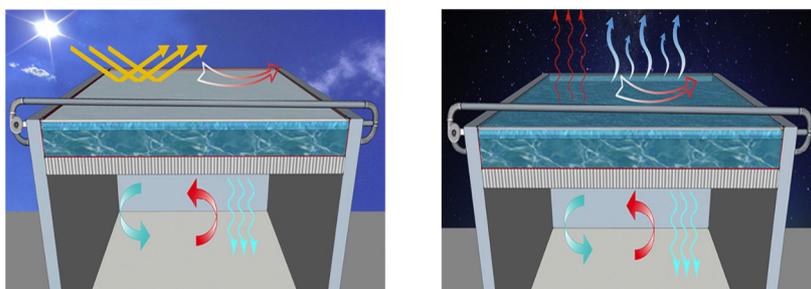




Figura 42 Energy roof

2.2.7 Cool Roof

Il Cool-Roof è un sistema brevettato nel 1992 da Springer e Bourne, ha una configurazione simile all'Energy Roof anche se si colloca al di sopra di un tetto in cemento coperto da una membrana impermeabile solitamente in PVC o in polietilene.

Allo stesso modo il pannello isolante è di 8 cm e galleggia sopra l'acqua, un sistema di scarico che rilascia l'acqua rinfrescata nelle ore notturne in modo da raffrescare l'ambiente nelle ore diurne per convezione.

Ciò che caratterizza e differenzia i Cool Roof dai sistemi Energy Roof è la grande capacità dei sistemi di riflettere l'irradiazione solare incidente e con un valore elevato di emissività nell'infrarosso. Il pannello isolante è verniciato con un colore bianco in modo da riflettere la radiazione solare all'esterno e ridurre quindi la radiazione incidente in ambiente, la maggior parte della radiazione infatti viene trasferita in atmosfera.

Da alcuni test si evince che durante la giornata la temperatura dell'acqua cresce anche di 5 gradi ma si mantiene comunque sempre al di sotto della temperatura dell'ambiente, infatti in fase di raffreddamento la temperatura si abbassa di almeno due gradi rispetto alla temperatura a bulbo umido.

Le prestazioni del sistema si possono incrementare dotando la tecnologia anche di un sistema di spruzzatura che può essere azionato quando necessario per favorire il raffreddamento evaporativo.

I Cool Roof sono stati ampiamente studiati e messi in produzione in America, in Italia non sono ancora sufficientemente conosciuti.

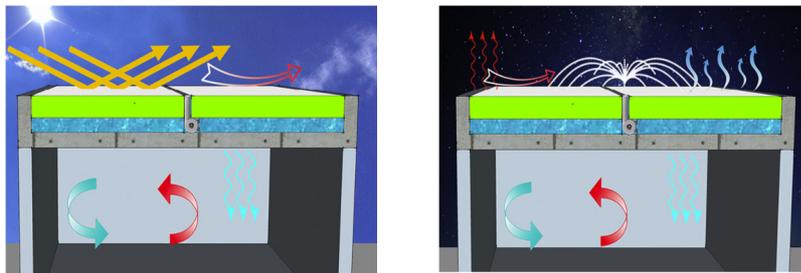


Figura 43 Cool Roof

2.2.8 Roof Pond Calpestabili

Questa categoria di Roof Pond è caratterizzata dalle superfici calpestabili che consentono la possibilità di essere attraversati senza creare problematiche di funzionamento o interruzioni del loro funzionamento.

I sistemi con tetto calpestabili possono essere realizzate in tetti di cemento armato piani e in zone con climi miti in cui le temperature difficilmente scendono al di sotto dello zero.

Esistono due varianti principali di questo sistema, una è dotata di isolamento integrato, l'altra di un sistema di circolazione notturna.

Per evitare che il sistema di dissipazione del calore si inibisca spesso questi sistemi sono dotati di un sistema di nebulizzazione.

2.2.8.1 Roof Pond Calpestabili con Isolamento Integrato

Il sistema è sostenuto da un tetto in calcestruzzo leggermente inclinato per drenare l'acqua piovana. È costituito da diversi strati:

- Membrana impermeabile;
- Tetto di supporto;
- Contenitore d'acqua e ciottoli;
- Pannelli isolanti (da 5 cm a 10 cm) in polistirolo ed intercapedini;
- Strato d'acqua e ciottoli;

Lo strato d'acqua inferiore è costituito da valvole che scaricano l'acqua rimuovono l'acqua in inverno.

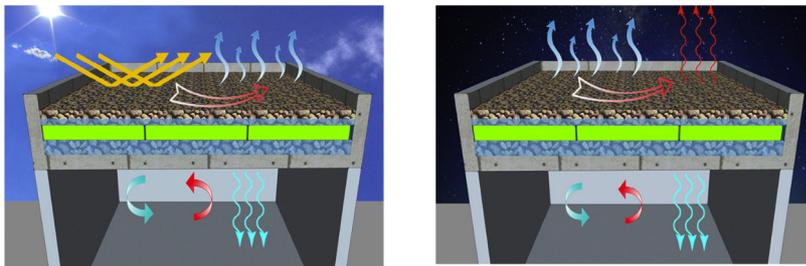


Figura 44 Roof Pond calpestabili con isolamento integrato

2.2.8.2 Roof Pond Calpestabili con Circolazione Notturna

Questa tecnologia ha una configurazione simile ai sistemi con isolamento integrato ma presenta un unico strato d'acqua. È costituito da diversi strati:

- Membrana impermeabile;
- Tetto di supporto;
- Contenitore d'acqua e ciottoli;
- Pannelli isolanti (da 5 cm a 10 cm) in polistirolo ed intercapedini;
- Piastrelle sottili.

Al di sopra dello strato di ciottoli è posizionata una membrana isolante sul quale poggiano le piastrelle che garantiscono la calpestabilità. Durante le ore notturne come nell'Energy Roof e nei Cool Roof l'acqua viene fatta circolare sopra le piastrelle per migliorare l'evaporazione notturna.

Attraverso dei test è stato constatato che il comportamento nei climi aridi e caldi e nei climi temperati e caldi è ottimale, nei secondi, invece, si è misurata una differenza di temperatura di 7 °C inferiore rispetto a quella esterna, nei secondi invece di 8°C.

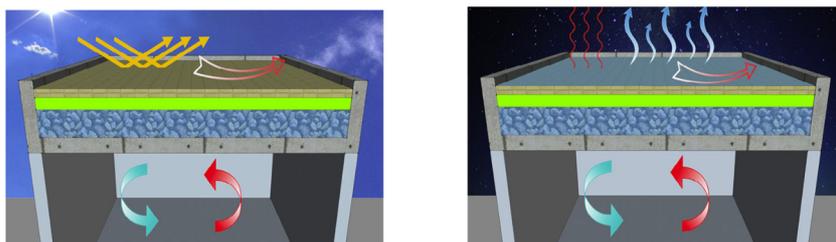


Figura 45 Roof Pond integrati con circolazione notturna

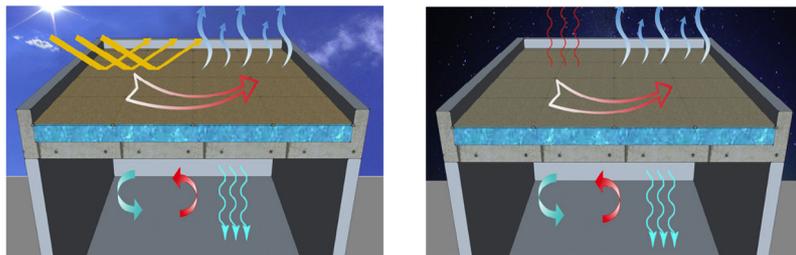
2.2.9 Roof Pond realizzati con Sacchetti di Iuta

Questo sistema poggia su tetto o in calcestruzzo o in metallo sul quale poggia una griglia in PVC perforato sul quale poggiano a sua volta dei sacchetti di iuta, che intercettano la radiazione solare e dissipano la radiazione ricevuta e gli incrementi di temperatura attraverso la radiazione termica, la convezione e l'evaporazione dell'acqua.

Lo strato d'acqua solitamente è di 15 cm con un massimo di 20 cm sopra il quale è posta la griglia galleggiante in poliestere sulla quale poggiano i sacchetti, ad una certa distanza solitamente è posto un pannello isolante in poliestere, posizionato in modo tale da fare circolare l'aria tra due strati.

Da diversi studi emerge che:

- Più è bassa la temperatura dello stagno più efficace è il sistema di raffreddamento;
- Nelle zone aride si ha una riduzione di temperatura di 7 °C rispetto alle temperature esterne;
- L'integrazione di un sistema d'irrorazione comporta un'implementazione nelle capacità di raffreddamento evaporativo.



2.2.10 Shaded Roof Pond

Nei Sistemi a laghetto ombreggiati la radiazione solare viene intercettata da un sistema di ombreggiamento fisso realizzato con una struttura simile alle veneziane che impedisce il contatto diretto tra le radiazioni solari e l'acqua e che garantisce la ventilazione.

Il sistema di copertura è completamente chiuso di giorno per minimizzare il guadagno termico solare e aperto di notte per consentire il raffreddamento evaporativo, se il sistema è fisso, gli elementi di copertura vengono posizionati in modo tale da bloccare la radiazione diretta diurna e ricevere quella notturna.

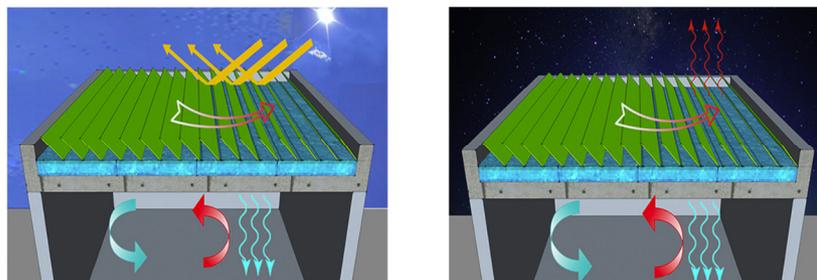


Figura 46 Shaded Roof Pond

Il roof pond ombreggiato può essere realizzato con solo strato d'acqua sopra il tetto oppure può essere accoppiato ad una colonna verticale d'acqua che collega la superficie del laghetto con lo spazio sottostante.

Quest'ultimo accoppiamento prende il nome di Cool Pool, grazie allo scambio diretto di calore interno con l'esterno garantisce vantaggi di raffrescamento.

Nei Cool Pool i costi di manutenzione dell'impianto sono sicuramente più elevati ma oltre a riscontrare dei vantaggi in termini di raffrescamento, i consumi d'acqua sono relativamente ridotti.

Attraverso delle prove si è riscontrato che questa strategia di raffrescamento ha portato degli ottimi risultati sia in un clima caldo temperato che in clima mite.

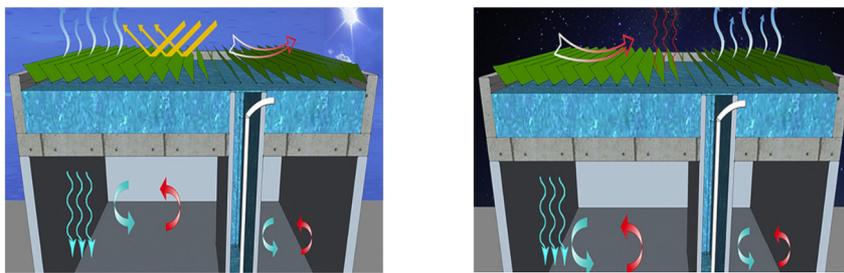


Figura 47 Cool Pool

2.2.11 Roof Pond Ventilati

I Roof Pond ventilati sono dei sistemi di tetto ad acqua installati su una soletta metallica, godono di un secondo strato isolante che protegge l'acqua e un coperchio in posizione fissa permanente che crea uno strato d'aria ventilato. Il coperchio solitamente è realizzato in metallo e foderato con uno isolante come EPS o poliestere.

La ventilazione naturale è garantita dalle aperture che permettono la circolazione dell'aria e da ventole meccaniche integrate, in alcuni casi è associato un sistema di irradiazione che consente di migliorare le prestazioni di raffrescamento evaporativo.

Questa configurazione limita il potenziale di raffreddamento ma incrementa notevolmente effetti convettivi ed evaporativi. In inverno l'acqua viene drenata e gli sfiati sono chiusi per diminuire ogni possibile perdita di calore. Sia in climi aridi che in clima mediterraneo i risultati sperimentali ottenuti hanno mostrato che il comfort termico era stato ottenuto riducendo la temperatura di picco, le oscillazioni di temperatura e la temperatura interna del 30%.

Per rendere ottimale l'efficienza del sistema la temperatura dell'acqua deva essere circa 1-2 K superiore alla temperatura a bulbo secco e funziona in maniera ottimale in luoghi con temperatura a bulbo secco inferiore a 40°C.

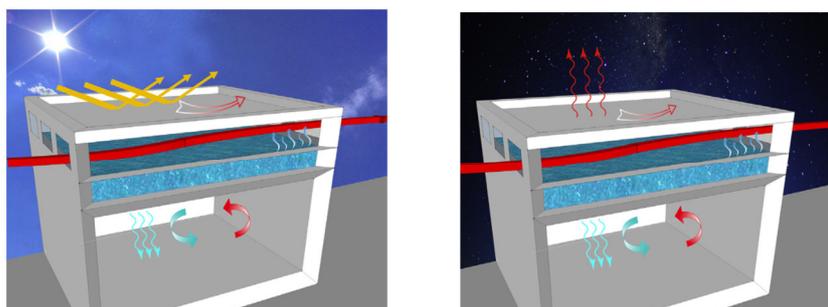


Figura 48 Roof Pond ventilati

2.2.12 Roof Pond con Tetto Chiuso

Sono dei sistemi dotati di una copertura fissa e da uno strato isolante, in alcuni casi è presenta un'intercapedine non areata.

Solitamente proprio come nei Cool Roof la copertura viene dipinta con dei pigmenti a base di titanio che migliorano le caratteristiche riflettenti del materiale.

Nelle ore notturne la temperatura della piscina è superiore a quella della lastra in alluminio, si crea del vapore d'acqua che da avvio ad un processo di scambio termico trasferendo calore all'esterno.

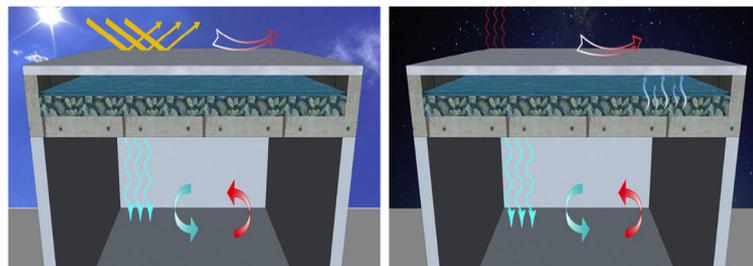


Figura 49 Roof Pond con Tetto chiuso.

In altri esperimenti è stato introdotto uno strato isolante aggiuntivo che blocca qualsiasi processo evaporativo e lo stagno funge da strato isolante aggiuntivo

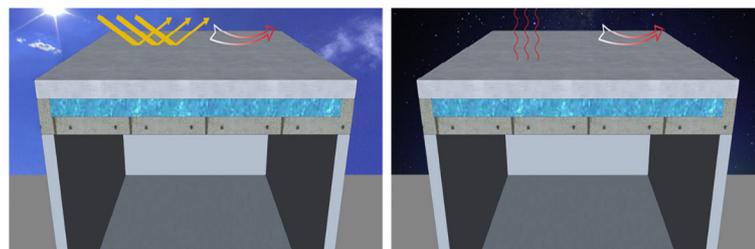


Figura 50 Roof Pond con Tetto chiuso con isolante aggiuntivo

2.2.12 Roof con Collettore solare integrato

Il tetto con collettore solare integrato nasce nel 2006 da uno studio sviluppato da Juanico, presenta una struttura simile allo Skytherm anche se non può essere considerato un sistema passivo di raffrescamento/ riscaldamento, in alcuni casi, ha un funzionamento migliore dello skytherm.

Il laghetto d'acqua ha una profondità di 5 cm circa ed è posizionato sulla sommità di una base metallica dipinta con strato di verniciatura impermeabile. Un primo strato di tenuta stagna viene

realizzato coprendo il laghetto con uno strato di vetro, al di sopra di esso viene realizzata una camera d'aria che a sua volta viene coperta da uno strato di vetro.

Al di sopra della camera d'aria viene installata una tenda che può essere aperta o chiusa in relazione alla stagione e all'ora del giorno.

Il drenaggio e il riempimento di acqua nello strato di tenuta stagna viene realizzato integrando il sistema con una pompa e una caldaia e realizzando un serbatoio di stoccaggio l'acqua nei pressi dell'abitazione.

Nei giorni invernali il sistema risulta scoperto, la vasca d'acqua riempita, assorbe tutto il calore e per irraggiamento riscalda l'ambiente interno, infatti questa viene inviata al serbatoio di stoccaggio e fatta circolare mediante uno standard sistema di acqua calda sanitaria.

Nelle ore notturne le camere d'aria garantiscono un ottimo isolamento termico.

Nelle sere estive viene generato un laghetto secondario che ha la funzione di raffreddare il primo, attraverso processi evaporativi e con radiazione termica verso il cielo.

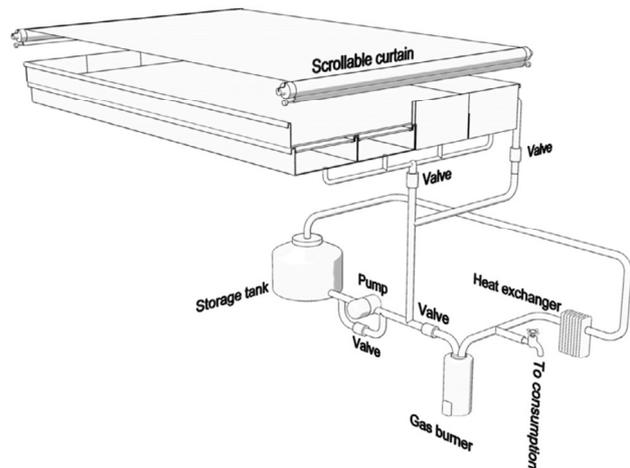


Figura 50 Schema con collettore solare integrato

Nelle ore giornaliere l'acqua raffrescata viene pompata nel tetto metallico per raffrescarlo mediante convezione libera. La tenda in questa circostanza sarà chiusa ed è in grado di ridurre le radiazioni solari incidenti.

Juanico ha inventato una variante che può essere realizzata anche con tetti inclinati, dalle prove è stato dimostrato che anche in questa configurazione il sistema risulta molto vantaggioso ed è in grado di raccogliere lo stesso quantitativo di energia solare di un sistema con tetto orizzontale fino ad una configurazione con una pendenza di 60°C.

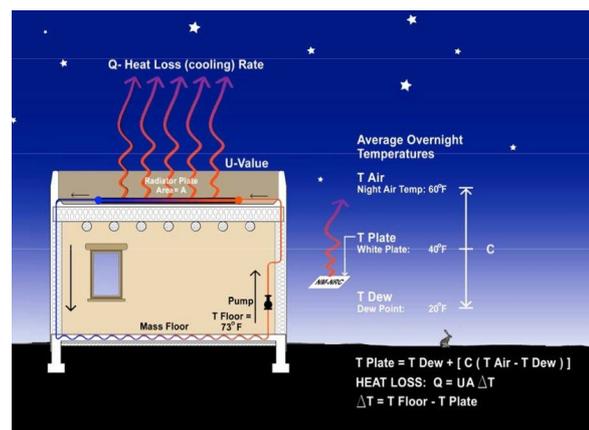
2.2.13 Varianti alternative di Roof Pond

Negli ultimi anni sono state studiate delle varianti di Roof Pond che sfruttano le proprietà dell'acqua per riscaldare e rinfrescare gli ambienti in modo innovativo.

Una di queste è il "Sunny South Model" che sfrutta un collettore solare e un riflettore per intensificare l'ingresso di radiazione solare e l'accumulo di calore sotto il pavimento.

Durante le ore notturne invernali, il pavimento e lo spazio abitativo sono riscaldati dall'acqua calda dello stagno che viene drenata in un'area di stoccaggio del pavimento.

In estate invece le temperature vengono ridotte grazie alle capacità di assorbimento del calore in eccesso del laghetto che libera in maniera ritardata di notte.





Nel 2003 viene realizzato un laghetto innovativo che viene protetto da una piastra di alluminio che viene posizionata ad una certa distanza da esso formando una cavità dalla

quale passa l'aria. Il laghetto poggia su un solaio in calcestruzzo sopra il quale poggiano un letto di rocce e lo strato d'acqua.

Come nei Cool Roof la lastra di copertura viene dipinta di uno strato di vernice bianco che ne aumenta le capacità riflettenti.

Lo schema di funzionamento è identico ai sistemi Cool Roof, nelle ore notturne la temperatura del foglio scende al di sotto della temperatura del letto di roccia ed acqua, si genera del vapore d'acqua che si condensa e cade nel laghetto a causa della gravità, in questo modo il calore viene indirizzato

verso l'ambiente esterno e il freddo verso quello interno, mettendo in azione un sistema di scambio termico.

Dagli studi effettuati il raffreddamento prodotto è soddisfacente, la temperatura viene mantenuta al di sotto della temperatura notturna nelle ore diurne.

Dei miglioramenti possono essere realizzati integrando al sistema una ventilazione meccanica durante la serata.

Esempi di Edifici Esistenti

In questo capitolo saranno riportate delle schede tecniche che esplicano le scelte, le caratteristiche, e le filosofie progettuali che stanno alla base della realizzazione di alcuni esempi di costruzioni che sfruttano tecnologie d'involucro ad acqua per ridurre il carico termico di raffrescamento e di riscaldamento.

In un primo momento saranno raccolti degli esempi di tecnologia che agiscono sulle partizioni verticali, in un secondo momento saranno illustrati degli esempi di tetti che sfruttano le proprietà dell'acqua per raffrescare gli ambienti.

3.1 Esempi Progettuali di Pareti ad Acqua

3.1.1 Abitazione Steve Baer New Mexico

Questo progetto rappresenta una delle prime applicazioni Water Wall realizzata negli '70, progettato da Steve Baer con lo scopo di realizzare una nuova abitazione solare passiva, sfruttando le capacità dell'acqua di accumulare calore e rilasciarlo in ambiente.

L'edificio ha un design spaziale che utilizzava cinquantacinque barili d'acqua che fungono da massa termica che conferisce alla struttura un design solare passivo innovativo.

Le pareti a sud dell'edificio godono di un sistema vetrato con vetro a vetro



Figura 51 Foto Interni



singolo e coperture riflettenti che si abbassano nelle giornate invernali soleggiate e vengono chiuse nelle ore notturne.

Il sistema ha registrato un buon funzionamento nonostante le modalità d'isolamento di pareti e soffitti siano state realizzate con materiali modesti.

Dai risultati il comfort dei residenti è stato soddisfatto ed ha spinto Steve Baer a realizzare altri progetti con la stessa filosofia costruttiva.

Figura 52 Facciata abitazione Steve Baer

3.1.2 Complesso Prisma a Norimberga in Germania

Realizzato da Joachim Eble è un complesso che fonda sui concetti di architettura bioclimatica sfruttando l'acqua come elemento che influisce sul microclima interno.

Nell'ottica della sostenibilità e dell'architettura "green" è stato realizzato un sistema di raccolta delle acque meteoriche, l'acqua piovana viene raccolta e incanalata all'ultimo piano e infine convogliata in una cisterna, successivamente viene sfruttata per scopi sanitari, invece, un sistema di sei torri d'acqua condizionano l'ambiente interno.

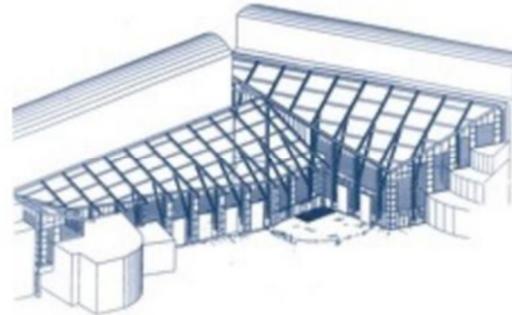


Figura 53 Schema facciata serra solare

il complesso composto da:

- Due blocchi di negozi al piano terra;
- appartamenti negli ultimi due piani;
- blocco di abitazioni composto da cinque piani;

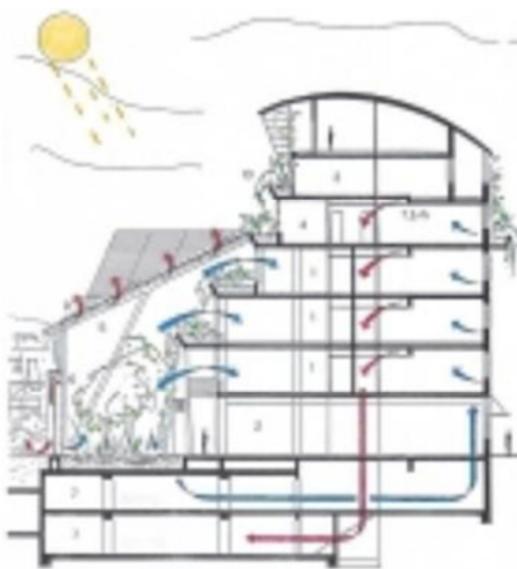


Figura 54 Schema di ventilazione

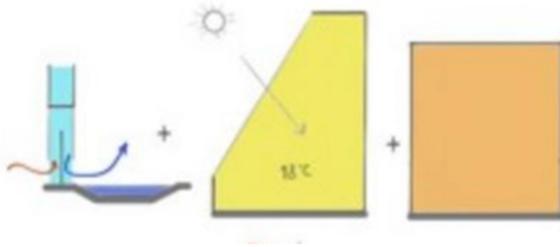
L'aria viene purificata attraverso un filtro naturale, "vegetale", una serra che connette i corpi degli uffici, caratterizzata da un percorso verde e da un piccolo stagno all'interno del quale convoglia l'acqua piovana. Un sistema vetri apribili considerato il "polmone" di tutto il complesso.

In estate i pannelli di vetro vengono aperti creando un flusso d'aria ascendente paragonabile a quello dei camini solari che raffresca l'ambiente grazie anche alla presenza di vegetazione e di acqua nella serra. Il limite delle vetrate di introdurre troppe radiazioni solari e conseguentemente un'eccessiva quantità di apporti solari è stata prevista la stesura di teli che intercettano l'irraggiamento.

La ventilazione durante le ore notturne viene invertita consentendo alla serra di liberare verso l'esterno il calore accumulato dalla serra.

La scelta dei materiali accurata consente di neutralizzare l'aria afosa dovuta all'umidità. L'architetto ha scelto dei materiali porosi e traspiranti come: laterizi, legno e intonaci di calce.

Nel periodo invernale la serra viene chiusa e grazie all'effetto di surriscaldamento le temperature interne vengono incrementate all'interno della serra. L'aria al suo interno viene prelevata ed immessa negli uffici stessi.



Lungo il perimetro della serra sono state installate diverse pareti che hanno la capacità di climatizzare gli ambienti, vincolando l'aria a fare un percorso obbligato che la raffresca.

Queste pareti cementizie hanno una configurazione simile ad una classica parete di Trombe ma con un elemento innovativo: degli specchi d'acqua.

In questo modo l'aria prima di entrare in ambiente subisce un decremento di temperatura, l'aria passa attraverso un sistema ligneo nella parte inferiore della parete, questa risale e viene convogliata all'interno d'intercapedine in cui ritroviamo l'acqua che abbassa la sua temperatura.

Sempre nell'ottica del risparmio energetico anche per alimentare questa parete l'acqua viene prelevata da una cisterna in cui convoglia l'acqua piovana attraverso una grondaia.

Questo edifici nel clima del risparmio energetico degli ultimi anni mostra come uno studio sull'utilizzo dell'acqua come strumento per mantenere comfort negli edifici sia una strategia vincente.

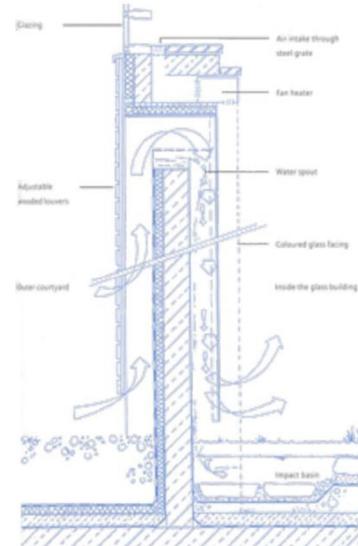


Figura 55 Schema parete ad acqua

3.1.3 Council House (CH2) a Melbourne in Australia

La Concil House nasce da un progetto di riqualificazione urbana, in particolare nel 2004 la città di Melbourne ha approvato un progetto di riqualificazione delle strutture all'interno delle quali sorgeva il municipio. La filosofia costruttiva sulla quale è stato fondato il progetto trova le sue radici sul concetto di architettura bioclimatica, diventando un esempio di green building nel mondo.

L'obiettivo principale era di ottenere degli standard di benessere igrometrico elevati ponendo una particolare attenzione ai temi della sostenibilità sfruttando strategie d'intervento attive e passive.

L'edificio gode di sistemi attivi quali:

- impianto fotovoltaico e solare;
- turbine minieoliche;
- raffrescamento naturale con serbatoi con PCM;
- pannelli radianti a soffitto;
- torri di refrigerazione.

E sistemi passivi:

- schermature controllate e frangisole in legno riciclato;
- verde pensile;
- materiali riciclati e naturali.

Ognuna delle quattro facciate del complesso ha un compito differente, ad ovest è stato installato un sistema di persiane mobili lignee che proteggono gli uffici dal sole, a nord sono presenti dei condotti oscuri utilizzati per l'estrazione dell'aria e dei giardini pensili come schermatura solare, ad est una lamiera forata consente la ventilazione continua e a sud invece si trovano delle torri evaporative.

Le tecnologie scelte sottolineano una maggiore attenzione progettuale per le tecniche di raffrescamento, infatti, il clima di Melbourne è caratterizzato da climi miti ed estati calde, rendendo necessaria il riscaldamento dell'edificio nelle sole ore mattutine dei mesi freddi.

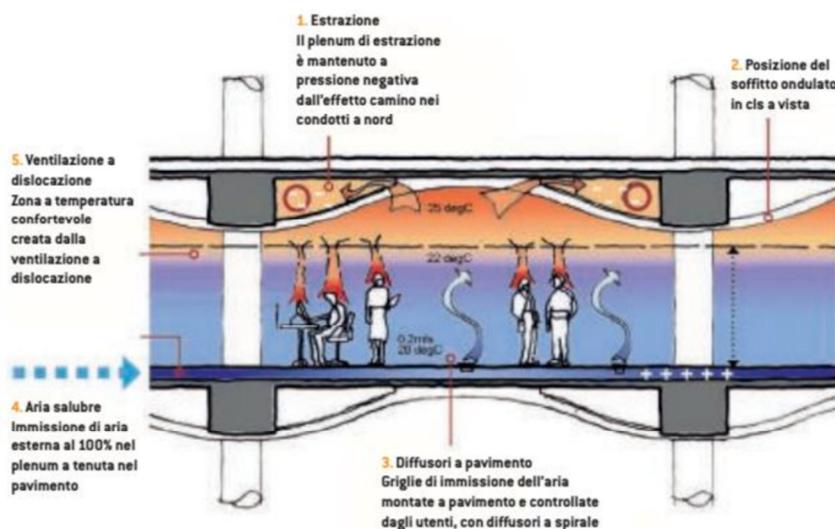


Figura 57 Schema di ventilazione ed estrazione aria



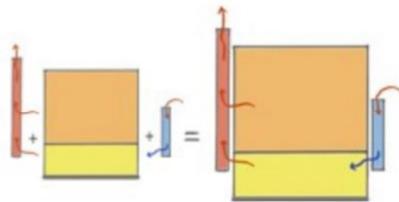
Figura 56 Concil House

La ventilazione viene garantita da un sistema di ventilazione meccanica che immette in ambiente l'aria fresca presa in sommità dall'esterni, mantenendo in depressione i camini solari collegati ai condotti dell'aria, l'aria viene estratta dall'ambiente.

Nelle ore notturne quando la temperatura dell'aria esterna è più

bassa di quella interna, si attiva una tecnologia di raffrescamento naturale della massa termica che asporta il calore accumulato durante le ore diurne.

Il sistema di climatizzazione utilizza dei pannelli radianti posti nel soffitto, ai quali viene pompata acqua fresca da un serbatoio di accumulo. Questi serbatoi sfruttano l'inserimento di sfere di acciaio inox contenenti materiali a cambiamento di fase (PCM) per raffrescare più velocemente l'acqua più calda che proviene dall'edificio.



Un elemento innovativo di raffrescamento sono le torri evaporative poste sul lato sud dell'edificio, hanno un diametro di 1,4m e altezza di 8 m dell'acqua viene spruzzata sulla sommità che evaporando raffresca l'aria circostante e l'acqua allo stato liquido.

L'aria precedentemente raffrescata viene immessa in ambiente mentre l'acqua viene introdotta nei serbatoi con PCM di cui abbiamo parlato precedentemente.

Sul tetto sono stati installati dei pannelli solari che sfruttano l'energia solare gratuita, dei pannelli d'acqua posti sul tetto inoltre vengono utilizzati per produrre il 60%

di energia per il fabbisogno di acqua calda sanitaria, attraverso dei pannelli fotovoltaici inoltre si è ridotto il fabbisogno di energia elettrica.

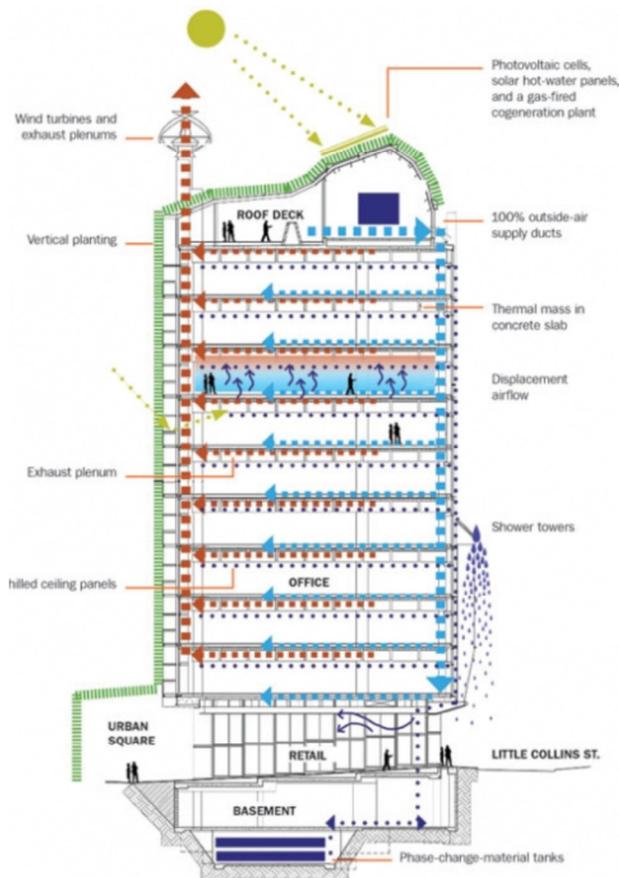


Figura 58 Schema riassuntivo dei sistemi installati

Le mini turbine eoliche servono a produrre energia elettrica utilizzata per estrarre l'aria dagli uffici, l'aria viene riciclata effettuando dei ricambi d'aria che garantiscono l'asportazione dell'aria al 100%.

Anche l'effetto ondulato del tetto aiuta a mantenere una stratificazione dell'aria che facilita il mantenimento della temperatura ideale in corrispondenza della fascia abitativa.

Dai dati rilevati dalle indagini effettuate sui consumi si è riscontrato:

- un abbattimento dell'87% di CO₂;
- un risparmio di elettricità dell'82%;
- un risparmio di acqua del 72%;
- un risparmio di gas dell'87%.

Da un'indagine sui livelli di soddisfazione e benessere degli occupanti si è constatato una condizione di benessere psicofisico degli occupanti.

3.1.4 EcoBoulevard a Madrid in Spagna

L'EcoBoulevard nasce da un progetto di qualificazione di una zona di nuova urbanizzazione nella periferia di Madrid. Il progetto prevede la costruzione di tre alberi d'aria posizionati agli incroci con altre strade. Tre padiglioni o alberi d'aria funzionano adoperando energia di raccolta dai sistemi fotovoltaici, sfruttano delle tecnologie architettoniche capaci di adattarsi al clima della zona.

I pannelli fotovoltaici posti sulla sommità della struttura rendono il sistema autosufficiente e grazie all'energia fornita e venduta sono in grado di coprire tutte le spese.

Sono caratterizzati da elementi facilmente smontabili e rimontabili in altre zone che richiedono lo stesso intervento di rigenerazione urbana.

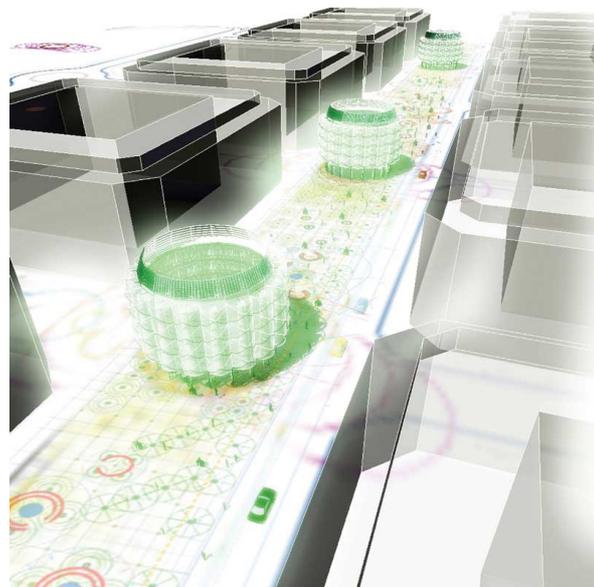


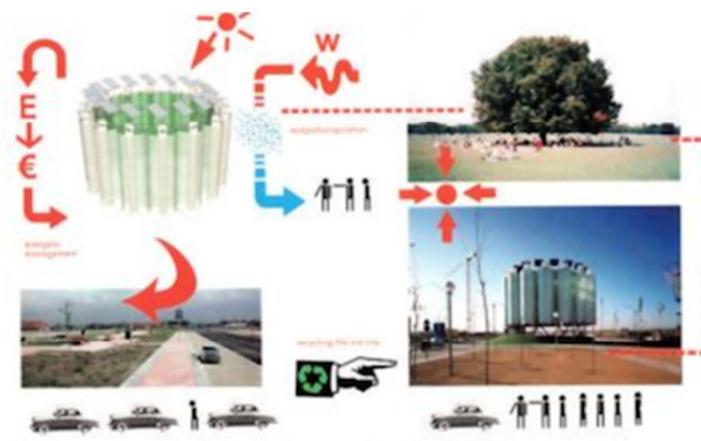
Figura 59 Render di progetto EcoBoulevr.

La caratteristica di maggiore rilievo è l'utilizzo di tecniche di ventilazione passiva e raffrescamento evaporativo che consentono di raggiungere il benessere igrometrico, elemento fondamentale per spingere gli abitanti ad un usufruire di questi alberi.

Questi alberi sono realizzati con una struttura reticolare caratterizzata da elementi tubulari e piastre in acciaio. La ventilazione viene creata mediante l'installazione di camini solari in poliestere di diametro 1,6 m che estraggono l'aria sulla sommità che poi incanalano verso il basso grazie all'aiuto di ventole in caso di mancata ventilazione naturale.

Al loro interno avviene un processo di nebulizzazione dell'aria grazie alla realizzazione di processi evaporativi innestati dall'acqua spruzzata all'interno.

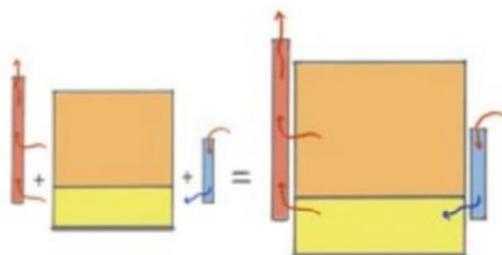
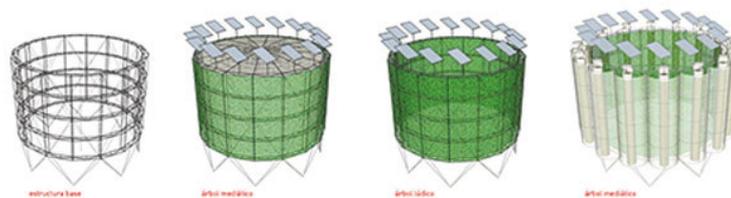
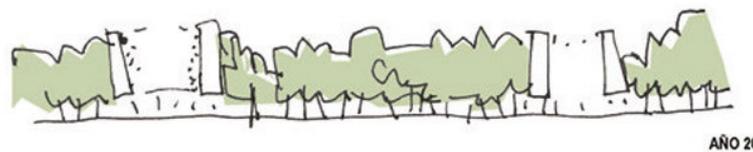
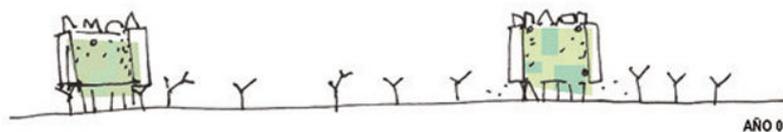
Il sistema entra in funzione grazie ad un sistema che rileva la temperatura esterna, quando la temperatura rileva un valore superiore ai 26°C il sistema si innesca e garantisce un abbattimento compresa tra i 10°C e i 12°C.



Uno dei padiglioni L'Air-Tree è costituito da torri evaporative agganciate alla struttura dalle quali fuoriesce l'aria refrigerata immessa in ambiente con ugelli di alluminio direzionabili. All'esterno la pavimentazione è caratterizzata da blocchi catalitici che consentono la depurazione dell'ambiente dagli inquinanti.

Il padiglione Ludic Tree sfrutta al suo interno di un sistema di raffrescamento evaporativo con l'utilizzo di tecnologie passive di ventilazione

Il Mediatic Tree è l'unico sistema in cui non è fornito da sistema a ventilazione evaporativa ma è ricoperto da una membrana tessile microforata che garantisce la protezione dai raggi solari in estate e da protezione termica in inverno.



In queste strutture le torri evaporative costituiscono l'interno involucro di facciata, queste permettono all'aria fresca in entrare in ambiente ottenendo uno spazio fresco anche nei climi molto caldi.

3.1.5 La Banca del Territorio di Toyo

Il progetto di Toyo prevede un ampliamento dell'edificio esistente realizzando una torre cilindrica in cui sono inseriti dei collegamenti verticali, inferiormente si trovano le attività di maggiore interesse mentre ai piani superiori sono stati progettati degli uffici.

L'edificio sviluppa la sua geometria prevalentemente in orizzontale realizzando degli spazi molto ampi collegati da tubi verticali che collegano in modo funzionale gli spazi.

Questi sistemi sono elementi fondamentali nella struttura, sono un esempio d'integrazione tra struttura e sistemi di raffrescamento innovativo. Una pelle vetrata riveste la struttura portante e i tubi di ventilazione.



Figura 60 Banca del territorio di Toyo.

Le tecnologie evaporative installate rendono l'edificio un edificio bioclimatico.

Questi tubi di respirazione permettono la ventilazione naturale negli ambienti grazie all'effetto di camino di ventilazione.

All'interno dei tubi è presente un sistema ad acqua che consente di migliorare la temperatura immessa in ambiente, attraverso un raffrescamento dell'aria per evaporazione.



Figura 61 Schema di ventilazione

3.2 Esempi Progettuali di Roof Pond

3.2.1 Studio GAD in Turchia

Lo Studio GAD è uno degli esempi più famosi di edilizia bioclimatica che sfruttano il sistema Roof Pond come tecnologia passiva per la climatizzazione estiva o invernale.

Questo progetto è stato realizzato a Bodrum in Turchia, si fonda su un'architettura composta da tre spazi di 75m² interconnesso da sistemi vetrati e da un ingresso spazioso.

È una villetta immobiliare composta da:

- zona cucina;
- zona dedicata alla sala da pranzo;
- una zona lavoro;
- una zona relax;
- una zona notte;
- una zona per gli ospiti;
- un'area in cui è installata una piscina.

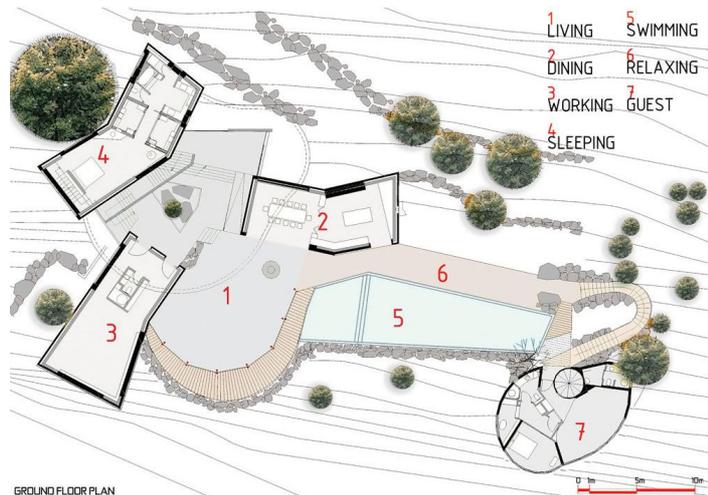


Figura 62 Schema distribuzione degli spazi dello studio GAD

Il progetto nasce da uno studio dell'ambiente e dal confronto bioclimatico della zona.

Il progetto integra nel suo complesso diverse tecnologie passive sia di facciata che di copertura.

Come sistemi di facciata il progetto prevedeva la realizzazione di ampie pareti vetrate che garantivano la ventilazione naturale degli ambienti



Figura 63 Foto esterni

Il progetto nasce dall'idea di realizzare un edificio che sfrutta le caratteristiche climatiche del proprio ambiente per integrare la costruzione con l'ambiente in maniera sinergica.

Le caratteristiche climatiche turche si sposano bene con le capacità raffrescative di alcune tecniche di raffrescamento evaporativo.

In particolare il tetto ad acqua hanno delle caratteristiche consone agli ambienti molto caldi

e secchi come il clima turco.

Questa caratteristica d'integrazione con le caratteristiche climatiche del territorio ha spinto i progettisti a realizzare un tetto ad acqua in

grado di ridurre il calore in eccesso dalle abitazioni riducendo la temperatura superficiale del tetto che per convezione ed irraggiamento consente il raffrescamento dello spazio.

Nell'ottica della realizzazione di un edificio green in grado di ridurre gli sprechi energetici e di sfruttare le risorse naturali disponibili in ambienti in modo efficiente riducendo gli sprechi.

Il Roof Pond è composto da una vasca di acqua posizionata in corrispondenza del tetto e viene utilizzata anche per raccogliere l'acqua piovana, questo sistema sfrutta ed accumula acqua piovana che viene movimentata attraverso una pompa meccanica che consente al sistema di mantenere bassa la temperatura.

Il sistema non è una piscina ma un serbatoio di acqua utile per la formazione di energia passiva che in concomitanza della realizzazione di superfici perimetrali scure consente al sistema di catturare il maggior quantitativo di radiazione solare.



Figura 64 Vista dall'alto del Roof Pond.

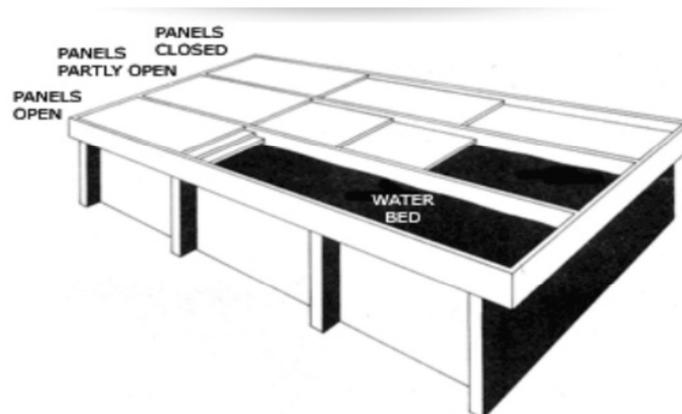
In questo edificio l'installazione del tetto ad acqua viene installata sulla copertura del blocco di altezza maggiore, grazie ad un sistema a cascata l'acqua viene trasportata sul tetto degli altri due blocchi che compongono l'edificio.

3.2.2 Skytherm House

La Skytherm house nasce dal progetto di Harold Hay nel 1973 in California a Tascadero il quale fonda la sua ideologia progettuale sulla realizzazione di un edificio in grado di ridurre il proprio carico di raffrescamento in modo da realizzare un edificio che liberi un quantitativo di CO₂ ridotto.

L'idea di Harold è stata quella di realizzare un sistema di copertura che sfrutti le proprietà dell'acqua per riscaldare o raffreddare gli ambienti.

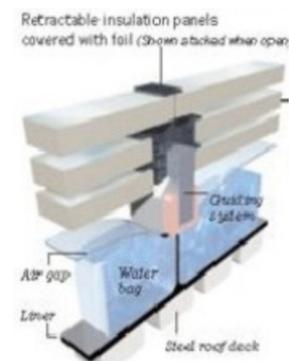
Il sistema di laghetto sul tetto ha consentito di sfruttare la capacità termica dell'acqua.



Il sistema Skytherm installato nella costruzione è una modalità d'installazione del Roof Pond economica che prevede la sua realizzazione con sacchetti d'acqua di plastica che vengono coperti attraverso un sistema di copertura con pannelli rigide di plastica trasparente.

Le condizioni di clima arido della California consente al Roof Pond di esprimere il suo massimo potenziale di raffrescamento permettendo all'edificio di non utilizzare sistemi ausiliari.

La stratigrafia mostra come il sistema di copertura sia dotato di pannelli di poliestere che possono essere aperti attraverso un sistema di copertura sovrapponibile.



Il sistema viene sorretto da un sistema di copertura metallico dipinto con uno strato di verniciatura bianco.

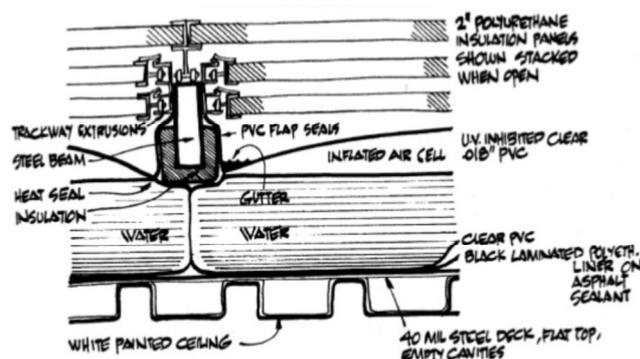


Figura 65 Stratigrafia Roof Pond

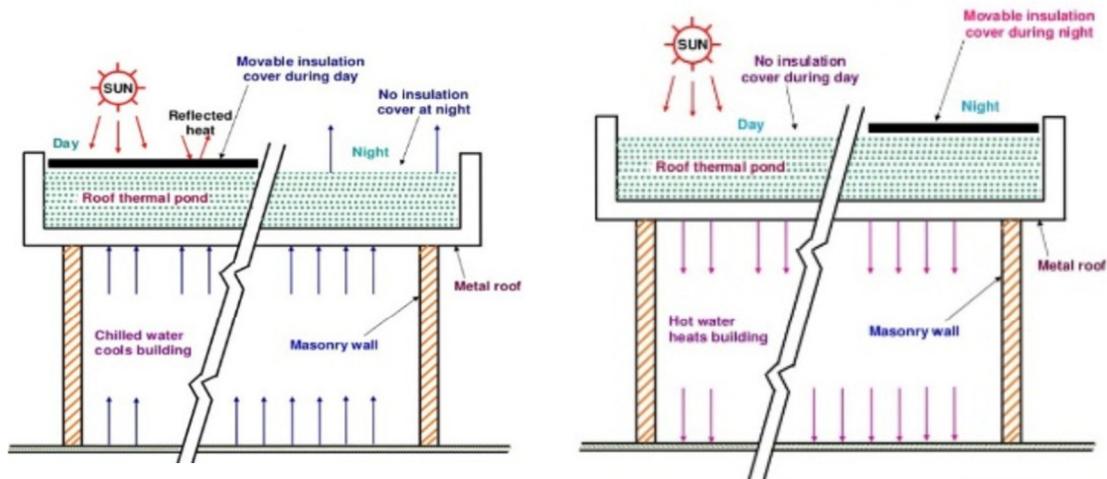


Figura 66 Schema di funzionamento Skytherm
rispettivamente in estate e in inverno

Il ciclo di funzionamento è differente nelle stagioni invernali ed estive. In inverno durante le ore del giorno risulta scoperto per assorbire le maggiori radiazioni solari. Il tetto coperto trattiene la temperatura dell'acqua e riscalda l'ambiente per radiazione. Nei mesi estivi il tetto viene scoperto nelle ore notturne per raffreddarsi. Nelle ore diurne viene coperto per mantenere l'acqua ad una temperatura più bassa.

Dagli studi su questo edificio è emerso che la temperatura interna può essere mantenuta al di sotto dei 30°C quando le condizioni climatiche esterne mostrano che la temperatura a bulbo umido supera i 40°C nei mesi estivi.

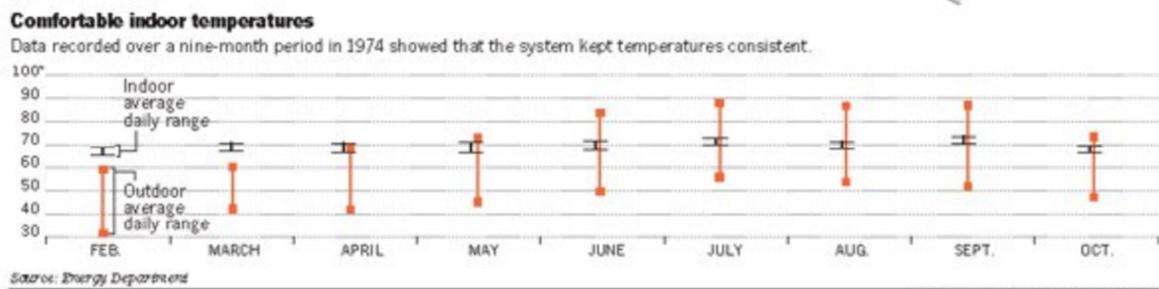


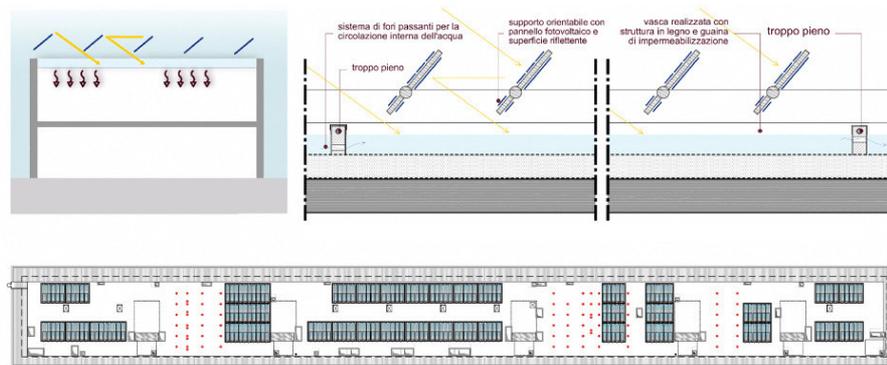
Figura 67 Risultati di Comfort interno

3.2.3 Architetture di Servizi del sito Expo Milano

Il progetto si fonda sull'idea del progettista di realizzare un edificio che leghi lo spazio interno al paesaggio. La copertura realizzata con una lamina d'acqua di ridotta profondità consente di sottolineare questa relazione edificio-natura.

La realizzazione di questa tipologia di copertura nasce dall'idea di utilizzare dei sistemi passivi che utilizzino delle risorse energetiche rinnovabili.

Il roof pond consente di sfruttare l'inerzia termica dell'acqua grazie le grosse masse in copertura.



ROOF POND

Il sistema, progettato da Alessandro Traldi è dotato di:

- sensori per identificano il livello dell'acqua;
- pannelli fotovoltaici riflettenti che riflettevano le radiazioni solari nell'acqua;
- una vasca d'acqua in legno con uno strato d'impermeabilizzazione.



Realizzazioni e Casi di Laboratorio

In questo capitolo saranno riportati alcuni esempi di prove realizzate in laboratorio e in edifici esistenti per confrontare i risultati ottenuti dalle diverse configurazioni di pareti ad acqua e roof pond per sottolineare la convenienza di un sistema rispetto ad altro in funzione delle condizioni meteorologiche del luogo.

In alcuni casi saranno prese in considerazione studi su sistemi integrati, che fondono in un'unica tecnologia i vantaggi di più tecnologie di raffrescamento evaporativo o riscaldamento.

4.1 Esempi di Studio di Pareti ad Acqua

4.1.1 Combinazione con il camino solare e il sistema di WWS

L'implementazione dei sistemi di raffreddamento negli ha portato alla sperimentazione della combinazione di sistemi differenti, ad esempio, sono state studiate le prestazioni di un sistema che utilizza sia i vantaggi del camino solare che un sistema d'irrorazione WWS combinati con il sistema di ventilazione naturale dell'edificio.

Dalla combinazione di queste due strategie di raffrescamento è possibile eliminare uno dei principali limiti delle pareti Trombe, ovvero l'inutilità nei periodi estivi e risolvere il problema del camino solare, il quale autonomamente non è in grado di ventilare nelle ultime ore del giorno.

Al fine di studiare il comportamento del muro sono state presentate delle scelte di orientamento del muro che evidenziano le sue prestazioni nelle condizioni di esposizione solare peggiorativa.

L'obiettivo principale dello studio riguarda la valutazione delle prestazioni del sistema integrato nelle diverse condizioni climatiche, invernali ed estive andando a calcolare il numero di ricambi d'aria, la portata massica e la velocità dell'aria nel canale.

Sono state valutate le variazioni di portata massica in funzione dell'umidità relativa e delle modifiche effettuate nel sistema d'irrorazione WWS, anche in relazione alle condizioni climatiche dell'ambiente esterno.

Lo studio è stato realizzato a Yazd in Iran in una stanza opportunamente orientata per assorbire la massima intensità solare e adeguatamente isolata con una schiuma al fine di raggiungere le condizioni ottimali. L'interno delle pareti è stato dipinto con un colore acrilico a base d'acqua resistente all'acqua e al calore.

Da un confronto sui dati meteorologici è stato constatato che l'intensità solare media annuale massima a Yazd è nella direzione nord-sud, proprio per questa ragione la parete di Trombe con camino solare integrato sono diretti in direzione sud.

È stato scelto un modello standard di parametri di valutazione delle condizioni termiche della cella nelle diverse stagioni. Nel caso in esame verranno confrontati i parametri standard relativi alla stagione estiva, in quanto lo studio analizza le performance di raffrescamento del sistema.

Nella cella viene realizzata una configurazione che comporta un incremento di temperature all'interno del canale del camino solare e nell'assorbitore, le alte temperature consentono di migliorare la ventilazione passiva sensibile nella cella.

Il muro di Trombe installato nella cella si differenzia da un classico muro di Trombe per i materiali che lo caratterizzano, non viene realizzata una parete in calcestruzzo dipinta con una vernice scura

per incrementare l'irradiazione solare, ma i lati sono tutti vetrati. In questo modo il canale riceve le radiazioni solari già durante le prime ore del mattino.

La parete è dotata:

- di un muro di Trombe con tutti i lati del canale vetrati, in modo tale da ricevere un'adeguata intensità solare a tutte le ore del giorno;
- di camino solare sulla sommità della parete del muro di Trombe
- due bocchette d'aria sulla parete in fondo alla stanza con sistema d'irrorazione WWS.



Figura 68 Foto elementi caratterizzanti il sistema

Il sistema WWS è un dispositivo dotato di pompa ad alta pressione, tubi, microugelli e timer per accendere e spegnere il sistema. Questa tecnologia è efficace per l'applicazione del raffreddamento e dell'umidità, genera delle gocce con un elevato rapporto di diffusione attraverso degli ugelli.

Gli ugelli sono realizzati acciaio inossidabili e sono stati installati secondo tre diametri, da 10, 20, 30, in questo modo sono state valutate le prestazioni in relazione a tre diametri diversi delle goccioline d'acqua spruzzate.

Dopo avere assorbito il calore nell'aria le goccioline evaporano comportando una diminuzione della temperatura dell'aria e un incremento di umidità.

La cella assume due configurazioni differenti in funzione della stagione in cui vengono effettuate le prove e conseguente in relazione se il fine è il raffreddamento o il riscaldamento.

Nella stagione estiva le bocchette di aereazione e il sistema di irrorazione vengono attivati e il camino solare è scoperto.

Per implementare la ventilazione la temperatura, all'interno del camino deve essere alta, combinando i sistemi l'assorbitore e il canale raggiungano temperature più elevate, la temperatura dell'assorbimento aumenta assorbendo la maggiore radiazione solare attraverso il vetro e la densità dell'aria diminuisce nel camino.

In corrispondenza delle cavità, che hanno la funzione di "porta l'ingresso" dell'aria fresca in stanza, l'acqua viene spruzzata diminuendo la temperatura dell'aria in ingresso e aumentando la sua densità.

Si genera un effetto di galleggiamento grazie alla differenza di temperatura tra l'aria in ingresso e lo spazio del canale, permettendo una ventilazione naturale migliore.

Nel periodo invernale invece, il camino solare viene coperto, le bocchette di aereazione vengono chiuse e il sistema d'irrorazione WWS viene disattivato, l'isolamento della parte posteriore del muro

di Trombe vien rimossa, in questo modo, si può sfruttare la ventilazione per il riscaldamento invernale in maniera simile al muro di Trombe classico, incrementando i guadagni solari rispetto al muro classico grazie alla sua configurazione totalmente vetrata.

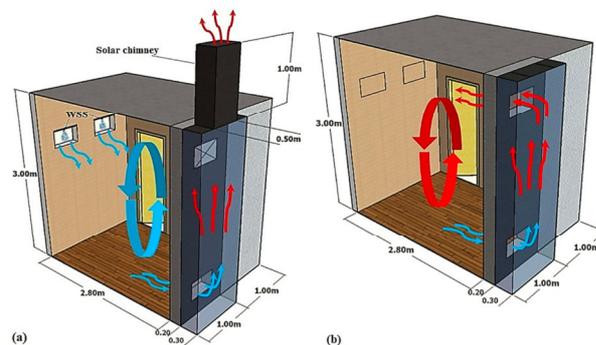


Figura 69 Schema di Funzionamento.

Lo studio sul comportamento di questo sistema viene sviluppato in tre fasi:

Fase 1: è stato studiata la variazione di portata massica, la variazione del diametro delle goccioline, in funzione della massima umidità e minima temperatura richiesta.

Fase 2: è stato analizzato l'effetto dell'umidità e della temperatura dell'aria nelle prestazioni del sistema WWS.

Fase 3: si calcola l'influenza del muro di Trombe sulla ventilazione e nei periodi non soleggiati.

Le misurazioni di temperatura e umidità relativa nelle diverse parti del sistema sono stati utilizzati dei sensori con una precisione di $\pm 0,5$ °C.

La misura dell'irradiazione solare e della velocità dell'aria nel canale vengono rilevate con un misuratore di energia solare e l'anemometro.

Le misure vengono effettuate mediante sensori che rilevano dati ogni 15 min. e memorizzati in un data logger. calcolando la media delle temperature nelle varie posizioni:

- parete posteriore;
- assorbitore;
- occhiello sinistro;
- occhiello destro;

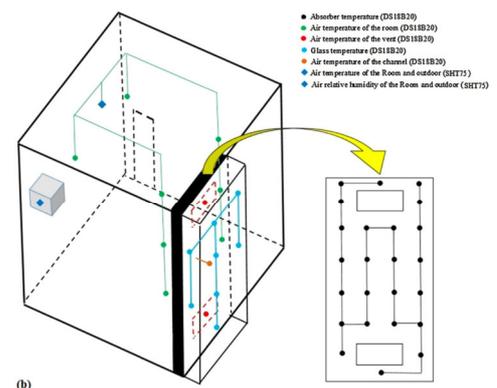


Figura 70 Schema sensori

- occhiello anteriore.

Nello studio sono state analizzate: la portata massica, la variazione di umidità al variare del diametro delle goccioline generate dal WWS, la velocità dell'aria.

Dai dati rilevati nella prima fase (29 giugno e 30 giugno) si nota che la temperatura diminuisce molto nelle prime ore del giorno, successivamente, grazie al sistema WWS si mantiene costante anche quando la temperatura esterna aumenta. La temperatura media aumenta al diminuire della portata massica dell'acqua che a sua volta aumenta insieme alla velocità dell'aria a causa della

diminuzione di temperatura dell'ambiente e della crescita della differenza di temperatura tra canale e stanza.

L'umidità relativa interna resta costante nel giorno in cui il sistema WWS non è attivato (29 giugno), mentre aumenta nel giorno in cui il sistema WWS viene attivato.

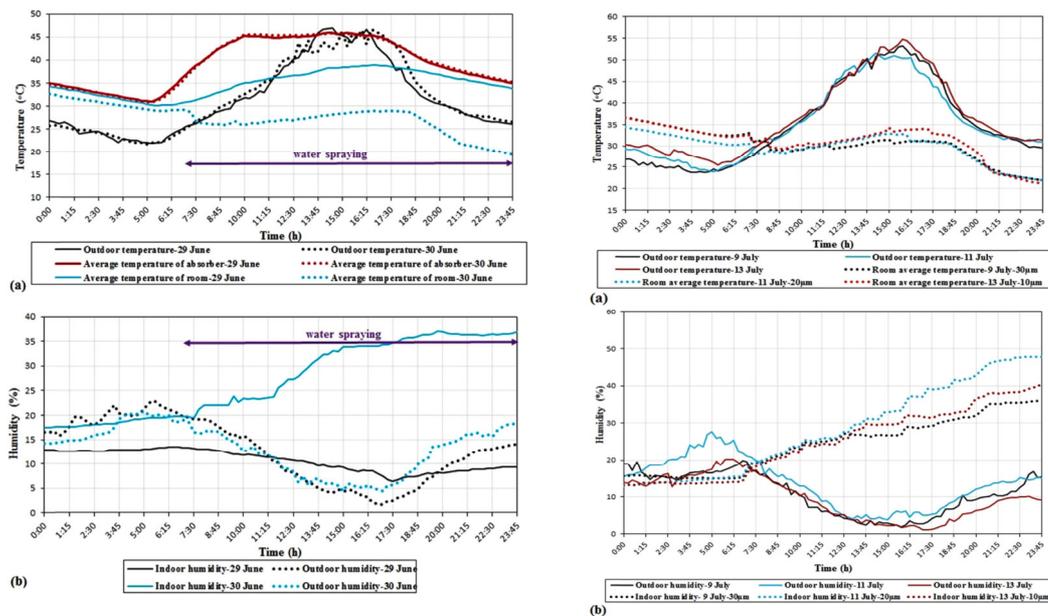
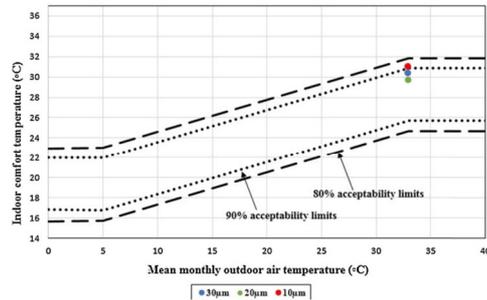
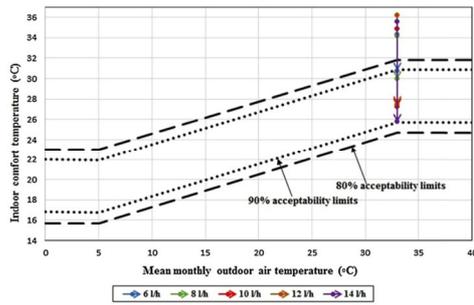


Figura 71 Grafici andamento della temperatura

L'effetto della variazione di goccioline comporta la variazione sia della temperatura che dell'umidità. In particolare si è notato che se il diametro delle gocce diminuisce la temperatura interna si riduce e aumenta l'umidità senza influenzare però sulla velocità dell'aria.

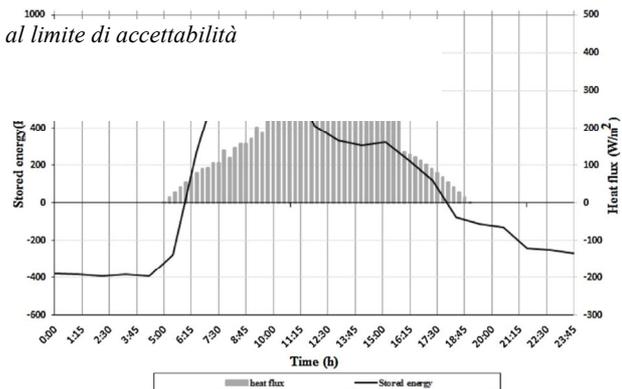
Dall'analisi del comfort al variare della portata massica e al variare del diametro delle goccioline del sistema WWS, si nota che nel primo caso il comfort viene raggiunta quando questa è pari a 10 l/h, mentre tutte e tre le dimensioni dei diametri delle goccioline hanno creato una situazione di comfort nella stanza di prova.



Il sistema WWS influisce sull'umidità dell'ambiente, ma non sulla velocità dell'aria, questa varia se la differenza di temperatura tra ambiente e canale aumenta.

Analizzando l'energia immagazzinata nel muro, si nota che di notte la quantità di energia è negativa, di giorno invece, l'energia è positiva, dopo l'alba l'energia aumenta fino a diventare positiva. Il WWS fa diminuire la temperatura dell'aria in ingresso facendo aumentare la differenza di temperatura tra assorbitore e canale, in questo modo la differenza tra temperatura ricevuta e trasferita diminuisce.

Figura 72 Confronto rispetto al limite di accettabilità



Questa tendenza si riduce nelle ore in cui il muro riceve un'intensità solare maggiore, nelle ore tarde del giorno l'energia immagazzinata diminuisce. Nei periodi poco soleggiati il calore che la parete immagazina viene trasferito al canale che induce la circolazione del flusso di calore nel canale e nella stanza.

L'energia utile che si ottiene dai flussi d'aria che attraversano il canale dell'aria si ottiene in funzione dell'efficienza termica, in funzione del calore trasmesso per convezione e quello totale:

Figura 73 Flusso di energia

$$\eta = \frac{Q_0}{Q_0 + Q_r}$$

Dai dati rilevati presenza di attivazione o disattivazione del sistema WWS è stato rilevato che l'efficienza del sistema privo di attivazione del sistema d'irrorazione era del 50% mentre successivamente all'attivazione si nota un incremento di efficienza fino all'80%.

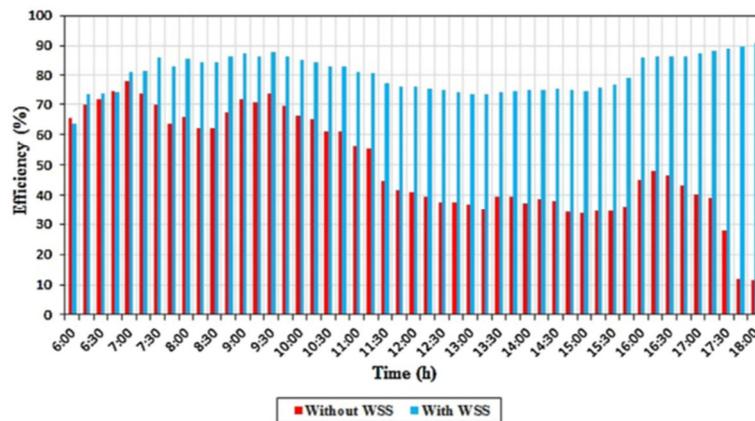


Figura 74 Dati relativi all'efficienza energetica

Dalle analisi effettuate si è riscontrato che l'energia immagazzinata dal muro di Trombe gioca un ruolo importante nella ventilazione dell'aria nel periodo soleggiato e che il sistema di spruzzatura incrementa l'efficienza del 30%. Il muro di Trombe ha fornito condizioni interne adeguate.

Si è riscontrato un collegamento forte tra l'aumento dell'umidità relativa esterna e l'umidità relativa interna, infatti all'aumentare dell'umidità esterna l'umidità della cella aumenta in maniera proporzionale.

Lo stesso comportamento viene riscontrato anche per la temperatura, questo, mette in evidenza la correlazione tra le caratteristiche di temperatura e umidità interne ed esterne.

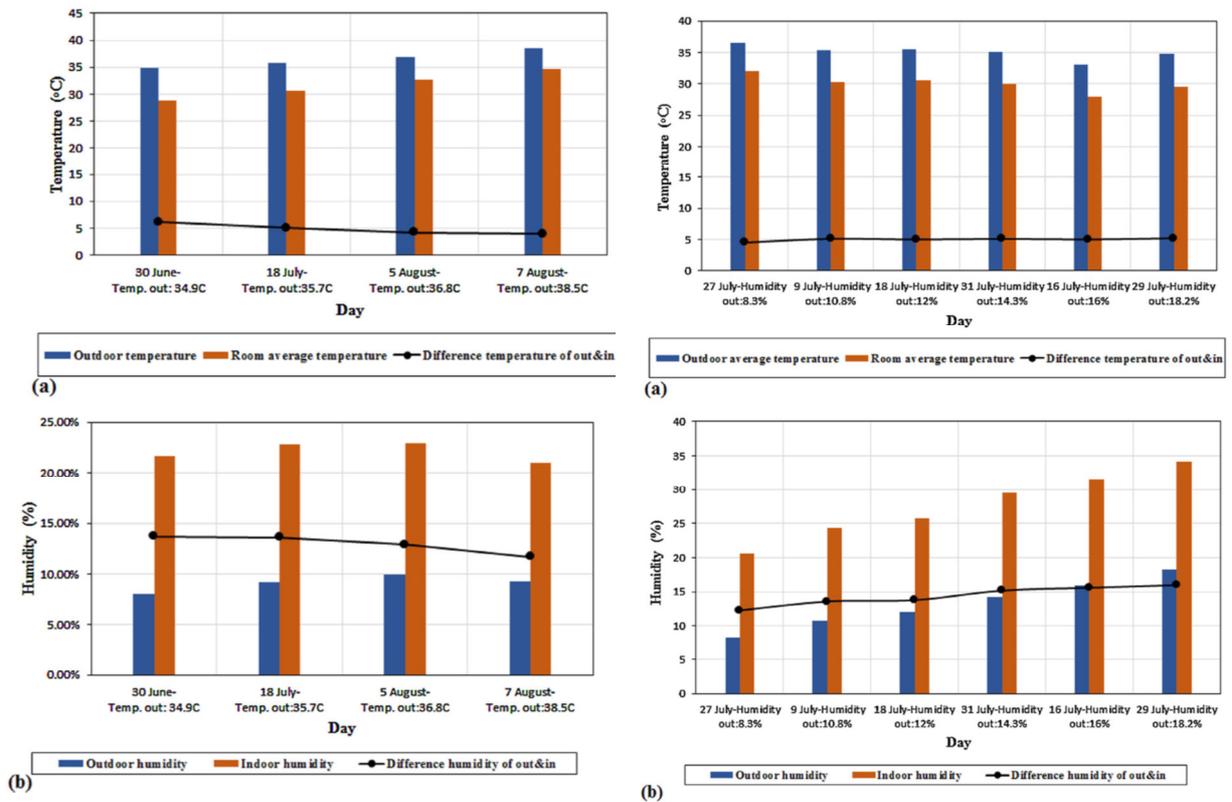


Figura 75 Confronto dati relativi all'umidità e alla temperatura

Modificandone la conformazione il sistema viene adoperato per riscaldare la stanza in inverno.

4.1.2 Valutazione delle performance di una parete ad acqua opaca in Australia

A Sidney è stato un confronto tra le prestazioni energetiche di due involucri, una parete opaca in calcestruzzo e una parete ad acqua opaca, per determinare il risparmio di energia del sistema ad acqua sia in condizioni climatiche invernali che in condizioni climatiche estive. Sono stati realizzati due modelli bidimensionali, entrambi collegati a due stanze nella quale sono state imposte le

condizioni climatiche invernali ed estive medie di Sidney, una delle quali è controllata mentre l'altra no. Queste due stanze, sono separate da una superficie di controllo, come mostrato in figura.

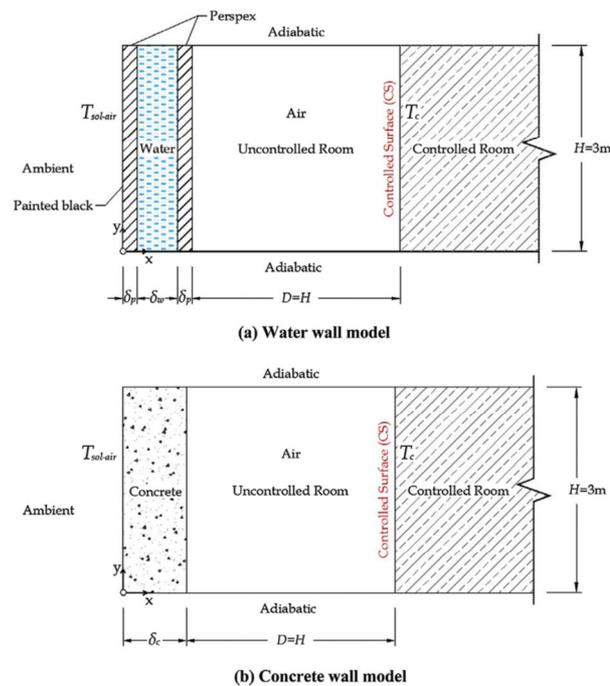


Figura 76 Schema del modello

La parete ad acqua è caratterizzata da due strati opachi in perspex, di cui quello esterno è verniciato di nero in modo da stoccare il maggior quantitativo di energia solare possibile.

Lo spessore della parete in calcestruzzo è pari allo spessore della colonna d'acqua.

Al fine di determinare l'efficienza energetica, è stato valutato il flusso di calore che attraversa la parete di controllo, mediante due studi, un modello fluidodinamico CFD e uno studio di bilanciamento energetico HBM.

È stato valutato inoltre come cambiano le prestazioni della parete in funzione dello spessore della colonna d'acqua, mantenendo lo spessore dei perspex costanti.

I test vengono realizzati facendo variare lo spessore della colonna dell'acqua da 0,075 m a 0,30 m, lasciando invariate le condizioni al contorno. Dai risultati si analizza la stratificazione della temperatura all'interno della colonna dell'acqua e nell'aria, il gradiente di temperatura verticale

(VTG). Confrontando i grafici si evince che la stratificazione della colonna d'acqua è maggiore che nell'aria e diminuiscono all'aumentare dello spessore dell'acqua.

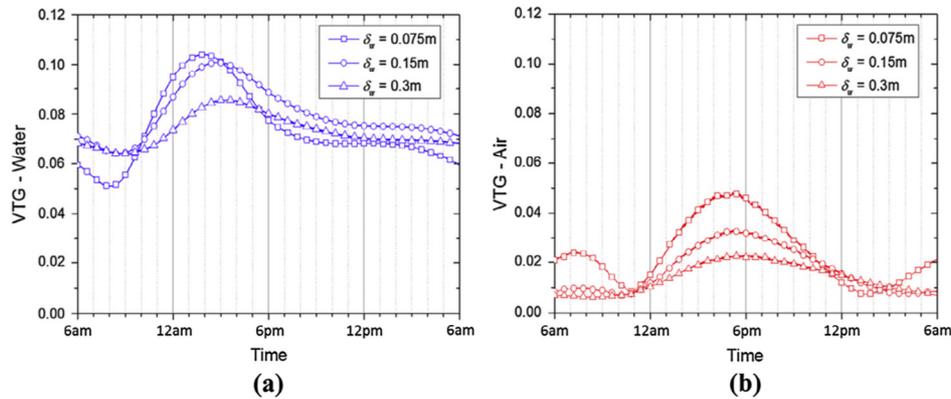


Figura 77 Gradiente di stratificazione dell'acqua.

In condizioni invernali le fluttuazioni di temperatura diminuiscono all'aumentare dello spessore della colonna d'acqua.

Le fluttuazioni di temperatura nella colonna d'acqua sono evidentemente superiori di quelle dell'aria.

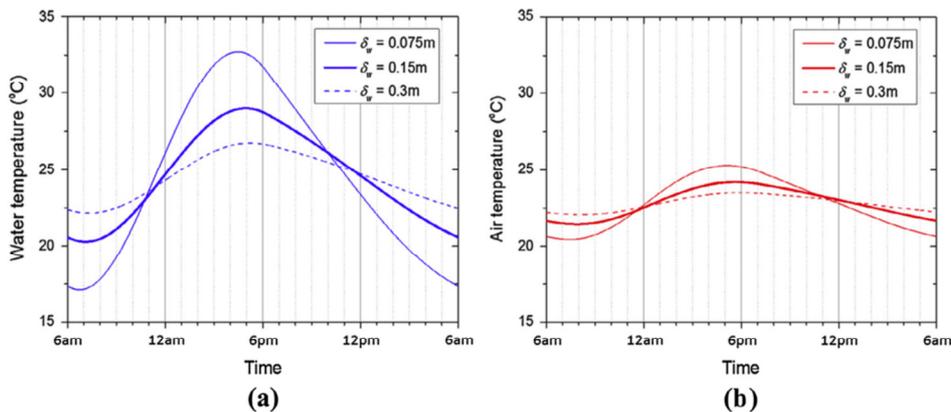


Figura 78 Fluttuazioni di temperatura.

Dai grafici è evidente che la colonna d'acqua ha la funzione di strato di tampone che mitiga sia le fluttuazioni di temperatura nell'area incontrollata. Le fluttuazioni di temperatura dell'acqua sono circa tre volte superiori rispetto alle fluttuazioni di temperatura dell'aria.

Al fine di definire il potenziale di risparmio energetico è stato esaminato il flusso di calore che va verso o che proviene da una stanza. Sono state riportati i flussi di calore che attraversano la parete in relazione ai diversi spessori della colonna d'acqua, in particolare viene riportato il flusso di calore che entra nella stanza controllata.

Se il flusso di calore è positivo indica che il calore entra in ambiente, il flusso di calore negativo invece, indica che il calore si muove in direzione esattamente opposta.

Dal grafico si nota come i flussi di calore entrino nella stanza controllata mentre il flusso di calore che entra ed esce nella stanza controllata decresce al crescere dello spessore della parete ad acqua.

La densità dell'acqua determina una maggiore capacità di accumulo di energia termica facendo decrescere il trasferimento di calore sia il calore in entrata che in uscita.

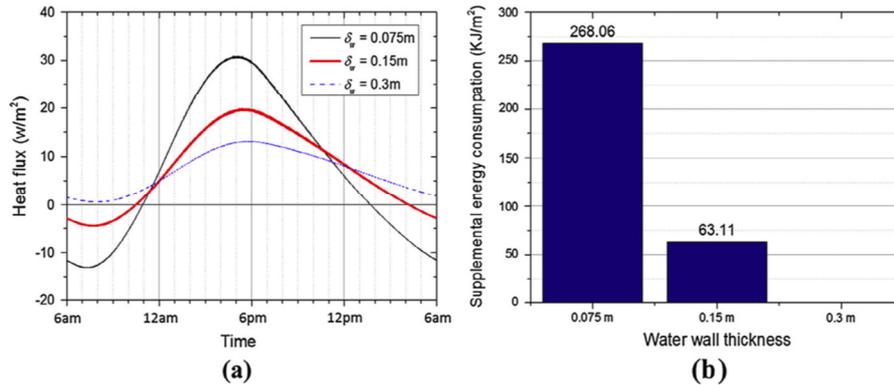


Figura 79 Flussi di Calore che attraversano la Parete.

Dai grafici riportati sopra osserviamo che i flussi di calore che si trasferiscono dalla stanza non controllata alla stanza controllata diminuiscono all'aumentare dello spessore dello strato d'acqua. Aumentando lo strato d'acqua, aumentano le capacità di accumulo del muro e di conseguenza, diminuisce il flusso di calore in entrata ed in uscita dallo ambiente. L'andamento del flusso monitorato con uno spessore della colonna d'acqua di 0,3m è sempre positivo, ciò indica che il calore che è sempre ingresso nella stanza non controllata rendendo superfluo l'utilizzo di energia supplementare. In questo i consumi energetici nella stagione invernale saranno notevolmente ridotti.

Confrontando le temperature giornaliere dell'aria nell'ambiente controllato, in estate, si nota come l'efficienza del sistema con parete ad acqua e quella con una parete tradizionale in calcestruzzo sono simili.

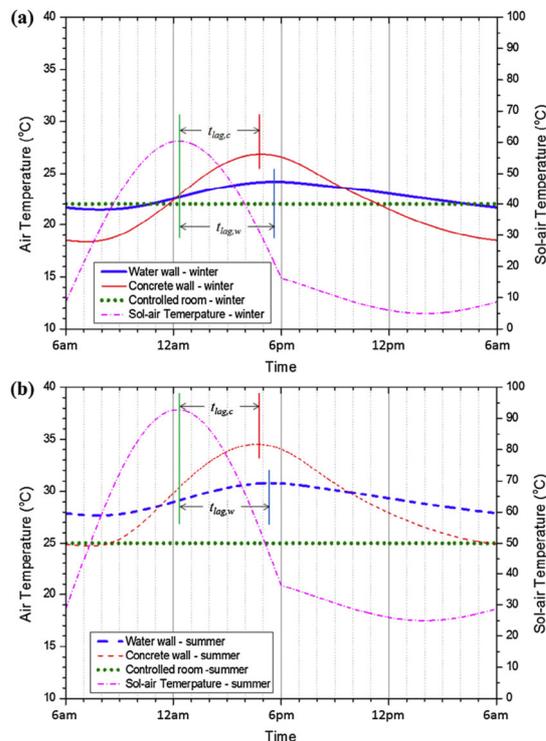


Figura 80 Confronto delle temperature giornaliere in ambiente

Nella parete ad acqua i flussi di calore sono minori rispetto a quelli del muro di cemento, i flussi termici positivi nella stanza controllata in estate implicano la necessità di condizionare l'ambiente, inoltre, la stanza non controllata, cedendo calore necessita di energia supplementare di riscaldamento per mantenere il comfort termico. In inverno il flusso negativo è praticamente nullo, per tale ragione è stato possibile constatare che il muro ha delle prestazioni migliori in inverno.

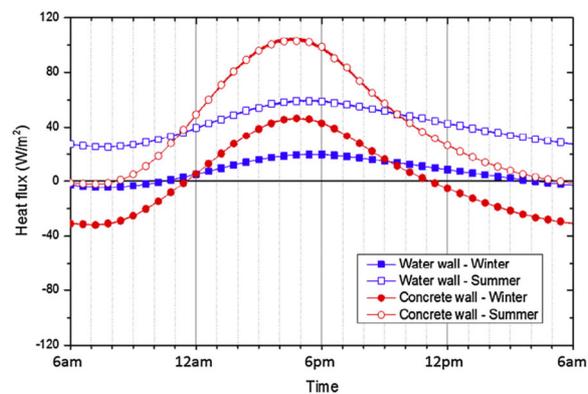


Figura 81 Flussi di calore in ambiente.

Si è concluso che il sistema a pareti ad acqua richiede un fabbisogno di energia notevolmente inferiore di un muro tradizionale nelle condizioni climatiche invernali mentre nei periodi estivi le due tecnologie hanno prestazioni simili, quindi può essere utilizzata in inverno per migliorare l'efficienza di un edificio.

4.1.3 Valutazione delle performance di una parete ad acqua trasparente in Australia

A Sydney, è stata effettuata all'università di ingegneria elettrica un confronto tra le prestazioni termiche di una parete classica in calcestruzzo e una parete ad acqua. Lo studio, effettuato su due celle sul tetto dell'università è stato realizzato su due pareti affiancate rivolte verso nord per assimilare la maggiore energia solare termica possibile. Il muro in calcestruzzo ha uno spessore di 40 mm, la parete ad acqua è costituita da cavità riempita d'acqua tra due pannelli perspex trasparenti da 25 mm, mentre lo spessore della colonna d'acqua è 100 mm, le altre pareti della cella sono composte da pannelli che simulano la composizione tipo degli edifici leggeri in Australia.

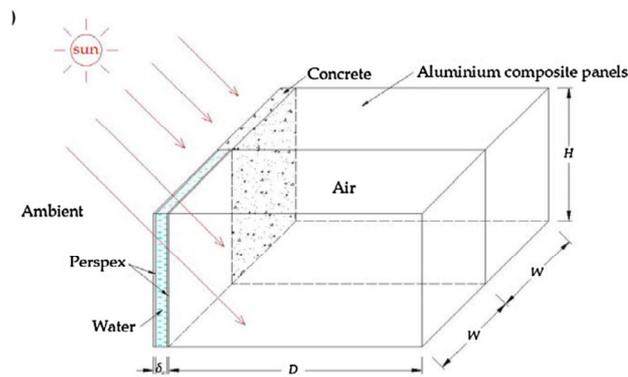


Figura 82 Schema del modello analizzato

Sono state utilizzate sette termocoppie per determinare la temperatura interna nella cavità di Perspex e della temperatura dell'aria dell'ambiente, quattro termocoppie invece, sono state posizionate all'interno del muro in calcestruzzo per determinare la temperatura interna della parete.

La stratificazione della temperatura è prevista sia all'interno della cavità che nella stanza, per tale ragione le termocoppie verranno predisposte in entrambe le parti e verrà installata un'ulteriore termocoppia all'interno della stanza che monitora la temperatura dell'ambiente.

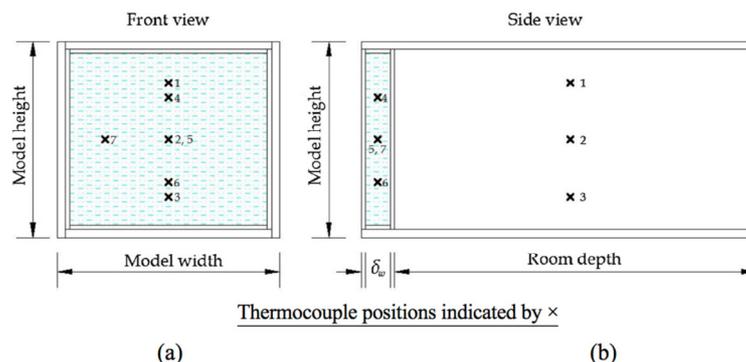


Figura 83 Posizionamento sensori

Per confrontare le prestazioni della parete ad acqua con quella in calcestruzzo sono state installate delle termocoppie anche nel muro in calcestruzzo.

Tutte le termocoppie vengono precalibrate ad una temperatura compresa tra 5°C e 50°C.

I processi di scambio termico che avvengono nel muro di calcestruzzo e nella parete ad acqua sono simili.

Tutti i processi di conduzione vengono avvengono nelle zone solide come il perspex e i pannelli isolanti, invece, i processi di conduzione avvengono tra solido e fluido.

La radiazione solare viene assorbita dal pannello perspex esterno, trasmessa allo strato d'acqua, il quale in parte lo assorbe e in parte successivamente lo trasferisce all'ambiente.

I parametri che influenzano maggiormente l'efficienza del sistema sono:

- Spessore dello strato di acqua;
- Capacità di trasmissione della parete perspex;
- Fattore di attenuazione solare.

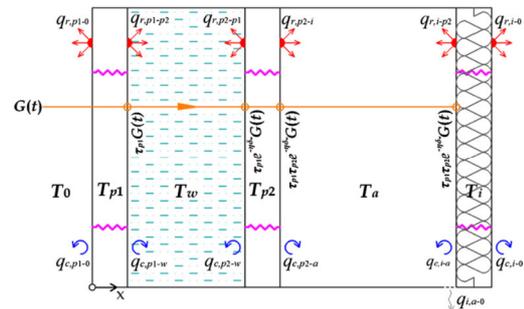


Figura 84 Processi di scambio termico.

Sia i fluidi che i solidi nell'equazioni di bilancio vengono considerati alla temperatura ambientale T_0 , rilevata attraverso una termocoppia installata in ambiente. Per convalidare i modelli in relazione alle misure prese in situ i valori di radiazione solare, velocità del vento, vengono rilevati da una stazione meteorologica vicina al situ in esame.

Le indagini mostrano le temperature sperimentali dell'aria e dell'acqua rilevate dalle termocoppie poste nello spazio aereo e nella colonna d'acqua sono la media aritmetica delle temperature da esse rilevate.

Si nota che:

- Le fluttuazioni di temperatura nella parete ad acqua sono notevolmente inferiori di quella il calcestruzzo;
- La temperatura dell'aria e dell'acqua misurate di giorno sono leggermente superiori rispetto a quelle misurate di notte.

Un parametro che può essere facilmente modificato è la trasmissività del pannello Perspex modificandone la colorazione o modificando la colorazione del vetro. Per questa ragione, sono state effettuate 3 simulazioni relative a tre tinte differenti:

- Caso a): tinte aderenti sia nei pannelli interni che in quelli esterni;
- Caso b): tinta aderente solo sul lato esterno;
- Caso c): tinta aderente solo sul lato interno.

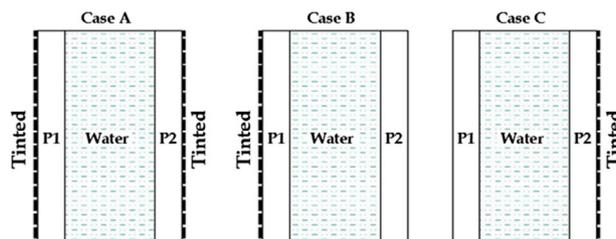


Figura 85 Casi di studio.

La trasmissione del sistema dipende dalle differenti capacità di trasmissione dei film adoperati 75% e 50%, la temperatura decresce significativamente quando la trasmissività viene ridotta da 0,9 a 0,45 ma l'andamento delle fluttuazioni di temperatura rimane invariato, la temperatura massima è

soggetta ad un'elevata riduzione di temperatura mentre la minima resta quasi invariata.

La differenza di temperatura minima fra i modelli con tintura e senza è dell'1%, quindi la riduzione della trasmissività del pannello può impedire il surriscaldamento di giorno mentendo una condizione di comfort durante la notte.

Un altro parametro che influenza le prestazioni della parete ad acqua è lo spessore dello strato di acqua contenuto, infatti, aumentando lo spessore si ottengono delle fluttuazioni inferiori, la temperatura di picco diminuisce significativamente, prevenendo il surriscaldamento dell'ambiente interno di giorno. È importante una progettazione accurata dello spessore della colonna d'acqua prima della sua costruzione perché la modifica dello spessore è un'operazione difficile da realizzare dopo il completamento della

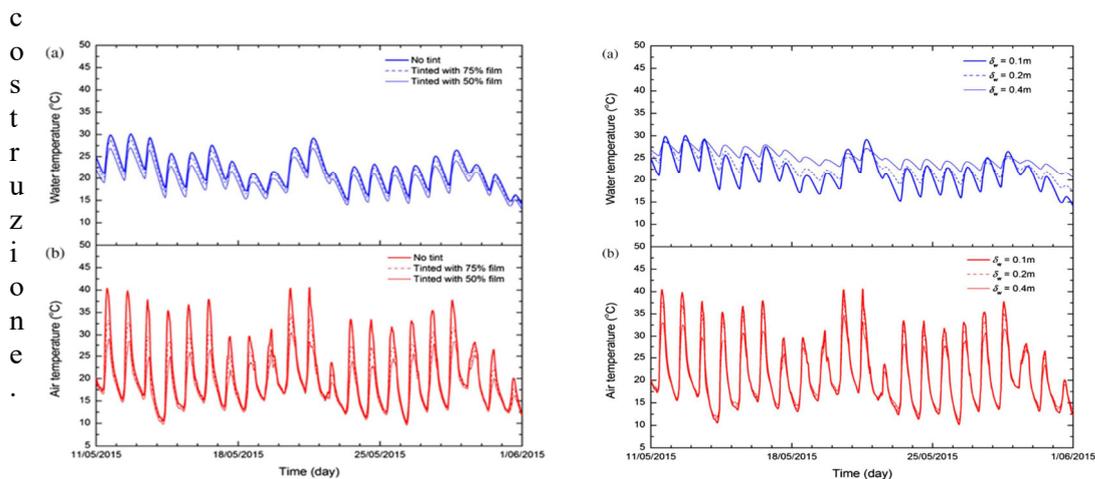
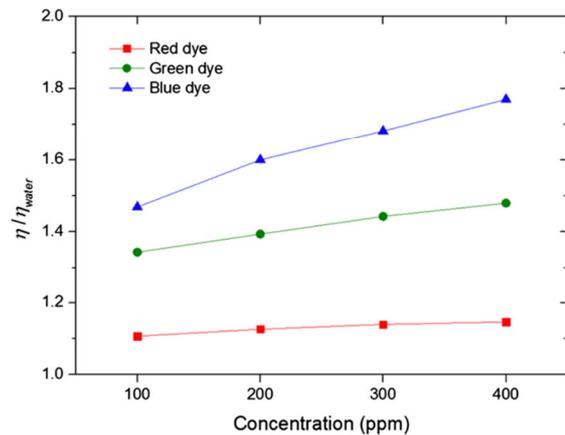
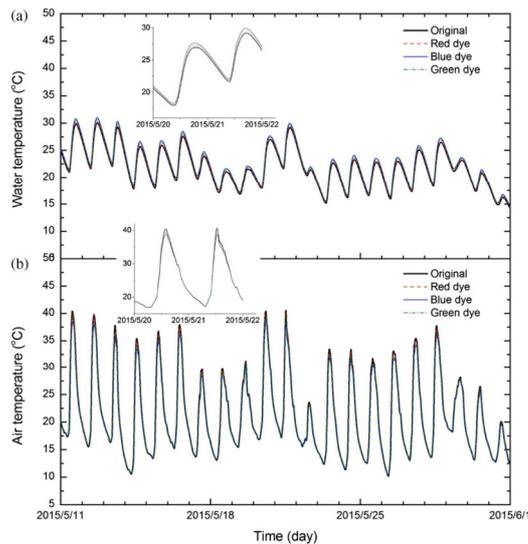


Figura 86 Andamento temperatura dell'acqua e dell'aria

Più semplice è modificare il fattore di attenuazione della radiazione solare in acqua utilizzando dei coloranti mentendo costante lo spessore dello strato d'acqua. Dalle prove effettuate risulta che

l'aggiunta di colorante in acqua definisce un fattore di attenuazione tra 1,1 e 1,8 in funzione del tipo di colorante adoperato. Si nota infatti come adoperando tre coloranti, uno blu, uno rosso e uno verde si siano ottenute tre diversi comportamenti, il colore blu ha aumentato il fattore di attenuazione in maniera più evidente rispetto alle altre due colorazioni, il rosso invece al contrario l'ha modificato in modo meno significativo. Effettuando uno studio comparativo tra uno strato d'acqua senza coloranti e lo studio di strati con acqua con tre diversi coloranti con una concentrazione di 200 ppm si è dimostrato che l'utilizzo di questi coloranti è praticamente irrilevante sulla riduzione di temperatura dell'acqua e dell'aria.



Confrontando efficacia, costi, praticità di esecuzione, la strategia migliore per prevenire il surriscaldamento è la modifica della riduzione di trasmissività del pannello perspex, in modo particolare la colorazione della superficie perspex rappresenta la strategia più economica per mantenere il comfort termico di un ambiente.

La riduzione di trasmissività dello strato di Perspex consiste in una riduzione della temperatura dell'acqua e dell'aria. La riduzione della trasmissività dello strato si traduce in una luce meno naturale, ma questo non risulta un problema data l'eccessiva luce che entra in ambiente attraverso un transwall. L'utilizzo di coloranti per l'acqua della parete comporta una riduzione della temperatura poco rilevante, mentre l'aumento dello spessore della colonna d'acqua aiuta a ridurre le fluttuazioni di temperatura e la temperatura di picco.

Tra le strategie adoperate il compromesso migliore sembra essere la riduzione di trasmissività dello strato di Perspex, mitiga il surriscaldamento delle pareti idriche semi-trasparenti. Il metodo risulta non solo più efficace ma anche più economico.

4.1.4 Studio di parete PCWW con sfruttamento dell'acqua piovana

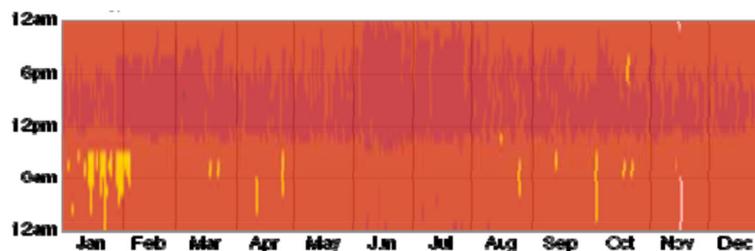
Lo studio di questo sistema viene effettuato in Malesia all'università di Tower Building a Selangor, dove a causa dell'eccessivo utilizzo di energia per condizionare l'ambiente, ha reso necessario l'esame di nuovi sistemi per ridurre il carico di raffreddamento.



Lo studio effettuato all'università indaga l'effetto di una parete di raffreddamento passiva PCWW sul consumo di energia per raffreddare una facciata in vetro dell'edificio e ridurre il calore interno. Il muro ha lo scopo di togliere il calore di accumulo nel vetro abbassandone la temperatura utilizzando fonti rinnovabili.

La parete è caratterizzata da un muro d'acqua compreso tra due pannelli di vetro che corrono lungo la facciata di un'aula al quattordicesimo piano, l'acqua viene prelevata da un serbatoio di accumulo di acqua piovana sul tetto dell'edificio. Dallo studio si è visto che la configurazione ha permesso una caduta di temperatura di quasi 1°C rispetto alla temperatura interna di un edificio senza PCWW con un risparmio del 24,6% sui costi relativi all'energia consumata.

Le simulazioni sono state realizzate utilizzando un software che ha considerato la temperatura esterna nelle ore comprese tra le otto del mattino e le quattro del pomeriggio secondo l'andamento stagionale.





L'irradiazione di calore che entra nella stanza tra la facciata di vetro viene confrontata nella configurazione con e senza PCWW considerando le ipotesi:

- Trasferimento di calore è in stato stazionario;
- Proprietà del fluido indipendenti dalla temperatura;
- Pareti esterne in calcestruzzo verso l'esterno isolate tranne il vetro;

L'energia termica totale è data dal rapporto tra la differenza di temperatura e la resistenza termica. Il flusso d'aria fredda scorre ad una temperatura costante, la temperatura in entrambe le configurazioni è la stessa per ogni ora del giorno mentre la resistenza tiene conto della resistenza del vetro, dell'aria e dell'acqua. Nella configurazione senza PCWW la resistenza termica è inferiore rispetto al caso con PCWW dato che si presenta meno isolata, inoltre, quando la differenza di temperatura tra l'ambiente interno ed esterno è maggiore, entrando nell'ambiente un quantitativo di calore superiore, Il consumo complessivo di energia elettrica per il raffrescamento risulta più alto.

WITH PASSIVE COOLING WATER WALL (PCWW)								
Time	8am to 9am	9am to 10am	10am to 11am	11am to 12pm	12pm to 1pm	1pm to 2pm	2pm to 3pm	3pm to 4pm
Outdoor Temperature, T1 (K)	300.00	302.00	304.00	306.00	308.00	311.00	310.00	308.00
Indoor Temperature, T2 (K)	287.5	287.7	288	288.2	288.4	288.7	288.6	288.4
Difference, T1 - T2 (K)	12.5	14.3	16	17.8	19.6	22.3	21.4	19.6
R Total Resistance, K/W	0.005962	0.005962	0.005962	0.005962	0.005962	0.005962	0.005962	0.005962
Heat Gain without PCWW, W	2096.61188	2398.52399	2683.6632	2985.57531	3287.48742	3740.35559	3589.39953	3287.48742
Heat Gain with PCWW, kW	2.097	2.399	2.684	2.986	3.287	3.740	3.589	3.287
1 TR = 3.517 kW	3.517	3.517	3.517	3.517	3.517	3.517	3.517	3.517
Tonnage Refrigerant, TR	0.596	0.682	0.763	0.849	0.935	1.064	1.021	0.935
Duration, hr	1	1	1	1	1	1	1	1
Hourly Energy Consumed with PCWW, kWh	2.097	2.399	2.684	2.986	3.287	3.740	3.589	3.287
Daily Energy Consumed, kWh	24.069							
Daily Each Floor Energy Consumed, kWh	96.276							
Daily Whole Building Energy Consumed, kWh	673.935							
Monthly Whole Building Energy Consumed, kWh	20218.048							
Electricity Cost per Unit, RM	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509
Hourly Electricity Cost with PCWW, RM	1.07	1.22	1.37	1.52	1.67	1.90	1.83	1.67
Daily Electricity Cost, RM	12.25							
Daily Each Floor Electricity Cost, RM	49.005							
Daily Whole Building Electricity Cost, RM	343.033							
Monthly Electricity bill of Whole Building, RM	10290.99							

Nella configurazione con PCWW, essendo maggiore l'isolamento, la resistenza termica ha un valore più alto, inoltre, il funzionamento del PCWW è attiva solo per otto ore.

WITHOUT PASSIVE COOLING WATER WALL (PCWW)								
Time	8am to 9am	9am to 10am	10am to 11am	11am to 12pm	12pm to 1pm	1pm to 2pm	2pm to 3pm	3pm to 4pm
Outdoor Temperature, T1 (K)	300.0	302.0	304.0	306.0	308.0	311.0	310.0	308.0
Indoor Temperature, T2 (K)	287.8	288.1	288.4	288.6	288.9	289.5	289.1	288.9
Difference, T1 - T2 (K)	12.2	13.9	15.6	17.4	19.1	21.5	20.9	19.1
R Total Resistance, K/W	0.004378	0.004378	0.004378	0.004378	0.004378	0.004378	0.004378	0.004378
Heat Gain without PCWW, W	2786.66058	3174.96574	3563.2709	3974.41754	4362.7227	4910.91823	4773.86935	4362.7227
Heat Gain without PCWW, kW	2.787	3.175	3.563	3.974	4.363	4.911	4.774	4.363
1 TR = 3.517 kW	3.517	3.517	3.517	3.517	3.517	3.517	3.517	3.517
Tonnage Refrigerant, TR	0.792	0.903	1.013	1.130	1.240	1.396	1.357	1.240
Duration, hr	1	1	1	1	1	1	1	1
Hourly Energy Consumed without PCWW, kWh	2.787	3.175	3.563	3.974	4.363	4.911	4.774	4.363
Daily Energy Consumed, kWh	31.910							
Daily Each Floor Energy Consumed, kWh	127.638							
Daily Whole Building Energy Consumed, kWh	893.467							
Monthly Whole Building Energy Consumed, kWh	26804.020							
Electricity Cost per Unit, RM	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509
Hourly Electricity Cost without PCWW, RM	1.42	1.62	1.81	2.02	2.22	2.50	2.43	2.22
Daily Electricity Cost, RM	16.24							
Daily Each Floor Electricity Cost, RM	64.97							
Daily Whole Building Electricity Cost, RM	454.77							
Monthly Whole Building Electricity Cost, RM	13643.25							

Dalla distribuzione della temperatura negli ambienti con climatizzazione e negli ambienti con PCWW, si è osservato che nel primo caso il raffrescamento non era sufficientemente efficace, in particolare nelle zone prossime al vetro, nel secondo caso invece, il raffreddamento era più efficace.

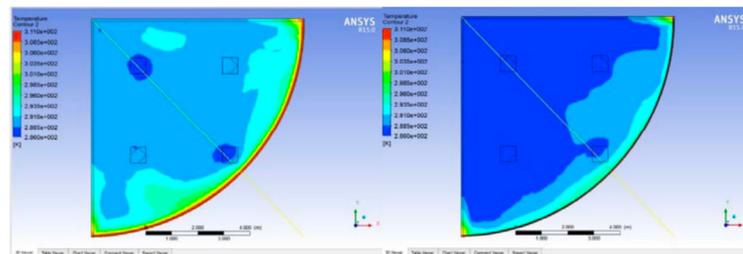


Figura 87 Distribuzione delle temperature

Confrontando i risultati, il PCWW nelle condizioni climatiche considerate ha ridotto il carico energetico giornaliero del 7,84 kW migliorando la climatizzazione dell'ambiente e riducendo notevolmente il consumo di energia elettrica.

In particolar modo è uno strumento di climatizzazione efficace per migliorare il comfort termico e il risparmio energetico degli edifici.

4.1.5 Effetto di miglioramento termico delle pareti di raffreddamento passivo

Il raffreddamento passivo viene realizzato con delle pareti evaporative costituite da mattoni umidi vuoti che siano in grado di assorbire acqua e che consentano la penetrazione del vento, l'evaporazione dell'acqua consenta la riduzione di temperatura.

Lo scopo dell'utilizzo di questi sistemi riguarda un miglioramento:

- Del Raffreddamento passivo

- Dell'Ombreggiatura solare
- Della ventilazione

Possono essere incorporati negli spazi semichiusi, nelle aree pedonali e nei cortili residenziali.

In Giappone è stata effettuata una simulazione in cui si studia l'effettivo miglioramento delle condizioni climatiche, in cui si confrontano le prestazioni dei mattoni a secco con delle pareti composte da mattoni umidi.

Vengono studiate due tipologie differenti di mattoni:

- A fessura: composto da undici canali a forma di fessura;
- A cielo aperto: composto da tre canali quadrati.

Il volume dell'aria che attraversa le due tipologie di mattoni è differente e questo

comporta degli effetti differenti di riduzione della temperatura. Nei primi infatti l'effetto di raffreddamento dell'aria è superiore dato il minore volume di aria che lo attraversa.

Successivamente all'attraversamento dell'aria nelle due configurazioni di laterizi si nota come la temperatura diminuisce maggiormente nei laterizi a fessura piuttosto che in quell'a cielo aperto, infatti se nei primi la temperatura si abbassa di 3°C, nei secondi la temperatura scende di solo 1°C.

L'acqua utilizzata per rendere umidi i mattoni viene fornita mediante un canale a forma di vassoio incorporato ai mattoni. Parete dell'acqua viene assorbita dai mattoni, la restante fuoriesce, grazie ad una spugna, incorporata tra i mattoni e il vassoio, assicura che il livello dell'acqua rimanga stabile ad un certo livello.

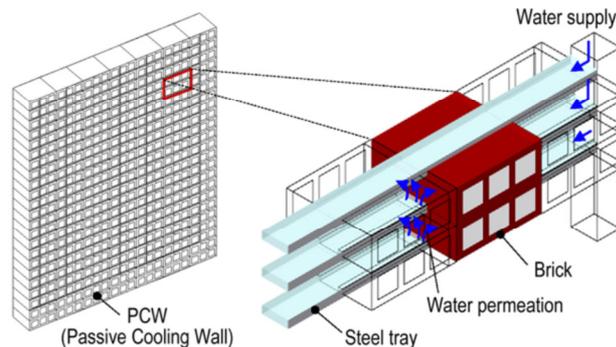


Figura 88 Schema PCW

Attraverso lo studio di alcuni prototipi realizzati sul tetto di un edificio a due piani sono state rilevate le temperature superficiali delle pareti:

- Il PCW rivolto a sud ha una temperatura superficiale di 29°C e 30°C, inferiore alla temperatura a bulbo secco di 3°C-4°C superiore alla temperatura a bulbo umido di 2-3°C;
- Il PCW rivolto a est ha una temperatura superficiale di 25°C, quasi coincidenti alla temperatura a bulbo umido;

Monitorando la temperatura rilevata sul lato sopravvento e sottovento, del muro diretto a sud, la temperatura del lato sottovento risulta uguale alla temperatura a bulbo umido.

Le temperature superficiali possono essere ridotte al di sotto della temperatura dell'aria in ambiente mediante l'evaporazione dell'acqua contenuta nei mattoni umidi.

Lo studio delle pareti con PCW con mattoni asciutti e quello con mattoni bagnati che creano l'effetto di raffreddamento evaporativo è stato basato sui dati meteorologici di Tokyo del 5 agosto in cui si è riscontrata:

- Un'alta temperatura dell'aria;
- Bassa velocità del vento;
- Alta radiazione solare;
- Cielo nuvoloso di notte.

Dai dati analizzati si evince che nella configurazione con mattoni a secco la temperatura superficiale alle 9:00 del mattino era quasi uguale a quella ambiente, alle 12:00 e alle 15:00 era dai 5- 10 °C più alta. Un comportamento diverso invece si nota nella configurazione a mattoni bagnati. In cui la temperatura superficiale resta sempre al di sotto della temperatura ambiente.

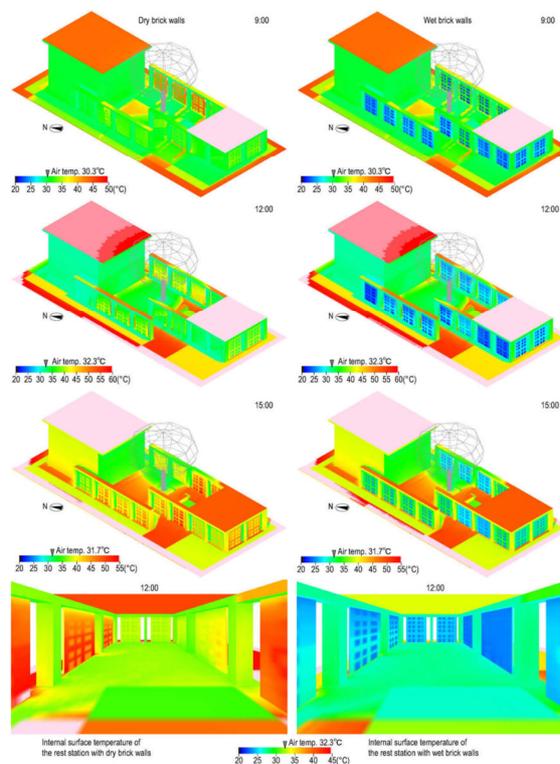


Figura 89 Distribuzione della temperatura

Per verificare il comfort termico è stata effettuata un'analisi sulla temperatura media radiante per entrambe le configurazioni ed è stato rilevato che era più basso e misurava 2-4°C meno della temperatura ambiente.

4.1.6 Effetto di raffrescamento di una parete di raffreddamento evaporativa in ceramica porosa e capacità

le pareti PECW sono delle pareti di raffreddamento costituite da ceramiche porose con una forza di assorbimento capillare che consente all'acqua di risalire fino ad 1m di altezza.

La composizione realizzata con tubi cilindrici sfalsati in ceramica consente all'aria di attraversare il mezzo, abbassando la temperatura superficiale per mezzo dell'evaporazione dell'acqua.

L'aria che attraversa la parete si raffredda di parecchi gradi e la temperatura del cilindro di ceramica può essere mantenuta a lungo uguale alla temperatura a bulbo umido.

La struttura di queste ceramiche porose è simile a quella di un loto, i pori sono estremamente sottili in modo da creare un effetto di capillarità elevato, si crea un effetto di ammollo che sfrutta l'acqua derivante da un serbatoio d'acqua piovana.

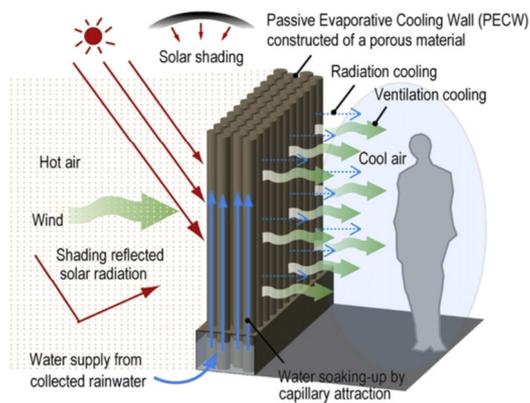


Figura 90 Schema PECW

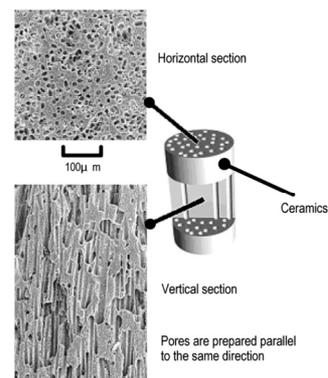


Figura 91 Particolare compositivo elemento in ceramica

Per raffrontare le misure rilevate sulla superficie della parete e quelle ambientali è stato effettuato un controllo sui dati meteorologici di temperatura umidità e radiazione solare incidente di Yokohama nel periodo di misurazione che va dal 1 luglio al 30 settembre. Le temperature dell'aria e delle superfici sono state misurate mediante termocoppie mentre la distribuzione della temperatura viene misurata tramite termocamera ad infrarossi.

Le termocoppie registrano la temperatura ogni 60 s e misurano il rapporto di superficie bagnata, la distribuzione della temperatura superficiale e il peso dei tubi di ceramica ad intervalli di 1 ora.

Dei test effettuati sulle capacità di assorbimento dell'acqua, da parte dei tubi di ceramica, hanno evidenziato che in tre posizioni differenti:

- Camera senza flusso d'aria, con temperatura ed umidità costante;
- Pilotis ventilato con ombreggiatura;
- Luogo aperto senza nessuna protezione solare.

Il tempo impiegato affinché l'acqua raggiunga il livello di 1m è di 18h, 28h, 32h rispettivamente. Nella prima ora d'immersione i tre tubi hanno raggiunto lo stesso livello di acqua imbevuta (36 cm), nelle ore successive si nota che l'altezza cresce maggiormente nelle camere senza

flusso d'aria e con temperatura ed umidità costante.

L'analisi dei rapporti di superficie bagnata evidenziano che nella faccia a sud del tubo di ceramica in un periodo compreso dal 30 luglio e l'8 agosto, variano nei giorni in funzione dell'altezza del provino e in funzione delle condizioni climatiche.

Notiamo che il primo giorno rapporto della superficie bagnata varia tra 0,7 e 1,0, con delle variazioni quasi nulle nelle differenti ore giornaliere, il secondo giorno l'andamento è praticamente lo stesso. Solo dopo quattro giorni si iniziano a notare delle differenze, infatti in altezze superiori ai 70 cm si notano delle differenze sostanziali durante le ore del giorno, questo comportamento ha un andamento simile fino al 7 agosto, l'8 agosto, nove giorni dopo, all'altezza superiore a 70 cm il rapporto di superficie bagnata diminuisce notevolmente fino a 0,1.

Durante le ore del giorno la temperatura lungo tutta l'altezza dei tubi è praticamente costante, anche nelle giornate in cui in si notano delle grandi differenze di rapporto di superficie bagnata la temperatura si mostra uniforme. Inoltre la temperatura delle superfici resta sempre al di sotto della temperatura dell'ambiente.

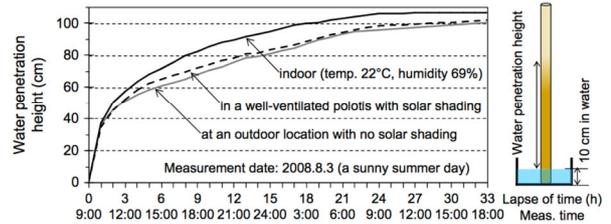
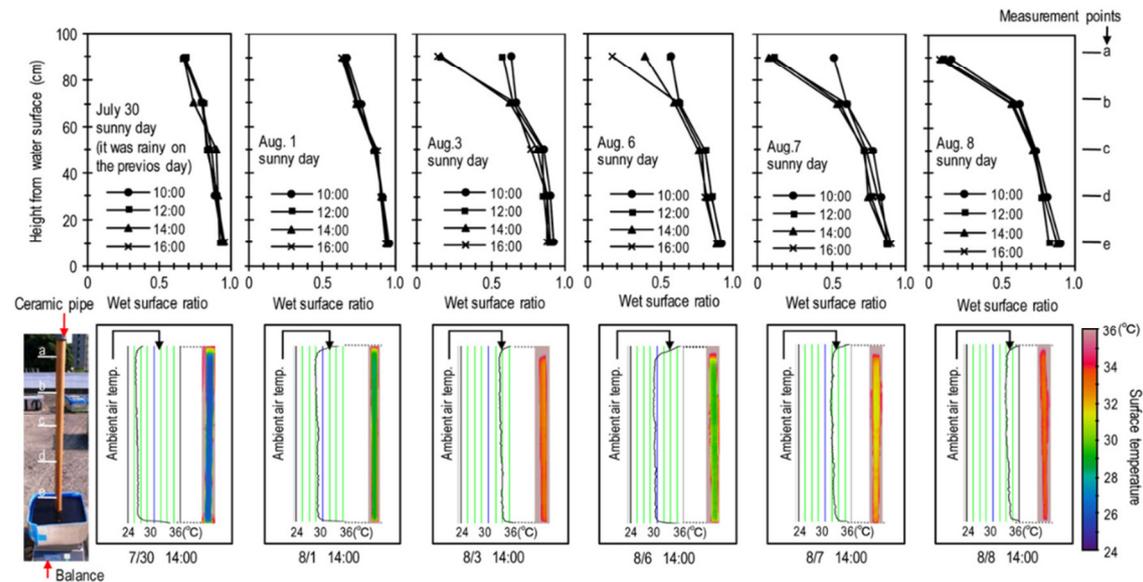


Figura 92 Grafico relativo alle capacità assorbitive dei tubi di ceramica.



Per le diverse ore della giornata, la parete PECW ha mostrato dei risultati di evaporazione molto vari. Il massimo tasso di evaporazione è stato riscontrato alle ore 13:00 con un tasso di evaporazione pari a 2,1 kg/h, nelle ore notturne invece, il tasso di evaporazione scende tra 0,3-0,6 kg/h.



L'evaporazione totale giornaliera era di 20,7 kg/giorno, infatti il tasso minimo e massimo constatata consiste nel 21,1 e 15,5kg/giorno.

La distribuzione della temperatura dell'aria della temperatura della PECW mostra che nella parete posteriore del muro 8 (lato sottovento), le temperature erano 3-4°C sotto la temperatura dell'aria ambiente, a 10 cm distanza dal muro, la temperatura era 2°C sotto la temperatura dell'aria ambiente mettendo in risalto la presenza di un getto di aria fredda proveniente dalla parete, la cui intensità varia in funzione della direzione e della velocità del vento.

La temperatura dell'aria che attraversa la parete può essere ridotta anche di parecchi gradi al di sotto della temperatura dell'aria ambiente.

L'efficienza di raffreddamento viene valutata come il rapporto di riduzione di temperatura dell'aria e calcolata in funzione:

- della temperatura ambiente a bulbo secco T_a
- della temperatura dell'aria sottovento vicino la parete posteriore del PECW T_0 ;
- della temperatura a bulbo umido dell'aria ambiente T_w

e viene calcolata come:

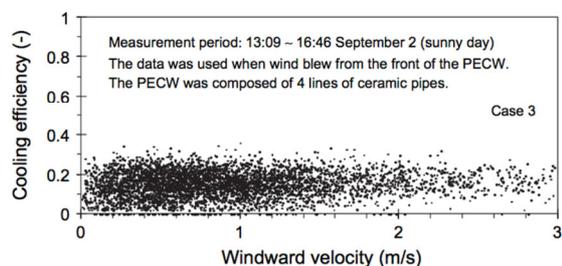
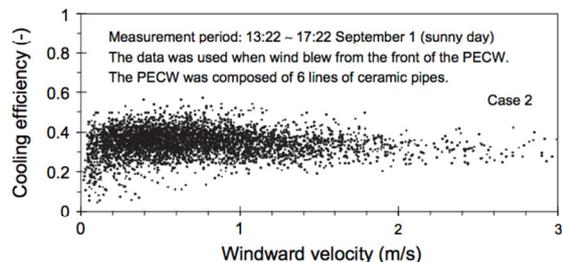
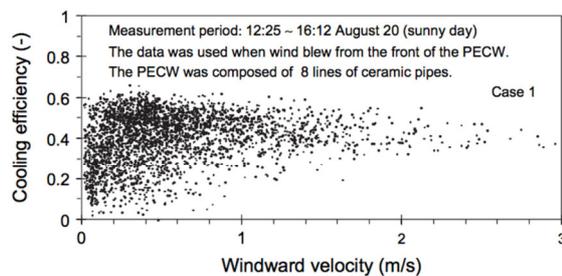
$$\beta = \frac{(T_a - T_0)}{(T_a - T_w)}$$

Utilizzando otto, sei, quattro linee sono stati analizzati tre casi:

Caso 1): otto linee, con efficienza di raffrescamento compresa tra 0-0,7;

Caso 2): sei linee; con efficienza tra 0,6-0,1;

Caso 3): quattro linee; con efficienza tra 0,3 e 0,1



4.1.7 Effetto di raffreddamento evaporativo mediante un fil d'acqua esposto alla ventilazione naturale

Il sistema oggetto di studio consiste nell'applicazione di film d'acqua associati a sistemi di aperture e balconi che sfruttano la ventilazione naturale.

Questi sistemi particolarmente indicati in zone aride, possono essere integrati negli ambienti anche come elementi di design oltre che come sistema di raffreddamento ecologico.

L'acqua viene fatta cadere come linee di nylon o altri filamenti, in modo da esporre la superficie massima al flusso d'aria che lo attraversa, la disposizione delle linee consente la realizzazione di cortine in cui l'aria passa in posizione orizzontale.

Una pompa, pompa l'acqua dal serbatoio sul fondo del sistema e lascia correre per tutto il sistema per essere successivamente riportata al serbatoio, formando un percorso ciclico.

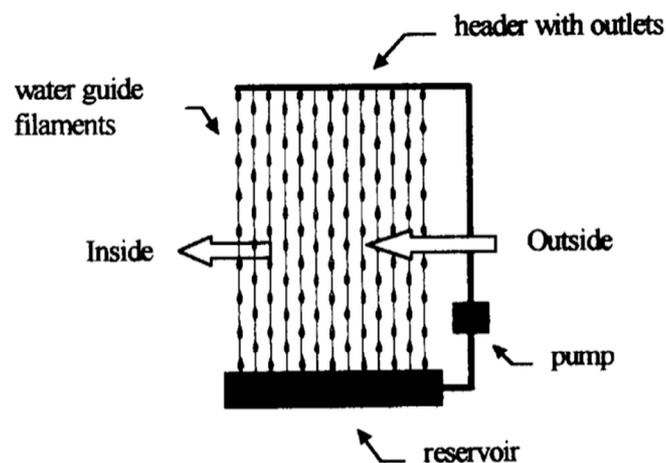


Figura 94 Schema film d'acqua

Nel processo di evaporazione diretta la corrente d'aria viene raffreddata grazie al processo evaporativo che si genera al passaggio dell'aria nei film d'acqua, l'incremento di vapore d'acqua nell'aria genera un processo adiabatico che comporta una riduzione di temperatura nell'aria. Il raffreddamento maggiore si raggiunge quando la temperatura a bulbo secco (T_i) e a bulbo umido (T_s) coincide.

$$E = \frac{(T_i - T_0)}{(T_i - T_s)}$$

L'efficienza del sistema dipende da alcuni fattori come il trasferimento di calore medio e il trasferimento di massa legato al flusso.

Le simulazioni sono state effettuate su una stanza di prova con due finestre su due pareti opposte, dove quella di nord presenta il sistema di raffreddamento analizzato.

La modellazione del sistema assume le linee d'acqua come piccole linee cilindriche con un diametro di 3mm, poste a distanza di 9mm l'una dall'altra, in file sfalsate in modo da poter fare alcune considerazioni:

- assenza dell'effetto pila;
- nessuna caduta di pressione nell'edificio;
- perfetta miscelazione dell'aria;
- profilo del vento a bassa potenza

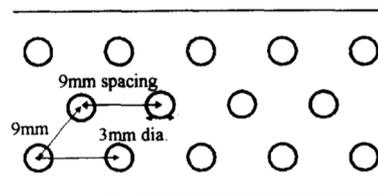


Figura 95 Schema di modellazione

Il comportamento termico di un edificio con questo sistema passivo di raffreddamento è stato realizzato mediante un programma che calcola ora per ora e per una durata che può variare da un giorno ad un anno i dati climatici, assumendo che:

- la casa sia modellata come una zona singola;
- non ci siano sporgenze;
- non ci siano arredi.

Dal grafico ottenuto la temperatura interna paragonata con quella esterna, considerando gli effetti di una ventilazione continua, la temperatura interna risulta essere 32,5 °C, nonostante sia inferiore rispetto alla temperatura media esterna di 38,5°C è comunque poco confortevole per gli occupanti. Quando il sistema evaporativo viene attivato invece, la temperatura massima interna scende al di sotto dei 26°C e una temperatura media interna di 24°C, che crea una situazione di comfort ambientale. L'aggiunta di ventilatori può incrementare ulteriormente i risultati.

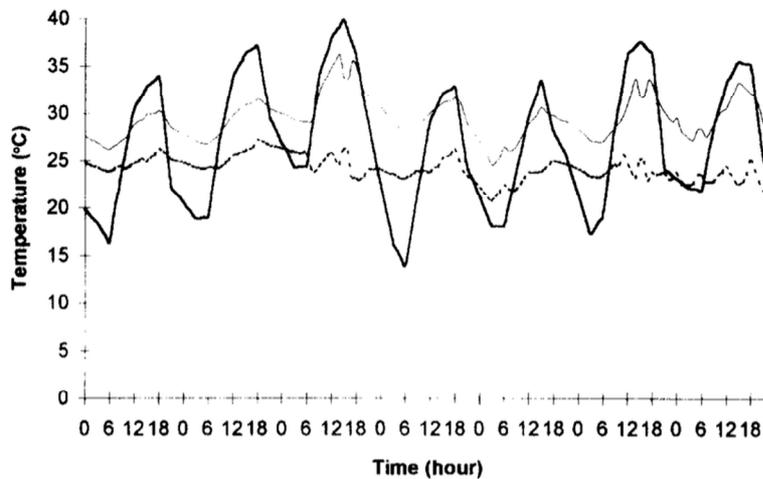


Figura 96 Andamento della temperatura.

4.2 Esempi di Studio di Roof Pond

4.2.1 Prestazioni termiche di diverse configurazioni di un sistema basato sul laghetto per condizioni subtropicali

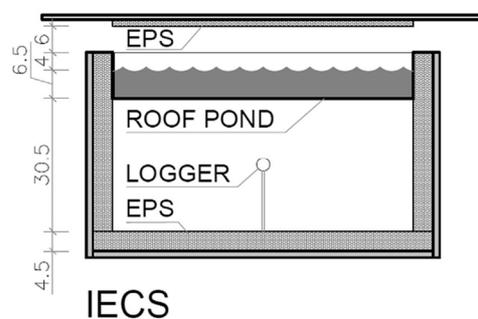
Uno studio comparativo sulle prestazioni di alcune configurazioni di Roof Pond è stato effettuato a Curitiba, situata in una zona tropicale del Brasile, in cui il clima è caratterizzato da grandi fluttuazioni di temperatura sia giornaliera che annuali nell'aria. Nella zona nel periodo estivo la temperatura è di 20°C circa, mentre in inverno si aggira ai 13°C nel periodo di giugno/luglio.

I test sono stati effettuati su due celle di prova:

- una con un sistema di raffreddamento evaporativo indiretto IECS;
- una nella quale sono state alternate differenti configurazioni: modulo di controllo, laghetto sfruttato come massa termica naturalmente ventilata, laghetto aperto senza copertura.

La composizione di entrambe le celle è costituita da pannelli di legno leggeri a bassa densità (pareti a pavimento), con colorazione in vernice bianca e uno strato di 4,5 cm in poliestere espanso.

Il sistema IECS consiste in un serbatoio d'acqua profondo 6,5 cm, coperto da uno strato in legno isolato sul lato interno da uno strato di EPS di 1,5 cm. Tra la superficie dell'acqua e il coperchio viene lasciato uno strato d'aria che serve a ventilare in modo naturale il

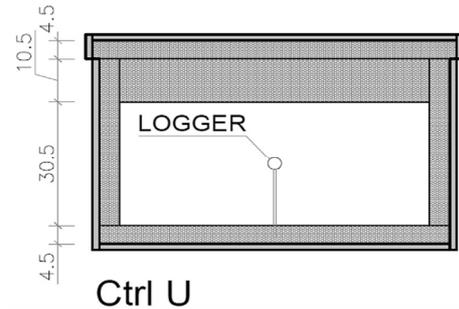


laghetto. La ventilazione consente inoltre al sistema di migliorare ed incrementare il processo di evaporazione.

Lo studio si sviluppa su tre fasi:

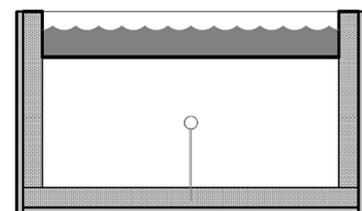
1. nei primi 24 giorni in primavera, è stato effettuato un controllo confrontando i dati rilevati nel sistema IECS con un'unità di controllo (CtrlU),
2. il paragone viene svolto con l'unità di controllo che viene trasformata in una configurazione di IECS TM vent, che funge da massa termica ventilata;
3. il confronto viene svolto rispetto ad un laghetto privo di copertura (IECS unshaded).

L'unità di controllo CtrlU è composta sul fondo e sulle pareti da pannelli di legno leggeri, bianchi con una densità bassa, proprio come le pareti dell'IECS. Differentemente da quest'ultimo, il serbatoio d'acqua viene coperto con uno un pannello di composizione identica alle pareti ma con uno spessore notevolmente superiore (15cm).



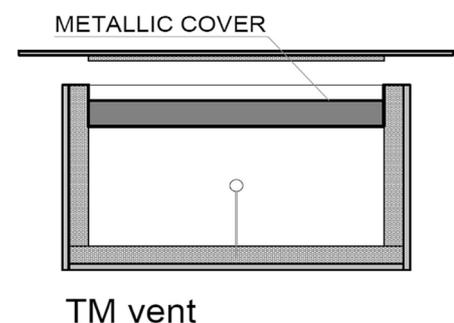
Il TM vent presenta la stessa stratigrafia dell'IECS e del CtrlU nelle pareti e sul fondo, come l'IECS troviamo un sistema a laghetto, che però in questo caso viene coperto con uno strato di pannelli uguale alle pareti, come l'IECS superiormente alla copertura è stato creato uno strato ventilato sopra il quale ritroviamo una seconda copertura lignea.

Questa configurazione consente nella seconda fase sperimentale di constatare le capacità. Della componente termica del tetto senza consentirne l'evaporazione.



L'IECS unshaded è composta dalla stessa tipologia di pareti che abbiamo ritrovato in tutti i sistemi confrontati, presenta inoltre un sistema a laghetto scoperto con le stesse caratteristiche del sistema IECS, ma si differenzia da quest'ultimo per la rimozione della copertura ombreggiante in legno.

Con questa configurazione viene svolto un controllo sugli effetti evaporativi di entrambe le configurazioni IECS.



Il monitoraggio della temperatura interna dell'aria ed esterna, della condizione di umidità esterna, sono stati utilizzati dei sensori posizionati rispettivamente al centro della cella di prova e all'interno di una scatoletta di protezione degli agenti atmosferici.

Dai i dati rilevati nelle fasi di misurazione, le condizioni ambientali esterne nei tre periodi di monitoraggio sono simili.

Nel primo step di monitoraggio l'EICS ha mostrato delle prestazioni superiori all'unità di controllo. Le differenze più evidenti sono state riscontrate nelle ore diurne, mentre in quelle notturne le temperature erano molto simili.

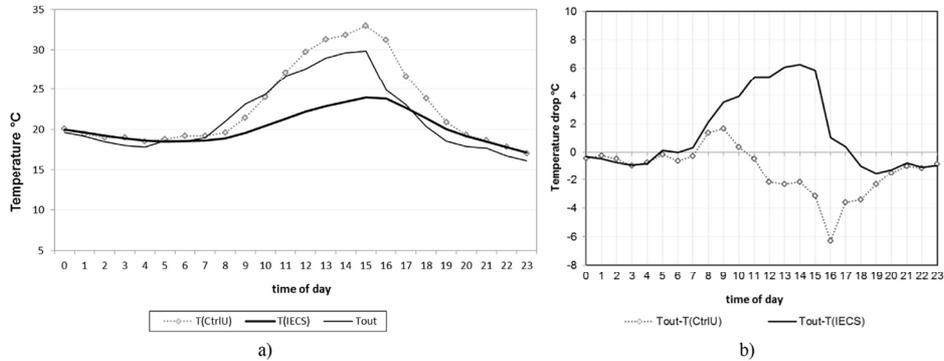


Figura 97 Andamento temperature step 1

Nel secondo step, le temperature interne del sistema IECS erano sempre inferiori rispetto a quelle del TM vent, infatti la massima riduzione di temperatura è di circa 8 °C, in condizioni di giornata limpida, senza nuvole.

La causa di queste differenti prestazioni tra le celle è attribuita alla perdita di calore legata all'evaporazione dell'EICS. Questo consente un incremento di raffreddamento di 1,1 °C.

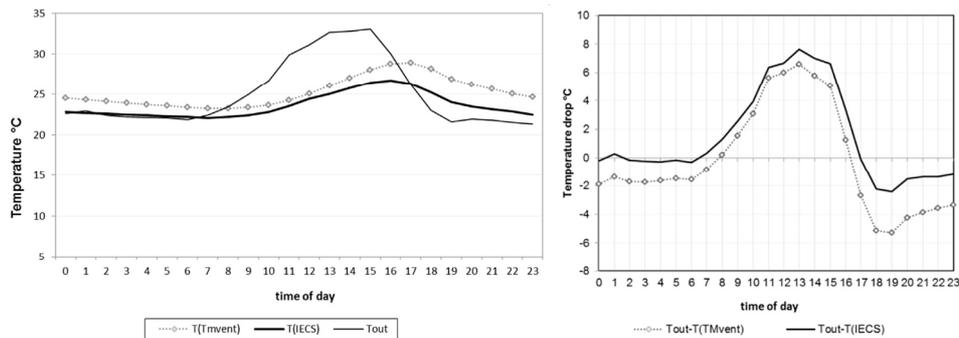


Figura 98 Andamento temperature step 2

Nel terzo step di monitoraggio, si nota che l'effetto di raffreddamento nell'EICS unshaded si verifica solo nelle ore notturne fino alle prime ore del mattino, nelle ore successiva, si riscalda, presentando dei risultati simili al Ctrl U nelle ore giornaliere.

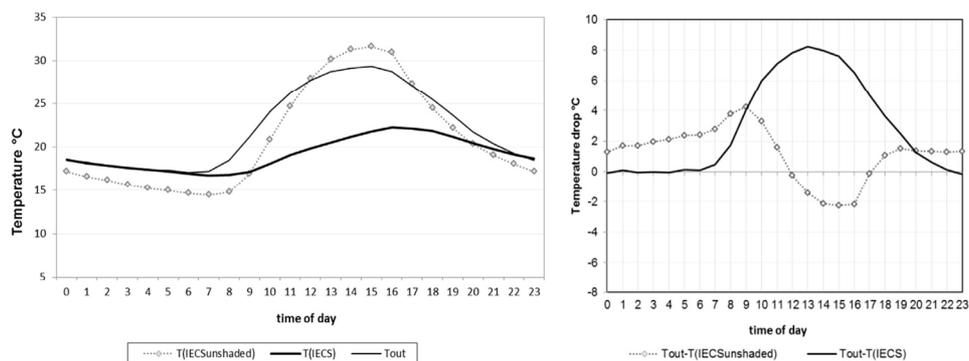




Figura 99 Andamento temperature step 3

Da questi risultati si evince come il sistema EICS non dia risultati di raffreddamento notturno notevoli, il comportamento termico, ha dei risultati ottimali nelle ore giornaliere con un picco di 9°C. Un ruolo importante è l'ombreggiamento, che consente di avere un effetto evaporativo passivo nelle ore diurne.

Nella configurazione con tetto chiuso TM vent le prestazioni rilevate hanno un andamento simile al sistema EICS, con una differenza di temperatura a favore dell'EICS di 1,5°C e un picco di 2°C.

Mediante semplici equazioni sono fatte delle analisi predittive sul comportamento delle singole configurazioni, al fine di descrivere il comportamento della temperatura sui vari sistemi e le singole variazioni rispetto alle ore giornaliere e alla temperatura esterna.

Questa previsione non viene realizzata per il sistema CtrlU, dato che serve solo come caso di riferimento, viene però realizzata sia per il sistema TM vent che per il sistema EICS unshaded, ottenendo risultati simili a quelli trovati sperimentalmente.

La configurazione EICS risulta vantaggiosa, può essere implementata rimuovendo in dei periodi selezionati la copertura, in particolare la notte, per incrementare il raffrescamento evaporativo notturno. In inverno invece, il funzionamento selettivo può essere invertito, esponendo il laghetto

alle radiazioni diurne, facendo in modo che questo immagazzini energia termica che successivamente viene trasferita all'ambiente sottostante per convezione e radiazione, nelle ore notturne invece, il laghetto viene coperto per limitare le perdite di calore.

Dallo studio effettuato si è concluso che:

- la media delle fluttuazioni giornaliere era di 2,5°C rispetto ai 6,5°C in un edificio privo di questo sistema;
- la combinazione di un effetto di raffreddamento evaporativo e un effetto di massa termica, consente la riduzione di temperatura anche quando la temperatura WTB è nulla (cosa che non accade solitamente in un Roof Pond);
- in una giornata limpida, i risultati ottenuti in letteratura, relativi alla riduzione di temperatura sono simili ai risultati Sperimentali;
- l'effetto di ombreggiamento consente di arrivare a picchi di riduzione di temperatura anche di 10°C

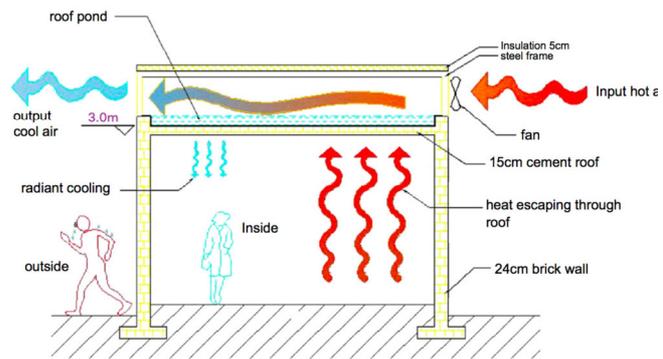
4.2.2 Prestazione di un Roof Pond in clima arido

Lo studio riguarda l'analisi di un Roof Pond e gli effetti migliorativi sul comfort termico e la riduzione dei carichi di raffrescamento in Iraq.

L'analisi ha valutato il carico di raffrescamento in tre condizioni:

- normali senza Roof pond;
- con Roof Pond e privo di ventilazione;
- con Roof Pond e ventilazione.

Considerando i dati metereologici, la disponibilità di acqua a costi bassi, gli effetti del raffrescamento evaporativo sembrano essere una soluzione ottimale per la riduzione del carico termico stagionale. In una tipica abitazione a due piani a Bagdad, il secondo piano è il piano più caldo della casa dato che i raggi solari irradiano il calore sul tetto, per questa ragione l'installazione di Roof Pond consentirà di irradiare una temperatura al di sotto della temperatura ambiente. L'aria calda che risale dall'ambiente viene raffrescata perdendo parte del calore sul tetto.



L'edificio oggetto di studio è costituito da una sola stanza e realizzato con il calcestruzzo tipico iracheno, presenta diverse finestre (protette dai raggi solari) e una porta in acciaio.

Figura 100 Schema flusso di calore.

Il tetto ha un'altezza di 2,75 m ed è stato verniciato da uno strato impermeabilizzante bituminoso, presenta una copertura in polistirolo sorretta da una struttura in acciaio.

L'installazione di una ventola di 3500 cfm solo su un lato del telaio, potrebbe spingere l'aria fresca su un canale di uscita posizionato sul lato opposto.

Le temperature sono state rilevate attraverso termometri a mercurio e termometri digitali nelle tre differenti configurazioni.

Le letture sono state effettuate manualmente ad intervalli di 60 minuti, successivamente alla riempitura e all'attivazione della ventola, è stata effettuata una pausa giornaliera dalle misurazioni per consentire che l'effetti si stabilizzasse.

Nel caso edificio con configurazione standard, senza piscina, la temperatura minima esterna rilevata è di 32°C, mentre la massima 44°C, la temperatura minima interna era di 39,5°C e la massima di 43,5°C.

La media delle temperature interna risulta quindi, superiore rispetto alla media della temperatura esterna. Questo è legato alle lunghe ore di esposizione solare giornaliera al quale le strutture sono

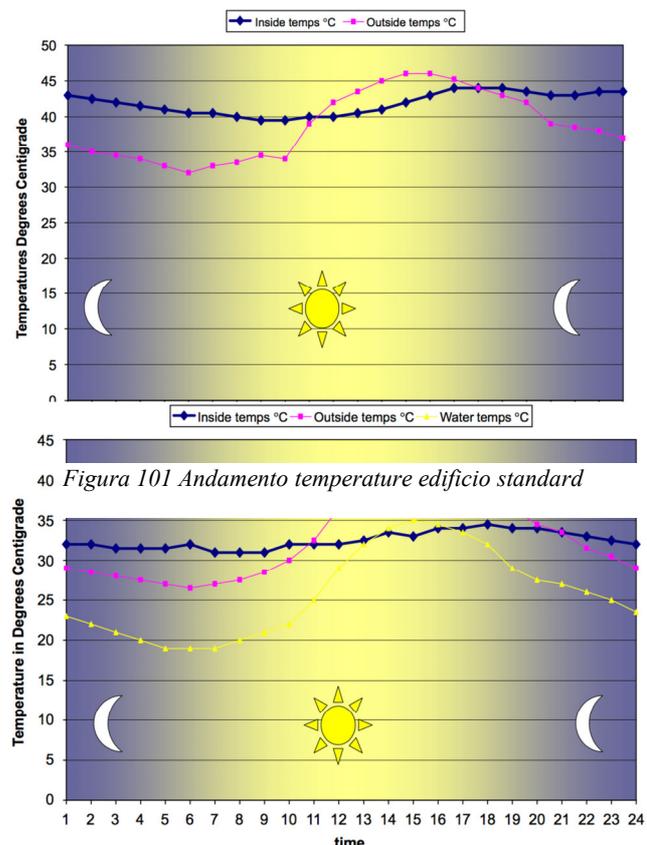


Figura 101 Andamento temperature edificio standard

esposte. L'aria che entra dalle finestre riscalda l'ambiente interno creando un effetto serra.

Nella configurazione con piscina priva di copertura e di ventola, le temperature si stabilizzano in modo significativo. Se all'esterno le temperature variano tra i 26,5°C di minima e i 41°C di massima, nell'ambiente le temperature saranno notevolmente più basse di quelle esterne e di quelle rilevate in una configurazione standard di tetto. Le fluttuazioni di temperatura si sono ridotte e la temperatura oscilla da una minima di 31°C e una massima di 34,5°C. La temperatura dell'acqua all'interno della piscina invece, si è aggirata tra i 19°C e i 28,5°C.

L'ultima simulazione è stata effettuata con la configurazione di Roof Pond coperto e

Figura 102 Andamento temperature edificio con piscina senza ventola.

con un sistema di ventilazione integrato. Nelle previsioni era previsto un incremento delle prestazioni elevato, ma dai dati riscontrati il miglioramento è stato rilevato ma non è risultato significativo quanto nelle aspettative.

Quando la temperatura esterna ha raggiunto i 47°C all'interno la temperatura rilevata si aggirava tra i 34°C e i 37°C. La temperatura dell'acqua da un minimo di 19°C ha raggiunto un valore di picco di 28,5°C.

Questo mostra che nonostante la temperatura esterna fosse parecchio più alta che nel caso precedente, il valore della temperatura dell'acqua è simile a quella riscontrato precedentemente.

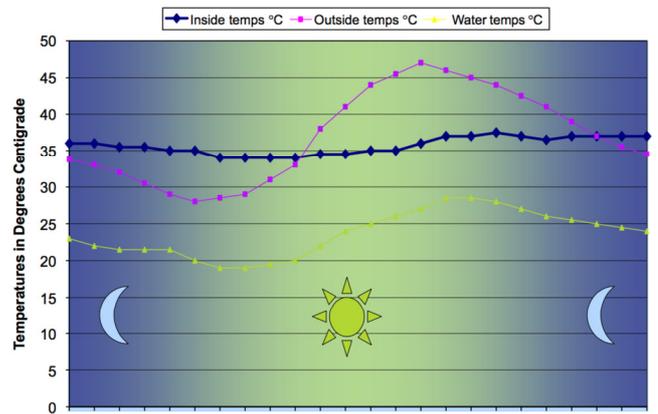


Figura 103 Andamento temperature edificio con piscina e ventola

Dall'analisi dei risultati una prima osservazione riguarda l'incremento di massa termica nelle configurazioni di Roof Pond aperto e nella configurazione con ventilazione.

La caduta di temperatura dovuta alla sola installazione della piscina è di 3,36°C rispetto al caso di abitazione con tetto standard, l'aggiunta di un ventilatore invece, consente d'incrementare la caduta di temperatura ulteriormente di 1,28°C per un totale di 4,5°C.

Un confronto sulle temperature interne è inadeguato data la differenza di temperatura esterna rilevata durante le misurazioni effettuate nei tre casi di studio, per tale ragione è più importante analizzare la differenza di temperatura che un sistema impone tra l'esterno e l'interno, valutando quindi la caduta di temperatura che consente il sistema.

Paragonando le cadute di temperatura orarie dei tre sistemi si osserva che nel caso con Roof Pond ventilato sono sempre superiori rispetto al caso senza ventola.

Solamente nella fascia oraria delle 5 del mattino si nota una diminuzione dell'efficienza del sistema di raffreddamento dovuta all'incremento di umidità in ambiente che comporta un effetto di raffreddamento evaporativo ridotto.

Si nota inoltre che in questa fascia oraria l'efficienza di raffreddamento del Roof pond senza ventola è leggermente superiore, la temperatura interna infatti è di 1,5°C più alta che nel caso con ventilatore installato. L'unica giustificazione a questo comportamento è legata alla composizione dell'edificio oggetto di studio, il calore emesso dalle pareti, completamente esposte. La temperatura dell'acqua ha una caduta di temperatura maggiore con l'uso della ventola, questo denota che non vi è un'inefficienza da parte del sistema, ma il comportamento è dovuto ad altri fattori.

Nel caso di studio, il tetto rappresenta il 32% della superficie esterna, in un caso reale è difficile che un ambiente sia esposto su tutti e quattro i lati all'esterno e presenterebbe dei risultati migliori in entrambe le configurazioni.

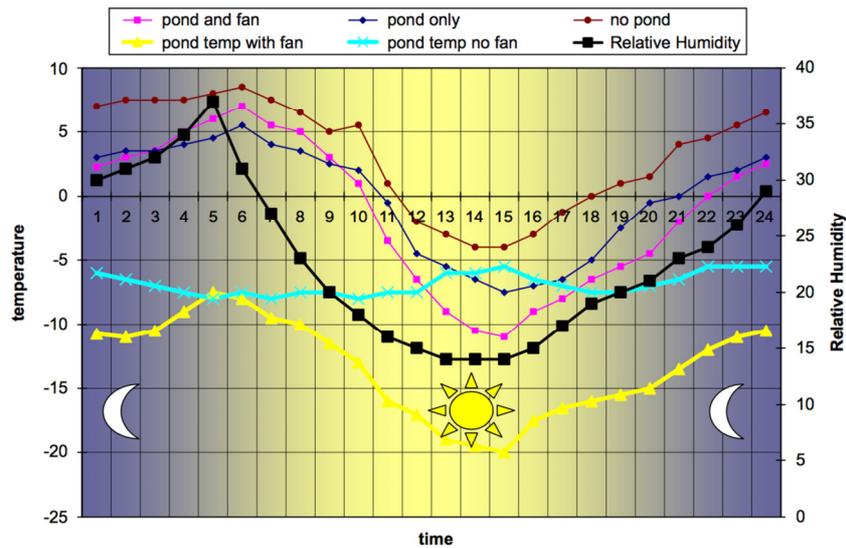


Figura 104 Grafico andamento delle temperature, umidità e temperatura dell'acqua nei diversi sistemi.

Attraverso un programma di simulazione è stato studiato come nelle diverse condizioni ambientali si possa ridurre la temperatura fino a 26 °C. Da questa analisi si nota che quando l'influenza delle pareti verticali diminuisce anche il rendimento del Roof pond aumenta, il calo di temperatura in una stanza è tra il 28% e il 30%.

4.2.3 Prestazione di un Roof Pond con sacchi iuta utilizzato per il raffrescamento estivo

In questo studio è stato analizzato un Roof pond costituito da sacchi di iuta (RPWGB) che si poggiano sulla superficie dell'acqua.

Tra le differenti configurazioni di roof pond, che sfruttano il raffreddamento evaporativo per ridurre il carico di raffrescamento di un edificio, sicuramente i sistemi con sacchi di iuta bagnati e sistemi con copertura mobile sono quelli che permettono di ottenere risultati migliori in termini di efficienza di raffrescamento.

In entrambi sistemi devono essere poste alcune attenzioni: nel primo, bisogna controllare che i sacchi non siano troppo bagnati, nel secondo devono essere installati dei sistemi di apertura o chiusura meccanica della copertura.

Questo nuovo sistema RPWGB integra i vantaggi di entrambe le configurazioni, si ottiene posizionando i sacchi di iuta su una griglia di polistirolo o altri materiali galleggianti.

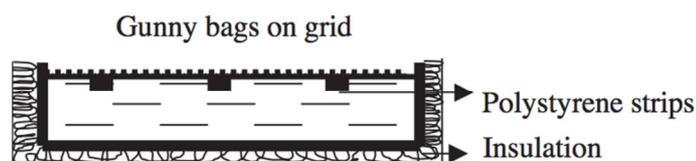


Figura 105 Schema Roof Pond con sacchi di iuta

I sacchi intercettano le radiazioni solari e dissipano le radiazioni ricevute e gli aumenti di calore nell'edificio attraverso il tetto mediante evaporazione, convezione e radiazione termica.

Al fine di esaminare le prestazioni dei tipi di edificio, le analisi vengono realizzate tre tipologie edilizie:

1. Edificio con pareti ben isolate, massicce e con un tetto in cemento;
2. Edificio con pareti scarsamente coibentate, luminose e con tetto coperto in metallo;
3. Edificio con pareti massicce ben coibentate e tetto coperto in metallo.

Le simulazioni sono state realizzate inserendo i dati climatici di Torino e le temperature iniziali di tutti gli elementi, i parametri dell'edificio e degli stagni simulati.

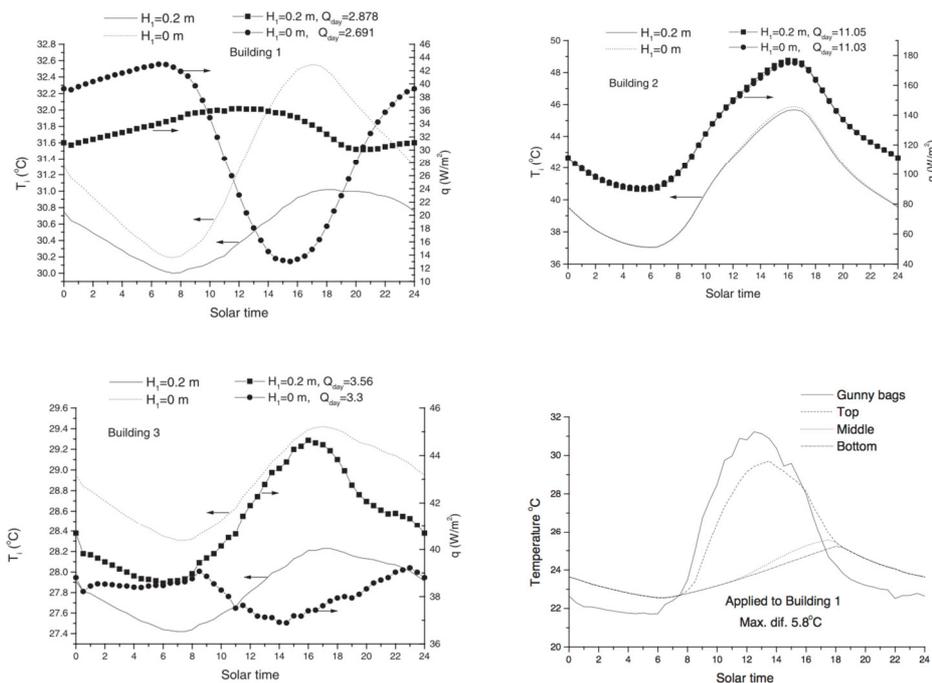
Il metodo di simulazione che utilizza il metodo delle differenze finite, considera i dati riferiti ad un momento iniziale (0:00) e successivamente determina i parametri ad ogni istante temporale (0:00+dt).

Paragonando il caso in cui il tetto è coperto da una semplice copertura con sacchi di iuta bagnati e il sistema RPWGB in tutte e tre le configurazioni di edificio.

Da questa analisi, è risultato evidente che tutti in tutti i sistemi edilizi il comportamento del sistema RPWGB ha un comportamento sempre migliore ad un sistema di tetto con sacchi di iuta bagnati.

Nel primo sistema le temperature sono sempre più basse e più stabili per tutte le ore del giorno anche i flussi di calore che attraversano il tetto sono costanti e giornalmente ha una perdita di calore maggiore.

Il sistema RPWGB permette di ottenere una stratificazione della temperatura lungo tutta la profondità del laghetto.



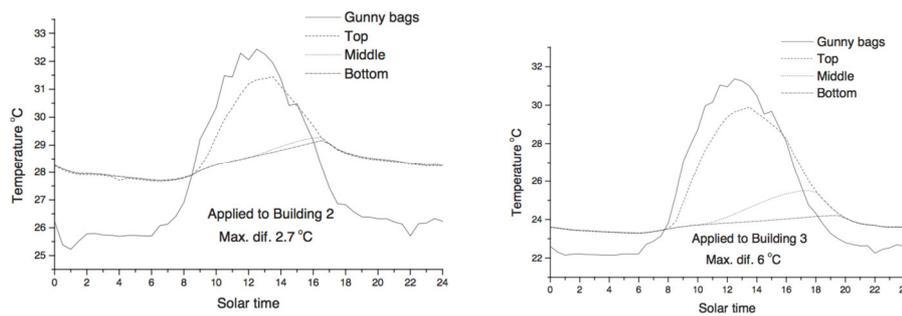


Figura 106 Andamento temperature ne sistemi studiati

Nei primi tre grafici è stato rappresentato l'andamento della temperatura della nelle diverse configurazioni, negli ultimi tre la stratificazione dell'acqua.

Da questi ultimi grafici, si nota come la stratificazione agisca da filtro, resiste al trasferimento di calore tra i sacchi e lascia che l'acqua resti relativamente fresca, facilitando il trasferimento di calore dall'edificio all'acqua.

Il flusso di calore attraverso il tetto dell'edificio 2 è maggiore rispetto al primo a causa della scarsa stratificazione che si crea in questa configurazione.

Nella configurazione dell'edificio 3, entrambi i sistemi sono stabili sia in termini di temperatura che di flusso la configurazione di RPWGB è superiore rispetto al caso di tetto con sacchi di iuta bagnati.

Paragonando le condizioni termiche dell'edificio 1 con l'RPWGB e la stessa configurazione di tetto sul sistema di edificio 3, si nota come nell'ultimo caso siano migliori. Questo denota come le prestazioni del sistema siano influenzate dal livello di coibentazione delle pareti e dalla capacità conduttiva del tetto.

Analizzando il comportamento del tetto con sacchi di iuta bagnata, si nota che al crescere dell'acqua contenuta all'interno di essi le performance cambiano e subiscono una decrescita.

Questa decrescita assume un'importanza maggiore in questa configurazione piuttosto che nella configurazione RPWGB grazie alla presenza dello strato d'acqua posto inferiormente.

La profondità dell' acqua influisce sulle capacità di raffrescamento delle caratteristiche del tetto. Ad esempio nel caso dell'edificio 1, si riscontra una proporzionalità diretta tra effetto di raffreddamento fino ad una profondità di 20 cm oltre la quale non si verifica più un incremento. Negli edifici con configurazione 2 o 3 invece si ha picco di efficienza quando la profondità dell'acqua è 5 cm, aumentando ulteriormente lo spessore invece, l'efficienza subisce un'inversione di comportamento.

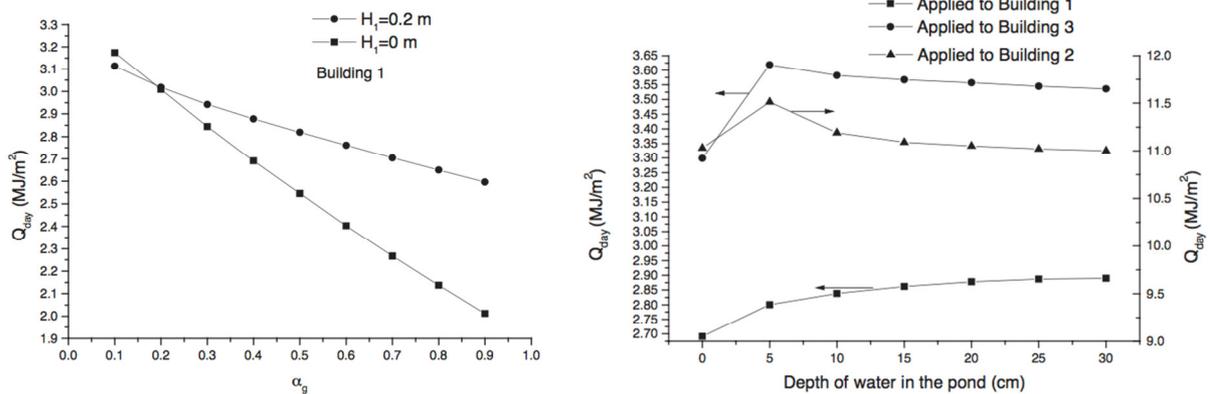


Figura 107 Grafici fabbisogno di energia

4.2.4 Prestazione di un Roof Pond psicometrico

In questo studio, condotto nel clima arido di Negev Highlands del sud d'Israele, è stato testato il comportamento di un laghetto con comportamento psicometrico che mantiene la temperatura vicino alla temperatura di bulbo umido attraverso un sistema che garantisce un'ombreggiatura elevata che massimizza l'evaporazione.

L'analisi confronta le prestazioni del laghetto psicometrico con le prestazioni di una copertura di controllo in condizioni di caldo secco.

La configurazione di tetto analizzata è stata progettata per migliorare le prestazioni dei sistemi a tetto:

- Riducendo l'esposizione solare mediante un dispositivo di ombreggiamento leggero;
- Massimizzando la ventilazione naturale, realizzando un'intercapedine d'aria alta tra il laghetto e il sistema di ombreggiamento;
- Riducendo le radiazioni attraverso il serbatoio.

La nuova configurazione di roof pond prevede una struttura:

- con ombreggiatura leggera elevata che elimini i carichi radianti sul tetto bagnato durante il giorno;
- che consente un flusso d'aria che massimizzi l'evaporazione;

questo schema integrato ad uno strato d'acqua permette di raggiungere passivamente la depressione di temperatura massima e quindi di massimizzare l'effetto di raffreddamento interno.

Il clima di Israele caldo secco è caratterizzato da grosse fluttuazioni diurne da un massimo di 32°C e 18°C, l'umidità durante il giorno è molto bassa e raggiunge un valore del 30% a metà pomeriggio.

L'installazione sperimentale consiste sulla realizzazione di due celle di prova con tetti piani in calcestruzzo di 10 cm. Su una cella viene installato il roof pond psicometrico, sull'altra invece il tetto è stato tenuto asciutto.

Al fine di testare le capacità di raffreddamento del PRF, sono stati analizzati attraverso le termocoppie gli effetti sulla temperatura interna e sul flusso di calore che entra in ambiente.

La velocità di evaporazione viene testata attraverso un radiometro posta a 30 cm dalla superficie del tetto.

I pannelli di copertura sono stati mantenuti in posizione chiusa durante le ore del giorno, dalle 7:00 alle 17:00, mentre nelle ore notturne sono state studiate due configurazioni diverse:

apertura a 45° in modo che il tetto fosse semi esposto e totalmente aperto in modo da creare un'esposizioni totale.

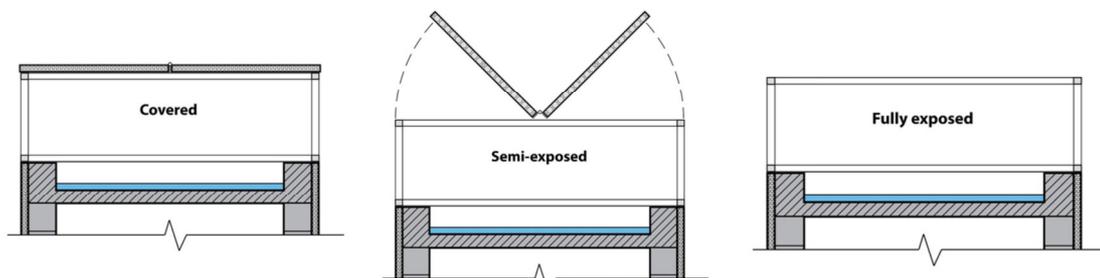


Figura 108 Schema funzionamento sistema psicometrico.

Osservando il ciclo giornaliero della temperatura interna del controsoffitto della cella di prova con il PRP e con il tetto a secco si nota come nel primo caso la temperatura di picco era di 25°C mentre nel secondo arrivi ad un picco di 40°C, inoltre la temperatura di picco si manifesta con un ritardo 1-2h.

Durante le ore notturne la temperatura di depressione era di circa 15°C rispetto ad un tetto secco. Un test ulteriore è stato effettuato rilevando la depressione ottenuta con un sistema privo di ombreggiatura, in questo caso ha assunto un valore di 30°C.

Mantenendo la stessa configurazione di riferimento sono state testate le differenti depressioni di temperatura oraria riferita alle diverse modalità di

funzionamento notturno, si nota che gli effetti sulla depressione di temperatura nelle ore notturne è meno evidente che nelle ore diurne in cui si raggiunge un picco di variazione di 15°C.

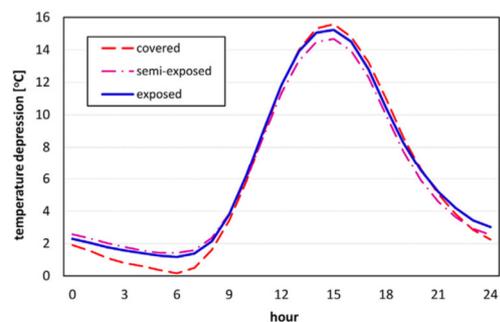
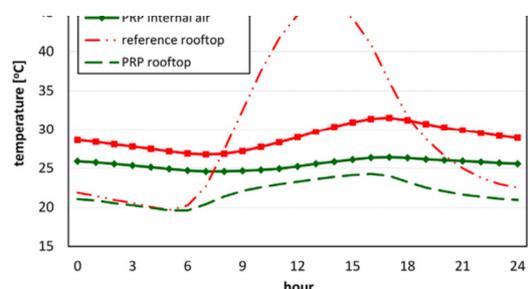


Figura 109 Grafico depressione di temperatura.



Confrontando anche i valori della temperatura interna in una cella con PRP e una cella di riferimento con tetto privo d'acqua, e le rispettive temperature superficiali superiori del tetto, si nota che le temperature interne del sistema con PRP sono sempre inferiori e che la differenza tra la temperatura superficiali del PRP è notevolmente

superiore alla temperatura del tetto della cella di riferimento. *Figura 110 Grafico andamento delle temperature nei sistemi*

Dal confronto del flusso di calore sensibile e latente che attraversa le due configurazioni di tetto, si riscontra una riduzione netta del flusso di calore che attraversa il PRP rispetto a quello che attraversa la cella di controllo.

Il tasso di evaporazione è stato stimato in funzione del quantitativo di acqua rifornita al roof pond e successivamente paragonata con una valutazione di bilancio energetico da cui sono stati ottenuti i risultati:

- 1mm con esposizione notturna completa (27% di energia di raffreddamento);
- 1,6 mm con copertura notturna;
- 1,5 mm con copertura aperta a 45°C.

Il raffreddamento giornaliero viene considerato come la differenza di flusso di calore sensibile attraverso il PRP e il tetto del sistema di controllo. Il calore latente equivalente viene confrontato per stimare il tasso di evaporazione. Dal rapporto di questi due parametri è stata individuata l'efficienza di raffreddamento del sistema.

Il PRP con sistema di copertura aperto di notte e chiuso di giorno, ha permesso di ottenere dei risultati migliori in termini di efficienza e di consumo di acqua.

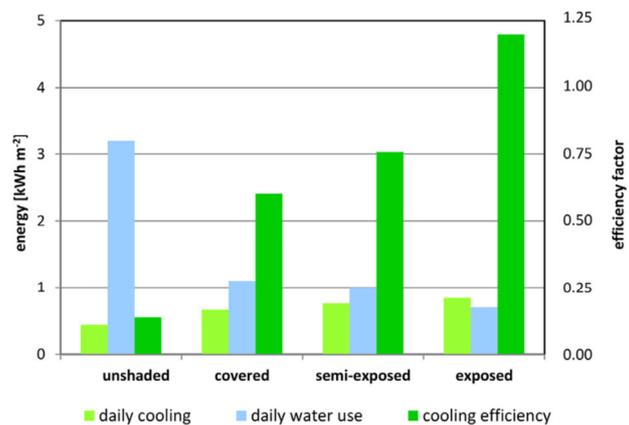


Figura 111 Confronto energia di raffreddamento.

4.2.5 Confronto prestazionale di sistemi solari passivi

lo studio presenta un confronto su cinque celle di prova solari passive e una cella di controllo per identificare gli ostacoli per il raggiungimento del comfort termico in uno spazio in cui le condizioni meteorologiche sono caratterizzate da inverni rigidi e cielo nuvoloso.

La ricerca confronta:

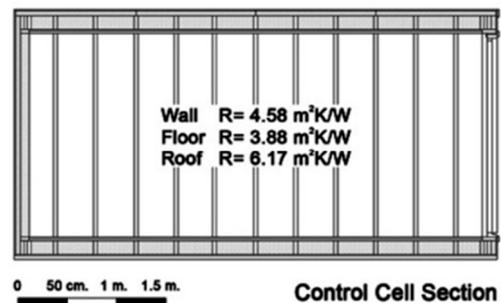
- una cella di confronto CC;
- un Direct Gain (DG);
- Trombe wall;
- Water wall,
- Sunspace (SS);
- Roof pond (RP);

le celle dei test presentano tutte le stesse caratteristiche, costruttive, di isolamento termico e dimensionali. L'obiettivo è di identificare delle barriere al raggiungimento del comfort, per tale ragione le facciate più grandi sono state ricolte a nord, mentre le altre a sud.

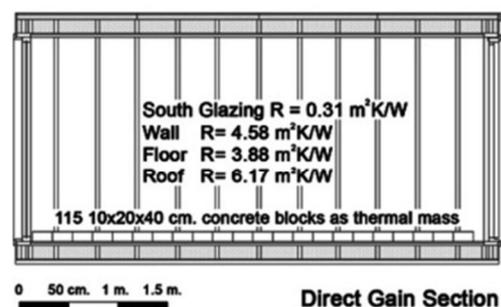
Il monitoraggio viene realizzato utilizzando delle attrezzature precedentemente calibrate prima dell'inizio degli esperimenti in un ambiente controllato per fare in modo che le misure fossero accurate. Nelle celle di prova i punti di misurazione erano quattro, due sensori interni e due sensori esterni, i primi due con la funzione di rilevare la temperatura dell'aria e l'umidità relativa, i secondi invece sono stati utilizzati per misurare la temperatura media radiante e quella a bulbo secco dell'aria, in modo da determinare la temperatura operativa (OT).

Con lo scopo di evidenziare le capacità di raggiungere comfort termico negli edifici, sono state valutate le variazioni di OT nello spazio e nelle ore giornaliere.

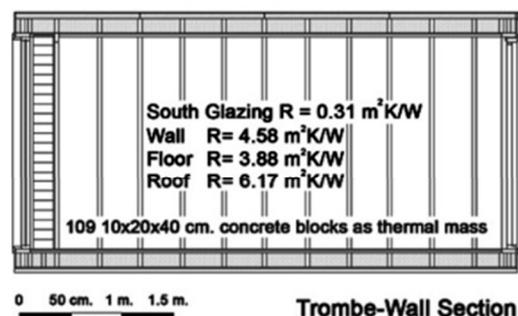
Nella cella di controllo (CC), in cui non era installato nessun sistema di riscaldamento o raffrescamento, le condizioni ambientali interne coincidevano con quelle esterne con delle attenuazioni previste. L'OT interna si discosta dalla temperatura dell'aria esterna di 2 °C, con delle oscillazioni tra i 2,26°C e i 2,41°C, che rientrano in un range accettabile per il raggiungimento del comfort termico-



Nella cella di guadagno diretto (DG), sono stati posizionati 115 blocchi di cemento con la funzione di accumulatori di guadagno termico. Questa configurazione presenta le oscillazioni di OT più elevata. Le oscillazioni elevate, non solo durante la giornata, ma anche tra il lato esposto a sud e quello esposto, creano un ambiente in cui è difficile raggiungere il benessere igrometrico. Per ridurre queste oscillazioni, causate dalla maggiore esposizione solare nelle ore giornaliere sul lato sud, è possibile aggiungere un isolamento notturno al collettore solare, mentre per ridurre le oscillazioni di OT, si può aumentare il rapporto tra l'area del collettore del solare e la massa termica.



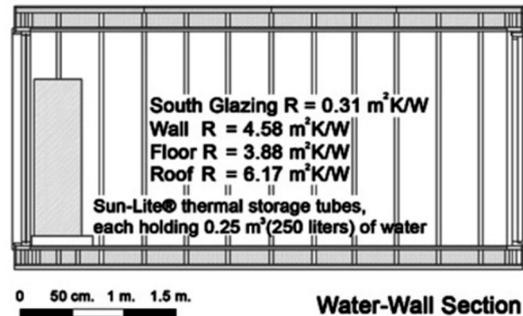
la cella di prova del Trombe wall ha dimostrato di avere una capacità di stoccaggio inferiore rispetto ai DG ma presentava variazioni di temperatura giornaliera inferiori,



le oscillazioni erano relativamente piccole di giorno con una variazione da 3,32 °C e 3,79°C, produce un ambiente stabile che consente di raggiungere le condizioni di comfort.

La cella di prova del Water wall, sfrutta i principi del guadagno diretto, attraverso la capacità dell'acqua di conservare energia termica. Il Water wall mostrava le caratteristiche prestazionali più simili a quelle trovate in una strategia di guadagni termico.

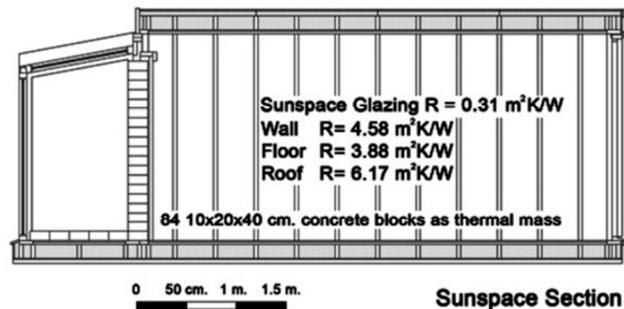
La cella di prova WW aveva l'oscillazione di temperatura più alta dopo il sistema DG, le differenze di temperatura riscontrate sono causate in parte la temperatura radiante più alta della parete e dalla radiazione solare che entra nel lato sud della cella di prova. La temperatura minima interna media mensile era quasi sempre superiore alla media mensile, dimostrando che l'acqua come mezzi di stoccaggio fosse efficace.



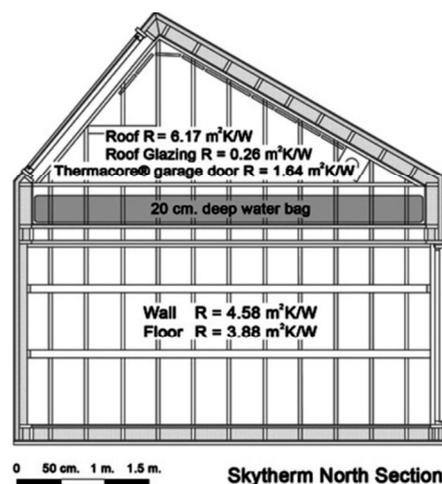
la cella con Sunspace (SS), presenta pareti in muratura ed era privo d'isolamento notturno.

I risultati mostrano un'oscillazione compresa tra i 5,28°C e i 5,74°C, delle perdite elevate di calore in fase notturna.

Le variazioni tra la parte sud e la parte nord variavano tra i 0,32°C e i 0,5°C, riportando quindi le prestazioni peggiori rispetto alle celle rilevate. Il sistema ha quindi riportato le capacità di stoccaggio peggiori, le maggiori perdite di calore e di guadagno, anche se la temperatura media rilevata risultava comunque sempre superiore rispetto alla media mensile esterna (6,7 °C).



La cella di prova del Roof Pond (RP), utilizza un laghetto a soffitto di 20 cm di profondità sotto un tetto a falda, isolato convenzionalmente sul lato nord e con vetri isolanti chiari. L'interno era provvisto da un isolamento mobile che nella stagione invernale resta aperto da 45 minuti dopo l'alba e chiuso 45 minuti prima del tramonto. Dai dati sperimentali si nota che i Roof sono la strategia di riscaldamento che comporta minori di oscillazioni di temperatura che varia tra 1,24°C e 1,44°C. ciò che rende il roof pond più efficiente è non solo la posizione, che consente raccogliere una radiazione solare maggiore, ma anche la sua capacità termica di accumulare calore.



Un ulteriore differenza sta nella mancanza di fluttuazioni di OT tra il lato sud e il lato nord della cella prova e valori di OT non eccessivamente elevati, per tale ragione è necessario incrementare i guadagni solari con una l'installazione di finestre a sud.



4.3 Confronti Critici tra i Sistemi ad Acqua

I risultati ottenuti dalle simulazioni e dai casi di laboratorio analizzati, evidenziano che i sistemi che utilizzano acqua al fine di ridurre carico di raffrescamento o di riscaldamento sono una strategia valida.

La modalità in cui l'acqua viene utilizzata nelle tecnologie è vario e cambia in relazione dell'obiettivo e delle condizioni climatiche a cui è esposto.

Le pareti ad acqua infatti possono sfruttare la capacità di accumulo di energia termica dell'acqua per riscaldare gli ambienti oppure ridurre la temperatura della parete di tamponamento attraverso un sistema di imbibizione di materiali con alte prestazioni di capillarità ed altamente porose.

Un riscontro immediato sui vantaggi risulta essere la capacità dell'acqua di distribuire velocemente il calore precedentemente stoccato.

A differenza di altre tipologie di sistemi passivi di riscaldamento infatti l'energia solare viene raccolta in modo quasi immediato, grazie alla sua caratterizzazione isoterma, le perdite di calore notturne vengono limitate.



Un aspetto molto importante per ottenere il comfort termico consiste nel riuscire a non creare in ambiente delle fluttuazioni di temperatura notevoli, le pareti ad acqua presentano delle oscillazioni temperature inferiori rispetto ad altri sistemi a sistemi a guadagno diretto.

Le capacità di accumulo termico consentono all'acqua di trattenere il calore assorbito dalle radiazioni solari per lunghe durante anche oltre le ore notturne.

Una caratteristica importante di queste pareti riguarda l'economicità di realizzazione e la possibilità di affiancare questa tecnologia ad edifici esistenti, permettendo al sistema di essere uno strumento per il retrofitting energetico.

Nel caso parete ad acqua con funzionamento di raffrescamento evaporativo, questa rappresenta una configurazione che svincola un tradizionale muro di Trombe dalle sole capacità di ridurre il carico riscaldamento, alla capacità di ridurre quello di raffrescamento nei periodi estivi

Nei transwall è molto importante ridurre le eventuali radiazioni solari che entrano in ambiente che possono creare il fenomeno dell'abbagliamento negli utenti, è importante prevedere già in fase di progetto uno studio sull'illuminazione dell'ambiente e sull'integrazione di sistemi di ombreggiamento. Un sistema integrato che consente mediante spruzzatura oppure imbibizione in acqua consente al muro di Trombe di ridurre la propria temperatura ed attivare un circolo di corrente fresca in ambiente.

Tra le problematiche più comuni che possono essere riscontrate su queste tecnologie di pareti è la difficoltosa gestione dell'acqua contenuta o fornita alla parete.

Una gestione non ottimale dell'acqua può indurre a delle problematiche legate ad un'umidità in ambiente elevate che può comportare l'insorgere di muffe.

L'isolamento in questi sistemi può comportare costi elevati a causa della sua difficoltosa messa in opera.

Nel caso di utilizzo del sistema per il riscaldamento, in zone climatiche con inverni particolarmente rigidi, si potrebbero verificare delle condizioni climatiche in cui la radiazione solare troppo poco

efficace non è sufficiente per riscaldare il muro, il quale perde la propria funzione di accumulatore termico trasformandosi in un carico.

Un altro limite di questi sistemi è l'ingombro elevato che hanno in pianta questi sistemi che comporta una riduzione degli spazi utilizzabili dall'utente per le sue attività.

Per quanto riguarda i sistemi orizzontali invece, i Roof pond sfruttano la capacità dell'acqua di assorbire calore che successivamente viene trasmesso in ambiente, invece in condizioni

invernali, l'evaporazione notturne consentiva all'acqua di ridurre la temperatura del tetto e conseguentemente ridurre il carico di raffrescamento.

Il posizionamento del Roof Pond è un elemento che gli conferisce un'esposizione solare migliore che a sua volta comporta un'efficienza migliore del sistema in entrambe le configurazioni (invernali, estive).

Questo sistema ha dei riscontri ottimali soprattutto in zone aride e calde, infatti le sue prestazioni sono migliori nelle stagioni estive, quando è installato nella configurazione di raffrescamento.



Inoltre in queste zone la temperatura invernale resta sempre al di sotto della temperatura di congelamento, requisito fondamentale per il funzionamento dei Roof Pond.

Tra i vantaggi più evidenti riscontrati dall'utilizzo di queste tecnologie è la stabilità del microclima interno, le temperature risultano avere le oscillazioni più piccole rispetto agli altri sistemi passivi.

Attraverso questi sistemi la temperatura può essere ridotta anche di 10/13 °C in zone climatiche aride e secche come Turchia o Messico.

Tra i problemi più evidenti sull'utilizzo di questa tecnologia è sicuramente la sua efficacia in edifici mono piano in quanto l'effetto di raffrescamento significativo si percepisce solo nel piano sottostante al sistema.

I carichi che questa strategia impone sulla struttura sono elevati a causa della pesante massa d'acqua che il soffitto impone, inoltre in zona sismica risulta essere poco funzionale.

Il sistema non adatto alle latitudini elevate a causa della bassa angolazione dei raggi solari in inverno a queste altezze, per tale ragione in queste zone è consigliabile installarlo in posizione inclinata.

Anche la neve può rappresentare un problema per il buon funzionamento dei tetti ad acqua per tale ragione è poco consigliabile installarlo in zone climatiche in cui la neve è frequente.

Per queste ragioni sia i sistemi verticali che i tetti necessitano di una progettazione accurata e studiata preliminarmente in funzione non solo delle necessità abitative ma anche delle condizioni climatiche esterne in cui vengono adoperati.

Integrando in un edificio entrambe le tecnologie potrebbero essere ridotti i limiti di uno e dell'altro sistema.



Casi di Studio: Partizione Verticale in Calcestruzzo Aerato e Roof Pond

In questo studio analizzeremo due casi, in un primo momento ci soffermeremo su un particolare sistema di partizione verticale composto da un calcestruzzo aerato che grazie alle sue capacità di trattenere acqua, sfrutta il principio del raffreddamento evaporativo per ridurre la sua temperatura superficiale e conseguentemente la temperatura dell'ambiente.

Dalla trattazione sperimentale in laboratorio seguirà l'elaborazione dei dati che esplicherà in che termini il sistema è in grado di ridurre il carico di raffreddamento di un impianto.

In secondo momento ci soffermeremo sulle capacità di raffreddamento passivo di un sistema di copertura ad acqua (Roof Pond). L'analisi del suo comportamento verrà studiata attraverso il programma di calcolo Energy Plus, effettuando un confronto prestazionale tra un sistema di copertura tradizionale e un sistema evapotraspirativo installati in un ambiente dalle medesime caratteristiche.

5.1 Descrizione dell'Idea e dei Principi di Funzionamento della Partizione Verticale in Calcestruzzo Aerato.

La partizione verticale analizzata è costituita da una parete di altezza 1m, larghezza 1,5 e spessore di 20 cm il cui materiale di costruzione è un particolare calcestruzzo poroso le cui caratteristiche compositive permettono al sistema di trattenere l'acqua che gli viene somministrata attraverso un sistema di irrorazione. Il materiale consente inoltre al sistema di avere un buon effetto di traspirazione.

Gli elementi che compongono questa parete sono:

- Muro il calcestruzzo aerato;
- Pannello di vetro;
- Sistema d'irrorazione;
- Canaletta di raccolta dell'acqua.

Il muro in calcestruzzo aerato è l'elemento di maggiore rilievo nel sistema, è costituito da un calcestruzzo le cui proprietà consente alla tecnologia di trattenere l'acqua e di avere delle buone capacità di traspirazione.

Il sistema d'irrorazione consentirà al sistema di essere imbevuto d'acqua attraverso degli ugelli che spuzzano acqua dall'alto.

La parete di vetro installata anteriormente alla superficie esterna della partizione consentirà la realizzazione di un effetto di evaporazione dell'acqua contenuta all'interno della parete.

Per raccogliere l'acqua in eccesso dovuta all'imbibizione del muro viene installato un sistema di canaletta in metallo che funge da sistema di raccolta delle acque.

L'evaporazione consente al muro di ridurre la sua temperatura superficiale e conseguentemente al raffrescamento dell'ambiente in cui viene installata.

L'aria che attraversa la parete inoltre subirà una riduzione di temperatura legata alla riduzione della temperatura superficiale del sistema.

In vista della progettazione ecosostenibile e della realizzazione di edifici Zero Energy Buildings, lo scopo di questo sistema è quello di riuscire a ridurre il più possibile la temperatura dell'ambiente riducendo il carico di raffrescamento di un impianto, attraverso un sistema che sfrutta le proprietà evaporative dell'acqua.

L'idea si fonda anche sullo sfruttamento dell'acqua piovana convogliata in un serbatoio di raccolta delle acque meteoriche che verranno pompate al sistema d'irrigazione posto superiormente al sistema di partizione analizzato.

5.2 Progetto e Taratura di un Sistema Sperimentale per l'Analisi delle Prestazioni.

Lo studio della parete ad acqua verrà svolto sul tetto del dipartimento di ingegneria energetica (DENERG) del Politecnico di Torino.

La parete di riferimento sarà installata a ridosso di una cella di prova "TWINS" che permette di valutare, in condizioni controllate, le sue prestazioni.

La cella di prova TWINS rappresenta lo spazio di prova sul quale verrà testato il funzionamento, ha una pianta rettangolare e le sue dimensioni sono:

- Lunghezza 3,6 m;
- Larghezza 1,6 m;
- Altezza 2,5 m.

La cella è costituita da quattro facciate di cui tre sono opache ed una è trasparente.

Il muro sarà posizionato proprio a ridosso di quest'ultima. *Figura 112 Foto TWINS*



La definizione dei flussi che attraversano la parete e la misura delle temperature superficiali interne ed esterne saranno rilevate mediante un sistema termocoppie e termo flussimetri collegati ad un DataTaker che traduce il segnale elettrico in informazioni in termini di flusso che lo attraversa e di temperature.

Il progetto prevede l'installazione di:

- ventidue sensori per il rilevamento della temperatura superficiale;
- due sensori, uno per misurare la temperatura interna e uno per la temperatura esterna;

- tre termo flussimetri posizionati in dei punti significativi del modulo analizzato.

I sensori che saranno utilizzati per rilevare le temperature sono delle termocoppie, in particolare, come si può vedere nelle figure, l'installazione prevede il posizionamento di undici termocoppie sul lato interno della parete e altre undici termocoppie sul lato esterno del modulo.

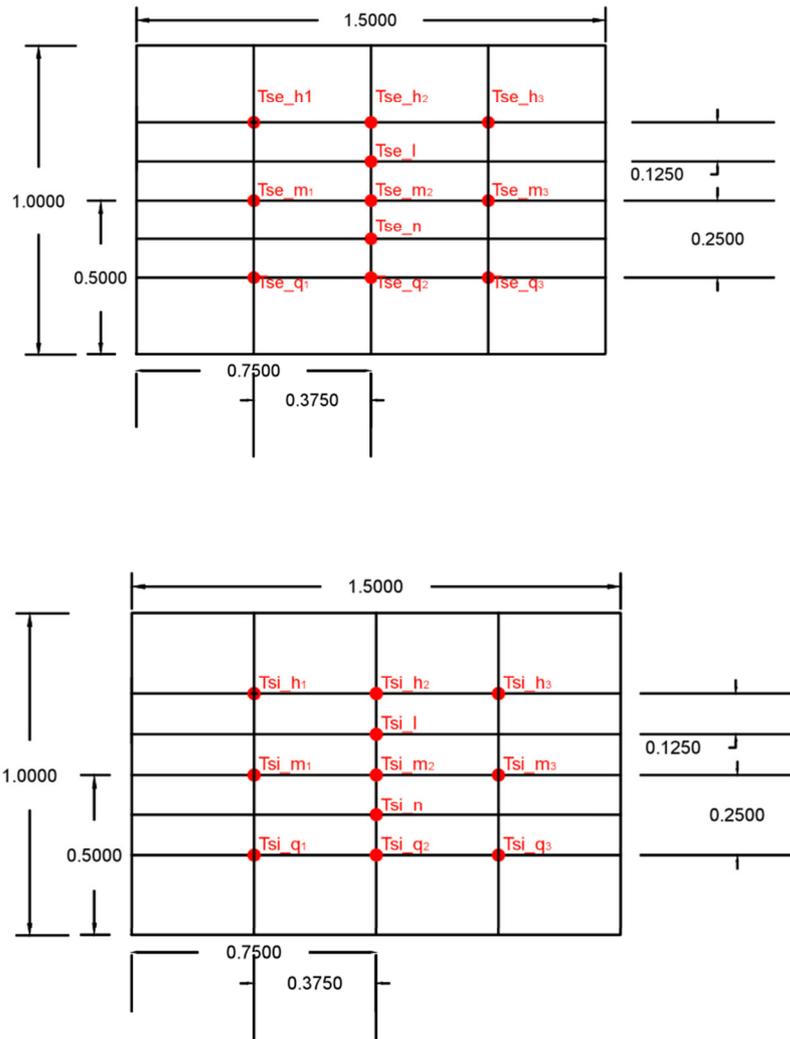


Figura 113 Schemi di posizionamento delle termocoppie sul lato interno e sul lato esterno della parete

Dallo schema si nota come il posizionamento delle termocoppie sia stato scelto suddividendo in assi il modulo, in modo da essere posizionati in maniera equidistante gli uni dagli altri. Nella porzione centrale del muro, l'installazione prevede un numero maggiore di termocoppie a causa dei maggiori variazioni di temperatura che potrebbero riscontrarsi a causa della maggiore umidità caratterizzante questi punti.

Il posizionamento delle termocoppie nella superficie interna è identico a quello della superficie esterne per effettuare un confronto superficiale sui punti di uguale coordinate.

Dalla sezione si nota che il muro verrà installato a ridosso della parete di vetro della Twins e nella parte interna di essa verranno posizionati tre termoflussimetri sull'asse centrale in modo da rilevare il flusso di calore che attraversa il sistema.

I punti in rappresentano invece dei sensori che rileveranno la quantità d'acqua che verrà somministrata al muro e il quantitativo d'acqua che verrà rilasciato da esso, per tale ragione, uno verrà posizionato in corrispondenza del sistema d'irrorazione, l'altro invece verrà installato in corrispondenza della canaletta di raccolta dell'acqua.

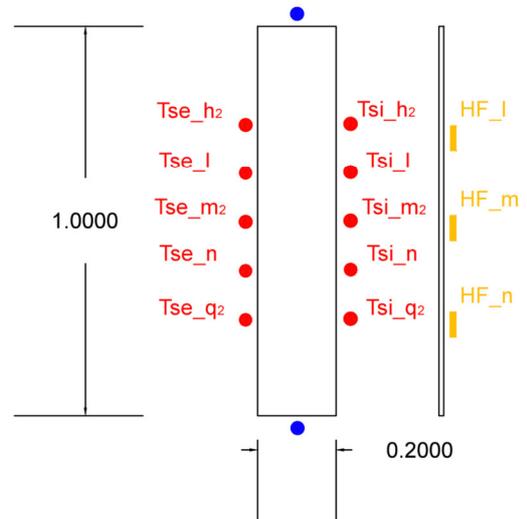


Figura 114 Sezione con indicazione del posizionamento dei sensori

Il modulo di parete sarà installato secondo la configurazione riportata sotto:



Figura 115 Vista tridimensionale dello schema d'installazione della parete

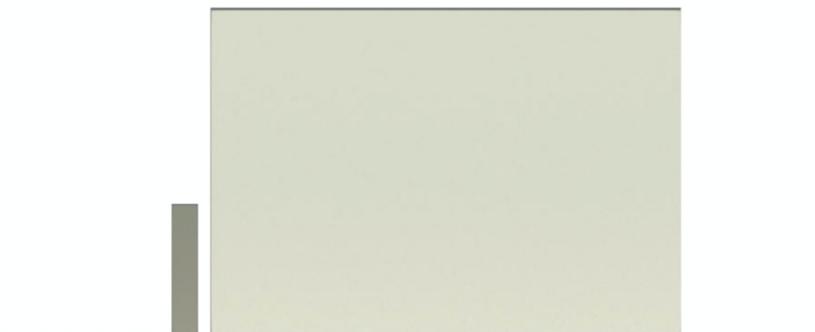


Figura 116 Vista laterale

Ogni termocoppia e ogni termo flussimetro saranno collegati ad un DataTaker secondo lo schema:

Codice	Porta	Lunghezza [cm]	Descrizione
Tsi_h ₁	9+	3m	Temperatura superficiale interna
Tsi_h ₂	9+	2,5m	Temperatura superficiale interna
Tsi_h ₃	9 -	2m	Temperatura superficiale interna
Tsi_l	7+	2,3m	Temperatura superficiale interna
Tsi_m ₁	2+	2,5m	Temperatura superficiale interna
Tsi_m ₂	2 -	2m	Temperatura superficiale interna
Tsi_m ₃	2*	1,5m	Temperatura superficiale interna
Tsi_n	7*	1,8m	Temperatura superficiale interna
Tsi_q ₁	3+	2m	Temperatura superficiale interna
Tsi_q ₂	3*	1,5m	Temperatura superficiale interna
Tsi_q ₃	3-	1m	Temperatura superficiale interna
Tse_h ₁	4+	3,3m	Temperatura superficiale interna
Tse_h ₂	4*	2,8m	Temperatura superficiale interna
Tse_h ₃	4-	2,3m	Temperatura superficiale interna
Tse_l	8+	2,5m	Temperatura superficiale interna
Tse_m ₁	5+	2,5m	Temperatura superficiale interna
Tse_m ₂	5*	2,3m	Temperatura superficiale interna
Tse_m ₃	5 -	1,8m	Temperatura superficiale interna
Tse_n	8*	2,1m	Temperatura superficiale interna
Tse_q ₁	6+	2,3m	Temperatura superficiale interna
Tse_q ₂	6*	1,8m	Temperatura superficiale interna
Tse_q ₃	6 -	1,3m	Temperatura superficiale interna
Ti	7-	1,5m	Temperatura superficiale interna
Te	8 -	3m	Termoflussimetro
HF_l	10+	3m	Termoflussimetro
HF_m	10*	2m	Termoflussimetro
HF_n	10-	1m	Termoflussimetro

Nello schema è indicata la porta del DataTaker alla quale ogni termocoppia viene installata, la loro lunghezza e il dato che rilevano.

Dal Data Taker verranno monitorati i dati di:

- incidenza della radiazione solare;
- temperatura esterna;
- umidità relativa;
- temperature superficiali;
- velocità del vento;
- variazione del quantitativo d'acqua.



il monitoraggio avverrà con un intervallo di 15 minuti e la variazione di contenuto d'acqua sarà attivata dalle 8:00 alle 20:00.

5.2.1 Calibrazione dello Strumento

Al fine valutare l'indice di errore di misurazione delle termocoppie adoperate e il coefficiente correttivo per ottenere delle misure più veritiere è stata effettuata la calibrazione delle apparecchiature.

Per la calibrazione sono state utilizzate delle termocoppie di tipo TJ, queste termocoppie sono caratterizzate da due cavi il primo in ferro (F_e), il secondo in costantana (C_u-N_i), sono altamente sensibili con una sensibilità di $51,7 \mu V/^\circ C$ la loro capacità di misurazione consente di rilevare un range di misurazione compreso tra $-40^\circ C$ e $750^\circ C$.



La taratura delle termocoppie è stata effettuata per un range di temperatura compreso tra $0^\circ C$ e $60^\circ C$.

Al fine di calibrare lo strumento, gli strumenti adoperati sono stati:

- una resistenza Pt 100;
- un bagno termostatico
- un secchio pieno di ghiaccio.

La Pt 100 è una termoresistenza al platino con resistenza nominale pari a circa 100Ω alla temperatura di $0^\circ C$. È un sensore di temperatura che sfrutta la variazione di resistività del platino al variare della temperatura. Rispetto ad altre termoresistenze ha una curva di calibrazione quasi lineare, è molto stabile, duratura e con una precisione ottima.

La relazione che lega resistività e temperatura è:

$$\rho(T) = \rho_0 \cdot [1 + \alpha(T - T_0)]$$

noto il legame resistività e resistenza:

$$R(T) = [1 + \alpha(T - T_0)]$$

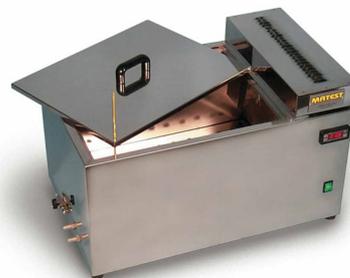
la temperatura può essere rilevata dalla relazione:

$$R(T) = R_0 \cdot [1 + \alpha(T - T_0)]$$



Il bagno termostatico è un contenitore metallico dotato di un sistema di piastre integrato che consente di portare in maniera automatica la temperatura dell'acqua contenuta al suo interno alla temperatura desiderata.

La taratura dello strumento è stata effettuata effettuando un'interpolazione tra le misure rilevate dalle termocoppie e le misure ottenute dalla resistenza Pt 100.



Le temperature misurate dalle termocoppie e dalla Pt 100 sono state effettuate alle temperature di 0°C, immergendo i due sensori di temperatura in un secchio pieno di ghiaccio, alle temperature di 30°C e 60°C, immergendo i sensori nel bagno termostatico portato prima alla temperatura di 30°C e poi alla temperatura di 60°C.



Figura 117 Termocoppie immerse nel ghiaccio e nel bagno termostatico

Per tutte e tre le temperature sono state effettuate 10 misurazioni con un intervallo di 30 s l'una dall'altra.

Sapendo che i valori misurati dalla resistenza Pt100 corrispondenti alle temperature di 0°C, 30°C e 60°C sono rispettivamente:

- 100,039 Ω
- 111,744 Ω
- 123,338 Ω

Riportando in una tabella riepilogativa di tutte le misure effettuate, mediante un'interpolazione dei risultati sono stati calcolati i valori di m e di q della retta di calibrazione delle termocoppie che rappresentano i fattori correttivi dei sensori.



Capitolo 5

Casi di Studio: Partizione Verticale in Calcestruzzo Aerato e Roof Pond

Ora	Pt100	2*	2+	2-	3*	3-	4*	4+	4-	5*	5+	5-	6*	6+	6-
17:01:00	0,073979592	0,415564	0,66249	0,52992	0,24484	0,43937	0,51651	0,64848	0,34535	0,32501	0,18185	0,25825	0,63131	0,46754	0,74579
17:01:30	0,076530612	0,444886	0,66394	0,48963	0,23589	0,36427	0,43088	0,53513	0,2597	0,2151	0,05444	0,11352	0,5389	0,37151	0,64631
17:02:00	0,084183673	0,421152	0,61595	0,45551	0,11812	0,7443	0,57091	0,57061	0,30935	0,3306	0,10048	0,22557	0,6613	0,4766	0,71658
17:02:30	0,086734694	0,429532	0,66606	0,45349	0,12665	1,00315	0,57583	0,35977	0,2445	0,20667	-0,02693	0,22717	0,53394	0,42245	0,59285
17:03:00	0,084183673	0,400972	0,68631	0,4528	0,11194	1,11075	0,59246	0,43578	0,31358	0,30695	0,09085	0,29956	0,66914	0,45657	0,59909
17:03:30	0,079081633	0,397006	0,71338	0,42443	0,11491	1,15448	0,59543	0,43498	0,31639	0,33432	0,04845	0,2956	0,66141	0,43498	0,60537
17:04:00	0,073979592	0,469168	0,65342	0,55911	0,15228	1,18034	0,54917	0,50729	0,33643	0,37515	0,0929	0,6358	0,91446	0,46194	0,67059
17:04:30	0,099489796	0,457679	0,70113	0,52683	0,10597	1,04982	0,5761	0,5202	0,30052	0,33247	-0,10685	0,8013	0,75355	0,40871	0,63832
17:05:00	0,086734694	0,486571	0,78214	0,58691	0,19048	1,17265	0,73002	0,50013	0,41636	0,38562	-0,02217	0,70878	0,85835	0,4376	0,74011
17:05:30	0,079081633	0,423437	0,82988	0,4822	0,16923	1,16265	0,72264	0,49983	0,38125	0,28406	-0,07493	0,597	0,80262	0,48943	0,64913
17:23:00	30,09278351	30,47041	32,8651	31,2213	30,5501	30,3907	31,4867	31,2478	30,876	31,3108	29,7649	32,4279	30,8659	30,3307	31,3276
17:23:30	30,08505155	31,00846	32,7852	30,7695	30,9886	30,4835	31,357	31,8345	31,3804	31,2575	29,4681	32,875	31,3504	30,5998	31,8945
17:24:00	30,09278351	30,73563	32,9243	30,8687	30,9117	30,8022	31,8639	31,5488	30,9749	31,3997	29,591	32,9542	31,121	30,9714	31,4529
17:24:30	30,09278351	30,62111	32,1769	30,9036	30,4148	30,2787	31,6004	31,0262	31,1626	31,3085	29,5027	32,6207	31,0496	30,4615	31,4049
17:25:00	30,09793814	30,44771	32,7596	30,5974	30,4311	30,3348	32,173	31,3014	30,9596	31,3876	29,7788	32,5504	31,7291	30,2216	31,5734
17:25:30	30,09020619	30,07803	32,6661	30,7829	31,0186	30,128	31,6522	31,0219	31,5232	31,2442	29,4119	32,3745	31,6125	30,3273	31,6291
17:26:00	30,09278351	30,73394	32,3784	30,8802	30,704	30,5512	31,8751	31,109	30,9034	31,5139	29,909	31,7096	31,3877	30,6706	31,5041
17:26:30	30,07731959	30,7081	32,5085	30,4855	31,0933	30,7446	32,1543	31,266	30,9838	26,6057	62,3314	-2,12743	31,2162	30,9672	31,6109
17:27:00	30,09020619	30,7332	32,5568	31,2911	31,2977	30,5672	32,2322	31,2745	31,112	30,9856	29,1958	32,8755	31,2213	30,4908	31,9905
17:27:30	30,08762887	30,68407	33,0885	31,0162	31,0495	30,8635	31,4343	31,4211	30,9929	31,1622	29,603	32,481	31,6596	30,6442	31,8818
18:01:00	59,92727273	59,60893	63,7879	60,9799	59,9004	60,0944	61,1841	61,1276	62,2414	61,8846	56,7023	65,1278	60,9789	60,3247	62,3296
18:01:30	59,95324675	58,92591	63,8809	61,2408	60,4784	61,045	62,8654	60,2099	61,1682	61,7226	56,4564	64,8471	61,8109	60,0548	61,8558
18:02:00	59,95324675	58,56852	64,4834	60,7056	60,6035	59,8609	61,5161	61,1661	61,3593	61,2163	56,156	64,9557	61,2953	60,2906	61,8671
18:02:30	59,96363636	58,9656	63,9168	60,041	59,7868	60,6926	63,2801	60,4708	61,0212	61,3517	56,6901	64,5247	61,5282	60,0593	61,7848
18:03:00	59,95324675	59,44969	63,7423	60,4542	61,0127	60,0144	62,1038	60,2954	61,8558	61,7477	57,0638	64,1743	61,2305	59,8587	61,386
18:03:30	59,93766234	60,30845	63,605	60,0847	60,5615	59,6922	62,3153	60,2076	61,1909	61,619	57,5316	63,7088	61,5465	60,0841	62,0045
18:04:00	59,92727273	59,86604	63,8158	59,5945	60,8275	59,2013	62,4008	61,0362	60,7684	61,0674	58,7724	62,4647	62,4698	59,9644	61,7372
18:04:30	59,94545455	59,20149	63,6309	60,4879	60,2183	59,7823	61,8316	61,8728	61,2365	61,2987	60,1678	62,2231	62,3134	60,2818	61,8735
18:05:00	59,94545455	58,9791	63,8213	60,3428	60,1515	59,9409	62,9305	60,0012	60,8707	62,4202	57,4574	63,4461	61,885	60,0107	61,981
18:05:30	59,93246753	59,37876	62,9906	60,4185	59,7779	59,6272	62,8546	60,4946	61,4134	61,3614	57,3334	64,104	60,9669	60,1467	61,5205
	Y	X1	X2	X3	X4	X5	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15
m		1,0145	0,9490	0,9985	0,9945	1,0134	0,9693	0,9942	0,9814	0,9761	0,9781	0,8910	0,9828	1,0032	0,9785
q		-0,5580	-0,6882	-0,5200	-0,2399	-0,8523	-0,5564	-0,6146	-0,2923	-0,1204	0,5892	2,2858	-0,6322	-0,4322	-0,6591

Ora	Pt100	3-	7*	7+	7-	8*	8+	8-	9*	9+	9-
12:15:00	0,066326531	-0,52295	-0,27358	-0,39132	-0,38469	-0,45706	-0,45359	-0,35695	0,59824	-0,45012	-0,28428
12:15:30	0,071428571	-0,55001	-0,32506	-0,43225	-0,41521	-0,49121	-0,49121	-0,3736	0,46393	-0,48427	-0,31827
12:16:00	0,045127551	-0,53087	-0,30923	-0,40617	-0,3926	-0,46513	-0,46513	-0,35793	0,42445	-0,45472	-0,29913
12:16:30	0,063265306	-0,49876	-0,28406	-0,35673	-0,35356	-0,42955	-0,42955	-0,32582	0,40109	-0,41915	-0,27049
12:17:00	0,072959184	-0,55457	-0,3572	-0,42988	-0,41947	-0,47149	-0,48536	-0,38826	0,29709	-0,48189	-0,33625
12:17:30	0,074489796	-0,54614	-0,33129	-0,42144	-0,41451	-0,46306	-0,46999	-0,3729	0,29166	-0,45959	-0,33144
12:18:00	0,075510204	-0,51773	-0,32368	-0,39997	-0,38263	-0,44505	-0,45199	-0,34796	0,28539	-0,43465	-0,31328
12:18:30	0,061734694	-0,50296	-0,28812	-0,37481	-0,36425	-0,41642	-0,4232	-0,31933	0,29683	-0,41642	-0,29159
12:19:00	0,055357143	-0,61697	-0,39864	-0,48865	-0,46814	-0,5268	-0,53027	-0,40934	0,15878	-0,51986	-0,39532
12:19:30	0,062244898	-0,62244	-0,4041	-0,47331	-0,46321	-0,51146	-0,53226	-0,40079	0,16041	-0,52533	-0,40079
12:05:30	29,45876289	29,62136	29,674	29,618	29,7767	29,7236	29,7139	29,4757	29,5019	29,7073	29,6312
12:06:00	29,46907216	29,48101	29,4578	29,5538	29,5277	29,6729	29,6002	29,4947	29,3586	29,5803	29,584
12:06:30	29,44329897	29,48629	29,6086	29,6087	29,738	29,7542	29,6087	29,3906	29,4233	29,4299	29,5693
12:07:00	29,44845361	29,50097	29,9306	28,9571	28,4886	29,8185	29,5076	29,3953	29,4611	29,5835	29,5741
12:07:30	29,47680412	29,4591	29,5011	28,3077	32,8629	29,3964	25,1383	26,1733	29,4623	29,4657	29,6514
12:08:00	29,46391753	29,47036	29,7885	28,6265	30,8063	29,9284	27,4054	27,4952	29,4437	29,5233	29,7554
12:08:30	29,4742268	29,63333	29,9361	27,6546	29,0564	29,7346	27,4061	27,3996	29,4179	29,5009	29,5474
12:09:00	29,46649485	29,24741	29,4406	29,2792	28,66	29,8608	29,5467	29,3401	29,5795	29,5897	29,5767
12:09:30	29,47164948	29,3281	29,6206	29,5712	29,5119	29,6768	29,6838	29,4174	29,6008	29,5712	29,5649
12:10:00	29,49742268	29,22629	28,8273	27,5464	33,38757	29,6111	29,6245	29,2332	29,4918	29,5186	29,5684
11:48:30	59,19480519	59,52832	60,118	59,7886	59,1996	60,3413	59,8924	58,807	59,3674	59,1989	60,4182
11:49:00	59,34545455	59,4004	60,1093	59,7073	59,1971	60,4206	60,0095	58,8107	59,2898	59,231	60,334
11:49:30	59,34545455	59,61353	60,1718	59,7169	59,2848	60,4328	59,8201	58,8294	59,3962	59,237	60,3839
11:50:00	59,34285714	59,52647	60,2635	59,7427	59,4079	60,4553	59,8679	58,8584	59,331	59,3161	60,3938
11:50:30	59,34805195	59,17462	60,1451	59,6108	59,433	60,4186	59,8584	58,9086	59,2284	59,2938	60,2274
11:51:00	59,32987013	59,54147	60,1983	59,6262	59,2351	60,5315	59,8392	58,7826	59,3318	59,3847	60,3402
11:51:30	59,3012987	59,50048	60,2575	59,7606	59,3476	60,4335	59,8266	58,7256	59,3503	59,3215	60,3491
11:52:00	59,27012987	59,57109	60,1112	59,706	59,3055	60,3723	59,8473	58,8782	59,3519	59,3484	60,2721
11:52:30	59,26753247	59,52894	60,1852	59,7516	59,3072	60,4712	59,8866	58,9396	59,272	59,3752	60,3649
11:53:00	59,32987013	59,50347	60,1531	59,6918	59,379	60,4803	59,8423	58,782	59,3628	59,4156	60,3393
	Y	X1	X2	X3	X4	X5	X7	X8	X9	X10	X11
m		0,9868	0,9791	0,9848	0,9904	0,9727	0,9803	1,0000	1,0042	0,9910	0,9765
q		0,5399	0,4282	0,6715	0,2029	0,5336	0,8178	0,5651	-0,2263	0,4122	0,4416

Per le ventiquattro termocoppie sono state rilevate ventiquattro rette di calibrazioni.

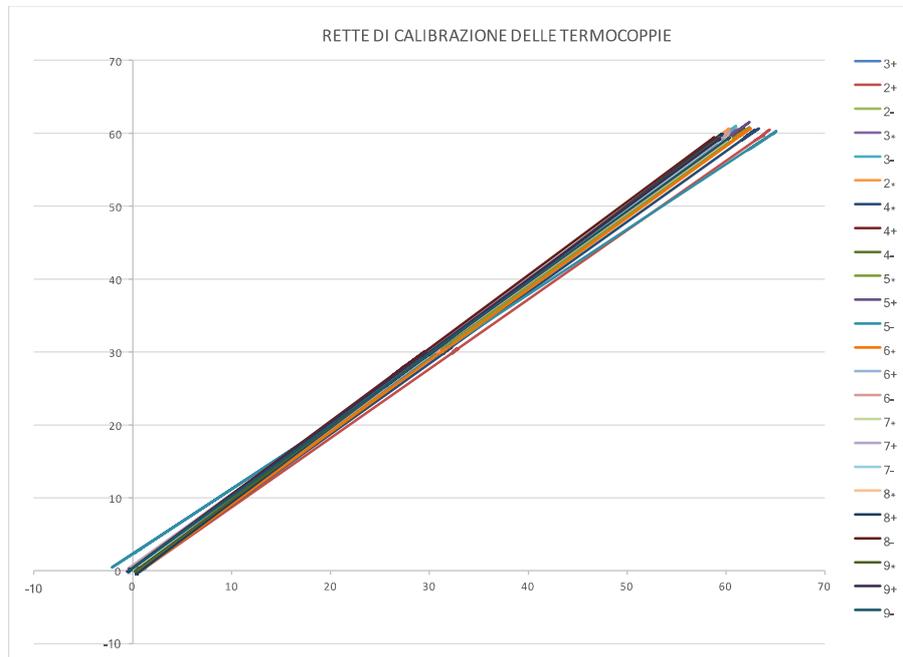


Figura 118 Grafico rette di calibrazione

5.3 Descrizione di un modello di Simulazione Sperimentale per l'Analisi Prestazionale di un Roof Pond

Dalle analisi sperimentali riportate in letteratura e dai risultati ottenuti in alcuni edifici esistenti, l'utilizzo di un sistema di copertura ad acqua sembra essere un buono strumento, in regime estivo, per ridurre il carico termico di raffrescamento dell'impianto.

In questo studio è stata effettuata un'analisi di simulazione sperimentale con Energy Plus che compara il comportamento di tre ambienti dalle medesime caratteristiche ma con tre sistemi di copertura differenti:

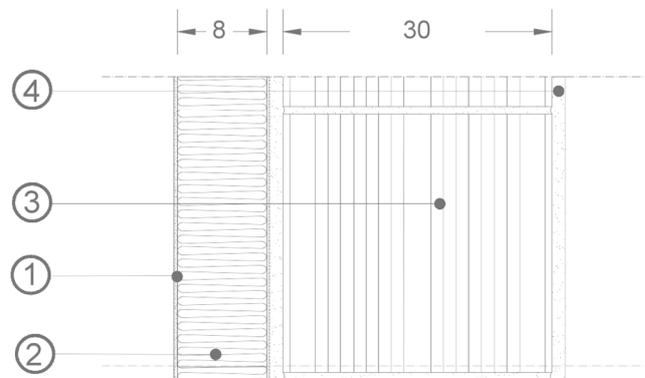
- Copertura piana tradizionale;
- Cool roof;
- Sistema di copertura ad acqua.

La simulazione è stata effettuata ipotizzando un ambiente di un edificio residenziale di Torino dalle dimensioni in pianta di 5m x 5m ed altezza di 2,7m, composte da due pareti adiabatiche, sul lato nord e sul lato ovest e due pareti esterne una sul lato sud e l'altra sul lato est.

La stratigrafia delle pareti prevede l'utilizzo di un sistema a cappotto esterno con:

1. Uno strato d'intonaco esterno;
2. Uno strato d'isolamento termico;
3. Uno strato di muratura;
4. Uno strato d'intonaco interno.

Con una trasmittanza complessiva di



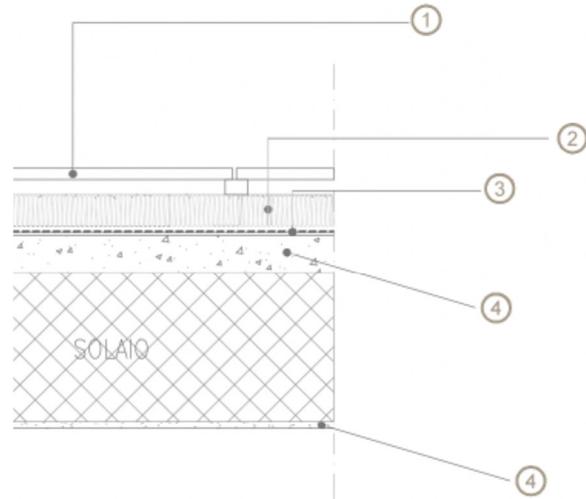
$$0,3 \frac{W}{m^2K}$$

Solamente la parete sul lato sud presenta una finestra triplo vetro, basso emissiva la cui trasmittanza è:

$$1,4 \frac{W}{m^2K}$$

Il solaio inferiore dell'ambiente analizzata è composto da:

1. uno strato di pavimentazione;
2. uno strato d'isolamento termico;
3. massetto;
4. solio in latero-cemento;
5. intonaco interno.



La sua trasmittanza complessiva è

$$0,32 \frac{W}{m^2K}$$

Al fine di analizzare l'andamento delle temperature all'interno dell'ambiente e il comfort ottenuto nei casi di studio, è stato ipotizzato che la stanza fungesse da soggiorno in modo da definire alcuni parametri relativi alla ventilazione e agli apporti interni.

In particolare considerando l'utilizzo abitativo dell'ambiente e stabilito che sia dotato di un sistema di ventilazione naturale è stato calcolato il numero di ricambi orari.

Dalla Norma UNI 10339 è stato scelto l'indice di affollamento n_s , che per soggiorni di abitazioni civili è 0,04.

A partire dall'indice di affollamento è stato determinato il numero di persone n_p come:

$$n_p = A \cdot n_s = 1$$

Dal prospetto III è stato scelto il valore di portata d'aria a persone Q_{op} pari a $11 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{s}$, dal quale è stata calcolata la portata d'aria oraria Q come:

$$Q = Q_{op} \cdot n_p = 39,6 \frac{m^3}{s}$$

Dividendo la portata per il volume dell'ambiente è stato trovato che il numero dei ricambi orari è:

$$n = ACH = \frac{Q}{V} = 0,58 \frac{1}{h}$$

Questo valore rappresenta il numero di volte l'ora in cui l'aria deve essere cambiata in ambiente attraverso un sistema di ventilazione naturale.

Dalla normativa UNI/TS 11300 (parte 1) sono stati valutati gli apporti globali in relazione alla superficie con un valore pari 12 W/m^2 .

Dal prospetto 14 dell'UNI/TS 11300 è stato definito l'andamento temporale degli apporti termici di apparecchiature e degli occupanti.

prospetto 14 **Profili temporali degli apporti termici dagli occupanti e dalle apparecchiature (edifici residenziali)**

Giorni	Ore	Soggiorno e cucina ($\Phi_{\text{int,Oc}} + \Phi_{\text{int,A}}$) / A_f [W/m ²]	Altre aree climatizzate (per esempio stanza da letto) ($\Phi_{\text{int,Oc}} + \Phi_{\text{int,A}}$) / A_f [W/m ²]
Lunedì – Venerdì	Dalle ore 07:00 alle ore 17:00	8,0	1,0
	Dalle ore 17:00 alle ore 23:00	20,0	1,0
	Dalle ore 23:00 alle ore 07:00	2,0	6,0
	Media	9,0	2,67
Sabato – Domenica	Dalle ore 07:00 alle ore 17:00	8,0	2,0
	Dalle ore 17:00 alle ore 23:00	20,0	4,0
	Dalle ore 23:00 alle ore 07:00	2,0	6,0
	Media	9,0	3,83
Media		9,0	3,0

($\Phi_{\text{int,Oc}} + \Phi_{\text{int,A}}$) è il flusso termico dalle persone e dalle apparecchiature, in W;
 A_f è la superficie utile di pavimento.

Figura 119 Prospetto 14 UNI/TS 11300.

Al fine di diminuire gli apporti solari nell'ambiente è stata considerata una schermatura posta sul lato esterno della finestra, la cui apertura è stata impostata in funzione dell'irradiazione solare incidente in particolare, nel modello, l'apertura è fissata a $300 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

Per l'analisi sono state considerate inoltre le condizioni climatiche di Torino.

Considerando l'ambiente come un'unica zona termica e definiti i carichi a cui è soggetto, tramite Energy plus sono state verificate le prestazioni delle tre configurazioni di riferimento, i cui risultati verranno riportati in seguito.

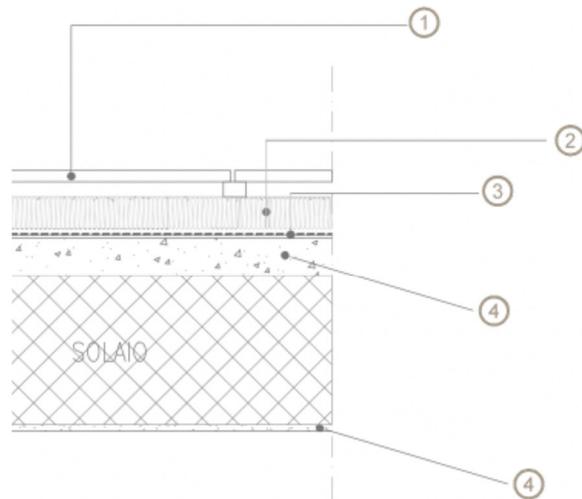
5.3.1 Descrizione e Analisi Prestazionale Del modello con Copertura tradizionale piana

Nella prima fase di analisi sono state studiate le prestazioni dell'ambiente quando la copertura è una classica copertura piana calpestabile.

La stratigrafia della copertura piana è composta da:

1. uno strato di pavimentazione;
2. uno strato d'isolamento termico;
3. impermeabilizzazione;
4. massetto;
5. solio in latero-cemento;
6. intonaco interno.

la cui trasmittanza è $0,32 \frac{W}{m^2K}$



Dalla simulazione attraverso il programma Energy Plus è stato rilevato l'andamento annuale della temperatura all'interno dell'ambiente impostando un Set-point pari a 26°C.

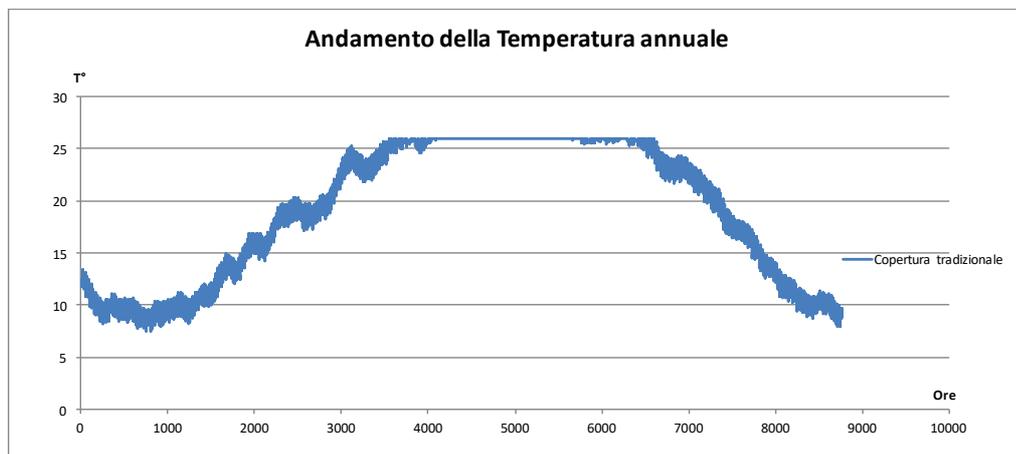


Figura 120 Andamento annuale della temperatura.

Come previsto l'andamento delle temperature è a campana, cresce nel periodo che intercorre tra l'autunno e l'estate, resta costante nel periodo estivo, a causa dell'attivazione del condizionamento e decresce nel periodo che intercorre tra l'estate e l'autunno.

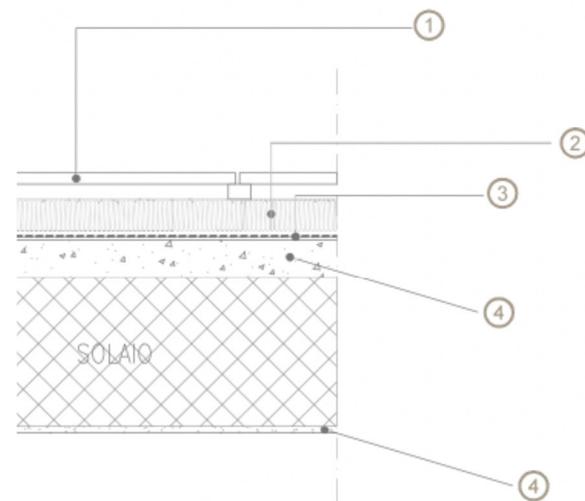
La stagione di raffrescamento, di questa configurazione, inizia a metà maggio e finisce a fine settembre.

5.3.2 Descrizione e Analisi Prestazionale Del modello con Cool Roof

In una seconda fase state studiate le prestazioni dell'ambiente quando la copertura è un sistema Cool Roof, questi sistemi hanno la caratteristica di avere come materiali di rivestimento della copertura, dei materiali con valori di emissività elevati. Questi tetti hanno la capacità di riflettere sull'irradiazione solare emettendo energia termica mantenendo basse le temperature interne.

La stratigrafia della copertura piana è composta da:

1. uno strato di pavimentazione con materiali ad alta emissività;
2. uno strato d'isolamento termico;
3. impermeabilizzazione;
4. massetto;
5. solio in latero-cemento;
6. intonaco interno.



La sua trasmittanza complessiva è

$$0,32 \frac{W}{m^2K}$$

Dalla simulazione attraverso il programma Energy Plus è stato rilevato l'andamento annuale della temperatura all'interno dell'ambiente impostando un Set-point pari a 26°C.

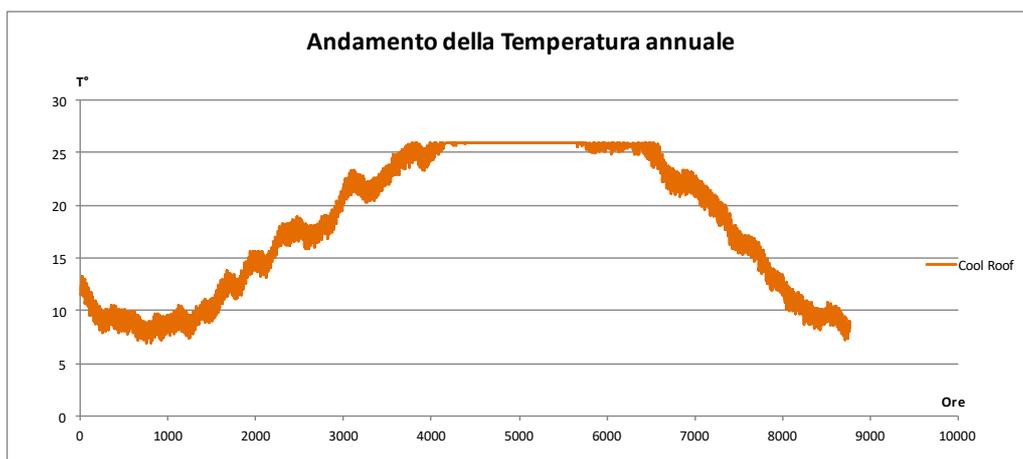


Figura 121 Andamento annuale della temperatura

Come previsto l'andamento delle temperature è a campana, cresce nel periodo che intercorre tra l'autunno e l'estate, resta costante nel periodo estivo, a causa dell'attivazione del condizionamento e decresce nel periodo che intercorre tra l'estate e l'autunno.

La stagione di raffrescamento, di questa configurazione, inizia a giugno e finisce a metà settembre.

5.3.3 Descrizione e Analisi Prestazionale Del modello con un Roof Pond

L'ultimo modello analizzato attraverso il programma di calcolo Energy Plus, è un sistema di copertura ad acqua Roof Pond.

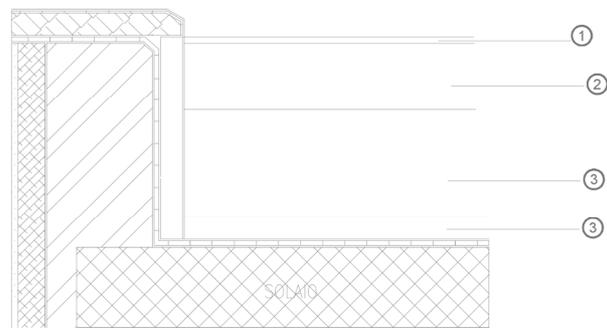
A causa dell'impossibilità di modellare lo strato d'acqua del Roof Pond, lo studio del suo comportamento è stato assimilato ad un tetto giardino il cui terreno viene mantenuto particolarmente umido. Questo è stato possibile grazie alla possibilità di simulare un'irrigazione continua del terreno ed un livello di saturazione molto alto.

Facendo un parallelismo tra un Roof Pond ombreggiato e un sistema di tetto verde, è possibile paragonare lo strato dell'acqua allo strato del terreno e la vegetazione all'ombreggiatura del sistema.

La stratigrafia del Roof Pond ombreggiato analizzato è composto da:

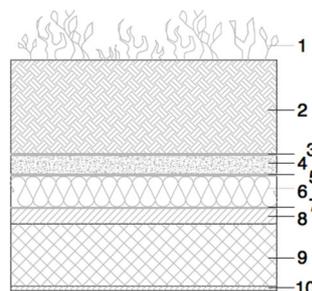
1. Copertura ombreggiante;
2. Intercapedine d'aria;
3. Acqua;
4. Struttura involucro contenete l'acqua;

Il sistema viene mantenuto da un solaio in latero cemento dalle caratteristiche uguali a quello utilizzato per la copertura tradizionale piana.



il Roof Pond viene studiato come un tetto verde composto da:

1. Strato di vegetazione;
2. Terreno;
3. Strato filtrante;
4. Strato di drenaggio;
5. Impermeabilizzazione;
6. Isolamento termico;





7. barriera al vapore;

8. strato di massetto;

La sua trasmittanza complessiva è

$$0,2 \frac{W}{m^2K}$$

Lo strato di suolo considerato (corrisponde allo strato d'acqua) presenta le seguenti caratteristiche

- Capacità termica assorbitiva 0,9;
- Saturazione $0,5 \frac{m^3}{m^3}$;

- Umidità volumetrica residua $0,01 \frac{m^3}{m^3}$;
- Volume iniziale di umidità contenuta $0,5 \frac{m^3}{m^3}$;

Lo strato di Vegetazione (corrispondente al sistema di ombreggiatura) presenta le seguenti caratteristiche:

- Altezza piante 50 cm;
- Fattore di riflessività 5;
- Emissività 0,95;

Per ottenere una simulazione del comportamento il più possibile veritiera e rendere l'acqua il più possibile assimilabile al terreno, è stato ipotizzato che l'irrigazione venga effettuata in tutte le ore del giorno.

Dalla simulazione attraverso il programma Energy Plus è stato rilevato l'andamento annuale della temperatura all'interno dell'ambiente impostando un Set-point pari a 26°C.

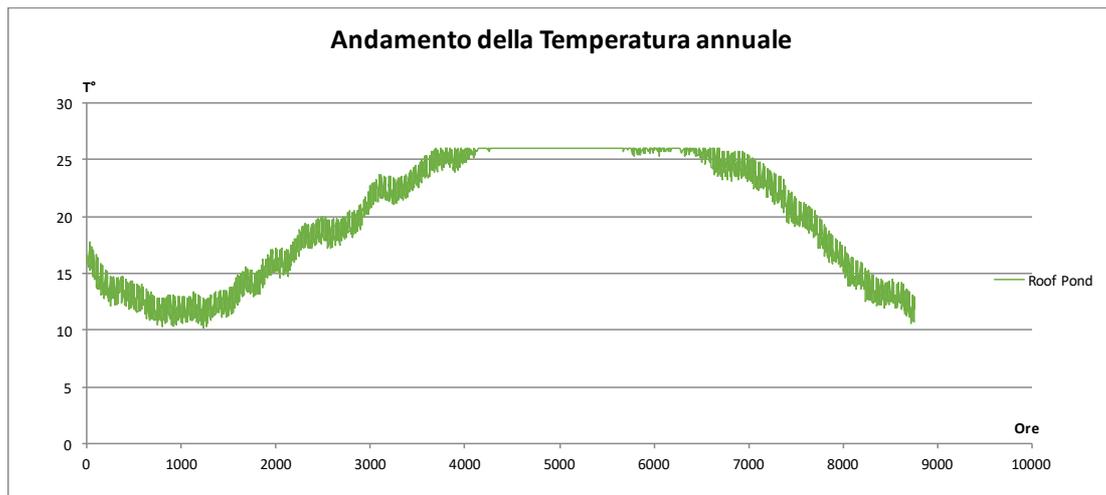


Figura 122 Andamento della temperatura annuale

Come previsto l'andamento delle temperature è a campana, cresce nel periodo che intercorre tra l'autunno e l'estate, resta costante nel periodo estivo, a causa dell'attivazione del condizionamento e decresce nel periodo che intercorre tra l'estate e l'autunno.

La stagione di raffrescamento, di questa configurazione, inizia a giugno e finisce a metà settembre.

5.3.4 Confronti Prestazionali fra i Tre Sistemi di Copertura

Da una prima analisi è stato constatato come l'andamento delle temperature sia simile in tutti e tre i modelli. Analizzato il comportamento dei tre sistemi nel periodo di raffrescamento si nota una riduzione del periodo di raffrescamento nei sistemi di Cool Roof e nel Roof Pond assimilato come un tetto giardino molto umido.

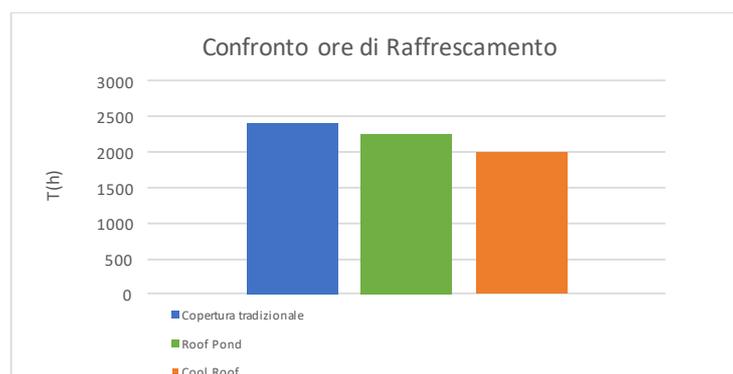


Figura 123 confronto ore di raffrescamento stagionale

Infatti le ore in cui il sistema di raffrescamento è attivo sono:

- 2403 ore per il sistema di copertura tradizionale;
- 2250 ore per il sistema di copertura roof pond;
- 1990 ore per il sistema di copertura cool roof.

Dal confronto delle temperature interne rilevate nei tre sistemi si è notato che nel periodo di raffrescamento la tecnologia di tetto giardino assimilata ad un roof pond, permette di ridurre la temperatura interna dell'ambiente rispetto al modello con copertura tradizionale di quasi 2°C.

Il sistema di copertura cool roof invece, consente all'ambiente di ridurre la temperatura di quasi 3°C in alcune ore del giorno.

Come si nota dai grafici riportati sotto, le prestazioni migliori sono state ottenute per entrambi i sistemi nel mese di luglio, inoltre i maggiori scostamenti di temperatura, rispetto alla copertura tradizionale, sono stati rilevati nelle prime ore del mattino e nelle ultime ore della notte, quando i sistemi, per evapotraspirazione rilasciano in ambiente il calore, diminuendo la loro temperatura superficiale ulteriormente.

I Grafici riportati sotto mostrano l'andamento della temperatura in tre giornate di riferimento del periodo di raffrescamento, una ad inizio stagione, una a metà stagione e una a fine stagione.

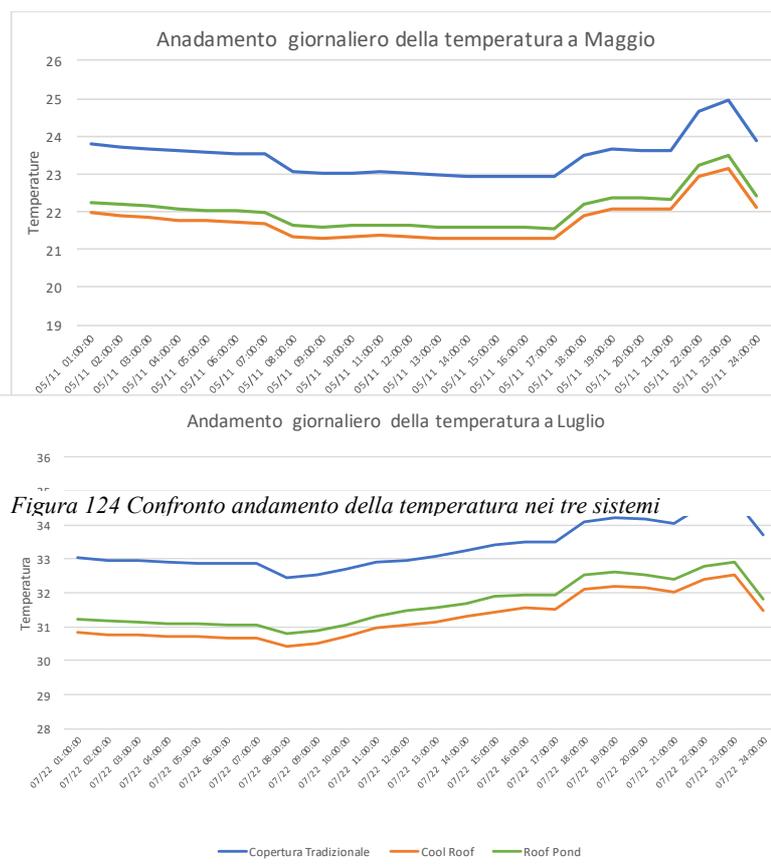


Figura 125 Confronto andamento della temperatura nei tre sistemi

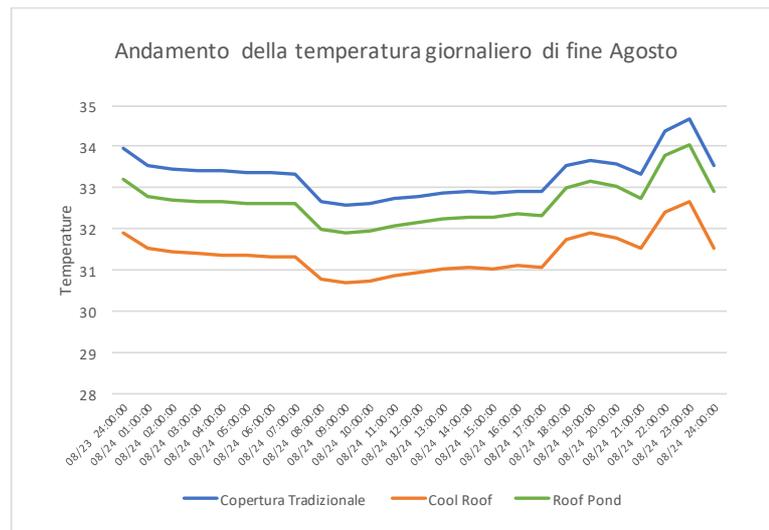


Figura 126 Confronto andamento della temperatura nei tre sistemi

Dai grafici riportati si nota che nei primi mesi estivi il comportamento del modello di tetto verde (assimilabile al Roof Pond), ha delle prestazioni molto simili al Cool Roof.

Nel mese di agosto invece, il Cool Roof risulta essere più prestante in maniera più evidente, questo può essere giustificato dalla capacità del Cool Roof di riflettere l'irradiazione solare.

Paragonando i consumi annui di energia totale e sensibile in tutti e tre i sistemi, come si intuisce dalle ore di raffrescamento stimate, i consumi maggiori sono stati ottenuti per la configurazione con copertura tradizionale, gli altri due sistemi invece hanno un comportamento molto simile anche se il sistema cool roof presenta dei consumi inferiori.

In particolare confrontando il consumo di energia totale a carico del sistema è stato constatato che in un anno solare:

- Il modello con copertura tradizionale consuma 450 kWh;
- Il modello con copertura Cool Roof consuma 312 kWh;
- Il modello con copertura Roof Pond consuma 335 kWh;

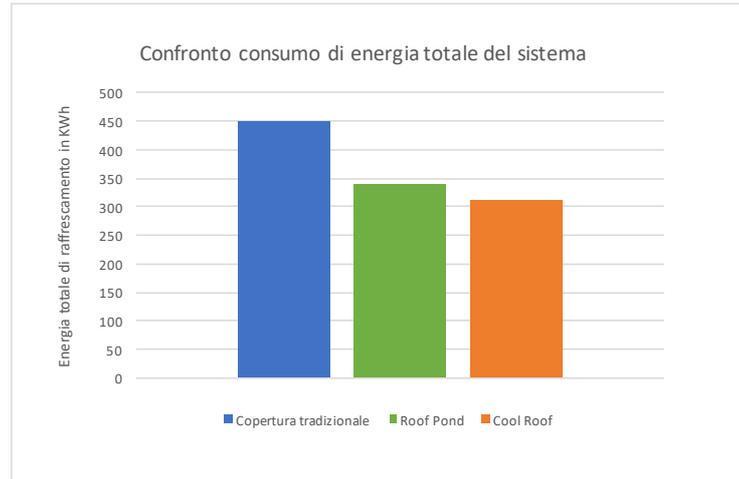


Figura 127 Confronto energia totale di raffreddamento

In particolare confrontando il consumo di energia sensibile a carico del sistema è stato constatato che in un anno solare:

- Il modello con copertura tradizionale consuma 350 kWh;
- Il modello con copertura Cool Roof consuma 230 kWh;
- Il modello con copertura Roof Pond consuma 253 kWh;

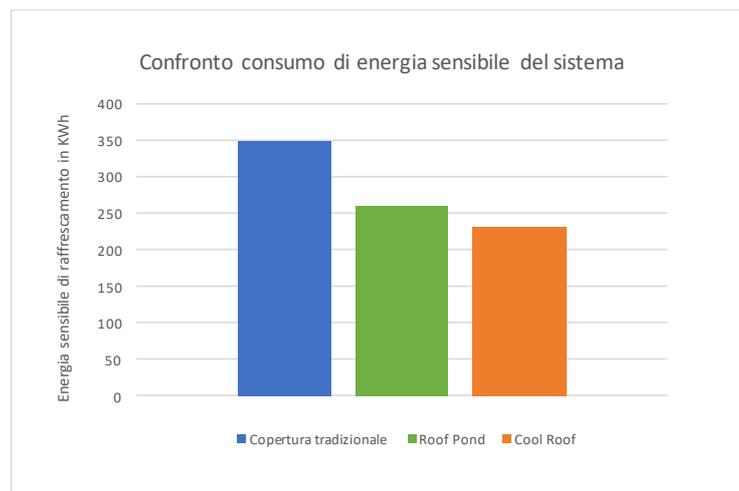


Figura 128 Confronto energia sensibile di raffreddamento

Da questo studio si è notato che in termini di raffreddamento il sistema cool roof ha dimostrato di essere più prestazionale, rispetto al sistema ad acqua analizzato.

Questo risultato non viene confermato se viene analizzato l'andamento della temperatura anche nella stagione di riscaldamento.

Osservando l'andamento della temperatura nei mesi compresi tra gennaio e aprile, si nota che il Cool Roof non apporta alcun beneficio in termini di riscaldamento, in alcuni casi ha delle prestazioni inferiori rispetto ad una copertura tradizionale.

Il tetto verde analizzato, assimilabile ad un roof pond, invece, nei mesi invernali risulta molto efficiente, infatti, la sua configurazione è in grado di creare una buona inerzia termica, riuscendo a ridurre la temperatura rispetto ad una copertura tradizionale anche di 4° C, in alcune ore dei mesi invernali.

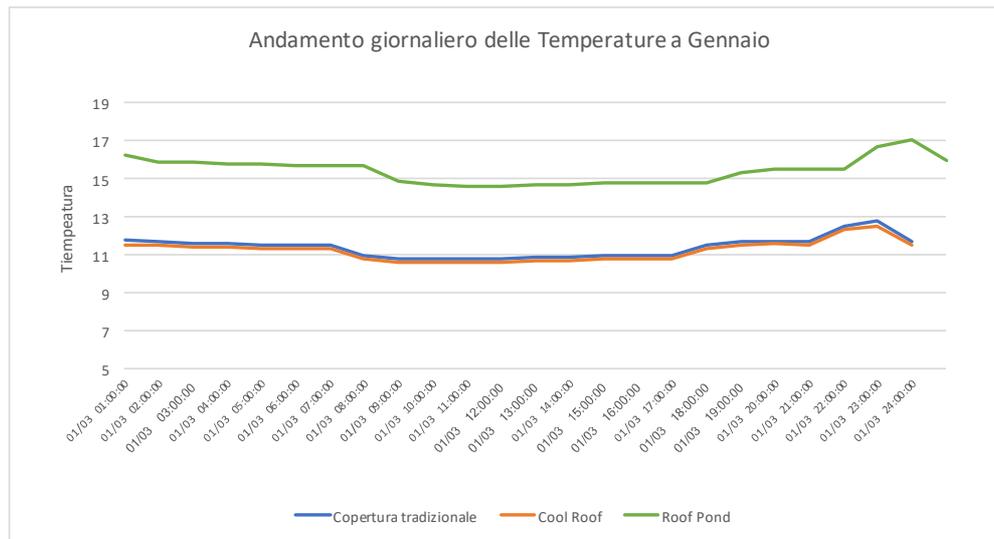


Figura 130 Confronto andamento della temperatura nei tre sistemi

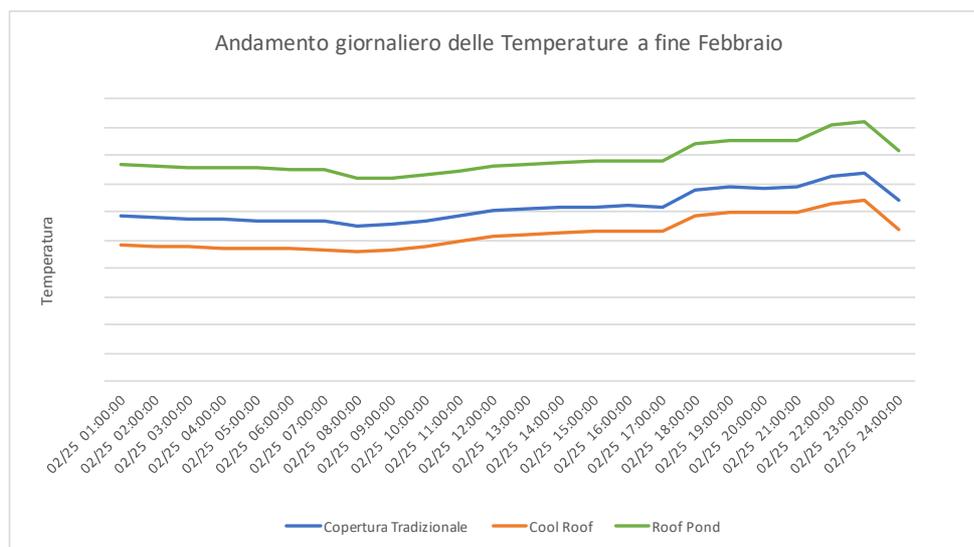


Figura 131 Confronto andamento della temperatura nei tre sistemi

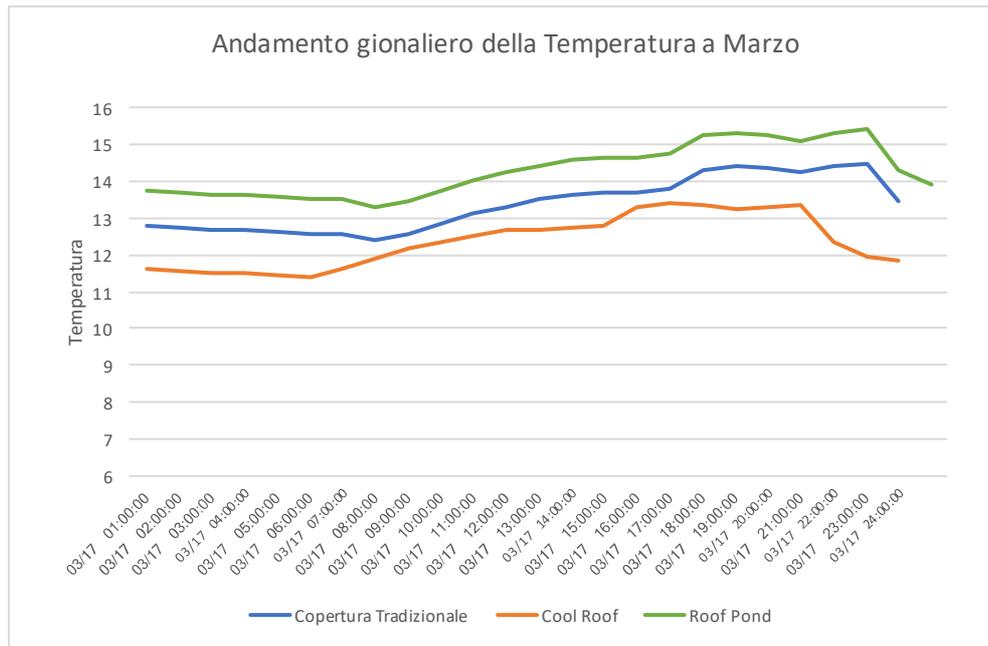


Figura 132 Confronto andamento della temperatura nei tre sistemi

Facendo quindi un'analisi su un intero anno solare si può dire che il sistema di tetto verde analizzato (Roof Pond), ha delle prestazioni migliori rispetto agli altri sistemi di copertura analizzati.

Dall'analisi dei consumi si è notato che il Cool Roof è poco più prestante in fase di raffrescamento, ma non presenta alcun vantaggio nel periodo invernale.

Il Roof Pond invece, avendo delle prestazioni simili al Cool Roof in fase di raffrescamento e delle prestazioni nettamente migliori rispetto ad entrambi i sistemi di copertura al qual viene paragonato nel periodo invernale, presenta un comportamento migliore rapportato all'intero anno solare.



Conclusioni

Lo studio condotto in questo lavoro di tesi si è posto come obiettivo la definizione e lo studio prestazionale delle tecnologie che sfruttano le proprietà dell'acqua per ridurre il carico di raffrescamento nel periodo estivo.

Dalle argomentazioni rilasciate dai dati sperimentali ottenuti dalle prove sperimentali dei diversi casi riportati in letteratura si può affermare che sia i sistemi di partizioni verticale che i sistemi di copertura ad acqua, sono degli strumenti che consentono di ridurre la temperatura interna dell'ambiente anche di parecchi gradi in alcune ore del giorno e in particolari condizioni climatiche.

L'utilizzo dell'acqua in sistemi di pareti simili alle pareti di Trombe consente di superare il limite della parete di Trombe di essere utile solo nel periodo invernale e di sfruttare l'evaporazione dell'acqua come strumento per ridurre la temperatura superficiale della parete.

L'uso dell'acqua all'interno di camini solari posti sulle pareti delle facciate consente attraverso il processo evaporativo dell'acqua di ridurre la temperatura dell'aria in ingresso in ambiente, migliorando il sistema di ventilazione degli spazi.

I sistemi copertura ad acqua consentono di ridurre la temperatura superficiale del tetto, elemento maggiormente esposto alle radiazioni solari, innescando un flusso calore che sposta l'aria calda dell'ambiente sul tetto nel quale viene raffrescata perdendo parte del calore sul tetto.

Il primo caso di studio affrontato si è limitato alla progettazione dell'installazione di una tecnologia di muro ad acqua che sfrutta l'evaporazione dell'acqua per ridurre il carico in ambiente grazie alla caduta di temperatura ottenuta.

Tramite questo progetto sono state studiate le modalità d'installazione di un modulo di parete le cui prestazioni saranno analizzate in uno studio successivo.

In laboratorio è stata effettuata la calibrazione delle termocoppie che saranno applicate alla parete per rilevarne la temperatura superficiale.

Da questo lavoro di taratura, sono state ottenute per ogni termocoppia dei coefficienti correttivi di temperatura e le rispettive rette di calibrazione dei ventiquattro sensori.

Il secondo caso di studio ha previsto la simulazione con Energy Plus del comportamento di una tecnologia di copertura ad acqua.

A causa dell'impossibilità di modellazione di un Roof Pond all'interno del programma, l'analisi è stata effettuata attraverso lo studio di un sistema di copertura verde con uno strato di terreno molto umido.

Questa assunzione comporta alcune criticità sullo studio sperimentali quali:

- L'impossibilità di studiare uno strato di sola acqua;
- L'impossibilità d'impostare un meccanismo di apertura e chiusura del sistema di ombreggiamento in funzione delle ore del giorno.



Per ottenere quindi un modello il più simile possibile a quello di Roof Pond si è scelto di mantenere il terreno saturo grazie all'attivazione di un sistema d'irrigazione continuo.

Inoltre si scelto un modello di Roof Pond (IECS) trattato in letteratura, dotato di un sistema di ombreggiamento, posto in maniera tale da creare un'intercapedine d'aria areata, il cui posizionamento è fisso sia nelle ore diurne che in quelle notturne.

Questa scelta è stata dettata dalle caratteristiche energetiche del tetto, infatti in questo tipo di copertura, lo strato di vegetazione funge da strumento fisso di ombreggiamento che aiuta al sistema l'effetto di raffrescamento evapotraspirativo.

L'affidabilità del modello, sull'incidenza dell'acqua sulla capacità di abbattimento della temperatura del sistema, è stata riscontrata, paragonando i risultati ottenuti dalla simulazione con terreno asciutto e terreno bagnato, nel secondo caso l'abbattimento della temperatura è risultato maggiore, dimostrando l'incidenza dell'irrigazione impostata sul programma di simulazione.

Lo studio prestazionale del sistema, effettuato attraverso un'analisi comparativa rispetto ad un sistema tradizionale di copertura e un Cool Roof, ha dimostrato che la copertura studiata, è un efficiente sistema di riduzione del carico termico che consente di ridurre di circa il 25% i consumi di energia totale di raffrescamento annuale a carico dell'impianto.

Vista la migliore capacità di abbattimento della temperatura attraverso l'installazione di un Cool Roof, rispetto al sistema di copertura ad acqua proposto, si può concludere che la realizzazione di un sistema di ombreggiamento con materiali ad alta emissività permetterà al sistema di migliorare il proprio comportamento nel periodo estivo riuscendo ad ottenere una maggiore caduta di temperatura.

In particolare la capacità dei materiali ad alta emissività, consentirà di ottenere un abbattimento maggiore nei periodi con una radiazione solare incidente elevate (Agosto).

L'integrazione dei due sistemi consentirà quindi di eliminare i limiti del Cool Roof di non apportare alcun guadagno nel periodo invernale e migliorerà le prestazioni del Roof Pond nel periodo estivo.

Osservando i risultati ottenuti dagli studi riportati in letteratura, la caduta di temperatura ottenute in zone dai climi torridi e con un elevato sbalzo termico è nettamente superiore rispetto a quella riscontrata in questo studio, nel quale sono state definite le condizioni climatiche di Torino.

Come sviluppi futuri si propone di studiare in laboratorio, le prestazioni del sistema, in seguito all'installazione in modo da confrontare il comportamento reale di questo sistema di copertura e verificare i possibili guadagni, in termini di raffrescamento, dovuti dall'apertura del sistema di ombreggiamento nelle ore notturne e la chiusura del sistema in quelle diurne.

Questa possibilità dovrebbe aumentare le prestazioni, grazie alla maggiore diminuzione della temperatura dell'acqua che si dovrebbe ottenere mantenendo il sistema aperto nelle ore notturne.

L'abbattimento della temperatura dell'acqua favorirebbe anche delle prestazioni migliori nelle ore diurne grazie ad un tempo di crescita della temperatura dell'acqua più lungo.



Riferimenti Bibliografici

- Andreas Luible, Mauro Overend, Laura Aelenei, Ulrich Knaack, Marco Perino, Frank Wellershoff, Adaptive facade network – Europe, 2015
- Omidreza Saadatian n, K. Sopian, C.H. Lim, Nilofar Asim, M.Y. Sulaiman Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development- Malaysia ,2012
- Øyvind Aschehoug, NTNU, Norway Marco Perino, Expert Guide Part 2 Responsive Building Elements -Politecnico di Torino, Italy ,2009
- Marco Perino, Responsive Building Elements Vol. 2A, Europe
- Øyvind Aschehoug, State of the Art Report Vol.1 -Europe
- Øyvind Aschehoug, Per Heiselberg Marco Perino, Designing with Responsive Building Components-Europe
- Zahra Giabaklou, John A. Ballinger, A passive evaporative cooling system by natural ventilation-Gran Britain 1995;
- Vinod Kumar Venkiteswaran , Wong Dee Lern, Surenthira Stephen Ramachanderana, A Case Study on the Use of Harvested Rainwater to Operate Passive Cooling Water Wall (PCWW) for SEGi University Tower- Malaysia,2016
- Jiang Hea,b, Akira Hoyanob, Experimental study of practical applications of a passive evaporative cooling wall with high water soaking-up ability, -Tokyo 2010
- Jiang He *, Akira Hoyano, A 3D CAD-based simulation tool for prediction and evaluation of the thermal improvement effect of passive cooling walls in the developed urban locations, Tokyo 2008
- Alfredo Fernández, González Analysis of the thermal performance and comfort conditions produced by five different passive solar heating strategies in the United States Midwest-Nevada, 2007;
- Ting Wu, Chengwang Lei, Thermal modelling and experimental validation of a semi-transparent water wall system for Sydney climate-Australia 2016
- Ting Wu, Chengwang Lei, A review of research and development on water wall for building applications-Australia, 2015
- Mehran Rabani, Vali Kalantar, Ali A. Dehghan, Ahmadreza K. Faghieh, Empirical investigation of the cooling performance of a new designed Trombe wall in combination with solar chimney and water spraying system- Iran,2015
- Ting Wu, Chengwang Lei, CFD simulation of the thermal performance of an opaque water wall system for Australian climate – Australia, 2016
- Ayyoob Sharifi, Yoshiki Yamagata Roof ponds as passive heating and cooling systems: A systematic review -Japan 2015
- Runsheng Tanga, Y. Etzionb , On thermal performance of an improved roof pond for cooling buildings –Israel 2002
- Sahar N. Kharrufa , Yahyah Adil ,Roof pond cooling of buildings in hot arid climates-Iraq 2006
- E. Krüger*, L. Fernandes, S. Lange, Thermal performance of different configurations of a roof pond-based system for subtropical conditions- Brazil, 2016
- Danyal Sabzi, Pegah Haseli, Mehdi Jafarian, Gholamreza Karimi, Mansoor Taheri, Investigation of cooling load reduction in buildings by passive cooling options applied on roof- Iran 2015



- Danyal Sabzi, Pegah Haseli, Mehdi Jafarian, Gholamreza Karimi, Mansoor Taheri, Investigation of cooling load reduction in buildings by passive cooling options applied on roof- Iran,2015
- David Pearlmutter, Pedro Berliner, Experiments with a ‘psychrometric’ roof pond system for passive cooling in hot-arid regions-Israel, 2016
- Artemisia Spanakia, Theocharis Tsoutsosb, Dionysia Kolokotsab, Experiments with a ‘psychrometric’ roof pond system for passive cooling in hot-arid regions- Greece,2010
- Alberto Sposito, International Journal of Architecture Art and Design-Italy, 2017
- David A. Bainbridge, A Water Wall Solar Design Manual-America,2005
- Stefano Paradiso, Alessandro Mazzotta, Il raffrescamento passivo dello spazio costruito: involucro e ventilazione, tra tecnica e immagine- Italy,2009
- UNI/TS 11300 (parte 1)
- UNI 10339

Sitografia

- <http://ecodallecitta.it/notizie/383265/raffrescamento-evaporativo-adiabatico-il-piu-antico-sistema-conosciuto-di-rinfrescamento-degli-ambienti/>
- <https://www.slideshare.net/SushilKumarGupta4/roof-pond>
- <http://www.architetto.info/news/green-building/raffrescamento-evaporativo-con-il-roof-pond-che-cose-e-come-funziona/>
- <http://www.fotovoltaicosulweb.it/guida/il-roof-pond.html>
- <http://www.alessandrotraldi.com/filter/2013/EXPO-2015-EDIFICI-DI-SERVIZIO-MILANO>
- <http://slideplayer.it/slide/5311290/>

