POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria

Corso di Laurea in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di laurea di II livello

Utilizzo dell'acqua nell'involucro edilizio, caratterizzazione sperimentale della performance di una schermatura opaca ad acqua



Relatore:

Prof. Marco Perino

Co-relatori:

Fabio Favoino

Stefano Fantucci

Candidato:

Alberto Perono Cacciafuoco

Marzo 2019

Sommario

1.Introduzione	4
2. Tecnologie per la riduzione del carico di raffrescamento	7
2.1. Sistemi di schermatura solare e facciate ventilate	9
2.1.1. Facciate verticali Opache	9
2.1.2. Muro di Trombe	
2.1.3. Il camino solare	12
2.1.4. Solare termico integrato nella facciata	
2.2. Tecnologie di Involucro Utilizzanti l'Acqua	15
2.2.1. Pareti verticali usanti acqua con involucro opaco	
2.2.2. Tubazioni inglobate nell'involucro	
2.2.3. Parete evaporativa ad acqua	20
2.2.4. Roof Pond	22
2.2.5. Green walls	29
2.2.6. Partizioni verticali usanti acqua con involucro trasparente o semi-trasparente	
2.2.7. Facciata a doppia pelle trasparente con tubi d'acqua	
2.2.8. Fluid glass project	
2.2.9. Water flow Glazing	
2.3. Sistemi utilizzanti materiali in cambiamento di fase	
2.3.1. PCM in superfici vetrate	
2.3.2. PCM in superfici opache	
3. Caso Studio	42
3.1. Introduzione	42
3.2. Obiettivi della caratterizzazione sperimentale	42
3.3. Sistema sperimentale	42
3.3.1. Cella di Prova	42
3.3.2. Campione di Water Wall	43
3.3.3. Sistema raccolta dati	43
3.3.4. Sistema di pompaggio e irrigazione	48
3.4. Metodologie di analisi dei dati	48
1. Risultati della campagna sperimentale	
4.1 Configurazione "Open"	
4.1.1. Configurazione di riferimento (dry)	53
4.1.2. Water Wall geometria open a 250 l/h	54
4.1.3 Water Wall geometria open a 500 l/h	61
4.1.4. Water Wall geometria open a 750 l/h	

	4.1.	.5. Water Wall geometria open a 1000 l/h	80
	4.1.	.6. Confronto tra le varie portate nelle ore di picco (15: 00 e 18:00)	
4	.2.Co	onfigurazione "Close"	
	4.2.	.1. Water Wall geometria "closed" a 250 l/h	
2.	Ana	alisi ed elaborazione dati	103
5	.1. Pr	rove del mese di luglio	103
	5.1.	.1. Temperatura normalizzata (T* _x)	105
	5.1.	.2. Efficienza di riduzione di temperatura	110
	5.1.	.3 Riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco	113
	5.1.4	.4. Valori medi degli indici	117
5	.2 Co	onfronto prove di luglio con prove di settembre	121
	5.2.	.1 Temperatura Normalizzata (T* _x)	121
	5.2.	.2. Efficienza di riduzione della temperatura	125
	5.2.	.3 Riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco	128
	5.2.4	.4. Valori medi degli indici	132
6.	Мос	odello numerico	135
е	.1.	Risultati per condizioni a secco	140
е	.2.	Risultati con portata d'acqua	144
	6.2.	.1. Prove 250 l/h	144
	6.2.	.2. Prove 500 l/h	148
	6.2.	.3. Prove 750 l/h	152
	6.2.4	.4. Prove 1000 l/h	155
е	.3.	Analisi degli indici prestazionali	159
	6.3.	.1. Temperatura normalizzata	159
	6.3.	.2. Riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco	164
е	.4.	Confronto su settimana tipo di un'altra località	168
7.	Con	nclusioni	185
Bib	liogra	afia e sitografia	187

1.Introduzione

La rapida crescita di consumo di energia negli ultimi anni ha iniziato ad allarmare, si è vista quindi la necessità di sviluppare piani di pianificazione energetica. Secondo i dati della IEA (International energy agency) Fig.1.1. negli ultimi 30 anni il consumo di energia elettrica totale è aumentato da 377 Mtoe fino a 1795 Mtoe, in particolare il settore edilizio comprendente sia il settore residenziale che quello commerciale e parte dei servizi pubblici sono aumentati rispettivamente da 88 Mtoe a 488 Mtoe e da 55 Mtoe a 396 Mtoe.



Fig. 1.1. Consumo di energia elettrica per settore

A luce di ciò si può notare come gran parte del consumo mondiale totale di energia primaria riguarda l'utilizzo di energia negli edifici residenziali e commerciali.

Nella tabella 1.1. (Lombard ed altri, 2008) si riportano le percentuali di consumo di energia primaria negli edifici di destinazione d'uso uffici (settore commerciale); si nota come il consumo di energia dovuto ai sistemi di climatizzazione, riscaldamento e ventilazione (HVAC) sia il termine più sostanzioso circa il 50 %.

Energy end uses	USA (%)	UK (%)	Spain (%)	
HVAC	48	55	52	
Lighting	22	17	33	
Equipment (appliances)	13	5	10	
DHW	4	10	_	
Food preparation	1	5	_	
Refrigeration	3	5	_	
Others	10	4	5	

Energy consumption in office	es di	y end	use
------------------------------	-------	-------	-----

Tabella 1.1. Consumo di energia primaria in edifici con destinazione d'uso uffici

L'uomo vuole vivere in un ambiente salubre e confortevole, però allo stesso tempo c'è bisogno comunque di ridurre i consumi energetici e ridurre le emissioni di inquinanti, ciò si può fare sfruttando

tecnologie in grado di soddisfare i fabbisogni energetici dell'edificio che non consumino risorse naturali. Per questo scopo si sono sviluppate nuove e varie strategie con l'obiettivo di ridurre il consumo energetico senza compromettere il comfort.

Il consumo energetico di un edificio è fortemente influenzato dalle proprietà dell'edificio stesso quali: orientamento, materiali e sistemi energetici adoperati.

Questi ultimi influenzano significativamente la domanda di risorse al fine di raggiungere la condizione di comfort.

L'impatto ambientale degli edifici dipende fortemente dal consumo energetico in funzione del clima in quanto influisce sul carico ambientale (apporti e/o dispersioni), per esempio in climi nordici la richiesta di raffrescamento è decisamente inferiore rispetto a climi miti, questo comporta a dover progettare sistemi differenti in base alle zone climatiche.

È chiaro che esiste una proporzionalità diretta tra qualità dell'ambiente interno (IEQ indoor enviromental quality) e consumi, alto IEQ implica maggiori 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. In vista di una progettazione a basso consumo è estremamente importante sviluppare e adoperare tecniche costruttive nuove che consentano il raggiungimento del comfort 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 fosse isolata dall'esterno, minimizzando le perdite ed i guadagni di calore attraverso le pareti, ma a scapito delle condizioni di igiene all'interno dell'edificio, si sviluppò di conseguenza la cosiddetta sindrome dell'edificio malato inoltre, molti architetti, hanno trascurato gli aspetti energetici prediligendo l'estetica degli edifici. A causa di questo modo di operare, sono stati realizzati edifici con la necessità di avere installati sistemi di HVAC spesso anche sovradimensionati.

Un'altra delle problematiche legata all'urbanizzazione sono le cosiddette "isole di calore urbane" (UHI): si tratta di zone all'interno dei centri urbani in cui il calore diurno assorbito dalle superfici viene rilasciato di notte alzando pertanto la temperatura dell'aria, questo comporta anche un effetto di inversione termica che impedisce agli inquinati di "allontanarsi dalla zona" e pertanto rendono la zona più inquinata. Le problematiche ambientali legate a tutto ciò 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 ad esse.

La riduzione di calore assorbito e l'abbassamento delle temperature superficiali dell'involucro sembrano essere due soluzioni chiave per mitigare l'effetto di UHI.

Ai fini di ridurre il livello di inquinamento ambientale dei paesi industrializzati già dal 1997 con il protocollo di Kyoto e successivamente nel 2015 con l'accordo di Parigi si sono imposti obiettivi a tal fine.

Questi obiettivi, possono essere raggiunti introducendo delle tecnologie con bassa emissione di anidride carboniche nelle costruzioni, a questo scopo la normativa europea "Energy performance in buildings directive recast" EPBD è stata redatta.

Uno degli obiettivi previsti nel EPBD è realizzare edifici di uso pubblico per il 2020 di tipologia "nearly zero energy building" (NZEB).

Gli edifici NZEB sono edifici quasi autosufficienti, il cui bilancio energetico è quasi pari a zero. Questa nuova tipologia di progettazione degli edifici 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 quindi importante in fase di progettazione prestare attenzione a :

- Condizioni al contorno (orientamento, clima, ombreggiatura, ecc....);

- Isolamento termico;

- Ponti termici;

- Infiltrazioni d'aria;

- IEQ;

- Dimensionamento dell'impianto.

Negli ultimi anni le tecnologie di accumulo di energia termica (TES) sono state individuate come tecnologie con grande possibilità nel ridurre i consumi energetici negli edifici sia in termini di raffrescamento che di riscaldamento. Le tecnologie TES si distinguono in quelle ad accumulo di calore sensibile o in quelle ad accumulo di calore latente in base al materiale di stoccaggio. In quest'ultimo si usano principalmente materiali in cambiamento di fase (PCM) che richiedono una piccola differenza di temperatura rispetto ai sistemi ad accumulo di calore sensibile. Lo svantaggio dei PCM e che spesso sono sostanze organiche infiammabili, hanno bassa conduttività termica e non sono adatti per tutte le condizioni climatiche di una singola località.

I sistemi ad accumulo di calore sensibile si distinguono in sistemi a breve o lungo termine. A breve termine significa che l'energia accumulata durante il giorno viene rilasciata durante la notte, mentre a lungo termine implica dei cicli di accumulo e rilascio stagionali.

Nell'ottica di una riduzione dei sistemi di climatizzazione degli edifici potenziando l'involucro esterno dell'edificio sono state sviluppate varie tecnologie tra cui: facciate a doppia pelle, facciate 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 fase.

In questo lavoro di tesi si è posta particolare attenzione alle tecnologie che negli ultimi anni sono state sviluppate e studiate al fine di ridurre i consumi di energia per il raffrescamento degli ambienti interni degli edifici, una maggiore attenzione è stata posta sulle tecnologie di involucro edilizio utilizzanti l'acqua. A seguito di questo lavoro di ricerca è stata analizzata una nuova tecnologia di involucro in grado di ridurre la temperatura superficiale della parete e attraverso una campagna sperimentale sono state analizzate le prestazioni di questo sistema. Successivamente si è sviluppato un modello numerico semplificato in grado di simulare le prestazioni di questa tecnologia.

2. Tecnologie per la riduzione del carico di raffrescamento

Proprio al fine di ridurre il carico di raffrescamento di un edificio in letteratura si possono trovare molteplici strategie e tecnologie. In generale si possono individuare due macro-categorie: i sistemi di schermatura solare e sistemi che assorbono e accumulano il calore solare.

I sistemi di schermatura solare sono dei sistemi che impediscono alla radiazione solare incidente di entrare direttamente in ambiente, in questo modo durante il periodo estivo vengono ridotti gli apporti solari che provocherebbero un aumento del carico di raffrescamento, spesso questo sistemi generano una cavità tra la schermatura e la parte effettiva dell'edificio, l'aria che circola in questa cavità può essere usata per raffrescare le pareti dell'edificio tramite moti convettivi, a volte quest'aria se il sistema lo permette può essere inviata direttamente in ambiente.

I sistemi che assorbono e accumulano calore sono sistemi che sfruttano materiali con alte capacità termiche come ad esempio acqua e materiali in cambiamento di fase che sono in grado di accumulare grandi quantità di calore, in questo modo il calore assorbito viene immagazzinato all'interno del materiale. Questo calore verrà successivamente rilasciato solo in parte nell'ambiente e quindi si provoca una riduzione del carico, inoltre uno dei principali vantaggi di queste tecnologie e lo sfasamento del rilascio del calore rispetto all'ora di picco di temperatura e radiazione solare, ma a volte questo calore assorbito non ha un ruolo importante e quindi questi sistemi assorbono calore al fine di asportarlo. Anche queste tecnologie possono essere combinate con le altre tecnologie per ottenere degli effetti aggiuntivi, ad esempio un sistema di schermatura solare accoppiato ad una tecnologia che sfrutta l'acqua può generare un sistema in grado non solo di ridurre il carico termico ma anche di ridurre le temperature superficiali e quindi migliorare il comfort termico degli ambienti interni.

I sistemi utilizzanti l'acqua si possono dividere principalmente in due categorie:

- A ciclo chiuso che a sua volta si divide in:

• Ad acqua in movimento in questi sistemi l'acqua una volta che svolge la sua funzione viene trasportata in un accumulo dove se necessario viene riportata a temperatura ottimale e/o filtrata, questi sistemi in caso di perdite d'acqua sono spesso ricaricati da acqua meteorica, il sistema in genere viene usato per asportare i carichi termici;

• Ad acqua statica in questi sistemi l'acqua acqua posta all'interno di appositi contenitori, questa acqua principalmente viene usata come accumulo termico assorbe e impedisce agli apporti solare di diventare carico di raffrescamento, normalmente i sistemi ad acqua statica hanno un ciclo di accumulo rilascio a livello giornaliero cioè assorbono calore di giorno alzandosi di temperatura mentre durante la notte rilasciano questo calore riportandosi alla temperatura esterna;

- A ciclo aperto in questi sistemi l'acqua una volta usata non viene più riutilizzata, principalmente questi sistemi sono applicati sulle tecnologie green wall e living wall dove l'acqua viene assorbita e successivamente evapora e quindi si ha una continua necessità di rigenerare l'acqua del circuito, in genere questi sistemi sono usati per asportare calore.

Nella tabella 2.1. sono riportate le tecnologie in base al principio di funzionamento e dove queste possono essere installate sull'edificio con riferimenti ai references a vari autori che hanno studiato una tecnologia simile.

		Principio di funzionamento							
		Schermatura	Ventilazione	Accumulo		raffrescamento evaporativo			
				Aperto Chiuso		Aperto	Chiuso		
	-				In movimento	Statica		In movimento	Statica
Involucro	Muro opaco								
			[8] [20] [27]	[9]	[9]	[26] [32]	[7] [34]		
	Tetto		[6]	[6] [9]	[6] [9]	[6]			[6]
	Componenti trasparenti	[8] [26] [27]	[8] [26] [27]	[10]	[10] [16] [21]	[21]	[7] [34]		

Tabella 2.1. Schema riassuntivo di varie tecnologie e strategie di involucro edilizio in gradi di ridurre i carchi solari.

2.1. Sistemi di schermatura solare e facciate ventilate

I sistemi di schermatura solare impediscono alla radiazione solare diretta di entrare direttamente nell'ambiente interno formando una "barriera" opaca che assorbe la radiazione solare. Le facciate ventilate sono dei sistemi in cui è presente un'intercapedine tra la parete dell'edificio e una struttura che funge da seconda parete dell'edificio in cui l'aria è libera di circolare, la seconda parete può essere trasparente od opaca in questo secondo caso il sistema può anche fungere da schermatura solare.

2.1.1. Facciate verticali Opache

Una facciata verticale opaca (OVF open vertical façade) è una facciata a doppia pelle composta da due strati opachi tra i quali è presente un canale di ventilazione. Lo strato più esterno è in genere composto da pannelli modulari che possono essere di vario materiale e colore. In alcune applicazioni lo strato esterno è continuo in questo caso si parla di (CJVF Continuous joint vertical façade) in altre lo strato esterno è discontinuo e si parla di facciate verticale con giunzioni aperte (OJVF Open Joint vertical façade), queste discontinuità permettono all'aria di entrare e uscire dalla cavità lungo il muro, inoltre queste aperture permettono il controllo delle espansioni dovute ai cambi di temperatura. Le tecnologie OVF senza discontinuità permettono all'aria di entrare ed uscire mediante due sole aperture una situata nella zona inferiore mentre l'altra nella zona superiore (Fig. 2.1.).



Fig. 2.1. A sinistra facciata verticale con giunzioni aperte, a destra facciata verticale con giunzioni continue

Il rivestimento esterno funge principalmente da filtro della radiazione solare mentre quello interno ha il compito di isolare l'edificio, inoltre è spesso un elemento con una certa massa termica. In origine le OVF sono state pensate come elemento di protezione dell'edificio dagli agenti atmosferici, ma attualmente si stanno diffondendo sempre di più come elemento di riduzione del carico di raffrescamento nei Paesi del Sud Europa.

La principale differenza rispetto a una facciata normale sono i fenomeni che accadono all'interno della cavità. La ventilazione nella cavità ha infatti un ruolo decisivo nelle prestazioni di questa tecnologia. Oltre ai fenomeni di trasmissione del calore per conduzione e radiazione, la convezione naturale risulta il fenomeno principale che influisce sul comportamento delle OVF. La ventilazione naturale è dovuta a due fenomeni: forze di galleggiamento e vento. La forzante "vento" crea una ventilazione a causa della differenza di pressione sulla superficie della facciata dovuta al vento esterno. La ventilazione per galleggiamento è invece dovuta alla differenza di densità dell'aria all'interno della cavità a causa della differenza di temperatura della zona inferiore e superiore di quest'ultima. L'azione del vento ha maggior peso nella zona superiore della cavità poiché l'effetto di galleggiamento tende a diminuire.



Fig. 2.2. Schema di funzionamento di una OVF

In Fig.2.2. è riportato uno schema di funzionamento di una OVF: l'aria all'interno della cavità sale (1) assorbendo il calore da entrambe le pareti lato interno ed esterno per conduzione (2, 3), convezione (9, 10) e radiazione (11). L'aria entra nella cavità attraverso l'apertura inferiore (4) e continua a salire perché riscaldata dalle pareti (5), la parete esterna viene riscaldata dalla radiazione solare (6) e dallo scambio termico radiativo con l'ambiente esterno (7). Quando l'aria nella cavità raggiunge una temperatura sufficientemente elevata (cioè maggiore di quella ambiente) esce dalla cavità attraverso l'apertura superiore (8). Bisogna ricordare comunque che la ventilazione nella cavità è anche influenzata dal vento (12).

Il sistema studiato da María Ibañez-Puy ed altri (2017) quindi opera con una strategia di raffrescamento passivo, in particolare sulle superficie esposte alla radiazione solare, si è riscontrato che si riesce a ridurre il flusso termico entrante nell'edificio rispetto a una facciata normale di circa il 40%.

Uno degli elementi interessanti della presenza di una OVF è la riduzione dei ponti termici e quindi una riduzione delle perdite di calore nel periodo invernale, nonostante questo studi diversi hanno portato a risultati contrastanti sui benefici di questa tecnologia nel periodo invernale.

2.1.2. Muro di Trombe

Il muro di 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 da un vetro che separa il muro di accumulo da un dispositivo di oscuramento. Entrambi sono dotati di aperture attraverso cui può passare aria, in base alla configura di funzionamento se riscaldamento o raffrescamento queste aperture vengono chiuse/aperte.

La radiazione solare attraversa il vetro e riscalda la parete, la quale accumula calore che verrà successivamente diffuso all'interno della cavità e negli ambienti interni con un certo ritardo. Il vetro funge da protezione alla ventilazione esterna che raffrescherebbe la parete. In inverno le aperture lato parete durante il giorno vengono aperte in modo da permettere all'aria calda presente nella cavità di entrare nell'ambiente. Di notte queste aperture vengono chiuse lasciando chiuse anche le aperture della parete vetrata. In estate viene attivato il sistema di oscuramento del vetro al fine di ridurre l'assorbimento di calore da parte della parete. Inoltre, le aperture della parete vetrate vengono aperte per permettere una ventilazione all'interno della cavità al fine di ridurne la temperatura, le bocchette della parete opaca sono chiuse. Durante la notte vengono chiuse le bocchette del vetro ma aperte quelle della parete come per il caso invernale diurno ma il un meccanismo è opposto: l'aria calda dell'ambiente interno esce dall'apertura superiore e si raffredda entrando in contatto con il vetro e rientra nell'ambiente dall'apertura inferiore.



In Fig. 2.3. è riportato uno schema delle varie configurazioni del Trombe Wall

Fig. 2.3. Configurazioni del Trombe Wall

Diversi studi sono stati effettuati su metodi in grado di migliorare le prestazioni di questa tecnologia, in particolare un gruppo di ricercatori Iraniani Sodha ed altri (1981) ha accoppiato un Trombe Wall con un sistema utilizzante un PCM e acqua per migliorare le capacità di accumulo del sistema. I miglioramenti sono stati molto evidenti soprattutto nel periodo invernale.

2.1.3. Il camino solare

Il camino solare è un sistema utilizzato per migliorare la ventilazione naturale nell'ambiente, è composto da tre elementi principali : uno spazio di raccolta dell'energia solare del calore generato per irraggiamento, un pozzo di ventilazione e dei condotti per il flusso d'aria.

Il sistema accumula calore mediante l'assorbimento della radiazione solare producendo moti di galleggiamento nel pozzo di ventilazione. Il camino solare ha una particolare rilevanza nel periodo estivo quando la ventilazione gioca un ruolo importante nel raffrescamento, in questo modo si ottiene un sistema di ventilazione naturale che riduce quindi l'uso di sistemi meccanici come ad esempio dei condizionatori. Il sistema sul lato esterno è composto da una superficie vetrata mentre quello interno è opaco con buone caratteristiche assorbenti, inoltre questo strato è dotato di un buon isolamento termico. Il sistema in questo caso riscalda la parete e l'aria nel pozzo di ventilazione ma grazie all'isolamento termico del muro il calore non viene portato nell'ambiente. Il sistema può operare in tre modi differenti:

- Modalità di riscaldamento Fig. 2.4.(A) in cui il sistema funziona come un muro di Trombe

- Modalità ventilazione naturale Fig. 2.4.(B) grazie ai moti ascendenti all'interno del pozzo di ventilazione si crea un tiraggio naturale che porta via l'aria dell'ambiente più calda di quella di rinnovo che arriva dall'ambiente esterno

- Modalità di isolamento termico Fig. 2.4.(C) in questo caso l'ambiente non risulta ventilato ma il calore presente nel pozzo viene asportato dai moti di galleggiamento presenti al suo interno.



(A) Space heating mode (B) Natural ventilation mode (C) Thermal insulation mode

Fig. 2.4. Modalità di funzionamento di un camino solare

Questa tecnologia può essere accoppiata con una parete ad acqua creando un sistema che migliora la ventilazione all'interno dell'ambiente. Un sistema particolare studiato Jiang He et altri (2008), composto da una parete vetrata chiusa, un'intercapedine d'aria e da una superficie scura contente dell'acqua, ha rilevato che il sistema riusciva a portare la temperatura dell'ambiente interno al di sotto della soglia limite prevista e pertanto non era necessario utilizzare sistemi di condizionamento.

2.1.4. Solare termico integrato nella facciata

Con solare termico integrato si piò fare riferimento sia a tecnologie che utilizzano il fotovoltaico denominate (BIPV) sia a tecnologia che utilizzano effettivamente il solare termico (BIST).

Le tecnologie BIPV sono moduli fotovoltaici che combinano le funzioni dei materiali dell'edificio e del sistema dell'edificio. I moduli fotovoltaici possono essere usati per produrre energia elettrica e possono anche sostituire i materiali dell'edificio che sono stati sostituiti da quest'ultimi, in questo modo il fotovoltaico diventa parte integrante dell'involucro edilizio. Uno dei principali fattori che influenza la produzione di energia di un modulo fotovoltaico è la temperatura della cella, che viene riscaldata nel processo di produzione di energia, è quindi importante mitigare l'effetto della temperatura. Nelle tecnologie BIPV si possono usare strategie di ventilazione che riducano la temperatura della cella e allo stesso tempo raggiungere un adeguato livello di comfort termico all'interno dell'edificio. Un modo per ottenere ciò è schematizzato in Fig. 2.5. la radiazione solare riscalda il modulo PV che viene raffrescato dall'aria che entra nella cavità similmente alle facciate verticali opache, in questo modo uno studio effettuato ad Hong Kong da Chin Ming Lai ed altri (2015) ha riscontrato una riduzione dei carichi estivi di circa il 50 % e una migliore efficienza di produzione di energia elettrica.



Fig. 2.5. Schema di funzionamento di una tecnologia BIPV

Le tecnologie BIST invece riescono a ridurre gli apporti solari e allo stesso tempo il calore asportato può essere riutilizzato per produrre acqua calda sanitaria (ACS) o per operazioni di preriscaldamento. Il liquido utilizzato può essere sia acqua glicolata o un PCM. Anche in questo caso si può creare una cavità similmente alle facciate verticale opache che elimini glia apporti solari per effetto camino.

Le tecnologie BIPV e BIST si possono combinare assieme per ottenere un sistema più efficiente che riesca allo stesso tempo a produrre energia elettrica tramite i pannelli fotovoltaici senza che questi si surriscaldino troppo in quanto il loro calore viene asportato dalla "parte" solare termico, il cui calore prodotto può essere riutilizzato per produrre ACS o per altri utilizzi. Il sistema BIPV/T può usare per come fluido di raffrescamento delle celle aria o acqua, in un circuito che può essere aperto o chiuso. Per esempio, in un circuito aperto in cui si riscalda l'aria, questa viene riscaldata con un particolare tipo di collettore chiamato UTC (unglazed transpired solar collector) che consiste in un pannello forato, l'aria si infila in uno spazio tra la cella fotovoltaica e il pannello forato qui asporta il calore della cella raffrescandola e passando attraverso i fori entra in un canale che la invia verso l'UTA del sistema HVAC dell'edificio, in questo modo si può ottenere un effetto sia di raffrescamento, dopo che l'aria è stata tratta, o di riscaldamento. In Fig. 2.6. si può vedere uno schema semplificato del sistema studiato da Andreas K. Athienitis ed altri (2011).



Fig. 2.6. Schema di funzionamento di una tecnologia BIPV/T

2.2. Tecnologie di Involucro Utilizzanti l'Acqua

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

Esistono diverse 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 strategie di riscaldamento o di raffrescamento in funzione delle caratteristiche climatiche della località in cui la tecnologia sarà installata.

Con l'obiettivo di realizzazione 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.



Fig. 2.7. Partizioni verticali e orizzontali usanti acqua

Nel libro di Bainbridge "A Water Wall Solar Design Manual" è descritta una breve storia sullo sviluppo di questa tecnologia. Si riscontra che una tecnologia in grado di sfruttare l'acqua nell'involucro apparve per la prima volta nel 1947 per opera di Hoyt Hottel e dei suoi studenti nell'istituto di tecnologia del Massachusetts. Questa versione consisteva in lattine dipinte di nero e posizionate dietro un pannello di vetro. Questa versione però non mostrò prestazioni soddisfacenti, soprattutto perché non fu progettata adeguatamente sotto diversi aspetti tra cui isolamento e scorretto posizionamento di superfici oscuranti mobili.

Nel 1972 in Messico Steve Baer ideò una casa che utilizzava diversi contenitori riempiti d'acqua per generare massa termica allo scopo di progettare un innovativo sistema solare passivo. Il sistema usato per il riscaldamento invernale diede buoni risultati nonostante il basso isolamento delle superfici esterne, infatti riuscì a ridurre il fabbisogno termico di riscaldamento dell'85%.



Fig. 2.8. Steve Baer Internal house, 1. Recipienti riempiti d'acqua

Attualmente i principali problemi di queste tecnologie sono la ruggine e le perdite d'acqua, il primo si può risolvere usando sostanze antiruggine a scapito delle prestazioni, le perdite d'acqua dipende principalmente se la tecnologia utilizza acqua corrente o acqua statica.

L'acqua può essere posizionata sia sulle pareti verticali che sugli elementi orizzontali, le pareti verticali inoltre possono essere sia opache che trasparenti.

2.2.1. Pareti verticali usanti acqua con involucro opaco

Questa può essere considerata la configurazione base delle tecnologie verticali usanti acqua.

Si tratta di una parete d'acqua incorporata in un involucro opaco che può essere: una lastra metallica, tubazioni opache in PVC o pannelli isolanti che separano l'ambiente esterno con quello abitato.

In Fig. 2.9. è rappresentato uno schema esplicativo di questa tecnologia.



Fig. 2.9. Schema semplificato di un involucro opaco verticale usante acqua

Una tecnica usata per confrontare le prestazioni di una facciata usante acqua con una convenzionale è il metodo empirico chiamato Solar Load Ration Method, questa tecnica è stata usata da MC Farald ed altri (1979) per confrontare le prestazioni di un muro Trombe con un muro utilizzante acqua in diverse configurazioni. I risultati di questo confronto hanno mostrato come la parete utilizzante acqua raggiungesse una maggiore percentuale di carico di riscaldamento da parte del sistema. Inoltre, è stata sviluppata un'analisi sul risparmio energetico dell'edificio in un anno tra le due tecnologie. Successivamente Sodha ed altri (1981) di studiosi ha confrontato le prestazioni di un muro trombe con:

- Parete d'acqua con calcestruzzo
- Parete d'acqua con pannello isolante

Tutte e tre le pareti sono state sottoposte a una variazione ciclica della radiazione solare sul lato esterno mentre all'interno veniva mantenuta una temperatura costante. Dai risultati si è visto che la parete con il calcestruzzo mostrasse risultati migliori, in particolare con maggiori quantitativi d'acqua le prestazioni aumentavano.

2.2.2. Tubazioni inglobate nell'involucro

Questa soluzione prevede l'uso di tubazioni con un liquido inserite direttamente nell'involucro edilizio. Questa strategia può essere sia usata per ridurre il fabbisogno termico di riscaldamento che di raffrescamento.

Chong Shen e Xiantiang Li (2017-2018) hanno eseguito dei test su questa tecnologia in entrambi gli obiettivi ma eseguiti su due references separati.

La strategia per ridurre il fabbisogno termico di riscaldamento si è dimostrata efficace soprattutto perché nei periodi invernali la temperatura dell'involucro è bassa perciò è sufficiente una sorgente di calore a temperature minori di 20 °C per ridurre il flusso termico. Per questo si possono usare tecnologie che producono acqua a bassa temperatura come pompe di calore, energia solare o direttamente sorgenti come acqua di falda. L'impianto preso in esame consiste in un boiler che alimenta i terminali posti in ambiente e in un sistema di tubazioni inserito nell'involucro alimentato da una pompa di calore ad aria. In Fig.2.10. è riportato uno schema funzionale dell'impianto in particolare si nota come le pareti utilizzino acqua a temperatura molto bassa mentre il sistema di condizionamento necessita di temperature più alte.



Fig. 2.10. Schema di funzionamento dell'impianto

In Fig. 2.11. sono riportati dei grafici che mostrano l'effetto di questa tecnologia rispetto a un sistema che ne è privo. Si può subito notare con lo scambio termico (Fig. 2.11. (a)) sia decisamente diminuito e con valori molto meno variabili. La temperatura (Fig. 2.11. (b)) è quella superficiale interna dell'ambiente che si ritrova ad essere molto più vicina a quella di set point dell'ambiente interno 20°C.



Fig. 2.11. effetto della presenza delle tubazioni nell'involucro rispetto ad uno privo, (a) Flusso termico, (b) temperatura dell'aria interna.

Lo studio ha ottenuto dei buoni risultati sul risparmio energetico. Utilizzando questa tecnologia si è ottenuto un risparmio energetico di energia primaria di quasi il 40 % utilizzando una temperatura dell'acqua pari alla temperatura interna di set point e inoltre si è riscontrato un payback di circa 2 anni.

Questo sistema è stato studiato anche per abbattere i carichi termici estivi: in questo caso le tubazioni sono anche inserite nel soffitto e, come nel caso invernale, le temperature delle superficie esterne sono elevate in particolare quelle colpite dalla radiazione solare. L'acqua che circola nelle tubazioni, potendo avere una temperatura non necessariamente troppo bassa, può essere prodotta da raffrescamento naturale o direttamente prelevata da sorgenti come laghi, fiumi o acque sotterranee.



Fig. 2.12. Schema di funzionamento dell'involucro con possibili sorgenti di acqua alternative

In Fig. 2.13. è riportato il confronto tra un sistema utilizzante delle tubazione inglobate nell'involucro e un sistema senza tubazioni nell'involucro.

Come si può vedere in Fig.2.13. con il sistema a tubazioni inglobate si riesce a mantenere la temperatura interna a 1 °C minore del caso senza tubazioni, comportando una minore temperatura media radiante e quindi un migliore comfort termico.



Fig. 2.13. Confronto delle temperature tra un sistema con tubazioni nell'involucro e uno senza (Ycon tubazioni, N-privo di tubazioni)

La presenza delle tubazioni nell'involucro permette di assorbire gran parte della radiazione solare e quindi ridurre i carichi di raffrescamento.

2.2.3. Parete evaporativa ad acqua

Questa tipologia di tecnologia basa il suo principio di funzionamento su un processo evaporativo dell'acqua. In questa parete si genera uno scambio termico tra acqua e aria, l'aria cede parte del suo calore per far evaporare l'acqua. Questo sistema è utilizzato nel periodo estivo quando la temperatura dell'aria è maggiore di quella dell'acqua. L'aria che viene raffreddata da questo sistema può essere se il sistema è studiato in modo particolare utilizzata per la ventilazione dell'ambiente interno, in particolare in climi molto aridi questa tecnologia presenta migliori prestazioni in quanto l'aria che viene raffrescata aumenta anche il titolo di vapore, si ottiene comunque un effetto di riduzione della temperatura superficiale e dell'ambiente circostante e ciò comporta ad una riduzione dei consumi energetici. Un aspetto molto importante per questa tecnologia di parete contente l'acqua che viene utilizzata, in particolare questa deve essere costantemente tenuta umida e quindi importate studiare un sistema di approvvigionamento dell'acqua.

Una particolare tecnologia che sfrutta questo effetto denominata "BioSkin" è stata sviluppata da un architetto giapponese ed applicata a un edificio in Tokyo in Fig.2.14. si può vedere l'edificio e un particolare sulle tubazioni.

Questa tecnologia utilizza delle tubazioni fatte da nuclei in alluminio ricoperti da un involucro in terracotta con un'alta capacità di trattenere l'acqua, le tubazioni sono posizionate a vista sulla facciata dell'edificio fungendo anche il compito di parapetto per i balconi dell'edificio. Il sistema utilizza l'acqua meteorica che viene raccolta sul tetto e inviata a un serbatoio dove l'acqua viene filtrata e sterilizzata. Quest'acqua viene poi fatta circolare in queste tubazioni.

L'acqua fuoriesce dallo strato ceramico, evaporando sulla superficie della tubazione e raffrescando l'aria. L'acqua in eccesso può essere drenata nel terreno attorno all'edificio.



Fig.2.14. Particolare delle tubazioni della tecnologia BioSkin

Sulla base di alcuni test (i cui risultati sono presenti nel sito green-buildings.ru) si è notato come l'evaporazione dell'acqua produca una riduzione della temperatura dell'ambiente circostante di circa 2 °C mentre sulla parete il salto di temperatura è di circa 12°C. L'utilizzo di questa tecnologia su più edifici nella stessa zona può rivelarsi un metodo efficiente per mitigare l'effetto delle isole di calore urbano (UHI).

Un'altra tecnologia che sfrutta lo stesso principio è stata realizzata nel 2012 nell'ambito della competizione Solar Dechatlon da Terrados-Cepeda ed Altri (2012) col nome di PATIO 2.12. In Fig. 2.15. è riportata una vista del progetto, dove all'interno delle pareti dell'edificio è presente una camera d'aria ceramica in cui riesce a scorrere capillarmente dell'acqua. Quando la temperatura dell'aria esterna si alza,

l'acqua evapora abbassando la temperatura dell'aria che viene immessa nell'ambiente interno per effetto camino. Infatti all'interno dell'edificio sono presenti delle aperture che permettono il ricambio dell'aria: le aperture situate nella zona inferiore sono adibite all'immissione dell'aria raffrescata all'interno della camera d'aria mentre quelle superiori ne permettono la rimozione. L'acqua utilizzata per alimentare il sistema è acqua meteorica o acqua grigia a patto che siano adeguatamente purificate e trattate. Durante il periodo invernale il sistema sfrutta le proprietà termiche della ceramica per interrompere il flusso e quindi avere dell'acqua stagnante che accumula calore durante il giorno e lo rilascia durante la notte.



Fig.2.15. Vista del Solar PATIO 2.12.

2.2.4. Roof Pond

Un'altra tecnologia utilizzante acqua sono i Roof ponds: si tratta di una piscina posizionata sul tetto dell'edificio che riesce a raffrescare indirettamente attraverso il raffrescamento evaporativo e/o raffrescamento radiante le cui forzanti sono la differenza di pressione di vapore sulla superficie dell'acqua con quella dell'ambiente circostante e la differenza di temperatura tra la superficie dell'acqua e la volta celeste. In entrambi i processi il tetto funge da scambiatore di calore che viene raffrescato o dall'evaporazione sulla superficie o dalla radiazione infrarossa solare della volta celeste.

Successivamente al suo raffrescamento funge da pozzo termico che assorbe il calore che entra o esce dall'edificio, inoltre funzionando come scambiatore di calore non incrementa l'umidità dell'ambiente interno.

Durante i periodi invernali i roof ponds possono essere usati per riscaldamento passivo. Nell ore diurne la piscina è esposta alla radiazione solare e l'acqua viene usata come elemento di stoccaggio di questa energia (solo la quota sensibile). Questa energia verrà successivamente trasferita nell'ambiente sottostante. Una dettagliata opera di classificazione dei roof ponds è stata eseguita da Ayyoob Sharifi ed altri (2015).

I roof ponds possono essere classificati in tre macro-categorie:

- Dry roof ponds dove l'acqua è contenuta in sacchetti di plastica
- Wet roof ponds dove i sacchetti di plastica sono immersi o spruzzati con acqua

- Open roof ponds non sono presenti sacchetti di plastica (questa tipologia è consigliata per climi molto aridi dove si ha quindi elevato effetto di evaporazione)

Di seguito verranno analizzate diverse varianti di roof ponds.

Roof ponds aperti

Questa tipologia, in genere realizzata su un tetto piano in calcestruzzo, è sempre esposta all'ambiente esterno. Può essere con spray Fig.2.16 (b) o senza Fig.2.16(a).



Fig. 2.16. Roof Pond aperto senza spruzzatori (a) con spruzzatori (b)

I roof ponds senza spray sono la tecnologia più semplice: hanno una profondità che può variare da 5 a 50 cm e durante il giorno assorbono e accumulano parte della radiazione solare, che viene trasferita nell'ambiente interno determinando un ritardo cioè spostando l'ora in cui all'interno si ha un massimo della temperatura. In particolare, questo spostamento avviene quando la temperatura esterna sta diminuendo permettendo così di ottenere il comfort termico dell'ambiente utilizzando tecnologie passive come la ventilazione naturale. Nelle ore notturne, quando la temperatura esterna è minore di quella interna, il flusso termico è diretto verso l'esterno; in questo caso il roof pond attenua le dispersioni di calore.

I roof pond con spray sono identici a quelli senza spray come struttura e comportamento, ma sono per l'appunto dotati di spray che spruzzano acqua sul tetto per tutto il giorno. Questa tecnica migliora l'adsorbimento e il raffrescamento evaporativo. Uno dei grandi svantaggi di questa tecnologia è l'elevato consumo di acqua. Uno studio ha dimostrato che il migliore momento per utilizzare gli spray è il periodo notturno in modo da limitare il consumo di acqua.

I roof ponds aperti sono adeguati a ottenere le condizioni di comfort in climi aridi e temperati.

Roof ponds con isolamento mobile

Questa tecnologia consiste in una piscina posizionata sul tetto coperta con un pannello mobile di isolante (poliuretano, polistirene, ecc....). Il pannello isolante deve essere di materiale opaco con alta riflessibilità per evitare che l'acqua si surriscaldi, riuscendo così a ridurre le fluttuazioni di temperatura. Durante la notte il pannello è rimosso in modo da facilitare il raffrescamento. L'esposizione all'aria riduce anche le perdite dell'edificio. Uno strato d'aria si trova tra la superficie dell'acqua e il pannello isolante fungendo da strato di isolante aggiuntivo. Questa tecnologia può essere dotata di spruzzatori d'acqua.

Esiste una variante di questa tecnologia chiamata Skytherm che rientra nella categoria di dry roof ponds in quanto l'acqua è contenuta i sacchetti trasparenti di polietilene o in PVC.

I sacchetti d'acqua raffreddati nel periodo notturno permettono di ridurre la temperatura dell'ambiente interno; si può aggiungere uno strato di acqua libera per aumentare l'effetto di raffrescamento evaporativo.



Fig. 2.17.Roof pond con panello isolante mobile



Fig. 2.18. Skytherm

Roof ponds con isolante galleggiante

Questa tipologia include al suo interno due configurazioni: Energy-roof e il Cool-roof.

L'Energy Roof è un sistema che ha un tetto di metallo che funge da supporto per la camera d'acqua primaria, sopra di questa è posizionato uno strato di isolante galleggiante (fatto di schiuma cellulare plastica o da altri materiali adatti) che funge da camera secondaria. Questa camera è coperta da uno strato molto sottile di materiale plastico trasparente. Un coperchio di contenimento è presente per limitare lo spostamento verticale della camera galleggiante. La camera secondaria è collegata alla primaria attraverso un sistema di tubazioni. Una pompa permette di trasferire acqua dalla camera primaria alla secondaria che durante le notti d'estate permette di raffrescare il sistema. Il giorno seguente l'acqua della camera secondaria è trasferita tramite un sistema di valvole nella camera primaria permettendo quindi di raffrescare l'ambiente interno. L'isolamento permette di ridurre gli apporti solari. Si può ottenere del raffrescamento aggiuntivo utilizzando getti d'acqua sulla lamina trasparente superiore.



Fig. 2.19. Energy Roof

Il Cool-roof consiste in una piscina posizionata su un tetto in calcestruzzo coperto con una membrana impermeabile come PVC, la cui superficie esterna deve essere bianca al fine di riflettere la radiazione solare. Una pompa che preleva l'acqua dalla piscina spruzza l'acqua sulla superficie del galleggiante generalmente nel periodo notturno in questo modo da raffreddare l'acqua. Un sistema di drenaggio permette di riassorbire l'acqua spruzzata sulla superficie esterna, in questo modo mantenendo la temperatura della piscina a temperature non troppo elevate che permettono di raffrescare l'ambiente interno.



Fig 2.20. Cool Roof

Roof ponds calpestabili

Come suggerisce il nome questi roof pond permettono di essere calpestati senza influire sul loro funzionamento. Si suddividono in due varianti: roof pond con isolamento inglobato e roof pond con circolazione notturna. Entrambe le varianti sono supportate su un tetto piano in calcestruzzo.

Il roof Pond con isolamento inglobato è un sistema composto da 7 strati. Uno strato consiste in un tetto leggermente inclinato in grado di drenare l'acqua piovana, sopra il quale è presente uno strato di impermeabile. Il terzo strato è uno strato di 2 cm di ciottoli che è in grado di contenere dell'acqua. Sotto di esso ci sono 5-10 cm di isolante con una cavità che permette la "circolazione termosifonica". Questo strato separa lo strato inferiore che contiene l'acqua anche esso costituito da ciottoli come quello superiore. Un galleggiante è incorporato su questo strato per evitare che il livello dell'acqua superi quello dell'isolante. Infine, l'ultimo strato permette di rimuovere l'acqua nel periodo invernale.



Fig. 2.21. Roof Pond calpestabile con isolamento inglobato

Il roof pond con circolazione notturna consiste in un sistema con un solo strato di ciottoli sopra il quale è posizionato l'isolante. Sopra lo strato di isolante sono presenti tegole che possono essere calpestate. Durante la notte sulle tegole viene fatta scorrere l'acqua migliorando l'evaporazione.



Fig. 2.22. Roof Pond calpestabile con circolazione notturna

Roof pond con sacchetti di iuta

Questa tipologia di roof ponds presenta due varianti. La prima consiste in un roof pond isolato con un pannello posizionato sopra il tetto e riempito d'acqua fino ad un certo livello. Il tetto può essere in cemento o metallo. I sacchetti di iuta o altro materiale adatto sono posizionati sopra a una griglia. I sacchetti e l'acqua non solo assorbono la radiazione solare ma ne dissipano una quota tramite evaporazione, convezione e radiazione notturna.

L'altra configurazione chiamata roof pond con sacchetti oscurata differenzia dalla precedente solo nella posizione dello strato di isolante, che funge anche da elemento oscurante. Tale isolante è posizionato ad una certa distanza dalla superficie dei sacchetti in modo che l'aria possa circolare liberamente nello spazio creatosi.



Le prestazioni di questi roof pond sono fortemente legate alle proprietà ottiche dei sacchetti

Fig. 2.23. Roof Pond con sacchetti di iuta (a e b) e con sacchetti di iuta oscurati (c e d)

Roof ponds schermati

Questa categoria di roof ponds comprende tutti quei roof ponds coperti da un elemento di schermatura separato dalla superficie dell'acqua generando di conseguenza uno strato d'aria. Questo elemento di schermatura può essere fisso o regolabile. I roof ponds regolabili sono chiusi durante il giorno per minimizzare gli apporti interni, mentre durante la notte sono aperti in modo da garantire un raffrescamento evaporativo. Se fissi, gli elementi di schermatura sono posizionati in modo da intercettare la radiazione solare diurna ma anche di permettere il raffrescamento durante la notte.

Una particolare variante di questa tecnologia è il Cool-pool che consiste in un roof pond schermato accoppiato ad una colonna d'acqua verticale che connette il roof pond sul tetto con lo spazio sottostante. Questa strategia permette, oltre ai soliti meccanismi termici dei roof ponds, di scambiare calore con l'ambiente interno tramite questa colonna. Questa strategia ha elevati costi di manutenzione ma basso consumo d'acqua.



Fig. 2.24. Roof Pond schermati



Fig.2.25. Cool-Pool

Roof ponds ventilati

Questa variante consiste in un roof pond posizionato su un tetto o in calcestruzzo o in metallo. L'acqua è coperta permanentemente da uno strato di isolante non in contatto con l'acqua; nello spazio che si genera tra i due c'è lo strato ventilato. La dimensione di questo "vuoto" deve essere ottimizzata per migliorare il flusso d'aria. Lo strato isolante è in genere in materiale metallico con alta riflessività termica accoppiato a un materiale isolante come EPS, polistirene, ecc..... Anche se l'aria è in grado di circolare liberamente, il sistema può essere dotato di ventilatori che operano al fine di ridurre la temperatura dell'acqua e migliorare il raffrescamento evaporativo. In inverno l'acqua viene drenata e le aperture di ventilazione vengono chiuse in modo da generare uno strato di isolante. Uno dei principali vantaggi di questa tecnologia è che può essere applicata anche su tetti non piani, e dà buone prestazioni sia in climi aridi che umidi, anche se sui primi le prestazioni sono migliori.



Fig.2.26. Roof Pond ventilato

Roof ponds chiusi

Questa tipologia considera tutti i roof ponds sempre coperti da uno strato isolante. Una tipologia è il roof pond "evapo-riflettivo". Questo roof pond è allocato su un tetto di calcestruzzo dove una piscina d'acqua è riempita da piccole rocce. Uno strato d'aria non ferma separa la piscina dalla copertura superiore che è piatta e fatta in alluminio dipinta con una sostanza allo scopo di migliorare le proprietà riflettive. Il sistema riflette la radiazione diurna. La notte la temperatura della piscina d'acqua è superiore a quella della lastra in allumino e , poiché il sistema è chiuso, il vapore acqueo non si disperde e ricondensa nella piscina. In questo modo il calore viene trasferito fuori dal sistema.



Fig.2.27. Roof Pond chiuso

2.2.5. Green walls

Una tecnologia che sfrutta l'acqua in modo indiretto per migliorare le prestazioni termiche della facciata è la tecnologia Green Wall. Questa tecnologia è in grado di pulire l'aria dalla CO_2 , ridurre l'inquinamento acustico, assorbire l'acqua piovana, ridurre l'effetto delle UHI e hanno inoltre un buon aspetto estetico.



Fig. 2.28. Esempio di edificio che usa un Green Wall

La riduzione della temperatura superficiale delle pareti su cui sono installate è dovuta a due principali cause: la parete non riceve più una radiazione solare diretta e inoltre la temperatura si riduce per raffrescamento evapotraspirativo, cioè si ha acqua che evapora direttamente dal terreno più acqua che viene rilasciata dagli apparati fogliari sotto forma di vapore.

I green walls si dividono in due principali categorie: Green façades (facciate verdi) e living walls.

- Le Green façade usano generalmente piante rampicanti, come ad esempio l'edera, che crescono verticalmente sulla facciata dell'edificio o in modo diretto oppure su un apposito sostegno secondario. Queste piante sono piantate o nel terreno o in appositi vasi.

- I living walls invece hanno le piante posizionate in diversi punti sulla superficie del muro. Si distinguono a loro volta in due categorie:

• Sistemi idroponici che usano un materiale molto denso come mezzo di crescita della pianta. Il materiale viene continuamente bagnato con nutrimenti arricchiti d'acqua.

• Sistemi a cella di suolo, in cui le piante crescono sul terreno rinchiuso in una cella. Questa tecnologia è più affetta dalle condizioni climatiche in quanto il vento può causare riduzioni di quantità di "suolo" dalle celle.

Uno studio eseguito in Inghilterra da Benjamin Riley (2017) ha riportato che queste tecnologie sono in grado di ridurre la temperatura negli ambienti in prossimità di queste superfici di 3-5 °C mentre sulla superficie stessa si ha una riduzione di circa 10 °C. Inoltre, si è riscontrato che questa tecnologia può anche ridurre i consumi energetici di riscaldamento in quanto tra la pianta e la superficie del muro si genera una zona con una temperatura più elevata rispetto a quella esterna.

Nonostante i molteplici benefici di questa tecnologia essa presenta diversi aspetti che ne rendono difficile lo sviluppo su larga scala. Uno dei principali problemi è dovuto ai costi di investimento iniziale che sono elevati in quanto si necessita per ciascun progetto un lavoro di design apposito in quanto le piante

utilizzate devono poter sopravvivere alle condizioni climatiche del luogo, devono aver sufficiente luce e nutrimenti per poter sopravvivere. Allo stesso modo sono molto elevati anche i costi di manutenzione. Un altro problema riscontrato è l'irrigamento delle piante che anche nell'impianto più efficiente richiedono come minimo 1 litro per m² al giorno di acqua. Gli eccessi di quest'acqua inoltre risultano difficili da riciclare in quanto deve essere filtrata e riportata al ph adatto per la pianta che deve bagnare.

In Australia a Sydney un progetto ha realizzato un edificio che ricicla l'acqua piovana e le acque di scarico per irrigare il sistema idroponico living wall, purificando e filtrando l'acqua in un impianto situato nei piani interrati dell'edificio. In Fig.2.29. è riportata una vista dell'edificio e uno schema rappresentativo del sistema di irrigazione e riciclaggio dell'acqua.

Il punto 1 dello schema rappresenta il purificatore a membrana dell'acqua, 2 rappresenta l'acqua riciclata, 3 è l'acqua potabile, 4 sono le acque nere, 5 vasca di raccolta d'acqua piovana, 6 è un purificatore d'acqua molto complesso che riporta l'acqua al ph desiderato e pulisce le acque nere, 7 torre evaporativa, 8 circuito di irrigazione delle piante.



Fig. 2.29. Vista del One Central Park (Sydney) a sinistra a destra schema semplificato di alimentazione del sistema living wall

2.2.6. Partizioni verticali usanti acqua con involucro trasparente o semi-trasparente

Si tratta di una parete d'acqua accoppiata con una facciata esterna (semi-)trasparente, che permette a parte della radiazione solare di entrare. Il lato interno del muro d'acqua può essere opaco o trasparente.



Fig.2.30. Schema semplificato di un involucro trasparente/semi-trasparente verticale usante acqua

2.2.7. Facciata a doppia pelle trasparente con tubi d'acqua

Una possibile applicazione studiata da Chong Shen (2016) per questa tecnologia è l'uso di tubazioni contenti acqua incorporate nel sistema di schermatura mobile come le veneziane. Questa soluzione è ottima anche in zone in cui l'acqua è relativamente calda già alla mandata e perciò può essere utilizzata senza essere prima sottoposta a raffrescamento mediante chiller.



Fig. 2.31. Schema di funzionamento del componente vetrato con possibili sorgenti di acqua alternative

Con questa configurazione la radiazione solare incidente sulla schermatura può essere asportata dalla tubazione anziché essere trasferita nella cavità o nell'ambiente interno.

Le tubazioni sono progettate per essere in grado di ruotare per permettere l'angolazione delle alette delle veneziane e quindi adattarsi a diverse condizioni ambientali in Fig.2.32. si mostra il particolare della tecnologia, per esempio veneziane chiuse in giorni molto caldi o aperte in giorni molto nuvolosi o freddi.



Fig.2.32. schema delle tubazioni inserite nelle veneziane

Lo studio effettuato ha confrontato questa tecnologia con una DSF e ha analizzato le migliori strategie per utilizzare questa tecnologia.

Da questo studio si è concluso che:

- bisognerebbe chiudere la cavità se la temperatura della cavità si riduce con le tubazioni a temperature inferiori a quelle della temperatura esterna.
- Smettere di pompare acqua durante il periodo diurno in quanto le tubazioni sono molto efficienti.
- Il sistema ha efficienze maggiori in zone in cui si ha un'estensiva radiazione solare e in cui il raffreddamento evaporativo è efficiente.

Questa soluzione è adeguata a ridurre gli apporti su superfici orientate a Est, Ovest e Sud.

2.2.8. Fluid glass project

Un'altra tecnologia utilizzante dei fluidi all'interno di una superficie vetrata è stata sviluppata nell'ambito di una ricerca dell'università di Monaco in collaborazione con quella di Vaduz (Jochen Stopper 2014). Il progetto utilizza un sistema di facciata vetrata che controlla i carichi termici: cambiando la trasparenza del vetro, si adatta il componente a differenti condizioni climatiche. Uno dei modi per avere una trasparenza dinamica del componente vetrato è l'utilizzo di materiali elettro-cromici, termo-cromici e tropo-cromici.

Un altro possibile metodo per ottenere questo effetto è la presenza di liquido all'interno della facciata. Questo progetto utilizza due strati di acqua all'interno del vetro che permettono di regolare il flusso energetico. Lo strato più interno mantiene la temperatura della superficie appena al di sotto o sopra alla temperatura dell'ambiente interno (in base al periodo se riscaldamento o raffrescamento), mentre il secondo strato, quello più esterno, controlla il flusso termico assorbendo la radiazione solare. I due fluidi sono termicamente separati. In Fig.2.33. sono riportati gli schemi di funzionamento nel periodo estivo e invernale.



Fig.2.33. Schema funzionale della facciata fluida vetrata in funzionamento estivo (sinistra) e invernale (destra)

Il vetro utilizzato è un triplo vetro con intercapedini riempiti di kripton, inoltre la superficie interna del pannello esterno e la superficie "esterna" del pannello interno sono rivestiti da una membrana basso emissiva.

In Fig.2.34. è riportato uno schema del vetro utilizzato.



Fig.2.34. Stratigrafia del vetro usato

L'assorbimento della radiazione solare della facciata può essere controllato colorando o decolorando il fluido sul lato esterno utilizzando delle particelle metalliche. In estate il fluido esterno viene colorato al fine di aumentarne le proprietà di assorbimento e di ridurre il surriscaldamento dell'ambiente interno. L'energia solare assorbita dal fluido può essere trasportata facendo circolare il liquido e, se si hanno carichi termici che necessitano bassa temperatura, può anche essere riutilizzata. In inverno questo liquido viene decolorato al fine di permettere il maggiore apporto termico gratuito per ridurre il carico di riscaldamento. Il sistema riesce quindi ad operare come dispositivo di schermatura, collettore solare e sistema di isolamento di facciata con uno spessore molto ridotto.

A seguito di una prova sperimentale su questa tecnologia eseguita sia a Monaco sia a Dubai in cui sono confrontate le prestazioni di questa tecnologia rispetto a un sistema di controllo solare tradizionale si sono riscontrati i seguenti risultati: a Monaco il carico di raffrescamento purché di suo non molto elevato si è ridotto di circa la metà, anche a Dubai, dove però non vi è necessità di riscaldamento e il carico di raffrescamento risulta molto elevato, si nota nuovamente un dimezzamento della richiesta di raffrescamento. Si può notare come i costi di pompaggio siano molto esigui.



Nella fig.2.35 seguente sono riportati i risultati di questo studio.

0

SCGU

Fig. 2.35. Consumi energetici del sistema con il fluido nel vetro e senza per Monaco (sopra) e Dubai (sotto)

Fluid Glass dyed

2.2.9. Water flow Glazing

Un'altra tecnologia di particolare interesse sono i Water-Flow Glazing (WFG) che consiste in un flusso d'acqua regolabile iniettato in una cavità tra due pannelli vetrati. L'acqua, essendo in grado di assorbire la radiazione infrarossa, risulta quindi capace di variare il valore g della finestra. Il valore g è un coefficiente tipico di una finestra che descrive quanto della radiazione solare incidente sulla finestra riesca effettivamente a passare da un'ambiente esterno a quello interno: non è il coefficiente di trasmissione ma una combinazione di quello di trasmissione più la quota parte dell'energia assorbita dalla finestra che viene successivamente riemessa verso l'ambiente esterno. Nel periodo invernale il valore di g deve essere preferibilmente alto in modo tale da massimizzare gli apporti solare. A causa di questo comportamento opposto nelle due stagioni bisogna spesso trovare un compromesso, ma grazie a questa tecnologia si può pensare di ottimizzare il comportamento dei componenti vetrati.

Le componenti vetrate mobili sono progettate in modo tale che il circuito che le alimenta si possa disinserire qualora quella componente non sia nella posizione di progetto.

Uno progetto di ricerca denominato INDEWAG (Industrial Development of water flow Glazing System) vuole realizzare ZEB a basso costo e con altre prestazioni sfruttando questa tecnologia in combinazione a muri interni radianti (RIW Radiant Internal Wall), con questa combinazione di tecnologie il progetto punta anche a minimizzare le dimensioni del sistema HAVC e del sistema fotovoltaico.

La ricerca è stata effettuata da Fernando del Ama Gonzalo ed altri (2017) su di un sistema campione (Fig.2.36.) a Sofia in Bulgaria in quanto le condizioni climatiche comportano sia stagioni calde che stagioni fredde, in questo modo si è potuto studiare il comportamento della tecnologia in due condizioni differenti.



Fig. 2.36. Vista del locale di prova

La facciata è composta da elementi modulari di WGF, un sistema fotovoltaico, una pompa e uno scambiatore di calore. (Fig.2.37.).



Fig.2.37. prospetto del water flow Glazing

Per soddisfare il fabbisogno energetico, il sistema è dotato di 2 circuiti Fig.2.38.:

_

- Una piscina che alimenta gli scambiatori dei WGF, lo scopo di questo sistema e permettere un free cooling. Il raffrescamento evaporativo permette alla piscina di dissipare il calore in eccesso.

Una pompa di calore che alimenta le partizioni interne, questo è il sistema di backup.



Fig. 2.38. Circuiti del sistema WGF

Durante la stagione fredda l'acqua che fluisce nella cavità del vetro viene fermata in modo tale da permettere al componete vetrato di raggiungere il suo valore massimo di g. Se la radiazione solare non fosse sufficiente a raggiungere le condizioni di comfort all'interno si attiva la pompa di calore che alimenta le partizioni interne.
Nella stagione calda, dove la radiazione solare può portare ad un surriscaldamento dell'ambiente interno, l'impianto che alimenta il flusso d'acqua all'interno della cavità viene attivato al fine di ridurre il valore di g e quindi l'eccesso di calore all'interno. L'acqua però viene in parte riscaldata da questo calore in eccesso che deve essere smaltito e perciò ritorna nella piscina dove evapora, questa strategia è applicabile solamente in zone in cui la temperatura esterna non è troppo elevata (come ad esempio in Bulgaria). Nel caso il sistema non fosse sufficiente a raggiungere la temperatura desiderata si attiva l'impianto di backup.

2.3. Sistemi utilizzanti materiali in cambiamento di fase

Benché l'acqua abbia una grande capacità termica per accumulare calore sensibile, questa sua capacità è piccola in confronto a ciò che si riesce ad immagazzinare in sistemi di accumulo di calore latente che utilizzano materiali in cambiamento di fase (PCM). Questa tecnologia trova quindi un'ampia applicazione sull'involucro edilizio potendo essere usata sia per ridurre i carichi di raffrescamento e di riscaldamento inserendola sia su superfici opache o trasparenti. Inoltre, le superfici contenenti la sostanza PCM mantengono la propria temperatura costante migliorando di conseguenza il comfort termico dell'ambiente interno. I PCM possono essere organici o inorganici: poiché i primi sono solitamente corrosivi e instabili, mentre i secondi sono infiammabili e con basse capacità di stoccaggio in fase di progettazione bisogna tenere conto di questi aspetti. Di seguito verranno analizzate due tecnologie che utilizzano i PCM, una applicata ad una superficie trasparente mentre l'altra su una superficie opaca.

2.3.1. PCM in superfici vetrate

In questa tecnologia si utilizza un materiale a cambiamento di fase nella cavità presente in un sistema a doppio vetro o a triplo vetro. I PCM nelle superfici vetrate hanno diversi effetti benefici tra cui aumentare la massa termica dell'elemento, con quindi di conseguenza una riduzione della temperatura della superficie di picco che viene anche ritardata. Il PCM interagisce con la radiazione solare riducendola agendo contemporaneamente come da dispositivo di schermature e mezzo di accumulo di calore. Quando allo stato solido il materiale blocca la radiazione solare e assorbe calore portandolo alla temperatura per farlo liguefare. Durante questo processo una grande quantità di calore viene immagazzinata nel materiale, questo calore è un carico di raffrescamento del periodo estivo che viene ridotto. Il cambiamento di fase inoltre porta a una variazione delle proprietà ottiche del materiale in particolare il coefficiente di trasmissione del sistema aumenta. Ciò permette ad una maggiore radiazione solare di entrare nell'ambiente. In assenza di radiazione solare il PCM solidifica e rilascia il calore assorbito che viene rilasciato in parte verso l'ambiente interno e in parte verso l'esterno. Oltre a migliorare le prestazioni energetiche dell'edificio l'inserimento di PCM nel sistema vetrato ha un effetto positivo anche sul comfort interno. Tuttavia, bisogna progettare il sistema con un PCM la cui temperatura fi cambiamento di fase si adeguata alla località. In particolare, durante il periodo estivo se la fusione completa del materiale avviene prima del tramonto si può causare un aumento della temperatura che peggiori le condizioni di comfort, ma questo effetto invece risulta utile nel periodo invernale. Uno dei problemi riscontrati per questa tecnologia è il controllo del flusso di calore rilasciato nel periodo notturno che in base alla stagione si preferisce in una direzione rispetto ad un'altra (in estate verso l'esterno mentre in inverno verso l'interno), una possibile soluzione è quella di utilizzare uno strato termotropico. Uno studio effettuato dal Politecnico di Torino Goia ed altri (2013) ha analizzato il comportamento nel periodo estivo di un triplo vetro con PCM con uno strato termotropico, con due configurazioni distinte PCM inserito nella cavità esterna o nella cavità più interna, in confronto ad un semplice triplo vetro e un triplo vetro con solo lo strato termotropico. In particolare, sono stati analizzati i principali parametri dei componenti vetrari cioè il coefficiente di trasmissione e il fattore solare (g-value) e gli effetti sul comfort interno dell'ambiente.



Fig.2.39. Vetro contenente un PCM allo stato solido a sinistra a destra mentre il PCM cambia fase

Il coefficiente di trasmissione solare τ per la tecnologia di riferimento sistema a triplo vetro risulta un valore compreso tra 0.3 e 0.4, mentre per il sistema termotropico risulta 0.19 se non attivo e 0.14 se attivo. Già tra questi due si può notare un dimezzamento della radiazione solare diretta che penetra nell'ambiente. In presenza di PCM invece la riduzione del tau aumenta ma va precisato che nella configurazione in cui il PCM si trova nella cavità più interna non riesca ad assorbire sufficiente calore da cambiare fase e quindi risulta sempre solido e quindi il valore di tau risulta costante in questa configurazione. In Fig.2.40. sono riportati le tendenze dei valori di tau per il vetro PCM in funzione della temperatura nelle due configurazioni.



Fig. 2.40. Valori del coefficiente di trasmissione del vetro con PCM quando è posizionato nell'intercapedine esterno o nell'intercapedine interno

Il g-value invece è schematizzato nella fig.2.41. in questo caso il valore riportato è un valore medio giornaliero valutato sperimentalmente. Si può notare come questo caso nuovamente il valore per PCM lato

interno sia pressoché costante (No cambiamento di fase) mentre per il PCM lato esterno riporta dei valori maggiori.



Fig. 2.41. Valori del coefficiente g del vetro nelle varie configurazioni

Una riduzione del valore di g comporta ad una riduzione della quota di calore prodotta dalla radiazione che riesce effettivamente ad entrare nell'ambiente si nota come quindi un normale triplo vetro permetta a circa il 0.45 della radiazione solare di entrare nell'ambiente mentre con un triplo vetro con PCM e strato termotropico porti il valore a circa 0.15. questo comporta ad una notevole riduzione del carico di raffrescamento.

2.3.2. PCM in superfici opache

In questo caso si inserisce il materiale che cambia fase all'interno dell'involucro opaco dell'edificio, sui muri definiti leggeri questa soluzione permette analogamente alle superfici vetrate di aumentare l'inerzia termica del sistema. La possibilità di risparmio energetico per l'involucro opaco è legata anche allo sfasamento e alla riduzione del picco di temperatura di quest'ultimo rispetto al picco temperatura dell'aria esterna. Questa capacità di attenuazione dipende dalla capacità di stoccaggio dell'involucro che risulta molto bassa nei muri leggeri.

Uno studio effettuato da Dirk Saelens (2008) ha confrontato nel periodo estivo le prestazioni di un muro dotato di PCM posizionato in punti diversi rispetto uno privo, in Fig.2.42. sono riportate le varie configurazioni analizzate nello studio.



Fig.2.42. Stratigrafie studiate nell'esperimento

Uno dei risultati più significativi ottenuti da questo studio è le prestazioni del PCM migliorano quando le temperature delle superfici a contatto sono vicine alla temperatura di fusione del PCM scelto. Inoltre, i maggiori risparmi si sono ottenuti nel mese più caldo, in cui si è ottenuto un risparmio di consumo energetico di circa il 60 %. In assenza di radiazione solare inoltre si è riscontrato che l'effetto di risparmio sia molto mitigato. Ne consegue che nella progettazione del materiale da usare è molto utile tenere conto della temperatura di fusione del materiale usato. In generale un PCM con temperatura di fusione bassa da buone prestazioni in Inverno ma basse in estate, e viceversa per un PCM ad alta temperatura di fusione. Una possibile strategia che si può attuare è di inserire all'interno dell'involucro due strati di PCM con temperature di fusione diverse in modo da sfruttare maggiormente le proprietà di uno durante il periodo di raffrescamento e dell'altro nel periodo di riscaldamento.

3. Caso Studio

3.1. Introduzione

Come si è notato esistono molte tecnologie e strategie in grado di ottenere un effetto di riduzione di temperatura superficiale e conseguente riduzione del carico di raffrescamento. Molte di queste sono semplicemente la combinazione di più tecnologie. Il caso studio preso in esame consiste in una facciata ventilata realizzata in calcestruzzo poroso che allo stesso tempo viene irrigata da acqua prelevata dell'acquedotto in un circuito aperto. L'obiettivo di questa parete è quello di ridurre i carichi termici solari nel periodo estivo e allo stesso tempo ridurre le temperatura superficiali della parete stessa. A tale scopo la parete funge da sistema di schermatura dalla radiazione solare e allo stesso tempo, per via della sua particolare geometria, permette all'intercapedine formatasi tra la parete e l'edificio stesso di essere ventilata e inoltre sfruttando l'irrigazione dell'acqua la parete produce un effetto di raffrescamento evaporativo.

Per valutare le prestazioni di questo sistema di seguito definito Water Wall (WW) è stata effettuata una caratterizzazione sperimentale nel periodo estivo.

3.2. Obiettivi della caratterizzazione sperimentale

Il sistema è stato studiato attraverso una caratterizzazione sperimentale, a tale fine il sistema è stato posizionato su una cella di prova, che simuli le condizioni dell'ambiente interno di un edificio, situata sul tetto piano del Dipartimento di Energia (DENERG) del Politecnico di Torino. Il campione è orientato verso Sud dove non sono presente ostruzioni esterne. Per ottenere dei dati il sistema è stato collegato a un sistema di raccolta dati che permette di misurare diverse grandezze tra cui: temperature, flussi termici, umidità relativa e dati meteo della località.

3.3. Sistema sperimentale

3.3.1. Cella di Prova

La cella di prova chiamata "TWINS" (Fig. 3.1) permette di valutare le prestazioni termiche in sistemi sia opache sia trasparenti esposti all'ambiente esterno. La cella di prova consiste in un modulo prefabbricato costituito da tre muri opachi e uno trasparente e su quest'ultimo, che è orientato verso Sud, è stato posizionato il campione di WW. Le dimensioni della cella sono le seguenti:

- Lunghezza 3.6 m
- Larghezza 1.6 m
- Altezza 2.5 m

La cella è dotata di un sistema HVAC che permette di controllare la temperatura interna con un range di ± 1 °C.



Fig. 3.1. Vista frontale delle celle di prova "TWINS"

3.3.2. Campione di Water Wall

Il campione di Water Wall (WW) installato consiste in due blocchi di calcestruzzo posizionati a 1.5 m dalla superficie vetrata della cella creando uno spazio non condizionato denominato "cavità". Ai fini dell'analisi il blocco superiore è stato chiamato "A" mentre quello inferiore "B". I due blocchi, una volta installati, sono separati da una certa distanza . A seguito di una prima preliminare analisi è stato suggerito di rieseguire alcune misurazioni con una nuova geometria in cui la distanza tra i due blocchi è stata ridotta. Queste due geometrie sono state denominate geometria "Open" (Fig.3.2a.) e geometria "Closed" (Fig.3.2b.).



Fig. 3.2a. Vista frontale del campione WW geometria "Open"



Fig. 3.2b. Vista frontale del campione WW geometria "Closed"

3.3.3. Sistema raccolta dati

Lo strumento usato per la raccolta dati è un DataTaker DT85 collegato ad un modulo di espansione in modo da aumentare il numero di sensori che possono essere collegati (Fig. 3.3.). Le temperature sono state misurate con l'ausilio di 33 termocoppie di tipi J (con una incertezza di misura di ±0.25 °C)(Fig. 3.4. E 3.5.). I flussi termici sono stati misurati invece con un termoflussimetro (HFP-01) (Fig.3.6.), l'umidità relativa all'interno della cavità è stata misurata da uno strumento denominato TESTO 175-H1. Un piranometro LP02 è stato usato per misurare la radiazione solare globale incidente sulla facciata. Inoltre, i dati climatici esterni (temperatura, umidità relativa, velocità e direzione del vento) sono stati ottenuti dalla stazione climatica del Politecnico di Torino.

In Fig. 3.7. è riportato uno schema dei sensori e dove questi sono posizionati, in Fig. 3.8. è inoltre riportato uno schema semplificato. In aggiunta, la tabella 3.1. riporta una lista dei sensori con un'indicazione su quale canale del data logger sono collegati, il loro nome e una breve descrizione.



Fig. 3.3. DataTaker e la sua espansione



Fig. 3.4. Vista frontale dei sensori di temperatura sulla superficie esterna





Fig. 3.5. Sensore superficiale esterno schermato con un nastro riflettente



Fig. 3.6. termoflussimetro e termocoppia sul componente vetrato



Fig.3.7. Schema dei sensori



Fig. 3.8. schema 3D semplificato dei sensori

Code	Door	Sensor description					
Tsi_b_dx	2*	Inside surface temperature lower block midway point at right					
Tsi_b_sx	2+	Inside surface temperature lower block midway point at left					
Tsi_b_m2	2-	Inside surface temperature lower block midway point					
Tse_b_m3	3*	External surface temperature lower block inferior point					
Ti	3+	Internal temperature					
Те	3-	External temperature					
Tse_b_m1	4*	External surface temperature lower block superior point					
Tsi_a_m1	4+	Inside surface temperature upper block superior point					
Tse_a_m1	4-	External surface temperature upper block superior point					
Tse_b_m2	5*	External surface temperature lower block midway point					
Tse_b_sx	5+	External surface temperature lower block midway point at left					
Tse_b_dx	5-	External surface temperature lower block midway point at right					
Tsi_b_m3	6*	Inside surface temperature lower block inferior point					
Tsi_a_m3	6+	Inside surface temperature upper block inferior point					
Tse_a_m3	6-	External surface temperature upper block inferior point					
Tse_a_m2	7*	External surface temperature upper block midway point					
Tse_a_sx	7+	External surface temperature upper block midway point at left					
Tse_a_dx	7-	External surface temperature upper block midway point at right					
Tsi_a_m2	8*	Inside surface temperature upper block midway point					
Tsi_a_sx	8+	Inside surface temperature upper block midway point at left					
Tsi_a_dx	8-	Inside surface temperature upper block midway point at right					
Tse_v_1	9*	Upper external surface glass temperature					
Tsi_b_m1	9+	Inside surface temperature lower block superior point					
Tse_v_2	9-	Midway external surface glass temperature					
Tsi_v_1	10*	Upper internal surface glass temperature					
Tse_v_3	10+	Lower external surface glass temperature					
Tsi_v_2	10-	Midway internal surface glass temperature					
Tcav1	11*	Upper cavity temperature					
Tsi_v_3	11+	Lower internal surface glass temperature					
Tcav2	11-	Midway cavity temperature					
Tcav3	12+	Lower cavity temperature					
R2	12-	Water temperature inferior pipe					
R1	12*	Water temperature superior pipe					
HF_1	101	heat flux meter superior					
HF_2	102	heat flux meter midway					
HF_3	103	heat flux meter inferior					
Qsol	104	External pyranometer					

Tabella 3.1. Lista dei sensori

3.3.4. Sistema di pompaggio e irrigazione

Il Sistema di pompaggio è composto da tue tubazioni in polietilene forate per permettere la fuoriuscita d'acqua (Fig. 3.10.). Alle tubazioni è stata data una forma che segue il profilo del blocco in calcestruzzo e la distanza tra le tubazioni e i blocchi è all'incirca costante. Il Sistema è controllato da un alesametro che permette la regolazione del flusso d'acqua che attraversa le tubazioni. Per evitare che la radiazione solare incidente surriscaldi troppo l'acqua, le tubazioni sono state schermate con nastro alluminato riflettente. Durante il primo periodo di prova si è notato che il sistema una volta attivo non permetteva la caduta dell'acqua su tutto il blocco sottostante (e successivamente dal blocco superiore a quello inferiore) in quanto l'acqua in uscita dalle tubazioni aderiva alla superficie per effetto Coanda. Per risolvere ciò si è usato del nastro adesivo sulle tubazioni che funge da sistema di controllo per la caduta dell'acqua.





Fig. 3.11. Vista del Sistema WW con il sistema di pompaggio attivo.

3.4. Metodologie di analisi dei dati

Al fine di analizzare le prestazioni del sistema diversi criteri sono stati utilizzati.

3.4.1. Analisi delle temperature

Due tipologie differenti di confronto sulle temperature sono state fatte:

1. Profilo giornaliero della temperatura dove si confronta il profilo giornaliero della temperatura della configurazione del WW a secco (configurazione dry) con quella del sistema WW con l'acqua attiva (water system ON configuration)

2. Distribuzione delle temperature nelle varie sezioni del campione a delle ore specifiche (in particolare dalle 9:00 alle 18:00 ogni tre ore).

3.4.2. Analisi dell'umidità relativa

Il profilo giornaliero dell'umidità relativa è stato analizzato, con lo scopo di controllare le condizioni igrometriche nella cavità. (questa analisi è stata effettuata solo nella geometria "Open" in quanto i dati della geometria "Closed" sono assenti per esaurimento memoria dello strumento che avrebbe dovuto raccogliere i dati).

3.4.3.Temperatura normalizzata

La temperatura normalizzata $T_{x,N}$ è definita come:

$$T_x^* = T_{x,N} = \frac{T_x}{T_{sa}}$$
 (3.1)

Dove T_{sa} è la temperatura sole-aria:

$$T_{sa} = T_{ext} + Q_{sol} \cdot \frac{\alpha}{h_e}$$
 (3.2)

Il valore di α (coefficiente di assorbimento solare per componenti opachi) usato è quello fornito dalla ditta produttrice del campione. Mentre h_e (coefficiente di scambio termico liminare) è stata calcolata utilizzando la formula di Mc Adams trovata in M. Mirsadeghi ed altri (2013) per valutare la componete convettiva, mentre per quella radiativa è stato utilizzato un valore standard medio:

0 0

$$\alpha = 0.3$$

$$h_{e} = h_{c} + h_{r} \frac{W}{m^{2} \cdot K} (3.3)$$

$$h_{r} = 4 \frac{W}{m^{2} \cdot K} (3.4)$$

$$h_{c} = 5.678 \cdot (m + n \cdot \left(\frac{V_{f}}{0.3048}\right)^{p} (3.5)$$

Dove V_f è la velocità del vento dove il flusso non è disturbato da ostruzioni e m,n,p sono coefficienti empirici forniti nella seguente tabella.

	V_f < 4.88 m/s (16 ft/s)			4.88 m/s (16 ft/s) $\leq V_f <$ 30.48 m/s (100 ft/s)		
Surface type	m	n	р	m	n	р
Smooth	0.99	0.21	1	0	0.50	0.78
Rough	1.09	0.23	1	0	0.53	0.78

Questo indice è valido solo se la T_{sa} non è mai minore di quella dell'acqua.

$$T_{sa} \leq T_{water}$$

Un altro limite di validità del modello è che le temperature non raggiungono mai il valore di 0 °C, cosa che si verifica nei periodi di richiesta di raffrescamento.

3.4.4.Rendimento di riduzione di temperatura

Rappresenta la riduzione percentuale della temperatura in una sezione definita rispetto alla temperatura sole-aria.

$$\eta = \frac{T_{sa} - T_x}{T_{sa}} (3.6)$$

Questo indice è il complemento a 1 della temperatura normalizzata in questo caso un aumento di questo valore significa un incremento delle prestazioni.

3.4.5.Riduzione di temperatura rispetto alle condizioni a secco

Questo indice è il rapporto tra la temperatura normalizzata della prova in esame (con una certa portata d'acqua) e la temperatura normalizzata della configurazione di riferimento a secco. L'indice indica di quanto la temperatura della superficie del muro ad una certa portata sia ridotta rispetto al caso a secco, può essere quindi definita come un'efficienza di riduzione rispetto alla configurazione di riferimento. Grazie a questa normalizzazione l'indice è indipendente dalle condizioni al contorno del giorno in esame.

$$\delta = \frac{\frac{T_x}{T_{sa}}}{\frac{T_{dry}}{T_{sa}}} = \frac{T_x^*}{T_{dry}^*} (3.7)$$

4. Risultati della campagna sperimentale

In questa sezione sono riportate le temperature misurate durante il periodo di misurazione e sono stati eseguiti dei confronti tra le temperature misurate in presenza di una portata d'acqua con quelle di un giorno preso come di riferimento.

4.1 Configurazione "Open"

Il periodo di monitoraggio è di 37 giorni con campionamento di 15 minuti, durante il quale sono stati eseguiti diversi test:

1. Controllo preliminare della temperatura interna della cella e del corretto funzionamento dei sensori (12 giorni: dal 14 al 26 Giugno). Durante questo periodo il sistema di pompaggio è stato installato.

2. Misurazioni a secco "Dry configuration" (10 giorni dal 27 Giugno al 5 Luglio). In questa fase, i valori misurati sono stati usati per generare la configurazione di riferimento la cosiddetta "dry configuration", che è stata usata come termine di paragone con le configurazioni aventi le varie portate. I risultati sono riportati in Fig. 4.1.

3. Misurazioni con le varie portate "Water system ON configuration" (8 giorni: dal 12 al 20 Luglio). In questa fase le temperature e i flussi termici sono stata misurati con il sistema di pompaggio in diverse configurazioni:

- a. Water Wall a 250 l/h
- b. Water Wall a 500 l/h
- c. Water Wall a 750 l/h
- d. Water Wall a 1000 l/h

Uno schema temporale di queste misurazioni è riportato in Fig. 4.1.



Fig. 4.1. Giorni selezionati per la configurazione a secco (dry configuration).



Fig. 4.1. Giorni selezionati per la configurazione a con sistema di pompaggio attivo (water system ON configurations).

Di seguito sono riportati i risultati delle misurazioni effettuate; i risultati sono rappresentati in due modi differenti:

- Un'analisi giornaliera in cui si confronta istante per istante l'andamento delle temperature misurate sulla parete tra la "dry configuration" e "water system ON configuration" su due giorni considerati confrontabili.

Un'analisi puntuale su ciascun layer del campione in quattro orari fissi di riferimento.

In tutti I seguenti grafici la stessa legenda è utilizzata



Questi grafici permettono di avere un'idea di quanto il sistema di pompaggio riesca a ridurre le temperature analizzate rispetto alle condizioni a secco controllando allo stesso tempo le condizioni al contorno delle giornate prese per il confronto.

4.1.1. Configurazione di riferimento (dry)

Per la "dry configuration" i dati ambientali dei due giorni selezionati sono rappresentati nelle Fig. 4.1.1 e 4.1.2.







Fig. 4.1.2. Giorno di riferimento 4 luglio

4.1.2. Water Wall geometria open a 250 l/h

4.1.2.1. Analisi profilo temporale

In questa analisi, I risultati di temperatura sono confrontati con la configurazione di riferimento (Dry) (Fig. 4.1.2.1.) I due giorni sono stati scelti in modo tale che le condizioni al contorno siano il più possibile simili.

La temperatura esterna del blocco superiore (Fig. 4.1.2.2.) con una portata d'acqua di 250 l/h è soggetta a un decremento massimo di temperature di 13 °C durante le ore di picco, mentre la temperatura interna decresce fina a portarsi quasi a quella dell'acqua (Fig. 4.1.2.3).Un risultato simile si nota per il blocco B (Fig. 4.1.2.4. e 4.1.2.5.).

Invece la temperatura della cavità (Fig. 4.1.2.6. e 4.1.2.7.) subisce una riduzione di temperature di circa 2 °C rispetto a quella esterna, mentre nel caso di riferimento la temperatura della cavità è quasi uguale a quella dell'aria esterna.

Il componente vetrato ha un comportamento simile a quello della cavità ma è comunque influenzato dalla temperatura mantenuta all'interno della cella.(Fig. 4.1.2.8.).

È significativo notare che l'umidità relativa della cavità nella condizione di portata di 250 l/h non sia interessata ad un aumento significativo. (Fig. 4.1.2.9.).



Fig. 4.1.2.1. Confronto delle condizioni al contorno dei due giorni. Il giorno di riferimento è il 4 luglio mentre il giorno con il WW irrigato a 250 l/h è il 17 luglio.



Fig. 4.1.2.2. Temperatura superficiale esterna del blocco superiore(T_{se,A})



Fig. 4.1.2.3 Temperatura superficiale interna del blocco superiore (T_{si,A}).



Fig. 4.1.2.4. Temperatura superficiale esterna del blocco Inferiore (T_{se,B})





Fig. 4.1.2.6. Temperatura zona superiore della cavità





Fig. 4.1.2.7. Temperatura superficiale esterna del vetro



Fig. 4.1.2.9. Umidità relativa all'interno della cavità, la zona a sinistra del grafico non deve essere considerate in quanto il giorno precedente è piovuto provocando questo aumento di umidità.

4.1.2.2 Analisi puntuale alle varie ore

In questa analisi sono state confrontate le temperature di ciascuno strato rispetto a quelle del giorno di riferimento, per le ore:

- 9:00
- 12:00
- 15:00
- 18:00

Alle 9:00 (Fig. 4.1.2.10. e 4.1.2.16.) la temperatura esterna e la radiazione solare non sono molto elevate, ne consegue che l'effetto dell'acqua non sia molto efficiente (perciò, per risparmiare sui costi di pompaggio, è da considerare utile attivare il Sistema di pompaggio solo in condizioni di alta temperatura esterna e radiazione solare).

Per le 12:00 (Fig. 4.1.2.11. e 4.1.2.17.) si può notare una riduzione più significativa della temperatura del muro di circa 6 °C.

Alle 15:00 e 18:00 (Fig. 4.1.2.12., 4.1.2.13., 4.1.2.18. e 4.1.2.19) che sono le ore in cui la temperatura esterna raggiunge il suo massimo la riduzione di temperatura sulla superficie esterna ed interna è tra ~10 e ~13 °C .



Fig. 4.1.2.10. Temperatura alle 9:00 blocco superiore





Fig. 4.1.2.11. Temperatura alle 12:00 blocco superiore





Fig. 4.1.2.14. Temperatura del blocco superiore alle varie ore a portata di 250 l/h



Fig. 4.1.2.15. Temperature del blocco superiore nel giorno di riferimento







Fig. 4.1.2.18. Temperatura alle 15:00 blocco inferiore



Fig. 4.1.2.17. Temperatura alle 12:00 blocco inferiore



Fig. 4.1.2.19. Temperatura alle 18:00 blocco inferiore



Fig. 4.1.2.20. Temperatura del blocco inferiore alle varie ore a portata di 250 l/h



Fig. 4.1.2.21. Temperatura del blocco inferiore alle varie ore nel giorno di riferimento

4.1.3 Water Wall geometria open a 500 l/h

4.1.3.1 Analisi profilo temporale

In questa analisi, nuovamente, i risultati di temperatura sono confrontati con la configurazione di riferimento (Dry) (Fig. 4.1.3.1.) I due giorni scelti non hanno condizioni al contorno molto simili in particolare la radiazione solare è molto variabile mentre le temperature esterne sono molto simili.

La temperatura esterna del blocco superiore (Fig. 4.1.3.2.) con una portata d'acqua di 500 l/h è soggetta a un decremento massimo di temperature di 12 °C durante le ore di picco, mentre la temperatura interna decresce fina a portarsi quasi a quella dell'acqua (Fig. 4.1.3.3).Un risultato simile si nota per il blocco B (Fig. 4.1.3.4. e 4.1.3.5.).

Invece la Temperatura della cavità (Fig. 4.1.3.6. e 4.1.3.7.) subisce una riduzione di temperature di circa 4 °C rispetto a quella esterna, mentre nel caso di riferimento la temperatura della cavità è quasi uguale a quella dell'aria esterna.

Il componente vetrato ha un comportamento simile a quello della cavità.(Fig. 4.1.3.8.).

È significativo notare che l'umidità relativa della cavità nella condizione di portata di 500 l/h sia interessata ad un aumento in particolare nella zona inferiore della cavità, in quanto la zona inferiore della cavità è interessata da una maggiore quantità d'acqua (blocco superiore e blocco inferiore). (Fig. 4.1.3.9.).



Fig. 4.1.3.1. Condizioni al contorno per I due giorni selezionati. Il giorno di riferimento è il 28 Giugno mentre quello per il giorno con il sistema di pompaggio attivo con 500 l/h è il 15 luglio.



Fig. 4.1.3.2. Temperatura superficiale esterna del blocco superiore (T_{se,A}).



Fig. 4.1.3.3. Temperatura superficiale interna del blocco superiore (T_{si,A}).



Fig. 4.1.3.4. Temperatura superficiale esterna del blocco inferiore (T_{se,B}).



Fig. 4.1.3.5. Temperatura superficiale interna del blocco inferiore (T_{si,B}).



Fig. 4.1.3.6. Temperatura della cavità superiore (T_{cav})







Fig. 4.1.3.8. Temperatura superficiale del vetro (Tglass)



Fig. 4.1.3.9. Umidità relativa nella cavità. (a) cavità superiore, (b) cavità inferiore.

4.3.2. Analisi puntuale alle varie ore

In questa analisi sono state confrontate le temperature di ciascuno strato rispetto a quelle del giorno di riferimento, per le ore:

- 9:00
- 12:00
- 15:00
- 18:00

Alle 9:00 (Fig. 4.1.3.10. e 4.1.3.16) come nel caso precedente la temperatura non è soggetta a una riduzione significativa .

Per le 12:00 (Fig. 4.1.3.11. e 4.1.3.17.) si può notare una riduzione più significativa della temperatura del muro di circa 10 °C rispetto ai 6 °C del caso con 250 l/h, ma questo è anche legato al giorno preso in esame che risulta non molto simile a quello di riferimento.

Alle 15:00 e 18:00 (Fig. 4.1.3.12., 4.1.3.13., 4.1.3.18. e 4.1.3.19) che sono le ore in cui la temperatura esterna raggiunge il suo Massimo la riduzione di temperatura raggiunge di 15°C (T_{se}) e 13°C (T_{si}) alle 15:00 e di 13°C (T_{se}) e 12°C (T_{si}) alle 18:00.



Fig. 4.1.3.10. Temperatura alle 9:00 blocco superiore.



Fig. 4.1.3.12. Temperatura alle 15:00 blocco superiore.



Fig. 4.1.3.11. Temperatura alle 12:00 blocco superiore.



Fig. 4.1.3.13. Temperatura alle 18:00 blocco superiore.



Fig. 4.1.3.14. Temperatura del blocco superiore alle varie ore a portata di 500 l/h



Fig. 4.1.3.15. Temperature del blocco superiore nelle varie ore del giorno di riferimento.



Fig. 4.1.3.16. Temperatura alle 9:00 blocco inferiore.



Fig. 4.1.3.18. Temperatura alle 15:00 blocco inferiore.



Fig. 4.1.3.17. Temperatura alle 12:00 blocco inferiore.



Fig. 4.1.3.19. Temperatura alle 18:00 blocco inferiore.



Fig. 4.1.3.20. Temperatura del blocco inferiore alle varie ore a portata di 500 l/h



Fig. 4.1.3.21. Temperature del blocco inferiore nelle varie ore del giorno di riferimento.

4.1.4. Water Wall geometria open a 750 l/h

4.1.4.1. Analisi profilo temporale

In questa analisi, I risultati di temperatura sono confrontati con la configurazione di riferimento (Dry) (Fig. 4.1.4.1.) I due giorni sono stati scelti in modo tale che le condizioni al contorno siano il più simile possibile.

La temperatura esterna del blocco superiore (Fig. 4.1.4.2.) con una portata d'acqua di 750 l/h è soggetta a un decremento massimo di temperature di 15 °C durante le ore di picco, mentre la temperatura interna decresce fina a portarsi quasi a quella dell'acqua (Fig. 4.1.4.3).Un risultato simile si nota per il blocco B (Fig. 4.1.4.4. e 4.1.4.5.).

Invece la Temperatura della cavità (Fig. 4.1.4.6. e 4.1.4.7.) subisce una riduzione di temperature di circa 4 °C rispetto a quella esterna, mentre nel caso di riferimento la temperatura della cavità è quasi uguale a quella dell'aria esterna, risultato analogo a quello della configurazione a 500 l/h

Il componente vetrato ha un comportamento simile a quello della cavità, ma verso le ore più tarde della giornata sente l'effetto del malfunzionamento della cella e quindi si alza di temperatura.(Fig. 4.1.4.8.).

È significativo notare che l'umidità relativa della cavità nella condizione di portata di 750 l/h sia interessata ad un aumento in particolare nella zona inferiore della cavità. (Fig. 4.1.4.9.).



Fig. 4.1.4.1. Condizioni al contorno per I due giorni selezionati. Il giorno di riferimento è il 4 luglio mentre quello per il giorno con il sistema di pompaggio attivo con 750 l/h è il 19 luglio.



Fig. 4.1.4.2. Temperatura superficiale esterna del blocco superiore (T_{se,A}).



Fig. 4.1.4.3. Temperatura superficiale interna del blocco superiore ($T_{si,A}$).


Fig. 4.1.4.4. Temperatura superficiale esterna del blocco inferiore (T_{se,B}).



Fig. 4.1.4.5. Temperatura superficiale interna del blocco inferiore $(T_{si,B})$.



Fig. 4.1.4.6. Temperatura cavità superiore (T_{cav})



Fig. 4.1.4.7. Temperatura cavità inferiore (T_{cav})



Fig. 4.1.4.8. Temperatura superficiale esterna del vetro (T_{glass})



Fig. 4.1.4.9. Umidità relativa nella cavità. (a) cavità superiore, (b) cavità inferiore.

4.4.2. Analisi puntuale alle varie ore

In questa analisi sono state confrontate le temperature di ciascuno strato rispetto a quelle del giorno di riferimento, per le ore:

- 9:00
- 12:00
- 15:00

-

- 18:00

Il comportamento della facciata con una portata d'acqua di 750 l/h è praticamente lo stesso della portata di 500 l/h per tutte le ore selezionate (9:00 - Fig. 4.1.4.10. e 4.1.4.16., 12:00 - Fig. 4.1.4.11. e 4.1.4.17., 15:00 e 18:00 - Fig. 4.1.4.12., 4.1.4.13., 4.1.4.18. e 4.1.4.19.).



Fig. 4.1.4.10. Temperature alle ore 9:00 blocco superiore



Fig. 4.1.4.12. Temperature alle ore 15:00 blocco superiore



Fig. 4.1.4.11. Temperature alle ore 12:00 blocco superiore



blocco superiore



Fig. 4.1.4.15. Temperature del blocco superiore nelle varie ore del giorno di riferimento.



Fig. 4.1.4.20. Temperatura del blocco inferiore alle varie ore a portata di 750 l/h



Fig. 4.1.4.21. Temperature del blocco inferiore nelle varie ore del giorno di riferimento.

4.1.5. Water Wall geometria open a 1000 l/h

4.1.5.1. Analisi profilo temporale

In questa analisi, l'risultati di temperatura sono confrontati con la configurazione di riferimento (Dry) (Fig. 4.1.5.1.) I due giorni sono stati scelti in modo tale che le condizioni al contorno siano il più simile possibile.

La temperatura esterna del blocco superiore (Fig. 4.1.5.2.) con una portata d'acqua di 1000 l/h è soggetta a un decremento massimo di temperature di 15 °C durante le ore di picco, mentre la temperatura interna decresce fina a portarsi quasi a quella dell'acqua (Fig. 4.1.5.3).Un risultato simile si nota per il blocco B (Fig. 4.1.5.4. e 4.1.5.5.).

SI può osservare che non c'è una significativa differenza nel comportamento della facciata rispetto al caso di 750 l/h (Temperatura della cavità Fig.4.1.5.6. e 4.1.15.7., temperatura del vetro Fig. 4.1.5.8., RH nella cavità Fig.4.1.5.9.).



Fig. 4.1.5.1. Condizioni al contorno per I due giorni selezionati. Il giorno di riferimento è il 4 luglio mentre quello per il giorno con il sistema di pompaggio attivo con 1000 l/h è il 18 luglio.







Fig. 4.1.5.3. Temperatura superficiale interna blocco superiore (T_{si,A}).







Fig. 4.1.5.5. Temperatura superficiale interna blocco inferiore $(T_{si,B})$.









Fig. 4.1.5.8. Temperatura superficiale esterna del vetro (Tglass)



Fig. 4.1.5.9. Umidità relativa nella cavità.(a) cavità superiore,(b) cavità inferiore

4.1.5.2 Analisi puntuale alle varie ore

In questa analisi sono state confrontate le temperature di ciascuno strato rispetto a quelle del giorno di riferimento, per le ore:

- 9:00
- 12:00
- 15:00

-

- 18:00

Nuovamente non si riscontra una significativa differenza con i casi di 500 e 750 l/h (9:00 - Fig. 4.1.5.10. e 4.1.5.16, 12:00 - Fig. 4.1.5.11. e 4.1.5.17., 15:00 e 18:00 - Fig. 4.1.5.12., 4.1.5.13., 4.1.5.18. e 4.1.5.19)



Fig. 4.1.5.10 Temperature alle 9:00 blocco superiore



Fig. 4.1.5.12. Temperature alle 15:00 blocco superiore



Fig. 4.1.5.13. Temperature alle 18:00 blocco superiore



Fig. 4.1.5.14. Temperatura del blocco superiore alle varie ore a portata di 1000 l/h



Fig. 4.1.5.15. Temperature del blocco superiore nelle varie ore del giorno di riferimento.



Fig. 4.1.5.16. Temperature alle 9:00 blocco inferiore



Fig. 4.1.5.18. Temperature alle 15:00 blocco inferiore



inferiore



Fig. 4.1.5.20. Temperatura del blocco inferiore alle varie ore a portata di 1000 l/h



Fig. 4.1.5.21. Temperature del blocco superiore nelle varie ore del giorno di riferimento.

4.1.6. Confronto tra le varie portate nelle ore di picco (15:00 e 18:00)

Nei grafici seguenti le temperature della configurazione dry sono confrontate con quelle del sistema WW con portate d'acqua crescenti nelle ore di picco.

Dai grafici è visibile come l'incremento di portata sia in grado di ridurre le temperature superficiale interne ed esterne del muro di una quantità significativa, da 10 °C per 250 l/h fino a 14 °C per 500 l/h. Mentre per la cavità la temperatura dell'aria diminuisce tra 2 e 6 °C (dipende se blocco superiore o inferiore e dall'ora). Oltre la portata di 500 l/h non si nota una significativa riduzione rispetto a quest'ultima.



Fig. 4.1.6.1. Temperature a tutte le portate alle ore 15:00 blocco superiore



Fig. 4.1.6.2. Temperature a tutte le portate alle ore 15:00 blocco inferiore



Fig. 4.1.6.3. Temperature a tutte le portate alle ore 18:00 blocco superiore



Fig. 4.1.6.4. Temperature a tutte le portate alle ore 18:00 blocco inferiore

4.2.Configurazione "Close"

Il periodo di monitoraggio è di 7 giorni con campionamento di 15 minuti. In questo periodo sono stati eseguite:

1. Misurazioni a secco "Dry configuration" (3 giorni dal 10 al 12 Settembre).

2. Misurazioni con portata di 250 l/h "water system ON configurations" (4 giorni dal 13 al 17 Settembre) .



Fig. 4.2.1. Giorni di monitoraggio scelti (dry configuration Geometria "Closed").



Fig. 4.2.2. Serie di prove effettuate per "water system ON configurations Geometria "Closed"".

In questa sezione I profili di temperatura giornalieri sono messi a confronto tra le configurazioni dry delle due geometrie.

I seguenti grafici riportano la seguente legenda:

Geomet	ria "Closed" (September)	
Geomet	ria "Open" (July)	
Solar Irr	adiance	
Externa	Temperature	
Internal	Temperature	
Solar ai	temperature	

I dati climatici esterni per la configurazione dry delle geometrie "open" e "closed" sono rappresentati nelle Fig. 4.2.3. e 4.2.4. In Fig. 4.2.5. sono riportati I due giorni a confronto, come si può notare I due giorni hanno temperature dell'aria esterna confrontabili, ma la radiazione solare presenta una significativa differenza: nel mese di luglio (geometria "open") la radiazione solare raggiunge un valore di picco intorno ai 500 W/m² mentre a settembre (geometria "closed") la radiazione solare raggiunge un picco di 700 W/m². Questo influisce fortemente sulle temperature sole aria e ciò rende un confronto diretto tra le due configurazioni non possibile.



Fig. 4.2.3. Giorno di riferimento per la geometria open 4 luglio



Fig. 4.2.4. Giorno di riferimento per la geometria "Closed" 11 settembre



Fig. 4.2.5. Confronto tra il giorno di riferimento per geometria "Open" (4 Luglio) e il giorno di riferimento per geometria "Closed" (11 Settembre)

4.2.1. Water Wall geometria "closed" a 250 l/h

I seguenti grafici seguono la seguente legenda:

Reference da	ау	
Analysed day	У	
Solar Irradia	nce	
External Ten	nperature	
Internal Terr	nperature	
Analysed Ter	mperature	

I giorni selezionati per il confronto tra la configurazione dry e la configurazione water system On con 250 l/h sono rispettivamente 11 settembre e 13 settembre.

4.2.1.1. Analisi profilo temporale

In questa analisi, I risultati di temperatura sono confrontati con la configurazione di riferimento (Dry) (Fig. 4.2.1.1.) I due giorni sono stati scelti in modo tale che le condizioni al contorno siano il più simile possibile.

La temperatura esterna del blocco superiore (Fig. 4.2.1.2.) con una portata d'acqua di 250 l/h è soggetta a un decremento massimo di temperature di 15 °C durante le ore di picco, mentre la temperatura interna decresce fina a portarsi quasi a quella dell'acqua (Fig. 4.2.1.3).Un risultato simile si nota per il blocco B (Fig. 4.2.1.4. e 4.2.1.5.).

Invece la Temperatura della cavità (Fig. 4.2.1.6. e 4.2.1.7.) subisce una riduzione di temperature di circa 2 °C rispetto a quella esterna nella zona superiore mentre si osservano circa 4°C nella zona inferiore, mentre nel caso di riferimento la temperatura della cavità è quasi uguale a quella dell'aria esterna.



Il componente vetrato ha un comportamento simile a quello della cavità.(Fig. 4.2.1.8.).

Fig. 4.2.1.1. Confronto tra le condizioni al contorno dei due giorni selezionati per la geometria "Closed". Il giorno di riferimento per la configurazione dry è 11 settembre mentre il giorno per la configurazione a 250 l/h è il 13 settembre.



Fig. 4.2.1.2. Confronto delle temperature superficiali esterne del blocco superiore (T_{se,A}) per I due giorni selezionati della Geometria "Closed".



Fig. 4.2.1.3. Confronto delle temperature superficiali interne del blocco superiore (T_{si,A}) per I due giorni selezionati della Geometria "Closed".



Fig. 4.2.1.4. Confronto delle temperature superficiali esterne del blocco inferiore (T_{se,B}) per I due giorni selezionati della Geometria "Closed".



Fig. 4.2.1.5. Confronto delle temperature superficiali interne del blocco inferiore (T_{si,B}) per I due giorni selezionati della Geometria "Closed".



Fig. 4.2.1.6. Confronto tra le temperature della cavità superiore (T_{cav,A}) per I due giorni selezionati della Geometria "Closed".



Fig. 4.2.1.7. Confronto tra le temperature della cavità inferiore (T_{cav,B}) per I due giorni selezionati della Geometria "Closed".



Fig. 4.2.1.8. Confronto tra le temperature della superficie esterna del vetro (T_{glass})) per I due giorni selezionati della Geometria "Closed".

4.2.1.2 Analisi puntuale alle varie ore

In questa analisi sono state confrontate le temperature (13 settembre) di ciascuno strato rispetto a quelle del giorno di riferimento (11 settembre), per le ore:

- 9:00
- 12:00
- 15:00
- 18:00

Alle 9:00 (Fig. 4.2.1.10. e 4.2.1.16) la temperatura esterna e radiazione solare non sono particolarmente elevati, perciò l'effetto dell'acqua risulta meno utile.

Per le 12:00 (Fig. 4.2.1.11. e 4.2.1.17.) si può notare una riduzione più significativa della temperatura del muro di circa 8 °C.

Alle 15:00 e 18:00 (Fig. 4.2.1.12., 4.2.1.13., 4.2.1.18. e 4.2.1.19) la temperatura diminuisce di 15 °C sia sul lato esterno che sul lato interno.



Fig. 4.2.1.9. Temperatura alle 9:00 blocco superiore



Fig. 4.2.1.11. Temperatura alle 15:00 blocco superiore



Fig. 4.2.1.10. Temperatura alle 12:00 blocco superiore



Fig. 4.2.1.12. Temperatura alle 18:00 blocco superiore



Fig. 4.2.1.13. Temperatura del blocco superiore alle varie ore a portata di 250 l/h (Geometria "Closed" 13 settembre)



Fig. 4.2.1.14. Temperatura del blocco superiore alle varie ore configurazione dry (Geometria "Closed" 11 settembre)



Fig. 4.2.1.15. Temperature alle 9:00 blocco inferiore



Fig. 4.2.1.17. Temperature alle 15:00 blocco inferiore



Fig. 4.2.1.16. Temperature alle 12:00 blocco inferiore



Fig. 4.2.1.18. Temperature alle 18:00 blocco inferiore



Fig. 4.2.1.19. Temperatura del blocco inferiore alle varie ore a portata di 250 l/h (Geometria "Closed" 13 settembre)



Fig. 4.2.1.20. Temperatura del blocco superiore alle varie ore configurazione dry (Geometria "Closed" 11 settembre)

5. Analisi ed elaborazione dati

In questa sezione sono stati rielaborati i dati raccolti durante la campagna sperimentale come descritto nella sezione \$ 3.4. e successivamente gli indici ottenuti sono stati sottoposti ad un analisi statistica.

5.1. Prove del mese di luglio

I risultati delle analisi dei profili giornalieri e nelle varie ore sono specifici per la località presa in esame. Per avere una descrizione più estesa delle prestazioni del WW, I dati sperimentali sono stati elaborati secondo gli indici prestazionali descritti in precedenza (sezione 3.4.)

- Temperatura Normalizzata
- Efficienza di riduzione della temperatura
- Efficienza di riduzione della temperatura in confronto alle condizioni a secco

Questi indici sono stati analizzati statisticamente usando le cumulate di frequenza. In questo modo è possibile quantificare la percentuale di tempo per cui un certo indicatore è inferiore o superiore a una specifica soglia, e inoltre si riesce in parte ad avere una maggiore comprensione delle prestazioni del WW nelle varie configurazioni (Dry e Water system ON).

Poiché la temperatura della cavità è all'incirca uguale a quella dell'aria esterna si può ipotizzare che il sistema WW rispetto all'ambiente esterno sia adiabatico e per cui non ci sia scambio di calore. Quindi l'aumento di temperatura della facciata è dovuto solamente alla radiazione solare. Sotto questa ipotesi la temperatura sole aria T_{sa} può essere considerata uguale alla temperatura superficiale esterna del WW.

$$T_{sa} = T_{ext} + Q_{sol} \cdot \frac{\alpha}{h_e} = T_{se}$$

Perciò ci si aspetta che la temperatura normalizzata della temperatura superficie esterna T_{se} sulla temperatura sole aria T_{sa} abbia un valore medio pari a 1 quando il campione si trova nella configurazione a secco. Questo si può notare nella cumulate di frequenza della temperatura normalizzata T_{se}^* riportata in Fig. 5.1., osservando il valore corrispondente al 50 % del tempo (asse y frequency), si può notare essere un valore di poco inferiore a 1. Inoltre, la distribuzione ha un range di valori che per circa il 90 % del tempo è compreso tra 0.8 e 1.1. Se effettivamente la T_{sa} = T_{se} per tutto il tempo la curva sul grafico risulterebbe una linea verticale centrata sul valore 1. Questa differenza è dovuta al fatto che il Sistema non è perfettamente adiabatico e che la temperatura superficiale esterna è influenzata dalla massa termica dell'elemento, perciò si riscontra un ritardo tra la radiazione solare assorbita e la variazione di temperatura dell'elemento. Ipotizzando questo ritardo pari a 1.5 ore e rieseguendo l'analisi della cumulate in frequenza della T_{se}^* Fig.5.2. si può notare come la distribuzione si avvicini molto di più al valore 1 e che la curva diventa molto più verticale con valori compresi tra 0.9 e 1.1 per il 95 % del tempo. Nella analisi degli indici comunque questo ritardo non è stata considerato.



Fig. 5.1. Cumulata di frequenza della temperatura superficiale esterna considerando tutto il giorno senza ritardo



Fig. 5.2. Cumulata di frequenza della temperatura superficiale esterna considerando solo il giorno con un ritardo do 1.5 ore.

5.1.1. Temperatura normalizzata (T*_x)

La distribuzione della cumulate di frequenza della temperatura normalizzata superficiale esterna, per le configurazioni a secco e con le varie portate d'acqua sono riportate nelle Fig. 5.5 (blocco superiore A) e Fig. 5.6. (blocco inferiore B).

Come è possibile osservare scartando il 10 % dei valori nella zona superiore (cumulative frequency da 0.9 a 1.0) e il 10 % dei valori inferiori (cumulative frequency da 0 a 0.1) per l'80% del tempo la T*_{se} assume valori come segue:

- ~0.85 e ~1.10 blocco superiore (A);
- ∼0.80 e ~1.10 blocco inferiore (B);
- ~0.7 e ~0.95 con portata d'acqua di 250 l/h blocco superiore (A);
- ~0.6 e ~0.95 con portata d'acqua di 250 l/h blocco inferiore (B);
- ~0.65 e ~0.75 con portata d'acqua di 500 l/h su entrambi I blocchi (A e B);
- ~0.55 e ~0.65 con portata d'acqua di 750 l/h e 1000 l/h su entrambi l blocchi (A e B).

Si può notare che la presenza d'acqua reduce fortemente la temperatura superficiale esterna rispetto a quella sole aria. Si nota inoltre come le cumulate di frequenza per le portate di 750 e 1000 l/h siano quasi sovrapposte. Questo risultato si può osservare riosservando il profilo di temperature giornaliero della superficie esterna (Fig. 4.1.4.2. e 4.1.5.2. delle sezioni \$ 4.1.4 e \$ 4.1.5 rispettivamente). Infatti, con un elevato flusso d'acqua la temperatura si avvicina molto alla temperatura dell'acqua perciò non si può ottenere un miglioramento delle prestazioni aumentando la portata.

Un altro elemento che si può osservare è la pendenza della curva della cumulativa. Si può osservare come questa aumenti con l'aumentare della portata d'acqua, raggiungendo un minimo con la configurazione a secco e il massimo con la portata a 1000 l/h. La pendenza della curva fornisce un'indicazione sull'affidabilità delle prestazioni del sistema in base alle condizioni al contorno, l'elevata pendenza della curva implica una minore dipendenza dalle condizioni al contorno. Questo implica che l'aumento della portata d'acqua non solo migliori le prestazioni del sistema ma che questa è anche meno dipendente dalle condizioni al contorno.

In FIg.5.7. e 5.8. sono riportate le cumulate delle distribuzioni di frequenza dell'indice della temperatura normalizzata per la superficie interna $(T_{si,N})$. Come ci si poteva aspettare, essendo il lato interno non esposto alla radiazione solare, il valore dell'indice è minore rispetto a quello per la temperatura superficiale esterna $(T_{se,N})$.

Come è possibile osservare scartando il 10 % dei valori nella zona superiore (cumulative frequency da 0.9 a 1.0) e il 10 % dei valori inferiori (cumulative frequency da 0 a 0.1) per l'80% del tempo la $T_{si,N}$ assume valori come segue:

- ~0.75 e ~1.05 per entrambi I blocchi (A e B);
- ~0.55 e ~0.95 con portata di 250 l/h per entrambi I blocchi (A e B);
- ~0.55 e ~0.75 con portata di 500 l/h su entrambi I blocchi (A e B);
- \sim 0.45 e \sim 0.60 per le portate di 750 e 1000 l/h su entrambi l blocchi (A e B).



Fig. 5.5. Cumulata di frequenza della temperatura superficiale esterna normalizzata (T*_{se_A}) nel blocco superiore



Fig. 5.6. Cumulata di frequenza della temperatura superficiale esterna normalizzata (T*_{se_B}) nel blocco inferiore



Fig. 5.7. Cumulata di frequenza della temperatura superficiale interna normalizzata (T*_{si_A}) nel blocco superiore



Fig. 5.8. Cumulata di frequenza della temperatura superficiale interna normalizzata (T*_{si_B}) nel blocco inferiore

In fig.5.9. sono riportati I risultati per la cavità. Per tutte le configurazioni I valori risultanti sono superiori a quelle specifici per le temperature superficiali. Questo risultato si può spiegare considerando che:

- La cavità è meno influenzata dal flusso d'acqua rispetto alle superfici direttamente colpite ($T_{se} \ e \ T_{si}$)

- La cavità è molto più influenzata dalla temperatura dell'aria esterna (è presente un ricambio naturale d'aria tra la cavità e l'ambiente esterno

Per queste ragioni è stata calcolata una variante di questo indice in cui si normalizza la temperatura della cavità non più rispetto alla temperatura sole aria ma rispetto la temperatura dell'aria esterna. In Fig. 5.10. sono riportati I risultati di questo secondo indice. Si possono evidenziare due elementi:

- Per tutte le configurazioni I valori sono più alti rispetto a quelli del caso di T^*_{cav} rispetto a T_{sa} (Fig.5.9.)

- Per la configurazione a secco per l'80 % del tempo il valore dell'indice è maggiore di 1. Ciò può essere dovuto agli apporti diretti sulle superfici circondanti la cavità al calore che il terreno cede all'aria che entra nella parte inferiore della cavità.



Fig. 5.9. Cumulata di frequenza della temperatura della cavità normalizzata (T*_{cav})


Fig. 5.10. Cumulata di frequenza della temperatura della cavità normalizzata rispetto alla temperatura dell'aria esterna.

5.1.2. Efficienza di riduzione di temperatura

Come già spiegato nella sezione 3.4.4. l'efficienza di riduzione della temperatura η rappresenta la percentuale di riduzione della temperatura rispetto alla temperatura sole aria. Questo indice è il complementare a 1 della temperatura normalizzata T^{*}_x. Tuttavia, permette un'associazione diretta ad un indice di efficienza cioè valori più elevati significano migliori prestazioni.

Dalla Fig.5.11. alla 5.15. sono rappresentate le cumulate di frequenza di questo indice. L'andamento come già spiegato risulta l'opposto a quello dell'indice della temperatura normalizzata: cioè la configurazione a secco essendo quella di riferimento riporta valori più bassi mentre aumentando la portate le curve si spostano verso valori più elevati. Nuovamente per la cavità è stato calcolato un indice che anziché considerare la temperatura sole aria considera la temperatura dell'aria esterna (Fig. 5.16.).



Fig. 5.11. Cumulata di frequenza dell'efficienza di riduzione della temperatura superficiale esterna del blocco superiore (A).



Fig. 5.12. Cumulata di frequenza dell'efficienza di riduzione della temperatura superficiale esterna del blocco inferiore (B).



Fig. 5.13. Cumulata di frequenza dell'efficienza di riduzione della temperatura superficiale interna del blocco superiore (A)



Fig. 5.14. Cumulata di frequenza dell'efficienza di riduzione della temperatura superficiale interna del blocco inferiore (B).



Fig. 5.15. Cumulata di frequenza dell'efficienza di riduzione della temperatura della cavità



Fig. 5.16. Cumulata di frequenza dell'efficienza di riduzione della temperatura della cavità rispetto alla temperatura dell'aria esterna T_e.

5.1.3 Riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco

L'indice di riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco evidenzia di quanto la temperatura del muro ad una certa portata d'acqua si riduca confrontandola rispetto alle condizioni a secco. Grazie a questa normalizzazione l'indice risulta indipendente dalle condizioni al contorno, per definizione il valore dell'indice nel caso a secco è pari a 1, questo valore può quindi essere preso di riferimento. Valori minori implicano prestazioni migliori e quindi una maggiore capacità a ridurre la temperatura rispetto alle condizioni a secco.

In Fig. 5.17 e Fig. 5.18. sono rappresentati gli indici per la temperatura superficiale esterna per il blocco superiore e inferiore. Come è possibile osservare scartando il 10 % dei valori nella zona superiore (cumulative frequency da 0.9 a 1.0) e il 10 % dei valori inferiori (cumulative frequency da 0 a 0.1) per l'80% del tempo $\frac{T_{se}^*}{T_{drv}^*}$ assume valori come segue:

• 1 in condizioni a secco per entrambi i blocchi (A e B);

- ~0.65 e ~0.95 con portata di 250 l/h sul blocco superiore (A);
- ~0.55 e ~0.95 con portata di 250 l/h sul blocco inferiore (B);
- ~0.60 e ~0.90 con portata di 500 l/h per entrambi i blocchi (A e B);
- \sim 0.55 e \sim 0.70-0.75 per le portate di 750 e 1000 l/h su entrambi l blocchi (A e B).

Mentre per la superficie interna (Fig. 5.19 e 5.20, blocco superiore e inferiore rispettivamente):

- 1 in condizioni a secco per entrambi i blocchi (A e B);
- ~0.60 e ~0.90 con portata di 250 l/h;
- ~0.60 e ~0.90 con portata di 500 l/h;
- \sim 0.50 e \sim 0.70 per le portate di 750 e 1000 l/h;

Per la cavità questi valori sono più alti (anche se sempre minori di 1), nuovamente l'indice per la cavità è stato anche determinate rispetto alla temperatura dell'aria esterna (Fig.5.22.) anziché la temperatura sole aria (Fig.5.21.).:

- 1 in condizioni a secco per entrambi i blocchi (A e B);
- \sim 0.9 e \sim 0.97 con portata di 250 l/h;
- \sim 0.85 e \sim 0.95 con portata di 500 l/h;
- ~0.8 e ~0.85 con portata di 750 l/h;
- ~0.7 e ~0.9 con portata di 1000 l/h;

Generalmente alta pendenza corrisponde ad alti valori di portata, come per gli indici precedenti (Sezioni 5.1.1 e 5.1.2.). Ciò non è valido per la cavità che con portate d'acqua tra I 250 e 1000 l/h è principalmente affetta dalla temperatura dell'aria (valore dell'indice >0.8), mentre a 1000 l/h (o superiori) la riduzione rispetto al caso a secco cresce.



Fig.5.17. Cumulata di frequenza dell'indice di riduzione della temperatura superficiale esterna rispetto a quella a secco per il blocco superiore



Fig.5.18. Cumulata di frequenza dell'indice di riduzione della temperatura superficiale esterna rispetto a quella a secco per il blocco inferiore



Fig.5.19. Cumulata di frequenza dell'indice di riduzione della temperatura superficiale interna rispetto a quella a secco per il blocco superiore



Fig.5.20. Cumulata di frequenza dell'indice di riduzione della temperatura superficiale interna rispetto a quella a secco per il blocco inferiore



Fig.5.21. Cumulata di frequenza dell'indice di riduzione della temperatura della cavità rispetto a quella a secco



Fig.5.22. Cumulata di frequenza dell'indice di riduzione della temperatura della cavità rispetto a quella a secco utilizzando la temperatura dell'aria esterna

5.1.4. Valori medi degli indici

In questa sezione sono riportati i valori medi degli indici, per ciascuno strato del sistema WW a portate crescenti messi in relazione alle condizioni a secco. Il valore medio riportato corrisponde al valore del 50 % della cumulata di frequenza riportata nelle sezioni \$5.1.1, \$5.1.2. e \$5.1.3. Il valore medio fornisce un valore immediato che si può usare per caratterizzare il sistema. Bisogna comunque ricordare che questo valore è solo indicativo perché rimane importate analizzare anche come sia la distribuzione dei valori attorno a questo numero (come ad esempio la pendenza della curva, più è pendente più il comportamento risulterà costante).

Fig. 5.22, rappresenta la riduzione di temperatura del blocco superiore e inferiore dovuta al flusso d'acqua nelle stesse condizioni a contorno con una specifica geometria ;

Fig. 5.23, rappresenta la riduzione di temperatura dovuta alla portata d'acqua rispetto al muro a secco alle stesse condizioni a contorno e con una specifica geometria

Fig. 5.24, rappresenta la riduzione di temperatura del blocco rispetto alle condizioni a secco;

Si può notare come l'aumento della portata d'acqua sulla temperatura superficiale del sistema porti a un notevole aumento delle prestazioni fino alla portata di 750 l/h dopo di che l'aumento della portata comporta delle variazioni molto inferiore si ha per esempio nel blocco superiore per l'indice della temperatura normalizzata per la superficie esterna Fig. 5.22. un passaggio da 79 % per 250 l/h a 61 % per 750 l/h se si porta la portata a 1000 l/h la l'indice si porta a 58 %. Questo può essere visto come il limite superiore del sistema in quanto portate superiori a 750 l/h non comportino effettivi miglioramenti in quanto il sistema si porta in equilibrio con la temperatura dell'acqua.

Per la cavità invece la riduzione di temperatura è più contenuta (dal 10 al 20 %) anche se in questo caso l'aumento di prestazioni tra 750 e 1000 l/h risulta decisamente più marcato.





Fig. 5.22.A (Sopra) e Fig. 5.22.B (Sotto) Valori medi delle temperature normalizzata per il blocco superiore (A) e inferiore (B)





Fig. 5.23. A (sopra) e Fig. 5.22.B (Sotto) Valori medi dell'efficienza di riduzione di temperatura per il blocco superiore (A) e inferiore (B)





Fig. 5.24. A (sopra) e Fig. 5.23.B (Sotto) Valori medi dell'efficienza di riduzione di temperatura rispetto alle condizioni a secco per il blocco superiore (A) e inferiore (B).

5.2 Confronto prove di luglio con prove di settembre

In questa sezione sono riportati gli indici descritti nella sezione \$3.4. per le prove corrispondenti alla geometria open (prove di luglio) confrontate rispetto a quelle della geometria closed (prove di settembre).

5.2.1 Temperatura Normalizzata (T*_x)

La cumulata di frequenza della temperatura normalizzata per la superficie esterna (T^*_{se}), per entrambe le geometrie e nelle condizioni dry e a 250 l/h sono riportate in Fig.(5.25.) (blocco superiore A) e 5.26. (blocco inferiore B).

Di seguito sono elencati i risultati scardando il 10 % dei valori della zona superiore e il 10 % della zona inferiore, per l'80% del tempo la T $*_{se}$ è compresa:

- ~0.85 e ~1.10 nelle condizioni a secco per la geometria open su entrambi i blocchi;
- ~0.70 e ~0.95 con portata d'acqua di 250 l/h per geometria open blocco superiore(A);
- ~0.70 e ~0.90 con portata d'acqua di 250 l/h per geometria open blocco inferiore (B);
- ~0.85 e ~1.10 nelle condizioni a secco per la geometria closed su entrambi i blocchi;
- ~0.70 e ~0.90 con portata d'acqua di 250 l/h per geometria closed blocco superiore (A);
- ~0.60 e ~0.95 con portata d'acqua di 250 l/h per geometria closed blocco inferiore (B);

Si può osservare come non siano presenti differenze significative tra le due configurazioni, questo risultato era prevedibile in quanto il cambio di geometria non influisce sulla superfice esterna. Nonostante questo, si riscontra un comportamento anomalo per la temperatura superficiale esterna del blocco inferiore con portata di 250 l/h, sono anomali i risultati della configurazione open che risultano decisamente inferiori a quelli del blocco superiore dello stesso periodo.



Fig. 5.25. Cumulata di frequenza della temperatura superficiale esterna normalizzata (T*_{se_A}) nel blocco superiore.



Fig. 5.26. Cumulata di frequenza della temperatura superficiale esterna normalizzata (T*_{se_B}) nel blocco inferiore.

In Fig. 5.27. e 5.28. è riportata la cumulata di frequenza per la temperatura normalizzata per la superfice interna. Non essendo il lato interno influenzato dalla radiazione solare il comportamento non è quindi influenzata dal fatto che la radiazione solare delle prove di settembre sia decisamente superiore a quella delle prove di luglio. Osservando le curve si può notare come il cambio di geometria non porti a significative differenze, l'unica differenza degna di nota si può riscontrare nella configurazione a secco che per il 50 % del tempo la geometria closed riporta valori leggermente più bassi della configurazione open, questa differenza può essere dovuta al fatto che nella nuova geometria all'interno della cavità entri minore radiazione solare diretta che riscalderebbe l'aria. Di seguito sono riportati i punti principali di questa analisi:

- ~0.77 e ~1.05 nelle condizioni a secco per geometria "Open" blocco superiore (A);
- ~0.70 e ~1.05 nelle condizioni a secco per geometria "Open" blocco inferiore (B);
- ~0.70 e ~1.05 nelle condizioni a secco per geometria "Closed" entrambi i blocchi;
- ~0.55 e ~0.90 con portata d'acqua di 250 l/h per geometria "Open" entrambi i blocchi;
- ~0.55 e ~0.85 con portata d'acqua di 250 l/h per geometria "Closed" entrambi i blocchi;



Fig. 5.27. Cumulata di frequenza della temperatura superficiale interna normalizzata (T*_{si_A}) nel blocco superiore.



Fig. 5.28. Cumulata di frequenza della temperatura superficiale interna normalizzata (T*_{si_B}) nel blocco inferiore.

Un ulteriore analisi è stata eseguita per la cavità (Fig.5.29.)

Così come per la superficie interna (Fig. 5.27 e Fig. 5.28.) non sono presenti significative differenze se non nella configurazione dry

Un indice aggiuntivo è stato calcolato per la cavità, questo indice è una normalizzazione rispetto alla temperatura esterna anziché di quella sole aria (Fig. 5.30.), poiché non vi è differenza sostanziale tra la temperatura dell'aria esterna delle prove di luglio rispetto a quelle di settembre si può notare come la temperatura all'interno della cavità sia maggiormente influenzata dalla temperatura esterna, infatti le due curve si sovrappongono quasi completamente.



Fig. 5.29. Cumulata di frequenza per la temperatura normalizzata della cavità (T*_{cav}).



Fig. 5.30. Cumulata di frequenza della temperatura della cavità normalizzata rispetto alla temperatura dell'aria esterna.

5.2.2. Efficienza di riduzione della temperatura

Come già spiegato nella sezione 3.4.4. l'efficienza di riduzione della temperatura η rappresenta la percentuale di riduzione della temperatura rispetto alla temperatura sole aria. Questo indice è il complementare a 1 della temperatura normalizzata T^{*}_x. Tuttavia, permette un'associazione diretta ad un indice di efficienza cioè valori più elevati significano migliori prestazioni.

Dalla Fig.5.31. alla 5.35. sono rappresentate le cumulate di frequenza di questo indice. L'andamento come già spiegato risulta l'opposto a quello dell'indice della temperatura normalizzata: cioè la configurazione a secco essendo quella di riferimento riporta valori più bassi mentre aumentando la portate le curve si spostano verso valori più elevati. Nuovamente per la cavità è stato calcolato un indice che anziché considerare la temperatura sole aria considera la temperatura dell'aria esterna (Fig. 5.36.).



Fig. 5.31. Cumulata di frequenza dell'efficienza di riduzione della temperatura superficiale esterna del blocco superiore (A).







Fig. 5.33. Cumulata di frequenza dell'efficienza di riduzione della temperatura superficiale interna del blocco superiore (A)



Fig. 5.34. Cumulata di frequenza dell'efficienza di riduzione della temperatura superficiale interna del blocco inferiore (B).



Fig. 5.35. Cumulata di frequenza dell'efficienza di riduzione della temperatura della cavità.



Fig. 5.36. Cumulata di frequenza dell'efficienza di riduzione della temperatura della cavità rispetto alla temperatura dell'aria esterna T_e.

5.2.3 Riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco

In questa sezione si confrontano gli indici di riduzione di temperature rispetto alle condizioni a secco. Come già definite nella sezione \$ 3.4.5. l'indice per definizione è uguale a 1 nelle prove a secco, mentre valori minori implicano migliori prestazioni.

In Fig.5.37. e 5.38 sono riportati gli indici per la temperatura esterna per entrambe le geometrie sul blocco superiore e inferiore. Scartando il 20 % dei dati (10 % nella parte superiore e 10 % della parte inferiore) si ottengono dei risultati di $\delta = \frac{T_x^*}{T_{em}^*}$ compresi:

- ~0.65 e ~0.95 con portata d'acqua di 250 l/h per geometria "Open" blocco superiore (A);
- ~0.65 e ~0.95 con portata d'acqua di 250 l/h per geometria "Closed" blocco superiore (A);
- ~0.70 e ~0.90 con portata d'acqua di 250 l/h per geometria "Open" blocco inferiore (B);
- ~0.55 e ~0.90 con portata d'acqua di 250 l/h per geometria "Closed" blocco inferiore (B);

Si nota come non ci sia una differenza significativa tra le varie geometrie ad eccezione del blocco inferiore nella configurazione open a 250 l/h.

Per la temperatura superficiale interna (Fig. 5.39 e 5.40, blocco superiore e inferiore rispettivamente):

- ~0.60 e ~0.95 con portata d'acqua di 250 l/h per geometria "Open" entrambi i blocchi;
- ~0.60 e ~0.95 con portata d'acqua di 250 l/h per geometria "Closed" entrambi i blocchi;

Per la cavità invece si ottengono valori diversi in base a quale normalizzazione si decide di utilizzare.

In Fig. 5.41. in cui si utilizzata la normalizzazione rispetto alla temperatura sole aria si notano differenze più marcate questo è dovuto al fatto che la temperatura della cavità nelle prove di luglio e di settembre risulta la stessa e quindi è poco dipendente dalla radiazione solare, ma non è così per la temperatura sole aria che a settembre risulta maggiore ciò implica che l'indice risulterà minore.

In Fig. 5.42. è riportato invece l'indice rispetto alla temperatura esterna in questo caso non si notano significative differenze.

- ~0.9 e ~0.97 con portata d'acqua di 250 l/h per geometria "Open";
- ~0.9 e ~0.97 con portata d'acqua di 250 l/h per geometria "Closed";



Fig.5.37. Cumulata di frequenza dell'indice di riduzione della temperatura superficiale esterna rispetto a quella a secco per il blocco superiore



Fig.5.38. Cumulata di frequenza dell'indice di riduzione della temperatura superficiale esterna rispetto a quella a secco per il blocco inferiore



Fig.5.39. Cumulata di frequenza dell'indice di riduzione della temperatura superficiale interna rispetto a quella a secco per il blocco superiore



Fig.5.40. Cumulata di frequenza dell'indice di riduzione della temperatura superficiale interna rispetto a quella a secco per il blocco inferiore



Fig.5.41. Cumulata di frequenza dell'indice di riduzione della temperatura della cavità rispetto a quella a secco



Fig.5.42. Cumulata di frequenza dell'indice di riduzione della temperatura della cavità rispetto a quella a secco utilizzando la temperatura dell'aria esterna

In generale si può notare come questi indici siano simili nelle due configurazioni, fa eccezione l'indice per la cavità rispetto alla temperatura sole aria, che tra le due configurazioni differisce di molto.

5.2.4. Valori medi degli indici

Di seguito sono riportati I valori medi degli indici riportati precedentemente. I valori riportati rappresentano il valore al 50 % della cumulate di frequenza presentata precedentemente. Questo valore fornisce un risultato immediate per eseguire il confronto tra le due geometrie e anche sulle prestazioni del sistema. Però è importante ricordare che il valore è medio fornisce solo un'informazione parziale.

Fig. 5.43, rappresenta la riduzione di temperatura del blocco superiore e inferiore dovuta al flusso d'acqua nelle stesse condizioni a contorno con una geometria ;

Fig. 5.44, rappresenta la riduzione di temperatura dovuta alla portata d'acqua rispetto al muro a secco alle stesse condizioni a contorno e con una specifica geometria;

Fig. 5.45, rappresenta la riduzione di temperatura del blocco rispetto alle condizioni a secco;





Fig. 5.43.A (Sopra) e Fig. 5.43.B (Sotto) - Valori medi delle temperature normalizzata per il blocco superiore (A) e inferiore (B)





Fig. 5.44. A (sopra) e Fig. 5.44.B (Sotto) Valori medi dell'efficienza di riduzione di temperatura per il blocco superiore (A) e inferiore (B)



Fig. 5.45. A (sopra) e Fig. 5.45.B (Sotto) Valori medi dell'efficienza di riduzione di temperatura rispetto alle condizioni a secco per il blocco superiore (A) e inferiore (B).

Si può notare come in tutti I casi I valori medi siano compresi in un intervallo di ±0.05 ciò implica che tra le geometrie non sia presente una significativa differenza pertanto è consigliabile utilizzare la geometria "open" in quanto permette un ingresso di una maggiore quantità di luce naturale nell'ambiente.

6. Modello numerico

A seguito della campagna sperimentale si optato di realizzare un modello semplificato in grado di simulare il comportamento del Water Wall, al fine di poter prevedere il comportamento della parete in altre località. Il modello è stato realizzato utilizzando il software Excel. Il modello si basa sul modello di calcolo proposto nella normativa EN 52017 in cui viene consigliato un metodo di calcolo per simulare il comportamento delle pareti esterne di un edificio, utilizzando una metodologia di calcolo oraria semplificata. La parete è stata rappresentata come un circuito RC equivalente in cui: i nodi rappresentano le temperature, le resistenze rappresentano i coefficienti di scambio termico tra i vari nodi, i condensatori rappresentano i termini di accumulo e i generatori sono i termini che producono o asportano calore (nel caso in questione sono specificamente la radiazione solare che scalda la parete e la portata d'acqua, se presente, che in genere asporta calore).

I termini h_{lim} rappresentano la somma algebrica del coefficiente di scambio termico convettivo e radiativo, questo valore può essere utilizzato a patto che si ipotizzi che la temperatura dell'aria si uniforme e che tutte le superfici esterne al sistema si trovino alla stessa temperatura dell'aria.

In Fig. 6.1. è riportata la rappresentazione grafica del circuito RC equivalente.



Fig. 6.1. Schema elettrico equivalente del sistema WW

Applicando il primo principio della termodinamica ad ogni nodo del modello si ottengono una serie di equazioni che permettono di risolvere il sistema. Di seguito verranno riportate e descritte le formule utilizzate per ciascun nodo e le ipotesi di calcolo utilizzate.

Nodo temperatura superficiale esterna

$$\dot{Q}_{sol} + h_{c,ext} \cdot \left(\theta_{e,t} - \theta_{se,t}\right) + h_{r,ext} \cdot \left(\theta_{e,t} - \theta_{se,t}\right) - h_{se,sm} \cdot \left(\theta_{se,t} - \theta_{sm,t}\right) - \frac{M \cdot C}{\Delta \tau} \cdot \left(\theta_{se,t} - \theta_{se,t-1}\right) - \Delta \dot{H} = 0$$
(6.1)

In questa formula si è ipotizzato che la temperatura esterna dell'aria ($\theta_{e,t}$) sia uniforme e quindi la temperatura media radiante dell'ambiente esterna coincide con quella dell'aria esterna.

Il termine di scambio termico convettivo h_{c,ext} è stato calcolato utilizzando una formula empirica per ambiente esterno in funzione della velocità dell'aria. La formula in questione è proposta da Sharples (1984)

$$h_{c,ext} = 1.7 \cdot v_s + 5.1 \left[\frac{W}{m^2 K}\right] \quad (6.2)$$

Il valore di v_s dipende dall'angolo di esposizione della parete e si determina interpolando i valori di v_s calcolati per la facciata direttamente esposta e non.

$$v_{s} = \begin{cases} 1.8 \cdot v_{10} + 0.2 \text{ per facciata esposta direttamente} \\ 0.2 \cdot v_{10} + 17 \text{ per facciata non espota direttamente} \end{cases} \begin{bmatrix} \frac{m}{s} \end{bmatrix} (6.3)$$

Il termine di scambio radiativo, in tutte le formule, è stato determinato con l'assunzione di corpo grigio per cui:

$$h_r = \epsilon \cdot \sigma \cdot \frac{T_x^4 - T_y^4}{T_x - T_y} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$
(6.4)

Dove x e y dipendono dal nodo in esame, per il nodo della superfice esterna T_x è la temperatura superficiale esterna mentre T_y è quella dell'ambiante esterno che è ipotizzata pari a quella dell'aria.

Il termine Qsol è stato determinato come la quota di radiazione totale assorbita dalla superfice per cui:

$$\dot{Q}_{sol} = \alpha \cdot I_{tot} \left[\frac{W}{m^2}\right] \tag{6.5}$$

Il termine di scambio termico conduttivo è stato determinato utilizzando i valori trovati in letteratura di conduttività termica dei materiali costituenti la parete, in modo analogo è stata determinata la capacità termica della parete. Quest'ultimo termine è quello che permette di valutare l'effetto di accumulo termico della parete.

Infine, il termine di calore asportato dalla portata d'acqua sulla parete ΔH. È stato determinato come

$$\dot{\Delta H} = (\dot{m}_{ev} \cdot r_0 + (\dot{m}_w - \dot{m}_{ev}) \cdot c_p \cdot \Delta T_w) / A_esame (6.6)$$

Questo termine viene calcolato una sola volta e poi successivamente diviso nei vari nodi in cui è presente.

Dove m_{ev} è stata calcolata utilizzando le formule usate nella progettazione delle piscine secondo ASHRAE fundamentls (2011)

$$\dot{m}_{ev} = S_{ev} \cdot 35 \cdot \rho_w \cdot (\rho_w - \rho_r)^{\frac{1}{3}} \cdot (x_w - x_r) \left[\frac{kg}{h}\right] (6.7)$$

Inoltre, è stata anche calcolata come elemento aggiuntivo utilizzando un'altra formula considerata in ASRHAE foundamentals (1997) che permette di determinare la portata evaporata utilizzando il numero di Lewis

$$Le = \frac{h_{c_a}}{h_M \cdot \rho_a \cdot c_{pa}} \approx 1 (6.8)$$
$$\dot{m}_{ev} = S_{ev} \cdot K_M \cdot \frac{\rho_i - \rho_\infty}{\rho_{am}} (6.9)$$
$$K_M = \frac{h_{c_a}}{(1 + x_a) \cdot c_{pa}} (6.10)$$

Il ΔT_W invece è stato determinato utilizzando i valori misurati durante la campagna sperimentale utilizzando il valore medio di temperatura superficiale situato nella posizione più bassa dei blocchi. Da questo valore si è determinato un ΔT_{max} in base alla portata utilizzata. Fisicamente ci si aspetta che il salto termico subito dall'acqua sia massimo durante le ore più calde della giornata mentre nel periodo notturno ci si aspetta che sia nullo. Si è quindi determinata una formula empirica che simuli questo comportamento e che allo stesso tempo consideri l'accumulo di calore da parte della parete che viene rimosso dall'acqua durante le prime ore serali, dopo le 17:00.

La formula utilizzata risulta quindi

$$\Delta T_{water} = \Delta T_{water,max} \cdot \sin\left(\frac{G(t)}{2 \cdot G_{max}} \cdot \pi + \phi(t)\right) (6.11)$$

Dove la G_{max} è la radiazione solare massima della località, G la radiazione solare all'istante t e ϕ lo sfasamento che risulta essere massimo durante le prime ore serali e poi decresce fino ad annullarsi.

Nodo temperatura superficiale intermedia

Questo nodo è situato in un punto fittizio all'interno della parete, è stato posizionato per ottenere un valore intermedio di temperatura della parete al fine di ottenere una modellizzazione più completa.

$$h_{se,sm} \cdot \left(\theta_{se,t} - \theta_{sm,t}\right) - h_{sm,si} \cdot \left(\theta_{sm,t} - \theta_{si,t}\right) - \frac{M \cdot C}{\Delta \tau} \cdot \left(\theta_{sm,t} - \theta_{sm,t-1}\right) - \Delta H = 0 \ (6.12)$$

Nodo temperatura superficiale interna

$$h_{sm,si} \cdot (\theta_{sm,t} - \theta_{si,t}) - h_{r,cav} \cdot (\theta_{si,t} - \theta_{ge,t}) - h_{c,cav1} \cdot (\theta_{si,t} - \theta_{cav}) - \frac{M \cdot C}{\Delta \tau} \cdot (\theta_{si,t} - \theta_{si,t-1}) - \Delta H$$

= 0 (6.13)

Il coefficiente di scambio termico radiativo h_{r,cav} è stato determinato con assunzione di corpo grigio che scambia calore con la parete vetrata.

Il coefficiente di scambio termico convettivo è stato determinato con l'equazione proposta da per pareti verticali Churchill, S.W. and Chu, H.H.S. (1975) che determina h_{c,cav} passando per il numero di Nusselt

$$Nu = \frac{h_{c,cav,1} \cdot L_{car}}{\lambda_{air}} \quad (6.14)$$

$$Nu = \left(0.825 + 0.325 \cdot Ra^{\frac{1}{6}}\right)^{2} (6.15)$$

$$Ra = Pr \cdot Gr \quad (6.16)$$

$$Pr \cong 0.7 \quad (6.17)$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \left(\theta_{si,t} - \theta_{cav,t}\right) \cdot L_{car}^{3}}{v \cdot \alpha} \quad (6.18)$$

$$\beta = \frac{1}{\theta_{cav,t}} \quad (6.19)$$

Il termine $1/\theta_{cav,t}$ risulterebbe non definibile in quanto la $\theta_{cav,t}$ dipende essa stessa da h_c per ciò si è utilizzato il valore di $\theta_{cav,t-1}$

Questa equazione va ripetuta uguale ma per il termine $h_{c,cav,2}$ che fa riferimento alla parete vetrata. Si è utilizzata questa formula che si adatta per convezione naturale e non ha una dipendenza legata alla velocità dell'aria all'interno della cavità che non è di facile modellazione in quanto a causa della geometria non si conoscono valori di area di ingresso dell'aria e uscita. L'aria infatti potrebbe entrare dalla parte inferiore della cavità ma potrebbe anche entrarne dal foro centrale ma da lì potrebbe anche uscirne in parte.

Nodo temperatura della cavità

Uno dei problemi principali per la realizzazione del modello è riuscire a determinare la temperatura della cavità, in quanto questa dipende dalla portata d'aria di ricircolo presente nella cavità e dalla temperatura dell'aria in ingresso di quest'ultima. Attraverso una ricerca si è trovato un modello descritto da Angelotti et al. (2007) e da Angeli et al. (2015) che può essere utilizzato per il caso in esame, in cui con le seguenti formule è possibile determinare la temperatura della cavità. Come già fatto notare in precedenza non è facile determinare la velocità dell'aria all'interno della cavità, si può ipotizzare un valore di velocità dell'aria costante a patto che la velocità del vento non sia troppo grande. Nel caso in esame si è ipotizzato un valore di velocità dell'aria nella cavità di 0.05 m/s.

$$c = \frac{1 - e^{-k \cdot H}}{k \cdot H} (6.20)$$
$$k = \frac{h_{c,cav1} + h_{c,cav2}}{s \cdot \rho \cdot v \cdot c_p} (6.21)$$
$$\theta_{asn} = \frac{\theta_{si,t} \cdot h_{c,cav1} + \theta_{ge,t} \cdot h_{c,cav2}}{h_{c,cav1} + h_{c,cav2}} (6.22)$$
$$\theta_{cav} = c \cdot \theta_{in} + (1 - c) \cdot \theta_{asn} (6.23)$$

Tramite queste equazione è possibile determinare la temperatura della cavità ponendo attenzione alla temperatura dell'aria in ingresso della cavità in quanto in assenza portata d'acqua può essere considerata pari alla temperatura dell'aria esterna, anche se una piccola parte dell'aria in ingresso quella dall'apertura inferiore viene riscaldata dal calore assorbito dal terreno, invece in presenza di una portata d'acqua questo valore deve essere ridotto in quanto l'acqua presente su tutte le possibili aperture di ingresso dell'aria riduce la temperatura dell'aria in ingresso tramite una miscelazione tra portata d'acqua di vapore evaporata e uno scambio termico sensibile tra aria e acqua. Per determinare la quota di calore ceduto dal terreno all'aria si è applicato il seguente bilancio in condizioni stazionarie:

$$m_{alr} \cdot c_p(\theta_{in} - \theta_{ext}) = q_{cv} \cdot \alpha_{terr} \cdot I_{sol} \cdot A + \dot{m}_{water} \cdot c_{p,w} \cdot (\theta_w - \theta_{w,out}) (6.24)$$

Dove il termine q_{cv} è la quantità di radiazione assorbita dal terreno scambiata per convenzione con l'aria, mentre α_{terr} è il coefficiente di assorbimento del terreno ipotizzato pari a 0.3. Il problema legato a questa formulazione è determinare il termine ϑ_w che rappresenta la temperatura finale dell'acqua. Essendo un termine non misurato e non potendo come per la $\vartheta_{w,out}$ dei dati misurati si è ipotizzato un valore costante in funzione della portata d'acqua.

Nodo temperatura superficiale esterna vetro

$$h_{r,cav} \cdot \left(\theta_{si,t} - \theta_{ge,t}\right) + h_{c,cav2} \cdot \left(\theta_{cav} - \theta_{ge,t}\right) - h_g \cdot \left(\theta_{ge,t} - \theta_{gi,t}\right) = 0 \ (6.25)$$

Per questo nodo si è ipotizzato il valore della trasmittanza termica del vetro pari a 1.2 W/m² mentre il coefficiente di scambio termico convettivo $h_{c,cav,2}$ è stato calcolato riutilizzando la formula 6.14 Bisogna prestare attenzione al termine di scambio radiativo di questo nodo in presenza di acqua in quanto essa assorbe la radiazione infrarossa riducendo quindi il termine di scambio radiativo, nel modello in presenza di acqua siccome questo termine era già relativamente basso durante le condizioni a secco ordine di 1 W/m²/K è stato considerato nullo.

Nodo temperatura superficiale interna vetro

$$h_g \cdot \left(\theta_{ge,t} - \theta_{gi,t}\right) - h_{c,int} \cdot \left(\theta_{gi,t} - \theta_{int}\right) - h_{r,int} \cdot \left(\theta_{gi,t} - \theta_{int}\right) = 0 \ (6.26)$$

Per questo nodo si è ipotizzata una temperatura dell'aria dell'ambiente interno costante pari a 25 °C coincidente con la temperatura media radiante dell'ambiente. Il coefficiente di scambio termico radiativo si è calcolato nuovamente con ipotesi di corpo grigio formula 6.4. Mentre per il coefficiente di scambio termico convettivo $h_{c,int}$ è stato calcolato nuovamente con la formula 6.14

6.1. Risultati per condizioni a secco

Il modello è stato prima utilizzato nelle condizioni a secco, in questo modo è stato possibile eseguire una operazione di fine tuning sui valori delle proprietà ipotizzate e su come spartire tra i vari nodi i valori della massa termica del materiale.

Di seguito sono riportati dei grafici rappresentanti i valori delle varie temperature poste a confronto con i valori misurati dalla campagna sperimentale durante una giornata tipo, inoltre sullo stesso grafico è riportato il valore dell'errore relativo. Fatta eccezione per la temperatura superficiale del vetro interna in quanto si è ipotizzato un valore di temperatura dell'ambiente interno costante intorno a 25 °C cosa che nelle misurazioni non si è sempre riuscita ad ottenere.

Come si può osservare dalla Fig. 6.2. il modello riesce con una buona accuratezza a simulare il comportamento della temperatura della cavità infatti si riesce ad ottenere un errore relativo medio dell'ordine del 5 %.



Fig. 6.2. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la cavità.

In fig.6.3.a. è riportato il confronto tra la temperatura superficiale esterna del blocco superiore rispetto a quelle misurate. Nuovamente il modello produce dei risultati coerenti con un errore relativo medio di circa 5 %. Su questo parametro si è calibrato il coefficiente di assorbimento solare della parete che non essendo noto è stato ipotizzato. In Fig. 6.3.b. invece è riportato lo stesso confronto ma per il blocco inferiore che non riporta significative differenze rispetto al blocco superiore.



Fig. 6.3.a Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice esterna del blocco superiore.



Fig. 6.3.b Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice esterna del blocco inferiore

In Fig.6.4.a è riportato il confronto tra la temperatura superficiale interna del blocco superiore rispetto a quelle misurate. In questo caso il modello sottostima il valore della temperatura superficiale per il blocco superiore in particolare nelle ore più tarde della giornata questo è legato in particolar modo alla dipendenza di questo parametro dalle condizioni della cavità e dai coefficienti di scambio termico. In Fig. 6.4.b. invece è riportato lo stesso confronto ma per il blocco inferiore, in questo caso invece il modello sovrastima la temperatura nelle prime ore della giornata. Nonostante ciò il valore medio dell'errore relativo si aggira intorno al 5 %



Fig. 6.4.a Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice interna del blocco superiore.



Fig. 6.4.b Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice interna del blocco inferiore.

In Fig. 6.5. Nuovamente è riportato il confronto della temperatura superficiale esterna del vetro rispetto a quella misurata, nuovamente come per la temperatura superficiale interna il modello sottostima la temperatura del vetro nelle ore di picco benché questa differenza sia inferiore rispetto a quella precedente.



Fig. 6.5. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice esterna del vetro

In Fig.6.6. sono riportati i risultati ottenuti per la temperatura superficiale interna del vetro, in questo caso il confronto non può essere eseguito in maniera corretta perché si è ipotizzata una temperatura dell'ambiente interno costante pari a 25 °C cosa che nel periodo di misurazione non si è verificata per problemi tecnici. Nonostante ciò è possibile notare un corretto andamento della temperatura del vetro in quanto il valore si aggira in un intorno di +-1°C rispetto alla temperatura dell'ambiente e i picchi di temperatura si hanno in concomitanza con i picchi della temperatura del vetro misurata.



Fig. 6.6. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice interna del vetro

Il modello simula in modo abbastanza corretto il comportamento della parete nelle condizioni a secco, per tanto può essere usato per ottenere dei valori di riferimento.

6.2. Risultati con portata d'acqua

Dopo aver simulato il comportamento della parete per le condizioni a secco si sono aggiunte al modello le portate d'acqua, e si eseguita la simulazione.

6.2.1. Prove 250 l/h

Nelle seguenti figure sono riportati a confronto i risultati del modello rispetto ai valori misurati, similmente alle condizioni a secco il modello simula con discreta precisione il comportamento del sistema WW.

In Fig. 6.7. è riportato il confronto tra la temperatura della cavità misurata e quella ottenuta dal modello, si nota come il comportamento delle due sia molto simile, ma la temperatura ottenuta dal modello è molto più influenzata dalla temperatura esterna rispetto a quanto lo sia realmente.

In Fig. 6.8. e 6.9. è riportato il confronto tra le temperature superficiale esterne misurate e quelle ottenute dal modello per entrambi i blocchi. Si nota come le temperature nel blocco superiore siano molto simili.

In Fig. 6.10. e 6.11. è riportato il confronto tra le temperature superficiali interne misurate e quelle ottenute dal modello per entrambi i blocchi. Il modello in questo caso produce valori che si discostano maggiormente da quelli reali, ma comunque i valori ottenuti sono accettabili per ottenere una idea dell'effetto della portata sulla parete.

In Fig.6.12. è riportato il confronto tra le temperatura superficiali esterne del vetro e quelle ottenute dal modello, in questo caso siccome il termine di scambio radiativo tra questa superficie e quelle interne dei blocchi è molto basso, come spigato in precedenza nella descrizione del nodo temperatura esterna del vetro, il vetro si mostra molto sensibile alle condizione della cavità. I risultati ottenuti sono comunque abbastanza precisi.



Fig. 6.7. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la cavità con portata di 250 l/h


Fig. 6.8. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice esterna del blocco superiore con portata di 250 l/h



Fig. 6.9. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice esterna del blocco inferiore con portata di 250 l/h



Fig. 6.10. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice interna del blocco superiore con portata di 250 l/h



Fig. 6.11. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice interna del blocco inferiore con portata di 250 l/h



Fig. 6.12. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice esterna del vetro con portata di 250 l/h

In generale il modello simula correttamente il comportamento della parete benché vi siano delle ore in cui il modello ottiene dei risultati che si discostano maggiormente da quelli misurati, in particolare il modello sottostima le temperature nelle prime ore di luce diurna, mentre sovrastima le temperature nelle ore più tarde della giornata. In particolare, si riscontrano maggiori problemi su comportamento della temperatura superficiale interna del blocco superiore che sovrastima il valore di temperatura, ma l'errore relativo massimo è intorno al 10 %, mentre quello medio si aggira attorno al 5 %.

6.2.2. Prove 500 l/h

Il modello con per il caso di 250 l/h si dimostra abbastanza accurato, ottenendo i maggiori errori per le temperature superficiali interne.

In Fig. 6.13. è riportato il confronto tra la temperatura della cavità misurata e quella ottenuta dal modello, si nota come il comportamento delle due sia molto simile, ma la temperatura ottenuta dal modello è molto più influenzata dalla temperatura esterna rispetto a quanto lo sia realmente.

In Fig. 6.14. e 6.15. è riportato il confronto tra le temperature superficiale esterne misurate e quelle ottenute dal modello per entrambi i blocchi. Si nota come le temperature nel blocco superiore misurate siano molto più dipendenti dalle condizioni esterne di quanto il modello riesca a simulare, questo può essere legato all'ipotesi fatta di temperatura dell'acqua in ingresso costante.

In Fig. 6.16. e 6.17. è riportato il confronto tra le temperature superficiali interne misurate e quelle ottenute dal modello per entrambi i blocchi. Il modello in questo caso produce valori che si discostano maggiormente da quelli reali nelle ore più calde della giornata in cui vengono sovrastimante ciò significa che il modello sottostima l'effetto di riduzione della temperatura.

In Fig.6.18. è riportato il confronto tra le temperatura superficiali esterne del vetro e quelle ottenute dal modello, in questo caso similmente con il caso di 250 l/h l'andamento si dimostra corretto in quanto influenzato principalmente dalla cavità che viene simulata in modo abbastanza corretto.



Fig. 6.13. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la cavità con portata di 500 l/h



Fig. 6.14. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice esterna del blocco superiore con portata di 500 l/h



Fig. 6.15. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice esterna del blocco inferiore con portata di 500 l/h



Fig. 6.16. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice interna del blocco superiore con portata di 500 l/h



Fig. 6.17. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice interna del blocco inferiore con portata di 500 l/h



Fig. 6.18. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la temperatura superficiale esterna del vetro con portata di 500 l/h

In generale il modello simula in modo abbastanza preciso l'effetto di abbattimento delle temperature in presenza della portata di 500 l/h. I valori ottenuti producono un errore relativo medio per ogni nodo di circa 6 %.

6.2.3. Prove 750 l/h

Il modello come nei casi precedenti si dimostra abbastanza accurato.

In Fig. 6.19. è riportato il confronto tra la temperatura della cavità misurata e quella ottenuta dal modello. Il confronto mostra come le due temperature siano molto simili.

In Fig. 6.20. e 6.21. è riportato il confronto tra le temperature superficiale esterne misurate e quelle ottenute dal modello per entrambi i blocchi. In questo caso il modello sovra stima di poco le temperature superficiali.

In Fig. 6.22. e 6.23. è riportato il confronto tra le temperature superficiali interne misurate e quelle ottenute dal modello per entrambi i blocchi. Il modello in questo caso produce valori molto simili a quelli effettivamente misurati

In Fig.6.24. si può notare come il modello simuli correttamente l'andamento della temperatura del vetro la differenza che si nota dopo le ore 16:00 è dovuta a un problema di malfunzionamento dell'impianto di condizionamento della cella che si è bloccato è la temperatura della cella ha cominciato ad alzarsi.



Fig. 6.19. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la cavità con portata di 750 l/h



Fig. 6.20. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice esterna del blocco superiore con portata di 750 l/h



Fig. 6.21. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice esterna del blocco inferiore con portata di 750 l/h



Fig. 6.22. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice interna del blocco superiore con portata di 750 l/h



Fig. 6.23. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice interna del blocco inferiore con portata di 750 l/h



Fig. 6.24. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la temperatura superficiale esterna del vetro con portata di 750 l/h

6.2.4. Prove 1000 l/h

Di seguito è riportato il confronto tra i dati misurati e quelli ottenuti dal modello, bisogna però in questo caso prestare attenzione ai dati utilizzati in quanto la portata di 1000 l/h è stata impostata alle 9:00 mentre nelle ore precedenti la portata era di 250 l/h ciò comporta che il modello ottenga una temperatura più bassa di quella effettivamente misurata, ciò è particolarmente evidente per la cavità mentre lo è meno per le temperature superficiale che durante il periodo notturno si trovano in equilibrio termodinamico con l'acqua. Bisogna anche tenere presente che la temperatura della cavità usata di riferimento è una media mobile tra quella della zona superiore della cavità (Fig. 4.1.5.6.) e di quella inferiore (Fig. 4.1.5.7.) che sono molto differenti. Per il resto il modello fornisce risultati discreti.

In Fig. 6.25. è riportato il confronto tra la temperatura della cavità misurata e quella ottenuta dal modello, si nota come il comportamento delle due sia molto simile, dopo le ore 9:00 questo perché la portata di 1000 l/h è stata inserita a quell'ora mentre nel periodo notturno era presente la portata di 250 l/h in cui l'effetto di abbattimento di temperatura risulta minore. Inoltre, il valore utilizzato per il confronto è stato ottenuto mediante una media dei valori mostrati in precedenza nelle Fig. 4.1.5.6. e Fig. 4.1.5.7.

In Fig. 6.26. e 6.27. è riportato il confronto tra le temperature superficiale esterne misurate e quelle ottenute dal modello per entrambi i blocchi. Il modello risulta abbastanza accurato in questo caso non si nota la differenza prima delle 9:00 in quanto le entrambe le portate riescono a portare la parete in equilibrio con l'acqua.

In Fig. 6.28. e 6.29. è riportato il confronto tra le temperature superficiali interne misurate e quelle ottenute dal modello per entrambi i blocchi. Il modello in questo caso produce valori che si discostano maggiormente da quelli reali nelle ore più calde della giornata in cui vengono sovrastimante ciò significa che il modello sottostima l'effetto di riduzione della temperatura.

In Fig.6.30. è riportato il confronto tra le temperatura superficiali esterne del vetro e quelle ottenute dal modello, in questo caso il modello sottostima leggermente la temperatura del vetro.



Fig. 6.25. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la cavità con portata di 1000 l/h



Fig. 6.26. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice esterna del blocco superiore con portata di 1000 l/h



Fig. 6.27. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice esterna del blocco inferiore con portata di 1000 l/h



Fig. 6.28. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice interna del blocco superiore con portata di 1000 l/h



Fig. 6.29. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la superfice interna del blocco inferiore con portata di 1000 l/h



Fig. 6.30. Confronto tra la temperatura misurata e quella ottenuta dal modello per la temperatura superficiale esterna del vetro con portata di 1000 l/h

Anche in questo caso il modello risulta abbastanza accurato con errori relativamente bassi.

6.3. Analisi degli indici prestazionali

Come definito nella sezione \$3.4. sono ricalcolati gli indici utilizzando il modello, bisogna tenere presente che il modello spesso sovrastima i valori delle temperature superficiale ne conseguirà che gli indici mostreranno prestazioni peggiori ma comunque utilizzabili per avere un ordine di grandezza degli effetti della parete.

Di seguito sono riportati i grafici delle cumulate di frequenza degli indici e i valori medi messi a confronto con quelli ottenuti dalla campagna sperimentale.

6.3.1. Temperatura normalizzata

Si può dai grafici seguenti (da Fig.6.31. a Fig. 6.36.) ottenere un confronto immediato dell'andamento delle cumulate di frequenza degli indici tra i dati misurati e quelli simulati.

In Fig. 6.31. e Fig.6.32. è riportato il confronto delle cumulate di frequenza per le temperature superficiali esterne di entrambi i blocchi per si nota subito come il modello e le misurazioni nelle condizioni a secco (dry) siano molto simili, invece per le portate d'acqua i valori sono simili per le portate di 250 e 500 l/h in cui i valori risultano molto simili in particolare per più del 60 % del tempo. Le portate di 750 e 1000 l/h invece si discostano maggiormente rispetto a quelle misurate in particolare la pendenza è minore e quindi si dimostrano più dipendenti dalle condizioni esterne, nonostante ciò le curve del modello tra di loro non si discostano di molto questo significa che gli effetti delle portate di 750 e 1000 l/h risultano simili.

In Fig.6.33 e Fig. 6.34. è riportato il confronto delle cumulate di frequenza per le temperature superficiali interne di entrambi i blocchi, il comportamento risulta simile a quello per le temperature superficiali esterne.

In Fig. 6.34. è riportato il confronto delle cumulate di frequenza per la temperatura della cavità rispetto a quella sole aria, il comportamento generale è simile a quello delle precedenti.

In Fig. 6.35. è riportato il confronto delle cumulate di frequenza per la temperatura della cavità rispetto a quella esterna, il comportamento in questo caso risultano molto simili.



Fig. 6.31. Confronto della temperatura normalizzata per la superficie esterna blocco superiore ottenuta dal modello (Mod) con quella ottenuta dalla campagna sperimentale (Mis).



Fig. 6.32. Confronto della temperatura normalizzata per la superficie interna blocco superiore ottenuta dal modello (Mod) con quella ottenuta dalla campagna sperimentale (Mis).



Fig. 6.33. Confronto della temperatura normalizzata per la superficie esterna blocco inferiore ottenuta dal modello (Mod) con quella ottenuta dalla campagna sperimentale (Mis).



Fig. 6.34. Confronto della temperatura normalizzata per la superficie interna blocco inferiore ottenuta dal modello (Mod) con quella ottenuta dalla campagna sperimentale (Mis).



Fig. 6.35. Confronto della temperatura normalizzata per la superficie per la cavita rispetto alla temperatura sole aria ottenuta dal modello (Mod) con quella ottenuta dalla campagna sperimentale (Mis).



Fig. 6.36. Confronto della temperatura normalizzata per la superficie per la cavita rispetto alla temperatura dell'aria esterna ottenuta dal modello (Mod) con quella ottenuta dalla campagna sperimentale (Mis).

In Fig. 6.37. e 6.38. sono riportati i valori medi degli indici precedentemente calcolati (valore al 50 % della cumulata di frequenza). Confrontandoli con i valori nelle Fig. 5.22.A e 5.22.B si nota come non siano presenti per entrambi i blocchi fino alla portata di 500 l/h significative differenze. Mentre il modello sovrastima i valori degli indici per le portate di 750 e 1000 l/h.



Fig. 6.37. Valori medi della temperatura normalizzata per il blocco superiore ottenuti dal modello



Fig. 6.38. Valori medi della temperatura normalizzata per il blocco inferiore ottenuti dal modello

6.3.2. Riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco

In modo analogo all'indice temperatura normalizzata si è fatta la stessa analisi per l'indice di riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco, i risultati ottenuti sono simili nel comportamento a quelli ottenuti per la temperatura normalizzata del modello. In questo caso la differenza tra gli indici risulta più marcata, in quanto, si sono utilizzati dati che già risultavano differenti in precedenza e inoltre i valori utilizzati dalla campagna sperimentale di T*_{dry} sono di quelli di un giorno di riferimento, mentre quelli utilizzati dal modello sono relativi al giorno stesso preso in esame per cui si possono notare maggiori differenze.



Fig. 6.39. Confronto dell'indice di riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco per la superficie esterna blocco superiore ottenuta dal modello (Mod) con quella ottenuta dalla campagna sperimentale (Mis).



Fig. 6.40. Confronto dell'indice di riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco per la superficie interna blocco superiore ottenuta dal modello (Mod) con quella ottenuta dalla campagna sperimentale (Mis).



Fig. 6.41. Confronto dell'indice di riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco per la superficie esterna blocco inferiore ottenuta dal modello (Mod) con quella ottenuta dalla campagna sperimentale (Mis).



Fig. 6.42. Confronto dell'indice di riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco per la superficie interna blocco inferiore ottenuta dal modello (Mod) con quella ottenuta dalla campagna sperimentale (Mis).



Fig. 6.43. Confronto dell'indice di riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco per la cavità rispetto alla temperatura sole aria ottenuta dal modello (Mod) con quella ottenuta dalla campagna sperimentale (Mis).



Fig. 6.44. Confronto dell'indice di riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco per la cavità rispetto alla temperatura dell'aria ottenuta dal modello (Mod) con quella ottenuta dalla campagna sperimentale (Mis).



Fig. 6.45. Valori medi dell'indice di riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco ottenuta dal modello per il blocco superiore.



Fig. 6.46. Valori medi dell'indice di riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco ottenuta dal modello per il blocco inferiore.

In generale il modello numerico è in grado di rappresentare il comportamento della parete in maniera sufficientemente accurata per le condizioni a secco e le portate di 250 e 500 l/h, d'altra parte il modello sottostima gli effetti delle portate di 750 e 1000 l/h rispettando però il comportamento, visto nella campagna sperimentale, dove al di sopra della portata di 750 l/h non si rilevano miglioramenti delle prestazioni significativi.

6.4 Confronto su settimana tipo di un'altra località

Dopo aver valutato le prestazioni del modello numerico confrontando i risultati ottenuti dalla campagna sperimentale, si è estesa l'analisi delle prestazioni della parete su un clima diverso da quello di Torino. In questa sezione è riportato il confronto tra una settimana tipo per Città del Messico (dal 2/05 al 9/05) con una settimana tipo per Torino (dal 3/07 al 10/07). I dati meteo sono stati presi dal software PV-Gis 5 che è dotato di un database di dati meteo per diverse località.

Va precisato che il clima di Città del Messico sia più costante durante tutto l'anno, ma si è scelto un periodo di riferimento in cui si hanno le temperature esterne massime, per Città del Messico ciò accade nel mese di maggio, nonostante questo sia il mese più caldo le temperature massime risultano minori di quelle della città di Torino e in particolare nel periodo notturno le temperature risultano molto più basse di quelle di Torino nel periodo più caldo, al punto che se si usasse il sistema di irrigazione della parete l'acqua avrebbe un effetto di riscaldamento della parete. D'altra parte, la nuova località è soggetta a una maggiore radiazione solare che incide maggiormente sulle temperature superficiali nel periodo diurno.

In Fig. 6.47. è riportato a confronto il periodo scelto per le due località come già segnalato le temperature di città del Messico sono minori rispetto a quelle di Torino, mentre la radiazione solare è più elevata.

In Fig.6.48. sono riportate le temperature della cavità a tutte le portate per le due località. Si nota come le temperature per Città del Messico siano in generale minori di quelle di Torino in più durante il periodo notturno in cui le temperature sono minore di quella dell'acqua il sistema riscalda la parete. In particolare, con la portata a 1000 l/h nel periodo notturno produce una cavità a temperatura costante.

In Fig.6.49. e 6.50. sono riportate le temperature superficiali esterne del blocco superiore e inferiore a tutte le portate per le due località. Si nota come per le condizioni a secco come la maggiore radiazione solare di Città dal Messico alzi la temperatura della parete maggiormente rispetto a quella di Torino, questo comporta ad avere temperature più alte anche in presenza di portata d'acqua, nel periodo notturno che per Città del Messico risulta di circa 12 ore le basse temperature permettono alla parete di andare in equilibrio con l'acqua.

In Fig. 6.51. e 6.52. sono riportate le temperature superficiali interne del blocco superiore e inferiore a tutte le portate per le due località. In questo caso le temperature massime tra le due località sono simili ma poiché in generale la temperatura di città del Messico è minore di quella di Torino e il lato interno non recepisce la radiazione solare diretta si ha che le portate d'acqua hanno un maggiore effetto di riduzione di temperatura.

In Fig.6.53. sono riportate le temperature superficiali esterne del vetro per le due località. Il comportamento in generale è simile a quello della cavità.



Fig. 6.47. Confronto delle condizioni a contorno nel periodo scelto (dal 2/05 al 9/05 per Città del Messico e dal 3/07 al 10 /07 per Torino)



Fig. 6.48. Temperatura della cavità alle varie portate per Città del Messico (Sopra)e Torino (Sotto).



Fig. 6.49. Temperatura superficiale esterna blocco superiore alle varie portate per Città del Messico (Sopra)e Torino (Sotto).





Fig. 6.50. Temperatura superficiale esterna blocco inferiore alle varie portate per Città del Messico (Sopra)e Torino (Sotto).



Fig. 6.51. Temperatura superficiale interna blocco superiore alle varie portate per Città del Messico (Sopra)e Torino (Sotto).



Fig. 6.52. Temperatura superficiale interna blocco inferiore alle varie portate per Città del Messico (Sopra) e Torino (Sotto).



Fig. 6.53. Temperatura superficiale esterna del vetro alle varie portate per Città del Messico (Sopra)e Torino (Sotto).

A seguito di questa analisi è stata eseguita anche l'analisi degli indici prestazionali descritti nel paragrafo \$3.4.

In Fig. 6.54. e 6.55. è riportato il confronto tra gli indici determinati dal modello per Città del Messico e quelli di Torino per la temperatura superficiale esterna di entrambi i blocchi. Si può notare che le curve per la Città del Messico sono meno pendenti rispetto a quelle di Torino questo è dovuto alla forti differenze di temperatura giornaliere. Inoltre, si nota come l'indice sia generalmente maggiore per Città del Messico in quanto la radiazione solare più alta produce un'alta temperatura superficiale.

In Fig. 6.56. e 6.57. è riportato il confronto tra gli indici determinati dal modello per Città del Messico e quelli di Torino per la temperatura superficiale interna di entrambi i blocchi. In questo caso rimane la forte dipendenza dalle variazioni di temperatura giornaliera, inoltre in presenza di portata d'acqua il valore dell'indice per città del Messico risulta abbastanza costante indipendentemente dalla portata. Questo perché le temperature dell'aria non sono molto elevate e quindi già con basse portate si riesce ad ottenere la massima riduzione di temperatura superficiale.

In Fig. 6.58. è riportato il confronto tra gli indici determinati dal modello per Città del Messico e quelli di Torino per la temperatura della cavità rispetto alla temperatura sole aria.

In Fig. 6.59. è riportato il confronto tra gli indici determinati dal modello per Città del Messico e quelli di Torino per la temperatura della cavità rispetto alla temperatura dell'aria. In questo caso l'indice di Città del Messico risulta maggiore in quanto in media le temperature dell'aria esterna sono minori.



Fig. 6.54. Cumulata di frequenza della temperatura normalizzata della superficie esterna del blocco superiore alle varie portate.



Fig. 6.55. Cumulata di frequenza della temperatura normalizzata della superficie esterna del blocco inferiore alle varie portate.



Fig. 6.56. Cumulata di frequenza della temperatura normalizzata della superficie interna del blocco superiore alle varie portate.



Fig. 6.57. Cumulata di frequenza della temperatura normalizzata della superficie interna del blocco inferiore alle varie portate



Fig. 6.58. Cumulata di frequenza della temperatura normalizzata della cavità rispetto alla temperatura sole aria alle varie portate



Fig. 6.59. Cumulata di frequenza della temperatura normalizzata della cavità rispetto alla temperatura dell'aria alle varie portate

Di seguito nelle figure (Fig. 6.60. a Fig. 6.65.) è riportata la medesima analisi ma per l'indice $\delta = \frac{T^*}{T_{dry}^*}$

Osservando i grafici non si notano significative differenze da quelli per l'indice di temperatura normalizzata, ma si prestano a una più facile lettura in quanto sono valori più stabili.



Fig. 6.60. Cumulata di frequenza indice di riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco della superficie esterna del blocco superiore alle varie portate.



Fig. 6.61. Cumulata di frequenza indice di riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco della superficie esterna del blocco inferiore alle varie portate.



Fig. 6.62. Cumulata di frequenza indice di riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco della superficie interna del blocco superiore alle varie portate.



Fig. 6.63. Cumulata di frequenza indice di riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco della superficie interna del blocco inferiore alle varie portate.



Fig. 6.64. Cumulata di frequenza indice di riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco ella cavità rispetto alla temperatura sole aria alle varie portate.



Fig. 6.65. Cumulata di frequenza indice di riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco della cavità rispetto alla temperatura dell'aria alle varie portate
Di seguito sono riportati i valori medi (valore al 50 %) delle cumulate di frequenza per tutti gli indici.

In particolare, si nota come gli indici risultano più elevati rispetto a quelli ottenuti per Torino, come già indicato in precedenza questo fatto è legato alle condizioni al contorno delle due località, in particolare a Città del Messico si hanno temperature più basse ma temperature superficiali in genere maggiori rispetto a Torino per via della maggiore radiazione solare. Sono più simili i valori degli indici per la cavità rispetto alla temperatura dell'aria.



Fig. 6.66. Valori medi temperatura normalizzata per il blocco superiore per Città del Messico (Sopra)e Torino (Sotto).



Fig. 6.67. Valori medi temperatura normalizzata per il blocco inferiore per Città del Messico (Sopra)e Torino (Sotto).





Fig. 6.68. Valori medi dell'indice di riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco per il blocco superiore per Città del Messico (Sopra) e Torino (Sotto).



Fig. 6.69. Valori medi dell'indice di riduzione della temperatura rispetto alle condizioni a secco per il blocco inferiore per Città del Messico (Sopra) e Torino (Sotto).

7. Conclusioni

Lo studio effettuato in questo lavoro di tesi si è posto come obiettivo l'analisi prestazionale di alcune tecnologie che sfruttano le proprietà dell'acqua per ridurre il carico di raffrescamenti nel periodo estivo.

Le tecnologie, che sfruttano l'acqua, si possono dividere in base al principio di funzionamento in sistemi ad accumulo e in sistemi che sfruttano il raffrescamento evaporativo. I primi vengono utilizzati per ridurre i carichi di riscaldamento in quanto il sistema accumula energia termica durante il periodo diurno, in cui il fabbisogno di riscaldamento è minore, e lo rilasciano nel periodo notturno, quando il fabbisogno è maggiore, ma possono anche essere usati per accumulare il calore che diverrebbe un carico e utilizzarlo per altri scopi. I sistemi che sfruttano il raffrescamento evaporativo riducono il carico di raffrescamento riuscendo anche a ridurre gli effetti di isole di calore urbano e quindi anche gli effetti di inquinamento atmosferico ad esse legati. Queste tecnologie possono essere abbinate a superfici piane o verticali, opache o trasparenti, o utilizzati in particolari configurazioni, spesso vengono tra di loro combinate più tecnologie per sfruttare i vantaggi di tutte le tecnologie usate. Il problema principale dell'utilizzo di acqua in questi sistemi è la formazione di ruggine e corrosione delle superfici se non adeguatamente trattate, inoltre l'utilizzo di acqua comporta il consumo di energia per il pompaggio se presente e il consumo della risorsa stessa. Attualmente esistono alcune tecnologie che sfruttano le acque grigie e l'acqua meteorica per alimentare i sistemi ma queste acque per essere utilizzate necessitano prima di essere trattate.

In questo lavoro di tesi si è studiata una particolare tecnologia di involucro edilizio che funge da sistema di facciata ventilata utilizzante acqua. Per studiare il comportamento di questa parete si è eseguita una caratterizzazione sperimentale della parete, e successivamente si è creato un modello in grado di simulare questo comportamento. Questa tecnologia a seguito delle misurazioni si è dimostrata abbastanza efficacie nel ridurre le temperature superficiali e delle zone limitrofe ad esse, in particolare già alla portata minima usata di 250 l/h si è ottenuto un effetto decisamente apprezzabile di riduzione di temperatura. Con l'aumento della portata l'effetto si è amplificato ma ha raggiunto un limite legato alla temperatura dell'acqua a cui il sistema tendeva. Il problema principale per questa tecnologia riscontrato è legato all'eccessivo utilizzo di acqua che una volta utilizzata viene sprecata benché questa possa essere riutilizzata in quanto non subisce una variazione di temperatura così elevata da aver bisogno di essere trattata da grandi impianti per riportarla alle condizioni di partenza. Pertanto, può rivelarsi utile pensare a un metodo per riuscire a raccogliere l'acqua e rimetterla nel circuito generando così un sistema semi-chiuso. Inoltre, l'uso continuo dell'acqua ha portato sulla superficie il manifestarsi di macchie di ruggine legate alla presenza di materiali interni ai blocchi.

Un altro elemento che si è riscontrato dalla campagna sperimentale è che durante le ore in cui la radiazione solare è bassa, e anche le temperature, il sistema di pompaggio risulta meno efficiente, in quanto non produce una riduzione significativa delle temperature. È quindi sconsigliabile utilizzare il sistema durante le ore notturne e nelle prime ore giornaliere.

A seguito della campagna sperimentale è stato realizzato un modello che vuole simulare il comportamento del sistema. Il modello che è stato realizzato è in grado di simulare con buona precisione il comportamento del sistema nelle condizioni a secco e con portate inferiori a 500 l/h mentre per le portate più elevate il modello sottostima gli effetti positivi de sistema. Nonostante ciò, il modello è stato utilizzato per valutare gli effetti di riduzione di temperatura per un'altra località, in questo caso Città del Messico che ha temperature esterne mediamente inferiori a quelle di Torino ma radiazione solare più elevata. I risultati ottenuti mostrano come l'effetto di riduzione di temperatura superficiale, a parità di condizioni del sistema, siano minori rispetto a Torino ma comunque apprezzabili. In particolare la tecnologia ha un effetto molto positivo per ridurre le temperature superficiali me è sconsigliabile durante le ore notturne in quanto la temperatura scende al di sotto della temperatura dell'acqua e quindi anziché abbassare la temperatura della superficie si ottiene l'effetto contrario.

In conclusione, il sistema WW risulta un buon sistema in grado di ridurre i carichi di raffrescamento degli edifici, abbattendo le temperature superficiali riuscendo allo stesso tempo a creare una zona di comfort limitrofa alla parete e a mitigare l'effetto delle UHI. Come già indicato il sistema può essere migliorato pensando ad un sistema in grado di riciclare l'acqua che non evapora e a un sistema di pompaggio regolato in base alla temperatura superficiale della parete rispetto a quella esterna.

Bibliografia e sitografia

[1] A. Giovanardi, A. Passera, F. Zottele, R. Lollini, Integrated solar thermal façade system for building retrofit, Solar Energy, Volume 122, 2015

[2] Abdultawab Qahtan, Nila Keumala, S.P. Rao, Zulkiflee Abdul-Samad, Experimental determination of thermal performance of glazed façades with water film, under direct solar radiation in the tropics, Building and Environment, Volume 46, Issue 11,2011

[3] Amirreza Fateh, Davide Borelli, Francesco Devia, Helmut Weinläder, Summer thermal performances of PCM-integrated insulation layers for light-weight building walls: Effect of orientation and melting point temperature, Thermal Science and Engineering Progress, Volume 6, 2018.

[4] Andreas K. Athienitis, James Bambara, Brendan O'Neill, Jonathan Faille, A prototype photovoltaic/thermal system integrated with transpired collector, Solar Energy, Volume 85, Issue 1,2011.

[5] Angelotti A., Dama A., Mazzarella L., Perino M., 2007. Validazione sperimentale di un modello per facciate a "doppia pelle" in ventilazione meccanica. Proceedings of 62nd National Congress ATI, Vol. 1, pp. 306-311

[6] Ayyoob Sharifi, Yoshiki Yamagata, Roof ponds as passive heating and cooling systems: A systematic review, Applied Energy, Volume 160, 2015.

[7] Benjamin Riley, the state of the art of living walls: Lessons learned, Building and Environment, Volume 114,2017.

[8] Chi-Ming Lai, Shuichi Hokoi, Solar façades: A review, Building and Environment, Volume 91, 2015.

[9] Chong Shen, Xianting Li, Energy saving potential of pipe-embedded building envelope utilizing low temperature hot water in the heating season, Energy and Buildings, Volume 138, 2017.

[10] Chong Shen, Xianting Li, Thermal performance of double skin façade with built-in pipes utilizing evaporative cooling water in cooling season, Solar Energy, Volume 137, 2016.

[11] Churchill S.W., Chu H.H.S., 1975. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 18 No. 11, pp. 1323-1329.

[12] Dama A., Angeli D., Larsen O.K., 2017. Naturally ventilated double skin façade in modelling and experiments. Energy and Buildings, Vol. 144, pp. 17-29

[13] David A. Bainbridge, A Water Wall Solar Design Manual, 1981-2005

[14] Dirk Saelens, Staf Roels, Hugo Hens, Strategies to improve the energy performance of multipleskin facades, Building and Environment, Volume 43, Issue 4, 2008

[15] E. Iribar-Solaberrieta, C. Escudero-Revilla, M. Odriozola-Maritorena, A. Campos-Celador, C. García-Gáfaro, Energy Performance of the Opaque Ventilated Facade, Energy Procedia, Volume 78, 2015.

[16] Fernando del Ama Gonzalo et al, Thermal Simulation of a Zero Energy Glazed Pavilion in Sofia, Bulgaria. New Strategies for Energy Management by Means of Water Flow Glazing 2017 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 245 042011

[17] Francesco Goia, Marco Perino, Valentina Serra, Improving thermal comfort conditions by means of PCM glazing systems, Energy and Buildings, Volume 60, 2013

[18] H. Radhi, Evaluating the potential impact of global warming on the UAE residential buildings – a contribution to reduce the CO2 emissions, Energy Build, 44 (2009)

[19] Ion Visa, Macedon Moldovan, Mihai Comsit, Mircea Neagoe, Anca Duta, Facades Integrated Solarthermal Collectors – Challenges and Solutions, Energy Procedia, Volume 112, 2017

[20] 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

[21] Jochen Stopper, Felix Boeing, Dr. Daniel Gstoehl, Fluid Glass Façade Elements: Influences of dyeable Liquids within the Fluid Glass Façade, 2014.

[22] Kadir Amasyali, Nora M. El-Gohary, A review of data-driven building energy consumption prediction studies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 81, Part 1,2018

[23] L. Bianco, Y. Cascone, F. Goia, M. Perino, V. Serra, Responsive glazing systems: Characterisation methods, summer performance and implications on thermal comfort, Solar Energy, Volume 158, 2017.

[24] Luis Pérez-Lombard, José Ortiz, Christine Pout, A review on buildings energy consumption information, Energy and Buildings, Volume 40, Issue 3,2008

[25] M. Mirsadeghi, D. Cóstola, B. Blocken, J.L.M. Hensen, Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: implementation and uncertainty, Applied Thermal Engineering, March 2013

[26] M.S. Sodha, S.C. Bhardwaj, S.C. Kaushik Thermal load leveling of heat flux through an insulated thermal storage water wal, I Energy Res., 1981

[27] María Ibañez-Puy, Marina Vidaurre-Arbizu, José Antonio Sacristán-Fernández, César Martín-Gómez,Opaque Ventilated Façades: Thermal and energy performance review,Renewable and Sustainable Energy Reviews,Volume 79,2017.

[28] McAdams W.H. 1954. Heat Transmission. McGraw-Hill, New York, NY.

[29] Miqdam T Chaichan, Khaleel I Abass, Raid S. Jawad, Aidah M J Mahdy, Thermal performance enhancement of simple Trombe Wall, International Journal of Computation and Applied Sciences, Vol. 2, Issue 1, FEBRUARY 2017

[30] Miqdam T Chaichan1, Khalil I Abaas2, Dina S M Al-Zubaidi, A Study of a Hybrid Solar Heat Storage Wall (Trombe Wall) Utilizing Paraffin Wax and Water, Journal of Research in Mechanical Engineering, Volume 2,2016.

[31] Omidreza Saadatisn, K. Sopian, C.H. Lim, Nilofar Asim, M.Y. Sulaiman, Trombe walls: A review and challenges in research and development, 2012

[32] R.D. McFarland, J.D. Balcornb, Effect of design parameter changes on the performance of thermal storage wall passive systems, Proceedings of the 3rd National Passive Solar Conference, 1979.

[33] Sharples S. 1984. Full-scale Measurements of Convective Energy Losses from Exterior Building Surfaces. Building and Environment, Vol. 19, No. I, pp. 31-39.

[34] Terrados-Cepeda, F. J., Baco-Castro, L., Moreno-Rangel, D. (2015). Patio 2.12: Vivienda prefabricada, sostenible, autosuficiente y energéticamente eficiente. Participación en la competición Solar Decathlon Europe 2012. Informes de la Construcción, 67(538): e088, doi: http://dx.doi.org/10.3989/ic.13.138.

[35] Ting Wu, Chengwang Lei, A review of research and development on water wall for building applications, Energy and Buildings, Volume 112, 2016

[36] Tomas Gil-Lopez, Carmen Gimenez-Molina, Influence of double glazing with a circulating water chamber on the thermal energy savings in buildings, Energy and Buildings, Volume 56,2013

[37] Weihua Lv, Chong Shen, Xianting Li, Energy efficiency of an air conditioning system coupled with a pipe-embedded wall and mechanical ventilation, Journal of Building Engineering, Volume 15, 2018.

[38] Ylenia Cascone, Alfonso Capozzoli, Marco Perino,Optimisation analysis of PCM-enhanced opaque building envelope components for the energy retrofitting of office buildings in Mediterranean climates, Applied Energy, Volume 211, 2018.

http://green-buildings.ru/en/bio-skin-holodnyj-ostrov-v-zharkom-gorode

https://www.iea.org/statistics/

http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#TMY