

OTTIMIZZAZIONE ENERGETICA SU BASE ANNUA DEI COMPONENTI OPACHI DI EDIFICI: UN CASO DI STUDIO

F. Asdrubali, C. Buratti, G. Baldinelli, E. Moretti

Università degli Studi di Perugia – Dipartimento di Ingegneria Industriale, Via Duranti 67 – 06125 Perugia

SOMMARIO

Il D.L. 311/06 ha introdotto dei vincoli relativi al comportamento dell'involucro edilizio nella stagione estiva, ed in particolare il rispetto di una massa superficiale delle strutture esterne superiore a 230 kg/m^2 per le zone climatiche con irradianza mensile maggiore o uguale a 290 W/m^2 . Il presente lavoro si propone di discutere tale requisito e di effettuare l'ottimizzazione dell'involucro esterno, non delegando unicamente ad una elevata massa superficiale il compito di limitare i consumi per il raffrescamento estivo, ma valutando nel dettaglio gli aspetti energetici su base annua, nonché altri parametri significativi del comportamento dell'edificio in regime dinamico. Il caso di studio esaminato è un importante edificio commerciale, sito in una località del Centro Italia (zona climatica D). L'ottimizzazione energetica dell'involucro è stata condotta individuando tamponature opache verticali di tipo leggero, con caratteristiche termofisiche (spessori, conducibilità termica, densità e capacità termica) in grado di garantire prestazioni migliori rispetto a strutture-tipo di riferimento, realizzate conformemente ai dettami di trasmittanza e di massa superficiale del D.L. 311/06. Per la stagione estiva, la verifica è stata effettuata con riferimento ai parametri termici dinamici: la soluzione proposta ha mostrato valori di trasmittanza termica dinamica significativamente inferiori rispetto a quelli della struttura di riferimento, garantendo una diminuzione del calore in ingresso al fabbricato; anche lo sfasamento è risultato maggiore per le strutture orizzontali, mentre è praticamente identico per quelle verticali. L'analisi su base annua, ottenuta sommando i contributi invernali ed estivi, ha dimostrato come sia possibile arrivare con le soluzioni proposte ad un risparmio energetico complessivo non trascurabile (pari a circa il 5%) rispetto alla struttura di riferimento conforme al D.Lgs. 311/06; pertanto, il requisito di una elevata massa superficiale non è di per sé garanzia di una minimizzazione del fabbisogno energetico di involucro su base annua, ma anche altri parametri quali la trasmittanza dinamica e lo sfasamento dell'onda termica assumono un ruolo fondamentale.

INTRODUZIONE

Il D.L. 311/06 [1], nell'ambito dell'applicazione dei requisiti minimi in materia di prestazioni energetiche degli edifici, oltre a ridefinire alcuni parametri di riferimento per la climatizzazione invernale, pone per la prima volta alcuni vincoli relativi al comportamento dell'involucro edilizio nella stagione estiva.

Per gli edifici situati nelle zone climatiche nelle quali il valore medio mensile dell'irradianza sul piano orizzontale nel mese di massima insolazione estiva è maggiore o uguale a 290 W/m^2 , si impone la verifica che il valore della massa superficiale delle pareti opache verticali, orizzontali o inclinate sia superiore a 230 kg/m^2 ; viene inoltre specificato che gli effetti positivi che si ottengono con il rispetto di questo requisito possono essere raggiunti, in alternativa, con l'impiego di tecniche e materiali, anche innovativi, che permettano di contenere le oscillazioni della temperatura derivanti dall'andamento dell'irraggiamento solare [2, 3].

Nel presente lavoro, attraverso il caso di studio di un importante edificio commerciale, si è cercato di approfondire l'influenza del requisito minimo di massa superficiale introdotto dal D.L. 311/06 sulle prestazioni energetiche degli edifici, non delegando unicamente ad una elevata massa superficiale il compito di limitare i consumi per il raffrescamento estivo, ma valutando nel dettaglio gli aspetti energetici su base annua, nonché altri parametri significativi del comportamento termico dell'edificio in regime dinamico.

In particolare, l'analisi è stata effettuata su un edificio caratterizzato da valori della massa superficiale delle pareti verticali molto inferiori ai limiti di legge, ma con prestazioni di isolamento termico molto spinte; l'edificio è situato in una località del Centro Italia (zona climatica D).

L'ottimizzazione energetica dell'involucro è stata quindi condotta individuando tamponature opache verticali che, pur presentando masse superficiali inferiori ai 230 kg/m^2 , possedessero caratteristiche termofisiche (spessori, conducibilità termica, densità e capacità termica) in grado di garantire prestazioni migliori rispetto a strutture-tipo di riferimento realizzate conformemente ai dettami di trasmittanza e di massa superficiale del D.L. 311/06. Si sono inoltre determinati alcuni parametri termici dinamici in grado di descrivere il comportamento dell'edificio nelle condizioni estive, tipicamente non stazionarie.

1. ANALISI METODOLOGICA

Le soluzioni per il contenimento delle oscillazioni di temperatura previste dal D.L. 311/06 (auspicabili, tra l'altro, non solo nelle località indicate dal decreto ma in generale in tutte le costruzioni, ai fini del comfort termico) possono essere valutate secondo diverse procedure [4, 5, 6].

Nel presente lavoro, il comportamento termico degli edifici nella stagione estiva è stato analizzato impiegando due distinti metodi di calcolo:

1. Calcolo delle caratteristiche termiche dinamiche tramite la norma UNI EN ISO 13786 [4], per valutare la trasmittanza termica dinamica e le caratteristiche di attenuazione e sfasamento dell'onda termica proprie delle strutture dell'edificio;

2. Calcolo del cooling load tramite il metodo ASHRAE delle funzioni di trasferimento (Transfer Function Method, TFM), per valutare il fabbisogno energetico per la climatizzazione estiva dell'edificio [6].

1.1. Parametri termici dinamici

L'analisi energetica in condizioni estive non può prescindere dalla valutazione delle caratteristiche termiche dinamiche, che risultano parte integrante nello studio del comportamento dei componenti opachi sulle prestazioni energetiche.

L'equazione che regola il flusso termico (in W) in regime variabile all'interno degli ambienti attraverso le superfici opache dell'involucro all'ora t ($\Phi_{op,t}$) è quella riportata nella UNI 10375 [5]:

$$\Phi_{op,t} = UA[(\theta_{e,t-\varphi_a} - \theta_{em})f_a + \theta_{em}] \quad (1)$$

dove:

U è la trasmittanza termica della parete [W/m^2K]

A è l'area della parete [m^2]

$\theta_{e,t-\varphi_a}$ è la temperatura esterna calcolata all'ora ($t-\varphi_a$) [K]

φ_a è il fattore di sfasamento dell'onda termica [h]

$\theta_{e,m}$ è la temperatura esterna media giornaliera [K]

f_a è il fattore di attenuazione del flusso termico [-]

t è l'ora in cui viene valutato il flusso termico [h].

Il calore in ingresso dipende dunque in prima istanza dai valori di trasmittanza termica U della parete, come peraltro già avviene in condizioni stazionarie (adottate nel calcolo in condizioni invernali). Il primo intervento che può essere attuato per ridurre i carichi estivi consiste dunque nel limitare il più possibile il valore della trasmittanza termica, migliorando anche le prestazioni nella stagione fredda.

Inoltre si può intervenire sulle caratteristiche termiche in regime dinamico che compaiono nell'equazione precedente, ovvero il fattore di attenuazione f_a (decrement factor) e il fattore di sfasamento dell'onda termica φ_a (time shift of the periodic thermal transmittance).

Le caratteristiche termiche in regime dinamico di un componente edilizio descrivono il comportamento termico del componente soggetto a condizioni al contorno variabili, ovvero flusso termico variabile o temperatura variabile su una o entrambe le facce con andamento sinusoidale; nella UNI EN ISO 13786 sono riportate le metodologie di calcolo di tali grandezze.

Il primo (f_a) definisce il rapporto tra la trasmittanza termica periodica e la trasmittanza termica in condizioni stazionarie U ; il prodotto di $f_a \times U$ fornisce pertanto la trasmittanza termica dinamica (Y_{12}), che definisce la trasmittanza delle strutture in regime variabile.

Il secondo parametro (φ_a) rappresenta il ritardo (in ore) che esiste fra l'oscillazione del flusso termico che passa attraverso la superficie interna della parete e l'oscillazione della temperatura nella superficie esterna. Un elevato sfasamento permette di ritardare i flussi termici in ingresso verso le ore serali, quando la ventilazione può contribuire al raffrescamento ovvero, in alcuni casi, quando gli edifici non

sono più utilizzati (come nel caso specifico degli edifici commerciali).

I due parametri sono calcolati nella UNI EN ISO 13786 in funzione delle proprietà termofisiche di ciascuna parete opaca che costituisce l'involucro; in particolare, le grandezze che intervengono nella definizione delle caratteristiche dinamiche possono essere riassunte, per ogni strato che costituisce la parete, come segue:

- spessore;
- conducibilità termica;
- capacità termica specifica;
- densità.

I valori delle caratteristiche termiche dinamiche sono funzione del periodo rappresentativo dell'oscillazione termica; nella valutazione del comportamento estivo di una parete, si fa riferimento alle 24 h, che tengono conto di variazioni meteorologiche e di temperatura giornaliera.

1.2. Calcolo del cooling load

La metodologia del cooling load consente, per un qualunque ambiente, il calcolo orario degli andamenti degli apporti di calore, dei contributi di carico termico ambiente, della potenza dell'impianto e della temperatura dell'aria interna, per qualsiasi programma di funzionamento dell'impianto di condizionamento (orario di funzionamento, temperature di set-point, etc.) e per qualsivoglia andamento delle variabili meteorologiche all'interno del periodo di simulazione scelto.

E' quindi un metodo impiegato principalmente per calcolare i massimi carichi termici sui quali dimensionare l'impianto di condizionamento e per simulare il fabbisogno annuale di energia per il raffrescamento. Tutte le grandezze sono calcolate in regime transitorio. Le principali sono le seguenti:

- *apporto termico istantaneo (heat gain)*: rappresenta la frazione di energia che in un dato istante entra o esce dall'ambiente per effetto dell'irraggiamento solare attraverso le superfici trasparenti, della trasmissione attraverso le pareti e i soffitti esterni, della trasmissione attraverso le pareti interne, i soffitti e i pavimenti, della presenza delle persone, dell'impianto di illuminazione o di apparecchiature, della ventilazione e delle infiltrazioni;
- *carico termico (cooling load)*: rappresenta la frazione di energia che deve essere rimossa dall'ambiente per mantenerlo ad una temperatura costante. La somma di tutti gli apporti istantanei non necessariamente coincide con il cooling load in quell'istante, infatti, ad esempio l'apporto istantaneo dovuto alla radiazione solare è parzialmente accumulato dalle strutture e dagli arredi dell'ambiente e sarà rilasciato in tempi successivi per convezione;
- *potenza termica (heat extraction)*: rappresenta la frazione di energia che deve essere effettivamente rimossa dall'ambiente climatizzato e tiene conto degli effetti dovuti all'intermittenza di funzionamento dell'impianto e alla sua regolazione (basata su un differenziale di temperatura centrato sulla temperatura di set-point).

Heat extraction e cooling load tendono a coincidere quando la temperatura è mantenuta effettivamente costante nell'ambiente per tutte le 24 h (ovvero nell'ipotesi di un esercizio continuo dell'impianto, con un differenziale di temperatura ridotto).

Pertanto, se il sistema di controllo è correttamente simulato, il

valore dell'*heat extraction* ambiente rappresenta in modo più realistico la potenza che deve essere rimossa dall'impianto di quanto non lo sia il valore del *cooling load* ambiente. L'*heat extraction* rappresenta, quindi, la potenza che l'impianto deve erogare all'ambiente per mantenere le condizioni di progetto in funzione dei carichi termici, dell'orario di funzionamento e delle tolleranze ammesse.

Nella presente trattazione, dal momento che l'obiettivo consiste nel valutare la richiesta energetica per la climatizzazione, si è fatto riferimento al *cooling load*.

Per la valutazione del *cooling load* di un ambiente è necessario impostare un bilancio termico conduttivo, convettivo e radiativo per ogni superficie dell'ambiente ed un bilancio termico convettivo per l'aria nell'ambiente.

Il metodo si basa sull'impiego delle funzioni di trasferimento che esprimono il legame fra una sollecitazione generica incidente su un sistema e la conseguente risposta.

Sfruttando il cosiddetto "metodo rigoroso" sono stati calcolati il *cooling load* e le temperature delle superfici dell'ambiente per molti tipici edifici, simulando gli *heat gain* come impulsi di ampiezza unitaria. Le funzioni di trasferimento, quindi, sono state calcolate come costanti numeriche che rappresentano il carico termico corrispondente ad una perturbazione unitaria. Considerando queste funzioni di trasferimento indipendenti dagli impulsi, ma caratteristiche dell'edificio, il calcolo del *cooling load* non richiede più la procedura rigorosa, ma basta una semplice moltiplicazione delle funzioni di trasferimento per la serie temporale degli apporti termici.

Il metodo applica quindi una serie di coefficienti della funzione di trasferimento della conduzione ad ogni superficie esterna opaca e alle differenze fra la temperatura sole-aria e la temperatura interna all'ambiente, così da determinare l'*heat-gain* tenendo conto dell'inerzia termica delle pareti. L'apporto di calore per conduzione attraverso finestre, porte e gli altri apporti termici interni sono calcolati direttamente per l'ora considerata.

Noti gli *heat-gain*, si calcola il carico di raffreddamento (*cooling load*) dovuto agli apporti di calore aventi componenti radianti, ricorrendo ai coefficienti delle funzioni di trasferimento dell'ambiente (*Room Transfer Function, RTF*), così da tener conto dell'effetto dell'accumulo termico nelle strutture dell'edificio. Conoscendo, quindi, i coefficienti delle funzioni di trasferimento *CTF* e *RTF*, è possibile eseguire i calcoli del *cooling load* ora per ora, per ogni locale dell'edificio, valutando quindi l'energia complessiva necessaria per il raffrescamento.

Entrambe le serie di coefficienti mettono in relazione la funzione risposta ad una certa ora con la funzione eccitatrice alla stessa ora e alle ore immediatamente precedenti.

Per calcolare il *cooling load* dell'ambiente occorre innanzitutto conoscere alcune informazioni sull'edificio e una serie di dati meteorologici; principalmente sono necessarie le seguenti indicazioni:

- caratteristiche dell'edificio (materiali, dimensioni dei componenti, colore e forma delle superfici esterne);
- configurazione dell'edificio (posizione e orientazione, ombreggiamento, presenza di elementi che possono riflettere la radiazione solare, come specchi d'acqua, parcheggi);
- condizioni di progetto esterne e interne (temperature di bulbo secco e di bulbo umido, ventilazione);
- dati relativi all'esercizio dell'edificio (occupazione, illuminazione, apparecchiature interne e tutti i

processi che possono influire sul carico termico interno);

- periodo di interesse (ore del giorno e mesi nei quali effettuare i calcoli).

La procedura si articola in due fasi: dapprima occorre individuare gli apporti termici (*heat gain*) da tutte le sorgenti; quindi ogni *heat gain* deve essere convertito in *cooling load*.

Il primo passo è quello di individuare i vari apporti termici che, ora per ora, gravano sull'ambiente. Gli *heat gain* vanno innanzitutto separati nella componente sensibile e nella componente latente. Gli apporti sensibili vengono direttamente aggiunti all'ambiente condizionato tramite i meccanismi di conduzione, convezione e/o radiazione; gli apporti di tipo latente vanno invece considerati quando viene immessa umidità nell'ambiente (ad esempio tramite il vapore emesso dagli occupanti o dalle apparecchiature). Per mantenere un tasso di umidità costante, il vapore deve essere estratto dall'impianto di condizionamento.

Gli apporti di calore sensibile da considerare sono i seguenti:

- contributo degli apporti per trasmissione termica;
 - attraverso una parete esterna o un tetto;
 - attraverso pareti interne;
 - attraverso porte e finestre;
- contributo degli apporti di calore per irraggiamento solare;
- contributo degli apporti interni;
 - dovuti all'occupazione dell'ambiente;
 - dovuti alle luci interne;
 - dovuti alle apparecchiature interne;
- contributo per infiltrazioni e ventilazione.

I contributi dovuti ad infiltrazioni, alla ventilazione, agli occupanti ed eventualmente alle apparecchiature interne hanno anche una componente legata al calore latente.

Ciascuno dei contributi sopra citati intervengono in modo differenziato sull'ambiente. L'apporto per trasmissione termica riscalda l'aria ambiente per convezione attraverso il flusso laminare interno. L'irraggiamento solare e gli apporti di tipo radiativo riscaldano sia l'aria ambiente sia le strutture che, in modo differito nel tempo, restituiranno l'energia assorbita anche quando la fonte di calore di tipo radiativo è cessata. Gli apporti di calore endogeni (occupanti, apparecchiature, illuminazione) scambiano con l'aria ambiente sia per convezione sia per radiazione. Le infiltrazioni e l'aria di ventilazione, miscelandosi con l'aria ambiente, influiscono in modo istantaneo sul carico termico. In modo analogo si comportano tutti gli addendi che prevedono apporti di calore latente.

2. APPLICAZIONE AD UN CASO DI STUDIO

2.1 Descrizione dell'edificio

L'edificio oggetto di studio ha una superficie totale di circa 36 000 m² ed un volume complessivo di 176 000 m³; si tratta di un importante edificio commerciale adibito a varie funzioni e con carichi termici differenti nelle varie zone.

Il progetto prevede una struttura che si sviluppa su 4 livelli: il piano terra ed il primo piano sono adibiti a parcheggio, mentre i piani secondo e terzo costituiscono la parte commerciale.

I piani destinati a parcheggio hanno un'altezza di circa 4.30 m; i piani secondo e terzo sono alti circa 4.95 metri e per un'ampia zona non sono separati da alcun solaio, in modo tale

da costituire un unico spazio di altezza doppia destinato a self-service. Al secondo piano sono previste la zona ricevimento merci, la zona deposito e self-service, le varie aree espositive, la zona casse e la zona giochi per i bambini; il terzo piano comprende l'area impianti, la zona uffici, la zona ristorazione e l'area show-room.

L'entrata e l'uscita dell'edificio commerciale sono situate sul prospetto nord-ovest dell'edificio, un ampio volume che si sviluppa sui 4 piani della struttura; l'area di ingresso è delimitata verso l'esterno da un'estesa vetrata, parzialmente coperta da frangisole in alluminio in corrispondenza del secondo e del terzo livello dell'edificio.

Il sito di costruzione dell'edificio è un Comune del Centro Italia, appartenente alla Zona Climatica D, caratterizzato da un'irradiazione sul piano orizzontale nel mese di massima insolazione estiva maggiore di 290 W/m^2 [7, 8].

2.2 Ipotesi di progetto

Nel calcolo energetico i valori di temperatura degli ambienti climatizzati sono stati assunti pari a 26°C in estate e 20°C in inverno per tutti i locali; l'umidità relativa dell'aria di progetto è pari al 50% in estate e al 45% in inverno, ad eccezione dei locali mensa e della sala ristorante, con valori rispettivamente del 55% e 50% in estate e in inverno. Le tolleranze ammesse sui valori sopra esposti sono $\pm 1^\circ\text{C}$ per la temperatura e $\pm 10\%$ per l'umidità relativa.

Nell'edificio è previsto un impianto di ventilazione meccanica; i valori minimi di portata d'aria esterna nei vari reparti dell'edificio sono riportati in tabella 1.

Per ogni persona si è considerato un carico termico sensibile pari a 58 W ed un carico termico latente pari a 64 W.

I carichi interni (illuminazione e apparecchiature) presi come riferimento per il dimensionamento degli impianti sono riportati in tabella 2.

Tab. 1 – Portate d'aria di rinnovo.

Zona	Quantità aria esterna		Affollamento (pers/m ²)
	vol/h (minimo)	m ³ /h x p	
Uffici	2	40	0.10
Show-room		25 (minimo)	0.25 (riferito all'area netta)
Market e self-service		25 (minimo)	0.25 (riferito all'area netta)
Sala ristorante		36 (minimo)	500 posti a sedere

Tab. 2 – Carichi interni.

Zona	Carichi interni (W/m ²)	
	a regime	transitorio
Zona uffici	20	15
Ufficio vendite	25	15
Zona Show-room p. terzo	20	10
Zona market p. secondo	220	60
Zona ingresso	20	10
Zona ristorante (pubblico)	15	10
Zona mensa personale	15	10

L'impianto termico che serve l'edificio oggetto di analisi è

composto da più parti funzionanti con modalità differenti a seconda della destinazione d'uso dei locali; si differenziano nello specifico due macro tipologie di impianto: impianto a tutt'aria per l'area vendita, impianto ad aria miscelata nell'area uffici (ventilconvettori a cassetta o canalizzabili, del tipo idoneo per impianti a quattro tubi ed aria primaria).

L'unità di trattamento dell'aria primaria è prevista sulla copertura del fabbricato in una zona opportunamente predisposta; la produzione di acqua calda per il riscaldamento ambiente è realizzata mediante l'impiego di 2 generatori, del tipo a condensazione, dotati di bruciatori ad aria soffiata modulanti alimentati a gas metano.

La produzione di acqua refrigerata per il condizionamento degli ambienti è realizzata mediante gruppi frigoriferi installati anch'essi in copertura.

La velocità dell'aria in ambiente, misurata a 1.5 metri d'altezza da terra, è stata ipotizzata non superiore a 0.15 m/s in regime invernale e 0.25 m/s in regime estivo.

In generale il funzionamento degli impianti è continuo nelle ore di apertura del centro commerciale e prevede lo spegnimento nelle fasce orarie di chiusura dello stesso.

Gli impianti sono infine stati dimensionati per garantire il raggiungimento delle condizioni di regime dopo 3 ore dall'accensione.

2.3 Soluzione costruttive esaminate

Per lo studio delle prestazioni termiche dell'edificio sono stati esaminati due casi che differiscono per le caratteristiche delle strutture che costituiscono le pareti verticali:

- **Caso A** (soluzione di riferimento): è caratterizzata da un sistema edificio-impianto che soddisfa i requisiti invernali del D.Lgs. 311/06 e le cui pareti opache (orizzontali e verticali) presentano una massa superficiale superiore a 230 kg/m^2 , così come richiesto dallo stesso Decreto per la stagione estiva;

- **Caso B** (soluzione alternativa): è caratterizzata da un sistema edificio-impianto che soddisfa i requisiti invernali del D.Lgs. 311/06, con pareti opache verticali di massa superficiale inferiore a 230 kg/m^2 , ma di elevata resistenza termica e capacità termica; le partizioni orizzontali sono simili a quelle del caso A.

Si riportano in dettaglio le caratteristiche delle principali tamponature per le due soluzioni proposte.

Caso A.

Pareti verticali esterne: struttura costituita da materiali tipicamente utilizzati nel campo dell'edilizia non residenziale, in calcestruzzo, del tipo pannello prefabbricato da 10 cm, coibentato con un isolamento a cappotto, costituito da 8 cm di polistirene; trasmittanza pari a $0.398 \text{ W/m}^2\text{K}$, massa superficiale pari a 232 kg/m^2 (codice: Vert-A).

Partizioni orizzontali: struttura costituita da un solaio strutturale in calcestruzzo di spessore pari a 5 cm, un massetto di ulteriori 5 cm, sormontato da uno strato di isolante di 6,4 cm; trasmittanza pari a $0.347 \text{ W/m}^2\text{K}$, massa superficiale pari a 232 kg/m^2 (codice: Oriz-A).

Caso B.

Pareti verticali esterne: struttura leggera, costituita da un pannello isolante ad elevate prestazioni di isolamento termico ed una sottostruttura di appoggio, non sempre presente; trasmittanza pari a $0.221 \text{ W/m}^2\text{K}$, massa superficiale pari a 30 kg/m^2 (codice: Vert-B).

Partizioni orizzontali: struttura costituita da uno strato di isolante di 10 cm, uno strato di massetto di 8 cm e uno strato di calcestruzzo armato di 5 cm; trasmittanza pari a 0.226 W/m²K, massa superficiale pari a 299 kg/m² (codice: Oriz-B).

In tab. 3 sono riportate le proprietà termofisiche dei materiali costituenti le tamponature analizzate, mentre in tab. 4 sono riassunti i valori di trasmittanza di ciascuna parete per le due soluzioni, insieme ai valori limite imposti dal D.Lgs. 311/06 attualmente in vigore e ai valori di massa superficiale; il calcolo delle trasmittanze è stato effettuato ai sensi della UNI EN ISO 6946 [9].

Tab. 3 – Proprietà termofisiche dei materiali costituenti le pareti opache.

Pareti	Materiali	Spes. (m)	Cond. (W/m K)	Cap. term. (J/kg K)	Dens. (kg/m ³)
Vert-A	calcestruzzo	0.100	2.150	880	2 300
	polietilene	0.080	0.035	1450	22
Vert-B	lana minerale	0.200	0.046	840	150
Oriz-A	calcestruzzo	0.050	2.150	880	2 400
	massetto	0.050	0.930	880	2 200
	poliuretano	0.064	0.024	1 250	30
Oriz-B	calcestruzzo	0.050	2.150	880	2 400
	massetto	0.080	0.930	880	2 200
	poliuretano	0.100	0.024	1 250	30

Tab. 4 – Alcune caratteristiche termofisiche delle strutture esaminate.

Parete	Massa superficiale (kg/m ²)	Trasmittanza (W/m ² K)	Trasm. limite (Zona D) (W/m ² K)
Vert-A	232	0.398	0.400
Vert-B	30	0.221	0.400
Oriz-A	232	0.347	0.350
Oriz-B	299	0.226	0.350

3. RISULTATI

3.1 Confronto in termini di prestazioni dinamiche

In tab. 5 è riportato il confronto fra le strutture verticali e orizzontali delle due soluzioni analizzate, sia in termini di sfasamento che in termini di trasmittanza termica dinamica.

Tab. 5 – Confronto fra le caratteristiche dinamiche delle soluzioni previste.

Parete	Sfasamento ϕ (h)	Trasmittanza dinamica Y_{12} (W/ m ² K)
Verticale esterna di riferimento (Caso A)	-4.9	0.177
Verticale esterna alternativa (Caso B)	-5.0	0.152
Differenza	- 2%	- 14%
Orizzontale esterna di riferimento (Caso A)	-4.9	0.178
Orizzontale esterna alternativa (Caso B)	-6.4	0.087
Differenza	- 30%	- 51%

Risultano evidenti i miglioramenti della soluzione alternativa sia per lo sfasamento che, in misura maggiore, per la trasmittanza termica dinamica.

In fig. 1 sono riportati gli andamenti dei flussi di calore specifici in corrispondenza delle superfici interne delle pareti verticali, considerando una variazione sinusoidale della temperatura esterna di ampiezza unitaria.

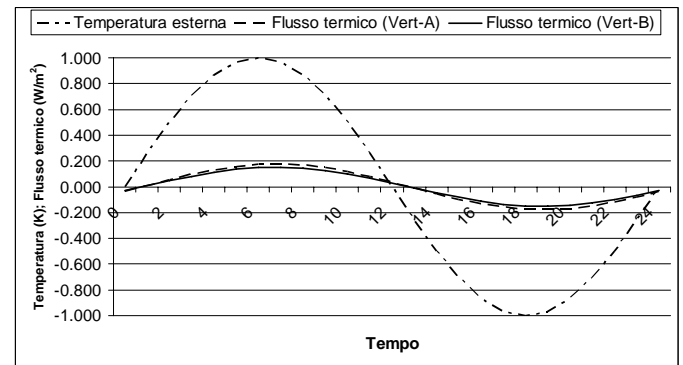


Fig. 1 – Andamento giornaliero dei flussi termici sulla faccia interna delle pareti esterne in corrispondenza di una variazione sinusoidale della temperatura esterna di ampiezza unitaria.

3.2 Confronto in termini di consumi energetici invernali ed estivi

I consumi energetici complessivi sono valutati come somma dei fabbisogni invernali ed estivi.

Dai valori ottenuti per l'EPI, calcolato come previsto dal D. L. 311/06, si risale immediatamente al fabbisogno energetico invernale complessivo, moltiplicando semplicemente per la volumetria dell'edificio riscaldato.

In tab. 6 sono riportati i risultati per i due casi esaminati.

Tab. 6 – Fabbisogno energetico invernale complessivo per i due casi esaminati.

Soluzione	Fabbisogno invernale complessivo (kWh/anno)
Caso A	939 061
Caso B	815 450

Le strutture alternative (caso B) mostrano un sensibile risparmio nei consumi invernali (-13%).

Per quanto riguarda la stagione estiva, si è ipotizzato che questa cominci il 1 giugno e termini il 15 settembre; in tab. 7 sono riportati i risultati del fabbisogno energetico estivo di raffrescamento per i due casi esaminati.

Tab. 7 – Fabbisogno energetico estivo per i due casi esaminati.

Soluzione	Fabbisogno estivo complessivo (kWh/anno)
Caso A	1 775 408
Caso B	1 768 370

Le due strutture mostrano praticamente gli stessi consumi estivi, con un leggero risparmio conseguito dalle strutture alternative (caso B).

I risultati complessivi, suddivisi per stagione e strutture, sono messi a confronto in tab. 8.

Tab. 8 - Fabbisogno energetico globale per i due casi esaminati.

Struttura	Consumi invernali (kWh)	Consumi estivi (kWh)	Consumi annui (kWh/anno)
Caso A	939 061	1 775 408	2 714 469
Caso B	815 450	1 768 370	2 583 820
Differenza (%)	- 13.1%	- 0.4%	- 4.8%

Si evince come i consumi energetici della struttura proposta risultino inferiori a quelli previsti per la struttura presa come riferimento, grazie soprattutto alla sensibile riduzione del fabbisogno invernale.

CONCLUSIONI

Il D.L. 311/06, al fine di limitare i consumi energetici nella stagione estiva nelle zone ad elevata insolazione, impone che il valore della massa superficiale delle pareti opache verticali, orizzontali o inclinate sia superiore a 230 kg/m².

In alternativa, lo stesso Decreto specifica che l'obbligo del superamento di 230 kg/m² per la massa superficiale delle pareti opache può decadere se gli effetti positivi che si ottengono con elevati valori di massa superficiale sono raggiunti con l'impiego di tecniche e materiali, anche innovativi, che permettano di contenere le oscillazioni della temperatura.

Si è scelto un edificio-pilota commerciale per la valutazione di soluzioni diverse, utilizzando due metodologie di analisi del comportamento termico degli edifici nella stagione estiva:

- calcolo delle caratteristiche termiche dinamiche con la norma UNI EN ISO 13786;
- calcolo del carico di raffrescamento tramite il metodo ASHRAE delle funzioni di trasferimento, per valutare il fabbisogno energetico per la climatizzazione estiva dell'edificio.

L'ottimizzazione energetica dell'edificio commerciale esaminato è stata ricercata individuando tamponature opache che, pur non presentando masse superficiali superiori ai 230 kg/m², possiedano caratteristiche termofisiche che garantiscono performance migliori rispetto a strutture-tipo di riferimento realizzate conformemente ai dettami di trasmittanza e di massa superficiale del D.L. 311/06.

Per la stagione di riscaldamento si è verificato il rispetto dei valori di trasmittanza previsti dal D.Lgs. 311/06 per tutte le tamponature; inoltre, sono state valutate le dispersioni totali stagionali, in termini di potenza massima richiesta all'impianto, insieme al consumo globale invernale di energia.

Il confronto con strutture-tipo di riferimento, realizzate conformemente ai dettami di trasmittanza e di massa superficiale del D.L. 311/06, ha evidenziato un sensibile risparmio nei consumi invernali per le strutture alternative, sia in termini energetici sia di dispersioni.

Per la stagione estiva, la verifica è stata effettuata con riferimento ai parametri termici dinamici: per le due strutture principali della soluzione alternativa, la trasmittanza termica dinamica è risultata significativamente inferiore rispetto a quella della struttura di riferimento; ciò garantisce la diminuzione del flusso termico in ingresso all'edificio. Anche

lo sfasamento è sensibilmente maggiore per le strutture orizzontali, mentre risulta praticamente uguale per quelle verticali.

Il confronto con strutture-tipo di riferimento realizzate conformemente ai dettami di trasmittanza e di massa superficiale del D.L. 311/06 ha evidenziato inoltre una sostanziale equivalenza dei consumi estivi.

L'analisi su base annua, ottenuta sommando i contributi invernali ed estivi, ha quindi dimostrato come le strutture alternative portino ad un risparmio energetico complessivo vicino al 5% rispetto alla struttura di riferimento, conforme ai requisiti del D.Lgs. 311/06.

Si può pertanto concludere che la massa superficiale non è l'unico parametro in grado di controllare gli apporti di potenza termica in condizioni estive; meritano infatti considerazione altri parametri come lo sfasamento e la trasmittanza termica dinamica, in grado di descrivere più compiutamente il comportamento dell'edificio in condizioni estive, tipicamente non stazionarie.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Decreto Legislativo 29 dicembre 2006, n. 311 Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo n. 192 del 2005, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia.
2. A. Prada, M. Baratieri, P. Baggio, P. Romagnoni, A. Gasparella, E. Bettanini, Consumi energetici e certificazione energetica: situazione estiva ed invernale in Italia e in Europa, in Atti 63° Congresso Nazionale ATI, Palermo Settembre 2008.
3. V. Corrado, S. Paduos, Il progetto termico dell'involucro opaco: l'effetto della massa sulla prestazione termica ed energetica dell'edificio, in Atti 63° Congresso Nazionale ATI, Palermo Settembre 2008.
4. UNI EN ISO 13786, Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di calcolo, Maggio 2008.
5. UNI 10375, Metodo di calcolo della temperatura interna estiva degli ambienti, Aprile 1995.
6. ASHRAE, Fundamentals Handbook, ASHRAE, 1997.
7. Decreto del Presidente della Repubblica del 26 agosto 1993, n. 412 Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10.
8. UNI 10349, Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici, Aprile 1994
9. UNI EN ISO 6946, Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo, Maggio 2007.

SUMMARY

In order to limit summer cooling loads, the recent Decree 31/2006 has introduced for the first time in Italian legislation the requirement of a surface mass higher than 230 kg/m² for external walls of buildings. The aim of the work is to discuss such a requirement and to carry out an optimization of a building envelope on a yearly basis, taking into account other parameters describing the dynamic conditions typical of summertime. A large commercial building located in central

Italy was chosen as case-study. Light vertical partitions, but with adequate thermophysical properties (density, thermal conductivity, thermal capacity) were chosen and compared with standard heavy partitions in compliance with the requirements of Decree 31/2006. The comparison was carried out taking into account various parameters such as the dynamic thermal transmittance and time shift of the periodic thermal transmittance. The building thermal loads were evaluated for both solutions in summer and winter time. The

results show that the light partitions have better values of the dynamic thermal parameters and lower energy requirements on a yearly basis (especially in wintertime) than the heavy ones. It can be concluded that a high value of the surface mass of external walls of buildings is not always a guarantee of a limited cooling load in summertime; other parameters describing dynamic heat transfer conditions have to be taken into account for a complete analysis.