



Ricerca di Sistema elettrico

“Redesign di edifici a energia netta zero e caratterizzazione degli edifici scolastici nella Regione Sicilia”

M. Cellura, M. Beccali, F. Guarino, V. Lo Brano

REDESIGN DI EDIFICI A ENERGIA NETTA ZERO E CARATTERIZZAZIONE DEGLI EDIFICI SCOLASTICI NELLA REGIONE SICILIA

M. Beccali, M. Cellura F. Guarino, V. Lo Brano, A. Orioli (Università di Palermo. DEIM)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

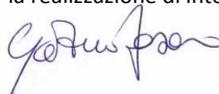
Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Razionalizzazione e Risparmio nell'uso dell'energia elettrica

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

Obiettivo: Applicabilità di tecnologie innovative e modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica

Responsabile del Progetto: arch. Gaetano Fasano, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione Redesign di edifici a energia netta zero e caratterizzazione degli edifici scolastici nella Regione Sicilia"

Responsabile scientifico ENEA: Gaetano Fasano

Responsabile scientifico Università di Palermo Maurizio Cellura

I dati relativi alla Leaf House sono stati gentilmente forniti dal gruppo Loccioni. Si ringrazia in particolare l'ing. Nardi Cesarini per la disponibilità mostrata durante l'acquisizione dei dati.

I dati relativi al Comune di Palermo sono stati gentilmente forniti dal Servizio Ambiente ed Ecologia del Comune. Si ringrazia in particolare l'ing. Mazzon per la disponibilità mostrata durante l'acquisizione dei dati.

Indice

SOMMARIO	PAG.4
PARTE A	PAG.6
1 INTRODUZIONE	PAG.6
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITA' SVOLTE E DEI RISULTATI	PAG.8
2.1 INDIVIDUAZIONE DEL GAP TRA L'EDIFICIO REALE E IL TARGET DI NZEB ATTRAVERSO LA VALUTAZIONE DEL BILANCIO DI ENERGIA PRIMARIA ANNUALE, MENSILE E GIORNALIERO DELL'EDIFICIO INDAGATO	PAG.8
2.2 REDESIGN DELL'EDIFICIO REALE UTILIZZANDO SOLUZIONI IMPIANTISTICHE E DI INVOLUCRO PER RAGGIUNGERE IL TARGET DI NZEB.....	PAG.15
2.3 ANALISI DELL'EMBODIED ENERGY DELL'INTERO EDIFICIO.....	PAG.19
2.4 STIMA DEI COSTI DI REDESIGN.....	PAG.25
3 CONCLUSIONI.....	PAG.26
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	PAG.27
PARTE B	PAG.28
1 INTRODUZIONE.....	PAG.28
2 CONSISTENZA ED EPOCA DI COSTRUZIONE.....	PAG.29
3 TIPOLOGIE COSTRUTTIVE DEGLI EDIFICI: CARATTERISTICHE TERMOFISICHE E GEOMETRICHE.....	PAG. 36
3.1 CARATTERIZZAZIONE TERMOFISICA DEGLI EDIFICI SCOLASTICI SICILIANI	PAG.36
3.1.1 Caratterizzazione termofisica di edifici scolastici in tre differenti periodi storici per la città di Palermo.....	PAG.36
3.2 CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA DEGLI EDIFICI SCOLASTICI SICILIANI.....	PAG. 41
3.2.1 Numero di piani totali degli edifici.....	PAG.43
3.2.2 Numero di piani fuori terra degli edifici.....	PAG.45
3.2.3 Altezza di interpiano degli edifici.....	PAG.49
3.2.4 Volume degli edifici.....	PAG.54
4 STATO DEL PATRIMONIO SCOLASTICO SICILIANO.....	PAG.63
4.1 TIPOLOGIE DI STRUTTURE VERTICALI E ORIZZONTALI.....	PAG.63
4.2 STATO DELLE STRUTTURE SCOLASTICHE.....	PAG.70
4.3 CRITICITA' EMERGENTI SULL'EDILIZIA SCOLASTICA.....	PAG.72
4.4 FONTI ENERGETICHE UTILIZZATE.....	PAG.74
5 CONCLUSIONI.....	PAG.75
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	PAG.77
CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO IMPEGNATO NELL'ATTIVITA'	PAG.77

Sommario

Il presente rapporto finale descrive gli studi svolti in seno all'accordo di collaborazione tra ENEA e Dipartimento dell'energia, ingegneria dell'informazione e metodi matematici (DEIM) dell'Università di Palermo) rivolto allo sviluppo di una ricerca dal titolo "Redesign di edifici a energia netta zero e caratterizzazione degli edifici scolastici nella regione Sicilia". Tale report è suddiviso in due parti: la prima relativa all'analisi degli edifici ad energia netta zero con un particolare approfondimento sul caso-studio investigato, la Leaf House; la seconda è relativa all'analisi dei dati statistici disponibili in letteratura sul patrimonio edilizio scolastico siciliano.

Nella prima sezione, è stata completata l'analisi dell'edificio investigato. In particolare è stato predisposto un completo redesign dell'edificio ipotizzando anche la sostituzione di alcuni elementi di involucro. Ciò ha consentito di verificare se l'edificio prescelto conseguiva il target di NZEB in accordo ai criteri e alle metriche definito all'IEA Task 40 / ECB Annex 52 "Towards net zero energy solar buildings".

Sono stati redatti accurati bilanci di energia primaria dell'edificio su base annuale, mensile e giornaliera, per valutare se l'edificio conseguiva il target di NZEB, è stato progettato un completo redesign, e si è valutata l'incidenza dell'energia incorporata sulle prestazioni energetiche dell'edificio. Una prima evidenza dello studio connessa alla valutazione dell'energia incorporata può essere sintetizzata nel fatto che, per edifici caratterizzati da elevate prestazioni energetiche, fasi del ciclo di vita diverse dalla fase d'uso possono essere non trascurabili nel caso di edifici NZEB.

In dettaglio, l'attività di approfondimento sull'edificio oggetto di studio è stata svolta nell'ambito dei diversi filoni di ricerca di seguito elencati:

1. Individuazione del gap tra l'edificio reale e il target di NZEB attraverso la valutazione dei bilanci annuali, mensili e giornalieri di energia convertita in primaria dell'edificio indagato,
2. Redesign completo dell'edificio reale utilizzando soluzioni impiantistiche e di involucro per raggiungere il target di NZEB,
3. Analisi dell'energia incorporata dell'intero edificio,
4. Stima dei costi di redesign.

Tramite la verifica dei bilanci suddetti è stato possibile stimare la differenza tra energia (convertita in primaria) generata e consumata nel corso del periodo di analisi. Si è rilevato altresì l'importanza di utilizzare la conversione in energia primaria rispetto alla definizione in termini di bilanci di energia finale.

Il lavoro di redesign dell'edificio campione, iniziato nelle annualità precedenti, è stato molto dettagliato, ipotizzando un ampio range di soluzioni possibili, quali la modifica di componenti di impianto, il compendio di ipotesi di gestione dell'impianto e la modifica dei componenti di involucro, nell'ottica dello sviluppo di modelli utili alla riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente

E' stata infine fornita una stima dei costi relativi agli interventi di redesign proposti.

Nella seconda parte del rapporto sono descritte la consistenza e l'epoca di costruzione degli edifici scolastici a livello regionale e provinciale. Sono altresì descritte le caratteristiche termofisiche e strutturali tipiche degli elementi di involucro degli edifici scolastici siciliani di ogni ordine di studio (nido, materna, media e superiore) e le tipologie edilizie presenti su tutto il territorio regionale.

Le analisi statistiche riguardano le principali caratteristiche tipologiche, termofisiche e metriche desunte dai dati ottenuti nella fase di indagine, cioè:

- 1 consistenza;
- 2 tipologia;
- 3 stato.

Sono altresì commentati i dati statistici riguardanti gli edifici in muratura e in calcestruzzo armato (c.a.) ed è effettuata un'analisi più dettagliata in riferimento al livello di risoluzione dei dati, disaggregandoli per grado di istruzione, per ambiti territoriali e anno di costruzione.

Nel report sono illustrati, per ognuna delle categorie analizzate e relativamente ai diversi ambiti territoriali e tipologici definiti, i dati raccolti. Tutti i dati riportati provengono essenzialmente da dati bibliografici e limitatamente alla provincia di Agrigento da dati di campo.

Il presente rapporto di ricerca è stato sviluppato nel più generale contesto del progetto "Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico", di cui l'accordo di collaborazione tra ENEA e DEIM costituisce parte integrante. L'analisi del caso studio di un NZEB italiano, sviluppata tramite la creazione di modelli dinamici, dimostra che l'oramai prossima realizzazione di nuovi edifici ad energia netta zero necessita di un forte processo di integrazione tra "tool" progettuali attualmente impiegati con scarsa interazione tra di loro. Un NZEB è infatti un "oggetto" complesso la cui progettazione va affrontata con un approccio interdisciplinare e con lo sviluppo di piattaforme informatiche di integrazione di modelli già esistenti che, singolarmente, non sono in grado di rispondere efficacemente alle nuove necessità progettuali indotte dalla realizzazione di edifici nei quali i consumi energetici dovranno essere equivalenti alla produzione.

Per quanto riguarda la seconda parte dello studio, seppur con riferimento a dati in larga parte statistici, si è evidenziato il rilevante potenziale di risparmio energetico connesso a potenziali interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico scolastico.

PARTE A

1 Introduzione

Gli obiettivi generali dell'attività si collocano nell'ambito dell'individuazione di metodi e sistemi per la progettazione di sistemi edificio-impianto ad energia netta zero (o quasi zero), anche nell'ottica della direttiva europea sull'efficienza energetica degli edifici e degli obiettivi di risparmio energetico e limitazione delle emissioni di gas serra.

La Strategia per la Produzione e il Consumo Sostenibili (SPC) e la Direttiva 2009/125/CE dell'Unione Europea hanno come obiettivo principale la riduzione degli impatti ambientali di prodotti e servizi lungo l'intero ciclo di vita, al fine di orientare il mercato verso soluzioni più sostenibili, migliorare la competitività delle imprese e incoraggiare la domanda e l'offerta di prodotti e servizi più ecologici.

La crescita economica ha infatti determinato un significativo incremento dei consumi energetici e delle emissioni climalteranti connessi al ciclo di vita dell'energia. Occorre dunque, come evidenziato nel Libro Verde "Una strategia europea per un'energia sostenibile, competitiva e sicura" e nelle direttive 2006/32/CE e 2009/28/CE, avviare delle politiche finalizzate a conseguire una produzione e un consumo di energia più efficienti e promuovere lo sviluppo e l'utilizzo di tecnologie alimentate da fonti energetiche rinnovabili, contribuendo alla decarbonizzazione della crescita economica.

La riduzione del fabbisogno energetico e la mitigazione degli impatti ambientali causati dal settore edilizio tramite misure volte all'aumento dell'efficienza energetica dei sistemi edificio-impianto e alla diffusione di tecnologie basate su fonti energetiche rinnovabili sono temi ricorrenti e centrali nelle politiche energetiche di un numero crescente di paesi nel mondo. In questo contesto l'idea di Edificio ad energia netta zero (NZEB) ha ottenuto particolare attenzione dal mondo scientifico e politico ed è oggetto di studio e approfondimento in seno alla Task 40 dell'Agenzia Internazionale dell'Energia - SHC task 40/ECBCS Annex 52 "Towards net zero energy solar buildings". L'importanza del concetto di NZEB è sottolineata dalla direttiva EU sulle prestazioni energetiche degli edifici [1]: essa stabilisce che, a partire dal 31 Dicembre 2018, gli edifici pubblici di nuova costruzione – e dal 1 Gennaio 2021 tutti gli edifici- dovranno essere ad energia netta quasi zero. Con il decreto legge 4 Giugno 2013, n. 63 lo Stato Italiano ha recepito la Direttiva 2010/31/UE del 19 Maggio 2010.

La definizione più accreditata coinvolge bilanci di energia finale (per vettore energetico) e di energia convertita in primaria: un edificio NZEB è un sistema tecnologico in grado di garantire soddisfacenti livelli di comfort agli occupanti ma capace di generare nella fase d'uso energia pari a quella effettivamente consumata.

Tra le definizioni di edificio ad energia netta zero scaturite dai lavori della task 40 è tuttavia presente anche un approccio che suggerisce di tenere in considerazione l'interezza del ciclo di vita dell'edificio, tramite una stima dell'energia incorporata nei materiali di involucro e negli impianti.

L'energia incorporata di un generico prodotto è definita come la somma dell'energia, convertita convenzionalmente in energia primaria, necessaria nella fase di produzione e di dismissione del suo ciclo di vita. Questo concetto può essere applicato anche al prodotto "edificio" [2-3] sommando ai tradizionali consumi in fase d'uso anche quelli delle altre fasi del ciclo di vita. Con la diffusione del concetto di Edificio ad energia netta zero (Net zero energy building – NZEB), l'idea di energia incorporata negli edifici sta ottenendo un'attenzione più ampia nell'ottica del raggiungimento del target di energia netta zero anche in termini di ciclo di vita. Gli studi di letteratura dell'ultimo decennio hanno sottolineato quanto l'importanza della quantificazione dell'energia incorporata sia rilevante per i NZEB: sebbene l'energia consumata netta in fase d'uso sia nulla, l'energia incorporata è generalmente maggiore rispetto ad un edificio medio.

L'approccio generalmente condiviso dalla maggioranza degli studi di letteratura sui NZEB, è quello di considerare solamente l'energia della fase d'uso, a causa dell'incidenza maggiore di consumi in questa fase nel ciclo di vita di un edificio standard (70- 90%). Per questa ragione, l'energia incorporata nei materiali costituenti l'involucro e i componenti di sistema è stata generalmente trascurata nelle analisi energetiche degli edifici e nella maggior parte di regolamenti e direttive.

Gli edifici NZEB o “nearly” NZEB sono caratterizzati, come già ricordato in precedenza, da un bilancio di energia convertita in primaria prossimo allo zero e da ciò emerge l'importanza della quantificazione dell'energia incorporata nei materiali di involucro e negli impianti in edifici di questo tipo, allo scopo di valutare se l'edificio risulti effettivamente Net Zero Energy nell'interezza del proprio ciclo di vita. E' altresì di pari importanza lo sviluppo di modelli termofisici dettagliati, volti allo studio e alla previsione dell'incidenza di interventi di riqualificazione energetica sul patrimonio edilizio esistente. E' fondamentale infatti poter quantificare la riduzione dei consumi energetici della fase d'uso connessa all'aumento di energia incorporata previsto dagli interventi di retrofit.

Di seguito, si presenteranno gli approfondimenti svolti sul caso-studio “Leaf House” (LH), in accordo al piano annuale del 2012 dell'Accordo di Programma MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico e nel contesto della convenzione tra il DEIM (Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Metodi Matematici) dell'Università di Palermo e l'ENEA.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Individuazione del gap tra l'edificio reale e il target di NZEB attraverso la valutazione del bilancio di energia primaria annuale, mensile e giornaliero dell'edificio indagato

Una definizione generale di edificio ad energia netta zero condivisa tra gli esperti del settore considera un Net ZEB come un sistema che, garantendo gli standard di comfort indoor per gli occupanti, genera tanta energia quanta effettivamente ne consuma nel corso di un certo periodo di tempo oggetto di studio (generalmente un anno). Sebbene semplice e di immediata comprensione, questa definizione non prende in considerazione alcuni fattori come le metriche utilizzate nei bilanci, considerazioni di "load-match" e stime della quota di energia auto-consumata in sito. E' possibile utilizzare un'ampia gamma di metriche (e.g. Exergia, costo, crediti ambientali) ma, sempre più di frequente nella comunità scientifica internazionale, i bilanci suddetti sono calcolati in termini sia di energia finale che convenzionalmente di energia convertita in primaria. L'applicazione della prima metrica non può però considerare il differente livello qualitativo dell'energia. Un bilancio di energia finale considererà infatti solamente gli usi finali, ed in tal modo gli aspetti relativi alla differente qualità dell'energia e all'efficienza dei processi di conversione effettuati non sono considerati.

L'equazione 1 esprime un bilancio di energia finale netta zero:

$$\sum_j g_j - \sum_j c_j = G - C = 0 \quad (1)$$

Dove g e c rappresentano rispettivamente la generazione e il carico, j gli energy carriers considerati per generazione e carico.

Nel bilancio di energia primaria l'energia finale deve essere convertita nel valore di energia primaria corrispondente attraverso fattori di conversione convenzionalmente definiti. L'equazione 2 mostra un bilancio di energia primaria:

$$\sum_j g_j \times p_{g,j} - \sum_j c_j \times p_{c,j} = G - C = 0 \quad (2)$$

Dove g e c rappresentano rispettivamente la generazione e il carico, p_j sono i fattori di conversione, j gli energy carriers considerati per generazione e carico. I fattori di conversione in energia primaria possono essere assegnati secondo modalità differenti e in accordo alla risoluzione temporale, alla disponibilità dei dati e alla precisione finale desiderata. Generalmente è possibile differenziare i fattori di conversione da utilizzare nei bilanci di energia primaria: fattori costanti, semi dinamici (stagionali) e dinamici (orari). Il problema degli approcci dettagliati è la corretta quantificazione, utilizzando time-step molto bassi, dell'energia che è generata e consumata on-site e di tutti i flussi di energia verso l'interno e l'esterno dei confini del sistema.

Nel caso della Leaf House (fig.1), il sistema di monitoraggio consente l'analisi di flussi di energia interagenti con il sistema con dettaglio orario e per più anni di rilevamento.



Fig. 1 La Leaf House

Dall'analisi dettagliata dei dati si è stimata ogni quota di energia generata e consumata in sito e ogni quota oraria di energia esportata e importata in/dalla rete.

Per il caso studio Leaf House si sono considerati i due vettori energetici energia elettrica e gas: nel primo caso l'energy carrier è prodotto in sito dal sistema fotovoltaico, importato dalla rete nelle ore in cui la generazione risulta inferiore ai consumi e esportato nelle ore in cui la generazione risulta superiore ai consumi; nel secondo caso la quota di energia ottenuta dall'energy carrier gas è pari a meno di 2000 kWh in un anno.

Da un'analisi relativa al solo vettore elettricità e relativa all'energia finale, la LH risulta essere un nearly net zero energy building: nella fase d'uso infatti, l'energia generata è prossima a quella consumata, come è verificabile in figura 2 e 3 e in tabella 1.

Risultati dei bilanci annuali [kWh]	
Energia elettrica generata	24665
Energia elettrica consumata	-25573
Energia elettrica importata dalla rete	-17212
Energia elettrica esportata in rete	16303
Bilancio carico-generazione	-908
Bilancio import-export	-908

Tabella 1 – Bilanci di energia elettrica

I termini load-generation (carico-generazione) e import-export si riferiscono ai confini del bilancio: nel primo caso si considera l'interezza della produzione di energia e la si confronta all'intero consumo, nel secondo si entra nel dettaglio della quota di energia prodotta ed auto-consumata in sito e si considerano

nel bilancio le quantità di energia esportate ed importate nel sistema. In ogni caso, i due bilanci sono matematicamente coerenti tra di loro, visto che differiscono della quota di energia auto-consumata.

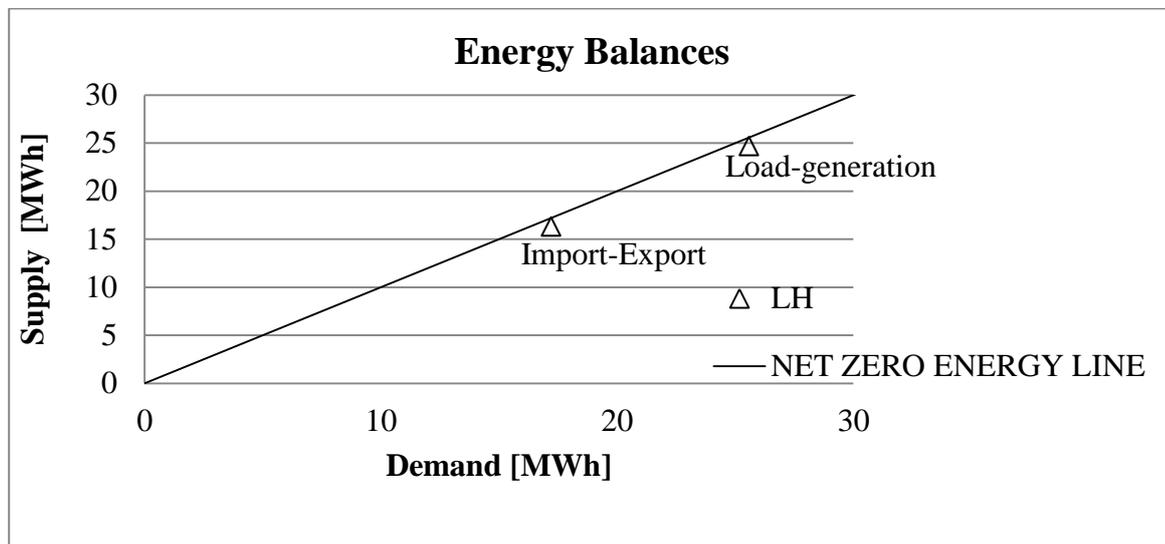


Figura 2 – Bilanci di energia finale

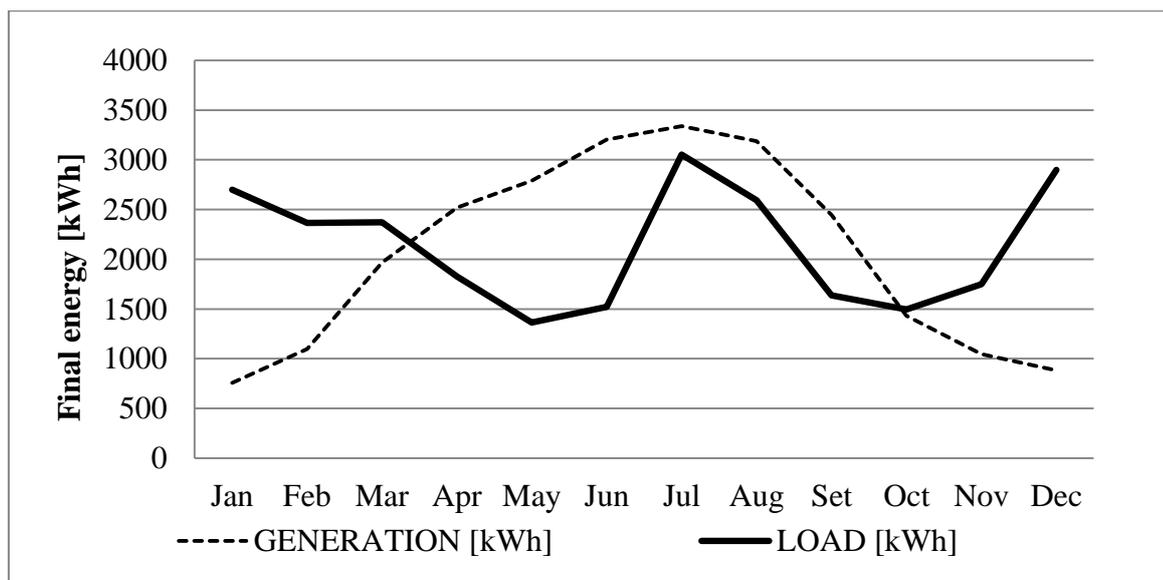


Figura 3 – Andamenti di generazione e carico (energia finale) a livello mensile

Il deficit annuale del bilancio di energia finale relativo al caso studio Leaf House è pari a 0.9 MWh/anno, come descritto in tabella 1.

In figura 4 si riporta altresì il risultato del bilancio di energia finale su base mensile: rilevante appare il deficit nei mesi invernali in cui la bassa radiazione solare garantisce bassi livelli di generazione e l'alto carico termico invernale necessita di maggiori consumi da parte della pompa di calore.

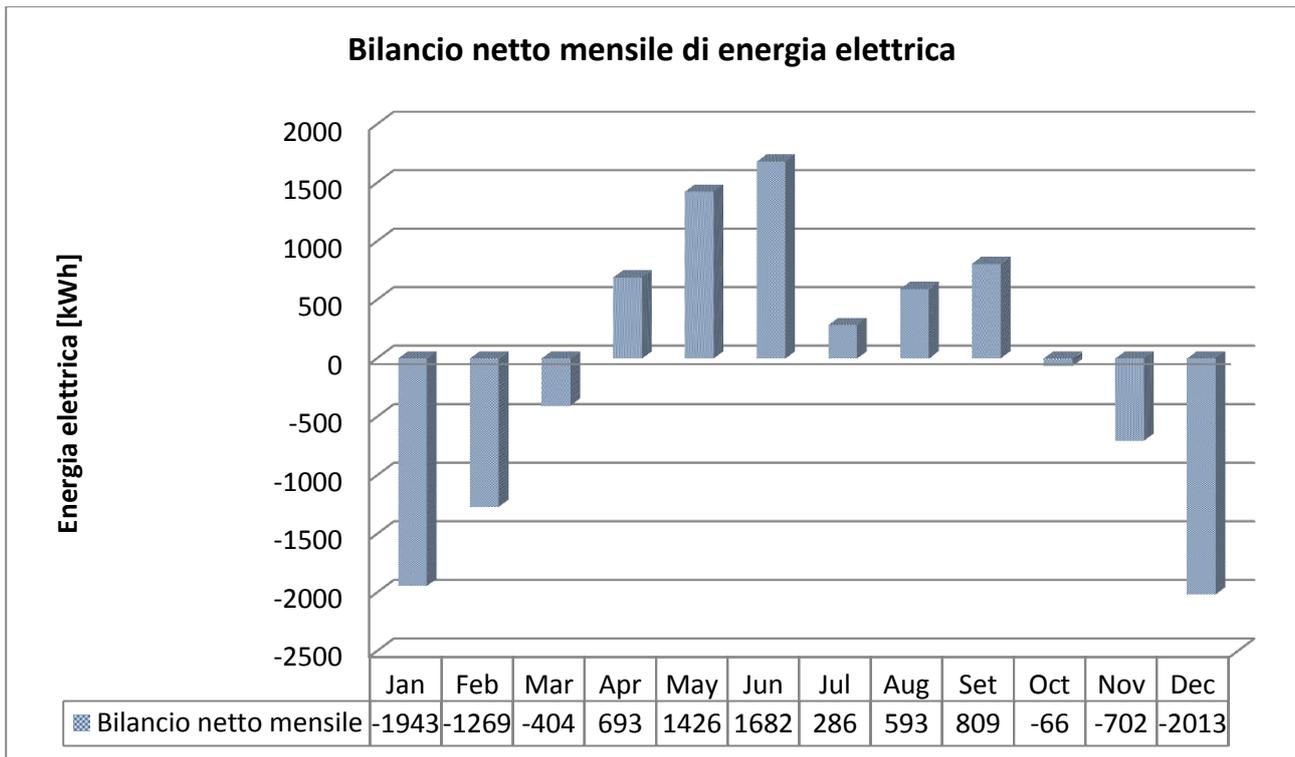


Fig. 4 Bilanci netti mensili di energia finale

La situazione è differente nel caso in cui l'energia finale venga convertita in energia primaria e si tenga conto di tutti gli "energy carriers" utilizzati nel sistema.

Utilizzando come fattore di conversione per l'energia elettrica generata da fotovoltaico 1.07, per il gas naturale 1.2 [4-5] e 2.17 per l'energia elettrica importata dalla rete, i bilanci di energia precedenti sono stati ricalcolati nel dettaglio.

Le figure 5 e 6 sono esemplificative di andamenti e bilanci di energia tipici per il periodo invernale ed estivo. Se nella figura 5 generalmente la generazione di energia convertita in primaria è sempre inferiore lungo tutto il corso dell'anno al carico energetico richiesto, durante l'estate (figura 4) nelle ore di massima radiazione solare la generazione riesce ad essere superiore al carico.

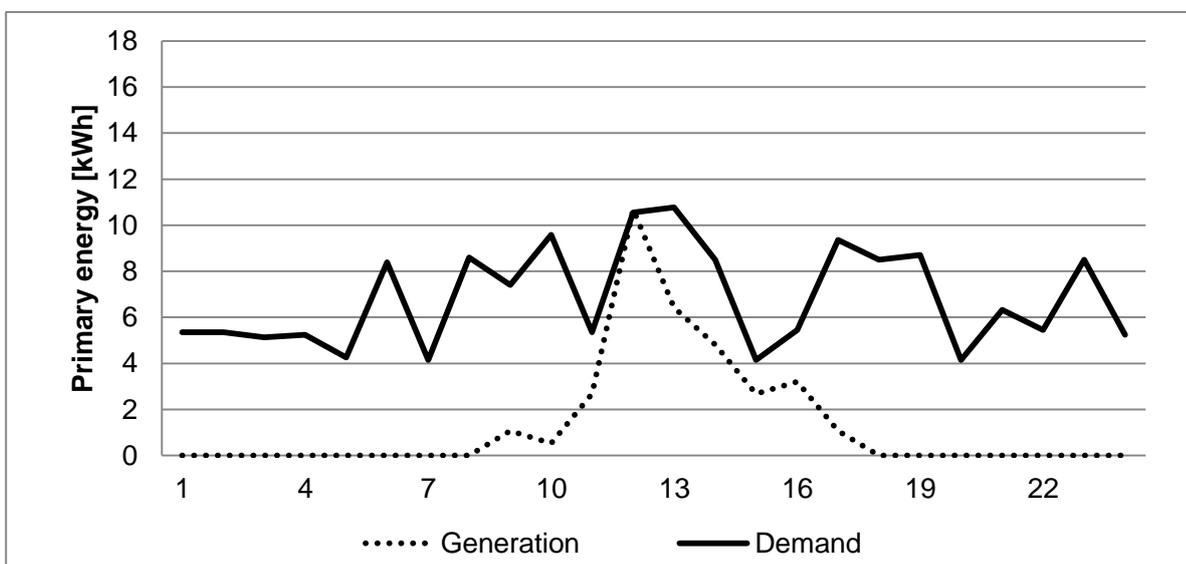


Figura 5 Andamento di generazione e carico di energia convertita in primaria per un giorno-tipo invernale

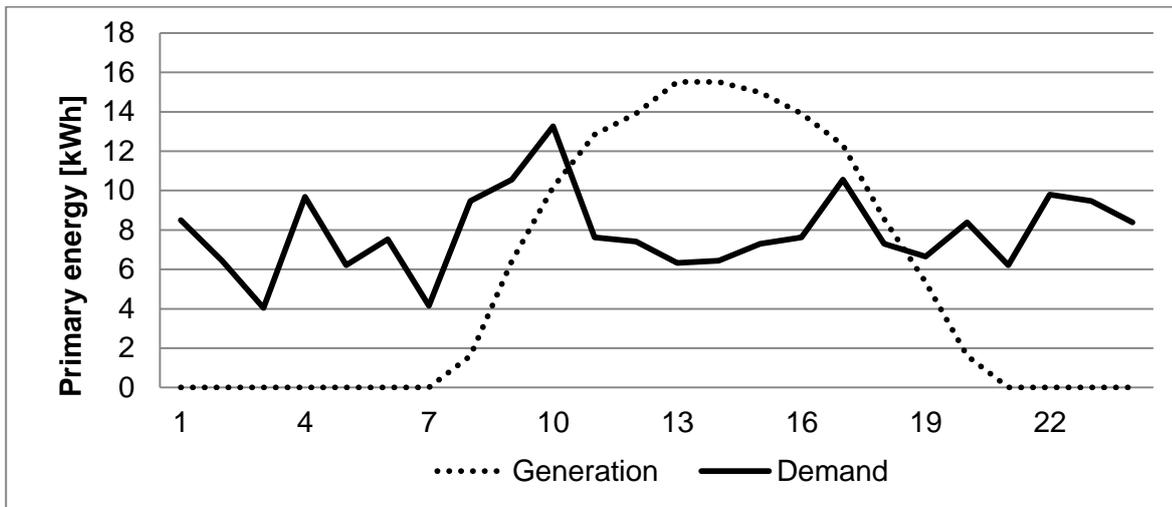


Figura 6 Andamento di generazione e carico di energia convertita in primaria per un giorno-tipo estivo

In ogni caso, tuttavia, la generazione totale di energia primaria (132 kWh primari) per il giorno tipo estivo rappresentato in figura 5 è inferiore al carico totale giornaliero (189 kWh primari).

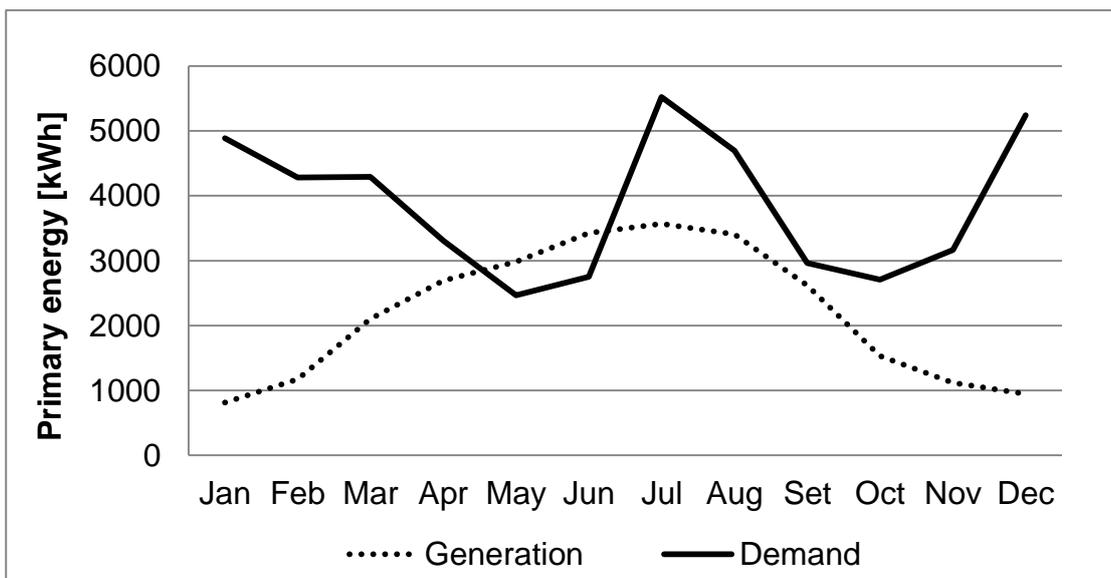


Figura 7 – Bilancio Carico-Generazione calcolato con energia primaria e valutato su base mensile

Come è desumibile dalla figura 7 infatti, ad eccezione di alcuni mesi a carico termico minore (primavera e autunno) e diversamente dalla figura 3 in cui si descrive un bilancio di energia finale, il bilancio di energia convertita in primaria è quasi sempre deficitario (fig.7) anche su base mensile.

Questo trend è molto dipendente dalle caratteristiche dei sistemi di generazione in termini di profili di generazione orari, di natura degli stessi (fattori di conversione in energia primaria) e conseguentemente dalla quota di energia consumata proveniente dalla rete elettrica. Come conseguenza dell'equazione (2), più è alta la quota di import energetico dalla rete più la domanda di energia primaria crescerà, anche se la quota di energia finale complessivamente consumata rimarrà invariata.

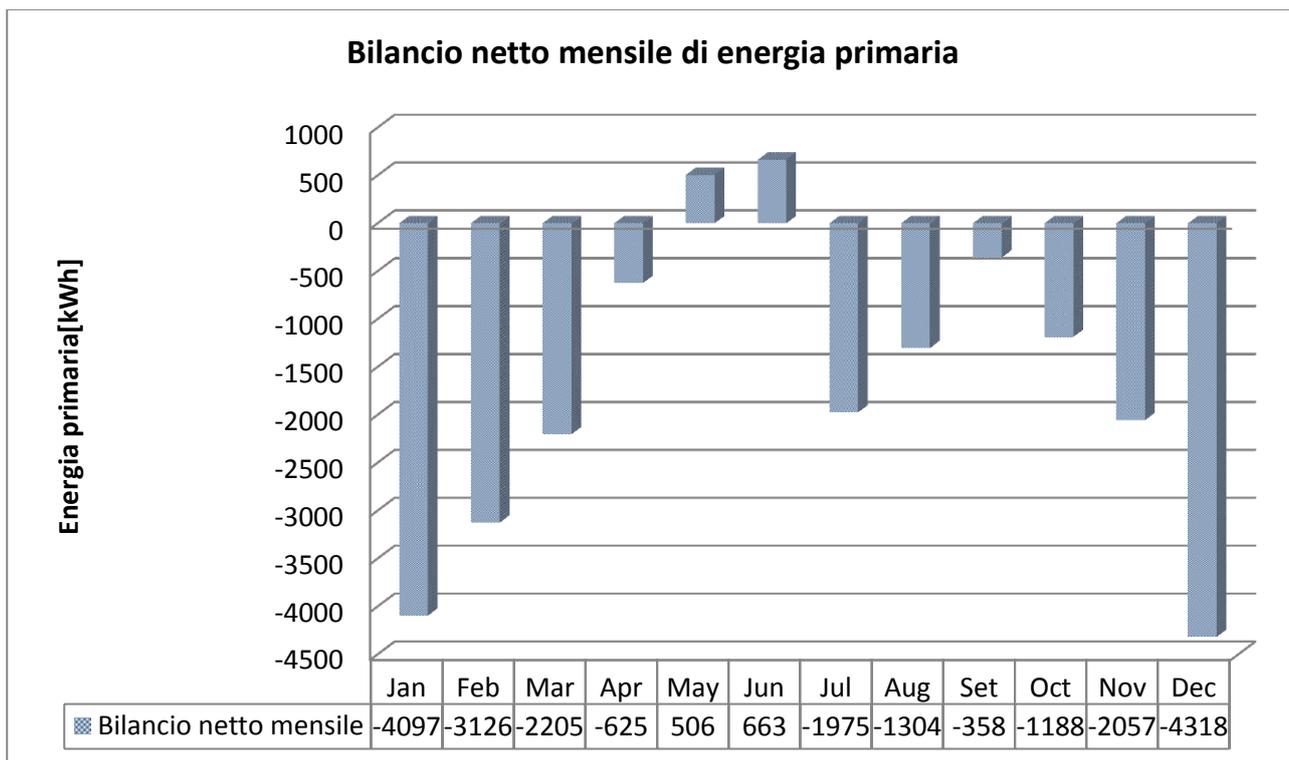


Fig.8 – Bilancio netto mensile di energia primaria

Un confronto tra la figura 7 e la 3 mostra con chiarezza come a modeste variazioni nella curva di generazione (fattore di conversione prossimo a 1) corrisponde uno spostamento più marcato della curva di domanda verso l'alto, causato dalla grande incidenza che ha l'import di energia dalla rete elettrica (fattore di conversione maggiore di 2).

Su base annuale il deficit complessivo in termini di energia primaria si attesta su circa 32 MWh. Similmente alla fig.4, la fig.8 riporta i bilanci netti mensili espressi in termini di energia primaria.

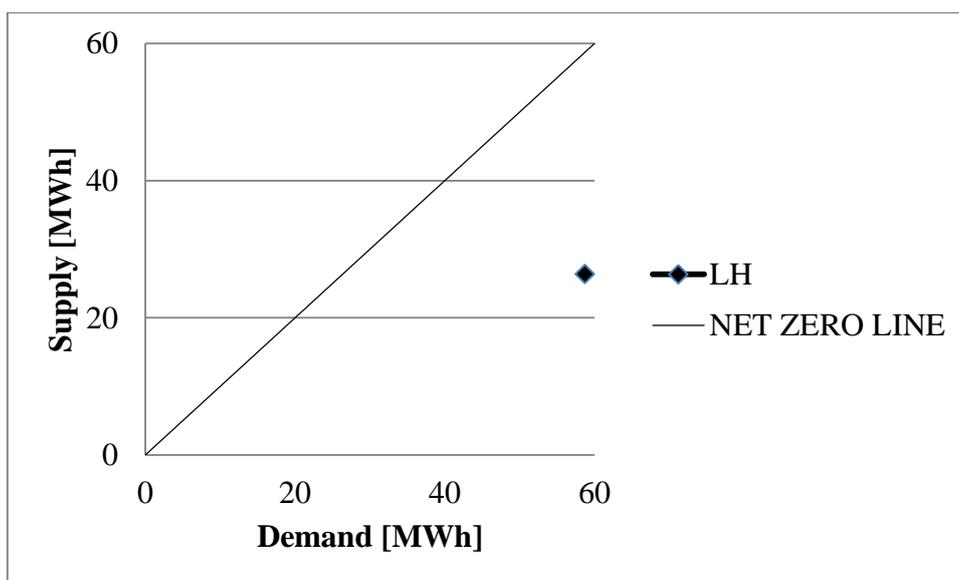


Figura 9 Bilancio di energia primaria per l'edificio esistente

Il deficit energetico cambia significativamente effettuando il calcolo in termini di energia primaria o finale. Nella figura 9 è infatti evidente come l'edificio in oggetto sia lontano dall'intersezione con la retta relativa agli edifici ad energia netta zero primari, visto che il carico (demand) risulta più che doppio rispetto alla generazione (supply).

E' fondamentale dunque la scelta della definizione di edificio ad energia netta zero di riferimento: un edificio NZEB in termini di energia finale non sarà necessariamente un NZEB in termini di energia primaria, anzi, nel caso della LH, a causa delle forti asimmetrie tra fattori di conversione, non sarà mai un "nearly NZEB primary", a meno che non si riesca a minimizzare la quota di import dalla rete.

2.2 Redesign dell'edificio reale utilizzando soluzioni impiantistiche e di involucro per raggiungere il target di NZEB

La costruzione di nuovi edifici e di relative infrastrutture, le attività estrattive, gli stabilimenti per la lavorazione e trasformazione dei materiali e lo smaltimento dei rifiuti, consumano sempre più nuove porzioni di territorio e maggiori quantità di energia. Tuttavia la maggior parte dei consumi energetici attribuibili all'edilizia viene impiegata per il riscaldamento e il condizionamento degli ambienti. Il motivo per cui questi consumi sono così elevati è spesso legato alle mediocri prestazioni energetiche degli edifici (basso livello di isolamento termico, impianti con ridotta efficienza e talvolta obsoleti, assenza di corrette pratiche di "gestione energetica" degli edifici, materiali con basse prestazioni energetiche ed ambientali).

Alcuni dati testimoniano inequivocabilmente quanto sopra affermato. A livello europeo il 42% dei consumi finali di energia e il 50% dei consumi di materie prime sono attribuibili al settore delle costruzioni, responsabile inoltre di circa il 35% delle emissioni di gas serra e di circa il 50% della produzione di rifiuti.

Tali impatti sono attribuibili principalmente al comparto residenziale (che rappresenta circa il 46% del patrimonio edilizio complessivo), ed in misura minore al settore non residenziale (31%) ed all'ingegneria civile (23%) .

Uno scenario simile è riscontrabile anche nei paesi del Mediterraneo (Europa, Africa, Asia). Nei paesi mediterranei, mediamente il settore edilizio ha inciso per circa il 38% del consumo finale di energia nel 2007, variando tra il 21 e il 50% . Si tratta di un settore che presenta un elevato potenziale di intervento sia sul fronte della domanda (efficienza energetica e risparmio energetico) sia dell'offerta (incremento dell'uso di tecnologie alimentate da energia rinnovabile).

In questo contesto è fondamentale operare sul settore edilizio già esistente tramite interventi estesi di riqualificazione ottimizzandone le prestazioni energetiche al fine di minimizzarne i consumi energetici negli edifici: il presente filone di ricerca sviluppa uno studio dettagliato e completo di redesign dell'edificio campione allo scopo di proporre ed individuare possibili nuove soluzioni tecnico-architettoniche, impiantistiche e gestionali del sistema edificio-impianto indagato.

In accordo a quanto già descritto nel corso delle precedenti annualità, il redesign dell'edificio Leaf House [6-7] è stato completato a partire dai modelli creati in ambiente TRNSYS negli ultimi anni. Sono compendiate modifiche impiantistiche, modifiche di involucro e ipotesi relative a una gestione più oculata dell'impianto termico.

Si riporteranno nel seguito tutte le opzioni di redesign proposte singolarmente nelle ultime due annualità, si integreranno con le ulteriori nuove opzioni ipotizzate (in corsivo) e se ne combineranno gli effetti in una simulazione completa di redesign, compendiando tutti gli scenari ipotizzati. Le opzioni di redesign ipotizzate sono:

- 1) Sostituzione dei pannelli del sistema PV con pannelli caratterizzati da migliore efficienza di conversione;
- 2) Sostituzione della pompa di calore geotermica con un modello più efficiente;
- 3) Eliminazione dello scambiatore della pompa di calore e conseguente connessione diretta della tubazione principale con il fluido riscaldato/raffreddato;
- 4) Modifica dei componenti del tetto per garantire un isolamento maggiore (U inferiore, circa $0,15W/(m^2K)$);
- 5) Modifica del volume del "tank" valutandone gli effetti sui consumi della pompa di calore;
- 6) *Integrazione di profili di gestione volti al risparmio energetico: modifica della temperatura di setpoint dell'impianto termico durante la notte nel corso del periodo di riscaldamento da 21° a 19° ;*
- 7) *Utilizzo di schermature solari mobili sulle finestre esposte a sud nel corso delle ore estive più calde.*

I risultati delle simulazioni sono schematizzati nel seguito:

- 1) Nell'ipotesi di sostituire i pannelli fotovoltaici l'energia elettrica generata in sito sarebbe pari a circa 38 MWh: questa soluzione garantirebbe una copertura completa del fabbisogno elettrico dell'edificio;
- 2) Il valore di COP di progetto della pompa di calore era pari a 4.6, ma i dati monitorati hanno mostrato dei risultati inferiori. Se effettivamente il COP fosse pari mediamente a 4.6 si potrebbe risparmiare un quantitativo di energia elettrica pari a 1.4 MWh;
- 3) L'eliminazione dello scambiatore connesso alla pompa di calore riduce la complessità del sistema termico. Un sistema meno complesso potrebbe garantire un risparmio di 2300 kWh elettrici;
- 4) Anche se il livello di isolamento e la qualità termofisica dell'involucro sono superiori agli standard di riferimento italiani, è stata effettuata una simulazione aggiungendo 0,01 m di lana di roccia nel tetto ($U = 0,15 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$). Il risparmio ottenibile in termini di energia elettrica è pari a 200 kWh;
- 5) Un tank di accumulo di volume 1.2 m^3 potrebbe garantire circa 100 kWh elettrici di risparmio;
- 6) È stato modellizzato nel dettaglio un sistema di controllo per le temperature indoor: un controller PID (proportional, integral, derivative) controlla l'apertura di valvole deviatrici e miscelatrici per ogni singola zona termica (simulando l'edificio reale) garantendo afflusso di acqua calda\fredda nei pavimenti radianti in funzione della differenza tra temperatura dell'aria indoor e temperatura di setpoint. In questo modo è stato possibile studiare l'influenza sui consumi finali della scelta di un profilo di temperature di setpoint variabile nel corso della stagione di riscaldamento. Utilizzando come setpoint 19°C tra le 00:00 e le 06:00 si potrebbe evitare il consumo di 550 kWh;
- 7) L'utilizzo di schermature solari sulle finestre orientate a sud potrebbe garantire un risparmio di circa 100 kWh.

Solamente lo scenario 1 garantirebbe il raggiungimento del target di Net ZEB in termini di energia finale e tutte le altre opzioni descrivono ulteriori quote di diminuzione della domanda di energia. La combinazione di tutte le opzioni di redesign ipotizzate garantirebbe un risparmio totale prossimo ai 3 MWh per anno. In un'ottica Net ZEB, come mostrato in fig.10, la LH riuscirebbe a raggiungere un livello netto di "Positive energy building", producendo nel corso di un anno più energia di quanta ne consumi. Il punto relativo allo scenario di redesign è infatti alla sinistra della retta inclinata a 45° , rappresentativa dei punti con uguali consumi e generazione.

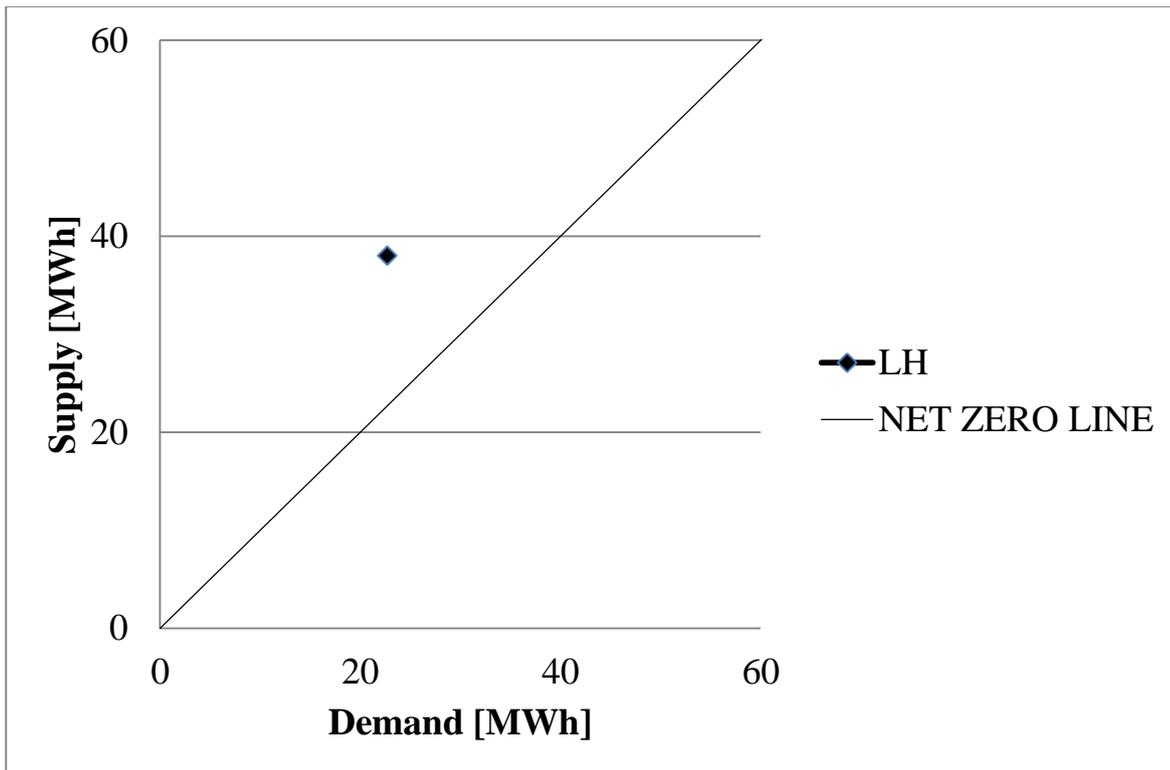


Fig. 10 Redesign dell'edificio, grafico carico generazione, energia finale

L'andamento dei consumi di energia elettrica per la pompa di calore è riportato in fig.11.

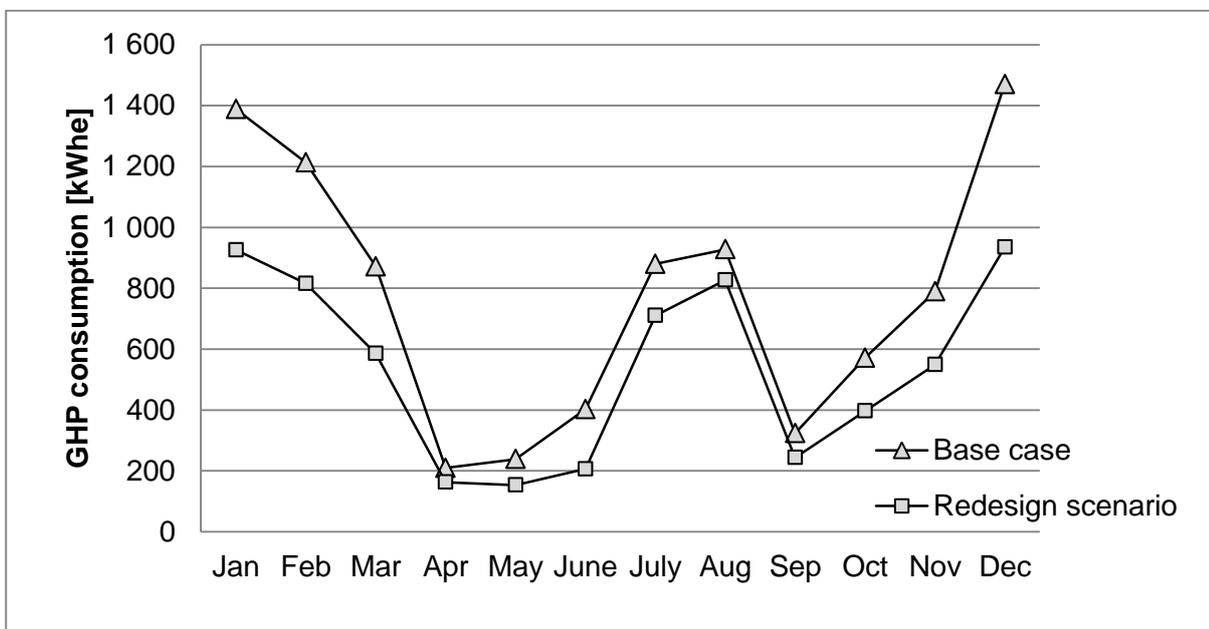


Fig.11 Andamento dei consumi di energia elettrica della pompa di calore (Caso base – Scenario di Redesign)

E' possibile quindi raggiungere il target di Net Zero Energy Building in termini di energia finale con le opzioni di redesign proposte.

La situazione è differente in termini di energia primaria, in relazione alle considerazioni formulate nel paragrafo 1. L'energia consumata convertita in primaria risulta ancora superiore alla generazione (fig.12), sebbene in misura decisamente inferiore (Circa 13 MWh primari) rispetto a quanto riportato in figura 9.

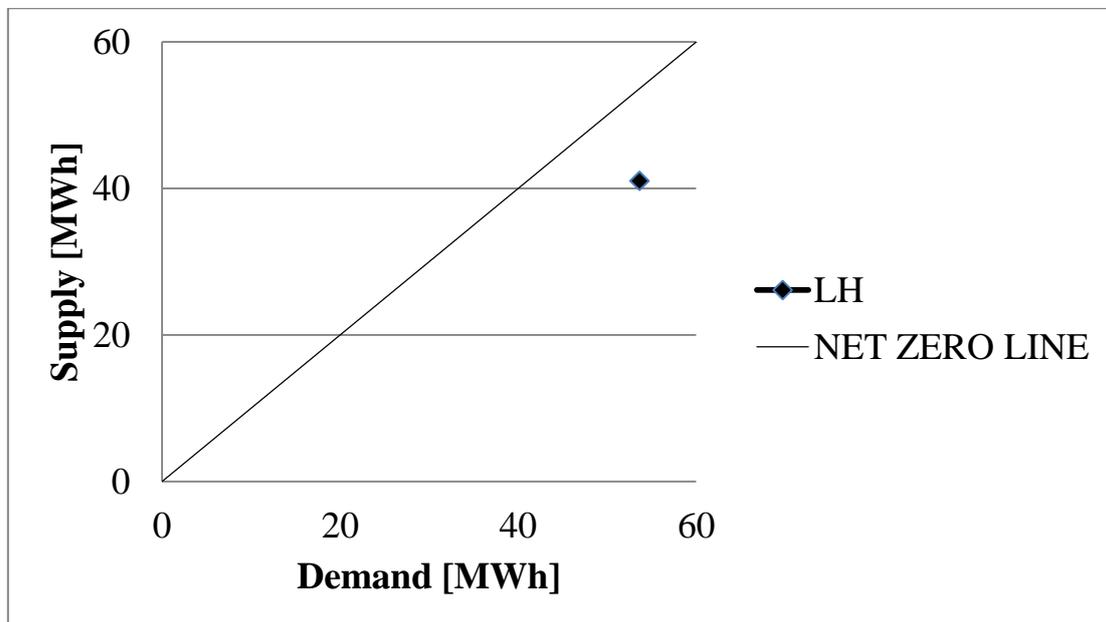


Fig. 12 Redesign dell'edificio, grafico carico generazione, energia convertita in primaria

2.3 Analisi dell'embodied energy dell'intero edificio

Per "embodied energy" o energia incorporata di un materiale si intende l'energia complessivamente impiegata nel ciclo di vita del prodotto stesso, convertita in energia primaria.

Con l'obiettivo di sintetizzare i molteplici casi che si possono presentare, ecco di seguito un elenco non esaustivo:

1. "Embodied energy" calcolata con un approccio "da risorsa a rifiuto" (from cradle to grave). Essa include l'energia utilizzata per estrarre le materie prime (inclusi i combustibili), per la produzione e l'assemblaggio del prodotto, per il trasporto, per la produzione dei "capital equipment", per la climatizzazione e l'illuminazione dell'industria in cui il prodotto viene realizzato, per la manutenzione e per lo smaltimento finale.
2. "Embodied energy" calcolata con un approccio "dalla culla al cancello" (from cradle to gate). Essa include tutta l'energia consumata fino a che il prodotto giunge al processo industriale in cui viene realizzato.
3. "Embodied energy" calcolata "dalla culla al sito" (from cradle to site). Essa include l'energia consumata fino a che il prodotto giunge presso l'utilizzatore finale (Beccali et al., 2003).

Va segnalata inoltre l'energia di feedstock che rappresenta una porzione potenzialmente recuperabile con un opportuno smaltimento del prodotto a fine vita, ad esempio la termovalorizzazione. Talvolta alcuni materiali presentano una elevata "embodied energy" ed una inesistente energia di "feedstock", come ad esempio il vetro.

L'energia incorporata negli edifici è ampiamente influenzata da molti fattori, la cui importanza non è sempre distinguibile con semplicità. E' possibile tuttavia effettuare alcune considerazioni generali sull'entità delle stime e sulle implicazioni delle modifiche proposte alle equazioni di bilancio Net ZEB.

Le tradizionali pratiche costruttive evidenziano il ruolo che il clima da sempre svolge sul design ottimale dell'involucro edilizio. Edifici costruiti in climi freddi generalmente utilizzano pareti sottili ma molto ben isolate, nell'Europa del sud l'inerzia termica è fondamentale nell'attenuare e sfasare i carichi termici, nei climi tropicali la ventilazione naturale è un aspetto fondamentale del design, ecc.. Da ciò discende che i valori di energia incorporata negli edifici variano generalmente con il sito geografico, il clima e con le abitudini costruttive locali. In accordo ad una selezione di studi di letteratura [8-14], è stato possibile selezionare alcuni casi-studio che rappresentano i trend di variazione delle categorie riportate in figura 1. Ciò che emerge immediatamente è che gli edifici costruiti in zone a clima freddo (F) mostrano generalmente valori più bassi di energia incorporata specifica (kWh/m^2) se confrontati con quelli più massivi localizzati in climi più caldi (C).

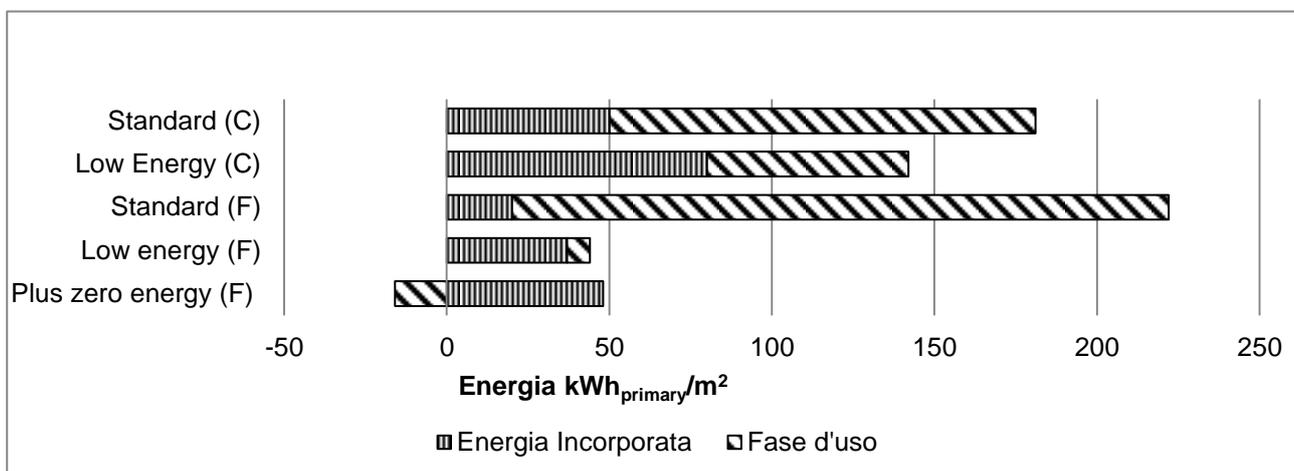


Figura 13: Energia incorporata e di fase d'uso per edifici differenti localizzati in differenti zone climatiche

Dalla figura 13 si riscontra quanto già affermato in precedenza in riferimento alle differenze tra edifici convenzionali ed edifici 'low-energy': l'incidenza della fase d'uso diminuisce, mentre i valori di energia incorporata aumentano. L'esempio di 'Plus Zero Energy Building' riportato in figura 13 – ovvero un edificio che produce più energia di quella consumata- mostra infatti consumi di energia in fase d'uso negativi, a causa della generazione superiore ai consumi.

Nell'ambito del presente filone di ricerca sono state valutate le prestazioni energetiche dell'edificio "low-energy" indagato [2-3], attraverso l'applicazione della metodologia Life Cycle Assessment (LCA), in accordo agli standard delle norme ISO 14040 [15]. Nel corso dell'analisi sono stati considerati due scenari differenti:

- Scenario 0, ovvero l'edificio realmente esistente,
- Scenario 1, o di re-design, ovvero l'edificio modificato in accordo alle ipotesi descritte nel paragrafo 2.2.

In dettaglio gli obiettivi dell'analisi sono:

- Confrontare le prestazioni energetiche dell'edificio nello scenario di redesign con l'edificio esistente,
- Stimare la variazione di "embodied energy" tra i due scenari.

E' stata svolta una Life Cycle Impact Assessment (LCIA), utilizzando gli indicatori indicati nello schema EPD. Il consumo di energia nel ciclo di vita dell'edificio è calcolato in termini di energia primaria, attraverso dei fattori di conversione.

Il modello LCA esamina e considera tutte le perdite relative ai processi di estrazione delle risorse, della loro trasformazione e distribuzione e richiede la stima dei consumi di energia elettrica e combustibili fossili, in accordo ai differenti usi finali (Riscaldamento, ACS etc.).

Per stimare i consumi di energia primaria è stato utilizzato il metodo "Cumulative Energy Demand" (CED).

L'unità funzionale dello studio LCA è l'intero edificio in entrambi gli scenari. Con riferimento ai confini di sistema, la quantificazione delle prestazioni energetiche di entrambi gli scenari copre processi "up-stream" e "down-stream", necessari a garantire le funzionalità dell'edificio. Il periodo di riferimento dello studio e la vita utile dell'edificio sono assunti pari a 70 anni. Si considerano altresì i seguenti step del ciclo di vita dell'edificio:

- Produzione dell'edificio, che include i processi di produzione di tutti i componenti dell'edificio e la fase di costruzione, analizzando nel dettaglio l'acquisizione delle materie prime e la fornitura delle risorse,
- Fase d'uso, che copre tutti i processi che si verificano durante l'utilizzo dell'edificio (e.g. riscaldamento, raffrescamento, fornitura d'acqua),
- Sostituzione di materiali e componenti. Sebbene si consideri una vita utile dell'edificio pari a 70 anni, alcuni componenti dalla vita utile più breve saranno soggetti a sostituzione (Tab.2). In dettaglio, la produzione e il processo di installazione dei componenti sostituiti sono stati considerate nell'analisi. Il conferimento in discarica e il riciclo dei componenti rimossi nella fase di fine vita sono state considerate nello step successivo,
- Fine-vita dell'edificio che include tutti i processi, dalla demolizione al conferimento in discarica all'eventuale riciclo,
- Trasporti, che comprende tutte le fasi di trasporto che si verificano durante l'intero ciclo di vita dell'edificio: dal trasporto dei materiali e componenti dalla produzione al sito di costruzione, fino al trasporto dei rifiuti ai centri di riciclo, stoccaggio o in discarica.

Sistemi, component di impianto ed elementi di involucro	Vita utile (anni)
Finestre	35
Tetti e pavimenti	35
Mura	15
Sistemi solari	25
Sistema ACS	50
Pavimento radiante	40
Sistema di distribuzione del gas	35
Pompa di calore	25
Caldia ausiliaria	35
Tubazioni unità trattamento aria	50
Unità di trattamento aria	25

Tabella 2 – Vita utile dei componenti soggetti a sostituzione

Tutti gli impatti derivanti da produzione, trasporto, installazione, uso dell'edificio e sostituzioni sono allocati interamente sull'edificio.

L'analisi di inventario è stata effettuata al fine di quantificare gli input e gli output più rilevanti per i sistemi analizzati, tramite bilanci di massa ed energia valutati per l'unità funzionale. A tal fine, dati specifici ricavati per il sistema oggetto di studio sono stati integrati con dati di letteratura. In dettaglio, i dati relativi all'edificio esistente provengono dal Gruppo Loccioni e da produttori di materiali e componenti d'impianto. I dati sull'implementazione delle opzioni di retrofit sono forniti da produttori del settore. I dati d'inventario sulla fornitura di energia (elettricità e combustibili fossili) e sui trasporti derivano da (Frischknecht et al. 2007). Il modello di analisi di inventario è stato sviluppato grazie all'utilizzo del software SimaPro (Prè-Product Ecology Consultants 2010). Il consumo di combustibile e le emissioni in aria dai trasporti sono calcolati a partire dalla tipologia di trasporto e dalla distanza percorsa.

I consumi di energia per riscaldamento e raffrescamento, ventilazione, generazione di ACS, illuminamento indoor e utilizzo di elettrodomestici sono stimati a partire dai dati monitorati, la natura degli interventi di redesign e i relativi dati su consumi di energia sono invece calcolati tramite simulazioni termofisiche in regime dinamico, descritte nel paragrafo 2.2.

Si riportano di seguito i principali risultati dell'analisi.

La figura 14 riporta l'incidenza dell'"embodied energy" nello scenario iniziale (Baseline) e nello scenario 1 (Redesign), per la fase di costruzione.

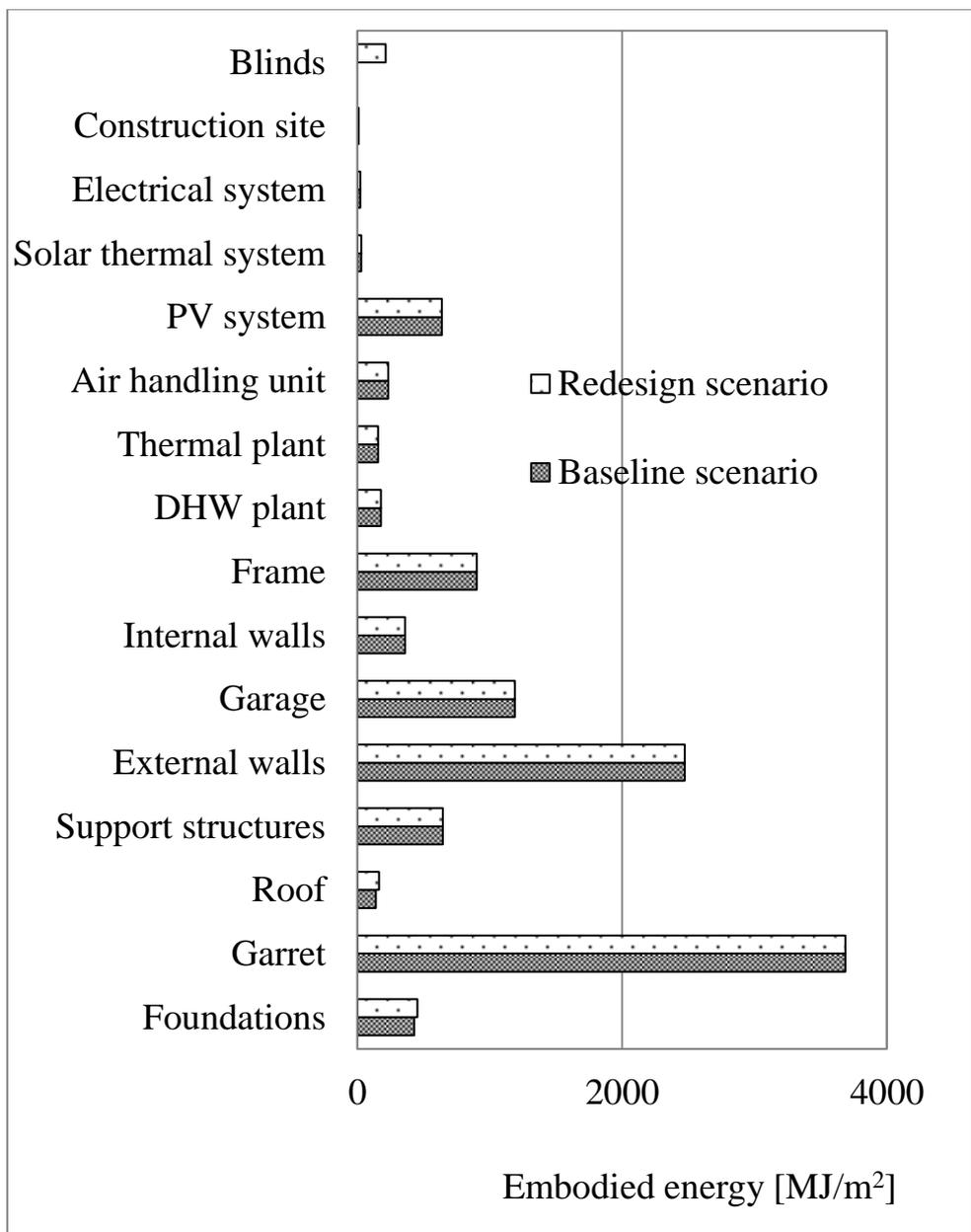


Fig. 14 “Embodied energy” dell’edificio, fase di produzione

L’indicatore specifico riportato è calcolato come MJ equivalenti per metro quadrato di superficie orizzontale.

Dall’analisi di fig.14 risulta evidente come l’”embodied energy” dei componenti di involucro e dell’impianto termico mostri differenze trascurabili tra il primo e il secondo scenario. Risultati simili sono stati riscontrati per le altre fasi del ciclo di vita.

Evidentemente queste conclusioni non sono estendibili alla fase d’uso del sistema: la modifica del sistema PV e le opzioni di redesign modificano ampiamente i risultati relativi allo scenario zero in fase d’uso.

La fase di produzione (come descritto in fig.15) rappresenta lo step più impattante in termini di consumi di energia dell’intero ciclo di vita dell’edificio. In dettaglio, la fase di produzione e di sostituzione dei componenti sono le più impattanti dal punto di vista del CED in entrambi gli scenari: nello scenario zero infatti raggiungono rispettivamente il 55% e il 45% del CED totale calcolato sull’intero ciclo di vita. Nello scenario di redesign invece, la fase di produzione e di sostituzione aumentano lievemente in termini relativi

(1 e 4% rispettivamente) mentre la fase di fine vita registra un decremento di circa il 15% a causa di un aumento della quota dei materiali riciclabili.

Il valore di CED per la fase d'uso invece ha un impatto minimo per lo scenario zero, in cui incide solamente per l'8% sul CED totale. Ciò è coerente con la definizione di nearly Net Zero Energy Building e con i dati di letteratura riportati in fig.13.

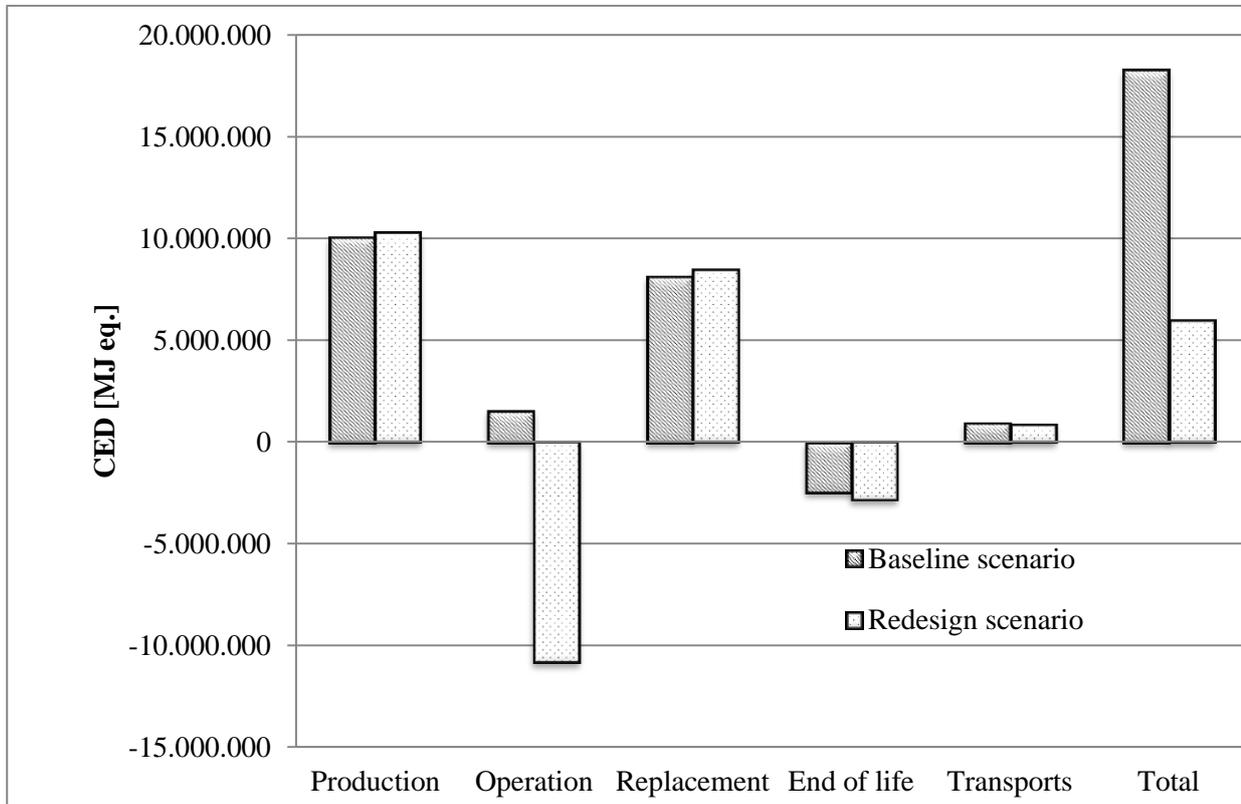


Fig.15 – Consumi di energia primaria per fase del ciclo di vita dell'edificio

Nel caso dello scenario di redesign, invece, a causa del surplus di elettricità generato dal sistema PV, la fase d'uso riporta dei valori negativi di CED. Si tratta di un risparmio di circa 10,800 GJ, che garantirebbe una riduzione di circa il 60% del CED totale come è possibile desumere dalla figura 15.

Un ulteriore step nell'analisi tuttavia è legato alla connessione tra il concetto di NZEB e quello di "embodied energy": un Net ZEB infatti, in accordo alle definizioni, è tale solamente raggiungendo un pareggio nel bilancio di energia della fase d'uso. Le ottime prestazioni energetiche in fase d'uso hanno comunque reso paragonabili i consumi in fase d'uso ai consumi delle altre fasi. La comunità scientifica ha evidenziato la suddetta comparabilità e ha sottolineato l'importanza di introdurre l'energia incorporata nel bilancio Net ZEB delle fasi di edificio diverse dall'uso: si propone a questo riguardo un ulteriore passaggio nel calcolo del bilancio aggiungendo un termine negativo, connesso all'energia incorporata nel sistema. L'equazione 3 sintetizza quanto sopra affermato.

$$G - C - EI_a = 0 \quad (3)$$

In particolare, EI_a è l'energia incorporata annualizzata del sistema in esame.

Un edificio che soddisfi questo bilancio sarebbe quindi in grado di comportarsi come un produttore netto di energia durante la fase d'uso, riuscendo a coprire il gap iniziale nel bilancio energetico causato dal consumo di energia incorporato nei materiali dell'involucro e negli impianti.

Il termine EI_a può essere descritto più in dettaglio, come suggerito nell'equazione 4:

$$EI_a = EI_{i,a} + EI_{r,a} + ED_a \quad (4)$$

Dove:

- $EI_{i,a}$ rappresenta l'energia incorporata annualizzata iniziale nell'edificio.
- $EI_{r,a}$ è l'energia incorporata annualizzata relativa a manutenzione e sostituzione dei componenti.
- ED_a è l'energia di demolizione annualizzata.

L'energia incorporata iniziale è calcolata come il contenuto energetico, convertito in energia primaria, dei materiali costituenti l'involucro, i componenti dell'edificio e tutte le installazioni tecniche, includendo tutti gli step del ciclo di vita, dall'acquisizione di materie prime ai processi di costruzione.

Il consumo di energia dovuto al trasporto dall'industria di costruzione al sito di assemblaggio/costruzione dovrebbe essere inoltre incluso in questo termine.

Il termine $EI_{r,a}$ rappresenta il consumo di energia convertita in primaria relativo ad operazioni di manutenzione o sostituzione dei componenti dell'edificio e delle installazioni tecniche.

L'energia di demolizione annualizzata ED comprende tutti i processi che si verificano nella fase di fine-vita dell'edificio. E' stimabile tramite scenari di conferimento in discarica e di riciclo dei materiali di scarto, in dipendenza inoltre della distanza dalla discarica-sito di riciclo. L'ED dovrebbe inoltre includere la fase di fine-vita dei componenti sostituiti e il trasporto dei materiali di scarto agli impianti di riciclo o di stoccaggio.

Per la Leaf House, il risultato del calcolo di ogni elemento riportato in eq.4 è riportato in fig.16 .

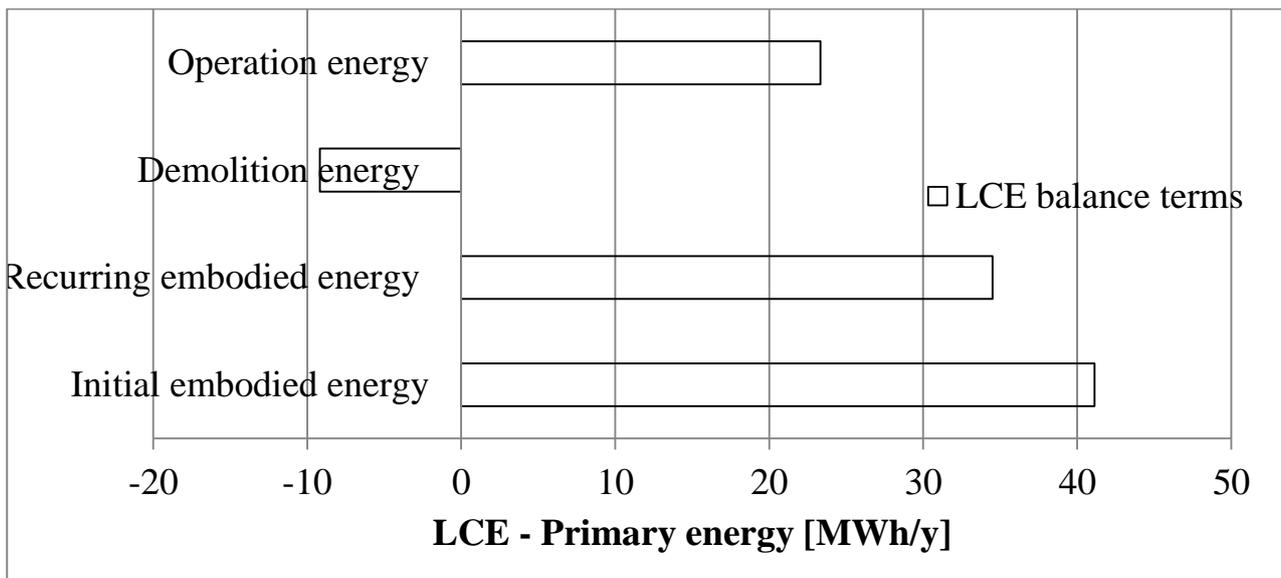


Fig.16 "Embodied energy" per fase del ciclo di vita e confronto con la fase d'uso (operation), scenario 0

2.4 Stima dei costi di redesign

Si riporta di seguito nella tabella 3 una stima di massima dei costi economici da affrontare per implementare le modifiche descritte nel paragrafo 2.2.

Ipotesi di redesign		Materiali (Euro)	Manodopera (Euro)
PV	1	20.000	1.400
PdC	2	8.000	700
Scambiatore	3	0	700
Tetto	4	1.350	1.000
Serbatoio	5	2.000	0
PID	6	0	100
Schermature	7	2.400	400

Tab.3 Costi del redesign

In figura 18 invece, si mostra il rapporto tra il risparmio (o l'aumento di generazione nel caso 1) di energia ottenuto tramite l'opzione di redesign ipotizzata (1-7) e il costo ipotizzato in tabella 3.

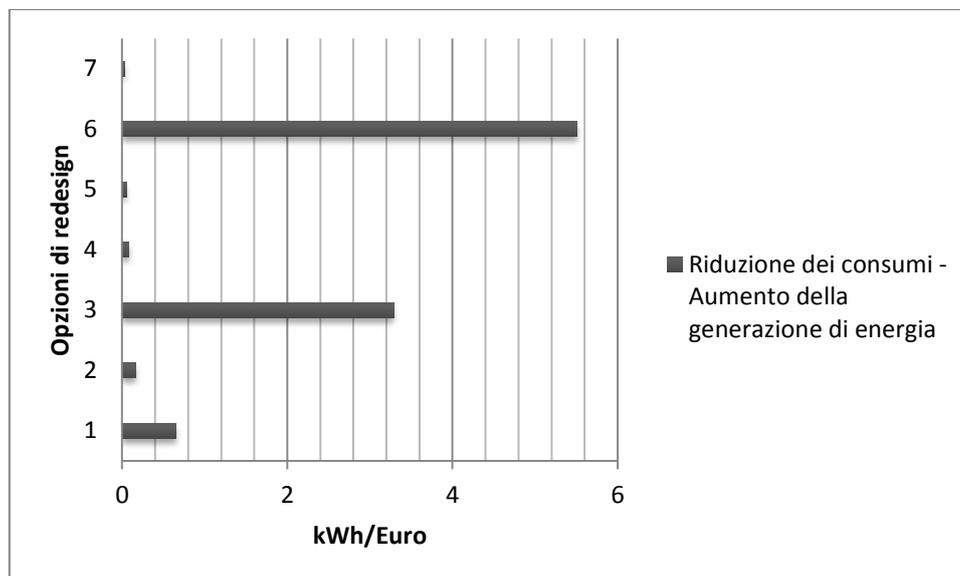


Fig.18 – Confronto dell'incidenza del redesign sulle prestazioni del sistema per unità di input monetario

Come appare evidente le opzioni decisamente a maggior impatto per unità di costo sono la 6 e la 3, ovvero rispettivamente una modifica del sistema di temperature di setpoint e la semplificazione dell'impianto termico. Si sottolinea altresì come la gestione ottimale di un sistema complesso sia fondamentale nella determinazione delle sue prestazioni energetiche: l'ottimizzazione della gestione dell'edificio tramite interventi a costo zero o quasi (ottimizzazione della gestione dell'impianto termico) è un target significativo cui rivolgere attenzione nell'ottica del retrofitting del patrimonio edilizio esistente.

3 Conclusioni

Allo scopo di centrare gli ambiziosi target di riduzione dei consumi e aumento della quota di energia rinnovabile fissato dall'UE con la nota strategia del 20/20/20 e nel contesto del recast della direttiva EPBD sulle prestazioni energetiche degli edifici, è evidente come il concetto di edificio ad energia netta zero rappresenta un grande spunto di ricerca per la comunità scientifica e di potenziale avanzamento tecnologico per il settore civile d'utenza.

Sebbene le attività della Task 40 /Annex 52 "Towards Net Zero Energy Solar Buildings" abbiano fornito un "background" solido agli esperti del settore, non esiste ancora un "framework" di riferimento accettato dalla comunità scientifica. Da ciò deriva che la scelta di utilizzare metriche differenti conduce inevitabilmente a risultati molto diversi: come evidenziato nel paragrafo 2.1, l'utilizzo della metrica *energia finale* conduce, nel caso studio, a un bilancio di energia elettrica annuale quasi nullo e a un deficit inferiore al MWhe.

Se, tuttavia, si opera una conversione dell'intera quota di energia consumata e generata in sito in primaria, il deficit energetico risulta superiore: il risultato del bilancio si sposta lontano dal target di NZEB.

Nel paragrafo 2.2 si sottolinea come il raggiungimento degli obiettivi di riduzione dei consumi energetici e delle emissioni climalteranti citati in precedenza, passa inevitabilmente da interventi di retrofit energetico sulla quota già esistente del patrimonio edilizio italiano ed europeo, che incide per più del 40% dei consumi di energia primaria sul totale. Si propone uno studio di redesign basato su simulazioni termofisiche in regime dinamico tramite il software TRNSYS. Lo scenario risultante mostra che:

- E' possibile raggiungere il target di energia netta zero finale,
- Con le opzioni proposte non si raggiunge il target di energia primaria netta zero, che, è bene sottolineare, dipende dai fattori di conversione impiegati, sebbene il deficit diminuisca comunque sensibilmente.

Nel paragrafo 2.3 si analizza l'"embodied energy" nel contesto dei NZEBs. E' evidente come per ottenere edifici caratterizzati da consumi in fase d'uso quasi nulli è necessario impiegare una quota maggiore di energia per produrre un sistema edificio-impianto dalle prestazioni energetiche superiori. Per questa ragione l'EE, sebbene spesso trascurata per edifici tradizionali, non può esserlo per edifici NZEB. Dovrebbe quindi essere stimata in sede di progettazione e considerata nel bilancio di energia annuale NZEB.

Nel dettaglio per il caso-studio Leaf House:

- L'"embodied energy" del nuovo edificio (redesign) è prossima a quella del caso zero,
- L'aumento della quota di generazione elettrica garantisce una riduzione del "cumulative energy demand" pari a più del 60% rispetto al caso iniziale.

4 Riferimenti bibliografici

- 1 EU – European Union Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), 2010.
- 2 UNI EN 15804 Sustainability of construction works "Environmental product declarations" Core rules for the product category of construction products, 2012.
- 3 UNI EN 15978 Sustainability of construction works "Assessment of environmental performance of buildings" Calculation method, 2011.
- 4 Frischknecht R, Jungbluth N, Althaus H, Doka G, Dones R, Heck T, et al. Overview and Methodology. Ecoinvent Report. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dubendorf (CH); 2007.
- 5 PRè Consultants. SimaPro 7.2, Environmental Database. Amersfoort, The Netherlands 2010.
- 6 Cellura, M., Campanella, L., Ciulla, G., Guarino, F., Lo Brano, V., Cesarini, D.N. , Orioli, A. 2011, "The redesign of an Italian building to reach net zero energy performances: A case study of the SHC Task 40 - ECBCS Annex 52", ASHRAE Transactions, pp. 331.
- 7 Cellura, M., Campanella, L., Ciulla, G., Guarino, F., Brano, V.L., Cesarini, D.N. & Orioli, A. 2011, "A net zero energy building in Italy: Design studies to reach the net zero energy target", Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, pp. 649.
- 8 Sartori I, Hestnes AG. "Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article". *Energy and Buildings*. 2007;39:249-57.
- 9 Hernandez P, Kenny P. "From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB)". *Energy and Buildings*. 2010;42:815-21.
- 10 Ardente F, Beccali M, Cellura M, Mistretta M. "Energy and environmental benefits in public buildings as a result of retrofit actions". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15:460-70.
- 11 Cellura M, Longo S, Mistretta M. "The energy and environmental impacts of Italian households consumptions: An input-output approach". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15:3897-908.
- 12 Marszal AJ, Heiselberg P, Bourrelle JS, Musall E, Voss K, Sartori I, et al. "Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies". *Energy and Buildings*. 2011;43:971-9.
- 13 Hall M. From Minergie-A towards net zero energy buildings. Von Minergie-A zu Nullenergiegebäuden. 2012;34:197-203.
- 14 Thiel CL, Campion N, Landis AE, Jones AK, Schaefer LA, Bilec MM. "A materials life cycle assessment of a net-zero energy building". *Energies*. 2013;6:1125-41.
- 15 UNI EN ISO 14040 -Environmental management "Life cycle assessment - Principles and framework". International organisation for standardisation 2006.

PARTE B

1 Introduzione

Il tema dell'uso efficiente dell'energia è sempre più ricorrente nella legislazione nazionale ed europea. Gli edifici scolastici [1-2] rappresentano una cospicua parte dell'intero patrimonio pubblico nazionale e pertanto l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche e la riqualificazione del patrimonio immobiliare scolastico sono di fondamentale importanza per conseguire i target previsti dalle direttive comunitarie 92/2001/CE, 32/2006/CE e dalla recente 31/2010/CE [3], che sottolineano come gli edifici pubblici possono svolgere un ruolo di esempio nella società civile e vengono dunque individuati come elemento fondamentale per la diffusione della cultura dell'efficienza energetica. In sede Europea la direttiva 2012/27/UE fissa per ogni paese membro una quota di riqualificazione energetica minima del patrimonio edilizio pubblico da effettuare annualmente [4]. Ciascuno Stato membro garantisce infatti che dal 1 gennaio 2014 il 3 % della superficie coperta utile totale degli edifici riscaldati e/o raffreddati di proprietà governativa e da esso occupati sia ristrutturata ogni anno al fine di rispettare almeno i requisiti minimi di prestazione energetica che il singolo governo ha stabilito.

Il retrofit energetico del patrimonio edilizio siciliano può garantire edifici energeticamente efficienti con riduzione dei costi di esercizio, manutenzione e di gestione, in conformità alle prescrizioni indicate nelle Direttive Europee e in accordo al D.Lgs. 311/06, al DM 22/12/2006 e il D.Lgs 4/06/2013 n. 63 coordinato con legge di conversione 3 agosto 2013 n.90, nei quali sono stati stabiliti criteri, condizioni e modalità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici esistenti.

Gli obiettivi generali dell'attività sono rivolti all'individuazione della consistenza, dello stato e delle tipologie di involucro più rappresentative del patrimonio edilizio scolastico siciliano tramite un'analisi dei dati statistici disponibili.

E' stata effettuata un'indagine statistica a partire da dati di letteratura e sono stati interrogati gli enti responsabili al fine di delineare una caratterizzazione termofisica del patrimonio edilizio scolastico su scala regionale.

La ricerca è stata sviluppata all'interno del piano annuale di realizzazione 2012 dell'Accordo di Programma MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico nel contesto del progetto "Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico"; la convenzione stipulata con il Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici (DEIM) dell'Università di Palermo, prevede una ricerca dal titolo: "Redesign di edifici a energia netta zero e caratterizzazione degli edifici scolastici nella Regione Sicilia". In dettaglio il presente rapporto tecnico è relativo all'attività B dal titolo "Caratterizzazione degli edifici non residenziali ad uso scolastico della PA siciliana".

2 Consistenza ed epoca di costruzione

Il campione preso in esame sul territorio regionale corrisponde a 4296 edifici censiti. I dati statistici analizzati provengono da un'indagine di campo per la provincia di Agrigento e da un'analisi dei dati disponibili in letteratura. Le fonti principali di letteratura sono tuttavia:

- 1) Report finali di progetti scientifici e studi di settore [1-2];
- 2) Pubblicazioni scientifiche [5-9].

Tra le fonti di letteratura il report finale sulle caratteristiche tipologiche degli edifici dell'istruzione del Progetto SAVE [2] fornisce una descrizione statistica accurata e completa delle caratteristiche tipologiche e di vulnerabilità dell'edilizia scolastica siciliana.

Le informazioni circa la consistenza e l'epoca di costruzione sono ricavate inoltre dai dati raccolti su tutto il territorio regionale interrogando gli enti responsabili (Province, regione e assessorati, provveditorato regionale scolastico, ecc.) con riferimento all'ultimo censimento realizzato dal MIUR [1] per la regione Sicilia.

Nel seguito si riporta una visione di insieme relativa all'edilizia scolastica nella regione siciliana.

La tabella 1 [6] riporta il numero di edifici scolastici della regione Sicilia censiti dal MIUR.

Tabella 1: edifici scolastici siciliani per provincia

Provincia	n°	%
Trapani	389	9,1
Palermo	892	20,8
Messina	777	18,1
Agrigento	378	8,8
Caltanissetta	251	5,8
Enna	201	4,7
Catania	856	19,9
Ragusa	260	6,1
Siracusa	292	6,8
TOTALE	4296	100

Si esamineranno nel seguito le caratteristiche tipologiche degli edifici scolastici investigati, distinti nelle categorie più rappresentative [2].

La tabella 2a riporta il numero degli edifici scolastici, per provincia e tipologia costruttiva [2].

Tabella 2a: Numero complessivo di edifici scolastici del campione suddiviso per tipologia costruttiva

Provincia	Muratura	Cemento Armato	Acciaio	Altro	TOTALE
CT	424	1144	79	2	1649
ME	283	524	17	0	824
RG	207	376	3	3	589
SR	170	288	15	1	474
TOTALE	1098	2373	114	6	3591

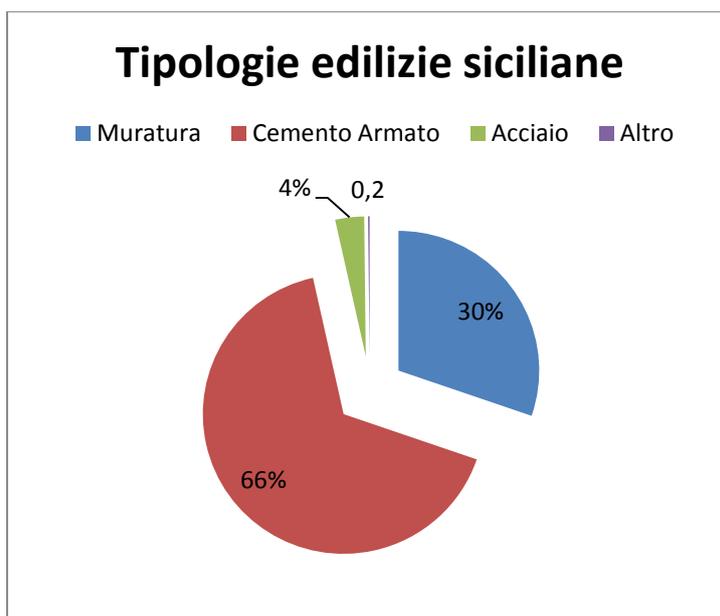


Figura 2.1: Tipologie edilizie degli edifici scolastici siciliani

Tabella 2b: Numero di edifici scolastici del campione suddivisi per tipologia costruttiva (dati di campo)

Agrigento	
Muratura	14
Cemento Armato	41
Acciaio	0
Altro	0
Totale	55

In tabella 2b, sono riportati separatamente i risultati della provincia di Agrigento in quanto provenienti da dati di campo.

Risulta evidente come circa il 66% degli edifici (fig. 2.1), ha una struttura in cemento armato, mentre solo il 29% presenta una struttura in muratura. Tale dato è giustificato dal fatto che la gran parte degli edifici è stata realizzata dal 1960 in poi, quando tale tecnica costruttiva era ormai predominante.

Le tabelle 3 e 4 [2] riportano informazioni circa l'anno di costruzione del campione statistico disponibile.

La tabella 3 si riferisce alle costruzioni in muratura (il 31,6% del totale campionato) mentre la tabella 4 alle costruzioni in cemento armato (il 68,4% del totale campionato):

Tabella 3: Epoca di costruzione degli edifici scolastici in muratura

Epoca di costruzione	n°	%
< 1919	173	15,8
19-'45	249	22,7
46-'60	432	39,3
61-'71	189	17,2
72-'81	31	2,8
>1981	13	1,2
Dati non identificabili	11	1,0
TOTALE	1098	100

Tabella 4: Epoca di costruzione degli edifici scolastici in calcestruzzo armato

Epoca di costruzione	n°	%
< 1919	2	0,1
19-'45	52	2,2
46-'60	159	6,7
61-'71	526	22,2
72-'81	644	27,1
>1981	881	37,1
Dati non identificabili	109	4,6
TOTALE	2373	100

Le tabelle 5a -5b e 6a-6b [2] rappresentano i dati disaggregati per provincia, relativi a edifici in muratura e in calcestruzzo armato:

Tabella 5a: Epoca di costruzione degli edifici scolastici in muratura

Epoca di costruzione	CT	ME	RG	SR
< 1919	100	5	31	34
19-'45	101	85	18	42
46-'60	169	141	69	51
61-'71	40	42	73	28
72-'81	8	9	4	10
>1981	3	1	5	4
Dati non identificabili	3	0	7	1
TOTALE	424	283	207	170

Tabella 5a-bis: Epoca di costruzione degli edifici scolastici in muratura

Epoca di costruzione	AG
< 1919	3
19-'45	3
46-'60	2
61-'71	6
72-'81	
>1981	
Dati non identificabili	
TOTALE	14

Tabella 5b: Epoca di costruzione degli edifici scolastici in muratura (in percentuale)

Epoca di costruzione	CT	ME	RG	SR	AG
< 1919	23,6	1,8	15,0	20,0	21,4
19-'45	23,8	30,0	8,7	24,7	21,4
46-'60	39,9	49,8	33,3	30,0	14,3
61-'71	9,4	14,8	35,3	16,5	42,9
72-'81	1,9	3,2	1,9	5,9	0,0
>1981	0,7	0,4	2,4	2,4	0
Dati non identificabili	0,7	0	3,4	0,6	0

Tabella 5b-bis: Epoca di costruzione degli edifici scolastici in muratura (in percentuale)

Epoca di costruzione	AG
< 1919	21,4
19-'45	21,4
46-'60	14,3
61-'71	42,9
72-'81	0,0
>1981	0
Dati non identificabili	0

Tali dati sono altresì organizzati in figura 2.2 per una maggiore chiarezza visiva. E' evidente come la quasi totalità degli edifici scolastici siciliani in muratura sia stata costruita precedentemente al 1971 con una quota consistente (anche superiore al 90%) precedente al 1960. Una parte non trascurabile (variabile tra il 20 e il 40% nelle differenti province) è stata addirittura costruita prima della seconda guerra mondiale. Considerato che la prima legge nazionale relativa al risparmio energetico è la 373 del 1976 - Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici, ne discende che la maggioranza di tali edifici, a meno di ristrutturazione energeticamente orientata, presenti una scarsa qualità termofisica. L'insieme di tali edifici rappresenta di per sé un bacino di efficientamento energetico potenziale di rilevante entità.

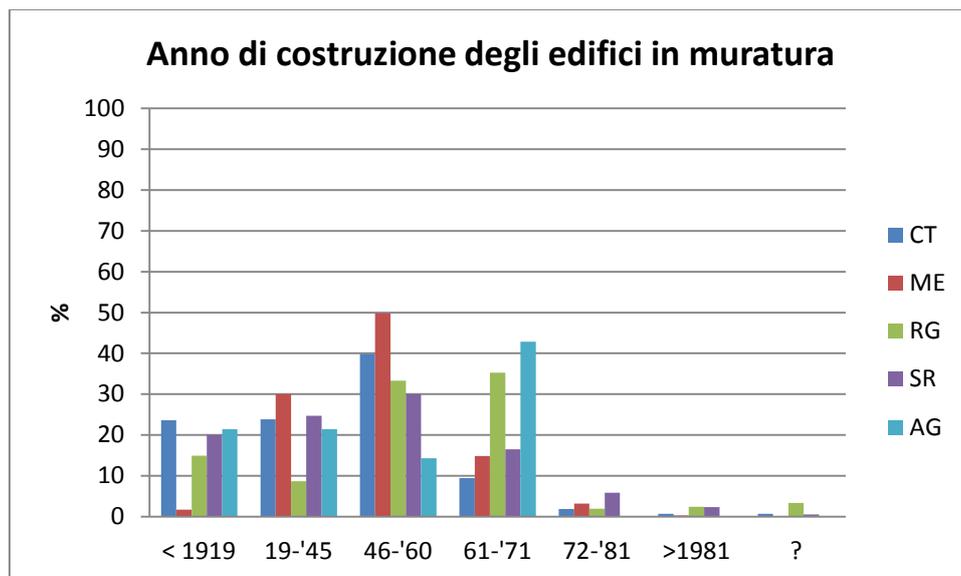


Figura 2.2: Anno di costruzione degli edifici in muratura

Tabella 6a: Epoca di costruzione degli edifici scolastici in calcestruzzo armato

Epoca di costruzione	CT	ME	RG	SR
< 1919	0	0	1	1
19-'45	10	38	1	3
46-'60	62	73	13	10
61-'71	266	126	44	79
72-'81	318	145	107	74
>1981	430	139	191	92
Dati non identificabili	58	3	19	29
TOTALE	1144	524	376	288

Tabella 6a - bis: Epoca di costruzione degli edifici scolastici in calcestruzzo armato

Epoca di costruzione	AG
< 1919	0
19-'45	0
46-'60	1
61-'71	11
72-'81	0
>1981	29
Dati non identificabili	0
TOTALE	41

Tabella 6b: Epoca di costruzione degli edifici scolastici in calcestruzzo armato (in percentuale)

Epoca di costruzione	CT	ME	RG	SR
< 1919	0	0	0,3	0,3
19-'45	0,9	7,3	0,3	1
46-'60	5,4	13,9	3,5	3,5
61-'71	23,3	24	11,7	27,4
72-'81	27,8	27,7	28,5	25,7
>1981	37,6	26,5	50,8	31,9
Dati non identificabili	5,1	0,6	5,1	10,1

Tabella 6b - bis: Epoca di costruzione degli edifici scolastici in calcestruzzo armato (in percentuale)

Epoca di costruzione	AG
< 1919	0
19-'45	0
46-'60	2,4
61-'71	26,8
72-'81	0
>1981	70,7
Dati non identificabili	0

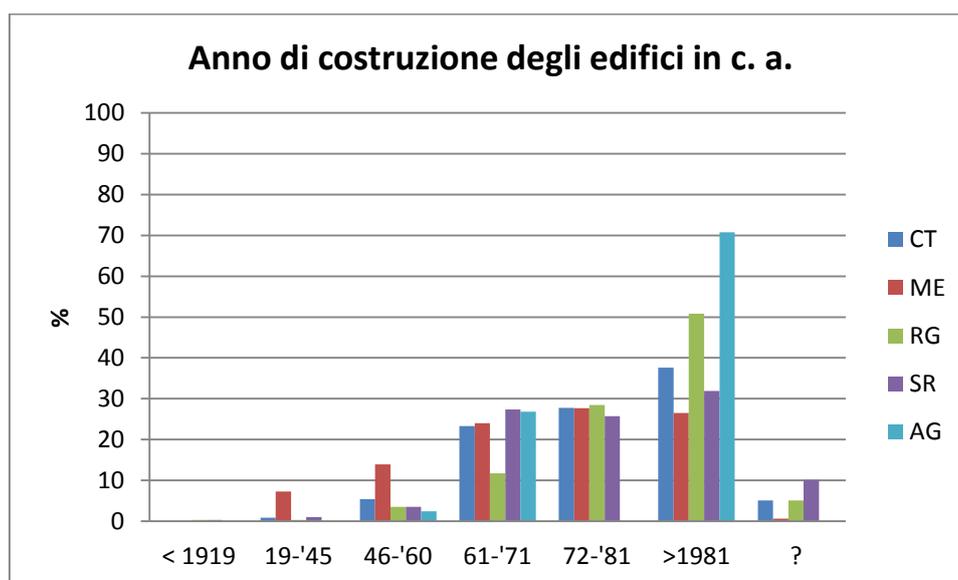


Figura 2.3: Anno di costruzione degli edifici in cemento armato

La figura 2.3 rappresenta visivamente i dati riportati nella tabella precedente. Gli edifici scolastici in calcestruzzo armato siciliani sono in massima parte stati costruiti negli anni successivi al 1961. La provincia di Ragusa presenta più della metà degli edifici scolastici in calcestruzzo armato appartenenti ad epoche

costruttive successive al 1981 mentre la provincia di Messina presenta un dato tendenzialmente opposto, con più del 70% degli edifici realizzati prima dell'81. Anche per gli edifici in cemento armato è possibile notare come ad un'alta percentuale di edifici costruita precedentemente al 1971 (variabile tra il 30 ed il 50% circa) sia possibile associare un rilevante bacino potenziale di efficientamento energetico.

3 Tipologie costruttive degli edifici: caratteristiche termofisiche e geometriche

3.1 Caratterizzazione termofisica degli edifici scolastici siciliani

L'analisi di letteratura ha consentito di individuare le tipologie costruttive più rappresentative per la Regione Siciliana. L'approccio utilizzato ha consentito di individuare per ogni tipologia di involucro e di componenti trasparenti valori tipici di trasmittanza termica sulla base di dati di letteratura; è stato altresì possibile identificare le tipologie costruttive più rappresentative per periodo storico analizzato.

Questa fase dell'attività è rivolta alla caratterizzazione termofisica del campione di edifici analizzato.

Nella tabella 7a sono altresì riportate le caratteristiche termofisiche delle strutture verticali rappresentative del campione di edifici investigato (tab. 7a).

Tabella 7a: Parametri termofisici degli elementi opachi [7-10-11-12]

Caratterizzazione Strutture Verticali	Densità ρ [kg/m ³]	Cp [kJ/(kg*K)]	Conduttività termica λ [W/(m*K)]
A-Sacco	x	x	x
B-Sacco+ricorsi	x	x	x
C-Sbozzata	x	x	x
D-Sbozzata+ricorsi	x	x	x
E-Arrotondata	x	x	x
F-Arrotondata+ricorsi	x	x	x
G-Blocco tufo o squadrata	1600	1,3	0,7
H-Blocco calcestruzzo pesante	2700	0,8	1,2
I-Blocco calcestruzzo leggero	500	0,8	0,14
L-Mattoni pieni o multif.	710	0,84	0,22
M-Mattoni Forati	650	1	0,15
N-Pareti calcestruzzo non armato	800	0,8	x
T-Miste	x	x	x
Dati non identificabili	x	x	x

I dati riportati nelle tabelle precedenti presentano un'estrema variabilità dei dati termofisici al variare delle diverse possibili tecnologie costruttive (ad es. quelle a sacco). Una corretta caratterizzazione termofisica dei componenti edilizi, richiederebbe l'ausilio di test di misura in sito, che esulava dai contenuti della presente convenzione.

I risultati seguenti sono basati sull'indagine effettuata da CRESME [8] e sui risultati del Progetto BEEPS [9]. E' stata effettuata una classificazione in funzione dell'anno di costruzione dell'edificio (ante 1920, 1920/1945, 1946/1970, 1971/1990, 1991 ad oggi) come mostrato in tab.8a in funzione delle:

- superficie media degli infissi

- numero medio di infissi per stanza

I valori dei parametri che caratterizzano gli edifici "tipo" sono frutto di analisi e rielaborazioni dei dati riportati in [8].

La tabella 8a riporta dati medi relativi alla superficie e al numero di finestre per stanza.

Tabella 8a: Superficie media e numero delle finestre

Superficie media finestre [m ²]					
Sicilia	ante 1920	1920/1945	1946/1971	1972/1991	1992/oggi
	3,47	3,67	3,09	3,18	3,21
Numero medio finestre per stanza					
Sicilia	ante 1920	1920/1945	1946/1971	1972/1991	1992/oggi
	1,42	1,58	1,46	1,67	1,79

Le informazioni utili per la determinazione delle caratteristiche costruttive delle strutture opache orizzontali e verticali e di quelle trasparenti sono state individuate in riferimento ai risultati della ricerca del Progetto BEEPS [9].

Nel seguito sono riportati i valori delle caratteristiche termofisiche delle strutture opache orizzontali e verticali e delle strutture trasparenti più rappresentative del campione di edifici preso in esame (tab.le 8b a 8h). In particolare le proprietà delle pareti opache sono descritte secondo due categorie: edifici la cui costruzione è antecedente al 1920 e successiva al 1971. Le superfici trasparenti sono invece distinte secondo le cinque fasce descritte in tabella 8a.

Tabella 8b: Caratteristiche termofisiche parete esterna muratura mista [6]

Caratteristiche strutturali parete esterna mista (ante 1920/1970)						
	s	λ	ρ	c	Massa frontale	Resistenza
	[m]	[W/m*K]	[kg/m ³]	[W/m ² *K]	[kg/m ²]	[m ² *K/W]
INTONACO	0,02	1,4	2000		40	0,01
FORATI IN LATERIZIO	0,08	0,9	2000		160	0,09
CAMERA D'ARIA	0,2	0,026	1,03	6,4	0,206	0,156
MATTONI	0,12	0,72	1800		216	0,17

Tabella 8c: Caratteristiche termofisiche solaio [6]

Caratteristiche strutturali solaio piano terra (ante 1920/1970)					
	s	λ	ρ	massa frontale	resistenza
	(m)	(W/mK°)	(kg/m ³)	(kg/m ²)	(m ² k/W)
Ciottoli	0,18	0,7	1500	270	0,26
Solaio	0,18		1800	324	0,30
Argilla	0,06	0,12	450	27	0,50
Massetto	0,03	0,9	1800	54	0,03
Piastrelle	0,02	1	2300	46	0,02

Tabella 8d: Caratteristiche termofisiche solaio di copertura [6]

Caratteristiche strutturali solaio di copertura (ante 1920/1970)					
	s	λ	ρ	massa frontale	resistenza
	(m)	(W/mK)	(kg/m³)	(kg/m²)	(m²K/W)
Intonaco	0,02	0,7	800	16	0,03
Solaio	0,22		1800	396	0,33
Argilla espansa	0,05	0,27	900	45	0,19
Massetto	0,03	1,4	400	12	0,02
Rivestimento cemento	0,03	1,4	2000	60	0,02

Tabella 8e: Caratteristiche termofisiche parete esterna in c.a. [6]

Caratteristiche strutturali parete esterna CEMENTO ARMATO (1971/ ad oggi)						
	s	λ	ρ	c	massa frontale	resistenza
	(m)	(W/mK)	(Kg/m³)	(W/m²K)	(Kg/m²)	(m²K/W)
INTONACO	0,025	1,4	2000		50	0,02
FORATI IN LATERIZIO	0,08	0,90	2000		160	0,09
CAMERA D'ARIA (20 cm)	0,12	0,026	1,03	6,400	0,1236	0,156
ISOLANTE (polistirene)	0,08	0,17	1100			
FORATI IN LATERIZIO	0,12	0,90	2000		240	0,13
INTONACO	0,025	1,4	2000		50	0,02

Tabella 8: Caratteristiche termofisiche solaio piano terra [6]

Caratteristiche strutturali solaio piano terra (1971 ad oggi)					
	s	λ	ρ	massa frontale	resistenza
	(m)	(W/mk)	(kg/m³)	(kg/m²)	(m²k/W)
Ciottoli	0,18	0,7	1500	270	0,257
Solaio	0,3		1800	540	0,41
Pannelli semirg.	0,05	0,046	16	0,8	1,087
Massetto	0,03	0,9	1800	54	0,03
piastrelle	0,02	1	2300	46	0,02

Tabella 8g: Caratteristiche termofisiche solaio di copertura [6]

Caratteristiche strutturali solaio piano terra (ante 1971 ad oggi)					
	s	λ	ρ	massa frontale	resistenza
	(m)	(W/mk)	(kg/m ³)	(kg/m ²)	(m ² k/W)
intonaco	0,03	0,7	800	24	0,04
Solaio	0,3		1800	324	0,30
Pannelli semirg.	0,03	0,046	16	0,48	0,652
Massetto	0,03	1,4	400	12	0,021
Rivestimento cemento	0,03	1,4	2000	60	0,021

Tabella 8h: Caratteristiche termofisiche degli infissi [6]

Valori della trasmittanza degli infissi (W/m²K)					
	Pre-1920	1920/1945	1946/1971	1972/1991	1992/oggi
Superficie vetrata					
Legno vetro singolo	4,63	4,66	4,57	4,58	4,59
Legno vetro doppio	2,59	2,59	2,58	2,58	2,58
Alluminio (no Taglio termico) vetro singolo	6,10	6,09	6,13	6,12	6,12
Alluminio no T.T. Vetro doppio	3,95	3,91	4,02	4,00	4,00
Alluminio T.T. Vetro singolo	-	-	-	-	-
Alluminio T.T. vetro doppio	3,19	3,18	3,21	3,21	3,21
Superficie Opaca					
Parete verticale esterna	1,17	1,17	1,17	0,76	0,76
Solaio di calpestio	0,81	0,81	0,81	0,52	0,52
Solaio di copertura	1,32	1,32	1,32	0,83	0,83

E' evidente come con il passare degli anni si verifichi un miglioramento delle caratteristiche termofisiche ottenendo valori di resistenza termica superiore (circa 50%), sia per gli elementi opachi che per quelli trasparenti [6].

3.1.1 Caratterizzazione termofisica di edifici scolastici in tre differenti periodi storici per la città di Palermo

Nel seguito, si riporta un approfondimento relativo alla caratterizzazione termofisica degli edifici scolastici relativi alla città di Palermo. Utilizzando un approccio statistico, sono stati definiti valori tipici delle grandezze termofisiche elencate per tre differenti macro-categorie di edificio [13]. I valori si riferiscono al contesto climatico della città di Palermo, la città siciliana demograficamente più rilevante. In particolare sono state esaminate:

- una scuola di recente costruzione, a norma di legge per quanto riguarda l'involucro edilizio in accordo a quanto previsto dal Dlgs 19 agosto 2005, n. 192 e s.m.i.;
- una scuola risalente agli anni '60-'70;
- una scuola sita in edificio storico realizzata prima del 1930.

Ciascuna classe temporale è caratterizzata da differenti tipologie d'involucro, sia in termini di materiali utilizzati che di tipologie costruttive.

Per la definizione delle tipologie costruttive e della relativa caratterizzazione termofisica il periodo di costruzione è fondamentale per la definizione del livello di isolamento termico dei componenti edilizi. Le ipotesi formulate sono le seguenti:

- o prima del 1976 non erano presenti isolanti termici all'interno delle strutture edilizie;
- o tra il 1976 e il 1991 si considera un basso livello di isolamento termico del componente opaco ($U_{\text{parete}} \approx 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$);
- o tra il 1991 e il 2005 si considera un livello medio di isolamento termico ($U_{\text{parete}} \approx 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$);
- o Dopo il 2005 il livello di isolamento termico è determinato dalla legislazione nazionale (D.Lgs. 192/2005 e D.Lgs. 311/2006) attraverso valori limite di trasmittanza termica.

Tabella 8i: Caratteristiche termofisiche medie degli edifici scolastici nei tre periodi storici considerati per la città di Palermo

	Edificio ex 192/2005	Edificio anni '60-'70	Edificio storico ante 1930
Trasmittanza elemento verticale opaco verso l'esterno ($W/m^2 K$)	0,48	1,1	1,2
Trasmittanza chiusura verticale opaca verso ambiente non riscaldato ($W/m^2 K$)	0,48	1,1	1,2
Trasmittanza chiusura verticale trasparente (infixo e vetro) ($W/m^2 K$)	3,0	3,6 - 6	3,6 - 6
Trasmittanza chiusura orizzontale opaca verso il cielo ($W/m^2 K$)	0,38	1,8	1,8
Trasmittanza chiusura inclinata opaca verso il cielo ($W/m^2 K$)	0,38	1,8	1,8
Trasmittanza pavimento verso spazio non riscaldati o verso l'esterno ($W/m^2 K$)	0,49	1,3	1,3

Nei tre differenti periodi considerati (tab. 8i), il valore di trasmittanza si riduce notevolmente; in particolare per le strutture opache si riduce quasi del 70%, per gli infissi del 50% e per i solai di copertura di 80% .

3.2 Caratteristiche geometriche degli edifici scolastici siciliani

Ai fini di una completa caratterizzazione del patrimonio scolastico, si riportano i dati geometrici più significativi degli edifici oggetto di studio.

3.2.1 Numero di piani totali degli edifici

La tab 9a riporta il numero di piani totali per edificio, comprensivo di eventuali piani interrati, di piani non utilizzabili ovvero piani rialzati o di sottotetto, caratterizzati quindi anche da altezze di interpiano ridotte e tali da non consentire un uso ordinario [2].

Facendo una distinzione delle due tipologie costruttive più rappresentative (cioè tra gli edifici in muratura e in calcestruzzo armato) e riportando i dati aggregati anche per provincia (tab. 9b-c [2]), si ottiene la caratterizzazione riportata in tabella 10a. Il 64,6% del campione degli edifici scolastici in muratura (1097 totale in muratura) analizzati sono costituiti da 1 o 2 piani. In particolare nella provincia di Messina più del 40% di edifici scolastici in muratura ha un solo piano.

Tabella 9a: Numero totale dei piani di edifici in muratura

N° Piani totali	N°	%
1	350	31,9
2	359	32,7
3	246	22,4
4	115	10,5
5	19	1,7
6	7	0,6
7	1	0,1
8	0	0
TOTALE	1097	100

Tabella 9b: Numero totale dei piani di edifici in muratura per provincia

N° Piani	CT	ME	RG	SR
1	111	122	84	32
2	138	81	64	71
3	96	58	39	48
4	61	22	16	14
5	14	0	1	4
6	4	0	2	1
7	0	0	1	0
8	0	0	0	0
TOTALE	424	283	207	170

Tabella 9b bis: Numero totale dei piani di edifici in muratura per la provincia di Agrigento (dati di campo)

N° Piani	AG
1	1
2	5
3	5
4	2
5	0
6	0
7	0
8	0
TOTALE	13

Tabella 9c: Numero totale dei piani di edifici in muratura per provincia (in percentuale)

N° Piani	CT	ME	RG	SR
1	26,2	43,1	29,7	18,8
2	32,5	28,6	22,6	41,8
3	22,6	20,5	13,8	28,2
4	14,4	7,8	5,7	8,2
5	3,3	0	0,4	2,4
6	0,9	0	0,7	0,6
7	0	0	0,4	0
8	0	0	0	0

Tabella 9c bis: Numero totale dei piani di edifici in muratura per la provincia di Agrigento "dati di campo"
(in percentuale)

N° Piani	AG
1	7,7
2	38,5
3	38,5
4	15,4
5	0
6	0
7	0
8	0

Un andamento simile è riscontrabile per gli edifici in calcestruzzo armato, descritti similmente nelle tabelle 10 a-b-c [2]: essi sono costituiti per la maggior parte da 1 o 2 piani (circa 67%).

Tabella 10a: Numero totale dei piani di edifici in calcestruzzo armato

N° Piani totali	N°	%
1	859	36,7
2	728	30,2
3	448	18,7
4	200	8,4
5	62	2,7
6	32	1,4
7	22	0,9
8	14	0,6
9	5	0,2
10	2	0,1
11	2	0,1
12	0	0
TOTALE	2374	100

Tabella 10b: Numero totale dei piani di edifici in calcestruzzo armato per provincia (in numero)

N° Piani totali	CT	ME	RG	SR
1	410	212	141	93
2	337	155	118	95
3	223	110	56	47
4	115	33	31	18
5	37	7	7	11
6	8	5	6	13
7	8	1	7	6
8	2	0	6	5
9	2	0	3	0
10	0	1	1	0
11	2	0	0	0
12	0	0	0	0
TOTALE	1144	524	376	288

Tabella 10b bis: Numero totale dei piani di edifici in calcestruzzo armato per la provincia di Agrigento “dati di campo (in numero)

N° Piani totali	AG
1	3
2	23
3	12
4	3
TOTALE	41

Tabella 10c: Numero totale dei piani di edifici in calcestruzzo armato per provincia (in percentuale)

N° Piani totali	CT	ME	RG	SR
1	35,8	40,5	37,5	32,3
2	29,5	29,5	31,4	33
3	19,5	21	14,9	16,3
4	10,1	6,3	8,2	6,3
5	3,2	1,3	1,9	3,8
6	0,7	1	1,6	4,5
7	0,7	0,2	1,9	2,1
8	0,2	0	1,6	1,7
9	0,2	0	0,8	0
10	0	0,2	0,3	0
11	0,2	0	0	0
12	0	0	0	0

Tabella 10c bis: Numero totale dei piani di edifici in calcestruzzo armato per la provincia di Agrigento “dati di campo” (in percentuale)

N° Piani totali	AG
1	7,3
2	56,1
3	29,3
4	7,3
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0

3.2.2 Numero di piani fuori terra degli edifici

Il numero dei piani fuori terra è un'informazione rilevante dal punto di vista della caratterizzazione dell'edificio. Tra i piani totali degli edifici sono considerati, nei dati di letteratura [2], anche i piani che sono caratterizzati da altezze di interpiano ridotte ed in alcuni casi poco significative sia dal punto di vista strutturale sia dell'utilizzo del piano stesso. Per questo motivo si è provveduto alla individuazione del numero di piani utilizzabili ed alla determinazione dei piani fuori terra di ognuno degli edifici rilevati.

Secondo i regolamenti edilizi, i piani fuori terra, per essere tali, devono avere più della metà della loro altezza fuori terra (e quindi caratterizzati da un'altezza di interpiano tale da consentire un uso ordinario Fig. 3.3b) come mostrato in figura fig. 3.3a. L'edificio a sinistra ha solo due piani fuori terra in quanto gli altri non hanno altezze tali da garantire l'agibilità al piano stesso; l'edificio a destra, è caratterizzato anch'esso da due soli piani fuori terra in quanto quello più in basso è per più della sua metà sottoterra [2].

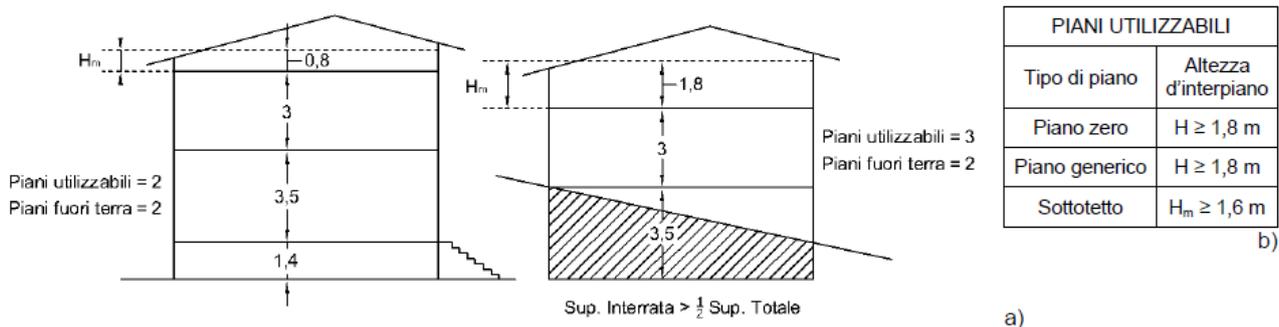


Figura 3.3: Esempi di schemi per la valutazione del numero di piani utilizzabili e fuori terra a) e criteri per la determinazione dei piani utilizzabili b)

È stato possibile a questo punto stimare il numero dei piani interrati da sottrarre a quello dei piani utilizzabili per ottenere il numero di piani fuori terra, eccezion fatta per la provincia di Agrigento nella quale, attraverso indagini di campo, non si è riscontrata nessun tipo di discordanza tra il numero dei piani totali e il numero dei piani fuori terra.

I limiti principali dell'approccio statistico risiedono nel fatto che le altezze massime e minime fuori terra sono riferite al canale di gronda dell'edificio che, per gli edifici con copertura a falde inclinate, non sempre coincide con la quota dell'ultimo solaio. Per questo motivo non è possibile valutare in maniera esatta il numero dei piani dell'edificio che sono interrati.

Dalla conoscenza del tipo di copertura è possibile tuttavia a distinguere il caso di struttura di copertura orizzontale da quello a falde inclinate.

Nel primo caso si considerano l'altezza massima e minima fuori terra alla gronda coincidenti con la quota dell'ultimo solaio rispetto al terreno sui due fronti dell'edificio. Nel caso di copertura a falde inclinate invece la differenza di quota tra la gronda e l'ultimo solaio è stimata in base ad alcune considerazioni sulla presenza di eventuali muri di sottotetto e sull'altezza dell'ultimo interpiano [2]:

- se non sono presenti muri di sottotetto si assume che la quota di gronda coincida con la quota del solaio di sottotetto;
- se sono presenti muri di sottotetto si suppone invece che la gronda sia a quota maggiore rispetto al solaio di sottotetto. In questo caso, in assenza di altre informazioni, se il sottotetto è utilizzabile la differenza di quota tra la gronda e l'ultimo solaio viene assunta pari ad $1/3$ dell'altezza d'interpiano dell'ultimo livello e pari ad $1/2$ se il sottotetto non è utilizzabile.

Una volta quantificate le quote di gronda sui due fronti dell'edificio queste vengono confrontate entrambe con l'altezza totale dello stesso ottenuta sommando le altezze di interpiano per tutti i piani.

Dall'applicazione dei criteri enunciati in precedenza è possibile determinare il numero di piani fuori terra dell'edificio. I risultati di tali elaborazioni effettuate sugli edifici scolastici sono presentati in tabella 11 a , b, 12a , b.

Dall'analisi delle tabelle si evidenzia come il numero massimo dei piani fuori terra tra gli edifici in muratura sia al massimo pari a 7 e pari a 10 per gli edifici in cemento armato. Sempre per la prima tipologia, risulta che circa il 41% degli edifici si estenda in un unico piano e il 35% in due piani fuori terra (tabella 10 a -10 b). Per gli edifici in calcestruzzo armato, invece, per circa il 42,3% dei casi gli edifici si sviluppano in un unico piano e il 31% in due. Soltanto due sono gli edifici che nella provincia di Catania si sviluppano in 10 piani fuori terra (tabelle 11 a-b).

Tabella 11a: Numero dei piani fuori terra degli edifici in muratura

N° Piani fuori terra	N°	%
1	439	41,0
2	369	34,5
3	195	18,2
4	54	5,0
5	9	0,8
6	4	0,4
7	0	0,0
TOTALE	1070	100

Tabella 11b: Numero dei piani fuori terra degli edifici in muratura per provincia

N° Piani fuori terra	CT	ME	RG	SR
1	152	144	96	44
2	147	82	63	72
3	79	43	33	35
4	29	8	7	8
5	6	0	0	3
6	2	0	2	0
7	0	0	0	0
TOTALE	415	277	201	162

Tabella 11b bis: Numero dei piani fuori terra degli edifici in muratura per la provincia di Agrigento

N° Piani fuori terra	AG
1	1
2	5
3	5
4	2
5	13
6	
7	
TOTALE	26

Tabella 12a: Numero dei piani fuori terra degli edifici in calcestruzzo armato

N° Piani fuori terra	N°	%
1	978	42,8
2	714	30,6
3	383	16,4
4	132	5,7
5	43	1,9
6	24	1
7	24	1
8	6	0,3
9	4	0,2
10	2	0,1
11	0	0
TOTALE	2310	100

Tabella 12b: Numero di edifici in calcestruzzo armato in funzione del numero di piani fuori terra per provincia

N° Piani fuori terra	CT	ME	RG	SR
1	476	236	160	100
2	330	165	121	79
3	208	79	45	40
4	67	21	26	16
5	22	7	4	10
6	6	3	4	11
7	9	1	8	6
8	0	0	2	4
9	2	0	2	0
10	2	0	0	0
11	0	0	0	0
TOTALE	1122	512	372	266

Tabella 12b bis: Numero di edifici in calcestruzzo armato in funzione del numero di piani fuori terra per la provincia di Agrigento

N° Piani fuori terra	AG
1	6
2	19
3	11
4	2
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
TOTALE	38

3.2.3 Altezza di interpiano degli edifici

L'analisi delle altezze di interpiano è stata limitata ai soli piani utilizzabili e fuori terra[2]. Le figure e tabelle seguenti (tab. 13a a 13f e 14a a 14f) riportano i dati relativi alle altezze di interpiano per il campione statistico analizzato. I dati presentati derivano da un'elaborazione che, a partire dall'individuazione delle altezze di interpiano associate ai piani fuori terra degli edifici, associa due valori di altezze di interpiano di riferimento a ogni edificio ad eccezione degli edifici della provincia di Agrigento, per i quali questa tipologia di dati non è disponibile. Le due grandezze rilevate sono: l'altezza di interpiano massima e l'altezza di interpiano media.

Attraverso il confronto tra le altezze di interpiano di tutti i piani degli edifici si valuta il valore dell'interpiano massimo per ognuno di essi. Il calcolo del valor medio delle altezze di interpiano è stato esteso ai soli piani utilizzabili e fuori terra; l'altezza di interpiano massima è stata dedotta per confronto tra le altezze di interpiano dell'intero edificio. L'altezza di interpiano media si determina invece come media delle altezze di interpiano dei diversi piani dell'edificio escludendo eventuali piani rialzati e di sottotetto non utilizzabili.

Gli edifici scolastici sono stati quindi suddivisi in funzione delle altezze di interpiano massime e medie (tab. 13a/f e 14a/f [2]): si riporta sotto forma tabellare il numero di edifici scolastici analizzati che rientrano nelle categorie definite nella prima colonna sulla sinistra. Gli edifici scolastici in muratura presentano altezze di interpiano che variano da circa 3 m fino ad oltre 6 m (in alcuni casi si rilevano valori massimi di 10 m attribuibili in genere alle palestre).

Dall'analisi dei risultati ottenuti si può evidenziare che gli edifici scolastici in muratura presentano prevalentemente altezze di interpiano comprese nell'intervallo tra 3,5-4,0 m (30% degli edifici) senza particolari variazioni tra una provincia e l'altra.

Per quanto riguarda la distribuzione delle altezze di interpiano degli edifici nelle diverse province (tab. 13b-c e 14b-c) si osserva generalmente un buon accordo con i dati globali regionali.

Tabella 13a: Altezze massime interpiano edifici scolastici in muratura in numero di edifici

Altezze interpiano massime	n° edifici	%
< 3	3	0,3
3-3,5	73	6,9
3,5-4	227	21,5
4-4,5	280	26,5
4,5-5	138	13,1
5-5,5	138	13,1
5,5-6	105	10
>6	91	8,6
TOTALE	1055	100

Tabella 13b: Altezze massime interpiano edifici scolastici in muratura per provincia

Altezze interpiano massime	Numero di edifici			
	CT	ME	RG	SR
< 3	0	3	0	0
3-3,5	17	31	16	9
3,5-4	53	108	36	30
4-4,5	105	67	57	51
4,5-5	61	26	30	21
5-5,5	60	31	27	20
5,5-6	71	3	15	16
>6	48	8	20	15
TOTALE	415	277	201	162

Rispetto al grado di istruzione degli edifici scolastici e con riferimento alle classi definite in precedenza si evidenzia in generale che le scuole nido e le materne sono caratterizzate da interpiani di altezza inferiore mentre altezze di interpiano più elevate si riscontrano per gradi di istruzione superiori.

Tabella 13c: Altezze massime interpiano edifici scolastici in muratura per provincia (in percentuale)

Altezze interpiano massime	CT	ME	RG	SR
< 3	0	1,1	0	0
3-3,5	4,1	11,2	8,0	5,6
3,5-4	12,8	39,0	17,9	18,5
4-4,5	25,3	24,2	28,4	31,5
4,5-5	14,7	9,4	14,9	13,0
5-5,5	14,5	11,2	13,4	12,3
5,5-6	17,1	1,1	7,5	9,9
>6	11,6	2,9	10,0	9,3

Tabella 13d: Altezze medie interpiano edifici scolastici in muratura

Numero edifici		
Altezze interpiano medie	n°edifici	%
< 3	10	0,9
3-3,5	104	9,9
3,5-4	257	24,4
4-4,5	301	28,5
4,5-5	150	14,2
5-5,5	108	10,2
5,5-6	68	6,4
>6	57	5,4
TOTALE	1055	100

Tabella 13e: Altezze medie interpiano edifici scolastici in muratura per provincia

Numero di edifici				
Altezze interpiano medie	CT	ME	RG	SR
< 3	4	4	0	2
3-3,5	24	45	20	15
3,5-4	63	110	43	41
4-4,5	124	60	63	54
4,5-5	71	28	34	17
5-5,5	55	22	19	12
5,5-6	44	3	9	12
>6	30	5	13	9
TOTALE	415	277	201	162

Tabella 13f: Altezze medie interpiano edifici scolastici in muratura per provincia (in percentuale)

Altezze interpiano medie	CT	ME	RG	SR
< 3	1,0	1,4	0	1,2
3-3,5	5,8	16,2	10,0	9,3
3,5-4	15,2	39,7	21,4	25,3
4-4,5	29,9	21,7	31,3	33,3
4,5-5	17,1	10,1	16,9	10,5
5-5,5	13,3	7,9	9,5	7,4
5,5-6	10,6	1,1	4,5	7,4
>6	7,2	1,8	6,5	5,6

Gli edifici scolastici in calcestruzzo armato presentano altezze di interpiano che variano da circa 3 m fino ad oltre 6 m (in alcuni casi si rilevano valori massimi di 10 m corrispondenti generalmente alle palestre). Per ognuno delle classi individuate è valutato il numero di edifici appartenenti e la percentuale rispetto al totale nell'ambito considerato.

I risultati ottenuti sono riportati nelle tabelle e nei grafici seguenti.

Dall'analisi dei risultati si evidenzia che gli edifici scolastici in calcestruzzo armato presentano prevalentemente altezze di interpiano comprese nell'intervallo tra 3,0 e 4,0 m (il 64,3% che corrispondono a 1458 edifici su un totale di 2268) con una consistente percentuale di edifici (circa il 19,5%) ad interpiano massimo compreso tra 4,0 e 5,0 m.

Per quanto riguarda la distribuzione delle altezze di interpiano degli edifici nelle diverse province si osservano lievi variazioni tra 3-5 metri (dal 29,3% al 37,7%).

Nel confronto tra le altezze di interpiano massime e le medie sui piani utilizzabili si osserva una riduzione dei valori prevalenti che passano da 3,5-4,0 m per gli interpiani massimi a 3,0-3,5 m per i valori medi. Per il resto valgono le stesse osservazioni valide nel caso degli interpiani massimi.

Tabella 14a: Altezze massime interpiano edifici scolastici in calcestruzzo armato

Altezze interpiano massime	n°	%
< 3	23	1
3-3,5	499	22
3,5-4	747	32,9
4-4,5	451	19,9
4,5-5	148	6,5
5-5,5	110	4,8
5,5-6	87	3,8
>6	206	9,1
TOTALE	2271	100

Tabella 15b: Altezze massime interpiano edifici scolastici in calcestruzzo armato per provincia (in numero)

Numero di edifici				
Altezze interpiano massime	CT	ME	RG	SR
< 3	11	2	1	9
3-3,5	225	145	78	51
3,5-4	364	157	148	78
4-4,5	222	107	53	69
4,5-5	83	29	19	17
5-5,5	60	27	15	8
5,5-6	40	16	14	17
>6	115	30	44	17
TOTALE	1120	513	372	266

Tabella 14c: Altezze massime interpiano edifici scolastici in calcestruzzo armato per provincia (in percentuale)

Altezze interpiano massime	CT	ME	RG	SR
< 3	1,0	0,4	0,3	3,4
3-3,5	20,1	28,3	21,0	19,2
3,5-4	32,5	30,6	39,8	29,3
4-4,5	19,8	20,9	14,2	25,9
4,5-5	7,4	5,7	5,1	6,4
5-5,5	5,4	5,3	4,0	3,0
5,5-6	3,6	3,1	3,8	6,4
>6	10,3	5,8	11,8	6,4

Tabella 14d: Altezze medie interpiano edifici scolastici in calcestruzzo armato

Altezze interpiano medie	n°	%
< 3	40	1,8
3-3,5	687	30,3
3,5-4	771	34
4-4,5	324	14,3
4,5-5	117	5,2
5-5,5	80	3,5
5,5-6	71	3,1
>6	178	7,8
TOTALE	2268	100

Tabella 14e: Altezze medie interpiano edifici in calcestruzzo armato per provincia

Numero di edifici				
Altezze interpiano medie	CT	ME	RG	SR
< 3	21	8	1	10
3-3,5	292	180	129	86
3,5-4	422	150	121	78
4-4,5	156	84	41	43
4,5-5	57	31	14	15
5-5,5	41	18	11	10
5,5-6	33	14	14	10
>6	96	27	41	14
TOTALE	1118	512	372	266

Tabella 14f: Altezze medie interpiano edifici in calcestruzzo armato per provincia (in percentuale)

Altezze interpiano medie	CT	ME	RG	SR
< 3	1,9	1,6	0,3	3,8
3-3,5	26,1	35,2	34,7	32,3
3,5-4	37,7	29,3	32,5	29,3
4-4,5	14,0	16,4	11,0	16,2
4,5-5	5,1	6,1	3,8	5,6
5-5,5	3,7	3,5	3,0	3,8
5,5-6	3,0	2,7	3,8	3,8
>6	8,6	5,3	11,0	5,3

3.2.4 Volume degli edifici

E' stato analizzato il volume globale degli edifici scolastici in muratura e in calcestruzzo armato, a partire dai dati disponibili relativi alle superfici medie coperte ed alle altezze di interpiano medie ai vari piani. Il volume globale di ogni edificio viene stimato sommando il volume di tutti i piani.

Gli edifici scolastici sono stati quindi raggruppati in funzione del volume calcolato (tab. 15a), definendo degli intervalli di ampiezza costante (pari a 1000 m³).

Gli edifici scolastici in muratura del campione considerato presentano un volume globale coperto che varia da meno di 100 m³ fino ad un massimo di oltre 70000 m³.

Per ognuno delle classi descritte, è stato valutato il numero di edifici e la percentuale rispetto al totale nell'ambito considerato [2].

Tabella 15a: Volume edifici in muratura

Volumetria [m ³ x 1000]	N°	%
< 1	201	18,4
1-2	212	19,4
2-3	125	11,4
3-4	93	8,5
4-5	80	7,3
5-6	71	6,5
6-7	48	4,4
7-8	32	2,9
8-9	28	2,6
9-10	29	2,6
10-11	18	1,6
11-12	18	1,6
12-13	15	1,4
13-14	13	1,2
14-15	12	1,1
15-16	9	0,8
16-17	10	0,9
17-18	5	0,5
18-19	11	1,0
19-20	7	0,6
>20	58	5,3
TOTALE	1095	100

Dall'analisi dei risultati ottenuti si può evidenziare che gli edifici scolastici in muratura presentano prevalentemente volumi inferiori a 2000-3000 m³ senza sostanziali variazioni in relazione della provincia considerata (16b).

Tabella 15b: Volume edifici in muratura per provincia (in numero)

Volume [m ³ x 1000]	CT	ME	RG	SR	AG
< 1	55	71	54	21	0
1-2	75	79	34	24	0
2-3	49	31	27	18	0
3-4	38	18	21	16	0
4-5	37	20	10	13	0
5-6	21	16	13	15	1
6-7	22	4	7	12	4
7-8	17	6	4	5	0
8-9	8	6	8	4	2
9-10	10	8	3	8	0
10-11	10	1	4	2	2
11-12	10	2	3	3	3
12-13	6	2	3	4	0
13-14	5	3	1	3	1
14-15	6	1	2	3	0
15-16	3	1	0	5	0
16-17	6	2	1	1	0
17-18	1	1	1	2	1
18-19	7	0	3	1	0
19-20	3	1	1	2	0
>20	35	10	5	8	0
TOTALE	424	283	205	170	14

In dettaglio, le province di Catania e Siracusa presentano volumi mediamente maggiori rispetto alle province di Messina e Ragusa.

Con riferimento alla distinzione operata nelle tabelle 16c-d relativamente al livello di istruzione, si evidenzia in generale che le scuole nido e materne sono caratterizzate da volumi minori (in media inferiori a 2500 m³) rispetto ai livelli di istruzione superiori (si superano i 7000 m³ di media per le scuole superiori).

Tabella 15c: Volume edifici in muratura per grado di istruzione (in numero)

Volume [m ³ x 1000]	Nido- Materna	Elementare	Media	Superiore	Totale
< 1	62	70	23	37	192
1-2	65	106	11	23	205
2-3	23	55	22	16	116
3-4	15	37	17	20	89
4-5	8	40	14	12	74
5-6	7	36	7	13	63
6-7	8	14	10	12	44
7-8	4	12	7	7	30
8-9	2	11	3	6	22
9-10	1	7	5	10	23
10-11	2	10	1	3	16
11-12	0	9	4	3	16
12-13	0	5	3	5	13
13-14	2	3	1	6	12
14-15	0	4	2	4	10
15-16	2	3	2	1	8
16-17	0	5	2	2	9
17-18	0	5	0	0	5
18-19	0	4	0	7	11
19-20	1	2	1	3	7
>20	1	19	5	20	45
TOTALE	203	457	140	210	

Tabella 15d: Volume edifici in muratura per grado di istruzione (in percentuale)

Volume [m³ x 1000]	Nido- Materna	Elementare	Media	Superiore
< 1	30,5	15,3	16,4	17,6
1-2	32,0	23,2	7,9	11,0
2-3	11,3	12,0	15,7	7,6
3-4	7,4	8,1	12,1	9,5
4-5	3,9	8,8	10,0	5,7
5-6	3,4	7,9	5,0	6,2
6-7	3,9	3,1	7,1	5,7
7-8	2,0	2,6	5,0	3,3
8-9	1,0	2,4	2,1	2,9
9-10	0,5	1,5	3,6	4,8
10-11	1,0	2,2	0,7	1,4
11-12	0	2,0	2,9	1,4
12-13	0	1,1	2,1	2,4
13-14	1,0	0,7	0,7	2,9
14-15	0	0,9	1,4	1,9
15-16	1,0	0,7	1,4	0,5
16-17	0	1,1	1,4	1,0
17-18	0	1,1	0	0
18-19	0	0,9	0	3,3
19-20	0,5	0,4	0,7	1,4
>20	0,5	4,2	3,6	9,5

Gli edifici scolastici in calcestruzzo armato presentano volume globale coperto (tab. 16a) che ha una variabilità maggiore rispetto agli edifici in muratura.

Tabella 16a: Volume edifici in calcestruzzo armato

Volume [m³ x 1000]	N°	%
< 1	350	14,8
1-2	480	20,3
2-3	430	18,2
3-4	244	10,3
4-5	210	8,9
5-6	149	6,3
6-7	116	4,9
7-8	71	3,0
8-9	49	2,1
9-10	38	1,6
10-11	28	1,2
11-12	36	1,5
12-13	24	1,0
13-14	23	1,0
14-15	16	0,7
15-16	10	0,4
16-17	10	0,4
17-18	10	0,4
18-19	10	0,4
19-20	8	0,3
>20	53	2,2
TOTALE	2365	100

Sebbene i dati disaggregati siano generalmente in accordo a quelli complessivi regionali, la provincia di Siracusa si discosta dalla tendenza delle altre province, in proporzione, con volumi mediamente più elevati (tab. 16b).

Tabella 16b: Volumetria edifici in calcestruzzo armato per provincia (in numero)

Volume [m³ x 1000]	CT	ME	RG	SR	AG
< 1	178	87	54	31	0
1-2	223	109	99	49	0
2-3	186	113	71	60	0
3-4	118	43	45	36	2
4-5	105	46	33	23	3
5-6	80	26	22	15	6
6-7	64	23	10	16	3
7-8	37	15	9	5	5
8-9	24	13	6	4	2
9-10	22	7	3	4	2
10-11	14	8	3	2	1
11-12	22	6	3	5	0
12-13	12	3	5	4	0
13-14	10	4	5	3	1
14-15	9	1	1	5	0
15-16	4	1	2	2	1
16-17	2	3	2	3	0
17-18	3	2	1	4	0
18-19	6	2	0	1	1
19-20	2	2	0	2	2
>20	19	10	2	14	8
TOTALE	1140	524	376	288	37

Anche nel caso di edifici in calcestruzzo armato, il volume medio degli edifici scolastici è minimo nelle scuole nido e materne (circa 2500 m³), e aumenta generalmente all'aumentare del grado di istruzione (oltre 6000 m³).

Tabella 16c: Volume edifici in calcestruzzo armato per grado di istruzione (in numero)

Volume [m ³ x 1000]	Nido- Materna	Elementare	Media	Superiore	Totale
< 1	72	101	70	79	322
1-2	168	136	92	74	470
2-3	97	134	113	75	419
3-4	52	68	61	52	233
4-5	31	47	60	57	195
5-6	15	39	35	47	136
6-7	10	27	26	40	103
7-8	7	13	20	24	64
8-9	2	11	12	17	42
9-10	0	7	11	16	34
10-11	0	6	8	10	24
11-12	0	6	12	15	33
12-13	3	1	5	12	21
13-14	1	3	5	10	19
14-15	0	1	6	9	16
15-16	1	1	1	5	8
16-17	2	2	2	4	10
17-18	2	2	1	5	10
18-19	1	4	2	2	9
19-20	0	0	3	2	5
>20	5	10	7	17	39
TOTALE	469	619	552	572	

Tabella 16d: Volume edifici in calcestruzzo armato per grado di istruzione (in percentuale)

Volume [m³ x 1000]	Nido- Materna	Elementare	Media	Superiore
< 1	35,5	22,1	50,0	37,6
1-2	82,8	29,8	65,7	35,2
2-3	47,8	29,3	80,7	35,7
3-4	25,6	14,9	43,6	24,8
4-5	15,3	10,3	42,9	27,1
5-6	7,4	8,5	25,0	22,4
6-7	4,9	5,9	18,6	19,0
7-8	3,4	2,8	14,3	11,4
8-9	1,0	2,4	8,6	8,1
9-10	0	1,5	7,9	7,6
10-11	0	1,3	5,7	4,8
11-12	0	1,3	8,6	7,1
12-13	1,5	0,2	3,6	5,7
13-14	0,5	0,7	3,6	4,8
14-15	0	0,2	4,3	4,3
15-16	0,5	0,2	0,7	2,4
16-17	1,0	0,4	1,4	1,9
17-18	1,0	0,4	0,7	2,4
18-19	0,5	0,9	1,4	1,0
19-20	0	0	2,1	1,0
>20	2,5	2,2	5,0	8,1

4 Stato del patrimonio scolastico siciliano

4.1 Tipologie di strutture verticali e orizzontali

In questa sezione si riportano ed analizzano i dati relativi alle tipologie di strutture verticali ed orizzontali degli edifici scolastici in muratura e in calcestruzzo armato (tab. 17a e 20a). Nei casi in cui un edificio presenti diversi tipi di strutture verticali ed orizzontali si fa riferimento alla tipologia prevalente [2].

I dati ottenuti dalla campagna di indagine sono stati catalogati per ambiti territoriali (tab. 17b), per epoca di costruzione (tab. 17c) e per grado di istruzione (tab. 17d). E' stata inoltre analizzata la correlazione tra le tipologie di strutture verticali e le epoche di costruzione degli edifici scolastici considerati.

Tabella 17a: Tipologia di strutture verticali edifici in muratura

Tipologie di strutture verticali	n°	%
A-Sacco	26	2,4
B-Sacco+ricorsi	44	4,1
C-Sbozzata	299	27,6
D-Sbozzata+ricorsi	64	6
E-Arrotondata	7	0,6
F-Arrotondata+ricorsi	27	2,5
G-Blocco tufo o squadrata	321	27,8
H-Blocco cls pesanti	9	0,8
I-Blocco cls leggeri	9	0,8
L-Mattoni pieni o multiforo	179	16,5
M-Mattoni Forati	30	0,8
N-Pareti cls non armato	2	0,2
T-Miste	41	3,8
Dati non disponibili	69	6,1
TOTALE	1127	100

Tabella 17b: Tipologia di strutture verticali edifici in muratura per provincia (in numero)

Tipologie di strutture verticali					
Provincia	CT	ME	RG	SR	AG
A-Sacco	3	12	9	2	0
B-Sacco+ric	6	0	32	6	0
C-Sbozzata	225	22	18	34	0
D-Sbozzata+ric	48	9	5	2	0
E-Arrotondata	2	2	0	3	0
F-Arrotondata+ric	24	1	0	2	0
G-Blocco tufo o squadrata	79	0	118	104	20
H-Blocco cls pesanti	5	1	0	3	0
I-Blocco cls leggeri	9	0	0	0	0
L-Mattoni pieni o multif.	10	165	0	4	0
M-Mattoni Forati	3	6	0	0	21
N-Pareti cls non armato	0	2	0	0	0
T-Miste	10	5	18	8	0
Dati non disponibili	0	58	7	1	3
TOTALE	424	283	207	169	44

Dall'analisi dei risultati ottenuti si può evidenziare che gli edifici scolastici in muratura sono realizzati prevalentemente in blocchetti di tufo o pietra squadrata e in pietra sbozzata (27,6%) ed in mattoni pieni o multiforo (15,6%). Inoltre è molto frequente riscontrare l'utilizzo di coperture orizzontali realizzate in laterocemento o solette in calcestruzzo armato (in totale il 45%), e in misura minore di putrelle e voltine o tavelloni (17,5%).

Per le province il campione analizzato mostra una prevalenza nell'uso di blocchi di tufo o pietra squadra nelle province di Ragusa e Siracusa, mentre prevalgono i mattoni pieni o multiforo nella provincia di Messina e la pietra sbozzata nella provincia di Catania.

Le seguenti tabelle (17c, 17 d, 18a, 18b) riportano una classificazione degli edifici censiti sulla base della natura delle strutture orizzontali e verticali e in funzione dell'anno di costruzione.

Tabella 17c: Tipologia di strutture verticali edifici in muratura per epoca di costruzione

Tipologie di strutture verticali							Dati non disponibili	TOTALE
Provincia	< 1919	19-'45	46-'60	61-'71	72-'81	>1981		
A-Sacco	9	2	11	3	0	1	0	26
B-Sacco+ric	17	9	7	3	0	1	7	44
C-Sbozzata	94	66	102	29	4	1	3	299
D-Sbozzata+ric	11	23	23	6	1	0	0	64
E-Arrotondata	3	1	2	1	0	0	0	7
F-Arrotondata+ric	0	6	20	1	0	0	0	27
G-Blocco tufo o squadrata	33	58	112	79	12	6	1	301
H-Blocco cls pesanti	0	0	2	3	4	0	0	9
I-Blocco cls leggeri	1	0	6	2	0	0	0	9
L-Mattoni pieni o multif.	2	43	91	36	7	0	0	179
M-Mattoni Forati	0	0	7	1	1	0	0	9
N-Pareti cls non armato	0	0	0	1	1	0	0	2
T-Miste	0	6	22	10	0	3	0	41
Dati non disponibili	0	31	25	8	1	1	0	66
TOT	170	245	430	183	31	13	11	1083

Tabella 17d: Tipologia di strutture verticali edifici in muratura per grado di istruzione

Tipologie di strutture verticali				
Grado di istruzione	Nido-Materna	Elementare	Media	Superiore
A-Sacco	3	18	3	1
B-Sacco+ric	14	16	6	8
C-Sbozzata	39	117	31	77
D-Sbozzata+ric	10	28	5	19
E-Arrotondata	2	2	1	2
F-Arrotondata+ric	3	19	1	4
G-Blocco tufo o squadrata	68	110	54	53
H-Blocco cls pesanti	3	5	0	1
I-Blocco cls leggeri	1	1	0	6
L-Mattoni pieni o multif.	41	97	17	16
M-Mattoni Forati	3	4	1	1
N-Pareti cls non armato	1	1	0	0
T-Miste	5	12	15	9
Dati non disponibili	12	27	6	13
TOTALE	205	457	140	210

Tabella 18a: Tipologia di strutture Orizzontali edifici in muratura

Strutture Orizzontali	n°	%
A-Legno	3	0,3
B-Legno con catene	1	0,1
C-Putrelle e voltine o tavelloni	189	17,2
D-Putrel.+voltine o tavelloni+catene	10	0,9
E-Laterocemento o solette in cemento armato	497	45,3
F-Volte senza catene	60	5,5
G-Volte con catene	21	1,9
H-Miste volte solai	33	3,0
I-Miste volte solai con catene	3	0,3
M-Legno spingente	18	1,6
N-Legno	29	2,6
O-Legno spinta elim. o travi orizzontali	42	3,8
P-Laterocemento o solette in c.a.	158	14,4
Q-Acciaio spingente	3	0,3
R-Acciaio non spingente	10	0,9
S-Mista spingente	0	0,0
T-Mista non spingente	6	0,5
Dati non disponibili	14	1,3
TOTALE	1097	100

La tabella 19 mostra la combinazione delle strutture verticali e orizzontali prevalenti nelle differenti province: ad ogni tipologia costruttiva è attribuito un numero (riportato tra parentesi) che sarà utilizzato per identificare senza ambiguità ogni classe nel seguito. Nella figura 4.1 sono evidenziate le combinazioni tipologiche più frequenti negli edifici scolastici siciliani (tipologia II, IV, VI).

Tabella 19: Strutture verticali-orizzontali in edifici in muratura

Tipologie di strutture verticali-orizzontali	Provincia					TOTALE
	CT	ME	RG	SR	AG	
AC-Muratura a sacco-Putrelle e voltine o tavelloni (I)						0
BE-BP-Sacco+ricorsi-Laterocemento o solette in c.a. (II)						0
CC-Pietra sbozzata-Putrelle e voltine o tavelloni (III)	86					86
CE-CP-Pietra sbozzata-Laterocemento o solette in c.a. (IV)	81	21		13		115
DE-DP-Sbozzata+ricorsi-Laterocemento o solette in c.a. (V)						0
EE-EP-Pietre arrotondate-Laterocemento o solette in c.a. (VI)						0
GC-Blocco tufo o squadrata-Putrelle e voltine o tavelloni (VII)				11		11
GE-GP-Blocco tufo o squadrata-Laterocemento o solette in c.a. (VIII)	28		79	84	20	211
GF-Blocco tufo o squadrata-volte senza catene (IX)						0
GO-Blocco tufo o squadrata-Legno a spinta eliminata o travi orizz. (X)			14			14
LC-Mattoni pieni o multif.-Putrelle e voltine o tavelloni (XI)						0
LE-LP-Mattoni pieni o multif.-Laterocemento o solette in c.a. (XII)		140			37	177
LO-Mattoni pieni o multif.-Legno a spinta eliminata o travi orizz. (XIII)						0
TE-TP-Miste-Laterocemento o soletta in c.a. (XIV)			16			16
VE-VP-Dati non disponibili-Laterocemento o solette in c.a. (XV)		55				55

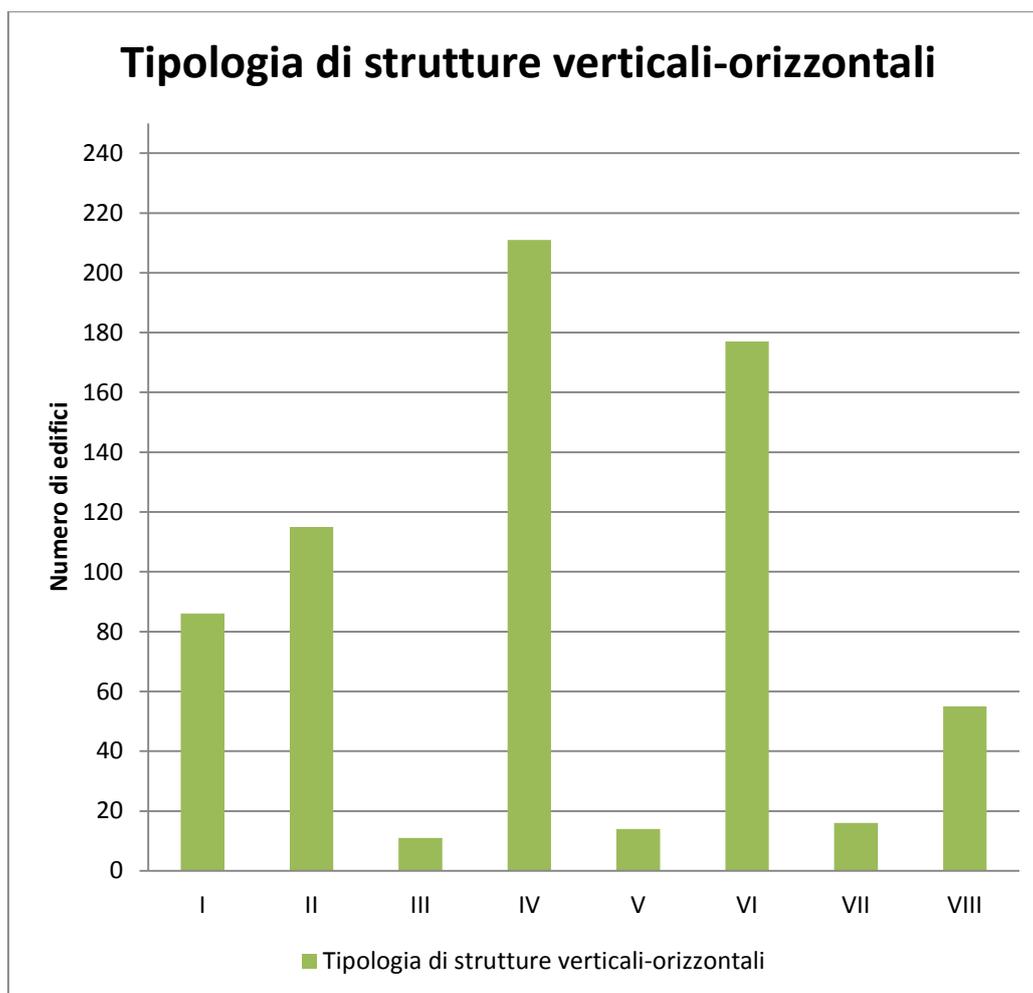


Figura 4.1: Caratterizzazione dei componenti verticali e orizzontali del patrimonio edilizio scolastico siciliano

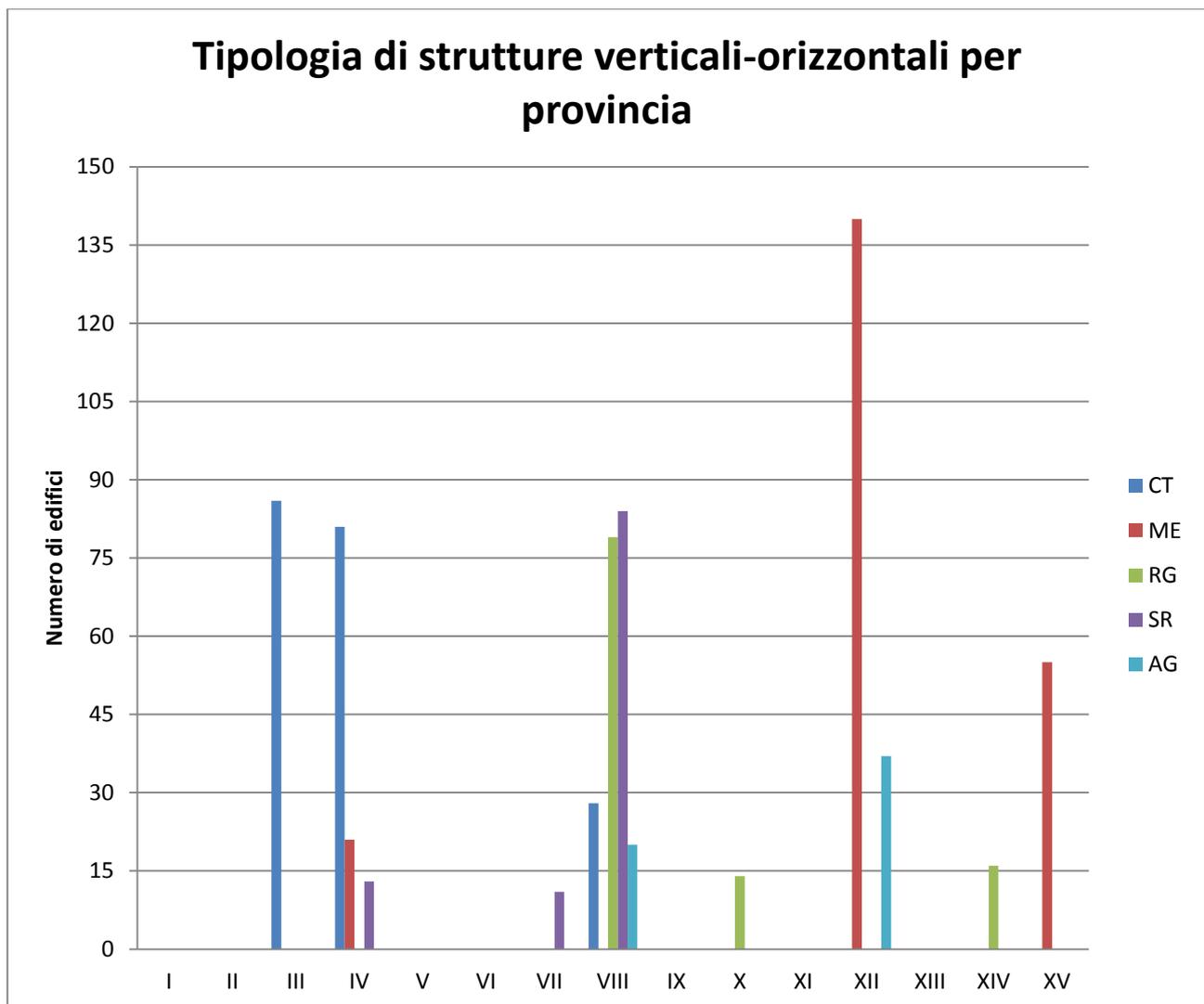


Figura 4.2: combinazioni tra le strutture verticali e orizzontali suddivisi per provincia

La figura 4.2 evidenzia come tra le diverse province vi sia una notevole differenza nelle caratteristiche costruttive degli edifici scolastici. La tipologia XII (Mattoni pieni- laterocemento) nella provincia di Messina prevale rispetto alle altre, a seguire la tipologia III nella provincia di Catania e la VIII nella provincia di Siracusa.

I sistemi costruttivi presi in considerazione per gli edifici in calcestruzzo armato sono classificabili secondo le seguenti categorie:

- strutture a pareti di calcestruzzo armato;
- strutture a telai di calcestruzzo armato non tamponati;
- strutture a telai di calcestruzzo armato con tamponature deboli;
- telai di calcestruzzo armato con tamponature consistenti.

Tabella 20a: Strutture verticali edifici in calcestruzzo armato in Sicilia

Tipologie di strutture verticali	n°	%
O-Pareti calc. Armato	69	3,0
P-Telai c.a. non tamponati	79	3,4
Q-Telai c.a. tampon. Deboli	1169	50,2
R-Telai c.a. tampon. Consistenti	1010	43,4
Dati non disponibili	8	0,3
TOTALE	2328	100

Tabella 20b: Strutture verticali in edifici in calcestruzzo armato in Sicilia (in percentuale)

Tipologie di strutture verticali	CT	ME	RG	SR	AG
O-Pareti calc. Armato	1,9	7,3	0,5	1,4	57,1
P-Telai c.a. non tamponati	2	10,7	0	0,3	0
Q-Telai c.a. tampon. Deboli	64	28,8	52,9	29,9	0
R-Telai c.a. tampon. Consistenti	31,9	53,2	46,3	67,4	0
Dati non disponibili	0	0	0,3	1	42,9
TOTALE					

Dall'analisi dei risultati presentati nelle tabelle 20a e 20b, il 43,4% degli edifici scolastici in calcestruzzo armato sono realizzati con telai a tamponature consistenti, mentre il 50,2% presentano tamponature deboli.

4.2 Stato delle strutture scolastiche

Analizzando i dati relativi alle classi tipologiche di vulnerabilità degli edifici scolastici in muratura, ottenuta dalle informazioni contenute nelle schede di vulnerabilità di 1° livello del progetto Save[2], è stata effettuata l'attribuzione degli edifici scolastici alle classi tipologiche di vulnerabilità, secondo i criteri definiti in [14]. La definizione delle classi di vulnerabilità a scopi macrosismici è data dalla scala EMS (European Macroseismic Scale), nell'ultima versione del 1998 [14] ed estende il range delle classi a disposizione, dalle tre (A, B, C) della MSK [15] a sei (A, B, C, D, E, F).

Attraverso l'attribuzione di ognuno degli edifici censiti ad una delle classi MSK sono state definite le figure 4.3, 4.4 e le tabelle 21a e 21b, valutando il numero degli edifici appartenenti a ciascuna categoria e la percentuale rispetto al totale nell'ambito territoriale considerato.

La definizione dello stato degli edifici scolastici proviene da un'attenta definizione iniziale della tipologia edilizia individuata da due parametri: tipologia verticale (TV) e tipologia orizzontale (TO).

Per poter classificare gli edifici in questione nell'ambito delle tredici tipologie riportate in tabella 17a, si è quindi adottato il criterio per il quale ogni edificio è rappresentato dalle tipologie verticali ed orizzontale più frequenti tra quelle presenti ai vari piani [16].

Tale metodologia deriva dalla necessità di stabilire la corrispondenza tra le strutture analizzate e la classe di vulnerabilità MSK (A, B, C) a cui corrisponde ogni singolo edificio al fine di valutare la vulnerabilità ad un fenomeno sismico [15].

Ai fini di una corretta utilizzazione delle tipologie strutturali verticali precedentemente definite, è stato necessario svincolarsi dalle definizioni strettamente legate ai materiali utilizzati, classificando le tipologie verticali in muratura in relazione alla qualità strutturale dell'involucro [16]:

1. Qualità Scadente

2. Qualità Media
3. Qualità Buona.

Associando le tipologie di seguito riportate alla qualità della muratura (tab. 22a) è stato possibile ottenere una classificazione dello stato qualitativo delle strutture indagate sul territorio siciliano.

Tabella 21a: Associazione tipologia strutturale con lo stato qualitativo di edifici in muratura

Muratura di qualità scadente	Muratura di qualità media	Muratura di buona qualità
A-Sacco	B-Sacco+ric	G-Blocco tufo o squadrata
C-Sbozzata	D-Sbozzata+ric	H-Blocco cls pesanti
E-Arrotondata	F-Arrotondata+ric	I-Blocco cls leggeri
	M-Mattoni Forati	L-Mattoni pieni o multif.
		T-Miste

Tabella 21b: Stato delle strutture in muratura

Stato delle strutture in muratura	n°	%
Muratura di qualità scadente	332	30,7
Muratura di qualità media	144	13,3
Muratura di buona qualità	541	50,0
Dati non disponibili	66	6,1
TOTALE	1083	

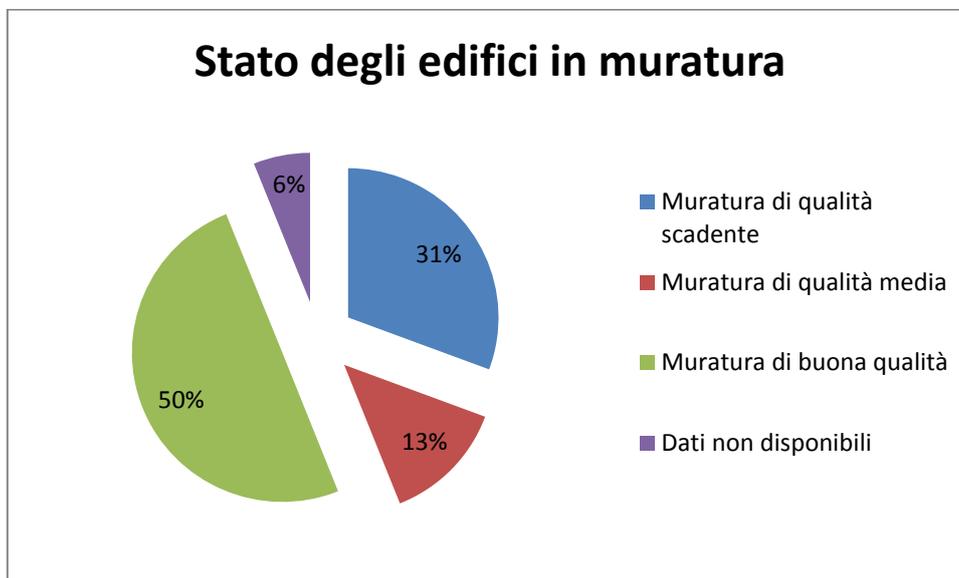


Figura 4.3: Stato degli edifici in muratura in percentuale

Dall'analisi dei risultati, è evidente che circa il 50% degli edifici è dotato di una muratura di buona qualità, mentre il 31% di una muratura scadente (fig. 4.3).

Utilizzando criteri simili anche per le strutture in cemento armato, si perviene alla tabella 22a:

Tabella 22a: Associazione tipologia strutturale con lo stato qualitativo edifici in c.a.

Qualità scadente	Qualità media	Buona qualità
P-Telai c.a. non tamponati	R-Telai c.a. tamponature. Consistenti	O-Pareti calc. Armato
Q-Telai c.a. tampon. Deboli		

Tabella 22b: Stato delle strutture in calcestruzzo armato

Stato delle strutture in calcestruzzo armato	n°	%
Qualità scadente	1248	53,6
Qualità media	1010	43,4
Buona qualità	65	2,8
Dati non disponibili	4,656	0,2
TOTALE	2328	100

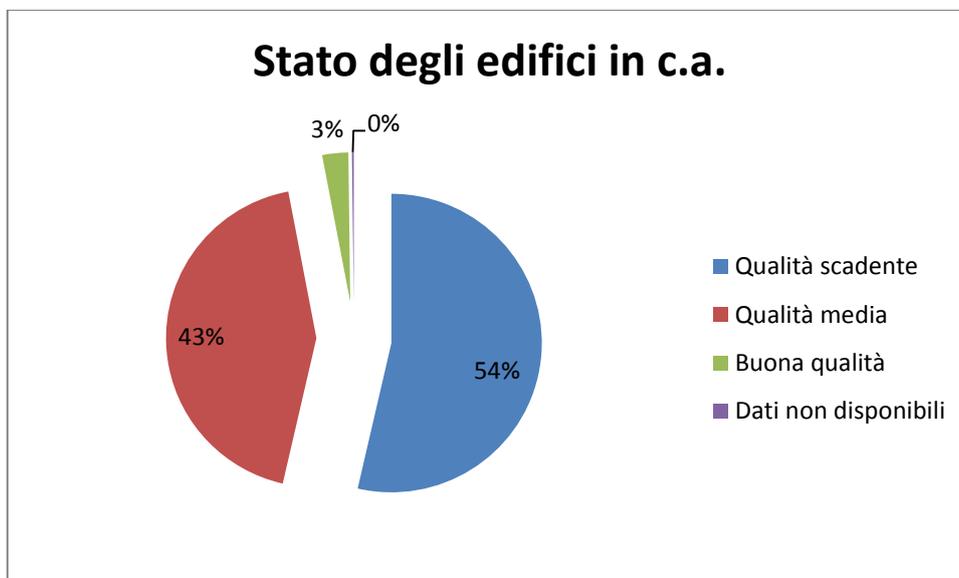


Figura 4.4: Stato degli edifici in c.a. in percentuale

Per quanto riguarda le strutture in calcestruzzo armato, è immediato notare come più della metà degli edifici investigati abbia una struttura qualitativamente scadente, è altresì rilevabile una bassa percentuale di edifici di buona qualità da un punto di vista strutturale.

4.3 Criticità emergenti sull’edilizia scolastica

Da una valutazione delle informazioni reperite in riferimento ai casi studio individuati, emerge un’immagine dell’edilizia scolastica fortemente permeata da situazioni di reale emergenza.

Un primo elemento rappresentativo della situazione attuale è la suddivisione degli edifici in tre gruppi principali, in relazione al periodo di costruzione:

- epoca di costruzione tra il 1900 e il 1930;
- epoca di costruzione tra il 1950 e il 1970;
- epoca di costruzione dal 1970 ad oggi.

Questa distinzione rispecchia momenti storici particolarmente significativi per il settore dell’edilizia scolastica; infatti, il primo periodo corrisponde a quello fascista che ha portato alla costruzione di numerose nuove strutture scolastiche; il secondo periodo fa seguito alle leggi sui finanziamenti statali per la

costruzione di nuovi edifici scolastici in zone depresse, con particolare attenzione all'industrializzazione dei processi edilizi e alla prefabbricazione; il terzo periodo raggruppa le strutture nate principalmente in risposta alle nuove esigenze di edifici per l'istruzione superiore, non dell'obbligo, e per le strutture dell'infanzia non private di cui vi era reale necessità.

La maggior parte degli edifici analizzati ha subito interventi sostanziali (sostituzione di componenti degli elementi tecnici) in periodi successivi all'anno di realizzazione o di trasformazione in sede scolastica, ma l'aspetto che solleva particolare interesse è che gli edifici che hanno subito gli interventi maggiori sono quelli costruiti nei periodi più recenti (soprattutto negli anni Sessanta e Settanta, con alcuni casi appartenenti anche alla fine degli anni Novanta) [17]. Questa tendenza ha portato in luce un aspetto particolarmente significativo: le tecnologie costruttive che contraddistinguono gli edifici dagli anni Sessanta in poi sono caratterizzate da materiali poveri e poco costosi, oppure da sperimentazioni che inseguivano gli aspetti stilistici e di rapidità di posa in opera piuttosto che quelli di durata nel tempo e di benessere indoor. Pertanto, il parco edilizio oggi a nostra disposizione versa in condizioni di inadeguatezza prestazionale e tecnologica sotto diversi punti di vista e, in alcuni casi, si tratta di situazioni di vera emergenza.

Purtroppo, le Pubbliche Amministrazioni sono raramente in grado di provvedere con interventi sostanziali a causa della scarsità dei fondi a disposizione e devono accontentarsi di rimediare alle situazioni maggiormente urgenti con soluzioni temporanee e non definitive al progressivo invecchiamento degli edifici.

In quest'ottica, i provvedimenti più frequenti consistono in:

- rifacimento dei manti di copertura, in particolare delle guaine impermeabilizzanti che, per la loro esposizione diretta e continuativa agli agenti atmosferici, sono soggette a deterioramento causando infiltrazioni;
- sostituzione dei vetri singoli delle finestre con vetri accoppiati di sicurezza;
- sostituzione dei sistemi di generazione di calore;
- sostituzione dei vecchi infissi (con vetro singolo, telaio in alluminio, ferro o legno, senza guarnizioni di tenuta, ormai obsoleti e deteriorati) con sistemi maggiormente performanti e a tenuta;
- inserimento di materiale isolante all'interno di coperture e, più raramente, in facciata (cappotto termico);
- sostituzione di caldaie tradizionali a scarso rendimento con generatori più efficienti;
- Inserimento di valvole termostatiche nei terminali di riscaldamento.

Addentrando maggiormente all'interno del campione di studi, a livello delle classi di elementi tecnici, è possibile individuare un insieme d'informazioni relative allo stato di fatto del costruito, utili alla determinazione delle criticità e delle potenzialità dello stesso e a una prima formulazione delle caratteristiche energetiche di involucro e di impianto.

L'analisi delle pareti perimetrali verticali evidenzia un territorio fortemente legato alla tradizione del mattone, utilizzato sia sotto forma di laterizi pieni per murature portanti, sia sotto forma di laterizi forati per tamponamenti di strutture intelaiate in cemento armato.

Per quanto riguarda le chiusure verticali trasparenti, si è notato che le loro caratteristiche variano in relazione all'appartenenza del fabbricato alla sfera comunale o provinciale. Infatti, gli edifici di competenza comunale presentano una percentuale maggiore del 35% circa di finestre con vetro singolo oppure di doppie finestre con vetro singolo, intendendo per queste ultime due telai separati, ognuno con un proprio vetro, montati ad una certa distanza tra loro e che presentano, generalmente differenti materiali per il telaio; di contro, gli edifici di competenza provinciale presentano una quota maggiore di infissi con vetrocamera. Il motivo di questa differenza consiste nel fatto che le Province hanno in gran parte provveduto alla sostituzione degli infissi, mentre i comuni trovano ancora numerosi ostacoli legati agli aspetti economici. In ogni caso, è da notare che in gran parte dei casi analizzati la finestra risulta essere l'elemento maggiormente disperdente dell'involucro edilizio, sia per la tecnologia costitutiva (ormai obsoleta) che per lo stato di conservazione.

Dal punto di vista del materiale che costituisce il telaio dell'infisso, la tendenza è assolutamente uniforme per comuni e province e vede un maggiore orientamento verso l'alluminio, mentre il legno è presente solo nei casi di edilizia storicizzata (attorno agli anni Venti e Trenta). In questo ultimo gruppo sono ancora

presenti, inoltre, numerosi casi di “ferro - finestra” che aspettano di essere sostituiti con componenti più performanti.

L’analisi delle tecnologie che costituiscono la chiusura orizzontale inferiore richiede un approfondimento specifico in relazione al reperimento dei dati. Infatti, la conoscenza del solaio a terra è possibile solo se sono stati effettuati interventi di manutenzione agli impianti o alle reti di scarico poiché, soprattutto per le strutture più vecchie, non è possibile reperire documentazioni tecniche di riferimento. Di conseguenza la percentuale di casi sconosciuti è maggiore rispetto alle altre voci.

Gli edifici indagati presentano una tecnologia costruttiva più rappresentativa del patrimonio esistente che è quella legata alla tradizione del solaio in laterocemento o in legno e tavelle in laterizio (o in tavole di legno), per quanto riguarda l’edilizia storicizzata. Il manto di copertura è fortemente influenzato dal contesto in cui la scuola si trova, poiché in un ambiente urbano si preferiscono gli elementi in cotto (coppi, marsigliesi, etc.), mentre nell’ambiente extraurbano si riscontrano molti casi di elementi piani quali guaine impermeabilizzanti e lamiera metalliche.

Si è riscontrato che il solaio di copertura è l’elemento tecnico in cui si riscontra maggiormente la presenza di isolante termico, generalmente sotto forma di lastre dello spessore di circa 5 cm.; infatti, molto spesso, si decide di provvedere alla posa in opera dell’isolamento termico in occasione di manutenzioni straordinarie del coperto, quali il rifacimento delle guaine impermeabilizzanti o la sostituzione degli elementi in cotto con nuove lastre di lamiera.

Anche per le partizioni orizzontali si evidenzia la presenza quasi assoluta del solaio in laterocemento, con alcuni casi di solaio in legno e tavelle (o tavole) negli edifici storici e di solaio in elementi in ferro in alcuni casi di recupero dell’esistente [17].

4.4 Fonti energetiche utilizzate

Le analisi condotte sul campione di studi dimostrano che il gas metano è il combustibile che trova attualmente il più largo impiego, ma sono ancora presenti edifici che utilizzano il gasolio come unica fonte energetica. Si tratta per lo più di edifici isolati e localizzati nelle periferie e nelle frazioni delle città e, pertanto, non ancora serviti dalla rete di distribuzione per motivi legati a condizioni locali. La buona notizia è che per alcuni edifici è stata prevista la conversione del combustibile da gasolio a biodiesel.

Le energie rinnovabili, malgrado i bandi nazionali a supporto e incentivo del loro utilizzo, non hanno ancora trovato ampio campo di applicazione e sono destinate ad essere energie di supporto alle tradizionali. Si tratta generalmente delle tecnologie di sfruttamento dell’energia solare attraverso impianti fotovoltaici finalizzati alla produzione di energia elettrica. Gli impianti che utilizzano potenziale termico dell’energia solare (collettori solari) trovano un campo di applicazione molto limitato: la quasi totalità dei casi riguarda le scuole per l’infanzia, in cui è richiesta la presenza di acqua calda sanitaria, e gli istituti scolastici che presentano particolari dotazioni sportive (ad es. piscine).

Grazie ai progetti nazionali di incentivazione dell’energia solare, l’utilizzo di fonti alternative sta andando sempre più diffondendosi; secondo i dati riportati all’interno del rapporto di Legambiente “Ecosistema scuola 2008”, la percentuale di edifici che utilizzano sistemi di generazione di energia da fonti rinnovabili è del 7,54%, quasi raddoppiata rispetto all’anno precedente [17].

5 Conclusioni

Nel contesto di una legislazione Europea ed Italiana che ha ormai adottato il concetto di Edificio ad energia netta (quasi) zero per ogni edificio pubblico di costruzione successiva al 2018 e l'idea di una progressiva riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente, il settore edilizio scolastico è caratterizzato, dal punto di vista dell'ottimizzazione delle prestazioni energetiche degli edifici, da ampie potenzialità di miglioramento.

Lo studio ha analizzato lo stato del patrimonio edilizio scolastico focalizzando maggiormente l'attenzione su consistenza, caratteristiche termofisiche e tipologiche del patrimonio scolastico investigato. Sono stati analizzati report finali di progetti scientifici, articoli di letteratura e sono stati interrogati gli enti locali preposti alla raccolta di tali dati statistici; è stata inoltre effettuata una campagna di raccolta di dati sperimentali nella provincia di Agrigento.

L'analisi proposta ha consentito di analizzare i dati di letteratura e di campo a disposizione ottenendo una caratterizzazione termofisica e costruttiva degli involucri utilizzati nell'edilizia scolastica.

In dettaglio sono stati esaminati dati medi relativi a trasmittanze termiche delle superfici opache e finestrate di edifici-tipo siciliani e le tipologie più rappresentative della pratica costruttiva nel dettaglio delle caratteristiche termofisiche e stratigrafiche.

Dal punto di vista costruttivo sono stati invece esaminati il numero di piani per edificio, volumi interni, qualità costruttiva delle superfici verticali ed orizzontali.

Inoltre, i risultati dello studio sono stati disaggregati per area territoriale, per periodo di costruzione e per grado di istruzione. Si è altresì approfondita l'analisi distinta delle scuole costruite in calcestruzzo armato ed in muratura, in quanto rappresentative della quasi totalità del patrimonio edilizio siciliano.

I risultati hanno mostrato come una quota molto rilevante delle scuole (80-90% in muratura, 50-60% in calcestruzzo armato, a seconda delle province analizzate) attualmente utilizzate, sia stata costruita prima del 1980. I dati medi di trasmittanza per le superfici opache e finestrate riportati nel corpo del rapporto per costruzioni tipiche di quel periodo o antecedenti, mostrano valori molto superiori a quelli ritenuti accettabili secondo la pratica costruttiva moderna e la legislazione vigente. E' possibile concludere dunque come, analizzando dati di letteratura rilevanti dal punto di vista statistico, una rilevante parte del patrimonio edilizio scolastico siciliano potrebbe beneficiare, sotto il profilo dei consumi energetici, di interventi di riqualificazione energetica volti al miglioramento delle prestazioni energetiche del sistema edificio-impianto.

6 Riferimenti bibliografici

1. Rapporto Nazionale sullo stato dell'edilizia scolastica, febbraio 2010, MIUR.
2. Dolce M., Martinelli A. (A cura di), Progetto SAVE-strumenti aggiornati per la vulnerabilità sismica del patrimonio edilizio e dei sistemi urbani. Task 2: Inventario e vulnerabilità degli edifici pubblici e strategici dell'Italia centro-meridionale, Vol. I – Caratteristiche tipologiche degli edifici per L'Istruzione e la Sanità, INGV/GNDT-Istituto Nazionale di geofisica e Vulcanologia / Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, L'Aquila, 2005.
3. The Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings, Official Journal of the European Union, 53, 2010.
4. DIRETTIVA 2012/27/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 25 ottobre 2012 sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE
5. Chiara Leone. Tesi di dottorato: Retrofit energetico. Linee guida per la riduzione dei consumi e miglioramento delle condizioni ambientali nell'edilizia scolastica. 2012
6. F Citterio M., Report di ricerca di sistema elettrico: Analisi statistica sul parco edilizio non residenziale e sviluppo di modelli di calcolo semplificati, Maggio 2009.
7. Tubi, N., Zanarini, G.. "Le murature in laterizio alveolato" Ed. Consorzio Alveolater Bologna, 1987.
8. CRESME ricerche S.p.A. Rapporto finale di ricerca di sistema elettrico; Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi Edificio-impianto: Caratterizzazione del parco immobiliare ad uso ufficio.
9. De Santoli, L. Building Energy and Environment Performance System (BEEPS): a programme for building energy certification in Italy. Building services engineering research & technology. Vol. 24 no.2, 61-68. Maggio 2003.
10. Raffellini, Rabitti, Zambonelli, Marchegiani, Munari, Pagliarini: Analisi conoscitiva del microclima dei componenti edilizi generatori del ponte termico, Ed. C.C.C. Bologna, 1987.
11. UNI 10351, Materiali da costruzione, Conduttività termica e permeabilità al vapore, Marzo 1994.
12. Spitler. J. Load Calculation Applications Manual SI Edition, ISBN 978-1-933742-72-4, 2010.
13. Corgnati S.P., Fabrizio, E., Ariaudo F., Rollino, L., Report di ricerca di sistema elettrico: Edifici tipo, indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio, ad uso scolastico (medie superiori e istituti tecnici) applicabilità di tecnologie innovative nei diversi climi italiani. 2010.
14. Di Pasquale, G., M. Dolce, A. Martinelli, Censimento di vulnerabilità a campione dell'edilizia corrente dei Centri abitati nelle regioni Abruzzo, Basilicata, Calabria, Campania, Molise, Puglia e Sicilia – Cap. 2.2, pagg. 76-106:
Analisi della Vulnerabilità. Dipartimento della Protezione Civile, 2000, Roma
15. Medvedev, S.V., Seismic Intensity Scale M.S.K. 76, Pul. Inst. Geophisics, Polish Academy of Sciences, A-6 (117), Varsavia, 1977
16. G. Di Pasquale, G. Orsini (1997), Proposta per la valutazione di scenari di danno conseguenti ad un evento sismico a partire dai dati ISTAT, Atti dell'8° Convegno nazionale L'Ingegneria Sismica in Italia, Taormina.
17. Boarin, P. RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA E AMBIENTALE DELL'EDILIZIA SCOLASTICA. IMMAGINI, OBIETTIVI, STRATEGIE, OPPORTUNITÀ. Diss. Università degli Studi di Ferrara, 2009.

Curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività

Il gruppo di ricerca del Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici (DEIM) dell'Università di Palermo si occupa di simulazioni termiche in regime dinamico degli edifici ad energia netta zero, di impianti basati su fonti energetiche rinnovabili e di Life cycle assessment (LCA).

In particolare il gruppo di ricerca del DEIM è attivo nell'analisi del caso-studio italiano (Leaf House), sviluppato congiuntamente con il gruppo Loccioni, secondo le linee guida del framework di analisi sviluppato nell'ambito della Sub-Task B della task 40.