

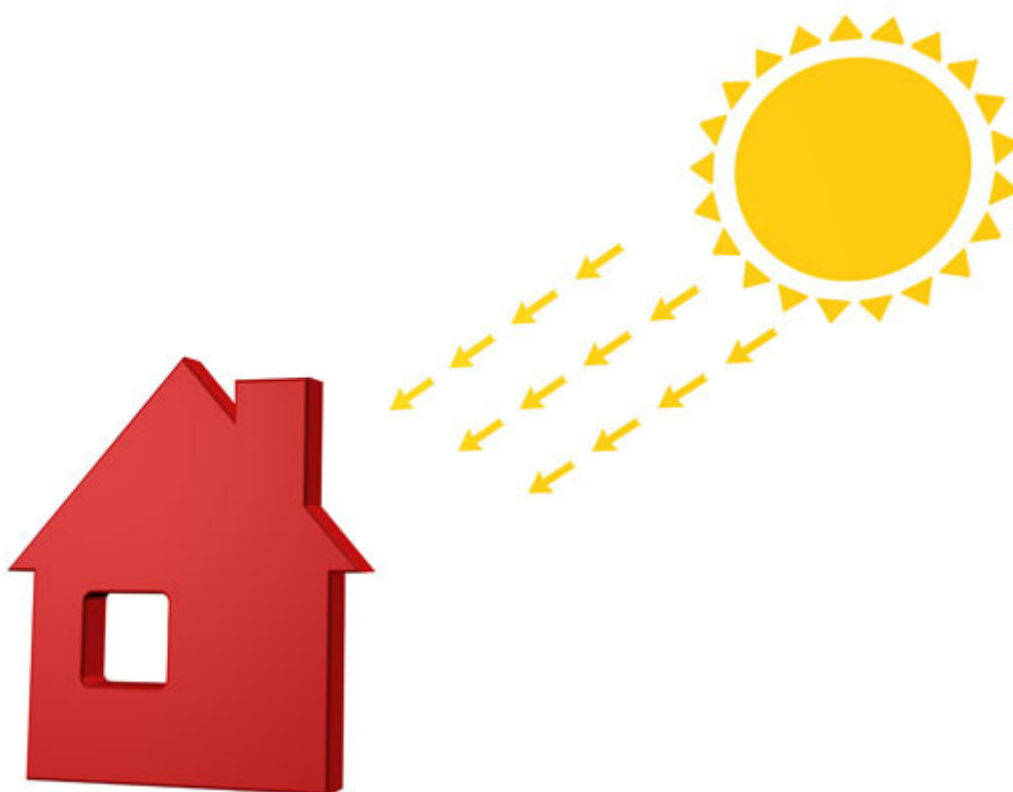
Calcolo del fabbisogno energetico di un edificio: procedure semplificate in regime stazionario e valutazioni in regime dinamico

Si riporta di seguito un articolo pubblicato sulla rivista "Costruire in Laterizio" n. 131 (Settembre/Ottobre 2009) a cura del prof. Simone Ferrari (Politecnico di Milano).

Premessa

Le attuali norme di riferimento per la stima del **fabbisogno energetico degli edifici** rimandano a **procedure semplificate (regime stazionario)** di derivazione CEN (Comitato Europeo di Normazione).

A differenza di quanto rilevabile applicando tali norme, **procedure di calcolo più sofisticate (regime dinamico)** evidenziano come la variabilità del flusso termico attraverso l'involucro edilizio comporti effetti sul bilancio energetico dell'edificio sensibilmente dipendenti dalla sua capacità termica.



Il fabbisogno energetico di un edificio

Una valutazione dettagliata delle **prestazioni energetiche** dei sistemi edilizi in fase di progetto comporta analisi di notevole complessità che rimandano all'uso di strumenti di simulazione sofisticati.

Il reale **comportamento termico-dinamico** del sistema costruttivo è infatti strettamente dipendente dalla variabilità delle condizioni ambientali al contorno. In particolare, il flusso termico trasmesso attraverso l'involucro edilizio dipende dalle oscillazioni delle condizioni interne all'edificio (determinate dalle modalità di occupazione e di gestione degli impianti) e, contemporaneamente, dalle fluttuazioni delle condizioni climatiche che si verificano al suo esterno.

Per determinare numericamente tali effetti, è necessario ricorrere a **valutazioni di tipo dinamico**, che considerino la variabile temporale, correlata agli effetti della capacità termica dei materiali, nel computare i fenomeni di trasmissione del calore.

Data la mole di dati e di elaborazioni richieste a tale scopo, è consuetudine per gli "addetti ai lavori" fare ricorso ad appositi **modelli di simulazione** computerizzati. Sono infatti ben noti al mondo scientifico, e professionale "avanzato", diversi software che consentono di effettuare simulazioni del comportamento energetico del sistema edilizio con livello di dettaglio quanto meno orario.

Attraverso questi modelli di analisi, la variabilità delle condizioni climatiche esterne viene descritta facendo ricorso a dati climatici su base oraria e la variabilità delle condizioni ambientali interne all'edificio viene determinata attraverso l'imputazione di dati occupazionali e gestionali, anch'essi rappresentati su base oraria.

Per ovviare al problema della complessità, diversamente, sono state definite **procedure semplificate** che risolvono il **bilancio energetico in regime stazionario**, anche su base mensile o stagionale, omettendo, salvo utilizzare parametri di prima approssimazione⁽¹⁾ che solo indirettamente riconducono ad effetti dinamici, l'analisi dettagliata delle variazioni delle prestazioni termiche dei sistemi edilizi nell'arco della giornata.

Tali procedure sono da tempo tradotte in norme che, proprio per esigenze di larga diffusione, richiedono semplificazioni metodologiche, quali quelle di derivazione CEN (Comitato Europeo di Normazione), e costituiscono il riferimento su cui si basano anche i decreti nazionali di recepimento della EPBD, la Direttiva UE sull'efficienza energetica degli edifici.

Di fatto, negli anni più recenti si è venuta a consolidare l'adozione di strumenti informatici di larga diffusione, con il risultato che le stesse norme semplificate vengono praticamente applicate esclusivamente tramite l'utilizzo di software sviluppati allo scopo. In altre parole, la procedura normata resta appannaggio di una software-house e l'utente si confronta semplicemente con una interfaccia user-friendly in cui digitare i dati di input necessari per il computo, al quale pensa in completa autonomia il codice di calcolo del software utilizzato.

A questo punto è lecito domandarsi: **perché non delegare al medesimo strumento informatico un codice di calcolo più sofisticato** dal momento in cui l'utente è sollevato da ogni onere di computazione?

Quali effetti potrebbero rivelare procedure di calcolo più sofisticate celate dietro una interfaccia che presenti la medesima consistenza di dati di input richiesti per il computo semplificato?

Nel presente articolo vengono riassunti alcuni casi di approfondimento sul tema, affrontati confrontando il fabbisogno energetico dell'edificio determinato tramite procedure di derivazione

CEN con quello stimato dal codice di **calcolo dinamico denominato DOE-2** (LBL, 1994), limitando, in prima analisi, le potenzialità date dal software sofisticato entro i confini di prima approssimazione dettati dagli input richiesti dalle procedure semplificate.

ANALISI PRESTAZIONALE DI EDIFICI A DIVERSA CAPACITÀ TERMICA

Effetti della capacità termica valutati con simulazioni dinamiche

Per un recente studio commissionato dal U.S. Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy Office of Building Technologies – di Washington, D.C. (Henninger e Witte 2007), è stato testato, secondo standard ANSI/ASHRAE 140-2004, il livello di sensibilità dei più noti modelli di simulazione dinamici nell'apprezzare gli effetti della capacità termica degli edifici.

Un edificio-tipo, a configurazione variabile, è stato simulato con diversi software (EnergyPlus, ESP, BLAST, DOE-2, SRES/SUN, SERIRES, S3PAS, TRNSYS, TASE) nelle condizioni climatiche di Denver (40° Lat. N, città dal clima freddo invernale e caldo secco estivo).

Sono state considerate due soluzioni edilizie, ad alta e bassa capacità termica, aventi trasmittanza termica di involucro analoga.

Per tutte le configurazioni considerate nello studio (orientamento delle aperture, presenza di elementi ombreggianti, regime di funzionamento degli impianti, presenza di serra per il periodo invernale e strategia di ventilazione notturna per il periodo estivo), i modelli di calcolo dinamici utilizzati hanno diagnosticato inequivocabilmente l'**efficacia della capacità termica edilizia** sia in inverno che in estate, con vantaggi energetici massimizzati in caso di freecooling notturno durante il periodo estivo.

Muovendo da questi risultati, nell'ambito di una ricerca svolta al Politecnico di Milano, si è voluto verificare quale ruolo avesse, in termini di efficacia prestazionale, la **capacità termica dell'involucro edilizio**, a parità delle restanti soluzioni costruttive adottate (partizioni verticali interne e solai).

A tale scopo, con il codice di calcolo DOE-2⁽²⁾ è stato condotto un set di simulazioni⁽³⁾ su alcuni edifici-tipo di diversa dimensione (rapporti S/V pari a 0.22, 0.43, 0.64 e 0.83, rispettivamente), con modalità occupazionali e gestionali costanti nel tempo, variando le sole caratteristiche delle murature perimetrali, confrontando cioè le prestazioni date da stratigrafie di involucro convenzionali in **laterizio** rispetto a quelle ottenute da un **involucro "iperleggero"** (isolante in sandwich), a parità di trasmittanza termica risultante $U = 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

La sensibilità del codice di calcolo dinamico utilizzato ha diagnosticato **scostamenti prestazionali significativi** in presenza di involucro edilizio dotato di capacità termica, sia per quanto riguarda il fabbisogno energetico invernale che per quello estivo⁽⁴⁾.

Nel grafico di fig. 1 sono riportate le riduzioni percentuali di fabbisogno termico invernale ed estivo delle tipologie in laterizio rispetto a quella "iperleggera".

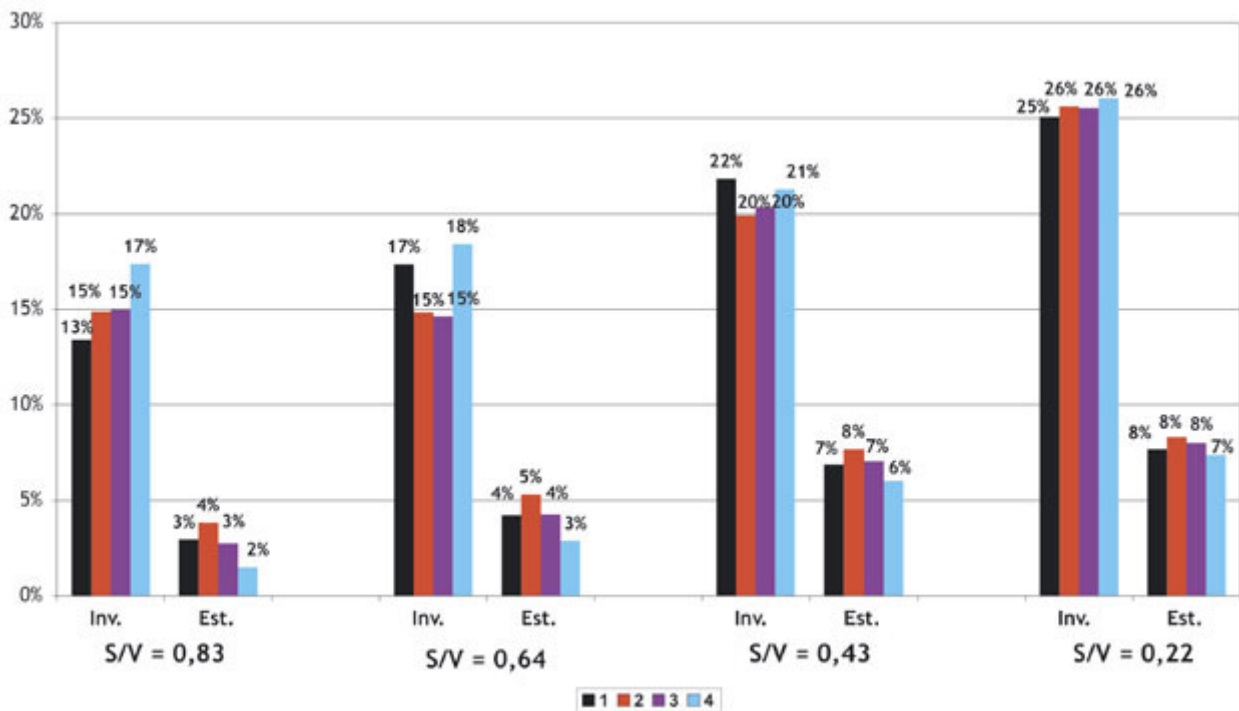


Fig. 1 - Riduzione percentuale di fabbisogno energetico rispetto all'involucro "iperleggero".

Effetti della capacità termica valutati tramite procedure semplificate

La recente specifica tecnica UNI/TS 11300 definisce le modalità per l'applicazione nazionale della norma UNI EN ISO 13790:2008 con riferimento al metodo mensile per il calcolo dei fabbisogni di energia termica per riscaldamento e per raffrescamento.

Il bilancio energetico dell'edificio viene stimato determinando i "fattori di utilizzazione" mensili, dipendenti dalla capacità termica della struttura edilizia interna, sia degli apporti termici (riscaldamento) che delle dispersioni termiche (raffrescamento).

Tale procedura è stata applicata, tramite un foglio elettronico, a due varianti di un edificio-tipo, distinte da valori di capacità termica pari a 165 kJ/m²K per la struttura più "massiva" e pari a 85 kJ/m²K per la struttura più "leggera" (valori estremi di capacità termica areica riportati nella specifica tecnica per gli edifici esistenti con numero di piani ≥ 3), con medesime trasmittanze termiche d'involucro.

I dati climatici medi mensili utilizzati per la valutazione (ex UNI 10349) sono riferiti alla città di Milano.

Come si evince dal grafico di fig. 2, il bilancio energetico rilevato per la struttura "massiva" e per quella "leggera" evidenzia valori di fabbisogno di energia con differenze stagionali contenute nell'ordine dell'1 ÷ 5% (estate-inverno).

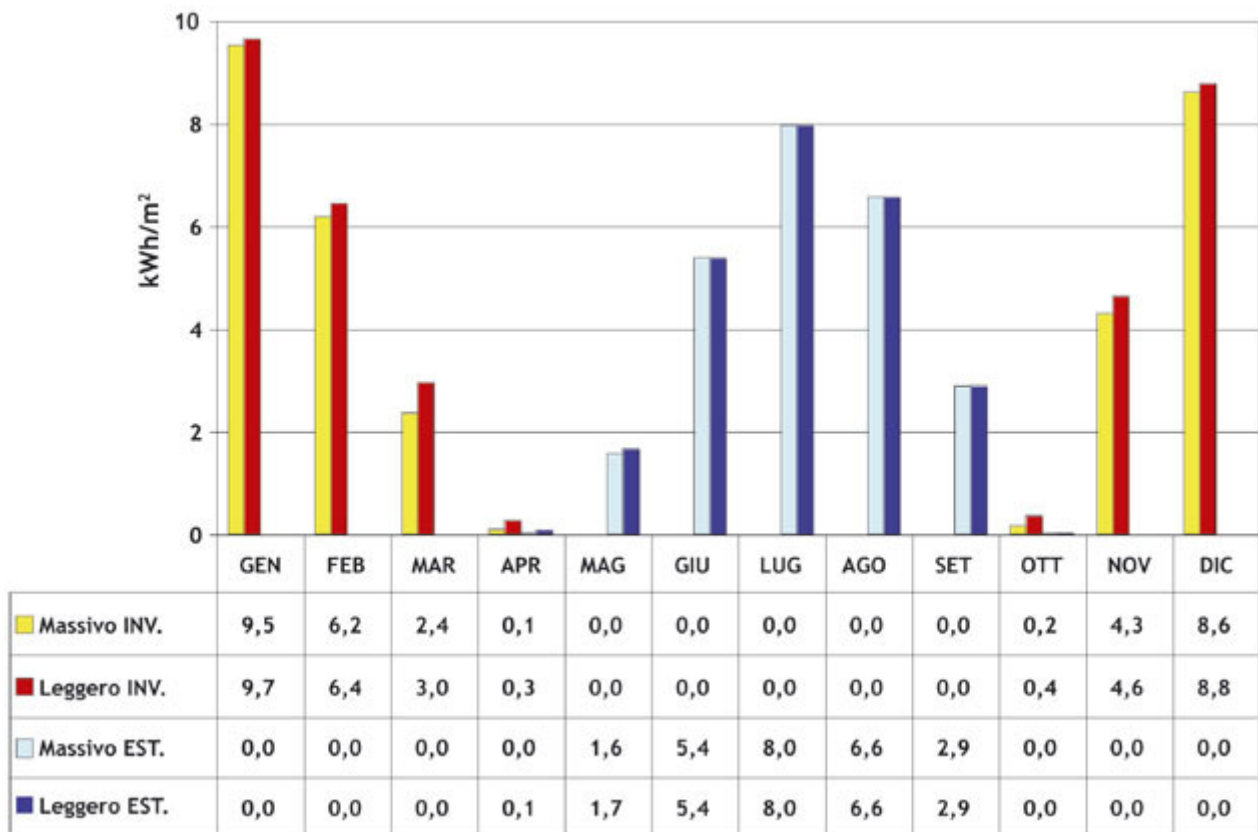


Fig. 2 - Fabbisogno energetico per climatizzazione secondo UNI/TS 11300.

Contrariamente a quanto emerso con le precedenti simulazioni dinamiche, nell'applicazione della procedura semplificata prevista dalla normativa vigente la capacità termica dell'edificio assume un ruolo di scarso rilievo, sia in termini di fabbisogno energetico invernale sia di quello estivo.

La variabilità delle condizioni climatiche: un aspetto determinante

La norma UNI EN 832, riferimento precedente alla citata UNI EN ISO 13790:2008, consente di calcolare la **prestazione energetica invernale** dell'edificio risolvendo una sola equazione di bilancio, in funzione dei dati climatici medi stagionali di temperatura dell'aria e di radiazione solare della località considerata.

La norma, inoltre, contempla la possibilità di considerare l'apporto di radiazione solare incidente sulle superfici opache dell'involucro di entità analoga alla quantità di calore ceduta per irraggiamento verso la volta celeste dall'involucro stesso, dunque di omettere il calcolo di entrambi i contributi nel bilancio dell'edificio.

Un edificio-tipo, analogo a quello descritto precedentemente, è stato sottoposto a valutazione tramite un foglio elettronico impostato secondo tale approccio semplificato e, per confronto, tramite il codice di calcolo dinamico orario DOE-2, allo scopo di verificare quanto possa incidere l'effetto della variazione climatica sul bilancio energetico.

Per apprezzare il solo effetto dato dalla variabilità delle condizioni ambientali esterne, dunque, le condizioni interne (carichi interni e ricambi d'aria) al sistema edilizio simulato con DOE-2 sono state poste costanti e di entità analoghe a quelle definite secondo la procedura semplificata.

Per una maggiore coerenza di confronto tra i due metodi, il file climatico orario utilizzato per la simulazione dinamica è stato generato, avvalendosi di una apposita routine di calcolo⁽⁵⁾, a partire

dai dati climatici medi mensili desunti dalla norma UNI 10349 relativi alla località considerata (Roma).

Ferme restando le medesime caratteristiche di conducibilità termica associate in entrambi i casi ai materiali edilizi costituenti l'edificio [tab. 1], nel modello di simulazione dinamico sono stati ovviamente assegnati i dati di calore specifico e densità.

Tab. 1 - Caratteristiche fisico-termiche delle murature di involucro

Murature perimetrali	Spessore m	Cond. W/mK	Densità kg/m ³	Cal. spec. Wh/kgK
1. Monostrato intonacata (383 kg/m²)				
Intonaco di calce e cemento	0,015	0,930	1800	0,25
Muratura in laterizio	0,380	0,210	878	0,23
Intonaco di calce e gesso	0,015	0,540	1500	0,03
2. Monostrato con cappotto (180 kg/m²)				
Intonaco plastico	0,005	0,700	1000	0,22
Isolante per cappotto	0,040	0,038	80	0,37
Muratura in laterizio	0,170	0,230	878	0,23
Intonaco di calce e gesso	0,015	0,540	1500	0,22
3. Con isolante in intercapedine (202 kg/m²)				
Intonaco di calce e cemento	0,015	0,930	1800	0,22
Muratura in laterizio	0,085	0,230	878	0,23
Isolante	0,040	0,038	80	0,37
Muratura in laterizio	0,085	0,230	787	0,23
Intonaco di calce e gesso	0,015	0,540	1500	0,22
4. Con isolante in intercapedine e faccia a vista (356 kg/m²)				
Laterizio faccia a vista	0,120	0,650	1800	0,23
Isolante	0,040	0,038	80	0,37
Muratura in laterizio	0,130	0,230	878	0,23
Intonaco di calce e gesso	0,015	0,540	1500	0,22
5. Tamponamento "iperleggero" (52 kg/m²)				
Rivestimento fibrocemento	0,013	0,600	1800	0,23
Isolante	0,064	0,038	80	0,37
Cartongesso	0,026	0,210	900	0,3

Il set delle simulazioni effettuate, calcolando il bilancio termico con la procedura semplificata su base stagionale e tramite il codice dinamico su base oraria, ha previsto il confronto di prestazione tra due varianti del medesimo edificio: mantenendo invariate le caratteristiche delle partizioni orizzontali e verticali interne, sono stati considerati un **involucro "massivo" (laterizi pieni intonacati)** e un **involucro "leggero" (sandwich di fibrocemento e cartongesso con interposta lana di roccia)**, entrambi aventi la medesima trasmittanza termica $U = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$.

I due diversi edifici sono stati simulati con procedura dinamica (caso 2) escludendo l'apporto di radiazione solare sulle superfici opache (azzerando i coefficienti di assorbimento della radiazione solare e di emissione nell'infrarosso dei materiali superficiali esterni), ottenendo dunque un modello basato su un approccio del tutto analogo a quello previsto con la procedura semplificata (caso 1).

Successivamente, è stato simulato l'edificio con il codice dinamico senza "forzare" il mancato apporto di radiazione solare sulle superfici opache (caso 3), assegnando ai materiali superficiali esterni i coefficienti di assorbimento della radiazione solare e di emissione nell'infrarosso.

I risultati di fabbisogno termico invernale dei tre casi descritti sono rappresentati nel grafico di fig. 3 a sinistra. Tra le due procedure di calcolo si evidenzia una sostanziale differenza dei risultati.

Inoltre, e in particolare, si evince che la simulazione dinamica diagnostica una **migliore prestazione dell'involucro dotato di maggior capacità termica** (caso 2, differenza di fabbisogno termico rispetto all'involucro "leggero" dell'ordine del 10%), mentre la procedura semplificata (caso 1) non rivela differenze apprezzabili tra le due soluzioni (36,1 kWh/m² e 36,4 kWh/m², rispettivamente).

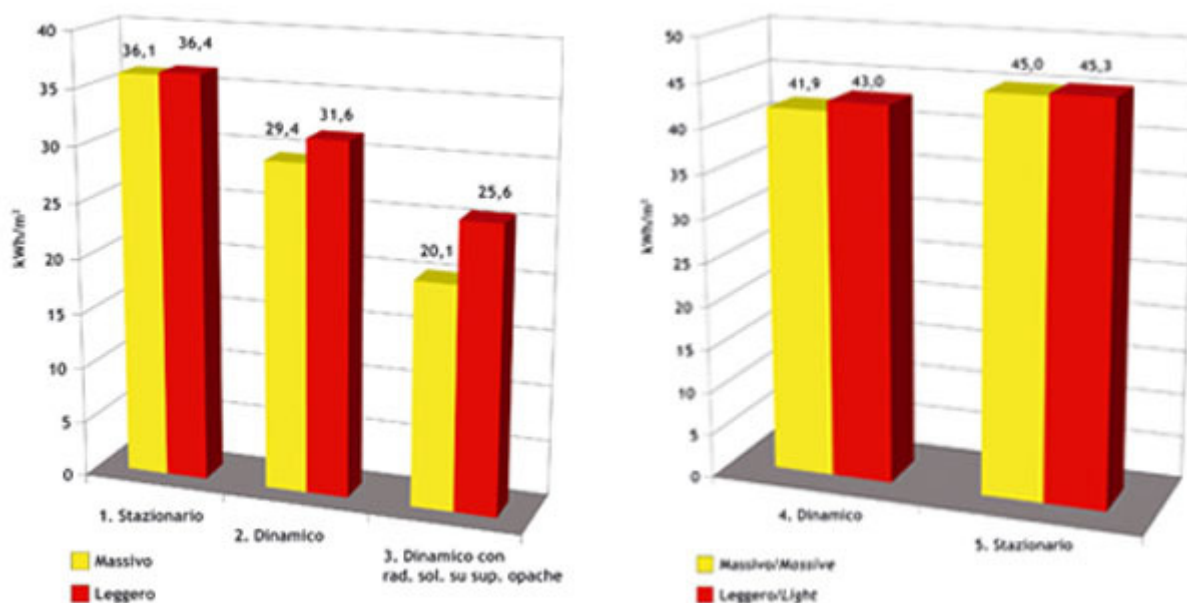


Fig. 3 - A sinistra: confronto fabbisogno energetico stazionario/dinamico al variare dell'apporto solare. A destra: confronto fabbisogno energetico stazionario/dinamico in assenza di apporto solare.

Data l'assenza di apporto solare sulle superfici opache, il **vantaggio dell'involucro "massivo"** è, in questo caso, attribuibile principalmente ai soli effetti di accumulo indiretto (lato interno) dell'apporto di radiazione solare che penetra nell'edificio attraverso le superfici trasparenti e, in

parte, alla migliore prestazione data nei confronti delle oscillazioni di temperatura esterna contemplate dal file climatico orario (effetto buffer).

L'apporto di radiazione solare sull'involucro opaco (caso 3) determina un significativo aumento delle differenze riscontrabili tra le due diverse procedure di calcolo (caso 3 vs. caso 1) e rivela un **ulteriore aumento prestazionale dato dall'involucro dotato di maggior capacità termica** rispetto alla prestazione rilevabile con la soluzione leggera (riduzione del fabbisogno energetico prossimo al 25%).

Per quantificare il contributo della forzante determinata dalle sole oscillazioni di temperatura dell'aria esterna (grafico di fig. 3 a destra), le due versioni d'edificio sono state simulate, con il codice dinamico, escludendo la componente solare sia dalle superfici opache che da quelle trasparenti (caso 4); la medesima condizione, in totale assenza di apporto solare, è stata valutata anche con la procedura semplificata (caso 5).

Rispetto ai risultati precedenti, per entrambe le soluzioni di involucro edilizio il fabbisogno energetico, in assenza di apporto solare, ovviamente aumenta ed il vantaggio, dato dalla soluzione con maggiore capacità termica, si riduce al 2% (42 kWh/m² e 43 kWh/m² di fabbisogno termico per ciascun caso, rispettivamente).

È interessante constatare, inoltre, come i risultati ottenuti in assenza di radiazione solare non si discostino molto tra simulazione dinamica e valutazione stazionaria, a riprova della **significativa rilevanza data dal variare dell'apporto di radiazione solare** diagnosticabile con la procedura dinamica oraria.

Per riassumere, la variazione climatica, in particolar modo relativa all'apporto di radiazione solare, valutata con strumenti sofisticati, non solo riveste un ruolo fondamentale nella determinazione del fabbisogno energetico degli edifici, ma consente di apprezzare i vantaggi dati dalla capacità termica dell'involucro.

Conclusioni

Basandosi sulle semplificazioni procedurali consentite dagli approcci normativi, alcuni fondamentali aspetti della reale prestazione termica dell'edificio, apprezzabili analiticamente solo tramite le più complesse modalità di calcolo in regime dinamico, rischiano di assumere un ruolo impropriamente secondario.

Se, da un lato, i modelli di simulazione più sofisticati presentano il vantaggio di poter "inserire" con maggiore dettaglio la descrizione dell'edificio, dei suoi impianti e delle sue modalità gestionali, dall'altro lato, pur trascurando i dettagli impiantistici e gestionali, limitandosi dunque ad una mole di dati di input praticamente analoga a quella necessaria alla risoluzione delle procedure semplificate, con i codici di calcolo dinamici si possono ottenere risultati prestazionali significativamente diversi da quanto rilevabile applicando le norme semplificate.

In particolare, la valutazione effettuata secondo normativa rivela una scarsa sensibilità nell'apprezzare l'importanza della forzante climatica e gli effetti della capacità termica dell'involucro edilizio: tali aspetti possono rivelare differenze energetico-prestazionali sostanziali, soprattutto in riferimento alle condizioni climatiche caratteristiche del territorio nazionale.

Note

1. Il bilancio energetico dell'edificio viene valutato, in pratica, facendo riferimento alle sole proprietà isolanti dell'involucro e computando gli effetti della capacità termica dei soli materiali che interagiscono con il volume d'aria interno all'edificio stesso tramite il parametro dinamico definito "fattore di utilizzazione").
2. Versione DOE-2.1E-119.
3. Il file climatico orario utilizzato in questa analisi è il Test Reference Year di Roma città.
4. È da porre in evidenza che in questo caso il vantaggio termico rilevato durante il periodo estivo risulta contenuto poiché i ricambi d'aria adottati per le simulazioni sono stati considerati costanti e pari a quelli invernali (0,3 vol/h, secondo norma nazionale), assai ridotti rispetto a quanto di prassi si verifica in fase di gestione durante il periodo estivo.
5. Utility del software Meteonorm, <http://www.meteotest.com>

Riferimenti bibliografici

- Simulation Research Group of Lawrence Berkeley Laboratory, "DOE-2 manuals", U.S. Department of Energy, University of California, 1994.
- R.H. Henninger, M.J.Witte, Energy-Plus Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard, 140-2004 (prepared for: U.S. Department of Energy Energy Efficiency and Renewable Energy Office of Building Technologies Washington, D.C.), 2007, www.energyplus.gov.
- S. Ferrari, Building envelope and heat capacity: re-discovering the thermal mass for winter energy saving, Atti 2nd PALENC & 28th AIVC Conferences, 2007, Crete Island, Greece.
- S. Ferrari, M. Baldinazzo, Valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici: dalle norme semplificate all'analisi dinamica, Atti Convegno AICARR, "Certificazione energetica: normative e modelli di calcolo per il sistema edificio-impianto posti a confronto", Bologna 16/10 - Torino 25/11/2008, Napoli 16/01/2009.

Si ringraziano il Prof.A. Campioli, il Dott. R. S. Adhikari (Dip.to BEST - Politecnico di Milano).

Autore: Simone Ferrari - Politecnico di Milano