



Ricerca di Sistema elettrico

Caratterizzazione e applicazioni di *cool materials* per le chiusure verticali degli edifici

M. Zinzi, G. Fasano, C. Girardello

APPLICAZIONI DI *COOL MATERIALS* PER LE CHIUSURE VERTICALI DELL'INVOLUCRO EDILIZIO

M. Zinzi, G. Fasano (ENEA)

C. Girardello (Stagista ENEA nell'ambito di Master in Progettazione Ecosostenibile, Dipartimento di Architettura Università degli Studi Roma Tre)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia

Progetto: Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Obiettivo: Sviluppo, sperimentazione e caratterizzazione di materiali innovativi (Cool materials)

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 APPLICAZIONI DI <i>COOL MATERIALS</i> PER FACCIATE.....	6
3 MATERIALI.....	6
4 MISURE DI <i>RIFLETTANZA</i> ED <i>EMISSIVITÀ</i>	7
5 ANALISI NUMERICA.....	10
5.1 OBIETTIVI.....	10
5.2 CODICE DI CALCOLO PER LE SIMULAZIONI.....	10
5.3 APPLICAZIONE NEL RESIDENZIALE.....	11
5.3.1 <i>Modello edificio residenziale</i>	11
5.3.2 <i>Analisi carichi energetici sul campione scelto</i>	14
5.3.3 <i>Analisi temperature superficiali e indoor sul campione scelto</i>	17
5.3.4 <i>Analisi a riflettanza variabile</i>	22
5.4 APPLICAZIONI NEL SETTORE COMMERCIALE.....	24
5.4.1 <i>Modello edificio commerciale</i>	24
5.4.2 <i>Analisi carichi energetici sul campione scelto</i>	26
6 CONCLUSIONI.....	28
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	28

Sommario

Sono definiti *cool materials* i materiali caratterizzati da elevata *riflettanza* solare, ottenuta attraverso l'utilizzo di tinte chiare (tipicamente il bianco) o con colori più scuri, trattati però con speciali pigmenti riflettenti all'infrarosso vicino, che aumentano la *riflettanza* nel vicino infrarosso mantenendo la risposta cromatica desiderata. nell'infrarosso vicino. La elevata *riflettanza* permette di limitare l'innalzamento della temperatura superficiale quando sottoposti a carichi solari. Un'alta emissività inoltre determina un più favorevole rilascio termico in fase notturna del calore immagazzinato durante le ore diurne. Queste caratteristiche influiscono sulla riduzione del flusso di calore trasmesso verso l'interno di un edificio e, nel caso di un'applicazione su pavimentazione urbana, sulla riduzione del calore rilasciato all'ambiente esterno per convezione. In entrambi i casi i *cool materials* rappresentano una strategia importante per mitigare due fenomeni emersi già in passato che influenzano negativamente la qualità ambientale ed energetica delle città nei climi temperati: l'incremento dei consumi energetici e l'effetto isola di calore urbana. I *cool materials* utilizzati come rivestimento per i tetti, i *cool roof*, sono stati studiati e testati negli ultimi anni ed ora sono considerati una tecnologia efficiente e matura per molte tipologie di edifici in differenti climi. Tuttavia, il crescente aumento dei consumi per la climatizzazione estiva e il target a breve scadenza di edifici a consumo quasi zero, suggeriscono l'adozione di tecnologie *cool* in tutti quei casi in cui il raffrescamento gioca un ruolo fondamentale nel bilancio energetico degli edifici. Da questo punto di vista si è esplorata la possibilità di sviluppare e testare *cool materials* per facciate: diverse tinte e colorazioni sono state prodotte e caratterizzate, applicando tecnologie riflettenti nell'infrarosso vicino in modo che il materiale si comportasse nello spettro visibile secondo la risposta cromatica desiderata. A partire dai dati sperimentali è stata poi eseguita un'analisi energetica sull'impatto di facciate *cool* sul bilancio complessivo di edifici residenziali e commerciali. Analisi di fabbisogno energetico e di comfort termico in edifici non climatizzati sono state condotte per un edificio residenziale di riferimento, considerando le seguenti variabili: livello di isolamento, zona climatica, *riflettanza* delle pareti, condizioni operative indoor. Lo studio ha consentito di esplorare potenzialità e limiti della tecnologia, fornendo indicazioni sulle condizioni più favorevoli per l'adozione di involucri ad elevata *riflettanza* solare. Lo stesso studio è stato replicato su un edificio commerciale. Potenzialità e limiti della tecnologia sono discussi

1 Introduzione

E' stimato che oltre l'80% della popolazione europea vivrà in aree urbane nel 2030 [1]. Questo processo di concentrazione della popolazione influenzerà la distribuzione di energia, le condizioni ambientali e la salute pubblica. Una conseguenza critica di questi fenomeni, amplificata dal global warming, sarà il rafforzamento del fenomeno dell'isola di calore urbana (UHI). Esso è rappresentato dall'innalzamento delle temperature dell'aria nelle città che raggiungono valori decisamente più elevati rispetto a quelli riscontrati nelle aree rurali. L'isola di calore dipende dalla modifica del territorio operata dall'uomo che ha come conseguenza la sostituzione della vegetazione con superfici costruite, caratterizzate da elevati valori di assorbimento solare, elevata impermeabilità e da proprietà termiche che innalzano la quantità di energia termica immagazzinata. L'isola di calore è anche causata da molte altre attività antropiche: gli scarichi dei mezzi di trasporto pubblici e privati e degli impianti di riscaldamento degli edifici; l'aria calda rilasciata dagli impianti di raffrescamento, etc. Diversi studi hanno quantificato questo fenomeno ed è stato possibile registrare intensità di isola di calore superiori ai 12 °C [2-8].

L'UHI ha severe implicazioni sulle performance e sui costi energetici degli edifici che rappresentano approssimativamente il 40% dei consumi energetici totali per usi finali e il 36% di emissioni di CO₂ in Europa. Inoltre l'isola di calore è un problema che non riguarda solo il campo energetico, infatti in concomitanza con questo fenomeno si verificano anche problemi di discomfort e un intensificarsi dei problemi di salute durante le ondate di calore. Non è da trascurare inoltre la formazione dello smog e di agenti inquinanti che trovano in un ambiente caldo le condizioni più favorevoli.

La temperatura superficiale di picco dei materiali da costruzione può raggiungere valori elevatissimi, anche 30 °C più alta rispetto a quella dell'aria. L'energia termica immagazzinata viene poi rilasciata nell'ambiente prima attraverso uno scambio termico per conduzione tra gli strati solidi e poi per convezione tra la superficie dei materiali e l'aria, con un conseguente incremento della temperatura ambiente. Strade, marciapiedi, parcheggi, aree pedonali, giocano un ruolo rilevante in questo bilancio energetico, dato che rappresentano tra il 30 e il 45% dell'impronta urbana [9]. I valori di riflettanza solare tipici per i materiali che rappresentano le strutture urbane sono: 5% per gli asfalti appena posati (il conglomerato bituminoso ricopre uniformemente la superficie); 15% per l'asfalto datato; 25% per il calcestruzzo.

I *cool materials* sono una particolare categoria di materiali che sottoposti all'irraggiamento solare non subiscono innalzamenti significativi della temperatura superficiale vista la loro capacità di riflettere le radiazioni nelle diverse lunghezze d'onda, rimanendo pertanto "materiali freschi". Tinte bianche e chiare hanno intrinsecamente tali caratteristiche. Tecnologie più innovative utilizzano pigmenti caratterizzati da una elevata riflettanza nella porzione infrarossa dello spettro solare, mantenendo però il profilo tipico del colore di riferimento nello spettro visibile (*cool coloured materials*). I materiali per il rivestimento sono caratterizzati dalla riflettanza solare (capacità di riflettere la radiazione solare incidente sul materiale) ma anche dall'emissività termica (capacità di emettere calore nella lunghezza d'onda dell'infrarosso medio e lontano). L'elevata emittanza permette al materiale di raffreddarsi nelle ore notturne irradiando verso la volta celeste il calore accumulato durante le ore diurne. L'emissività ha in genere un valore simile per quasi tutti i materiali (0.9), fanno eccezione i metalli, caratterizzati da valori più bassi di emissività. In sostanza si può dire che a parità di altri fattori e dati sulle condizioni climatiche, i *cool materials* rimarranno più freschi rispetto quelli convenzionali. Tale comportamento riduce l'innalzamento della temperatura superficiale del materiale con benefici quali la riduzione del calore ceduto all'ambiente interno e conseguente miglioramento del comportamento energetico degli edifici durante la stagione estiva, la riduzione del calore ceduto all'ambiente esterno permettendo la mitigazione dell'isola di calore urbana e la riduzione dello stress termico dei rivestimenti dell'involucro consentendo l'incremento della loro funzionalità e durabilità.

Applicazioni di *cool materials* per le coperture sono una tecnologia ormai matura (*cool roofs*) e numerosi studi e applicazioni confermano i benefici per la riduzione dei consumi per la climatizzazione estiva e, in molti casi, per il risparmio energetico complessivo su base annuale [10-16]. Nell'ambito di prestazioni

energetiche sempre più avanzate, con particolare attenzione ai consumi per il raffrescamento estivo in continuo aumento, e con il target di edifici a consumo quasi zero nei prossimi, l'utilizzo di questi materiali anche per le facciate degli edifici (e di alcune tipologie edilizie in particolare) può essere non trascurabile.

2 Applicazioni di *cool materials* per facciate

Il raffrescamento passivo si basa sull'uso di tecniche per il controllo del calore, della radiazione solare, dell'inerzia termica e della dissipazione del calore. I *cool materials* sono particolarmente efficaci sulle coperture (*cool roof*), poiché il picco della radiazione solare nella stagione estiva si ha sulle superfici orizzontali e, in misura minore, su quelle moderatamente inclinate. Per le medesime considerazioni di tipo geometrico, le coperture sono i componenti di involucro con il fattore di vista maggiore rispetto alla volta celeste e, di conseguenza, quelli con maggiori potenzialità di raffrescamento radiativo durante la fase notturna.

Diverso è il comportamento delle facciate, tipicamente inclinate a 90°. Innanzitutto gli apporti solari sono funzione della stagione ma anche dell'orientamento della facciata, le quali danno di conseguenza un contributo differente alla riduzione degli apporti solari. Gli apporti solari sulle facciate sono decisamente minori rispetto a quelli sul piano orizzontale ma non a priori insignificanti, soprattutto nell'ottica della realizzazione di edifici a consumo energetico quasi nullo. È importante ricordare che anche il raffrescamento notturno è meno efficace rispetto alle coperture, in quanto le facciate hanno un fattore di vista pari alla metà delle superfici orizzontali con conseguente riduzione della dispersione termica per irraggiamento.

Rispetto alle coperture che prevedono una molteplicità di materiali di finitura (membrane, guaine, lastricati, laterizi, pitture), l'attenzione di questo studio si concentra sul trattamento delle finiture esterne, in particolare, pitture per facciata che trovano applicazione nelle nuove costruzioni e nella riqualificazione energetica degli edifici con isolamento dall'esterno (il cosiddetto *cappotto*). Si tratta generalmente di pitture a base acqua o acriliche, che possono realizzate in diverse tinte. I materiali caratterizzati in questo studio fanno parte dei sopra citati *cool coloured materials*, che presentano il maggiore interesse dal punto di vista di innovazione di prodotto e di applicazione nel contesto urbano già esistente.

3 Materiali

Nella fase di laboratorio sono stati presi in esame dei campioni per rivestimenti esterni. Per ogni variazione cromatica sono stati prodotti due campioni: uno realizzato con prodotto standard ed un altro con tecnologia riflettente. In questa fase di laboratorio sono state misurate e calcolate le proprietà ottiche e radiative di una serie di campioni dello stesso colore ma con diverso trattamento all'infrarosso, completata con una serie di calcoli dettati dalle normative tecniche. Sono stati presi in esame 4 differenti colori nelle due versioni "standard" e "cool" (totale 8 campioni) trattati rispettivamente con pigmenti tradizionali e con pigmenti ad elevata riflettanza all'infrarosso e messi a confronto attraverso le simulazioni energetiche per comparare le prestazioni di entrambi i prodotti.

Per il set di materiali da testare l'azienda ha preparato un set di campioni secondo le specifiche dell'ENEA: un codice identificativo; dimensioni 70x70 mm; substrato in alluminio; spessore della pittura dello stesso ordine delle applicazioni reali. Si ritiene importante ricordare che l'ultimo aspetto è cruciale ai fini della caratterizzazione del prodotto e che i risultati ottenuti con il presente studio sono validi per pitture aventi tale spessore. I campioni con relativo codice identificativo (es. C1_S= campione standard C1_C=campione cool) sono presentati in figura 1, dalla quale emerge che sono state individuate due tipologie di prodotto: una serie di colori chiari e brillanti; una serie di colori scuri.

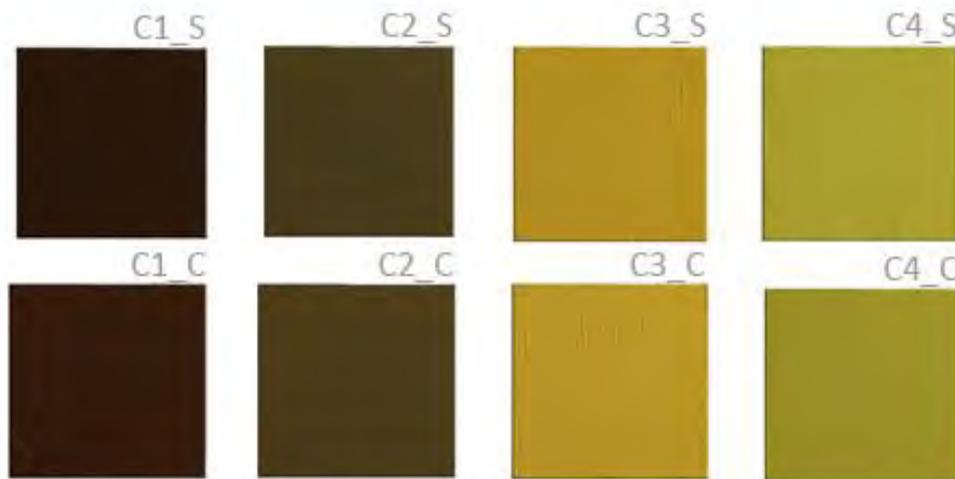


Figura 1. Campioni di colore scuro e di colore chiaro

4 Misure di riflettanza ed emissività

Il parametro principale che caratterizza il comportamento dei materiali in presenza della radiazione solare è la riflettanza. La sorgente che emette le radiazioni è nel caso specifico il sole, che ha convenzionalmente uno spettro di emissione che va da 300 a 2500 nanometri. All'interno di questo spettro ricadono i campi: UV-A (300-380 nm); visibile (380-780 nm); infrarosso vicino NIR (780-2500 nm). Ai fini della caratterizzazione del prodotto sono eseguite misure di riflettanza ρ su tutto lo spettro solare, i dati spettrali sono poi integrati nei tre spettri di riferimento: visibile (pedice v), vicino infrarosso (pedice nir) e solare (pedice e). La *riflettanza* può essere espressa in termini assoluti, con valori compresi tra 0 e 1, oppure in percentuale, con valori compresi tra 0 e 100. Facendo riferimento al comportamento su tutto lo spettro solare, elevata *riflettanza* implica ridotto assorbimento dei raggi solari da parte del materiale e, conseguentemente, minor surriscaldamento in presenza di radiazione solare. Lo strumento utilizzato uno spettrofotometro Perkin Elmer Lambda 950 a doppio raggio equipaggiato con una sfera integratrice con diametro di 15 centimetri e con rivestimento in spectralon, accessorio necessario per misure su materiali diffusivi come quelli in esame. Le misure sono eseguite con campione di riferimento da due pollici, realizzato in Spectralon e provvisto di certificato di calibrazione. Le procedure e le attrezzature di misura, nonché i calcoli e le integrazioni, sono conformi alle norme di riferimento, in particolare:

- ISO 9050. *Glass in building-determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors, 2003.*
- EN 410. *Glass in building - Determination of luminous and solar characteristics of glazing, 201.1*
- ASTM E903 – 12. *Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres, 2012.*
- EN 14500. *Blinds and shutters - Thermal and visual comfort - Test and calculation methods, 2008.*

Lo strumento presente nel laboratorio ENEA è uno spettrofotometro a rilevazione automatica a doppio raggio Perkin Elmer Lambda 950. Lo spettro di scansione è, come detto, 300-2500 nm; la risoluzione spettrale 5 nm; l'apertura delle slitte, che determinano la suddivisione in spettri monocromatici, è 2 nm nello spettro visibile e modalità servo assistita nell'infrarosso vicino. Quest'ultima modalità consente di variare la larghezza della slitta in modo da avere per ogni lunghezza d'onda il massimo dell'energia disponibile, la dimensione massima non può essere comunque superiore a 20 nm.

I risultati spettrali sono presentati in figura 2 e in ogni grafico sono tracciati gli andamenti di riflettanza spettrale di ogni campione nella versione convenzionale (S) e in quella cool (C). Su ogni grafico è inoltre evidenziata la porzione spettrale corrispondente al range visibile. I valori integrati sui vari spettri e norme di riferimento sono presentati in tabella 1, nell'ultima colonna della stesa sono riportati anche i valori di

emissività, commentati al paragrafo successivo. I dati di *riflettanza* sono espressi in percentuale [0-100], quelli di emissività in valore assoluto [0-1].

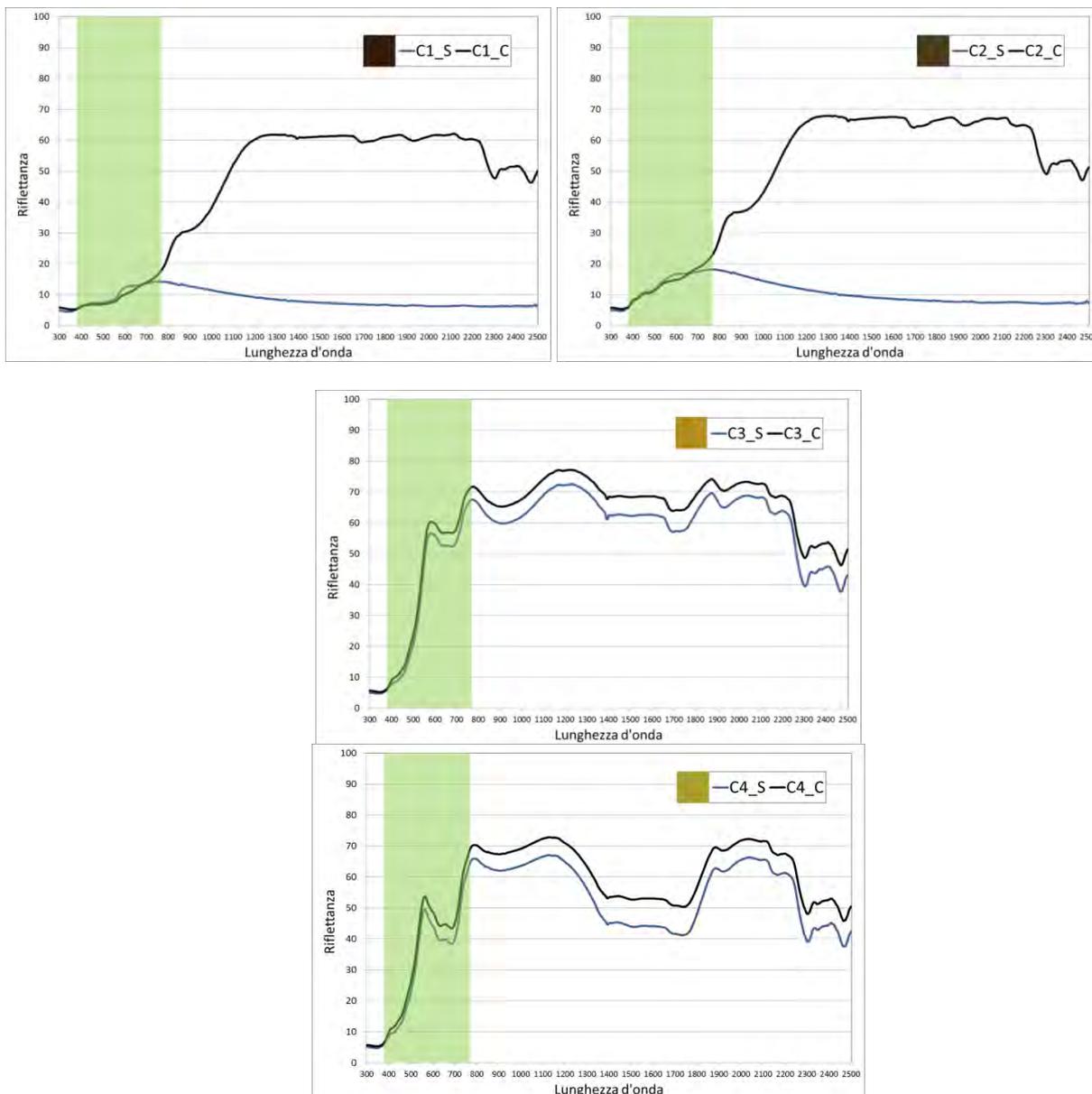


Figura 2. Riflettanza spettrale dei campioni: C1, C2, C3 e C4 nella versione convenzionale (S) e cool (C)

Tabella 1. Valori integrati delle misure di riflettanza ed emissività dei campioni analizzati

Campioni	ρ_e (9050) [%]	ρ_v (9050) [%]	ρ_{nir} (9050) [%]	ρ_e (410) [%]	ρ_v (410) [%]	ϵ [-]
C1_S	10	10	10	10	10	0.90
C1_C	25	8	46	24	8	0.87
C2_S	14	15	13	13	15	0.90
C2_C	30	14	51	29	14	0.87
C3_S	49	44	64	48	44	0.89
C3_C	53	47	69	52	47	0.88
C4_S	45	40	59	43	40	0.88
C4_C	49	44	66	48	44	0.88

Nella tabella 2 sono presentate alcune elaborazioni delle misure eseguite sui campioni. In particolare per ogni colore è calcolato l'incremento della riflettanza solare e al vicino infrarosso dovuto all'utilizzo di pigmenti riflettenti. Essendo il prodotto invariante rispetto alla *riflettanza* visibile, questa non è stata presa in considerazione nella tabella. L'incremento della *riflettanza* è espresso in termini assoluti e percentuali, al fine verificare i benefici per le diverse gradazioni di colore.

Tabella 2. Incremento assoluto e percentuale della riflettanza solare e al vicino infrarosso con il rivestimento cool

Colore	$\Delta\rho_e$ [-]	$\Delta\rho_e$ [%]	$\Delta\rho_{nir}$ [-]	$\Delta\rho_{nir}$ [%]
C1	15	149	36	364
C2	16	114	38	307
C3	4	8	5	8
C4	5	11	6	11

I risultati evidenziano due ben differenziate categorie di prodotto, i bianchi e i neri. Questi ultimi sono quelle pitture che hanno una base di colore nero e quindi, più scure: C1_S, C1_C, C2_S, C2_C. I pigmenti riflettenti neri sono altamente prestazionali e quello che ne discende è un deciso incremento della *riflettanza* rispetto alle pitture convenzionali, come ben evidenziato dai grafici spettrali in figura 2. I prodotti convenzionali di questa categoria sono decisamente scuri, con *riflettanza* visibile e solare molto simile, compresa tra 10 e 15%. L'effetto dei pigmenti riflettenti è un incremento di *riflettanza* all'infrarosso vicino compreso da il 36 e il 38%. Questo incremento determina un aumento della *riflettanza* solare in termini assoluti compreso tra il 15 e il 16%.

Decisamente diversi sono i risultati per i colori bianchi. Si tratta di pitture decisamente più chiare, nella cui formulazione è assente il colore nero e il colore bianco è a base di biossido di titanio. La caratteristica di questo materiale, universalmente utilizzato per pitture edili, è di avere una elevata *riflettanza* all'infrarosso e, di conseguenza, il beneficio dei pigmenti cool è ridimensionato, in quanto si trovano ad opera con qualcosa che è prestazionale sin dall'inizio. Colori con queste caratteristiche sono: C3_S, C3_C, C4_S, C4_C e si attestano tra il 45 e il 49% per la *riflettanza* solare e decisamente sopra il 59% per la *riflettanza* all'infrarosso. Gli incrementi assoluti dovuti ai materiali cool risultano di conseguenza limitati e si attestano tra il 4 e il 6% sia per lo spettro solare che per l'infrarosso vicino.

La seconda proprietà superficiale dei materiali che determina lo scambio termico tra involucro e ambiente esterno è l'emissività. L'emissività di un qualsiasi corpo, funzione della temperatura e della lunghezza d'onda, è espressa come rapporto rispetto a quella del corpo nero, considerato come emettitore perfetto. Per tale motivo l'emissività è compresa tra 0 e 1, quindi maggiore è l'emissività, maggiore sarà la tendenza del materiale a smaltire il calore accumulato dalla struttura.

Le misure sono state eseguite con l'emissometro Device & Services AE1/RD1, che opera secondo le specifiche dello standard: ASTM C1371 - 2010 Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers. Si tratta di una misura che determina direttamente il valore integrato della grandezza, senza eseguire misure di tipo spettrale.

I risultati sono elencati all'ultima colonna della tabella 1. I valori sono sempre molto alti, essendo materiali tipicamente non metallici. L'unico dato significativo è una minore emissività dei *cool materials*. Il fenomeno è spiegabile con l'incremento della riflettanza nella regione remota del vicino infrarosso che rimane elevata nella regione più vicina del medio infrarosso (4-5 micron) a discapito della emissività di cui è il completo a 1, per materiali opachi. La riduzione di emissività è comunque contenuta in valori $\pm 0.02/3$, che possono essere considerati trascurabili per quanto attiene alla risposta termica del materiale nei meccanismi di scambio termico che hanno luogo a temperature ambiente.

5 Analisi numerica

5.1 Obiettivi

L'obiettivo che la ricerca si è posta è stato quello di dimostrare con quali valori sia possibile ridurre il carico termico nella stagione estiva agendo sull'involucro, mettendo a confronto località appartenenti a diverse fasce climatiche soprattutto dell'area mediterranea. Agire sull'involucro significa mettere in atto tecniche di raffrescamento passivo attraverso tecnologie e materiali ad elevata riflessione solare da utilizzare per le superfici disperdenti degli edifici. Per una valutazione completa di questa tecnologia è stato analizzato il bilancio complessivo annuale dei carichi termici quindi valutando l'impatto sia nella stagione estiva che in quella invernale. Per le caratteristiche climatiche lo studio si è focalizzato nell'area mediterranea, essendo fortemente interessata a tecnologie in grado di ottimizzare le prestazioni energetiche per il raffrescamento estivo di edifici climatizzati (sistema involucro-impianti) e le condizioni di comfort termico negli edifici non climatizzati (sistema involucro).

Completata la caratterizzazione sperimentale dei materiali si è impostato un set di calcoli avente come obiettivo valutare l'impatto dei materiali riflettenti all'infrarosso vicino sulle prestazioni energetiche dell'edificio. Per avere una panoramica quanto più ampia possibile sulle potenzialità della tecnologia si è innanzitutto scelto un materiale di riferimento nelle due versioni: standard e cool (campione C2). Successivamente sono state eseguite analisi termiche per comparare le prestazioni dei due prodotti ed individuate due tipologie sensibili di edifici: residenziale e commerciale/industriale. Sono state quindi definite una serie di variabili per monitorare ad ampio spettro l'impatto delle pitture: livello di isolamento termico dell'edificio; zona climatica di pertinenza; regime dell'edificio durante la stagione estiva (con o senza impianto di climatizzazione). I parametri sensibili analizzati a valle dei calcoli sono: prestazioni energetiche con impianto di climatizzazione attivo, condizioni di comfort termico in edifici non climatizzati, andamento delle temperature superficiali delle facciate di involucro.

Tabella 1. Dati climatici delle località selezionate

	Radiazione solare totale (kWh)				Temperatura esterna a bulbo secco (°C)			
	MILANO	ROMA	PALERMO	ABU DABHI	MILANO	ROMA	PALERMO	ABU DABHI
1	31	55	73	209	1	7	12	18
2	52	68	89	223	3	8	13	20
3	96	116	140	224	9	10	13	22
4	138	157	181	239	13	13	16	27
5	178	206	228	285	17	17	19	31
6	190	217	235	279	20	20	22	33
7	205	230	255	269	23	23	25	34
8	171	200	232	267	22	23	26	35
9	123	146	172	249	19	21	24	33
10	74	101	129	245	13	17	20	29
11	33	58	86	213	7	13	17	24
12	26	45	66	199	2	9	13	20

5.2 Codice di calcolo per le simulazioni

L'analisi numerica è stata eseguita con il codice EnergyPlus, sviluppato dal Lawrence Berkeley National Laboratory in California, accoppiato all'interfaccia grafica di elaborazioni dati Design Builder, strumenti che consentono l'analisi energetica in regime dinamico attraverso l'elaborazione di un'elevata quantità di dati in ingresso e in uscita con conseguente precisione di risultati. Innanzitutto sono state individuate quattro

diverse località di cui tre italiane, rappresentative di aree geografiche differenti come Milano, Roma e Palermo, e una in medio-oriente come Abu Dhabi, rappresentativa di un clima più estremo e soggetta ad un notevole carico per la climatizzazione estiva. I dati principali dati climatici sono riassunti in tabella 1. Un altro parametro variabile è stato il livello di isolamento termico pertanto sono state effettuate simulazioni con una configurazione isolata del modello secondo i valori a norma di legge (edifici di nuova costruzione o soggetti a ristrutturazione) e un'altra configurazione senza isolamento secondo valori medi per edifici esistenti. Le analisi sono state eseguite ipotizzando l'edificio con un impianto di climatizzazione estiva (set point: 26°C di temperatura dell'aria e 60% di umidità relativa) e di climatizzazione invernale (set point: 20°C di temperatura dell'aria) e per il calcolo dei carichi termici dell'involucro si è ipotizzato un sistema impiantistico ideale a potenza infinita, quindi privo di perdite, con un ciclo di funzionamento continuo di 24 ore al giorno, in accordo con l'attuale quadro normativo.

5.3 Applicazione nel residenziale

5.3.1 Modello edificio residenziale

L'edificio preso come modello per le simulazioni è una palazzina di tre piani a destinazione residenziale con due appartamenti per piano, una delle tipologie edilizie più diffuse in Italia. L'edificio presenta un fattore di forma (rapporto tra superficie disperdente e volume climatizzato) di 0.54, un valore intermedio tra forme più disperdenti e forme compatte.

Una serie di calcoli iniziali si sono resi necessari per determinare l'orientamento dell'edificio pertanto sono state eseguite simulazioni annuali (carico di riscaldamento e di raffrescamento) con orientamenti differenti secondo gli otto punti cardinali e si è scelto quello il cui risultato più si avvicinava alla media delle diverse simulazioni. L'edificio analizzato risulta quindi avere un orientamento con l'asse longitudinale inclinato di 45° rispetto l'asse est-ovest e l'appartamento tipo risulta pertanto avere tre esposizioni N-E S-E e S-O con una distribuzione più omogenea dell'irraggiamento solare.

Le caratteristiche geometriche di un appartamento sono le seguenti, superficie calpestabile 80.41 m², volume lordo 274m³, superfici finestrate 10.50m², altezza interpiano 2.7m. Ogni appartamento è suddiviso in due zone termiche, zona notte e zona giorno ed è presente una zona non climatizzata corrispondente con il vano scala. In figura 3 è riportata il modello dell'edificio.

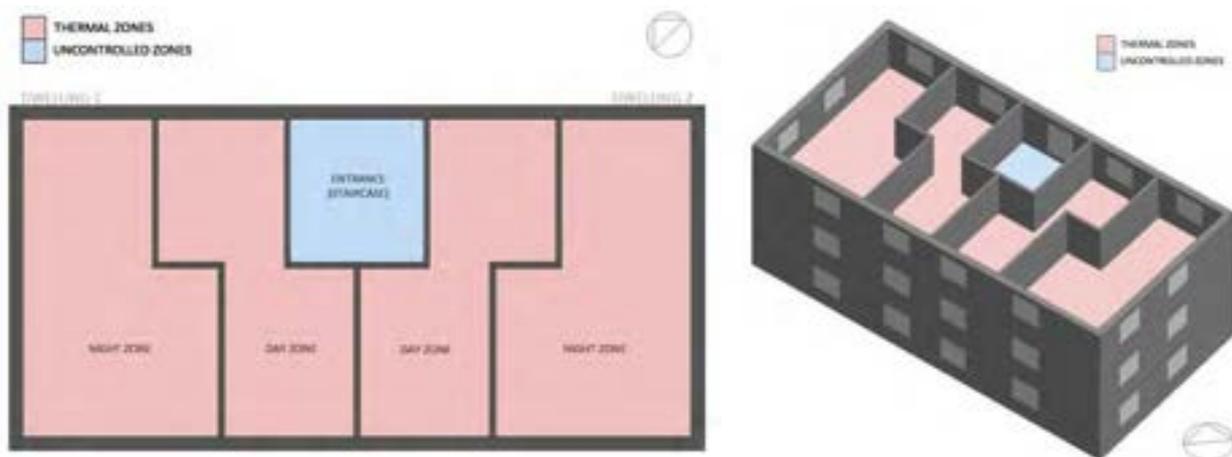


Figura 3. Pianta tipo edificio residenziale e spaccato assometrico

Sono state analizzate due configurazioni di involucro, una isolata e una priva di isolamento termico, con i dati dei vari componenti dell'involucro presenti in tabella 2, per Abu Dhabi sono stati ipotizzati gli stessi valori individuati per Palermo.

Tabella 2. Trasmittanza termica dei vari componenti dell'involucro

Località	Configurazione	Facciata U [W/m ² K]	Tetto U [W/m ² K]	Solaio terra. U [W/m ² K]	Finestra U [W/m ² K]
MILANO	Isolata	0.40	0.36	0.39	1.92
	Non isolata	1.21	1.25	1.28	3.28
ROMA	Isolata	0.42	0.36	0.43	2.20
	Non isolata	1.21	1.25	1.28	5.58
PALERMO/ ABU DABHI	Isolata	0.73	0.43	0.69	3.33
	Non isolata	1.21	1.25	1.28	5.58

L'involucro è stato ipotizzato con tecnologie a umido, sono stati adottati i seguenti pacchetti tecnologici dei vari componenti, elencati in tabella 3 e 4, i valori di riferimento per le proprietà termofisiche dei materiali fanno riferimento alla norma UNI 10351

Tabella 3. Configurazione isolata (edificio con impianto di climatizzazione)

CONFIGURAZIONE ISOLATA				
PARETE	PROPRIETA' GEOMETRICHE-TERMOFISICHE			
	Spessore (m)	Conducibilità (W/mK)	Calore specifico (J/kgK)	Densità (kg/mc)
intonaco di calce e gesso	0.02	0.7	1000	1400
blocco di laterizio forato	0.08	0.18-0.24-0.40	840	800 - 1000-1400
pannello isolante naturale	0.04-0.08	0.12	1700	800
blocco di laterizio forato	0.24	0.18-0.24-0.40	840	800 - 1000-1400
intonaco di gesso	0.01	0.35	1000	1200
SOLAIO A TERRA	PROPRIETA' GEOMETRICHE-TERMOFISICHE			
	Spessore (m)	Conducibilità (W/mK)	Calore specifico (J/kgK)	Densità (kg/mc)
cls alleggerito	0.05	0.25	1000	1000
piastra in C.A.	0.2	2.5	1000	2400
guaina impermeabilizzante	0.001	0.2	1100	930
pannello isolante EPS	0.04-0.08	0.04	1400	15
sottofondo in cls	0.02	0.25	1000	1000
pavimento in ceramica	0.01	1.3	840	2300
SOLAIO DI COPERTURA	PROPRIETA' GEOMETRICHE-TERMOFISICHE			
	Spessore (m)	Conducibilità (W/mK)	Calore specifico (J/kgK)	Densità (kg/mc)
pav.mattonelle	0.01	1	800	2000
sottofondo in cls	0.02	0.25	1000	1000
pannello isolante EPS	0.04-0.08	0.04	1400	15
cls a base di calce e sabbia	0.04	1	1000	2000
blocco di laterizio forato	0.2	0.24	840	1000
intonaco di gesso	0.01	0.35	1000	1200

Tabella 4. Configurazione non isolata (edificio con impianto di climatizzazione)

CONFIGURAZIONE NON ISOLATA				
PARETE	PROPRIETA' GEOMETRICHE-TERMOFISICHE			
	Spessore (m)	Conducibilità (W/mK)	Calore specifico (J/kgK)	Densità (kg/mc)
intonaco esterno	0.02	0.7	1000	1400
mattoncino pieno	0.08	0.8	840	2000
intercapedine d'aria	0.05	Resistenza termica = 0.21 mqK/W		
mattoncino pieno	0.08	0.8	840	2000
intonaco di gesso	0.01	0.35	1000	1200
SOLAIO A TERRA				
	PROPRIETA' GEOMETRICHE-TERMOFISICHE			
	Spessore (m)	Conducibilità (W/mK)	Calore specifico (J/kgK)	Densità (kg/mc)
cls alleggerito	0.05	0.25	1000	1000
piastra in C.A.	0.2	2.5	1000	2400
guaina impermeabilizzante	0.001	0.2	1100	930
massetto cls di argilla esp	0.06	0.25	1000	1000
sottofondo in cls	0.02	0.25	1000	1000
pavimento in ceramica	0.01	1.3	840	2300
SOLAIO DI COPERTURA				
	PROPRIETA' GEOMETRICHE-TERMOFISICHE			
	Spessore (m)	Conducibilità (W/mK)	Calore specifico (J/kgK)	Densità (kg/mc)
pav.mattonelle	0.01	1	800	2000
sottof. cls di argille espanse	0.02	0.25	1000	1000
cls di aggreganti naturali	0.04	1	1000	2000
blocco di laterizio forato	0.2	0.4	840	1400
intonaco di gesso	0.01	0.35	1000	1200

Per le aperture sono stati adottati tipi di vetro e telai riportati in tabella 5, scelti in base ad un database presente nel software di simulazione.

Tabella 5. Tipologie di infisso adottati per la configurazione isolata e non isolata

CONFIGURAZIONE ISOLATA				
PROPRIETA' INFISSE				
MILANO	Spessore/Largh.	Fattore solare	Trasmissione visibile	U (W/mqK)
vetrocamera basso emissivo	3-13(argon)-3	0.60	0.77	1.51
telaio in PVC	60			2.47
finestra				1.92
PROPRIETA' INFISSE				
ROMA	Spessore/Largh.	Fattore solare	Trasmissione visibile	U (W/mqK)
vetrocamera basso emissivo	3-13(aria)-3	0.60	0.77	1.80
telaio in legno	60			2.63
finestra				2.20
PROPRIETA' INFISSE				
PALERMO-ABU DABHI	Spessore/Largh.	Fattore solare	Trasmissione visibile	U (W/mqK)
vetrocamera	3-6(aria)-3	0.76	0.81	3.16
telaio in legno	60			2.63
finestra				3.33

CONFIGURAZIONE NON ISOLATA				
PROPRIETA' INFISSO				
MILANO	Spessore/Largh.	Fattore solare	Trasmissione visibile	U (W/mqK)
vetrocamera	3-6(aria)-3	0.76	0.81	3.16
telaio in PVC	60			2.47
finestra				3.28
PROPRIETA' INFISSO				
ROMA	Spessore/Largh.	Fattore solare	Trasmissione visibile	U (W/mqK)
vetro singolo	6	0.86	0.90	5.89
telaio in legno	60			2.63
finestra				5.58
PROPRIETA' INFISSO				
PALERMO-ABU DABHI	Spessore/Largh.	Fattore solare	Trasmissione visibile	U (W/mqK)
vetro singolo	6	0.86	0.90	5.89
telaio in legno	60			2.63
finestra				5.58

Per quanto riguarda la valutazione delle condizioni di comfort termico in edifici non climatizzati e l'analisi dell'andamento delle temperature superficiali delle facciate dell'involucro sono stati considerati gli stessi pacchetti tecnologici visti in precedenza, per la configurazione isolata e non isolata, tranne che per le pareti perimetrali (tabella 6) dove si è optato per un sistema di facciata con isolamento a cappotto per sottoporre il rivestimento esterno al maggiore stress termico.

Tabella 6. Configurazione isolata con cappotto (edificio senza impianto di climatizzazione)

CONFIGURAZIONE ISOLATA CON CAPPOTTO				
PARETE	PROPRIETA' GEOMETRICHE-TERMOFISICHE			
	Spessore (m)	Conducibilità (W/mK)	Calore specifico (J/kgK)	Densità (kg/mc)
intonaco di calce e gesso	0.02	0.7	1000	1400
pannello isolante naturale	0.06-0.12	0.12	1700	800
blocco di laterizio forato	0.3	0.24-0.40	840	1000 - 1400
intonaco di gesso	0.01	0.35	1000	1200

A completamento dei dati di input del modello sono stati definiti i ricambi orari di aria dovuti alla ventilazione naturale impostando un valore di 0.3 volumi/ora per l'edificio climatizzato, mentre per quello senza impianti un valore pari a 3 volumi/ora. Per quanto riguarda gli apporti interni sono fissati in 7 W/mq per la zona giorno e 1 W/mq per la zona notte, con una frazione di scambio radiativo di 0.8. Per gli apporti solari si ipotizza l'installazione di schermature solari esterne regolabili per adattarsi alla stagione e che presentano un fattore solare di 0.2 durante le ore diurne della stagione estiva.

Tutti questi dati di input sono ottenuti attraverso l'applicazione della norma tecnica di riferimento nazionale (UNI TS 11300 parte 1 - Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale).

5.3.2 Analisi carichi energetici sul campione scelto

In seguito alle rilevazioni di laboratorio e ai dati elaborati l'obiettivo è valutare le prestazioni dell'edificio in funzione della *riflettanza* solare delle facciate. L'attenzione è stata focalizzata sul campione 141 che ha aumentato la *riflettanza* solare da 0.14 a 0.30 grazie all'applicazione dei pigmenti riflettenti all'infrarosso. L'analisi numerica è stata eseguita con il codice EnergyPlus accoppiato all'interfaccia grafica di elaborazioni dati Design Builder, variando i parametri riguardanti la localizzazione geografica e la configurazione di isolamento ipotizzando un impianto di climatizzazione estiva (set point: 26°C di temperatura dell'aria e 60%

di umidità relativa) e di climatizzazione invernale (set point: 20°C di temperatura dell'aria) a potenza infinita con un ciclo di funzionamento continuo di 24 ore al giorno. I calcoli sono stati eseguiti per i due valori di *riflettanza* solare del prodotto preso in esame, cioè il campione 141 nella versione standard e cool. Essendo l'obiettivo generale quello di valutare le prestazioni di involucro prima e dopo l'applicazione della tecnologia riflettente, l'analisi è stata condotta sulla sola energia netta, senza tenere conto del rendimento delle soluzioni impiantistiche sia estive che onvernali

I risultati delle simulazioni, espressi in kilowattora sono riportati in tabella 7, dove sono presentati i dati per ogni località, sia nella configurazione isolata che non isolata. I risultati fanno all'energia netta per riscaldamento, raffrescamento e l'energia totale. Questi dati sono stati elaborati per individuare la penalità invernale e il risparmio estivo calcolati come la differenza tra il carico termico del prodotto tradizionale e quello a riflettanza solare incrementata. Il bilancio totale considerando le penalità e i risparmi indica la convenienza (valori positivi) o meno (valori negativi) dell'utilizzo di una materiale a riflettanza incrementata.

Risparmi e penalità su base stagionale ed annuale sono presentati in figura 4 per una visualizzazione immediata dei risultati. In figura 5 sono invece presentati i risultati in termini di incrementi e riduzioni percentuali delle performance con materiali riflettenti rispetto alle configurazioni con pitture standard.

Tabella 7. Dati di consumi e risparmi energetici dell'edificio residenziale

Località e configurazione	Riscald. [kWh]	Raffresc. [kWh]	Tot. energia [kWh]	Penalità invern. [kWh]	Risp. estivo [kWh]	Bilancio totale [kWh]
Milano isolata STD	18839	3480	22319	-359	415	56
Milano isolata IR	19198	3065	22263			
Milano no isol. STD	42465	3976	46441	-1029	753	-276
Milano no isol. IR	43494	3223	46717			
Roma isolata STD	8804	3672	12476	-318	402	84
Roma isolata IR	9122	3270	12392			
Roma no isol. STD	23851	4097	27948	-991	694	-297
Roma no isol. IR	24842	3403	28245			
Palermo isolata STD	3626	8676	12302	-333	932	599
Palermo isolata IR	3959	7744	11703			
Palermo no isol. STD	9220	8197	17417	-678	1110	432
Palermo no isol. IR	9898	7087	16985			
Abu Dhabi isol. STD	0	43245	43245	0	2100	2100
Abu Dhabi isol. IR	0	41145	41145			
Abu Dhabi no isol. STD	0	49755	49755	0	2923	2923
Abu Dhabi no isol. IR	0	46832	46832			

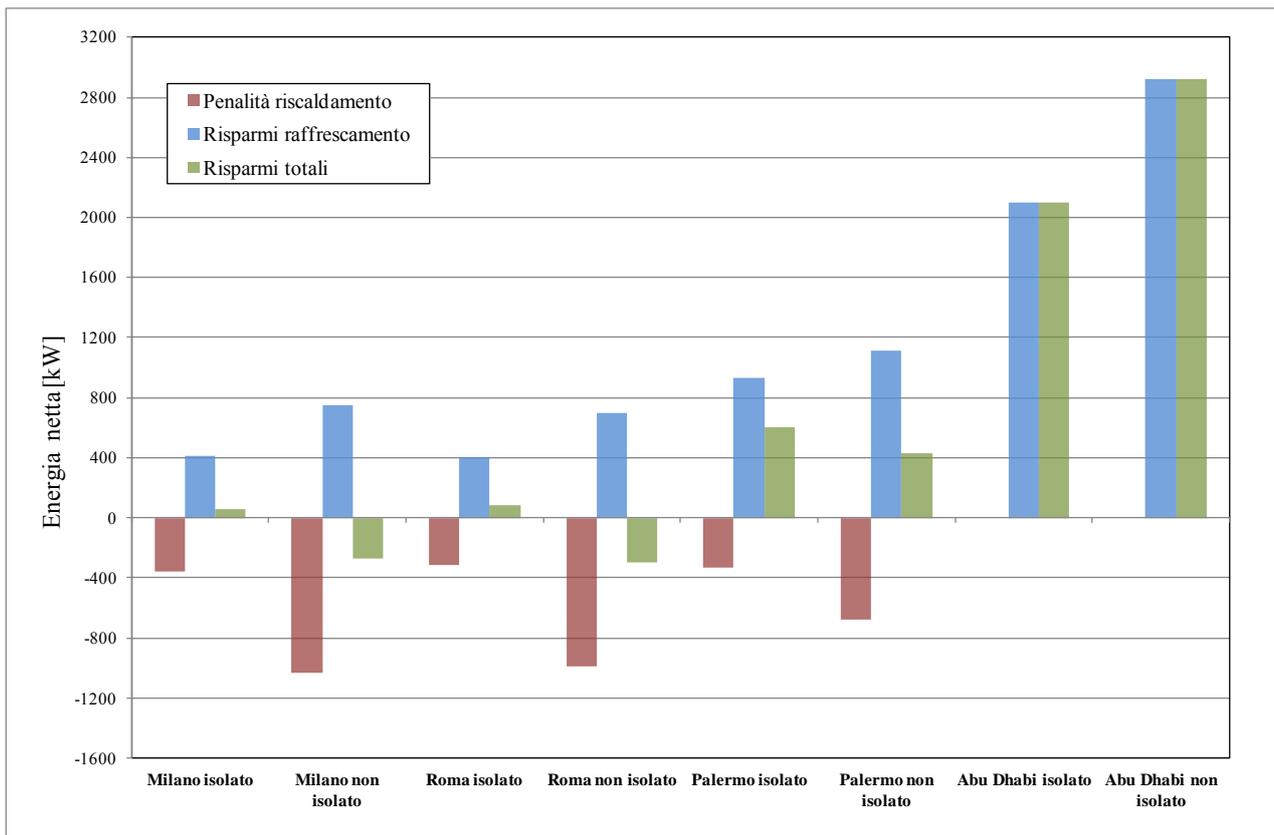


Figura 4. Dati dei consumi energetici, penalità invernale, risparmio estivo e bilancio totale

I risultati, evidenziano i limiti della tecnologia ai fini del risparmio energetico nelle zone centrali e settentrionali della penisola. Nel caso di edifici isolati il bilancio globale derivante dell’utilizzo di vernici riflettenti rimane sostanzialmente invariato a Roma e Milano, e diventa leggermente negativo per le configurazioni non isolate termicamente. Nei climi più caldi si registrano i maggiori vantaggi, come a Palermo dove si conferma maggiore il risparmio negli edifici isolati rispetto a quelli non isolati con un complessivo risparmio che varia tra il 3 e il 5% rispetto all’utilizzo di un materiale tradizionale.

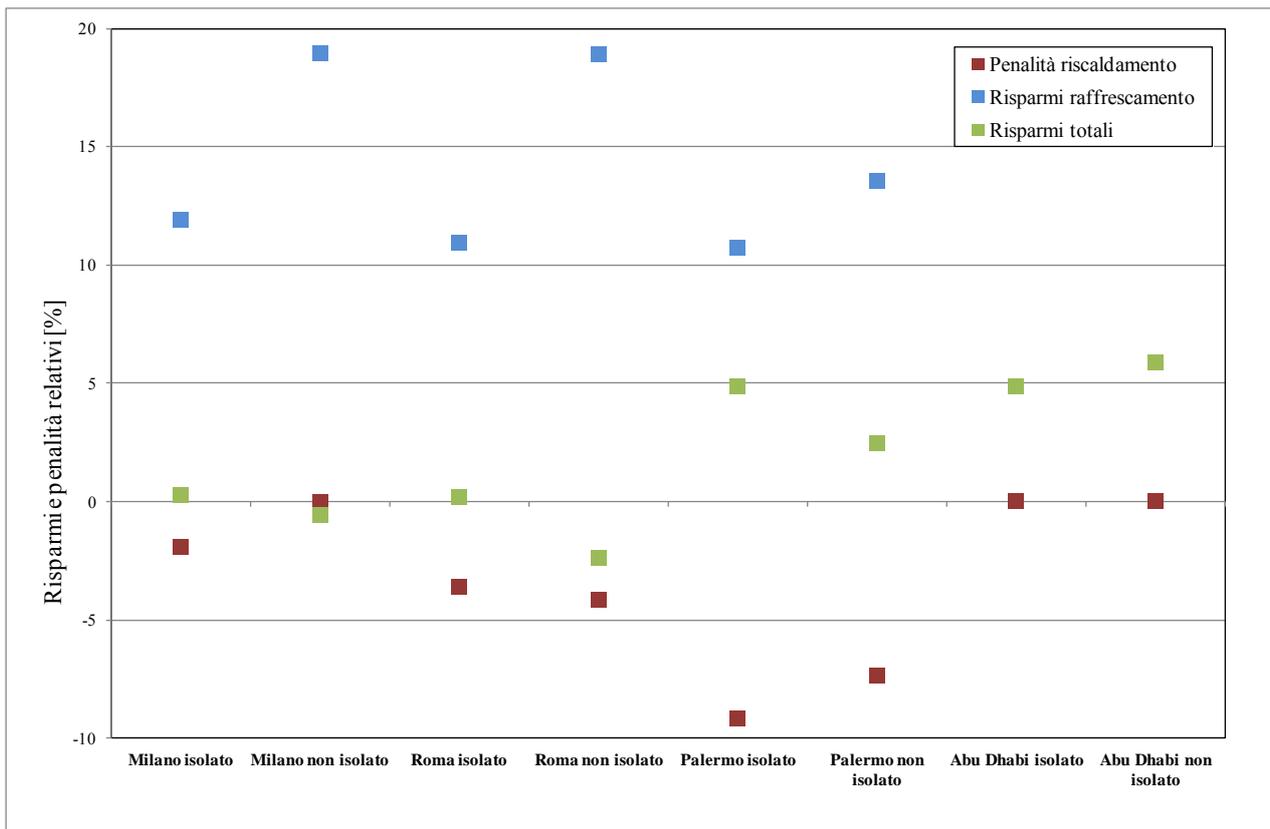


Figura 5. Risparmi e penalità percentuali per l'edificio residenziale

Nella località Medio-orientale di Abu Dhabi i risparmi per raffrescamento e totali sono praticamente coincidenti, maggiori nel caso di edificio non isolato e si attestano tra intorno al 5-6%. Si osserva inoltre che per quanto riguarda i soli carichi di raffrescamento si ottengono dei valori di risparmio relativo compreso tra il 10 e il 20% per tutte le zone climatiche della penisola e il dato è particolarmente interessante per le abitazioni stagionali, utilizzate soltanto durante la stagione estiva, per le quali non sussiste il problema delle penalità invernali.

5.3.3 Analisi temperature superficiali e indoor sul campione scelto

Il secondo set di misure è stato eseguito sull'edificio sprovvisto di impianto di climatizzazione e quindi con temperature oscillante nell'arco della stagione estiva. L'attenzione è stata posta su due aspetti fondamentali: andamento delle temperature interne ai fini del comfort termico e andamento delle temperature superficiali ai fini della durabilità delle pitture edili in opera. Le simulazioni sono state eseguite da maggio a settembre per le località italiane e per tutto l'anno ad Abu Dhabi.

Nella relazione sono commentati alcuni risultati significativi, concentrandosi sulle esposizioni più critiche, ovvero sud-est (SE) e sud-ovest (SO), e sulla configurazione di edificio isolata, vedi tabella 8, e a seguire si comparano i risultati ottenuti dalle due pitture in termini di ore con temperature superiori a determinati valori di soglia, riportati in figura 6, le percentuali tra parentesi sono calcolate rispetto al totale delle ore diurne del periodo.

La facciata esposta a SE a Milano raggiunge temperature superficiali superiori a 30°C in 1343 ore, ossia il 59 percento delle ore diurne del periodo. Valori superiori a 40 e 50°C sono raggiunti in 608 (27%) e 168 (7%) ore. Significativo è l'effetto del trattamento con pigmenti cool, infatti le percentuali relative ai tre valori di soglia si riducono rispettivamente a 53, 18 e 2%. Risultati simili sono registrati per l'esposizione a sud-ovest: le ore con temperature superiori a 30°C passano da 1266 a 1136 (da 56 a 51%); le ore con temperature superiori a 40°C passano da 765 a 613 (da 34 a 27%); le ore con temperature superiori a 50°C passano da 359 a 178 (da 16 a 8%). Va anche notato che la facciata con vernice convenzionale raggiunge i 60°C in 48 ore, ma tale soglia non è mai raggiunta nel caso della facciata con il trattamento all'infrarosso.

Tabella 8. Ore con temperature superiori ai valori di soglia nelle 4 località per la configurazione isolata

MILANO - CONFIGURAZIONE ISOLATA								
	PARETE SUD-EST - STD		PARETE SUD-EST - COOL		PARETE SUD-OVEST - STD		PARETE SUD-OVEST - COOL	
ORE	ORE DIURNE	INCIDENZA (%)	ORE DIURNE	INCIDENZA (%)	ORE DIURNE	INCIDENZA (%)	ORE DIURNE	INCIDENZA (%)
T>30°	1343	59	1209	53	1266	56	1156	51
T>35°	937	41	759	34	985	44	851	38
T>40°	608	27	413	18	765	34	613	27
T>45°	351	16	175	8	547	24	383	17
T>50°	168	7	39	2	359	16	178	8
T>55°	42	2	0	0	185	8	35	2
T>60°	0	0	0	0	43	2	0	0
ROMA - CONFIGURAZIONE ISOLATA								
	PARETE SUD-EST - STD		PARETE SUD-EST - COOL		PARETE SUD-OVEST - STD		PARETE SUD-OVEST - COOL	
ORE	ORE DIURNE	INCIDENZA (%)	ORE DIURNE	INCIDENZA (%)	ORE DIURNE	INCIDENZA (%)	ORE DIURNE	INCIDENZA (%)
T>30°	1355	60	1169	52	1333	59	1202	53
T>35°	855	38	653	29	984	44	828	37
T>40°	518	23	325	14	696	31	506	23
T>45°	273	12	103	5	424	19	192	9
T>50°	88	4	3	0	170	8	18	1
T>55°	3	0	0	0	19	1	0	0
T>60°	0	0	0	0	1	0	0	0
PALERMO - CONFIGURAZIONE ISOLATA								
	PARETE SUD-EST - STD		PARETE SUD-EST - COOL		PARETE SUD-OVEST - STD		PARETE SUD-OVEST - COOL	
ORE	ORE DIURNE	INCIDENZA (%)	ORE DIURNE	INCIDENZA (%)	ORE DIURNE	INCIDENZA (%)	ORE DIURNE	INCIDENZA (%)
T>30°	1414	63	1271	57	1427	64	1282	57
T>35°	930	41	708	32	1026	46	879	39
T>40°	546	24	386	17	741	33	541	24
T>45°	330	15	176	8	466	21	266	12
T>50°	159	7	41	2	239	11	86	4
T>55°	44	2	2	0	92	4	12	1
T>60°	2	0	0	0	19	1	0	0
ABU DABHI - CONFIGURAZIONE ISOLATA								
	PARETE SUD-EST - STD		PARETE SUD-EST - COOL		PARETE SUD-OVEST - STD		PARETE SUD-OVEST - COOL	
ORE	ORE DIURNE	INCIDENZA (%)	ORE DIURNE	INCIDENZA (%)	ORE DIURNE	INCIDENZA (%)	ORE DIURNE	INCIDENZA (%)
T>30°	3820	84	3706	81	3655	80	3548	78
T>35°	3317	73	3093	68	3185	70	3012	66
T>40°	2611	57	2332	51	2609	57	2342	51
T>45°	1937	42	1497	33	2034	44	1760	38
T>50°	1191	26	712	16	1611	35	1208	26
T>55°	643	14	200	4	1110	24	632	14
T>60°	235	5	21	0	637	14	214	5

L'applicazione della pittura IR sulla facciata a sud-est a Roma determina una riduzione delle ore con temperatura superficiale superiore a 30°C da 1355 a 1169 (da 60 a 52%). Questa esposizione raggiunge 50°C in 88 ore con la vernice convenzionale, ma le ore si riducono a 3 nel caso di pittura riflettente. Come per Milano, stress termici più elevate sono calcolati sulla facciata SO: le ore con temperature superiori a 30°C passano da 1333 a 1202 (da 59 a 53%); le ore con temperature superiori a 40°C passano da 696 a 506 (da 34 a 23%); le ore con temperature superiori a 50°C passano da 170 a 18 (da 8 a 1%).

Palermo ha un carico termico decisamente più elevato, per la facciate SE sono registrati i seguenti risultati: le ore con temperature superiori a 30°C passano da 1414 a 1271 (da 63 a 57%); le ore con temperature superiori a 40°C passano da 546 a 386 (da 24 a 17%); le ore con temperature superiori a 50°C passano da 159 a 41 (da 7 a 2%). Temperature superficiali superiori a 55°C sono calcolate per 44 ore, ma il valore scende a 2 quando è applicata la pittura IR. Per quanto riguarda l'esposizione sud-ovest si osservano le

seguenti riduzioni: da 1427 a 1282 (da 64 a 57%) ore con temperature superiori a 30°C; da 741 a 541 (da 33 a 24%) ore con temperature superiori a 40°C; da 239 a 86 (da 11 a 4%) ore con temperature superiori a at 50°C; da 19 a 0 ore con temperature superiori a 60°C. Ad Abu Dhabi le ore diurne con temperatura superficiale superiore a 40°C si riducono da 2611 a 2332 (dal 57 al 51%) per effetto della pittura cool per esposizione SE; il numero di ore passa dal 26 al 16% per temperature superiori a 50°C; infine è praticamente azzerato il numero di ore con temperature superficiali superiori a 60°C, che risultavano essere 235 con pittura standard. Nel caso di facciate a sud-ovest si hanno risultati identici al caso SE per temperatura di soglia pari a 40°C. Le ore sopra 50°C passano da 1611 a 1208 (da 35 a 26%) e le ore sopra 60°C si riducono da 637 a 215 (da 14 a 5%).

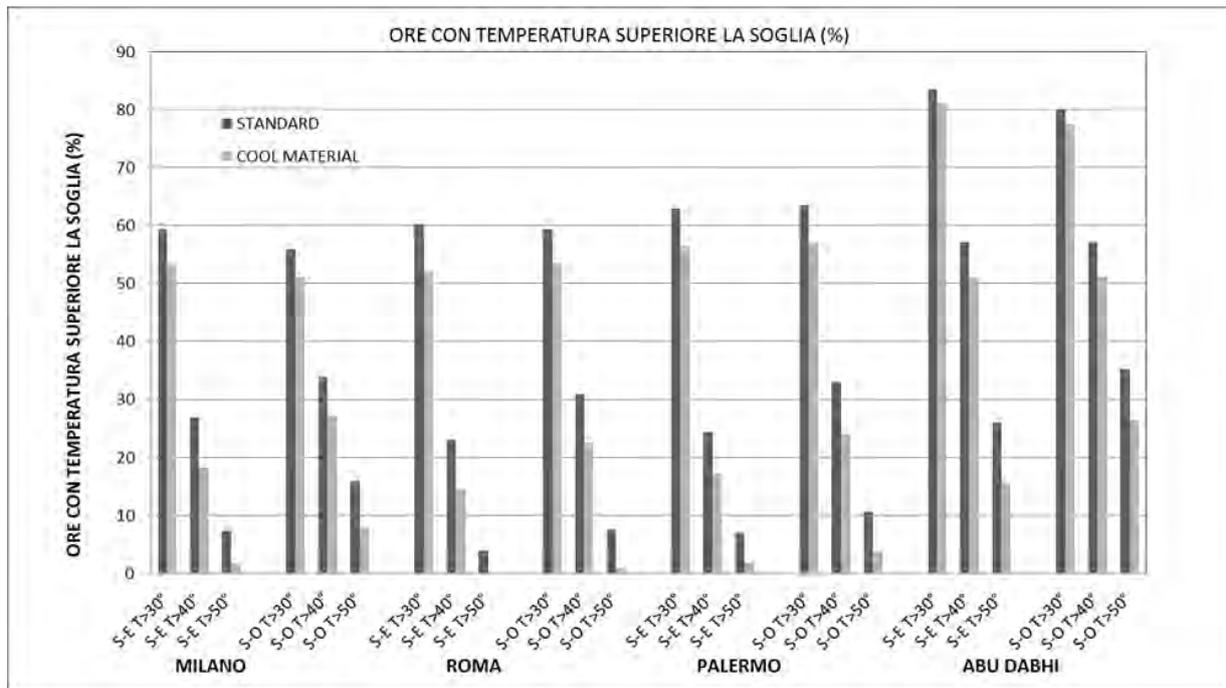


Figura 6. Ore con temperatura superiore alla soglia (%) per la configurazione isolata, esposizioni SE e SO

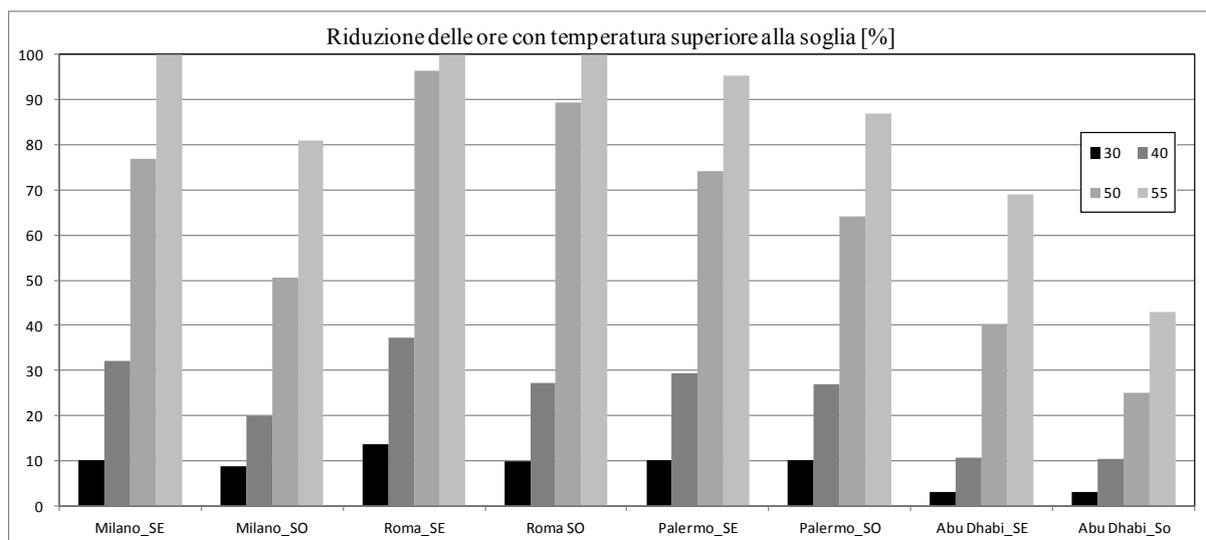


Figura 7. Riduzione delle ore con temperature superficiali superiori a diversi valori di soglia per l'edificio con configurazione isolata nelle 4 località selezionate

In figura 7 si riporta la riduzione percentuale delle ore con temperatura superficiale superiore al valore di soglia per le 4 località, per la configurazione isolata e per le esposizioni sud-est e sud ovest. L'effetto della

pittura IR è non molto significativo alle basse temperature, le ore si riducono per valori intorno al 10% per la soglia dei 30°. Il valore sale al 20-30% per la soglia dei 40°C per le località italiane, mentre rimane intorno al 10% ad Abu Dhabi. Alla soglia dei 50°C la riduzione è molto significativa in Italia, con valori compresi tra il 50 ed oltre il 90% di riduzione delle ore. In climi caldi come nel caso degli Emirati Arabi, la soglia significativa diventa quella dei 55°C con riduzioni tra il 40 e 70% in funzione dell'orientamento.

Dalla analisi della distribuzione cumulata delle temperature, figura 8, si può ulteriormente notare l'impatto delle pitture cool con una caratterizzazione differente per le diverse località, prendendo come riferimento l'esposizione sud-ovest, quella sottoposta alla maggiore radiazione solare. A Milano si osserva un andamento lineare della distribuzione cumulata simile per entrambe le configurazioni di parete, standard e cool, mantenendo pertanto una riduzione delle ore sopra la soglia indicata proporzionale per quasi tutto l'intervallo di temperature preso in considerazione.

Differenti le considerazioni per Roma e Palermo dove si nota un andamento più parabolico della distribuzione cumulata con aumenti percentuali nella parete cool delle riduzioni orarie, tra i 40°C e i 50°C rispetto la parete standard. Per Abu Dhabi invece il grafico si presenta con andamento lineare ma con pendenze maggiori e differenti per le due configurazioni, infatti nell'avvicinarsi alla soglia dei 60°C le riduzioni orarie nella parete cool vanno aumentando rispetto quelle della parete standard.

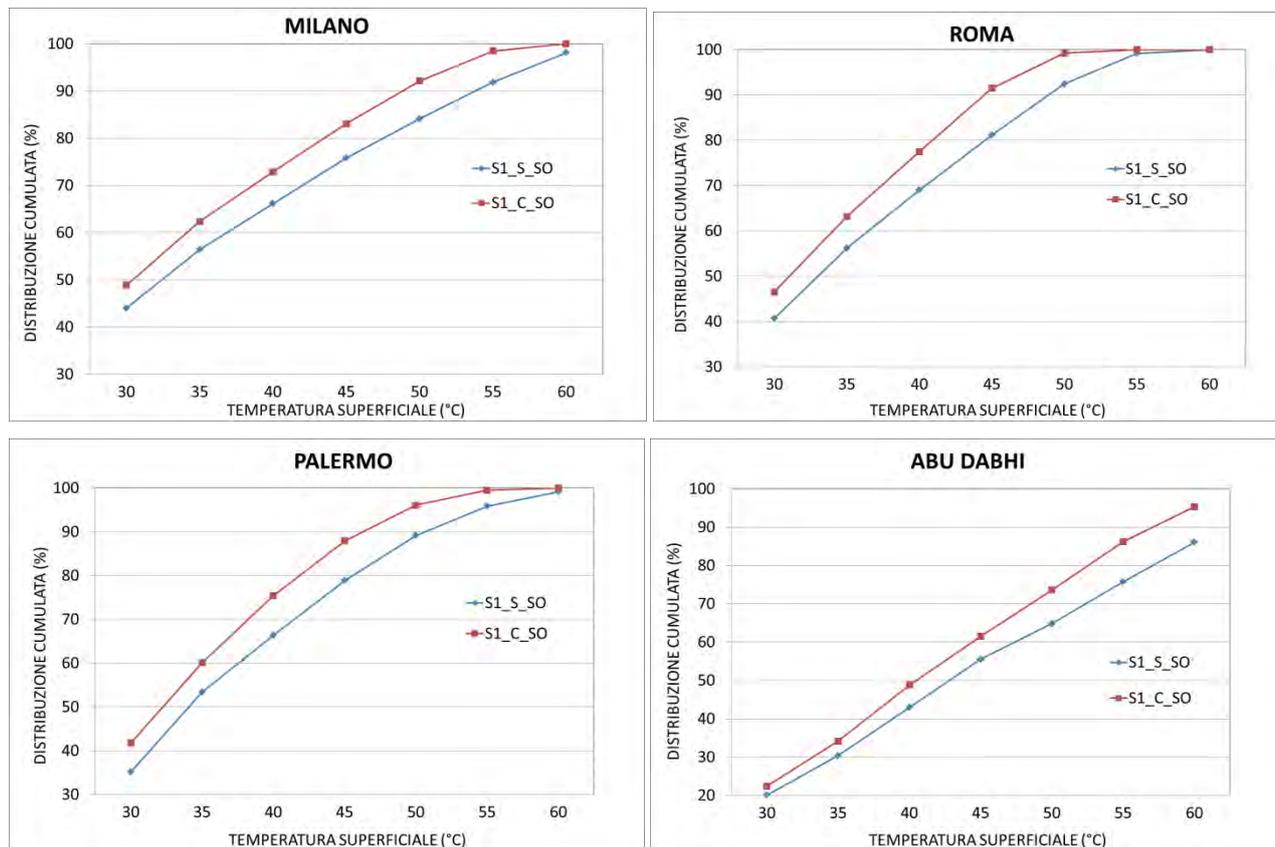


Figura 8. Distribuzione cumulata delle temperature superficiali esterne per la configurazione isolata

Un ultimo aspetto analizzato è il miglioramento del comfort termico all'interno degli ambienti per effetto dell'applicazioni di pitture IR. In tabella 6 sono riportati i valori di riduzione della temperatura operativa mediati sul periodo di calcolo, ossia maggio-settembre per le località italiane e l'intero anno per Abu Dhabi. La temperatura operativa è il parametro principale per valutare il comfort in ambienti non climatizzati, la temperatura operativa è definita come media aritmetica della temperatura dell'aria e della temperatura media radiante, essendo quest'ultima la temperatura media delle superfici dell'ambiente in esame. Nella tabella 6 sono indicati i valori riferiti alla sola zona notte dell'appartamento in quanto, avendo tre esposizioni esterne, è quella che più beneficia della riduzione dell'apporto solare.

Tabella 9. Differenze medie della temperatura indoor nell'edificio residenziale per effetto delle pitture cool

Configurazione	ΔT Milano [°C]	ΔT Roma [°C]	ΔT Palermo [°C]	ΔT Abu Dhabi [°C]
Isolata	0.1	0.1	0.2	0.2
Non isolata	0.3	0.3	0.3	0.3

I 3 ricambi d'aria e l'efficiente schermatura solare consentono di moderare in modo significativo le temperature indoor, l'incremento della *riflettanza* solare dell'involucro ha l'effetto di un ulteriore decremento della temperatura operativa anche se con valori limitati tra 0.1 e 0.3. Dai risultati seguenti emerge però, che anche queste modeste variazioni hanno un impatto non trascurabile sulla distribuzione cumulata delle temperature. I dati in tabella 10 indicano le ore con temperature operative superiori rispetto a determinati valori di soglia, in figura 9 è indicata la riduzione percentuale di tali ore per effetto dell'applicazione della pittura IR. I dati esemplificativi fanno riferimento alla zona notte dell'appartamento ed alla configurazione non isolata di involucro, che riceve i maggiori benefici dall'applicazione del prodotto riflettente all'infrarosso vicino. Nei fogli di calcolo allegati sono presenti tutti i risultati.

Tabella 10. Ore con temperature operative superiori ai livelli di soglia, zona notte dell'edificio non isolato

	Milano		Roma		Palermo		Abu Dhabi	
	non iso_st	non iso_ir						
T>26	1230	1095	1584	1429	2512	2385	6516	6355
T>27 (30)	825	681	1083	950	2005	1839	4902	4777
T>28 (34)	497	411	635	486	1478	1326	3172	2968
T>29 (38)	263	203	230	146	928	729	534	442
T>30 (40)	117	80	45	26	378	263	90	59

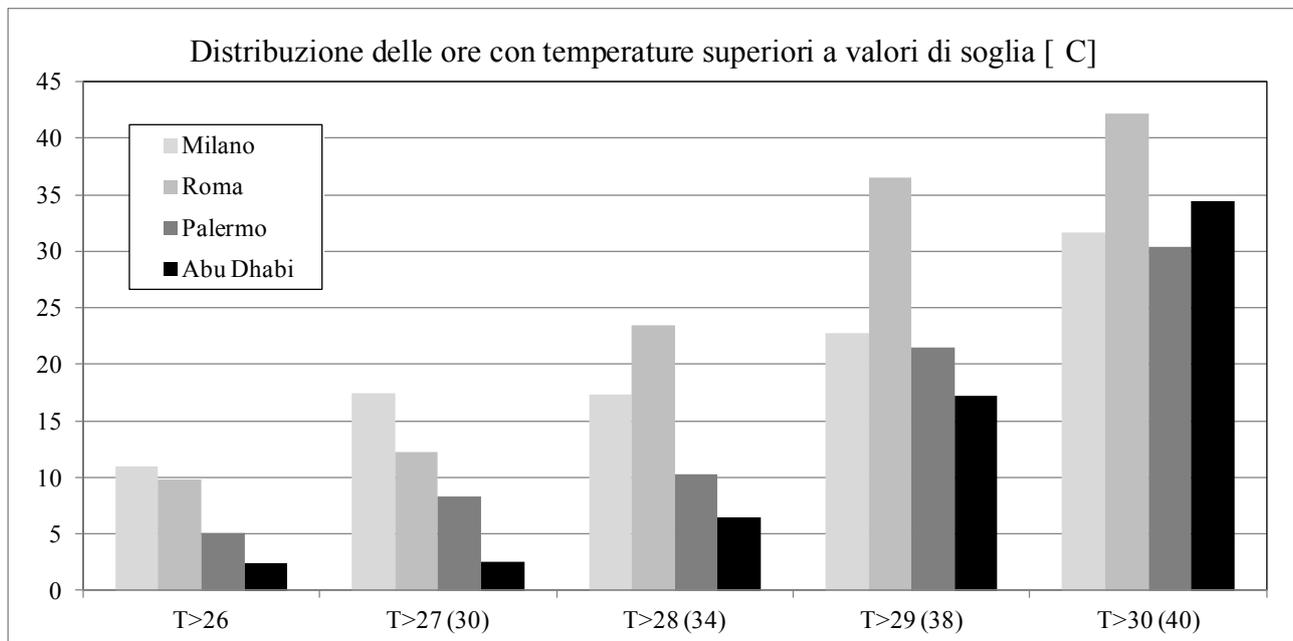


Figura 9. Distribuzione cumulata delle temperature operative nella zona notte dell'edificio non isolato

Dalla figura emerge l'impatto delle pitture IR nel mitigare le temperature operative e migliorare le condizioni ambientali indoor. Nelle tre località italiane, l'effetto della pittura è quello di ridurre le ore con temperature superiori a 29°C di una percentuale compresa tra 21 e 35% in funzione della località. Il valore diventa tra 30 e 40% per la temperatura di soglia di 30°C. Percentuali più basse ma non trascurabili sono

calcolate per i valori di soglia più bassi: da 26 a 28°C. La scala cambia nel caso di Abu Dhabi, essendo il clima estivo decisamente più severo. L'effetto del rivestimento è poco significativo per temperature operative fino a 34°C, valore raggiunto in molte ore dell'anno; tuttavia i valori di 38 e 40°C si raggiungono in un numero di ore significativamente inferiore, rispettivamente il 15 e 34%.

5.3.4 Analisi a riflettanza variabile

Un'ulteriore analisi effettuata ha avuto come scopo quello di testare il modello di edificio residenziale supponendo valori variabili di riflettanza del rivestimento esterno, per meglio valutare quando si verifica la miglior resa energetica nel bilancio annuale, quindi sia per climatizzazione estiva che invernale, ovvero il valore più basso di consumo energetico totale. Sono stati individuati dei valori di riflettanza compresi nell'intervallo da 0.15 a 0,75 e calcolati i relativi carichi termici con evidenziato il consumo energetico totale più basso, come si può osservare dalla tabella 11 (Roma e Milano) e 12 (Palermo e Abu Dhabi).

Si osserva per la località di Milano (zona climatica E) come il crescere della riflettanza produca variazioni basse dei carichi termici, sia invernali che estivi, per entrambe le configurazioni di isolamento. Inoltre si nota come valori alti di riflettanza per la configurazione non isolata genera maggior consumi energetici, dovuti ai minori apporti solari durante la stagione invernale, pertanto risulta ancora conveniente l'uso di un materiale standard per il rivestimento esterno, mentre per la configurazione isolata il minore consumo si ottiene con valori di riflettanza intorno allo 0.45, ma il risparmio risulta essere quasi irrilevante dato che corrisponde a 90kWh.

Nella località di Roma (zona climatica D) il variare della riflettanza genera leggere variazioni dei carichi termici per entrambe le configurazioni di isolamento e si possono trarre le stesse considerazioni fatte per la zona climatica E. La configurazione non isolata ottiene i consumi più bassi con un materiale standard mentre in quella isolata con valori di riflettanza intorno allo 0.55, generando un risparmio annuo di 115kWh.

La località di Palermo (zona climatica A) presenta invece variazioni dei carichi termici più significative e si può osservare come per entrambe le configurazioni i consumi più bassi si ottengono con alti valori di riflettanza (0.65-0.75), dato che nella zona climatica in esame incide maggiormente il carico per la climatizzazione estiva. Il risparmio prodotto annuale per la configurazione isolata risulta essere di 1797kWh mentre per quella non isolata di 659kWh.

Nella quarta località, scelta al di fuori dal contesto europeo, con un clima tale da presentare elevati carichi per climatizzazione estiva e praticamente nulli quelli invernali, si osserva come materiali con elevata riflettanza solare (0.75) permettono di abbattere notevolmente il carico termico estivo generando risparmi maggiori (configurazione isolata 7963kWh, configurazione non isolata 10890kWh).

Da questa analisi emerge il campo di applicabilità in termini di maggiore risparmio energetico, dei materiali ad alta riflettanza solare, che risultano scarsamente convenienti nelle zone climatiche del centro-nord Italia mentre iniziano ad ottenere risultati più significativi nel zone del sud del Paese, soprattutto nella configurazione isolata, per mostrare i notevoli vantaggi in termini di risparmio energetico per i carichi di climatizzazione estiva nell'area Medio-orientale, soprattutto per la configurazione non isolata.

Tabella 11. Milano e Roma, carichi termici configurazione isolata e non al variare della riflettanza

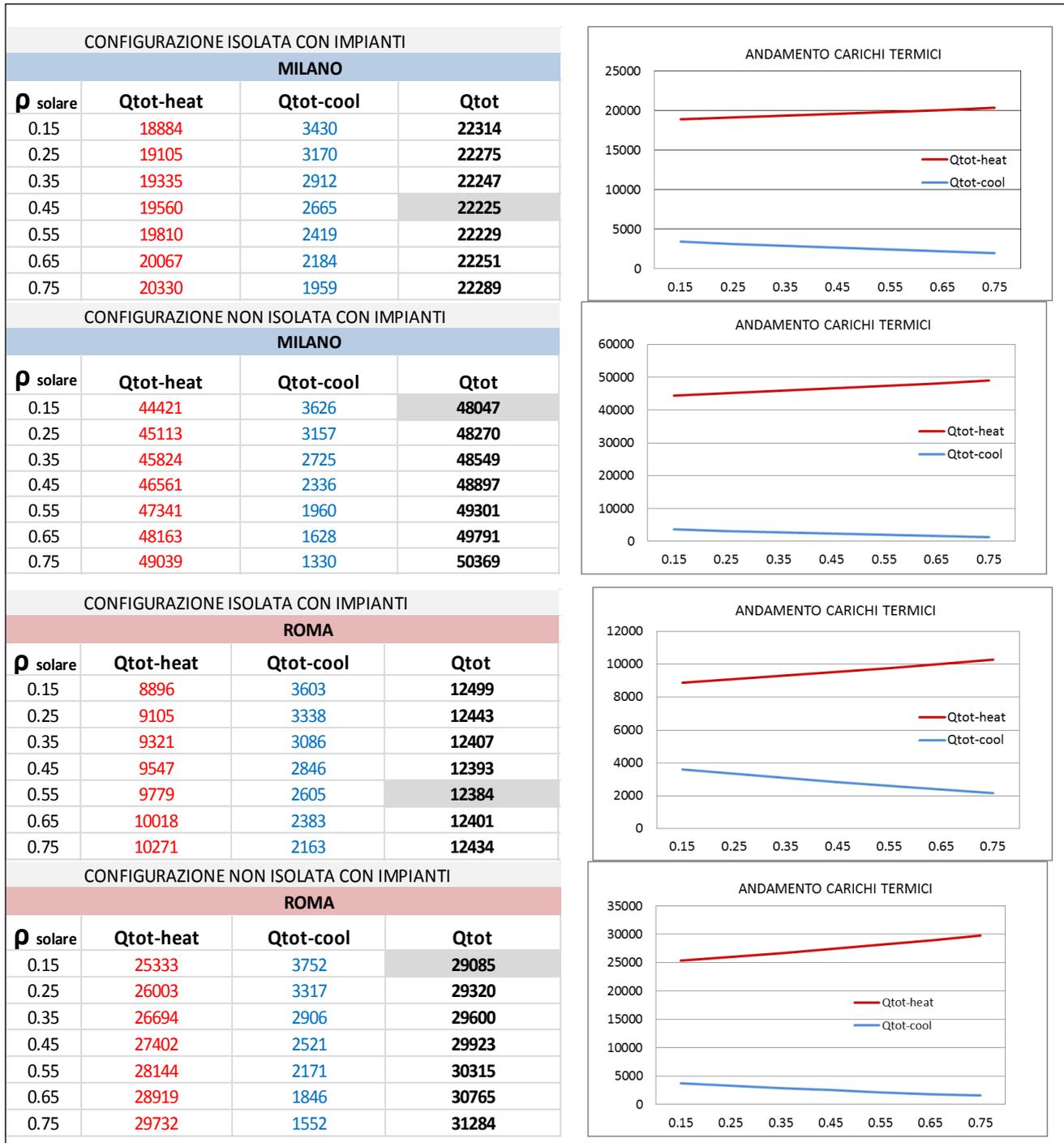
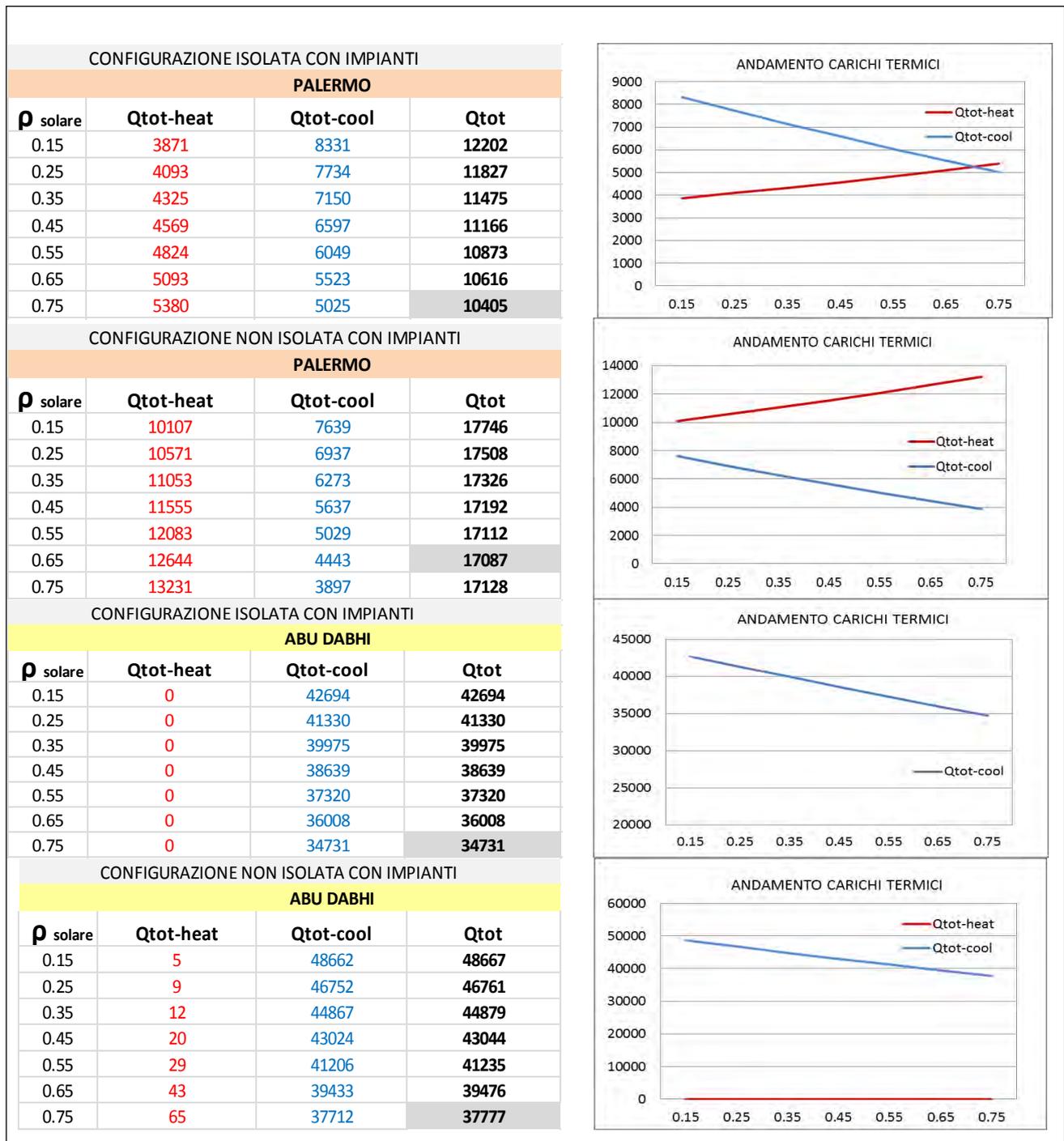


Tabella 12. Palermo e Abu Dhabi, carichi termici configurazione isolata e non al variare della riflettanza



5.4 Applicazioni nel settore commerciale

5.4.1 Modello edificio commerciale

La seconda tipologia di edificio è significativa di uno stock edilizio non trascurabile, ovvero edifici di taglio tipicamente industriale che nel tempo hanno almeno parzialmente modificato la loro destinazione d'uso, e oggi sono essenzialmente usati come magazzini con annessa zona commerciale. L'edificio è schematizzato in figura 10, dalla quale si evince la distinzione in diverse zone fisiche che sono però raggruppate in un unico ambiente mono zona ai fini del calcolo energetico. Le principali caratteristiche geometriche sono: Il

fattore di forma dell'edificio (rapporto tra superficie disperdente e volume climatizzato) è 0.46, buon valore intermedio tra forme eccessivamente aperte e compatte. L'edificio industriale ha le seguenti caratteristiche geometriche: area netta 961.36 m², volume lordo 5600 m³, superfici finestrate 96 m², altezza interpiano 5.00 m. La distribuzione delle aperture è omogenea sulle diverse facciate. Per differenziare questo studio dal precedente, si ipotizza per l'edificio un classico orientamento sud/est/ovest/nord. Dal punto di vista delle caratteristiche termo fisiche, la struttura ha valori presentati nella tabella 13. La modifica è soltanto nei materiali, là dove nel residenziale si usa essenzialmente il laterizio, nel commerciale prevale il calcestruzzo nella doppia configurazione con e senza isolamento termico. Per questo edificio non sono ipotizzate schermature mobili ma dei frangisole fissi in acciaio su tutte le aperture, con sporgenza sia verticale che orizzontale e una profondità della paletta di 0.20 m. I ricambi orari di aria di ventilazione esterna sono fissati in 1 volume/ora, sia nel caso di edificio climatizzato, che per l'edificio senza impianto. Gli apporti interni sono fissati in 10 W/m², con una frazione di scambio radiativo fissata a 0.7.

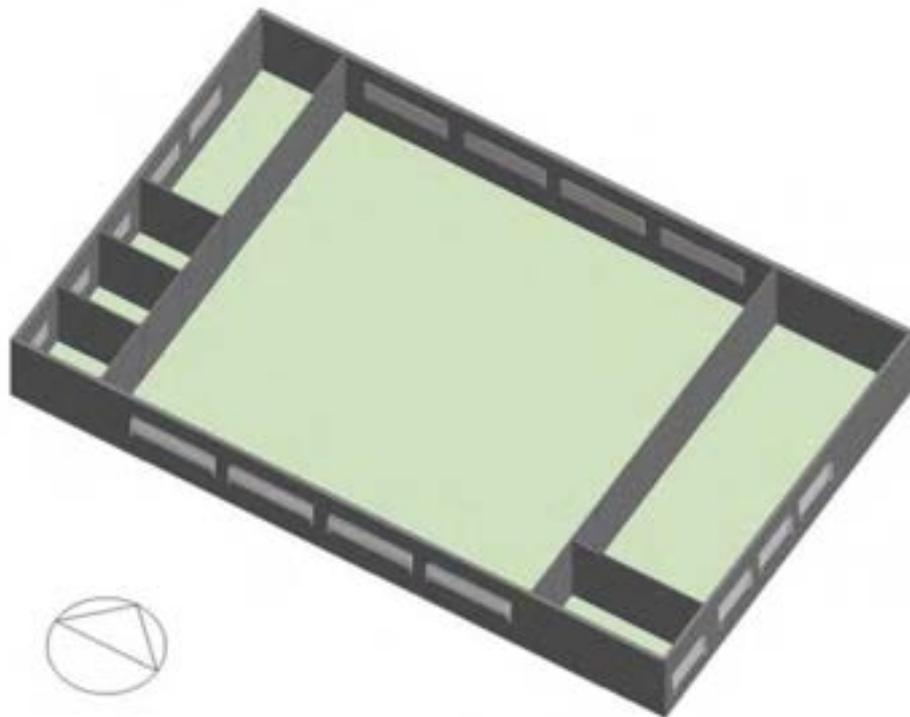


Figura 10. Spaccato assometrico del blocco commerciale

L'involucro è stato ipotizzato con tecnologie a umido, sono stati adottati i seguenti pacchetti tecnologici dei vari componenti, elencati in tabella 13 e 14, i valori di riferimento per le proprietà termofisiche dei materiali fanno riferimento alla norma UNI 10351. Per le aperture sono stati adottati tipi di vetro e telai come per l'edificio residenziale nelle diverse località, scelti in base ad un database presente nel software di simulazione.

Tabella 13. Trasmittanza termica dei vari componenti dell'involucro

Località	Configurazione	Facciata U [W/m ² K]	Tetto U [W/m ² K]	Solaio terra. U [W/m ² K]	Finestra U [W/m ² K]
MILANO	Isolata	0.36	0.32	0.35	1.92
	Non isolata	1.41	2.10	2.10	3.24
ROMA	Isolata	0.42	0.34	0.41	2.20
	Non isolata	1.41	2.10	2.10	5.49
PALERMO/ ABU DABH	Isolata	0.65	0.41	0.65	3.33
	Non isolata	1.41	2.10	2.10	5.49

Tabella 14. Pacchetti tecnologici adottati nelle diverse località, configurazione isolata

CONFIGURAZIONE ISOLATA				
PARETE	PROPRIETA' GEOMETRICHE-TERMOFISICHE			
	Spessore (m)	Conducibilità (W/mK)	Calore specifico (J/kgK)	Densità (kg/mc)
intonaco di calce e gesso	0.02	0.7	840	1760
pan.fibrocemento rinforzato	0.02x2	1900	840	2 300
pannello isolante EPS	0.06-0.12	0.046	1400	10
SOLAIO A TERRA				
	Spessore (m)	Conducibilità (W/mK)	Calore specifico (J/kgK)	Densità (kg/mc)
piastra in C.A.	0.15	2300	1000	2300
pannello isolante EPS	0.05-0.10	0.046	1400	10
sottofondo in cls	0.06	0.38	1000	1200
mattonelle in cemento	0.02	1100	840	2100
SOLAIO DI COPERTURA				
	Spessore (m)	Conducibilità (W/mK)	Calore specifico (J/kgK)	Densità (kg/mc)
membrana bituminosa	0.01	1	800	2000
guania impermeabilizzante	0.001	0.2	1100	930
pannello isolante EPS	0.08-0.12	0.04	1400	15
sottofondo cls	0.05	1.13	1000	2000
pan. cemento rinforzato	0.05-0.08-0.05	1.9	840	2300

Tabella 14. Pacchetti tecnologici adottati nelle diverse località, configurazione non isolata

CONFIGURAZIONE NON ISOLATA				
PARETE	PROPRIETA' GEOMETRICHE-TERMOFISICHE			
	Spessore (m)	Conducibilità (W/mK)	Calore specifico (J/kgK)	Densità (kg/mc)
intonaco di calce e gesso	0.02	0.7	840	1760
pan.fibrocemento rinforzato	0.05x2	1700	840	2'200
pannello isolante EPS	0.02	0.046	1400	10
SOLAIO A TERRA				
	Spessore (m)	Conducibilità (W/mK)	Calore specifico (J/kgK)	Densità (kg/mc)
piastra in C.A.	0.15	2500	1000	2400
intercapedine	Resistenz termica = 0.18 mqK/W			
mattonelle in cemento	0.02	1100	840	2100
SOLAIO DI COPERTURA				
	Spessore (m)	Conducibilità (W/mK)	Calore specifico (J/kgK)	Densità (kg/mc)
membrana bituminosa	0.01	1	800	2000
guania impermeabilizzante	0.001	0.2	1100	930
sottofondo cls	0.05	1.13	1000	2000
pan. cemento rinforzato	0.05-0.06-0.05	1.9	840	2300

5.4.2 Analisi carichi energetici sul campione scelto

I risultati delle simulazioni sono riportati in tabella 15, i risparmi assoluti sono presentati in figura 12 mentre in figura 13 si riportano i risparmi e le penalità percentuali conseguite nelle varie stagioni. Il primo dato che emerge con chiarezza è che i consumi specifici per la climatizzazione estiva sono molto bassi, si tratta di strutture voluminose con poche superfici vetrate e con apporti interni, dovuti a occupanti e macchinari, anch'essi molto bassi. Il fabbisogno specifico di raffrescamento è inferiore a 5 kWh/m² anno a Milano e Roma, inferiore a 10 kWh/m² a Palermo ma sale fino a oltre 80 kWh/m² ad Abu Dhabi.

Tabella 15. Dati di consumi e risparmi energetici del blocco commerciale

Località e configurazione	Riscald. [kWh]	Raffresc. [kWh]	Tot.energia [kWh]	Penalità invern. [kWh]	Risp. estivo [kWh]	Bilancio totale [kWh]
Milano isolata STD	18839	3480	22319	-243	238	-5
Milano isolata IR	19198	3065	22263			
Milano no isol. STD	42465	3976	46441	-526	263	-263
Milano no isol. IR	43494	3223	46717			
Roma isolata STD	8804	3672	12476	-263	277	14
Roma isolata IR	9122	3270	12392			
Roma no isol. STD	23851	4097	27948	-486	293	-193
Roma no isol. IR	24842	3403	28245			
Palermo isolata STD	3626	8676	12302	-252	502	250
Palermo isolata IR	3959	7744	11703			
Palermo no isol. STD	9220	8197	17417	-344	528	184
Palermo no isol. IR	9898	7087	16985			
Abu Dhabi isol. STD	55	81464	81519	-8	1448	1440
Abu Dhabi isol. IR	63	80016	80079			
Abu Dhabi no isol. STD	422	83354	83776	-26	1656	1630
Abu Dhabi no isol. IR	448	81698	82146			

I risultati conseguiti evidenziano che la tecnologia è sostanzialmente invariante rispetto alle prestazioni energetiche complessive dell'edificio nelle località Italiane, dove il risparmio complessivo è sempre inferiore al 2%. La percentuale è la stessa anche per la zona Medio Orientale, ma in questo caso i valori assoluti sono decisamente più elevati e il risparmio è stimato in circa 1.5 megawattora, questo dipende anche dall'assenza di penalità termiche durante la stagione invernale. Limitandosi alla stagione estiva, i risparmi conseguibili variano tra 5 e 8% nelle località italiane. Questo dato non è trascurabile in tutte quelle applicazioni che non prevedano la climatizzazione degli ambienti durante la stagione invernale.

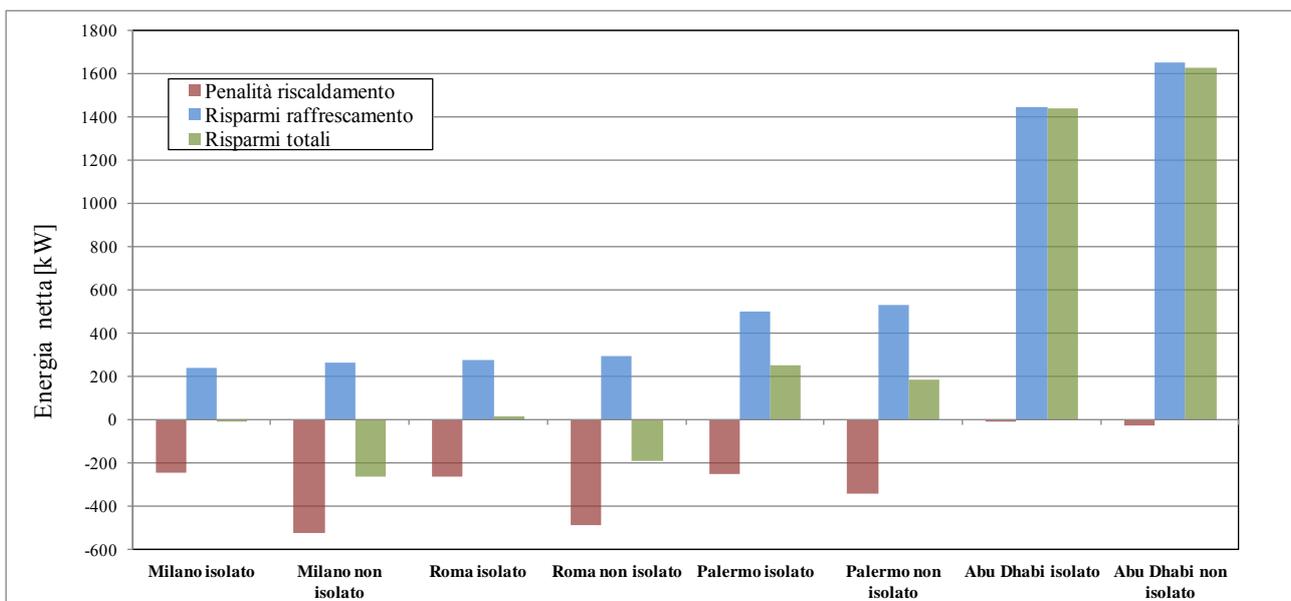


Figura 11. Risparmi e penalità assoluti energetici per edificio commerciale

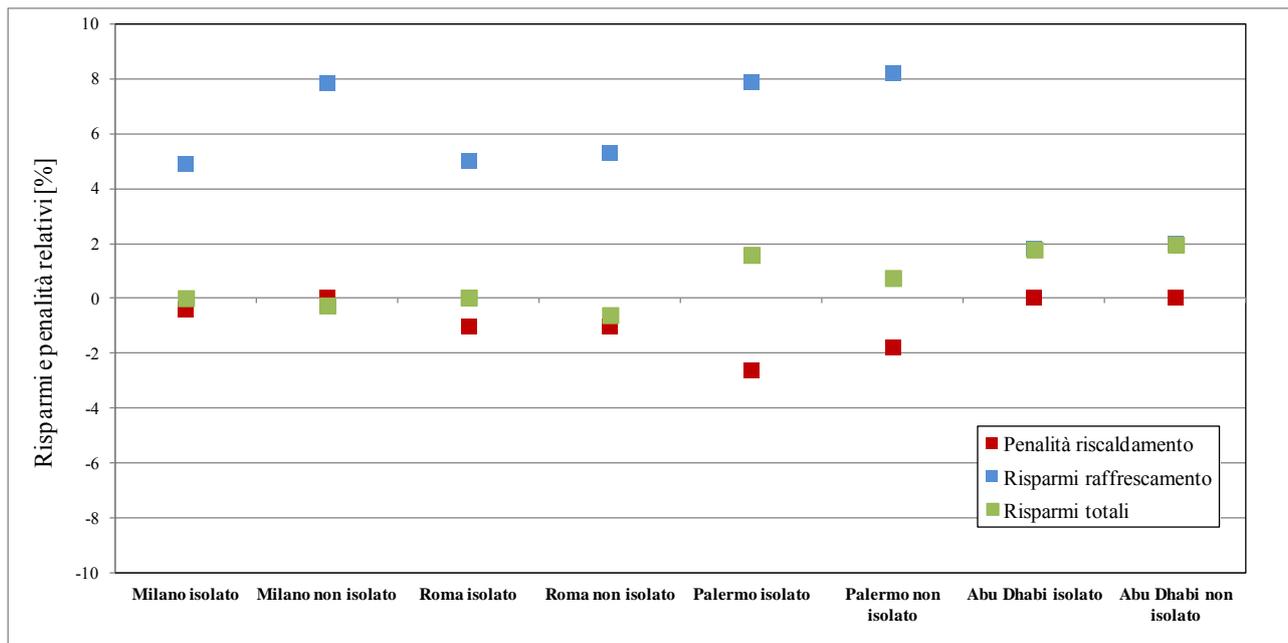


Figura 12. Risparmi e penalità percentuali per edificio commerciale

6 Conclusioni

La ricerca ha evidenziato come la tecnologia presenti delle interessanti prospettive in termini di miglioramento della risposta alla radiazione solare soprattutto per i colori scuri. Gli incrementi di *riflettanza* solare sono invece molto più modesti nel caso di colori chiari, laddove già si registra un buon comportamento sullo spettro dell'infrarosso vicino. Dal punto di vista dell'impatto sull'edificio, lo studio evidenzia notevoli potenzialità di risparmio energetico per quanto riguarda la stagione estiva per tutte le zone climatiche testate. Viceversa su base annuale i vantaggi, peraltro modesti, sono invece registrati nelle zone più calde di Italia o in condizioni climatiche decisamente più severe di quelle riscontrabili alle nostre latitudini. È interessante infine notare la riduzione della temperatura superficiale derivante dall'applicazione di materiali riflettenti (valori di picco fino a oltre 6°C), con una riduzione di calore liberato verso l'ambiente urbano per convezione e un minore stress termico sul materiale, creando condizioni che favoriscono la durabilità dei componenti di involucro in opera.

7 Riferimenti bibliografici

1. World Energy Outlook 2008-2009, International Energy Agency Geneva; 2008-2009.
2. Goldreich Y. Ground and top of canopy layer urban heat island partitioning on an airborne image. Remote Sensing of Environment 2006; 104: 247-255.
3. Hassid S, Santamouris M, Papanikolaou N, Linardi A, Klitsikas N. The effect of the heat island on air conditioning load. Journal of Energy and Buildings 2000; 32(2): 131-141.
4. Huang L, Li D, Zhao J, Zhu J. A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing. Building and Environment 2008; 43: 7-17.
5. Kolokotroni M, Zhang Y, Watkins R. The London heat island and building cooling design. Solar Energy 2007;81(1):102-110.
6. Rosenzweig C, Solecki W, Parshall L, Choppingc M, Pope G, Goldberg R. Characterizing the urban heat island in current and future climates in New Jersey. Environmental Hazards 2005; 6: 51-62.
7. Santamouris M. Heat island research in Europe, the state of the art. Advances Building Energy Research 2007;1: 123-150.

8. Taha H, Chang SC, Akbari H. Meteorological and air quality impacts of heat island mitigation measures in three U.S. Cities. Lawrence Berkeley National Laboratory Report, Berkeley, CA, 2000.
9. Rose LS, Akbari H, Taha H. Characterizing the Fabric of the Urban Environment: A Case Study of Greater Houston, Texas. Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-51448, Berkeley, CA, 2003.
10. H. Akbari, S. Bretz, D. Kurn, H. Hartford, "Peak power and cooling energy savings of high albedo roofs", *Energy and Buildings*, Volume 25 (1997), pp. 117-126.
11. A. Christen, R. Vogt, "Energy and radiation balance of a central European city", *International Journal of Climatology* Volume 24 (2004), pp. 1395-1421.
12. H. Suehrcke, E.L. Peterson, N. Selby, "Effect of roof solar reflectance on the building heat gain in a hot climate" *Energy and Buildings*, Volume 40 (2008), pp. 2224-2235.
13. D. Parker, J. Huang, S. Konopacki, L. Gartland, J. Sherwin, L. Gu, "Measured and simulated performance of reflective roofing systems in residential buildings", *ASHRAE Transactions*, Volume 104(1) (1998), pp. 963-975.
14. A. Synnefa, M. Santamouris, H. Akbari, "Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions", *Energy and Buildings*, Volume 39(11) (2007), pp. 1167-1174.
15. H. Akbari, S. Konopacki, "Calculating energy saving potentials of heat island reduction strategies", *Energy Policy*, Volume 33 (2005), pp. 721-756.
16. M. Zinzi, "*Cool materials and cool roofs: Potentialities in Mediterranean buildings*", *Advances in Building Energy Research*, Volume 4 (2010), pp. 201-266.