



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO



Ricerca di Sistema elettrico

Stato dell'arte del patrimonio edilizio nazionale e analisi degli Attestati di Prestazione Energetica (APE)

D. Palladino, F. Pagliaro, V. Del Fatto, C. Lavinia,
F. Margiotta, L. Colasuonno

Report RdS/PTR2019/037

STATO DELL'ARTE DEL PATRIMONIO EDILIZIO NAZIONALE E ANALISI DEGLI ATTESTATI DI PRESTAZIONE ENERGETICA (APE)

D. Palladino, F. Pagliaro, V. Del Fatto, C. Lavinia, F. Margiotta, L. Colasuonno

Con il contributo di: N. Calabrese, R. Guida, N. Labia

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *1 - Edifici ad alta efficienza energetica*

Linea di attività: *LA1.15 - Stato dell'arte del patrimonio edilizio nazionale e analisi degli Attestati di Prestazione Energetica (APE)*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi

Responsabile del Work package: Domenico Iatauro

Indice

SOMMARIO.....	8
SUMMARY.....	8
1 INTRODUZIONE	10
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	11
2.1 STATO DELL'ARTE DELLA NORMATIVA IN MATERIA DI CERTIFICAZIONE ENERGETICA.....	12
2.1.1 <i>Excursus Normativo</i>	12
2.1.2 <i>Direttiva 2010/31/UE</i>	14
2.1.3 <i>Legge 90/2013</i>	15
2.1.4 <i>Decreto Interministeriale del 26 giugno 2015</i>	16
2.1.5 <i>Normativa tecnica</i>	18
2.2 STATO DELL'ARTE DEL PATRIMONIO EDILIZIO ITALIANO	23
2.2.1 <i>Indagine delle caratteristiche geometriche</i>	23
2.2.2 <i>Indagine delle caratteristiche termiche dell'involucro edilizio</i>	32
2.2.2.1 Involucro edilizio: componenti opache verticali	33
2.2.2.2 Involucro edilizio: componenti opache orizzontali	50
2.2.2.3 Involucro edilizio: componenti vetrati.....	60
2.2.3 <i>Indagine delle caratteristiche impiantistiche</i>	62
2.3 ANALISI DEL SIAPE.....	70
2.3.1 <i>Riorganizzazione del database</i>	71
2.3.2 <i>Verifica dei dati: analisi preliminari</i>	73
2.3.3 <i>Analisi delle caratteristiche geometriche</i>	75
2.3.4 <i>Analisi delle caratteristiche termiche dell'involucro edilizio</i>	84
2.3.5 <i>Analisi delle caratteristiche impiantistiche</i>	90
2.3.6 <i>Analisi delle prestazioni energetiche degli edifici</i>	98
2.4 RISULTATI	101
3 CONCLUSIONI.....	108
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	110
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	113

Indice delle Tabelle

Tabella 1 – Classificazione degli edifici in funzione della loro destinazione d'uso secondo D.P.R. 412/93 [8].....	13
Tabella 2 – Scala di classificazione degli edifici sulla base dell'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile dell'edificio di riferimento ($EP_{gl,nren,rif,standard(2019/21)}$) [19].	16
Tabella 3 – Tipologie di valutazione energetica per applicazioni omogenee all'intero edificio [21].	19
Tabella 4 – Distribuzione percentuale degli edifici residenziali secondo la superficie utile in ciascuna regione italiana (elaborazione dati da [27]).	31
Tabella 5 – Tipologie e nomenclatura delle componenti opache verticali maggiormente diffuse in Italia.....	34
Tabella 6 – Periodi di costruzione assunti per ogni componente opaco verticale.	34
Tabella 7 – Caratteristiche termiche dei materiali costituenti le strutture opache verticali.....	35
Tabella 8 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: muratura in pietra.....	36
Tabella 9 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: muratura in mattoni.....	36
Tabella 10 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: muratura in calcestruzzo.....	37
Tabella 11 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: muratura a sacco.	38

Tabella 12 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: muratura a cassa vuota in pietra.	39
Tabella 13 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: muratura a cassa vuota in mattoni.	40
Tabella 14 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: parete in calcestruzzo.	41
Tabella 15 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: parete in laterizio.	42
Tabella 16 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: parete a cassetta (parte 1).	43
Tabella 17 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: parete a cassetta (parte 2).	44
Tabella 18 – Caratteristiche termiche dei pacchetti ipotizzati: parete con paramento in mattoni.	45
Tabella 19 – Caratteristiche termiche dei pacchetti ipotizzati: parete con paramento in mattoni.	46
Tabella 20 – Caratteristiche termiche dei pacchetti ipotizzati: parete con paramento in pietra.	47
Tabella 21 – Caratteristiche termiche dei pacchetti ipotizzati: parete con paramento in pietra.	48
Tabella 22 – Caratteristiche termiche dei pacchetti ipotizzati: parete con blocco termico e cappotto.	49
Tabella 23 – Caratteristiche termiche dei pacchetti ipotizzati: parete leggera.	50
Tabella 24 – Tipologie e nomenclatura delle componenti opache orizzontali maggiormente diffuse in Italia.	50
Tabella 25 – Caratteristiche termiche dei materiali costituenti le strutture opache orizzontali.	51
Tabella 26 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio in legno confinante verso l'esterno.	52
Tabella 27 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio in laterocemento confinante verso l'esterno.	53
Tabella 28 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio alleggerito in EPS confinante verso l'esterno.	54
Tabella 29 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio in legno confinante verso il terreno.	54
Tabella 30 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio in calcestruzzo confinante verso terreno.	55
Tabella 31 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio in calcestruzzo e igloo verso il terreno. ...	55
Tabella 32 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio in laterocemento confinante verso terreno.	56
Tabella 33 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio alleggerito in EPS confinante verso terreno.	57
Tabella 34 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio in legno confinante verso zone non riscaldate.	57
Tabella 35 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio in acciaio e volterrane confinante verso zone non riscaldate.	58
Tabella 36 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio in acciaio e tavelloni confinante verso zone non riscaldate.	58
Tabella 37 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio alleggerito in EPS confinante verso zone non riscaldate o l'esterno.	59
Tabella 38 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio in laterocemento confinante verso zone non riscaldate.	60
Tabella 39 – Caratteristiche termiche medie dei vetri [21].	61
Tabella 40 – Caratteristiche termiche medie dei telai degli infissi [21].	61
Tabella 41 – Trasmittanza termica dell'infisso in funzione delle caratteristiche termiche del vetro e del telaio [21].	62
Tabella 42 – Verifica preliminare della Zona Climatica: percentuale del campione degli APE non verificato raggruppato per le sei zone climatiche.	74
Tabella 43 – Percentuale del campione degli APE ritenuto attendibile e non attendibile per ciascun parametro di controllo considerato, rispettivamente per il settore residenziale e non residenziale.	74
Tabella 44 – Percentuale di APE per specifici range di superficie utile e per fissati periodi di costruzione – edifici residenziali.	80
Tabella 45 – Percentuale di APE per specifici range di superficie utile e per fissati periodi di costruzione – edifici non residenziali.	81

Tabella 46 – Percentuale di APE per range di superficie disperdente e per fissati periodi di costruzione – edifici residenziali.....	82
Tabella 47 – Percentuale di APE per range di superficie disperdente e per fissati periodi di costruzione – edifici non residenziali.....	82
Tabella 48 – Percentuale di APE per range di volume lordo riscaldato e per fissati periodi di costruzione – edifici residenziali.....	83
Tabella 49 – Percentuale di APE per range di volume lordo riscaldato e per fissati periodi di costruzione – edifici non residenziali.....	83
Tabella 50 – Percentuale di APE per range di rapporto di forma (S/V) e per fissati periodi di costruzione – edifici residenziali.....	84
Tabella 51 – Percentuale di APE per range di rapporto di forma (S/V) e per fissati periodi di costruzione – edifici non residenziali.....	84
Tabella 52 – Percentuale di APE per diversi range di trasmittanza termica periodica e per fissati periodi di costruzione – edifici residenziali.....	87
Tabella 53 – Percentuale di APE per diversi range di trasmittanza termica periodica e per fissati periodi di costruzione – edifici non residenziali.....	88
Tabella 54 – Percentuale di APE per diversi range di area solare equivalente estiva per unità di superficie e per fissati periodi di costruzione – edifici residenziali.....	89
Tabella 55 – Percentuale di APE per diversi range di area solare equivalente estiva per unità di superficie e per fissati periodi di costruzione – edifici non residenziali.....	90
Tabella 56 – Distribuzione percentuale degli APE per destinazione d’uso e tipologia impiantistica per la climatizzazione invernale.....	94
Tabella 57 – Distribuzione percentuale degli APE per destinazione d’uso e tipologia impiantistica per la produzione di acqua calda sanitaria.....	94
Tabella 58 – Distribuzione percentuale degli APE per destinazione d’uso e tipologia impiantistica per la climatizzazione estiva.....	95
Tabella 59 – Distribuzione percentuale degli APE per destinazione d’uso e fissati range di potenza termica dell’impianto di riscaldamento.....	95
Tabella 60 – Distribuzione percentuale degli APE per destinazione d’uso e fissati range di potenza termica dell’impianto di produzione acqua calda sanitaria.....	96
Tabella 61 – Distribuzione percentuale degli APE per destinazione d’uso e fissati range di potenza termica dell’impianto di raffrescamento.....	96
Tabella 62 – Distribuzione percentuale degli APE per fissati range di potenza installata e per tipologia impiantistica: climatizzazione invernale.....	97
Tabella 63 – Distribuzione percentuale degli APE per fissati range di potenza installata e per tipologia impiantistica: produzione di acqua calda sanitaria.....	97
Tabella 64 – Distribuzione percentuale degli APE per fissati range di potenza installata e per tipologia impiantistica: climatizzazione estiva.....	98
Tabella 65 – Caratteristiche dimensionali dei modelli per destinazione d’uso.....	102
Tabella 66 – Zona Climatica e Gradi Giorno delle città scelte come le più rappresentative.....	103
Tabella 67– Livello di isolamento e caratteristiche termiche minime e massime calcolate per le componenti opache verticali e orizzontali (copertura (C), fondazione (F) e solaio di intermedio (I)) maggiormente diffuse in Italia.....	104
Tabella 68– Configurazioni di telaio e componente vetrata.....	105
Tabella 69– Caratteristiche termiche dei materiali costituenti le strutture opache verticali.....	106
Tabella 70– tipologie impiantistiche individuate per la climatizzazione invernale, climatizzazione estiva e la produzione di acqua calda sanitaria, per le destinazioni d’uso preminenti.....	107
Tabella 71– Percentuale del campione di APE suddiviso per range di potenza degli impianti termici e per le destinazioni d’uso più rappresentative – scala di colore dal verde scuro (maggiore frequenza) al bianco (frequenza nulla).....	107

Indice delle Figure

Figura 1 – Suddivisione del territorio nazionale in 6 zone climatiche in funzione dei Gradi Giorno [8].....	13
Figura 2 – Distribuzione percentuale delle unità del costruito nelle diverse regioni italiane (elaborazione dati da [27]).	24
Figura 3 – Ripartizione percentuale delle unità del costruito per le diverse destinazioni d’uso (elaborazione dati da [27]).	25
Figura 4 – Distribuzione percentuale delle unità del costruito nelle diverse regioni italiane per epoca di costruzione (elaborazione dati da [27]).	25
Figura 5 – Percentuale degli edifici residenziali, ripartita per le diverse regioni Italiane e caratterizzata da 1 o più piani fuori terra (elaborazione dati da [27]).	27
Figura 6 – Numero di piani fuori terra per tipologia edilizia ed epoca di costruzione [31, 32].	27
Figura 7 – Percentuale degli edifici residenziali, ripartita per le diverse regioni Italiane e caratterizzata da 1 o più abitazioni (elaborazione dati da [27]).	28
Figura 8 – Numero di abitazioni per tipologia edilizia ed epoca di costruzione [31, 32].	29
Figura 9 – Percentuale degli edifici residenziali ripartita per le diverse regioni italiane e realizzata in muratura portante, in calcestruzzo armato o da altra tipologia costruttiva (elaborazione dati da [27]).	30
Figura 10 – Percentuale di edifici residenziali ripartita per le diverse zone geografiche Italiane e caratterizzata da specifici range di superficie utile (elaborazione dati da [27]).	30
Figura 11 – Superficie media degli appartamenti per epoca di costruzione e tipologie edilizia [31, 32].	31
Figura 12 – Rapporto di forma medio per epoca di costruzione e tipologia edilizia [31, 32].	32
Figura 13 – Percentuale del campione indagato suddiviso per la tipologia impiantistica: riscaldamento (elaborazione dati da [27]).	63
Figura 14 – Percentuale del campione indagato suddiviso per combustibile utilizzato: riscaldamento (elaborazione dati da [27]).	64
Figura 15 – Numero medio di ore di accensione dell’impianto di riscaldamento (elaborazione dati da [27]).	64
Figura 16 – Percentuale del campione indagato suddiviso per tipologia impiantistica: raffrescamento (elaborazione dati da [27]).	65
Figura 17 – Percentuale del campione indagato raggruppato per tipologia di accensione dell’impianto di raffrescamento (elaborazione dati da [27]).	65
Figura 18 – Percentuale del campione indagato per tipologia impiantistica: produzione acqua calda sanitaria (elaborazione dati da [27]).	66
Figura 19 – Percentuale del campione indagato per tipo di combustibile utilizzato per produrre l’acqua calda sanitaria (elaborazione dati da [27]).	67
Figura 20 – Confronto della numerosità dei Comuni italiani riscontrati nel SIAPE con quelli dichiarati nel D.P.R. 412/93 [8].	70
Figura 21 – Ciclo di vita di un Database [46].	71
Figura 22 – Schema Entità Relazione dei dati APE.	72
Figura 23 – Distribuzione percentuale degli APE secondo destinazione d’uso secondo il DPR. 412/93.	75
Figura 24 – Distribuzione percentuale degli APE per motivazione.	76
Figura 25 – Distribuzione percentuale del campione degli APE raggruppato per periodo di costruzione.	77

Figura 26 – Distribuzione percentuale del campione degli APE raggruppato per range di superficie utile.	77
Figura 27 – Distribuzione percentuale del campione degli APE raggruppato per prefissati range di superficie disperdente.	78
Figura 28 – Distribuzione percentuale del campione degli APE raggruppato per prefissati range di volume lordo riscaldato.	79
Figura 29 – Distribuzione percentuale del campione degli APE raggruppato per prefissati range di rapporto di forma (S/V).	79
Figura 30 – Distribuzione percentuale degli APE per fissati range di trasmittanza termica periodica.	85
Figura 31 – Distribuzione percentuale degli APE per fissati range dell'area solare equivalente estiva per unità di superficie utile.	86
Figura 32 – Distribuzione percentuale degli APE per tipologia impiantistica dichiarata.	91
Figura 33 – Distribuzione percentuale degli APE per tipologia di combustibile dichiarato.	91
Figura 34 – Distribuzione percentuale degli APE per tipologia impiantistica a fonte energetica rinnovabile.	92
Figura 35 – Distribuzione percentuale per tipologia di lampade installate.	93
Figura 36 – Distribuzione percentuale del campione per fissati range dell'indice di Prestazione Energetica non rinnovabile.	99
Figura 37 – Distribuzione percentuale del campione per fissati range dell'indice di Prestazione Energetica rinnovabile.	99
Figura 38 – Indice di Prestazione Energetica rinnovabile medio per le diverse destinazioni d'uso.	100
Figura 39 – Distribuzione della trasmittanza termica in funzione dello spessore del componente opaco verticale.	105

Sommario

La certificazione energetica degli edifici si basa su metodi di calcolo che permettono di determinare il fabbisogno di energia in condizioni di utilizzo standard dell'edificio (asset rating). La procedura proposta, risulta essere poco dispendiosa per l'utente finale, ma porta al calcolo di consumi che si possono discostare in maniera anche significativa da quelli reali dell'edificio. L'utilizzo di metodologie meno approssimate, al contrario, permetterebbe di calcolare un fabbisogno energetico sicuramente più aderente al consumo effettivo, ma comporterebbero un maggior costo per l'utente finale.

La presente attività di ricerca triennale si pone come obiettivo la definizione di benchmark di riferimento che, integrando il metodo semplificato attualmente usato per la certificazione energetica degli edifici, permettano di restituire un consumo più realistico del fabbricato.

In considerazione della ricchezza di informazioni necessarie per il calcolo del fabbisogno energetico di un fabbricato, la definizione dei suddetti benchmark è stata basata sia su documentazione presente in Letteratura, che sui parametri necessari per la redazione di un Attestato di Prestazione Energetica (APE). In particolare, il primo anno di attività ha riguardato l'analisi dettagliata dello stato dell'arte del patrimonio edilizio nazionale, basata sia su dati Istat che su documentazione disponibile in Letteratura. Questa analisi ha permesso di evidenziare le principali caratteristiche geometriche, le proprietà termiche dell'involucro edilizio e le tipologie impiantistiche più significative degli edifici costruiti nel territorio italiano. Questi aspetti sono stati investigati per tutte le destinazioni d'uso in considerazione della distribuzione territoriale.

Gli aspetti emersi dalla valutazione sullo stato dell'arte sono stati supportati e integrati dall'analisi dei dati riportati negli APE che alimentano il Sistema Informativo sugli Attestati di Prestazione Energetica (SIAPE), realizzato e gestito da ENEA. I risultati emersi dai dati del SIAPE sono risultati essere il punto di forza del lavoro, grazie alle elevate potenzialità intrinseche all'analisi aggregata degli attestati, la quale ha permesso non solo di restituire un'immagine dettagliata delle caratteristiche geometriche, delle tipologie impiantistiche e dei vettori energetici impiegati per ciascun servizio energetico, ma anche di elaborare delle correlazioni tra i suddetti parametri.

Le analisi parametriche hanno permesso di individuare le destinazioni d'uso degli edifici più rappresentative, sia in termini di numerosità, che di prestazioni energetiche, nonché di caratterizzare le principali proprietà del sistema edificio-impianto nelle diverse epoche di costruzione.

I risultati ottenuti costituiranno la base di partenza per la definizione di modelli di simulazione che permetteranno il calcolo dei consumi energetici degli edifici sfruttando diversi profili di utilizzo, tramite i quali sarà possibile definire dei benchmark di riferimento per un calcolo più realistico dei consumi del fabbricato.

Summary

Energy demand evaluation of buildings is based on a method which implements a standard use profile of building (asset rating). This standard method is not an expensive procedure for the end-users but the calculated energy consumption can significantly differ from the real one. On the other hand, the use of more accurate methods would allow calculating of more reliable energy demand but it would be more expensive for the end-users.

In this context, this three-year research aims to define benchmarks able to return a more reliable energy consumption by incorporating the same standard method. Considering all the information needed for the energy demand calculation, the benchmarks will be based on both data found in the Literature and the ones generally required for the Energy Performance Certificate (EPC) calculation. For this reason, the first year of the activity was focused on a detailed Literature research about national building heritage. This analysis highlighted the main characteristics of buildings in terms of dimensional parameters, thermal properties of building envelope, and HVAC systems mainly used in buildings. The research was carried out considering both the different use of buildings and their local distribution.

The results of the Literature research were supported and integrated by the analysis of EPCs included in the national Informative System of Energy Performance Certificate (ISEPC), created and managed by ENEA. This

further analysis was the strength of the work as it is very power tool; in fact, it allowed to carry out aggregated analysis of the EPC data and to make different correlations between all these parameters.

The outcomes obtained by the Literature research and by the EPC analysis, allowed to identify the most representative use of buildings, in terms of sample size and of energy demand, as well as to define the main thermal properties of buildings envelope and the main characteristics of HVAC systems for the different year of construction.

The outcomes obtained in this work will be the starting point of the activity of the second year, i.e. for the implementation of simulation models which will be used for the energy consumption calculation of different kind of buildings by considering different use profiles. Based on the simulations outputs, it will be possible to define several benchmarks for a more reliable energy consumption of buildings.

1 Introduzione

Le tematiche energetiche hanno un ruolo di rilievo all'interno delle politiche europee, che è andato crescendo a partire dalla sottoscrizione del Protocollo di Kyoto nel 1997. Numerosi studi condotti a livello internazionale hanno identificato il settore edilizio come uno tra quelli più energivori, con una aliquota pari a circa il 40% del consumo energetico totale.

In un'ottica di risparmio ed efficienza energetica, diviene quindi fondamentale andare ad intervenire con particolare attenzione su questo settore. Per tale motivo, sono stati identificati e forniti diversi strumenti per il calcolo del consumo energetico degli edifici, quali, ad esempio, le diverse Energy Performance Building Directive (EPBD), Direttive Europee il cui scopo principale è quello di definire delle metodologie finalizzate al miglioramento delle prestazioni energetiche, di promuovere l'aumento dell'efficienza energetica degli edifici in relazione alle condizioni climatiche esterne e di fornire le prescrizioni relative alle condizioni microclimatiche degli ambienti interni.

Le Direttive Europee hanno permesso, quindi, lo sviluppo di una metodologia per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici e di classificarli attraverso degli indici energetici, in modo tale da avere informazioni sul consumo dell'edificio secondo un profilo di utilizzo standard. Tuttavia, è necessario sottolineare, che, sebbene questa sia una metodologia non particolarmente dispendiosa per l'utente finale, i risultati ottenibili possono differire anche in maniera significativa dal consumo reale del fabbricato.

Il ricorso a metodologie di calcolo meno approssimate, al contrario, permetterebbe di ottenere un risultato più aderente al consumo effettivo, ma, al tempo stesso, richiederebbe l'utilizzo di una procedura molto più complessa e un maggior costo per l'utente finale.

Basandosi su questi presupposti, la presente linea di ricerca ha l'intento di sviluppare dei benchmark di riferimento che integrino i risultati ottenuti tramite il metodo semplificato attualmente usato per il calcolo dei fabbisogni energetici, restituendo una stima più realistica dei consumi dell'edificio. Con lo scopo di minimizzare l'errore e in considerazione della ricchezza di informazioni necessarie per la stima dei consumi energetici degli edifici, il calcolo dei benchmark si baserà sia su dati disponibili in Letteratura che su quelli generalmente utilizzati per la redazione degli Attestati di Prestazione Energetica (APE).

Il primo anno dell'attività è stato focalizzato sullo studio dettagliato dello stato dell'arte del patrimonio edilizio nazionale, con lo scopo di evidenziare:

1. le categorie di edificio più rappresentative nel territorio;
2. le tipologie edilizie e le caratteristiche dimensionali del parco edilizio italiano nei diversi contesti territoriali;
3. le proprietà termiche delle componenti che costituiscono l'involucro edilizio al variare del periodo di costruzione;
4. le tipologie impiantistiche e il vettore energetico prevalentemente utilizzati per i diversi servizi energetici.

Tali parametri sono stati valutati per tutte le categorie di edificio e nelle diverse zone climatiche in cui è suddiviso il territorio nazionale, al fine di individuare quelle che possono essere ritenute più significative in termini sia di rappresentatività del campione, che di prestazione energetiche.

Oltre a una estesa indagine bibliografica, gli aspetti quantitativi dello stato dell'arte del patrimonio edilizio sono stati supportati anche dall'analisi degli APE contenuti all'interno del Sistema Informativo sugli Attestati di Prestazione Energetica (SIAPE). Questa ulteriore analisi ha permesso di delineare non solo i consumi energetici calcolati secondo un profilo di utilizzo standard dell'edificio (asset rating), ma anche di effettuare una serie di correlazioni tra parametri territoriali, geometrici e termici, tipici del sistema edificio-impianto.

Infine, sulla base dei risultati ottenuti, è stato possibile definire le caratteristiche geometriche, le proprietà termiche e le tipologie impiantistiche al variare della destinazione d'uso, nonché di individuare le tipologie edilizie ritenute più rappresentative del parco edilizio italiano.

Su questi risultati sarà possibile basare i modelli di simulazione, oggetto del secondo anno di attività, per il calcolo dei consumi energetici al variare delle condizioni al contorno e dei profili di utilizzo, nonché delle caratteristiche geometriche e proprietà termiche individuate.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

La valutazione del fabbisogno energetico ai fini della certificazione energetica degli edifici avviene mediante l'applicazione di metodi di calcolo definiti dalle normative tecniche di settore. Attraverso questi metodi di calcolo, il fabbisogno di energia è determinato in condizioni di utilizzo standard dell'edificio (asset rating), permettendo di classificare l'immobile in una specifica classe energetica basata sull'Indice di Prestazione Energetica non Rinnovabile.

Il ricorso all'asset rating permette l'uso di una metodologia poco dispendiosa per l'utente finale; tuttavia, basarsi su profili di utilizzo standard può portare alla stima di valori di consumo energetico che si discostino anche in maniera significativa da quelli reali dell'edificio.

Metodologie di calcolo meno approssimate, che sfruttino un profilo di utilizzo dell'edificio più realistico (tailored rating), permetterebbero di calcolare un fabbisogno energetico più aderente al consumo effettivo, comportando però un maggior costo per l'utente finale.

In quest'ottica, la presente attività di ricerca si pone come obbiettivo l'individuazione di benchmark di riferimento che integrino i risultati ottenuti tramite il metodo semplificato attualmente usato per il calcolo dei fabbisogni energetici, restituendo un consumo più realistico del fabbricato.

In considerazione della ricchezza di informazioni necessarie per il calcolo del fabbisogno energetico, la definizione dei suddetti benchmark non è stata basata solo su documentazione presente in Letteratura in materia, ma anche sui parametri necessari per la redazione di un APE.

Lo studio è iniziato, quindi, da una analisi dettagliata dello stato dell'arte del patrimonio edilizio nazionale che ha permesso di evidenziare importanti risultati relativi alle caratteristiche geometriche, le proprietà termiche dell'involucro edilizio e le tipologie impiantistiche più rappresentative degli edifici costruiti in Italia. Questi aspetti sono stati investigati per le diverse destinazioni d'uso e per la distribuzione sul territorio, facendo riferimento a dati Istat e analizzando precedenti studi condotti su tali tematiche presenti in Letteratura.

Gli aspetti quantitativi emersi dalle precedenti valutazioni sono stati supportati e integrati dall'analisi dei dati riportati negli APE contenuti nel Sistema Informativo sugli Attestati di Prestazione Energetica (SIAPE). Questi rappresentano uno strumento dalle elevate potenzialità: infatti, l'analisi aggregata degli attestati permette non solo di restituire un'immagine dettagliata delle caratteristiche geometriche, delle tipologie impiantistiche e dei vettori energetici impiegati per ciascun servizio energetico su tutto il territorio, ma anche di elaborare correlazioni tra i precedenti parametri.

Attualmente, il SIAPE, realizzato e gestito da ENEA ai sensi dell'art. 5 del Decreto Interministeriale 26 giugno 2015, è alimentato da 8 regioni e 2 province autonome. Si precisa che le analisi effettuate sui dati degli APE contenuti nel SIAPE sono state condotte a seguito di verifiche preliminari che hanno permesso di filtrare il campione di partenza da dati considerati meno attendibili o poco significativi.

I risultati di queste valutazioni hanno permesso di evidenziare non solo le caratteristiche geometriche degli edifici certificati, ma anche di fornire informazioni molto più accurate sulla componente impiantistica adottata per i diversi servizi energetici, nonché indicazioni sul consumo energetico standard per le diverse destinazioni d'uso. In questo modo è stato possibile delineare i principali parametri del sistema edificio-impianto che dovranno caratterizzare i modelli di simulazione, oggetto del secondo anno di attività.

Ai fini della presente trattazione, dopo un breve cenno sull'evoluzione normativa in materia energetica, sono illustrati i risultati emersi inizialmente dall'analisi dello stato dell'arte, supportata da dati Istat e da documentazione disponibile in Letteratura, e, a seguire, le principali conclusioni derivanti dall'analisi degli APE contenuti nel SIAPE.

In conclusione del lavoro, sulla base dei risultati ottenuti, sono sintetizzate le principali caratteristiche geometriche, le proprietà termiche, nonché le tipologie impiantistiche su cui si baseranno i modelli di simulazione, oggetto del secondo anno di attività.

2.1 Stato dell'Arte della Normativa in materia di certificazione energetica

2.1.1 Excursus Normativo

A seguito della crisi petrolifera del 1973, molti paesi Europei iniziarono a riflettere sulle proprie risorse energetiche e sull'inevitabilità di sfruttare le fonti rinnovabili in sostituzione di quelle fossili. In questo contesto, alcuni studiosi americani introdussero per la prima volta il concetto di sviluppo sostenibile come condizione necessaria per la stabilità economica ed ecologica [1]. Questo tema implica l'adozione di strategie mirate atte a ridurre non solo i consumi energetici e le emissioni di anidride carbonica, ma anche ad aumentare lo sfruttamento delle risorse rinnovabili a discapito di quelle fossili.

Le autorità internazionali cominciarono a studiare delle possibili soluzioni adottando diverse strategie: una delle prime fu la sottoscrizione del Protocollo di Kyoto nel 1997 che prevedeva l'obbligo di riduzione delle emissioni degli agenti inquinanti in misura non inferiore al 5% rispetto alle emissioni registrate nel 1990. Il Protocollo di Kyoto definì, inoltre, anche l'obiettivo da raggiungere entro il 2012 per ciascun paese aderente alla strategia.

Con lo scopo di perseguire gli obiettivi prefissati, l'Unione Europea ha avanzato molteplici iniziative: le strategie attuate prevedono entro il 2020 la riduzione delle emissioni di anidride carbonica del 20% rispetto il 1990 (l'anno di riferimento del Protocollo di Kyoto), un incremento dell'efficienza energetica del 20% del consumo totale di energia e un incremento dell'energia proveniente dalle fonti rinnovabili pari al 20% dei consumi totali. Questi obiettivi dovranno rispettivamente raggiungere il 40%, 32% e 32.5% entro il 2030.

Risulta chiaro che, per poter intervenire correttamente, è necessario prima individuare e conoscere quali siano i settori più energivori, tra i quali emerge quello edilizio, come sottolineato da molti studi internazionali condotti in questi anni [2-5]. Infatti, circa il 40% dei consumi totali è destinato a servizi energetici quali riscaldamento, illuminazione e raffrescamento degli edifici. Anche il parco edilizio italiano presenta una percentuale analoga, in questo caso la causa dell'elevato consumo è da ricercare principalmente nello stato di conservazione degli edifici, i quali nel 70-80% dei casi risalgono a prima del 1990, ossia precedenti all'emanazione di quasi tutte le normative in materia di energetica.

L'Italia è stato uno dei primi paesi a sensibilizzarsi sulle problematiche energetiche, già a partire dalla prima metà degli anni Settanta, sia a causa della scarsa disponibilità delle risorse (crisi energetica del '73), che delle problematiche legate al forte impatto sull'atmosfera e sull'ambiente dei prodotti della combustione.

Fino al 1991 il contenimento dei consumi energetici negli edifici è stato regolamentato dalla Legge n. 373 del 30 aprile 1976 [6], poi abrogata dalla Legge Quadro n. 10 del 1991 [7], che nacque con lo scopo di razionalizzare l'uso dell'energia (relativamente al servizio di riscaldamento), promuovere lo sviluppo delle fonti rinnovabili e ridurre i consumi specifici di energia nei processi produttivi. La Legge 10/91 [7] introdusse per la prima volta il concetto di certificazione energetica, che rappresenta oggi un importante strumento di azione e sensibilizzazione sulle problematiche del consumo energetico e della qualità energetica degli edifici. Al fine di rendere operativa la Legge Quadro 10/91, furono emanati diversi decreti di attuazione, tra i quali il D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412 [8] e successivamente il D.P.R. 21 dicembre 1999, n. 551 [9]. In particolare, il DPR 412/93 [8] introdusse alcuni aspetti molto importanti, tra i quali:

1. Classificazione del territorio italiano in sei zone climatiche (Figura 1);
2. Classificazione degli edifici in funzione della loro destinazione d'uso (Tabella 1);
3. Introduzione e definizione di criteri di progettazione, quali il calcolo del fabbisogno di energia normalizzato (FEN) e del rendimento globale stagionale dell'impianto termico.

Un forte strumento giuridico dato dal Parlamento Europeo è rappresentato dalla Direttiva 2002/91/CE [10], il cui scopo principale era quello di favorire il miglioramento della prestazione energetica degli edifici e di ridurre le emissioni di gas serra per rispettare gli accordi di Kyoto e contrastare il cambiamento climatico.

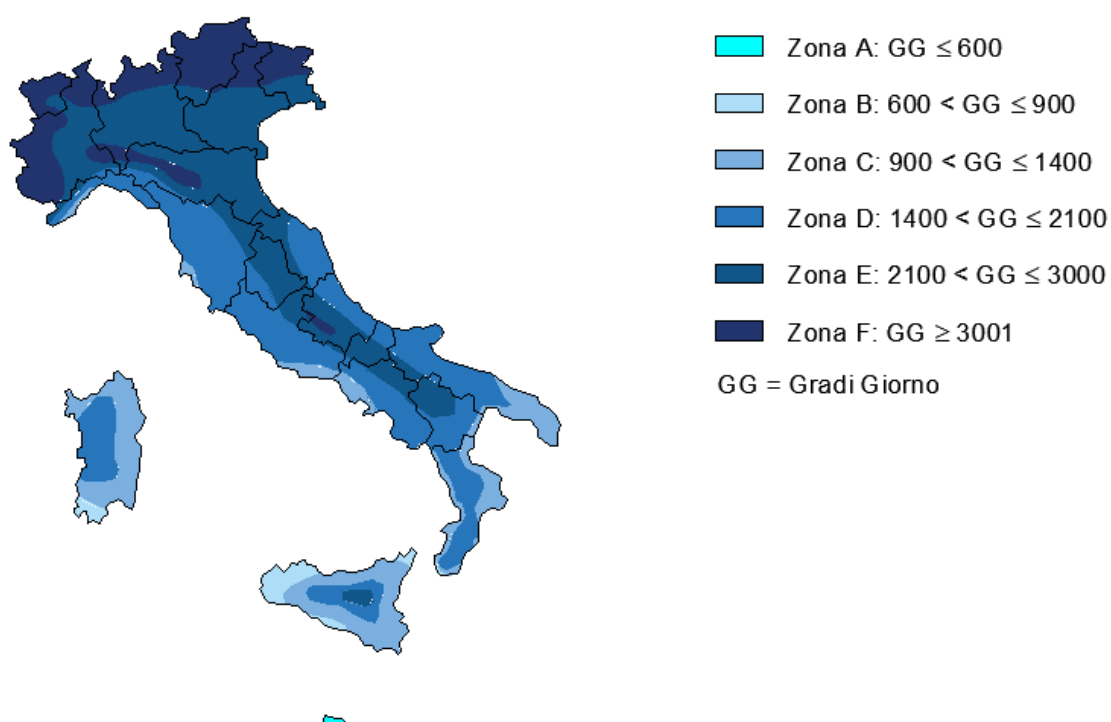


Figura 1 – Suddivisione del territorio nazionale in 6 zone climatiche in funzione dei Gradi Giorno [8].

Tabella 1 – Classificazione degli edifici in funzione della loro destinazione d’uso secondo D.P.R. 412/93 [8].

Categoria	Descrizione
E.1	Edifici adibiti a residenza e assimilabili
E.1 (1)	abitazioni adibite a residenza con carattere continuativo [...]
E.1 (2)	abitazioni adibite a residenza con occupazione saltuaria [...]
E.1 (3)	edifici adibiti ad albergo, pensione ed attività similari [...]
E.2	Edifici adibiti a uffici e assimilabili
E.3	Edifici adibiti a ospedali, cliniche o case di cura e assimilabili [...]
E.4	Edifici adibiti ad attività ricreative, associative o di culto e assimilabili
E.4 (1)	quali cinema e teatri, sale di riunione per congressi
E.4 (2)	quali mostre, musei e biblioteche, luoghi di culto
E.4 (3)	quali bar, ristoranti, sale da ballo
E.5	Edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili
E.6	Edifici adibiti ad attività sportive
E.6 (1)	piscine, saune e assimilabili
E.6 (2)	palestre e assimilabili
E.6 (3)	servizi di supporto alle attività sportive
E.7	Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili
E.8	Edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali e assimilabili

La Direttiva 2002/91/CE fu recepita a livello nazionale attraverso il decreto legislativo n. 192/2005 [11], integrato e corretto dal Decreto Legislativo n. 311/2006 [12], ma solo quattro anni dopo furono emanati i relativi decreti attuativi. I Decreti 192/05 e 311/06 introdussero il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, i criteri generali per la certificazione energetica e per la qualificazione degli esperti incaricati, nonché la promozione dell'uso razionale dell'energia.

Tra i decreti attuativi del 192/2005, il D.P.R. 2 aprile 2009, n. 59 [13] definì i criteri generali, le metodologie di calcolo e i requisiti minimi per la prestazione energetica del sistema edificio-impianto per la climatizzazione invernale e quella estiva e per la produzione dell'acqua calda sanitaria, mentre il D.M. del 26 giugno 2009 [14] fornì le procedure applicative della Certificazione Energetica degli edifici.

Successivamente, il D.Lgs. 28/2011 [15], di attuazione della Direttiva 2009/28/CE [16] sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, introdusse alcune importanti novità tra le quali la definizione degli obblighi di utilizzo delle fonti rinnovabili negli edifici di nuova costruzione e sottoposti a ristrutturazioni integrali.

La Direttiva del 2002 è stata quindi sostituita dalla Direttiva 2010/31/CE [17], recepita a livello nazionale tramite la Legge n. 90 del 3 agosto 2013 [18], di cui il Decreto Ministeriale del 26 giugno del 2015 [19] è il decreto attuativo. Quest'ultima rappresenta l'attuale quadro normativo di riferimento in materia di certificazione energetica che mettono a disposizione l'Attestato di Prestazione Energetica (APE) come strumento per valutare la qualità energetica di un immobile e promuovere l'efficienza energetica a livello nazionale.

Ai fini del presente studio, nei successivi paragrafi si riportano brevemente i principali concetti e le azioni introdotte dalle normative che regolamentano l'attuale Attestato di Prestazione Energetica (APE).

2.1.2 Direttiva 2010/31/UE

La Direttiva europea 2010/31/CE [17] nasce dall'esigenza di ridurre i consumi energetici del 20% entro il 2020, dei quali il 40% è attribuito al settore edilizio. Essa si basa sulla Direttiva 2009/28/CE [16] che promuoveva l'uso dell'energia rinnovabile al fine di raggiungere l'obiettivo della riduzione del 20% dell'energia globale consumata entro il 2020.

La Direttiva ha come obiettivo quello di:

1. migliorare le prestazioni energetiche degli edifici nell'ambito dell'UE, tenendo conto delle varie condizioni locali e climatiche;
2. stabilire i requisiti minimi e un quadro comune per il calcolo delle prestazioni energetiche;

La Direttiva introduce nuovi e importanti concetti, che possono essere sintetizzati principalmente in:

1. stabilire per ciascun Paese Membro dei requisiti minimi di rendimento energetico per il riscaldamento, raffrescamento, produzione acqua calda sanitaria, ventilazione, illuminazione e altri servizi energetici;
2. definizione di una metodologia comparativa per calcolare i livelli di costi ottimali al fine di ottemperare ai requisiti di rendimento energetico;
3. introduzione dell'obbligo per i nuovi edifici a soddisfare gli standard minimi;
4. introduzione dell'obbligo per gli edifici oggetto di ristrutturazione di soddisfare i requisiti applicabili;
5. utilizzo di un sistema di certificazione della prestazione energetica;
6. garantire controlli ai sistemi di riscaldamento e di condizionamento dell'aria.

Con lo scopo di accelerare la ristrutturazione economica degli edifici esistenti, promuovendo anche l'impiego delle tecnologie intelligenti negli stessi, la Direttiva 2010/31/CE è stata aggiornata e modificata nel 2018 dalla Direttiva 2018/844 [20]. Le modifiche apportate riguardano prevalentemente l'obbligo dei Paesi dell'UE ad elaborare strategie di ristrutturazione a lungo termine al fine di sostenere il rinnovamento degli edifici, ponendosi come obiettivo quello di realizzare un parco edilizio altamente energetico e decarbonizzato entro il 2050. Queste strategie devono essere definite in una tabella programmatica completa di misure ed indicatori di progresso misurabili, con lo scopo di verificare il raggiungimento dell'obiettivo fissato per il 2050.

di ridurre le emissioni di gas a effetto serra dell'80-95 % rispetto al 1990. La tabella programmatica deve includere le tappe intermedie relative al 2030, 2040 e 2050.

In sintesi, la nuova Direttiva emendata:

1. amplia l'ambito dell'attuale regime di ispezione dei sistemi di riscaldamento e di condizionamento dell'aria per includere sistemi combinati (con ventilazione) e tenere conto delle prestazioni dei sistemi in condizioni operative tipiche;
2. incoraggia l'uso delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione e delle tecnologie intelligenti di automazione e controllo negli edifici;
3. sostiene lo sviluppo delle infrastrutture per la ricarica intelligente dei veicoli elettrici nei parcheggi degli edifici;
4. introduce un indicatore di predisposizione degli edifici ai sistemi intelligenti con lo scopo di valutare la capacità degli edifici di adattarsi alle esigenze dell'occupante, di ottimizzare il suo funzionamento e di interagire con la rete.

Tutte le misure previste e adottate dalla Direttiva del 2010, in parte modificate da quella del 2018, mirano quindi ad una forte riduzione dei consumi energetici nel settore edilizio, sfruttando in particolare le fonti di energia rinnovabili. Questa forte riduzione dei consumi ha portato anche all'introduzione del concetto di "edifici a energia quasi zero", che rappresentano il target da raggiungere a partire dal 2020. "L'edificio a energia quasi zero" è definito come un edificio ad altissima prestazione energetica che viene determinata conformemente alla Direttiva. Il fabbisogno energetico deve essere molto basso, o quasi nullo, e dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili, compresa l'energia da fonti rinnovabili prodotta in loco o in zone limitrofe.

Come previsto dalla stessa Direttiva, la prestazione energetica degli edifici deve essere calcolata sfruttando una metodologia che consideri, oltre alle caratteristiche termiche dell'involucro edilizio, anche altri fattori, quali ad esempio il tipo di impianto di riscaldamento e condizionamento, l'impiego di energia da fonti rinnovabili, la presenza di elementi passivi o di sistemi di ombreggiamento, la qualità dell'aria interna e l'illuminazione naturale.

2.1.3 Legge 90/2013

La Legge n.90 del 2013 [18] integra e modifica il D.Lgs. 192/05 [11] e recepisce a livello nazionale la Direttiva Europea del 2010 [17]. Essa disciplina:

1. la metodologia per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici;
2. le prescrizioni e i requisiti minimi in materia di prestazioni energetiche degli edifici quando sono oggetto di nuova costruzione, ristrutturazioni importanti o riqualificazione energetica;
3. la definizione di un piano di azione per la promozione degli edifici a "energia quasi zero";
4. l'attestazione della prestazione energetica degli edifici;
5. la promozione dell'efficienza energetica degli edifici;
6. l'utilizzo delle fonti energetiche rinnovabili negli edifici;
7. la realizzazione di un sistema coordinato di ispezione periodica degli impianti termici negli edifici;
8. la promozione dell'uso razionale dell'energia attraverso l'informazione e la sensibilizzazione degli utenti finali;
9. la formazione e l'aggiornamento degli operatori del settore.

Ai fini del presente studio, è importante evidenziare come la Legge n.90 sopprima il vecchio l'Attestato di Certificazione Energetica (ACE), definito dal D.M. 2009 [14], e lo sostituisca con l'Attestato di Prestazione Energetica (APE), rispondente ai criteri indicati nella direttiva 2010/31/CE [17]. Il nuovo documento può essere rilasciato solo da esperti qualificati e indipendenti e deve attestare la prestazione energetica di un edificio attraverso l'impiego di specifici indicatori, fornendo all'utente finale delle raccomandazioni finalizzate al miglioramento dell'efficienza energetica dell'edificio in oggetto. La differenza tra i due attestati non è, quindi, solo formale: con il termine prestazione energetica si definisce la quantità annua di energia primaria effettivamente consumata, o che si prevede possa essere necessaria a soddisfare i bisogni energetici

dell'edificio relativi a servizi energetici per la climatizzazione invernale ed estiva, la produzione di acqua calda per usi igienico-sanitari, la ventilazione, l'illuminazione e gli impianti di trasporto di persone o cose, considerando un profilo di utilizzo standard dell'immobile.

L'energia consumata dall'edificio è espressa da indicatori che tengono conto sia delle caratteristiche termiche dell'involucro edilizio, che delle caratteristiche impiantistiche dei sistemi presenti.

Per le modalità relative alla redazione del nuovo APE, nonché per il calcolo degli indicatori energetici, la Legge rimanda ai decreti attuativi e alle norme tecniche di riferimento, di cui si riporta una breve descrizione di seguito.

2.1.4 Decreto Interministeriale del 26 giugno 2015

Il Decreto Interministeriale del 26 giugno 2015 [19] è il decreto attuativo della Legge n. 90 del 2013 [18]. Esso è costituito da tre allegati:

1. "Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici", cosiddetto "Decreto Requisiti Minimi";
2. "Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici";
3. "Schemi e modalità di riferimento per la compilazione della relazione tecnica di progetto ai fini dell'applicazione delle prescrizioni e dei requisiti minimi di prestazione energetica negli edifici".

Il Decreto Requisiti Minimi definisce le modalità di applicazione della metodologia di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, nonché le prescrizioni e i requisiti minimi in materia di prestazioni energetiche degli edifici e unità immobiliari.

Le Linee Guida definiscono il nuovo e attuale sistema di attestazione della prestazione energetica degli edifici comprendente i criteri generali, le metodologie per il calcolo, la classificazione degli edifici, le procedure amministrative, i format, nonché le norme per il monitoraggio e i controlli della regolarità tecnica e amministrativa. L'APE, in ottemperanza con la direttiva 2010/31/UE [17], è quindi lo strumento messo a disposizione per valutare e confrontare gli immobili da un punto di vista energetico. Esso permette infatti una chiara e immediata comprensione della convenienza economica all'acquisto o alla locazione, nonché nella realizzazione di specifici interventi di riqualificazione energetica dell'immobile stesso.

La classe energetica di appartenenza di un immobile viene determinata a partire dall'indice di prestazione energetica globale dell'edificio non rinnovabile ($EP_{gl,nren}$), per mezzo del confronto con una scala di classi prefissate, rappresentanti un intervallo di prestazione dell'edificio. La scala delle classi (Tabella 2) è definita dall'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile dell'edificio di riferimento ($EP_{gl,nren,rif,standard}$), che indica il limite di separazione tra le classi A1 e B ed è calcolato ipotizzando che nell'edificio siano installati elementi edilizi e impiantistici standard propri dell'edificio di riferimento (caratterizzati cioè dai valori riportati nel Decreto Requisiti Minimi).

Tabella 2 – Scala di classificazione degli edifici sulla base dell'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile dell'edificio di riferimento ($EP_{gl,nren,rif,standard(2019/21)}$) [19].

	Classe A4	$\leq 0.40 \cdot EP_{gl,nren,rif,standard(2019/21)}$
$0.40 \cdot EP_{gl,nren,rif,standard(2019/21)} <$	Classe A3	$\leq 0.60 \cdot EP_{gl,nren,rif,standard(2019/21)}$
$0.60 \cdot EP_{gl,nren,rif,standard(2019/21)} <$	Classe A2	$\leq 0.80 \cdot EP_{gl,nren,rif,standard(2019/21)}$
$0.80 \cdot EP_{gl,nren,rif,standard(2019/21)} <$	Classe A1	$\leq 1.00 \cdot EP_{gl,nren,rif,standard(2019/21)}$
$1.00 \cdot EP_{gl,nren,rif,standard(2019/21)} <$	Classe B	$\leq 1.20 \cdot EP_{gl,nren,rif,standard(2019/21)}$
$1.20 \cdot EP_{gl,nren,rif,standard(2019/21)} <$	Classe C	$\leq 1.50 \cdot EP_{gl,nren,rif,standard(2019/21)}$
$1.50 \cdot EP_{gl,nren,rif,standard(2019/21)} <$	Classe D	$\leq 2.00 \cdot EP_{gl,nren,rif,standard(2019/21)}$
$2.00 \cdot EP_{gl,nren,rif,standard(2019/21)} <$	Classe E	$\leq 2.60 \cdot EP_{gl,nren,rif,standard(2019/21)}$
$2.60 \cdot EP_{gl,nren,rif,standard(2019/21)} <$	Classe F	$\leq 3.50 \cdot EP_{gl,nren,rif,standard(2019/21)}$
	Classe G	$> 3.50 \cdot EP_{gl,nren,rif,standard(2019/21)}$

Ai fini della redazione dell'APE e dell'assegnazione della classe energetica, l'indice di prestazione $EP_{gl,nren}$ esprime la quantità annua di energia primaria non rinnovabile necessaria per soddisfare i bisogni energetici connessi ad un uso standard dell'edificio. Tale indice non tiene conto del solo fabbisogno di energia per la climatizzazione invernale, per la climatizzazione estiva, per la ventilazione, per la produzione di acqua calda sanitaria, per l'illuminazione e per il trasporto di persone o cose, ma anche dell'energia ausiliaria dei sistemi impiantistici presenti, inclusi i sistemi di cogenerazione, teleriscaldamento e fonti rinnovabili.

In aggiunta all'indice globale $EP_{gl,nren}$, sono valutati anche gli indici di prestazione energetica parziali, relativi cioè alle prestazioni energetiche dei singoli servizi energetici presenti nell'edificio, anch'essi espressi in kWh/m²anno. In particolare, l'indice di prestazione $EP_{gl,nren}$ è dato dalla somma dei fabbisogni di energia non rinnovabile dei servizi energetici presenti all'interno dell'immobile, ossia climatizzazione invernale, climatizzazione estiva, produzione di acqua calda sanitaria, ventilazione meccanica, illuminazione e trasporto di persone o cose. Tuttavia, il calcolo della prestazione energetica si basa solo sui servizi energetici effettivamente presenti nell'edificio oggetto di attestato: solo la climatizzazione invernale si considera sempre presente e, nel solo settore residenziale, la produzione di acqua calda sanitaria. Nel caso di assenza dell'impianto a servizio di uno dei servizi energetici obbligatoriamente presenti, è necessario simulare tali impianti in maniera virtuale, ossia considerando che siano presenti gli impianti standard con le caratteristiche indicate nel decreto stesso.

Per la determinazione della prestazione energetica degli immobili, sono disponibili procedure e metodi di calcolo standardizzati con lo scopo di renderne omogenea l'applicazione a livello territoriale, fornire una più efficace e corretta informazione dei cittadini, minimizzare i costi per gli utenti finali. Le procedure di determinazione della prestazione energetica contemplano le attività di reperimento e di scelta dei dati di ingresso, di applicazione del corretto metodo di calcolo, di espressione degli indici di prestazione energetica in termini di energia primaria e di individuazione degli interventi di miglioramento dell'efficienza energetica. I metodi di calcolo sono invece gli algoritmi, stabiliti dalle norme tecniche di riferimento, utilizzati per calcolare gli indicatori numerici di prestazione energetica richiesti, a partire dagli opportuni dati di ingresso. In merito alle procedure è possibile utilizzare i seguenti metodi di calcolo:

1. Metodo di calcolo di progetto o di calcolo standardizzato: applicabile a tutte le tipologie edilizie, sia per gli edifici nuovi che per quelli esistenti, indipendentemente dalla loro dimensione;
2. Metodo di calcolo da rilievo sull'edificio: prevede il metodo analitico (applicabile a tutti gli edifici esistenti e consistente nel rilievo in situ dell'edificio) e il metodo semplificato (applicabile esclusivamente agli edifici o alle unità immobiliari residenziali esistenti con superficie utile inferiore o uguale a 200 m²).

La procedura di calcolo di progetto o di calcolo standardizzato prevede la valutazione della prestazione energetica a partire dai dati di ingresso relativi sia al clima e all'uso standard dell'edificio, che alle caratteristiche dell'edificio e degli impianti, così come rilevabili dal progetto energetico.

La procedura di calcolo da rilievo sull'edificio prevede, invece, la valutazione della prestazione energetica a partire dai dati di ingresso rilevati direttamente sull'edificio esistente, sulla base dei quali si esegue la valutazione della prestazione energetica secondo l'opportuno metodo di calcolo. In questo caso le modalità di reperimento dei dati di ingresso relativi all'edificio possono essere:

- basate su procedure di rilievo supportate anche da indagini strumentali effettuate secondo le normative tecniche di riferimento vigenti o, in mancanza delle norme, dalla letteratura tecnico-scientifica;
- ricavate per analogia costruttiva con altri edifici e sistemi impiantistici coevi, integrate da banche dati o abachi nazionali, regionali o locali.

Ai fini della redazione dell'APE, sono rispettati i seguenti criteri per l'applicazione delle procedure di calcolo:

1. in caso di edifici di nuova costruzione o di edifici esistenti sottoposti a ristrutturazioni importanti, si applica la procedura di calcolo di progetto o di calcolo standardizzato;

2. per gli edifici esistenti non sottoposti a ristrutturazione importante, ferma restando la possibilità di avvalersi della procedura di calcolo di progetto o di calcolo standardizzato, si può applicare la procedura di calcolo da rilievo.

È importante sottolineare come il calcolo deve essere condotto mensilmente e in regime quasi stazionario; in particolare, ai fini della verifica dei requisiti minimi o dell'attestazione della prestazione energetica il calcolo deve essere condotto in condizioni standard (le cosiddette valutazioni A1 ed A2, indicate dalle specifiche tecniche UNI/TS 11300).

In base a quanto previsto dal decreto legislativo e dal decreto interministeriale, inoltre, ogni APE deve riportare obbligatoriamente:

- a) la prestazione energetica globale dell'edificio, sia in termini di energia primaria totale, che di energia primaria non rinnovabile, attraverso i rispettivi indici;
- b) la classe energetica determinata attraverso l'indice di prestazione energetica globale dell'edificio, espresso in energia primaria non rinnovabile;
- c) la qualità energetica del fabbricato, rispecchiante la capacità a contenere i consumi energetici per il riscaldamento e il raffrescamento;
- d) i valori di riferimento, quali i requisiti minimi di efficienza energetica vigenti a norma di legge;
- e) le emissioni di anidride carbonica;
- f) l'energia esportata;
- g) le raccomandazioni per il miglioramento dell'efficienza energetica dell'edificio con le proposte degli interventi più significativi ed economicamente convenienti, separando la previsione di interventi di ristrutturazione importanti da quelli di riqualificazione energetica;
- h) le informazioni correlate al miglioramento della prestazione energetica, come gli incentivi di carattere finanziario disponibili al momento del rilascio dell'attestato e l'opportunità di eseguire diagnosi energetiche.

Ulteriori indicazioni fornite dal decreto riguardano il sistema di archiviazione degli APE; in particolare, le Regioni e le Province autonome, al fine dell'effettuazione dei controlli della qualità dell'attestazione della prestazione energetica reso dai soggetti certificatori, definiscono piani e procedure di controllo che consentano di analizzare almeno il 2% degli APE depositati territorialmente in ogni anno solare, mentre l'ENEA, ha il compito di istituire il Sistema Informativo sugli Attestati di Prestazione Energetica (SIAPE) alimentato dagli APE delle Regioni e delle Province autonome.

2.1.5 Normativa tecnica

La determinazione delle prestazioni energetiche degli edifici richiede metodi di calcolo per:

1. il fabbisogno di energia termica utile per il riscaldamento e il raffrescamento ambiente;
2. il fabbisogno di energia termica utile per acqua calda sanitaria;
3. il fabbisogno di energia per la ventilazione meccanica;
4. l'efficienza e il fabbisogno di energia primaria degli impianti di climatizzazione invernale;
5. l'efficienza e il fabbisogno di energia primaria per la produzione di acqua calda sanitaria;
6. l'efficienza e il fabbisogno di energia primaria degli impianti di climatizzazione estiva;
7. il fabbisogno di energia per l'illuminazione degli ambienti interni ed esterni di pertinenza dell'edificio;
8. la quota di energia rinnovabile utilizzata per la climatizzazione invernale, la climatizzazione estiva, ventilazione, produzione di acqua calda sanitaria e illuminazione;
9. la conversione finale dei flussi di energia consegnata ed esportata in energia primaria, emissioni di CO₂, costi ed altri indicatori complementari.

Per il calcolo dei fabbisogni di energia termica, delle efficienze, dell'energia primaria necessaria a ciascun servizio energetico, nonché delle quote dell'energia rinnovabile, il quadro normativo precedentemente esposto fa quindi riferimento a specifiche norme tecniche, ossia la serie delle UNI/TS 11300 che definisco

metodi di calcolo specifici per ciascun servizio energetico. In particolare, la specifica tecnica UNI/TS 11300 è suddivisa nelle seguenti sei parti:

1. UNI/TS 11300 - 1 [21]: determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale;
2. UNI/TS 11300 - 2 [22]: determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali;
3. UNI/TS 11300 - 3 [23]: determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva;
4. UNI/TS 11300 - 4 [24]: utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria;
5. UNI/TS 11300 - 5 [25]: calcolo dell'energia primaria e della quota di energia da fonti rinnovabili;
6. UNI/TS 11300 - 6 [26]: determinazione del fabbisogno di energia per ascensori, scale mobili e marciapiedi mobili.

Il pacchetto di norme contempla tutte le possibili applicazioni previste dalla normativa europea (riportate in Tabella 3) quali il calcolo di progetto (design rating), la valutazione energetica di edifici attraverso il calcolo in condizioni standard (asset rating) o in particolari condizioni climatiche e di esercizio (tailored rating). Le valutazioni energetiche sul progetto (A1) e standard (A2) permettono di determinare un fabbisogno convenzionale, utile per confrontare edifici indipendentemente dal loro reale utilizzo. L'asset rating (A2) è quello previsto per la redazione degli Attestati di Prestazione Energetica; solo in caso di edifici di nuova costruzione è possibile fare utilizzo di dati progettuali per l'edificio (valutazione mista A1-A2). La valutazione adattata all'utenza (A3) può consentire invece una stima più realistica dei consumi energetici, ed è quella da utilizzare per la redazione di diagnosi energetiche; essa si basa sulle effettive condizioni di utilizzo in termini di livelli di occupazione e utilizzo dell'edificio nonché dell'impianto, del quale si adottano i reali valori di funzionamento.

Tabella 3 – Tipologie di valutazione energetica per applicazioni omogenee all'intero edificio [21].

Tipo di valutazione		Dati di ingresso		
		Uso	Clima	Edificio
A1	sul progetto (design rating)	Standard	Standard	Progetto
A2	standard (asset rating)	Standard	Standard	Reale
A3	adattato all'utenza (tailored rating)	In funzione dello scopo		Reale

In riferimento alla Parte 1 della UNI/TS [21], essa definisce, con riferimento al metodo quasi statico su base mensile, la seguente procedura di calcolo del fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale ed estiva:

- ✓ definizione dei confini dell'insieme degli ambienti climatizzati e non climatizzati dell'edificio;
- ✓ definizione dei confini delle diverse zone di calcolo, se presenti;
- ✓ definizione delle condizioni interne di calcolo e dei dati di ingresso relativi al clima esterno;
- ✓ calcolo, per ogni mese e per ogni zona dell'edificio, dei fabbisogni ideali di energia termica per riscaldamento ($Q_{H,nd}$) e raffrescamento ($Q_{C,nd}$);
- ✓ calcolo della stagione di riscaldamento e di raffrescamento;
- ✓ eventuale ricalcolo dei fabbisogni di energia sulle frazioni di mese comprese rispettivamente nelle stagioni di riscaldamento e di raffrescamento per i mesi estremi della stagione di riscaldamento e di raffrescamento;
- ✓ eventuale calcolo, per ogni mese o frazione di mese e per ogni zona dell'edificio, dei fabbisogni di energia termica per umidificazione ($Q_{H,hum,nd}$) e per deumidificazione ($Q_{C,dhum,nd}$);
- ✓ aggregazione dei risultati relativi ai diversi mesi e alle diverse zone servite dagli stessi impianti.

I fabbisogni ideali di energia vengono determinati attraverso le seguenti relazioni matematiche:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{gn} \quad (1)$$

$$Q_{C,nd} = Q_{gn} - \eta_{C,ls} \cdot Q_{C,ht} \quad (2)$$

Dove

- $Q_{H,ht}$ è lo scambio di energia termica totale nel caso di riscaldamento, espresso in MJ;
- $Q_{C,ht}$ è lo scambio di energia termica totale nel caso di raffrescamento, espresso in MJ;
- Q_{gn} sono gli apporti totali di energia termica, espressi in MJ;
- $\eta_{H,gn}$ è il fattore di utilizzazione degli apporti di energia termica;
- $\eta_{C,ls}$ è il fattore di utilizzazione delle dispersioni di energia termica;

Lo scambio di energia termica totale, viene quindi calcolato come somma di due contributi: quello associato allo scambio termico per dispersione (Q_{tr}) e quello dovuto per ventilazione (Q_{ve}). Gli apporti di energia termica, invece, sono dati dalla somma del contributo legato alla presenza di sorgenti interne (Q_{int}) e agli apporti di energia dovuti alla radiazione solare incidenti sui componenti vetrati ($Q_{sol,w}$).

Il metodo di calcolo appena descritto risulta essere un bilancio mensile di energia termica di tipo statico che viene condotto a livello di zona termica. In accordo con i principi che stanno alla base della Termodinamica, e in particolar modo della Trasmissione del calore, esso comprende:

- ✓ lo scambio termico per trasmissione tra ambiente climatizzato e ambiente esterno;
- ✓ lo scambio termico per trasmissione tra ambiente climatizzato e altri ambienti confinanti che si trovano a temperatura diversa da quella di progetto;
- ✓ lo scambio termico per ventilazione degli ambienti che sia naturale o regolata da un impianto di ventilazione meccanica;
- ✓ il contributo degli apporti interni di energia dovuti a persone o apparecchiature, illuminazione o altre fonti che dissipano energia;
- ✓ gli apporti termici solari sia diretti (attraverso le superfici vetrate) che indiretti (attraverso l'involucro edilizio opaco);
- ✓ l'effetto della riduzione degli apporti a causa di schermature e/o ostruzioni esterne;
- ✓ le dispersioni di calore dovute alla presenza di ponti termici, i quali possono essere determinati anche mediante calcolo agli elementi finiti.

Dalla descrizione appena fatta, si evince come il calcolo previsto dalla UNI/TS 11300 non tenga conto dell'effettivo comportamento dinamico dei diversi componenti, se non in parte attraverso il coefficiente correttivo di utilizzazione degli apporti termici; questo, infatti, permette di considerare che una parte degli apporti interni viene utilizzata nel bilancio per la riduzione del fabbisogno energetico.

La UNI/TS 11300 - 2 [22], invece, fornisce indicazioni per il calcolo dei fabbisogni di acqua calda sanitaria e per la valutazione delle perdite e dei rendimenti degli impianti per la climatizzazione invernale. Essa fornisce anche il metodo di calcolo per la determinazione del fabbisogno di energia per il servizio di ventilazione meccanica e le indicazioni e i dati nazionali per la determinazione dei fabbisogni di energia legati al servizio di illuminazione artificiale.

Relativamente al calcolo dei rendimenti, essa permette di calcolarli considerando i diversi sottosistemi dell'impianto, ossia, generazione, distribuzione, emissione e regolazione. Per ciascuno di questi, sono fornite indicazioni per il calcolo del fabbisogno di energia richiesta, l'energia ausiliaria necessaria per il funzionamento del sottosistema e le perdite attribuibili. È importante sottolineare come la norma fornisca dati e metodi per il calcolo dei rendimenti e delle perdite dei sottosistemi di generazione alimentati con combustibili fossili liquidi o gassosi. Per vettori energetici diversi da quelli fossili, si deve fare riferimento alla UNI TS 11300-4 [24].

Oltre all'appendice A e B, che forniscono rispettivamente il calcolo delle perdite di distribuzione e la determinazione delle perdite di generazione, la UNI/TS 11300 – 2 [22] presenta altre appendici, quali:

1. Appendice C per il calcolo dei fabbisogni di energia per la ventilazione meccanica e per la climatizzazione invernale in presenza di impianti aeraulici;
2. Appendice D per il calcolo dei fabbisogni di energia per l'illuminazione la quale si effettua solo per edifici a destinazione d'uso non residenziale;
3. Appendice E per il calcolo della prestazione energetica di edifici non dotati di impianto di climatizzazione invernale e/o di produzione di acqua calda sanitaria.

Da quanto detto, contrariamente alla UNI/TS 11300 - 1 [21], emerge come la specifica non fornisca dati univoci essendo questi in funzione della tipologia impiantistica adottata (in termini di generazione, regolazione, emissione e distribuzione); pertanto, per i dati e il metodo di calcolo dettagliato si rimanda alla UNI/TS 11300 – 2 [22].

In presenza della climatizzazione estiva, il calcolo dell'energia primaria e dei rendimenti attribuibili al servizio energetico sono invece definiti dalla parte 3 del pacchetto 11300 [23]. Si precisa che essa si applica unicamente ad impianti fissi di climatizzazione estiva con macchine frigorifere azionate elettricamente o ad assorbimento. La procedura di calcolo si articola nelle seguenti fasi:

- ✓ determinazione del fabbisogno ideale di raffrescamento $Q_{C,nd}$, secondo la UNI/TS 11300-1 [21];
- ✓ calcolo delle perdite di emissione, regolazione, distribuzione ed accumulo dell'impianto;
- ✓ calcolo dell'energia eventualmente recuperata;
- ✓ calcolo del fabbisogno per trattamento dell'aria Q_v ;
- ✓ calcolo del fabbisogno di energia elettrica per ausiliari degli impianti di climatizzazione Q_{aux} ;
- ✓ calcolo del coefficiente di prestazione medio mensile η_{mm} delle macchine frigorifere, attraverso la valutazione di dati prestazionali di riferimento forniti dai costruttori;
- ✓ calcolo del fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione estiva $Q_{C,P}$ mediante la seguente relazione:

$$Q_{C,P} = \sum_k Q_{aux,k} \cdot f_{p,el} + \sum_k \frac{[Q_{C,nd,k} + Q_{v,k}]}{\eta_{mm,k}} \cdot f_{p,x} \quad [kWh]$$

Dove:

- $Q_{C,r}$ è il fabbisogno effettivo per raffrescamento (kWh) dato dalla differenza tra $Q_{C,nd}$ e le perdite totali attribuibili a ciascun sottosistema dell'impianto più l'eventuale energia termica recuperata;
- $f_{p,el}$ è il fattore di conversione da energia elettrica ad energia primaria, determinato secondo la [22];
- $f_{p,x}$ è il fattore di conversione in energia primaria del vettore energetico utilizzato dal generatore;
- k è il mese k -esimo della stagione di climatizzazione estiva, determinata secondo la [21];
- x è l'indice che indica le diverse fonti di energia in ingresso.

In caso di produzione di energia termica da fonti energetiche rinnovabile o con sistemi di produzione comunque diversi da quelli previsti dalla UNI/TS 11300-2 [22], si deve fare riferimento con quanto riportato invece nella UNI/TS 11300-4 [24]. In particolare, le tecnologie considerate come rinnovabili sono:

1. impianti solari termici;
2. generatori a combustione alimentati a biomasse;
3. pompe di calore;
4. impianti fotovoltaici;
5. cogeneratori.

Le procedure di calcolo permettono di valutare il rispetto degli obiettivi energetici imposti da normative vigenti, di confrontare le prestazioni energetiche con diverse tipologie impiantistiche, di calcolare il risparmio di energia conseguibile mediante interventi sugli impianti, e di calcolare il risparmio di energia primaria nell'uso di energie rinnovabili. Come per la parte 2 [22], anche in questa la metodologia fornita varia al

cambiare del sistema impiantistico considerato; pertanto per i metodi di calcolo specifici, si rimanda alla parte 4 [24].

La UNI/TS 11300 – 5 [25] permette il calcolo dell'energia primaria e della quota di energia da fonti rinnovabili. Come riportato nella specifica, vengono definiti il fabbisogno di energia primaria rinnovabile, non rinnovabile e globale, ognuno dato come somma dei fabbisogni annuali di energia primaria rinnovabile, non rinnovabile e globale, attribuibile a ciascun servizio energetico considerato. La prestazione energetica dell'edificio viene quantificata mediante l'energia primaria totale (EP_{tot}) e l'indice di energia primaria globale non rinnovabile (EP_{nren}), forniti dalle seguenti relazioni:

$$EP_{tot} = \frac{E_{p,gl,tot}}{A} \quad (3)$$

$$EP_{nren} = \frac{E_{p,gl,nren}}{A} \quad (4)$$

Dove:

- $EP_{p,gl,tot}$ è il fabbisogno annuale di energia globale di energia primaria totale dell'edificio (kWh);
- $EP_{p,gl,nren}$ è il fabbisogno annuale di energia globale di energia primaria non rinnovabile dell'edificio (kWh);
- A è l'area della superficie utile climatizzata dell'edificio (m^2).

A partire dall'energia primaria rinnovabile (EP_{ren}) e quella totale (EP_{tot}) riferite entrambe al generico servizio energetico (k), si determina la quota di energia rinnovabile (QR) come:

$$QR = \frac{\sum_k EP_{k,ren}}{\sum_k EP_{k,tot}} \quad (5)$$

Infine, la UNI/TS 11300 - 6 [26] indica come calcolare i fabbisogni di energia nel caso di presenza di sistemi di trasporto quali ascensori, scale mobili e marciapiedi mobili a servizio dell'edificio. Questa si applica agli edifici residenziali, alberghi, uffici, ospedali, edifici scolastici, centri commerciali, edifici adibiti per attività sportive, attività industriali ed artigianali.

2.2 Stato dell'arte del patrimonio edilizio italiano

La definizione accurata del consumo energetico di un fabbricato non può esulare dalla conoscenza approfondita del sistema edificio-impianto: entrambi, infatti, influenzano direttamente il fabbisogno di energia primaria di un edificio. Tuttavia, lo studio del sistema edificio-impianto richiede l'utilizzo di numerosi parametri che non è sempre semplice o possibile rilevare, creando così un certo livello di incertezza nella stima del consumo energetico dell'edificio.

In considerazione di quanto descritto in precedenza, è chiaro che per poter definire le caratteristiche con cui si implementeranno i modelli di simulazione energetica, cuore della presente linea di ricerca, è necessario conoscere lo stato dell'arte degli edifici in termini di geometria e di parametri termo-energetici, anche secondo la loro evoluzione nel tempo e la distribuzione territoriale. In quest'ottica è stata condotta un'indagine che ha lo scopo di individuare le principali caratteristiche geometriche tipiche degli edifici italiani, le destinazioni d'uso maggiormente diffuse, le caratteristiche costruttive impiegate, nonché le proprietà termiche che caratterizzano l'involucro edilizio.

Per raggiungere questi obiettivi, è stato condotto un primo studio, basato sia su precedenti pubblicazioni redatte da Enea e altri enti di ricerca italiana, che su dati Istat disponibili online [27]; le informazioni acquisite sono state poi approfondite secondo l'evoluzione storica delle componenti edilizie più diffuse.

Questa prima indagine ha permesso di individuare alcune delle caratteristiche del parco edilizio italiano, come ad esempio l'epoca di costruzione, le destinazioni d'uso più rappresentative, il numero di zone termiche per edificio, la tipologia costruttiva, nonché la superficie calpestabile.

Lo studio è proseguito con l'individuazione delle caratteristiche termo-energetiche del sistema edificio-impianto. A partire dai risultati ottenuti dall'indagine bibliografica, sono state studiate le caratteristiche termiche delle diverse componenti dell'involucro edilizio individuate, al variare di alcuni parametri, quali, ad esempio, l'epoca di costruzione, lo spessore, i materiali utilizzati e il livello di isolamento.

Infine, sfruttando dati di Letteratura, è stata approfondita l'evoluzione storica delle componenti impiantistiche, nonché le diverse tecnologie disponibili per i diversi servizi energetici.

2.2.1 Indagine delle caratteristiche geometriche

In accordo con i dati Istat e quelli relativi al 15° censimento della popolazione e delle abitazioni del 2011 [27], gli edifici definiti come *“una costruzione generalmente di concezione ed esecuzione unitaria [...], dotata di una propria struttura indipendente, contenente spazi utilizzabili stabilmente da persone per uso residenziale e/o per la produzione di beni e servizi (uffici, studi, laboratori eccetera) [...]”* ammontano in Italia a 14,452,680 unità, mentre 63,115 sono i complessi di edifici definiti come *“insieme di costruzioni e infrastrutture di tipo non residenziale, ubicati normalmente in un'area limitata [...] e finalizzati in modo esclusivo [...] all'attività di un unico consorzio, ente, impresa o convivenza”*.

In considerazione delle definizioni appena fornite, è stata valutata la distribuzione percentuale dei fabbricati costruiti nelle diverse regioni italiane (Figura 2) riferite ai suddetti totali degli edifici (ordinate di sinistra) e dei complessi degli edifici (ordinate di destra). Si precisa che i dati relativi alle due province autonome di Trento e Bolzano sono stati raggruppati sotto la voce “Trentino Alto Adige”. I risultati dell'analisi evidenziano il maggior numero di complessi di edifici in Lombardia (più del 20%), la quale, insieme alla Sicilia, risulta essere anche la regione con la più alta concentrazione di edifici (circa il 12% delle unità totali). Veneto, Piemonte, Puglia e Campania sono le altre regioni che presentano più di un milione di edifici (oltre il 7%), seguite da Lazio, Emilia-Romagna e Calabria, con un numero di edifici di poco inferiore al milione (superiore al 6%). Per quanto riguarda i complessi di edifici, Lazio, Emilia-Romagna e Veneto risultano essere le regioni con la maggior presenza, dopo la Lombardia, rispettivamente pari al 8.8%, 8.0% e 7.8% [28]. Infine, Valle d'Aosta, Umbria, Molise, Marche e Basilicata mostrano le più basse percentuali di costruito sia di edifici, che di complessi di edifici. Si tiene a precisare, comunque, che le percentuali di fabbricati costruiti in ciascuna regione risulta essere in linea con la popolazione residente: infatti, se si considerasse il rapporto tra la popolazione residente e il numero di fabbricati costruiti totale, si otterrebbe un valore molto simile per tutte le regioni (valore medio pari a 3.9), ad eccezione della Lombardia e del Lazio (indicatore maggiore di 5.5) e della Valle d'Aosta e Molise (indicatore inferiore a 2.5).

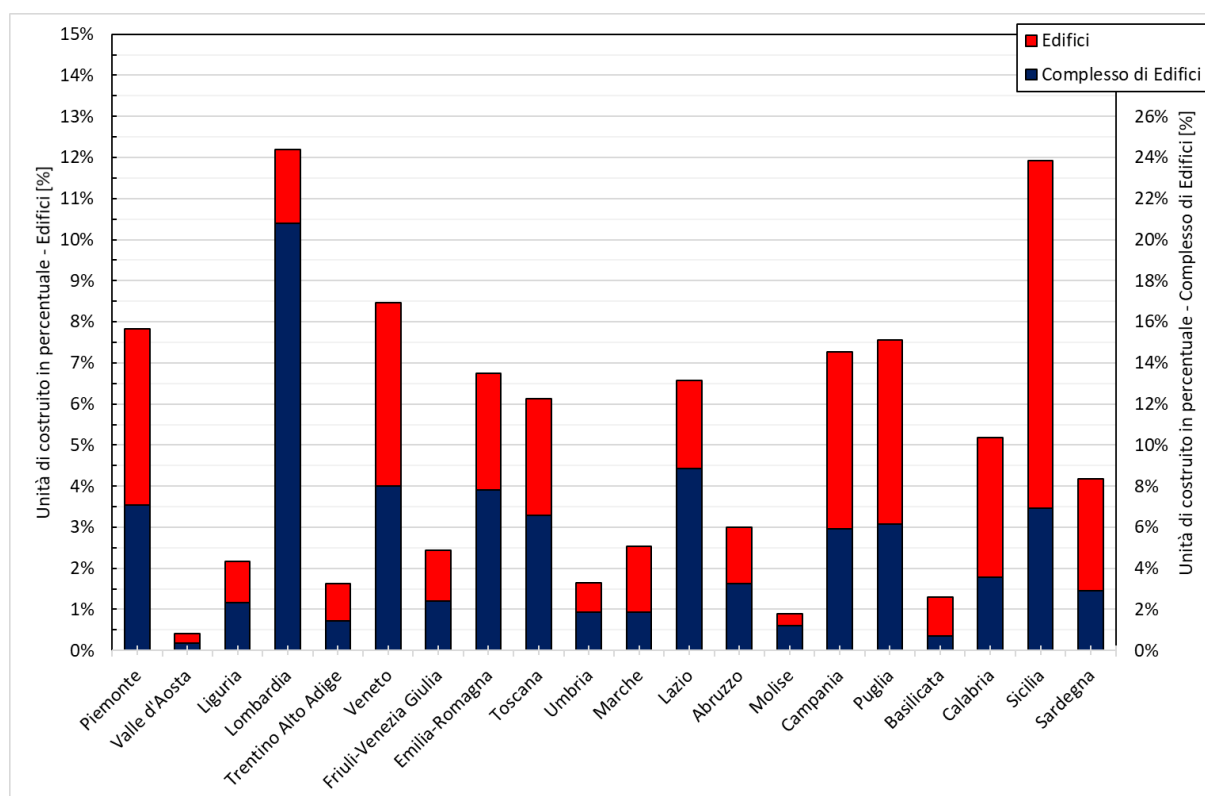


Figura 2 – Distribuzione percentuale delle unità del costruito nelle diverse regioni italiane (elaborazione dati da [27]).

Dettagliando maggiormente i dati relativi al costruito, emergono ulteriori e interessanti considerazioni (Figura 3). Oltre l'84% degli edifici, infatti, è accatastato come residenziale, circa il 10% è classificato come non residenziale e il restante 5.1% risulta essere non più utilizzato. Le destinazioni d'uso prevalenti nel settore non residenziale sono: produttivo (2.0%), commerciale (1.7%) e servizi (1.2%).

Nel complesso di edifici, invece, le destinazioni d'uso principali sono: produttivo (24.3%), servizi (23.7%) e commerciale (10.0%). Inoltre, circa il 13.5% dei complessi di edificio risulta essere non utilizzato perché scadente, in rovina o ancora in corso di costruzione al momento del censimento [28].

Relativamente alle nuove costruzioni, come riportato nell'annuario statistico italiano dell'Istat [29], è stato riscontrato un discreto aumento di nuovi fabbricati ad uso residenziale (incremento di circa il 16% rispetto al 2017), mentre la realizzazione di nuovi edifici non residenziali ha presentato un andamento con forti irregolarità attestandosi ad una crescita media del 22% circa.

Nonostante questi incrementi percentuali delle nuove costruzioni, le quali dovrebbero presentare delle prestazioni energetiche nettamente migliori rispetto gli altri edifici, la maggior parte del costruito in Italia ricade prima del 1990, ossia antecedente alle più importanti normative in materia di contenimento del consumo energetico. Come indicato in Figura 4, infatti, oltre l'85% dei fabbricati italiani sono stati costruiti prima del 1991, circa il 25% dei quali è antecedente al 1945. Solo il 6.8% a livello nazionale risulta costruito dopo il 2005: questo campione si trova prevalentemente in Lombardia, Veneto, Lazio, Sicilia ed Emilia-Romagna.

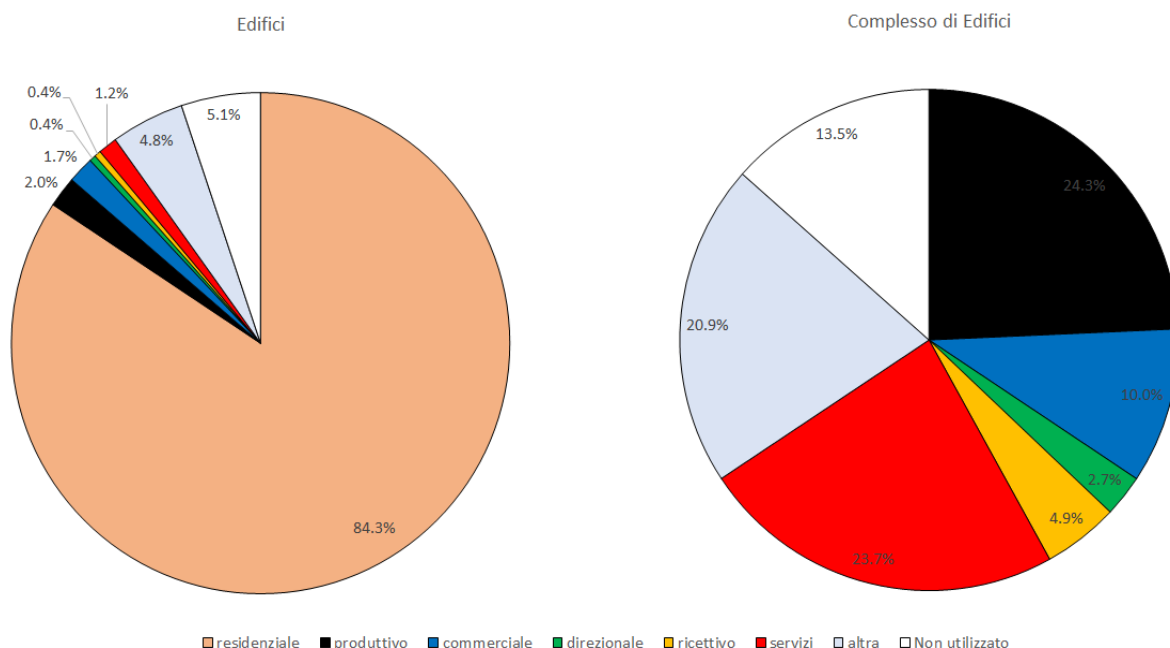


Figura 3 – Ripartizione percentuale delle unità del costruito per le diverse destinazioni d'uso (elaborazione dati da [27]).

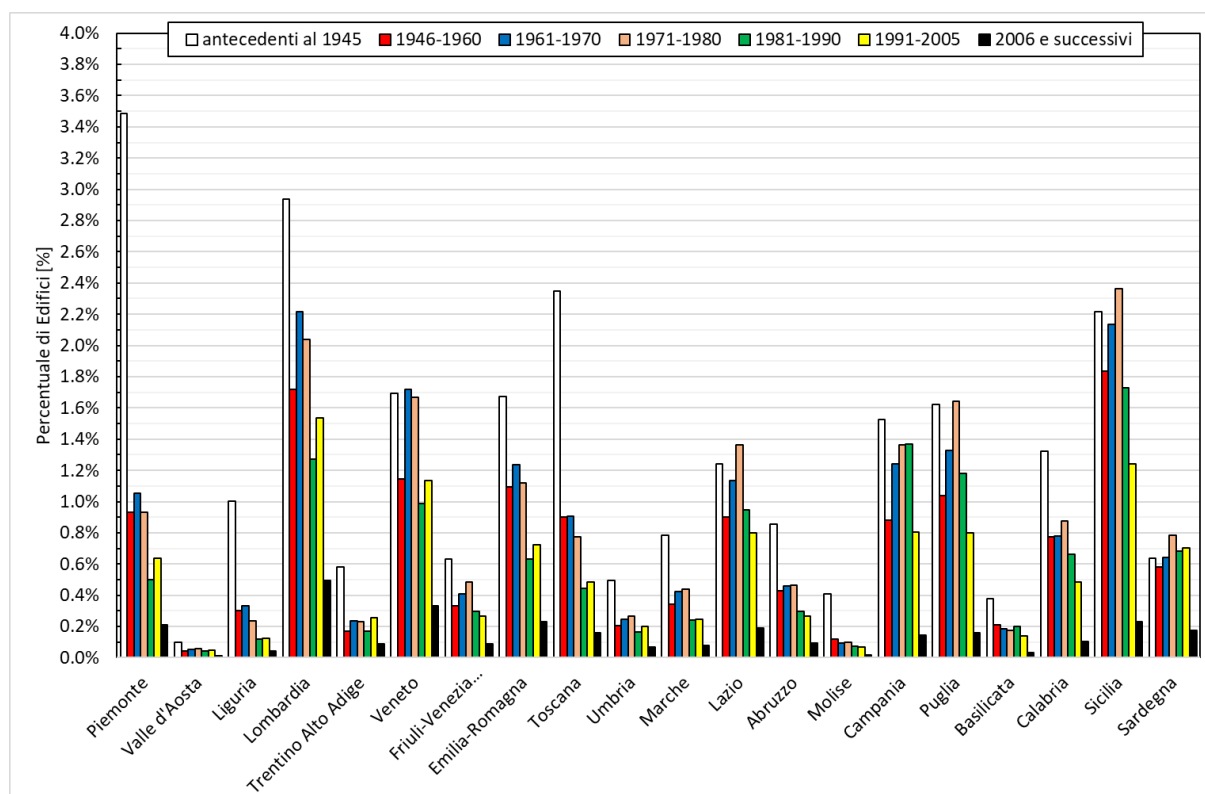


Figura 4 – Distribuzione percentuale delle unità del costruito nelle diverse regioni italiane per epoca di costruzione (elaborazione dati da [27]).

Altro dato interessante che emerge dall'elaborazione dei dati Istat è il numero di piani fuori terra dei fabbricati ad uso residenziale (Figura 5) che, come riportato in Figura 3, rappresentano la percentuale maggiore del costruito in Italia. Nello specifico, quasi il 50% degli edifici residenziali è realizzato con due piani

fuori terra, circa il 24% con tre, il 17% presenta un solo piano fuori terra, mentre poco meno del 10% è realizzato con 4 o più piani fuori terra (pari a 1,174,900 fabbricati).

Informazioni analoghe aggiuntive, relative al parco residenziale italiano, sono state fornite in precedenti report mediante le elaborazioni e stime Cresme su dati Istat e Cresme [30]. Relativamente ai piani complessivi di cui può essere composto un edificio, di cui Istat fornisce quelli fuori terra, nel documento [30] si riporta l'analisi dei piani complessivi di cui può essere composto un edificio; in particolare circa il 40% degli edifici residenziali è costituito da tre a cinque piani, quasi il 37% da due piani, mentre poco meno del 14% è caratterizzato da oltre cinque piani.

Un'analisi complementare è stata condotta anche dal Politecnico di Torino nel progetto Tabula [31, 32] nel quale è stato valutato anche il numero di piani per ogni tipologia edilizia e per le diverse epoche di costruzione relativamente agli edifici situati nella zona climatica E, la quale è quella che presenta una maggiore estensione sul territorio italiano. Dall'analisi sia del documento che della Letteratura, emerge che le tipologie edilizie maggiormente utilizzate (sia nella zona climatica E che in generale in Italia) sono:

1. Casa unifamiliare: costruzione edilizia per una sola famiglia, indipendente da altre unità abitative e generalmente corredata da giardino. Essa deriva storicamente da modelli del passato e rappresenta una semplificazione della villa e casa di campagna;
2. Casa a schiera: tipologia edilizia caratterizzata dall'accostamento di più unità abitative, una a fianco all'altra. Generalmente, la singola unità abitativa si sviluppa prevalentemente in altezza su più piani e in profondità essendo caratterizzata da un lato più stretto;
3. Casa in linea: tipologia edilizia plurifamiliare costituita da un vano scala (o aggregazione lineare di più corpi scala) che serve almeno due appartamenti per piano. Non vi è un numero di piani precostituito e non vi è alcuna limitazione sul numero massimo degli appartamenti per piano;
4. Casa a torre: costruzione che rappresenta l'evoluzione della casa in linea. Essa è caratterizzata da un maggiore sviluppo verticale della casa in linea con un'altezza che è superiore a ciascun lato della pianta. Storicamente, questi erano edifici prevalentemente ad uso residenziale, tuttavia, alcuni dei piani di questi fabbricati potevano essere a servizio anche di altre attività.

In considerazione di quanto detto sulle tipologie edilizie descritte e dei dati riportati in [31, 32], in Figura 6 è rappresentata l'evoluzione nel tempo del numero di piani per ciascuna tipologia costruttiva nelle diverse epoche di costruzione. Come si evince, sia la casa unifamiliare, che quella a schiera sono le uniche che non presentano una variazione del numero di piani con l'epoca di costruzione (sempre pari a 2), mentre sia la casa in linea, che quella a torre presentano una oscillazione anche molto marcata rispetto al valore medio. In particolare, la casa a torre risulta essere quella che presenta una maggiore variabilità negli anni, con un picco di 8 piani tra il 1961-1976. A partire dal 2006 il numero di piani medio delle case in linea si attesta a 3, mentre quello degli edifici a torre a 7.

Relativamente alla tipologia edilizia, inoltre, quella con maggior presenza sul territorio italiano, secondo quanto riportato in [30], è la monofamiliare (26%), seguita dalla piccola palazzina (21%), gli edifici plurifamiliari a torre (18%) e, infine, quelli in linea (15%). Un ulteriore dato fornito, di rilevanza interessante ai fini del presente studio, è quello relativo ai confini geometrici degli edifici, dove il 43% degli edifici risulta essere completamente isolato sui quattro lati, il 19% ha un solo lato di contiguità con altri edifici, mentre il restante 38% è caratterizzato da almeno due lati in condivisione.

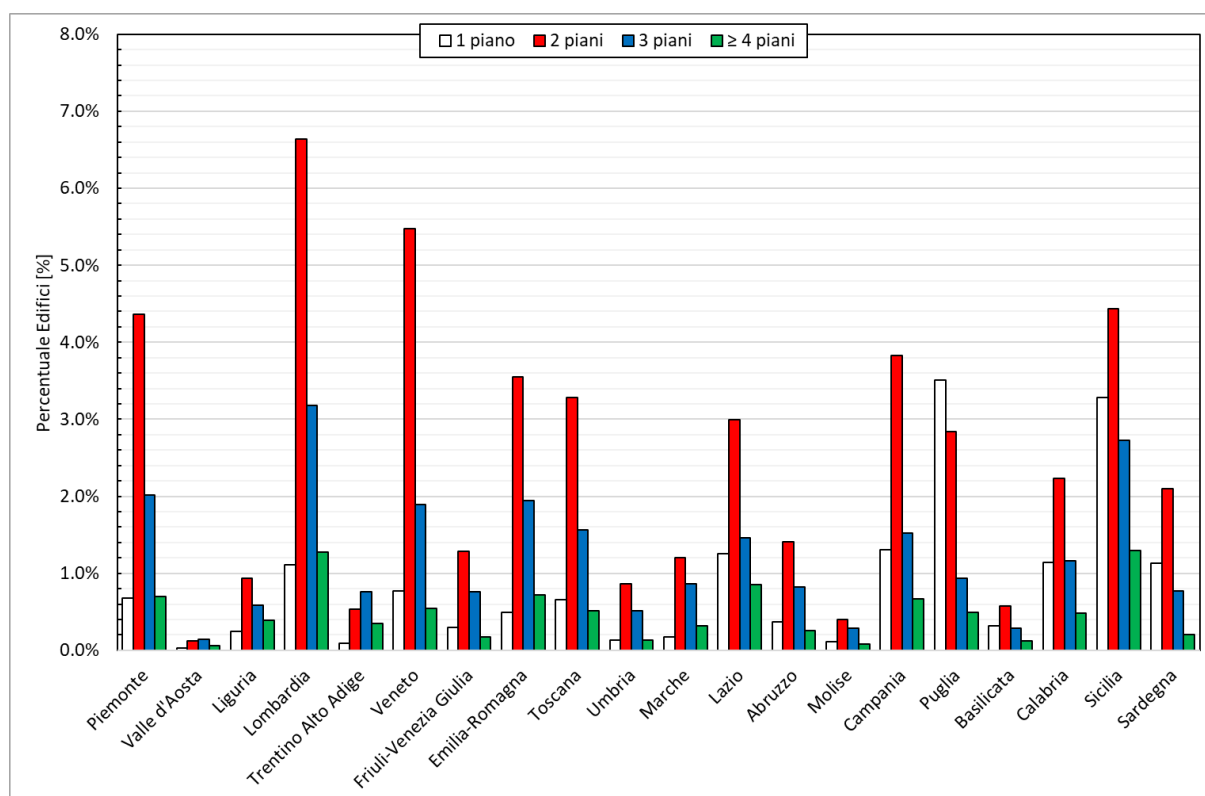


Figura 5 – Percentuale degli edifici residenziali, ripartita per le diverse regioni Italiane e caratterizzata da 1 o più piani fuori terra (elaborazione dati da [27]).

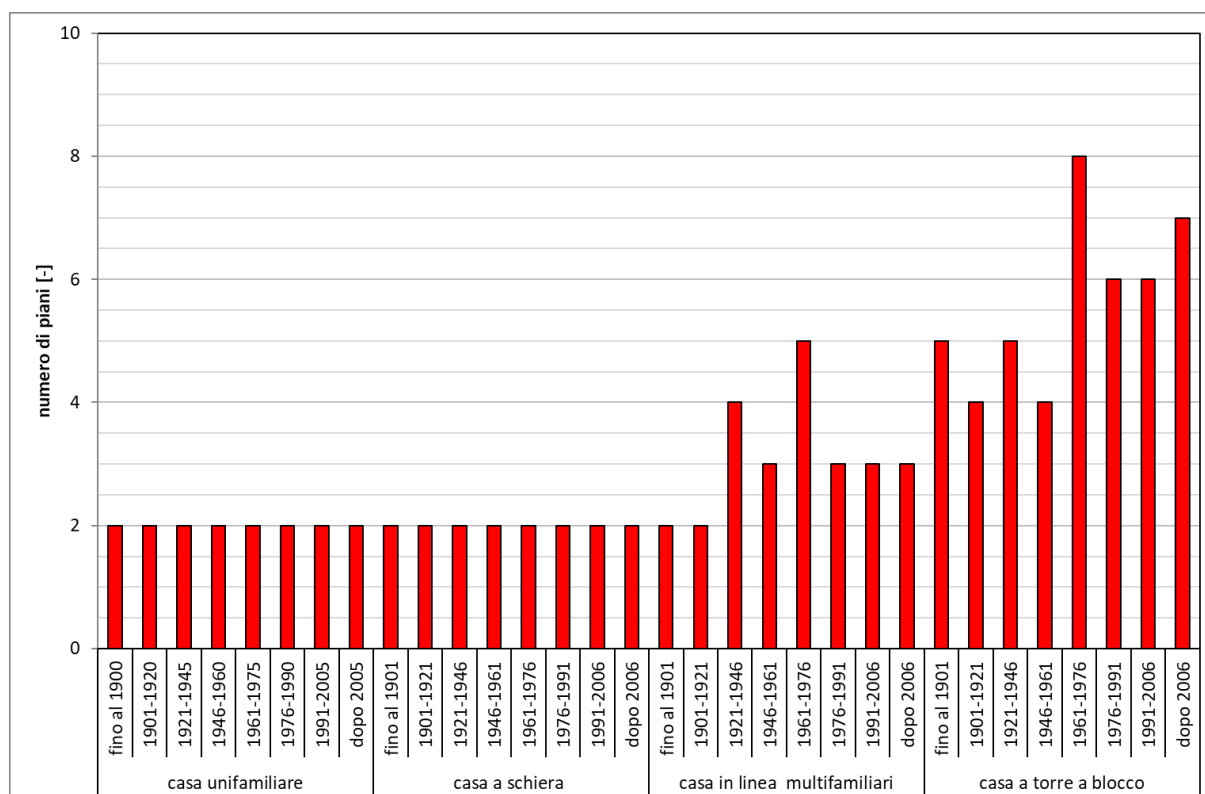


Figura 6 – Numero di piani fuori terra per tipologia edilizia ed epoca di costruzione [31, 32].

A partire dalla tipologia edilizia e dal numero di piani, è stato possibile dettagliare l'analisi verificando il numero di appartamenti presenti in ciascun edificio. In accordo con i dati Istat, in tutte le Regioni prevale il numero di edifici con una sola abitazione (Figura 7), definita come *“locale o insieme di locali, destinato stabilmente ad uso abitativo, separato, indipendente, inserito in un edificio (o che costituisca esso stesso un edificio)”*; in particolare, questa tipologia di edifici è presente in particolare in Sicilia e in Lombardia (rispettivamente al 7.3% e al 5.5%). La Lombardia è anche la regione con la percentuale più alta di edifici aventi dalle 2 alle 4 abitazioni (5.0%), che risulta essere la seconda tipologia di edificio più diffusa sul territorio italiano (circa il 35% del totale). Gli edifici aventi più di 4 abitazioni risultano essere, invece, circa 1.260.000 unità ossia pari a poco più del 9%.

Come evidenziato dai dati Istat del 2011, e confermato dal report [31] e dalla brochure [32] redatti dal Politecnico di Torino, tra il 1950 e il 1980 il numero di abitazioni per edificio ha una distribuzione percentuale meglio ripartita ed equa; in particolare, gli edifici aventi più di 4 abitazioni sono circa pari, in percentuale, a quelli caratterizzati da meno unità abitative.

Inoltre, valendosi dell'esperienza e del supporto di dati di Letteratura [31-32], si evidenzia come gli edifici che presentano un numero di appartamenti elevato sono, per l'appunto, gli edifici in linea e a torre; in particolare, in riferimento alla Figura 8 costruita a partire dai dati del progetto Tabula [31-32] relativi alla zona climatica E, si evidenzia come il numero di appartamenti medio dell'edificio a torre sia di circa 33 abitazioni, con picchi di 40-48 unità risalenti tra il 1961-1991.

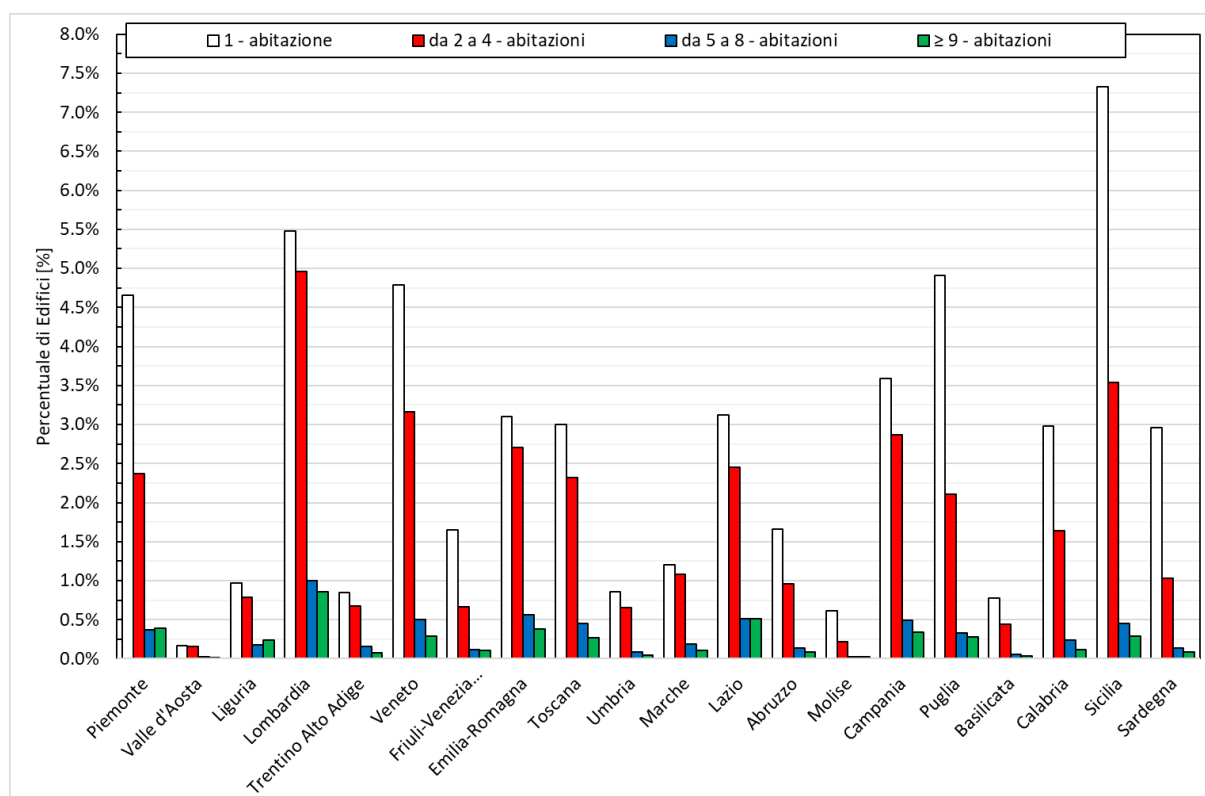


Figura 7 – Percentuale degli edifici residenziali, ripartita per le diverse regioni Italiane e caratterizzata da 1 o più abitazioni (elaborazione dati da [27]).

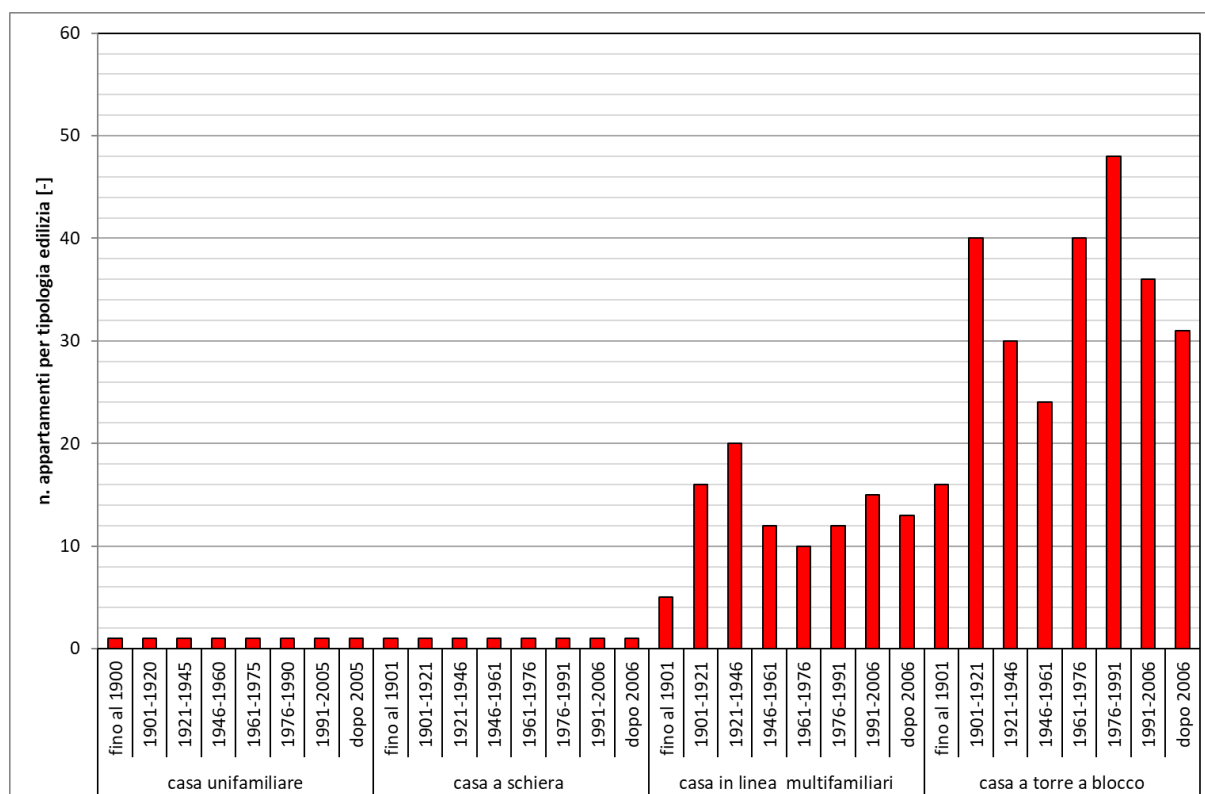


Figura 8 – Numero di abitazioni per tipologia edilizia ed epoca di costruzione [31, 32].

Sulla base dei dati Istat del 2011, è stato possibile elaborare un'ulteriore analisi sulla tipologia costruttiva degli edifici (Figura 9), dalla quale è risultato che in Italia la tipologia costruttiva predominante sia la muratura portante (57.2%), seguita dal calcestruzzo armato (29.5%). Il trend ottenuto sembra simile in tutte le regioni, ad eccezione della Sicilia dove la differenza in percentuale tra gli edifici in muratura e quelli in calcestruzzo risulta essere molto piccola e dell'ordine dell'1%.

Infine, sono stati investigati più in dettaglio gli aspetti dimensionali degli edifici costruiti, a partire dalla superficie utile, analizzata secondo la distribuzione territoriale italiana, sia secondo area geografica (Figura 10) che per regione (Tabella 4).

L'elaborazione non mostra significative discrepanze territoriali; la maggior parte degli edifici, infatti, presenta una superficie utile compresa tra i 60 e i 120 m² in ciascuna parte dell'Italia considerata (nord ovest, nord est, centro, sud e isole). Lombardia, Veneto, Piemonte, Emilia-Romagna, Toscana, Lazio, Campania e Sicilia risultano essere, inoltre, le regioni con la percentuale più elevata di edifici caratterizzati da una superficie utile maggiore di 150 m².

L'analisi della superficie utile media è stata condotta anche in funzione dell'epoca di costruzione e al variare della tipologia edilizia (Figura 11), basandosi su dati disponibili in Letteratura e riportati nel progetto Tabula [31-32]. Dai risultati di questa analisi, si evince un dato molto rilevante, ossia che le case unifamiliari hanno una superficie media più elevata (valore medio 154.1 m², con un picco di circa 200 m² tra il 1976 e il 1990), seguite dalle case a schiera (valore medio 113.8 m²). Le case in linea e le case a torre presentano una superficie mediamente più piccola e pari rispettivamente a 85.2 m² e 74.1 m².

L'evoluzione della superficie media in funzione dell'epoca di costruzione mostra una decrescita nel tempo, ad eccezione del solo periodo 1961-1991, all'interno del quale si riscontrano sempre i valori di picco maggiori.

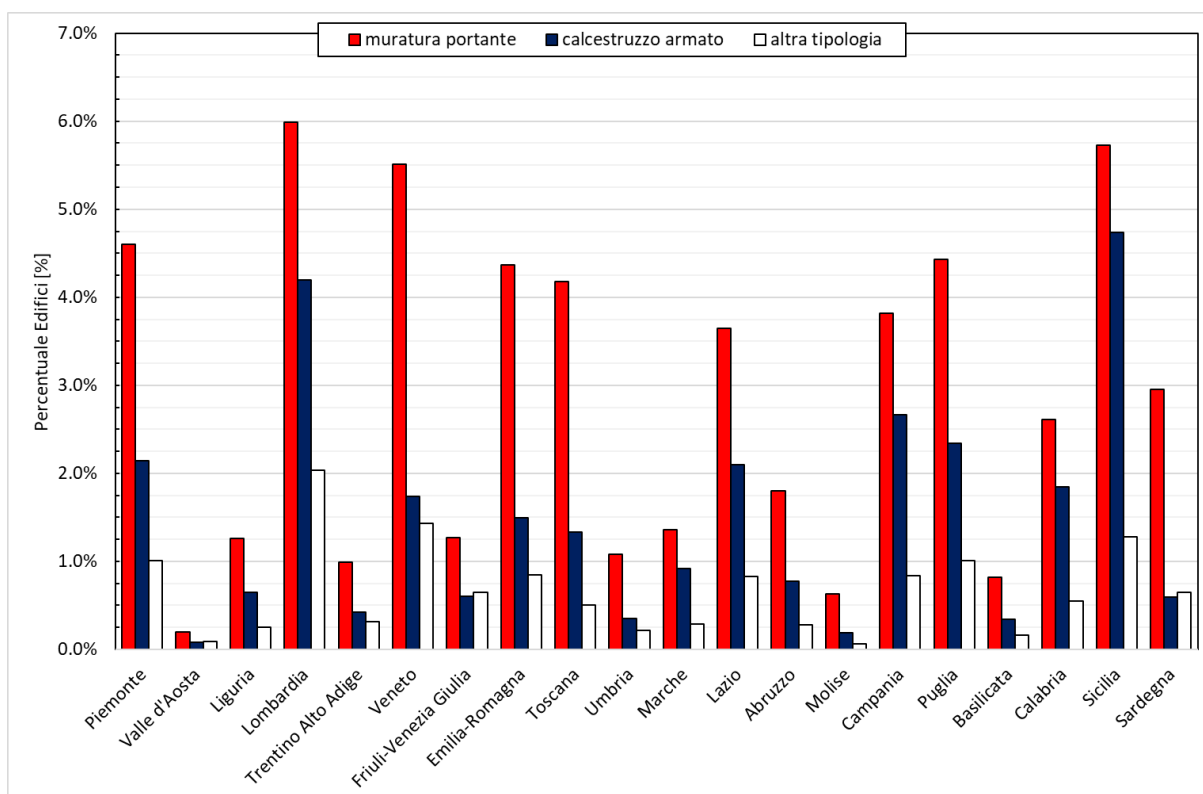


Figura 9 – Percentuale degli edifici residenziali ripartita per le diverse regioni italiane e realizzata in muratura portante, in calcestruzzo armato o da altra tipologia costruttiva (elaborazione dati da [27]).

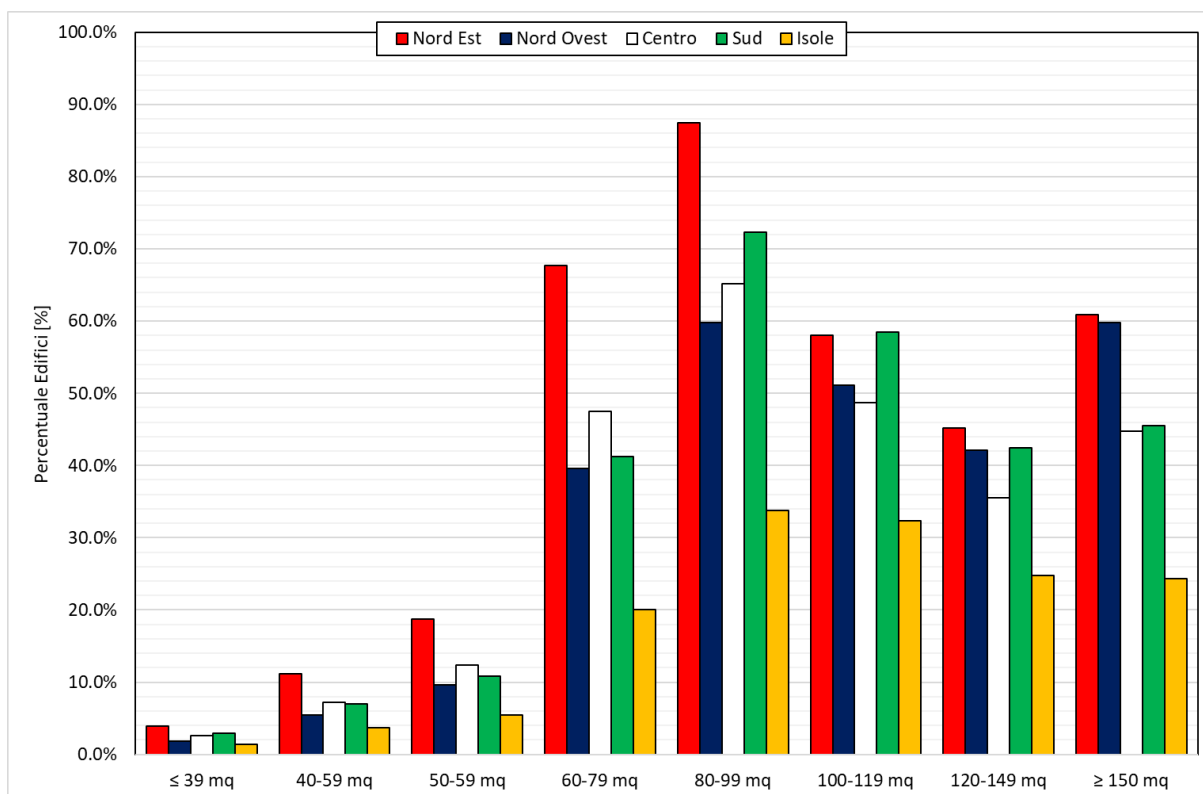


Figura 10 – Percentuale di edifici residenziali ripartita per le diverse zone geografiche Italiane e caratterizzata da specifici range di superficie utile (elaborazione dati da [27]).

Tabella 4 – Distribuzione percentuale degli edifici residenziali secondo la superficie utile in ciascuna regione italiana (elaborazione dati da [27]).

Regione	Superficie utile (m ²)							
	≤ 39	40-59	50-59	60-79	80-99	100-119	120-149	≥ 150
Piemonte	1.2	3.2	5.3	19.1	23.2	15.8	13.0	19.3
Valle d'Aosta	0.1	0.1	0.2	0.7	0.7	0.4	0.3	0.2
Liguria	0.6	1.6	2.8	10.0	10.2	5.7	3.6	4.9
Lombardia	2.2	6.3	10.4	38.0	53.3	36.1	28.3	36.4
Trentino Alto Adige	0.2	0.6	1.0	3.9	5.4	5.1	2.8	2.7
Veneto	0.5	1.8	3.2	14.1	23.5	21.5	19.5	30.1
Friuli-Venezia Giulia	0.2	0.6	1.2	4.7	7.0	5.8	4.9	6.3
Emilia-Romagna	0.8	2.4	4.2	16.9	24.0	18.7	14.9	20.6
Toscana	0.8	2.2	3.9	15.7	22.0	16.1	12.0	15.8
Umbria	0.1	0.3	0.6	2.6	5.1	4.4	3.3	4.0
Marche	0.2	0.6	1.1	4.9	9.2	8.0	5.6	6.2
Lazio	1.5	4.0	6.8	24.2	28.9	20.1	14.6	18.8
Abruzzo	0.2	0.6	1.0	3.9	7.0	6.4	4.9	5.7
Molise	0.1	0.1	0.2	0.9	1.7	1.4	1.2	1.5
Campania	1.4	3.1	4.8	17.8	28.7	22.0	14.1	15.1
Puglia	0.7	1.7	2.7	10.9	22.0	17.4	13.2	13.8
Basilicata	0.2	0.4	0.5	2.0	3.3	2.5	1.7	1.6
Calabria	0.4	1.0	1.6	5.6	9.5	8.8	7.4	7.8
Sicilia	1.2	2.9	4.3	15.4	25.7	24.9	17.4	16.6
Sardegna	0.2	0.7	1.2	4.7	8.1	7.5	7.4	7.7

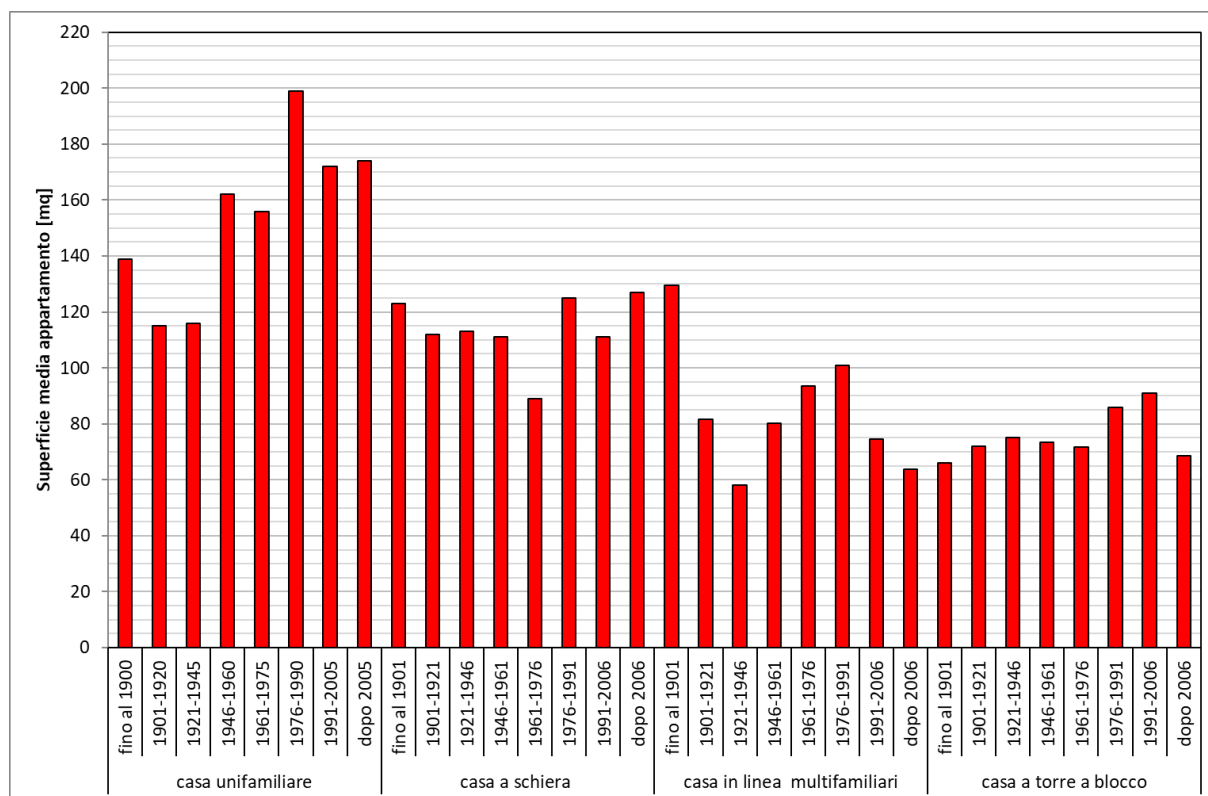


Figura 11 – Superficie media degli appartamenti per epoca di costruzione e tipologie edilizia [31, 32].

Altro dato interessante riguarda il rapporto di forma degli edifici (S/V), ossia il rapporto tra la superficie disperdente e il volume lordo riscaldato di un generico fabbricato. L'elaborazione, riportata in Figura 12, si basa sui dati del progetto Tabula [31, 32] che fornisce i dati medi in funzione della tipologia costruttiva. In accordo con i precedenti risultati, le abitazioni unifamiliari e le case a schiera presentano i valori medi del rapporto di forma maggiori tra le varie tipologie edilizie. Inoltre, il trend nel tempo è prevalentemente decrescente con l'epoca di costruzione ad eccezione della casa a schiera la quale nel periodo 1976-1991 il valore medio del rapporto di forma è nettamente superiore rispetto agli altri anni. Questo risultato è perfettamente in linea con quello riscontrato per la superficie media delle abitazioni (Figura 11).

Infine, altro aspetto da valutare, di rilevanza ai fini energetici degli edifici, è la dimensione geometrica degli infissi. In accordo con il Regolamento Edilizio [34], *“per ciascun locale d'abitazione, l'ampiezza della finestra deve essere proporzionata in modo da assicurare un valore di fattore luce diurna medio non inferiore al 2%, e comunque la superficie finestrata apribile non dovrà essere inferiore a 1/8 della superficie del pavimento”*. Inoltre, considerando che a partire dal dopoguerra si sono iniziate a realizzare finestre di tipo standardizzato, caratterizzate cioè da dimensioni e moduli standard, ai fini della definizione degli infissi da implementare nei modelli di simulazione degli edifici residenziali, le dimensioni degli infissi saranno comunque definite in considerazione sia del limite di 1/8 che alle dimensioni standard dei moduli generalmente utilizzati. Relativamente alle altre destinazioni d'uso, invece, precedenti studi condotti da Enea [35-36] hanno evidenziato come la superficie media degli infissi non sia variata significativamente nell'arco degli anni nei diversi contesti italiani. Il valore medio nazionale si attesta intorno a 3.29 m², mentre il numero medio di finestre per locale si attesta a 2.0 per i territori a nord e a 1.78 e 1.58 rispettivamente al centro e al sud comprensivo delle isole.

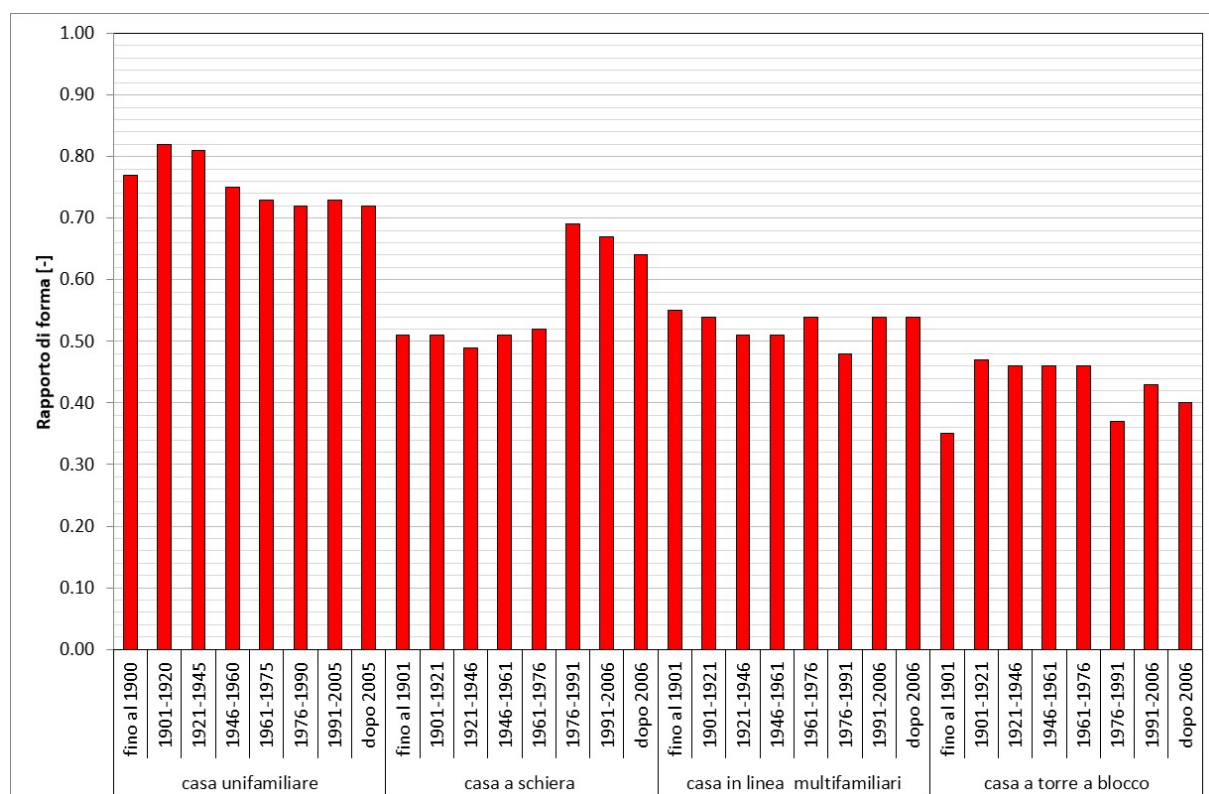


Figura 12 – Rapporto di forma medio per epoca di costruzione e tipologia edilizia [31, 32].

2.2.2 Indagine delle caratteristiche termiche dell'involucro edilizio

L'elaborazione dei dati presenti in Letteratura, così come dei dati resi disponibili online da Istat, o da quelli riportati in alcuni report precedentemente redatti, hanno permesso di mettere in evidenza alcune caratteristiche geometriche tipiche degli edifici costruiti in Italia. In particolare, l'analisi dei dati Istat ha

permesso di evidenziare come la maggior parte del costruito italiano si trovi prevalentemente in specifiche regioni e comuni che ricadono all'interno delle zone climatiche D, E e F. Questo dato giustifica il fatto che molti studi condotti in precedenza, come [31-32], abbiano prevalentemente considerato queste zone climatiche per la stima delle caratteristiche termiche dei diversi componenti opachi e trasparenti. Nonostante ciò, altri studi condotti da Enea [35-36] hanno preso in esame tutte le zone climatiche italiane, individuando le tipologie costruttive più comuni per epoca di costruzione, per le quali sono state fornite anche le caratteristiche termiche che le caratterizzano.

A partire dai dati raccolti e dai risultati mostrati in questi studi [31, 32, 35, 36] e basandosi anche sulla normativa tecnica di riferimento [37], sono state definite le tipologie costruttive edilizie maggiormente diffuse sul territorio italiano, classificandole sia in funzione dell'epoca di costruzione, che dell'evoluzione normativa in ambito energetico, e fornendone le principali caratteristiche termiche.

Una volta definite le tipologie edilizie maggiormente presenti nel territorio italiano, il lavoro è stato sviluppato in modo tale da fornire delle possibili soluzioni che si potrebbero adottare per riqualificare un generico edificio di una data epoca costruttiva, cercando di evidenziare la variazione delle caratteristiche termiche di diversi pacchetti costruttivi nell'arco degli anni. Questo approccio, risulta essere determinate per il presente lavoro, in quanto, se si desidera restituire una stima più realistica dei consumi energetici a partire da un profilo di utilizzo standard dell'edificio, è necessario capire quali cambiamenti l'involucro edilizio potrebbe subire nel tempo e come questi potrebbero influenzare sia le sue caratteristiche termiche che quelle geometriche.

2.2.2.1 Involucro edilizio: componenti opache verticali

In relazione alle caratteristiche tipiche degli edifici italiani, i quali sono prevalentemente massivi, considerando l'evoluzione storica della normativa in ambito energetico e l'evoluzione delle tecniche costruttive, si sono individuate 7 macro-famiglie di componenti opache verticali (Tabella 5). Per alcune di queste tipologie, sono state definite anche alcune delle varianti più comuni, quali, ad esempio, la presenza o meno di un'intercapedine d'aria. Si precisa che tutte le tipologie adottate sono attribuibili sia ad edifici residenziali che non residenziali. In Tabella 5 sono riportate anche la parete ventilata e la parete verde che, sebbene rappresentino delle soluzioni interessanti e peculiari, come evidenziato in alcuni studi presenti in Letteratura [38, 39, 40, 41], sono ancora molto poco diffuse nei nostri climi e quindi non rappresentative. Pertanto, queste non saranno implementate nei modelli di simulazione oggetto del secondo anno di attività. Le tipologie costruttive evidenziate sono caratteristiche di specifici periodi di costruzione, pertanto possono non prevedere alcun tipo di isolamento o al contrario essere caratterizzate da un elevato livello di coibentazione. Le tipologie quali muratura in pietra, muratura a sacco, muratura a cassa vuota, risalgono prevalentemente a prima degli anni 30', pertanto sono strutture tipicamente non isolate. Le pareti in laterizio, così come quelle in calcestruzzo, invece, sono caratteristiche di un periodo di costruzione molto ampio che va dal 1930 fino ai giorni nostri, pertanto possono essere caratterizzate da spessori e livelli di isolamento termico molto variabili. Infine, le pareti leggere, maggiormente utilizzate nelle nuove e recenti costruzioni, sono pareti caratterizzate da spessori molto ridotti ma da un livello di isolamento molto elevato. Il livello di isolamento termico è stato assegnato per ogni tipologia di parete studiata, riportate Tabella 5, in funzione dei periodi di costruzione considerati tipici per la stessa. In particolare, si sono considerate le seguenti configurazioni di isolamento:

1. Pareti non isolate: pareti costruite prima della Legge n.373 del 76 [6];
2. Pareti scarsamente isolate: pareti costruite a seguito della prima normativa in ambito energetico (periodo 1976-1991) e caratterizzate da un isolamento termico di piccolo spessore (ipotizzato pari 2 cm);
3. Pareti mediamente isolate: pareti costruite a partire dagli anni 90' (a seguito della Legge 10/91 [7]) caratterizzate da un isolamento termico di medio spessore (ipotizzato pari a 5 cm);
4. Pareti isolate: pareti realizzate successivamente al Decreto Legislativo del 2005 [11] con uno spessore dell'isolamento termico di circa 10 cm;
5. Pareti altamente isolate: pareti realizzate successivamente al D.M. del 2015 [19] contraddistinte da uno spessore dell'isolamento termico molto elevato (maggiore di 14-16 cm).

I periodi di costruzione e i livelli di isolamento assunti sono riportati in Tabella 6, dove con il simbolo ☒ si sono indicate le configurazioni di isolamento tipiche, o comunque probabili, della parete in esame, mentre con il simbolo ☐ si sono indicate le possibili configurazioni da adottare in ottica di riqualificazione energetica dello stesso involucro edilizio.

Oltre agli spessori, il comportamento termico del pacchetto edilizio è fortemente influenzato anche dal tipo di materiale. Le murature in pietra, ad esempio, possono presentare, a parità di spessore, delle prestazioni termiche completamente diverse a seconda che siano realizzate con blocchi di pietra o di tufo, le cui caratteristiche possono variare significativamente anche in funzione del territorio di formazione. Le prestazioni termiche dei laterizi risentono fortemente della tipologia di argilla, del mix di materie prime mescolate nell'impasto (come ad esempio farina di legno) e, nel caso dei forati, della percentuale di foratura con cui sono realizzati. Discorso analogo vale per gli isolanti, i quali presentano prestazioni termiche più o meno performanti a seconda che siano di tipo naturale (vegetale, animale o minerale) o sintetica (derivati dal petrolio).

Nel presente lavoro, al fine di definire delle caratteristiche termiche medie rappresentative del parco edilizio italiano, valendosi dell'esperienza e del supporto di dati presenti in Letteratura, per ogni materiale considerato (Tabella 7) sono stati calcolati e considerati dei valori standard medi della conducibilità termica, densità e calore specifico. A ciascun materiale è inoltre riportato, inoltre, il codice numerico associato al componente verticale (Tabella 5) per il quale questo è stato utilizzato. Relativamente alla resistenza termica dell'intercapedine aria, invece, è stato fatto riferimento alla norma UNI 6946 [42].

Tabella 5 – Tipologie e nomenclatura delle componenti opache verticali maggiormente diffuse in Italia.

N.	Tipologia	Materiale	Intercapedine d'aria	Nomenclatura
1	Muratura	pietra	no	muratura in pietra
		mattoni	no	muratura in mattoni
		calcestruzzo	no	muratura in calcestruzzo
2	Muratura a sacco	mattoni	no	muratura a sacco in mattoni
3	Muratura a cassa vuota	pietra	si	muratura a cassa vuota in pietra
		mattoni	si	muratura a cassa vuota in mattoni
4	Parete di tamponamento	calcestruzzo	si	parete in calcestruzzo
		laterizio forato	no	parete con forati
		laterizio forato	si	parete a cassetta
		laterizio	no	parete con paramento in mattoni
		laterizio	si	parete con paramento in mattoni - 2
		laterizio-pietra	no	parete con paramento in pietra
		laterizio-pietra	si	parete con paramento in pietra - 2
		blocco termico	no	parete con blocco termico
5	Parete leggera	variabile	no	parete leggera
6	Parete ventilata	variabile	si	parete ventilata
7	Parete verde	variabile	no	parete verde

Tabella 6 – Periodi di costruzione assunti per ogni componente opaco verticale.

Codice parete	Nomenclatura	Periodo	Configurazione di isolamento				
			1	2	3	4	5
1	muratura in pietra	≤ 1920	☑	-	☑	☑	-
2	muratura in mattoni	1900-1950	☑	-	☑	☑	-
3	muratura in calcestruzzo	1950-1975	☑	☑	☑	☑	-
4	muratura a sacco in mattoni	≤ 1930	☑	-	☑	☑	-
5	muratura a cassa vuota in pietra	1900-1975	☑	-	☑	☑	-
6	muratura a cassa vuota in mattoni	1930-1975	☑	-	☑	☑	-
7	parete in calcestruzzo	1976-1990	☑	-	☑	☑	-
8	parete con forati	1930-1975	☑	☑	☑	☑	☑
9	parete a cassetta	≥ 1976	☑	☑	☑	☑	☑
10	parete con paramento in mattoni	≥ 1976	☑	☑	☑	☑	☑
11	parete con paramento in mattoni - 2	≥ 1976	☑	☑	☑	☑	☑
12	parete con paramento in pietra	≥ 1976	☑	☑	☑	☑	☑
13	parete con paramento in pietra - 2	≥ 1976	☑	☑	☑	☑	☑
14	parete con blocco termico	≥ 2000	-	-	-	☑	☑
15	parete leggera	≥ 2000	-	-	-	-	☑

Tabella 7 – Caratteristiche termiche dei materiali costituenti le strutture opache verticali.

Parete	Materiale	Spessore [m]	Conducibilità termica [W/(m K)]	Densità [kg/m³]	Calore specifico [J/kg K]
da 1 a 15	intonaco	0.02	0.7	1500	1000
1, 5, 12, 13	pietra	0.16-0.80	2.40	2500	1000
3 e 7	calcestruzzo	0.20-0.80	1.70	2400	1000
15	cartongesso	0.012	0.21	900	1000
Da 8 a 13	forato - 1	0.15	0.333	760	840
da 8 a 13	forato - 2	0.25	0.305	755	840
14	Blocco termico	0.30	0.223	550	1000
14	Blocco termico - EPS	0.30	0.065	≅ 550	≅ 1000
10 e 11	mattoni pieni	0.12-0.80	0.78	1800	840
Da 1 a 14	isolante – 1	0.02-0.14	0.045	100	840
da 1 a 14	isolante – 2	0.02-0.14	0.032	30	1250
15	Isolante – 3	0.02-0.14	0.043	90	2000
15	Isolante – 4	0.02-0.14	0.038	175	840

A partire dai materiali e dalle tipologie di pareti individuate, sono state quindi definite delle possibili stratigrafie, a seconda delle quali sono stati calcolati i principali parametri che influenzano il comportamento termico invernale ed estivo dei componenti opachi, quali: spessore (s), massa superficiale (Ms), trasmittanza termica (U), fattore di attenuazione (fd), sfasamento (φ) e trasmittanza termica periodica (ψ).

I valori calcolati di ciascun parametro sono riportati da Tabella 8 a Tabella 23 per ognuna delle 15 tipologie di pareti individuate. Si precisa che, relativamente alle pareti isolate, i valori riportati nelle tabelle

rappresentano i valori medi delle 2 o più configurazioni ipotizzate (ad esempio tipo di isolante diverso ma di uguale spessore).

Tutti i risultati sono riportati al variare dello spessore ipotizzato, della configurazione di isolamento adottata (Tabella 5) e della stratigrafia della parete assunta (riportata graficamente nelle stesse tabelle).

Tabella 8 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: muratura in pietra.

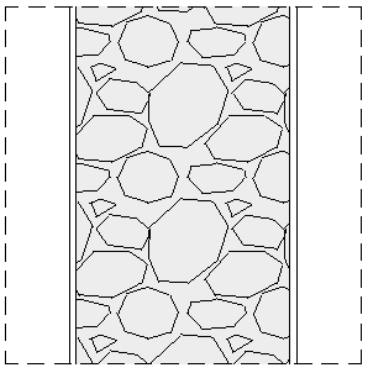
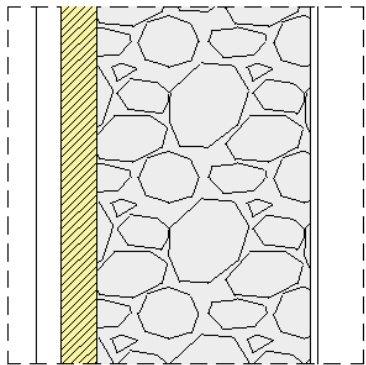
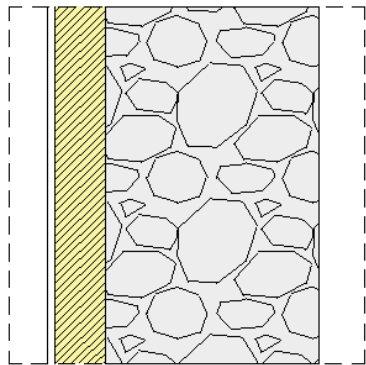
Muratura in Pietra	s [cm]	Ms [kg/m²]	U [W/m²K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m²K]
 non isolato	20	460.0	3.404	0.481	5.49	1.6376
	24	560.0	3.221	0.391	6.42	1.2578
	29	685.0	3.018	0.303	7.57	0.9149
	34	810.0	2.840	0.236	8.72	0.6709
	39	935.0	2.681	0.184	9.89	0.4936
	44	1060.0	2.539	0.143	11.06	0.3634
	54	1310.0	2.296	0.086	13.41	0.1967
	64	1560.0	2.096	0.051	15.76	0.1063
 mediamente isolato	84	2060.0	1.784	0.017	20.46	0.0310
	25	463.3	0.625	0.344	7.13	0.2151
	29	563.3	0.619	0.264	8.03	0.1636
	34	688.3	0.611	0.194	9.14	0.1187
	39	813.3	0.603	0.144	10.28	0.0872
	44	938.3	0.595	0.108	11.43	0.0643
	49	1063.3	0.588	0.080	12.60	0.0474
	59	1313.3	0.574	0.045	14.96	0.0257
 isolato	69	1563.3	0.560	0.025	17.31	0.0139
	89	2063.3	0.535	0.008	22.01	0.0040
	30	466.5	0.345	0.328	7.79	0.1130
	34	566.5	0.343	0.251	8.69	0.0859
	39	691.5	0.340	0.183	9.80	0.0624
	44	816.5	0.338	0.136	10.94	0.0458
	49	941.5	0.336	0.101	12.09	0.0338
	54	1066.5	0.333	0.075	13.26	0.0249
	64	1316.5	0.329	0.041	15.62	0.0135
	74	1566.5	0.324	0.022	17.97	0.0073
	94	2066.5	0.315	0.007	22.67	0.0021

Tabella 9 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: muratura in mattoni.

Muratura in Mattoni	s [cm]	Ms kg/m²	U [W/m²K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m²K]
----------------------------	-------------------	--------------------------------	---------------------------------	-------------------	------------------	---------------------------------

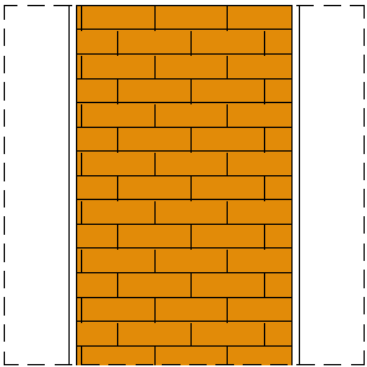
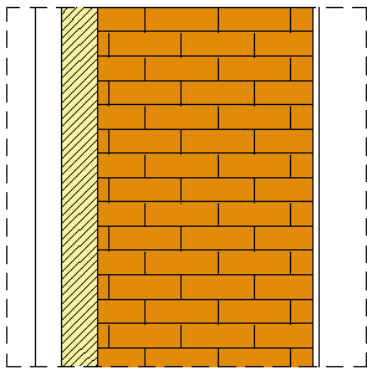
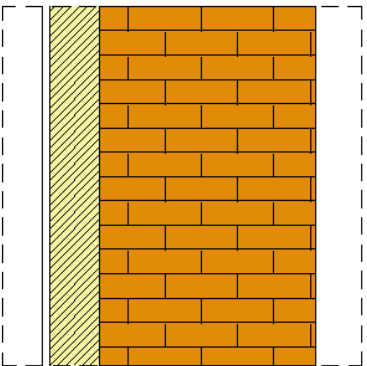
 non isolato	20	348.0	2.313	0.558	5.88	1.2908
	24	420.0	2.068	0.445	7.18	0.9194
	29	510.0	1.826	0.330	8.79	0.6021
	34	600.0	1.635	0.242	10.39	0.3952
	39	690.0	1.480	0.176	11.99	0.2597
	44	780.0	1.351	0.126	13.59	0.1707
	54	960.0	1.152	0.064	16.80	0.0737
	64	1140.0	1.004	0.032	20.00	0.0319
 mediamente isolato	25	351.3	0.575	0.371	7.74	0.2135
	29	423.3	0.558	0.268	9.02	0.1499
	34	513.3	0.538	0.181	10.60	0.0977
	39	603.3	0.520	0.123	12.19	0.0642
	44	693.3	0.503	0.084	13.79	0.0422
	49	783.3	0.487	0.057	15.39	0.0278
	59	963.3	0.458	0.026	18.60	0.0120
	69	1143.3	0.433	0.012	21.81	0.0052
 isolato	30	354.5	0.329	0.345	8.46	0.1135
	34	426.5	0.323	0.246	9.74	0.0796
	39	516.5	0.317	0.164	11.32	0.0519
	44	606.5	0.310	0.110	12.91	0.0341
	49	696.5	0.304	0.074	14.51	0.0225
	54	786.5	0.298	0.049	16.11	0.0148
	64	966.5	0.287	0.022	19.32	0.0064
	74	1146.5	0.277	0.010	22.52	0.0028

Tabella 10 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: muratura in calcestruzzo.

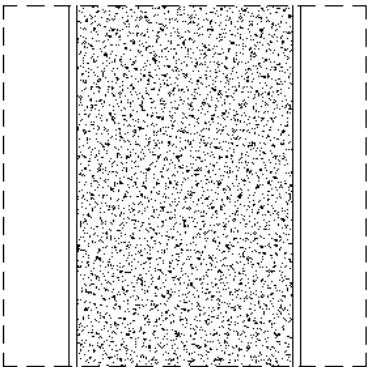
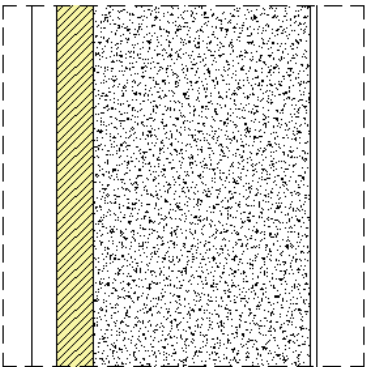
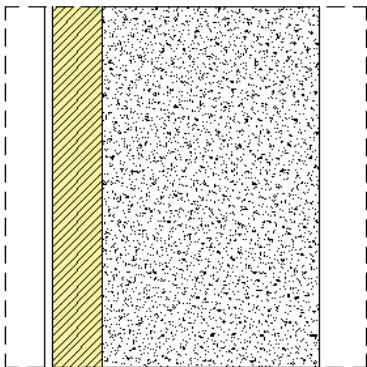
Muratura in Calcestruzzo	s [cm]	Ms [kg/m²]	U [W/m²K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m²K]
 non isolato	24	540.0	2.900	0.376	6.97	1.0893
	29	660.0	2.672	0.283	8.32	0.7568
	34	780.0	2.478	0.213	9.67	0.5286
	44	1020.0	2.162	0.120	12.40	0.2586
	54	1260.0	1.918	0.066	15.14	0.1264
	64	1500.0	1.724	0.036	17.88	0.0617
 mediamente isolato	29	543.3	0.606	0.243	8.61	0.1477
	34	663.3	0.595	0.172	9.93	0.1025
	39	783.3	0.584	0.122	11.27	0.0717
	49	1023.3	0.565	0.062	14.00	0.0352
	59	1263.3	0.546	0.031	16.74	0.0172
	69	1503.3	0.529	0.016	19.48	0.0084
 isolato	34	546.5	0.339	0.229	9.28	0.0777
	39	666.5	0.335	0.161	10.60	0.0540
	44	786.5	0.332	0.114	11.94	0.0378
	54	1026.5	0.326	0.057	14.67	0.0185
	64	1266.5	0.319	0.028	17.41	0.0091
	74	1506.5	0.313	0.014	20.15	0.0044

Tabella 11 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: muratura a sacco.

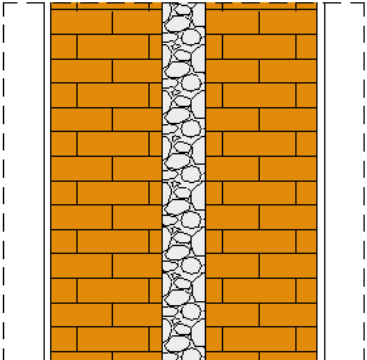
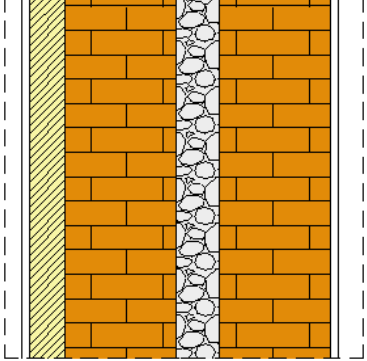
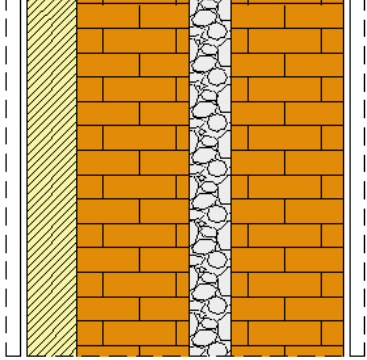
Muratura a sacco in mattoni	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
 non isolato	41	761.0	1.519	0.146	12.37	0.2215
	46	886.0	1.473	0.105	13.49	0.1541
	49	905.0	1.314	0.087	14.93	0.1140
	54	1030.0	1.279	0.062	16.07	0.0795
	59	1085.0	1.125	0.044	18.15	0.0494
	64	1210.0	1.099	0.031	19.30	0.0345
	69	1265.0	0.983	0.022	21.37	0.0213
 mediamente isolato	74	1390.0	0.963	0.015	22.51	0.0149
	46	764.3	0.508	0.071	14.14	0.0364
	51	889.3	0.502	0.051	15.27	0.0255
	54	908.3	0.482	0.039	16.74	0.0187
	59	1033.3	0.477	0.027	17.88	0.0131
	64	1088.3	0.454	0.018	19.97	0.0081
	69	1213.3	0.450	0.012	21.11	0.0056
 isolato	74	1268.3	0.429	0.008	23.18	0.0035
	51	767.5	0.306	0.063	14.86	0.0194
	56	892.5	0.304	0.045	15.98	0.0136
	59	911.5	0.296	0.033	17.46	0.0099
	64	1036.5	0.294	0.024	18.60	0.0069
	69	1091.5	0.285	0.015	20.68	0.0043
	74	1216.5	0.284	0.011	21.83	0.0030

Tabella 12 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: muratura a cassa vuota in pietra.

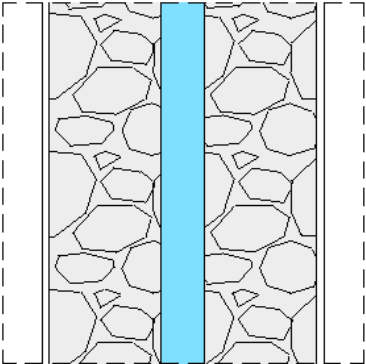
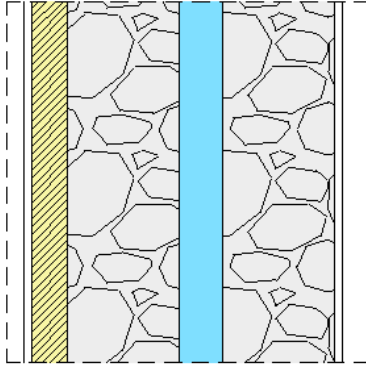
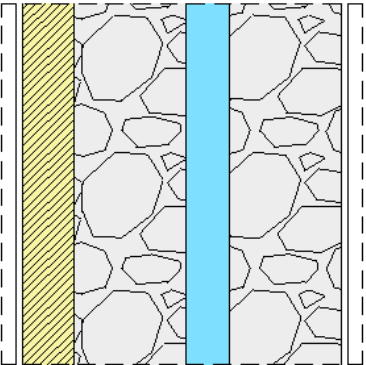
Muratura a cassa vuota in pietra	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
 non isolato	41	860.0	1.850	0.125	11.46	0.2312
	46	860.0	1.850	0.125	11.46	0.2312
	49	1060.0	1.743	0.078	13.25	0.1356
	54	1060.0	1.743	0.078	13.25	0.1356
	59	1310.0	1.625	0.044	15.48	0.0721
	64	1310.0	1.625	0.044	15.48	0.0721
	69	1560.0	1.522	0.026	17.76	0.0390
	74	1560.0	1.522	0.026	17.76	0.0390
	79	1810.0	1.431	0.015	20.08	0.0212
	84	1810.0	1.431	0.015	20.08	0.0212
	89	2060.0	1.350	0.009	22.43	0.0115
	94	2060.0	1.350	0.009	22.43	0.0115
 mediamente isolato	41	863.3	0.600	0.071	12.63	0.0426
	46	863.3	0.540	0.054	13.15	0.0295
	49	1063.3	0.588	0.042	14.34	0.0249
	54	1063.3	0.531	0.041	14.40	0.0219
	59	1313.3	0.574	0.023	16.52	0.0133
	64	1313.3	0.519	0.022	16.58	0.0117
	69	1563.3	0.560	0.013	18.78	0.0072
	74	1563.3	0.508	0.013	18.84	0.0064
	79	1813.3	0.547	0.007	21.10	0.0040
	84	1813.3	0.497	0.007	21.16	0.0035
	89	2063.3	0.535	0.004	23.45	0.0022
	94	2063.3	0.487	0.004	23.51	0.0019
 isolato	51	866.5	0.317	0.049	13.81	0.0155
	56	866.5	0.317	0.049	13.81	0.0155
	59	1066.5	0.314	0.029	15.51	0.0091
	64	1066.5	0.314	0.029	15.51	0.0091
	69	1316.5	0.310	0.016	17.69	0.0049
	74	1316.5	0.310	0.016	17.69	0.0049
	79	1566.5	0.306	0.009	19.95	0.0027
	84	1566.5	0.306	0.009	19.95	0.0027
	89	1816.5	0.302	0.005	22.28	0.0015
	94	1816.5	0.302	0.005	22.28	0.0015

Tabella 13 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: muratura a cassa vuota in mattoni.

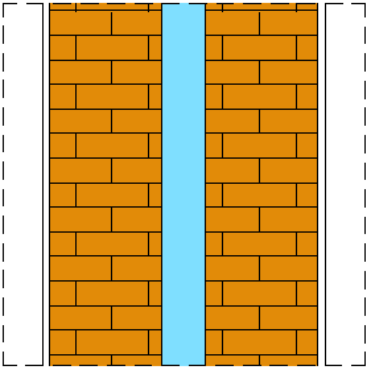
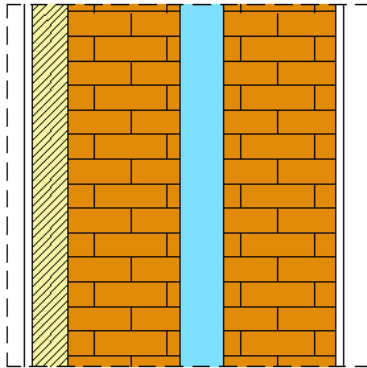
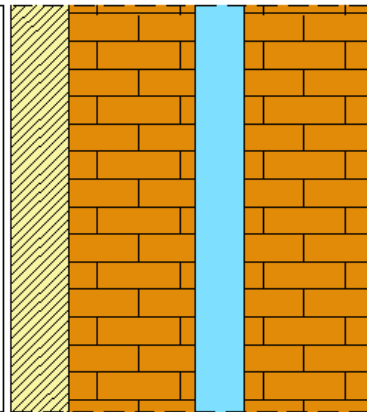
Muratura a cassa vuota in mattoni	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
 non isolato	41	636	1.223	0.164	12.42	0.2005
	46	636	1.223	0.164	12.42	0.2005
	49	780	1.087	0.093	14.98	0.1011
	54	780	1.087	0.093	14.98	0.1011
	59	960	0.954	0.046	18.17	0.0434
	64	960	0.954	0.046	18.17	0.0434
	69	1140	0.850	0.022	21.36	0.0188
	74	1140	0.850	0.022	21.36	0.0188
 mediamente isolato	41	639.25	0.513	0.097	13.95	0.0498
	46	636.75	0.822	0.115	13.34	0.1140
	49	783.25	0.487	0.051	16.48	0.0249
	54	783.25	0.448	0.049	16.56	0.0221
	59	963.25	0.458	0.023	19.63	0.0107
	64	963.25	0.423	0.022	19.72	0.0095
	69	1143.25	0.433	0.011	22.82	0.0046
	74	1143.25	0.401	0.010	22.91	0.0041
 isolato	51	642.5	0.291	0.058	14.99	0.0170
	56	642.5	0.291	0.058	14.99	0.0170
	59	786.5	0.283	0.030	17.50	0.0086
	64	786.5	0.283	0.030	17.50	0.0086
	69	966.5	0.273	0.014	20.67	0.0037
	74	966.5	0.273	0.014	20.67	0.0037
	79	1143	0.232	0.006	23.70	0.0014
	84	1143	0.232	0.006	23.70	0.0014

Tabella 14 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: parete in calcestruzzo.

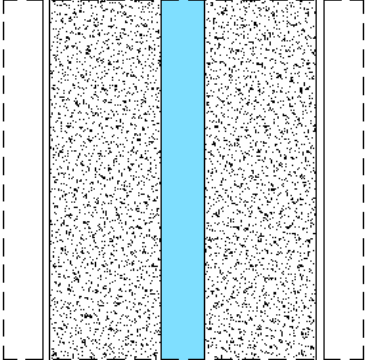
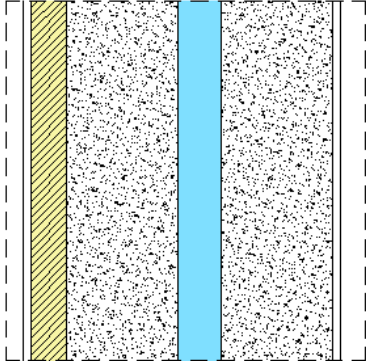
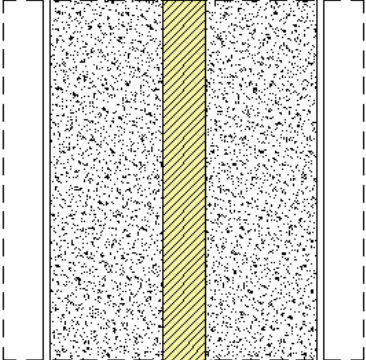
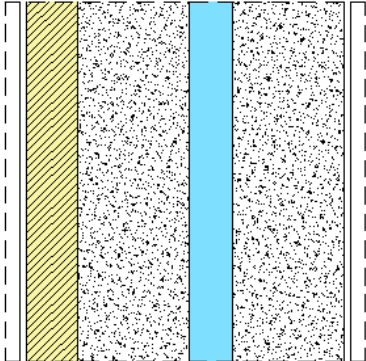
Parete in Calcestruzzo	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
 non isolato	49	1020.0	1.557	0.070	14.35	0.1087
	54	1020.0	1.557	0.070	14.35	0.1087
	59	1260.0	1.426	0.037	17.01	0.0528
	64	1260.0	1.426	0.037	17.01	0.0528
	69	1500.0	1.316	0.020	19.71	0.0259
	74	1500.0	1.316	0.020	19.71	0.0259
 mediamente isolato	54	1023.3	0.512	0.028	15.97	0.0145
	59	1023.3	0.512	0.028	15.97	0.0145
	64	1263.3	0.497	0.014	18.60	0.0071
	69	1263.3	0.497	0.014	18.60	0.0071
	74	1503.3	0.482	0.007	21.30	0.0035
	79	1503.3	0.482	0.007	21.30	0.0035
 mediamente isolato	49	1023.3	0.565	0.04	15.52	0.0211
	54	1023.3	0.51	0.04	15.59	0.0187
	59	1263.3	0.55	0.02	18.14	0.0103
	64	1263.3	0.50	0.02	18.21	0.0091
	69	1503.3	0.53	0.01	20.83	0.0051
	74	1503.3	0.48	0.01	20.90	0.0045
 isolato	59	1026.5	0.307	0.02	16.64	0.0076
	64	1026.5	0.31	0.02	16.64	0.0076
	69	1266.5	0.30	0.01	19.27	0.0038
	74	1266.5	0.30	0.01	19.27	0.0038
	79	1506.5	0.30	0.01	21.97	0.0019
	84	1506.5	0.30	0.01	21.97	0.0019

Tabella 15 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: parete in laterizio.

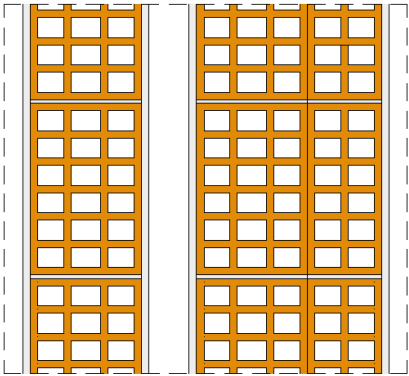
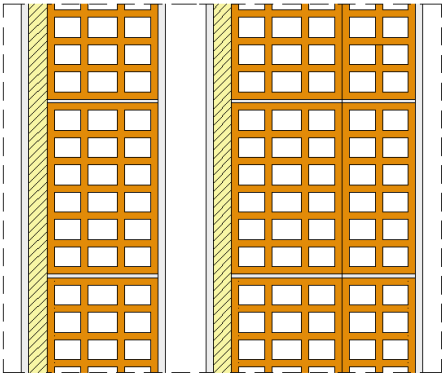
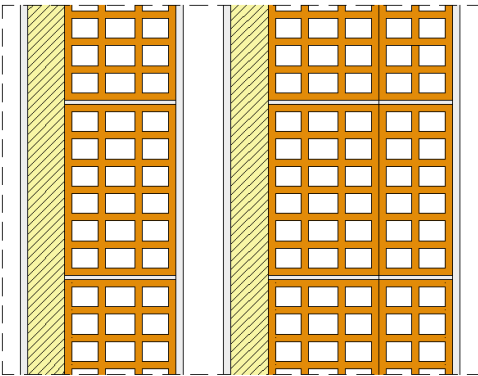
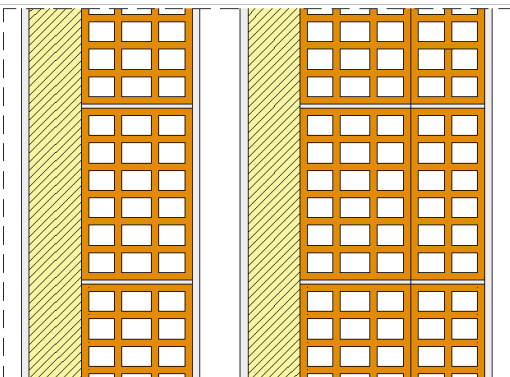
Parete in laterizio		s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
	non isolato	19	174.0	1.48	0.75	4.63	1.113
		29	248.8	0.96	0.46	8.13	0.442
		34	288.0	0.89	0.37	9.44	0.324
		44	362.8	0.67	0.19	12.94	0.128
	scarsamente isolato	21	175.3	0.829	0.62	5.94	0,5149
		31	250.1	0.634	0.32	9.52	0,2004
		36	289.3	0.603	0.24	10.82	0,1440
		46	364.1	0.493	0.12	14.31	0,0580
	mediamente isolato	24	177.3	0.503	0.55	6.61	0,2762
		34	252.0	0.423	0.25	10.20	0,1064
		39	291.3	0.409	0.19	11.48	0,0760
		49	366.0	0.355	0.09	14.97	0,0308
	isolato	29	180.5	0.304	0.40	7.70	0.1213
		39	255.3	0.273	0.17	11.21	0.0477
		44	294.5	0.267	0.13	12.49	0.0338
		54	369.3	0.243	0.06	16.00	0.0137
	altamente isolato	33	183.1	0.231	0.37	8.47	0.0859
		43	257.9	0.212	0.16	11.97	0.0337
		48	297.1	0.209	0.11	13.25	0.0239
		58	371.9	0.194	0.05	16.77	0.0097

Tabella 16 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: parete a cassetta (parte 1).

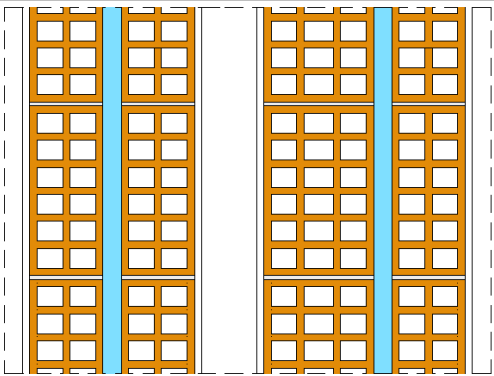
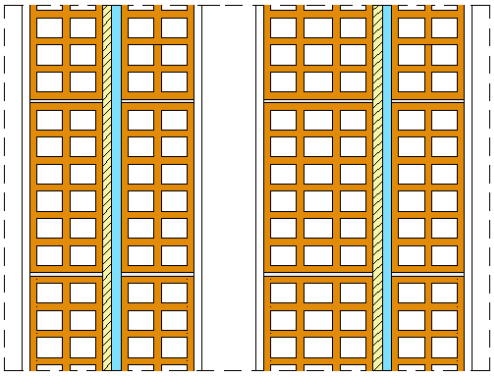
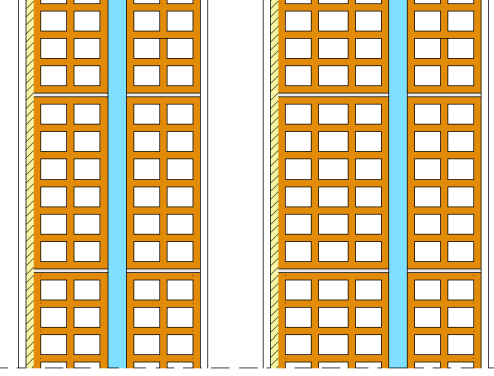
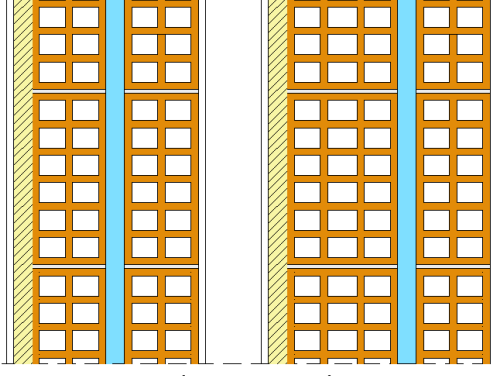
Parete a cassetta	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
	39	288.0	0.765	0.34	10.14	0.2584
	44	288.0	0.765	0.34	10.14	0.2584
	49	362.8	0.596	0.17	13.64	0.1020
	54	362.8	0.596	0.17	13.64	0.1020
	59	437.5	0.489	0.08	17.18	0.0398
	64	437.5	0.489	0.08	17.18	0.0398
non isolato						
	39	289.3	0.544	0.28	11.19	0.1516
	44	289.3	0.544	0.28	11.19	0.1516
	49	364.1	0.453	0.13	14.70	0.0597
	54	364.1	0.453	0.13	14.70	0.0597
	59	438.8	0.388	0.06	18.27	0.0231
	64	438.8	0.388	0.06	18.27	0.0231
scarsamente isolato						
	41	289.3	0.544	0.21	11.58	0.1143
	46	289.3	0.544	0.21	11.58	0.1143
	51	364.1	0.453	0.10	15.00	0.0461
	56	364.1	0.453	0.10	15.00	0.0461
	61	438.8	0.388	0.05	18.54	0.0180
	66	438.8	0.388	0.05	18.54	0.0180
debolmente isolato						
	44	291.3	0.381	0.16	12.25	0.0601
	49	291.3	0.381	0.16	12.25	0.0601
	54	366.0	0.334	0.07	15.67	0.0245
	59	366.0	0.334	0.07	15.67	0.0245
	64	440.8	0.297	0.03	19.21	0.0096
	69	440.8	0.297	0.03	19.21	0.0096
mediamente isolato						

Tabella 17 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: parete a cassetta (parte 2).

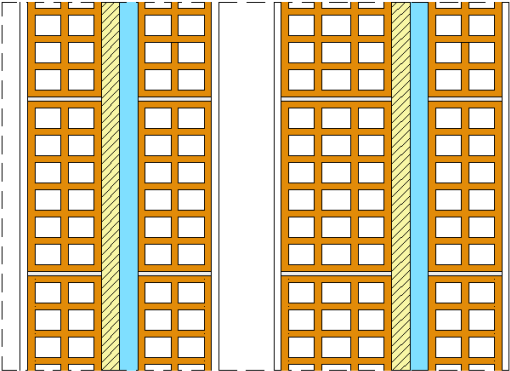
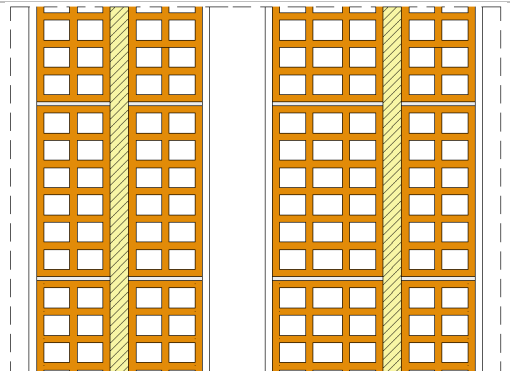
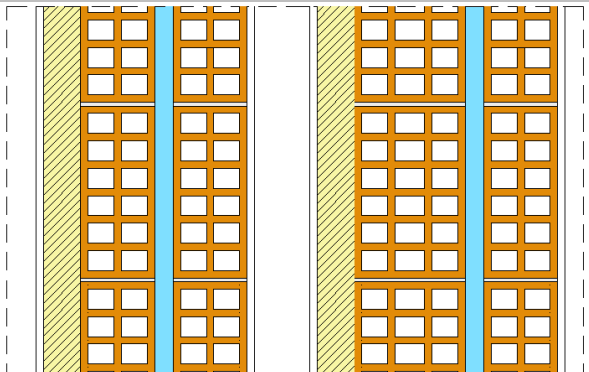
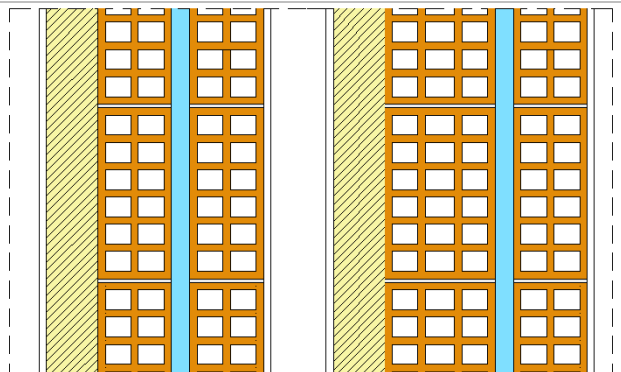
Parete a cassetta	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
	44	291.3	0.381	0.24	11.94	0.0904
	54	366.0	0.334	0.11	15.45	0.0355
	64	440.8	0.297	0.05	19.03	0.0137
mediamente isolato						
	39	291.3	0.409	0.24	11.82	0.0996
	49	366.0	0.355	0.11	15.33	0.0392
	59	440.8	0.314	0.05	18.91	0.0151
mediamente isolato						
	49	294.5	0.254	0.10	13.29	0.0266
	54	294.5	0.254	0.10	13.29	0.0266
	59	369.3	0.232	0.04	16.80	0.0105
	64	369.3	0.232	0.04	16.80	0.0105
	69	444.0	0.214	0.02	20.22	0.0043
	74	444.0	0.214	0.02	20.22	0.0043
isolato						
	53	297.1	0.201	0.09	14.06	0.0188
	58	297.1	0.201	0.09	14.06	0.0188
	63	371.9	0.187	0.04	17.56	0.0074
	68	371.9	0.187	0.04	17.56	0.0074
	73	446.6	0.175	0.02	20.99	0.0030
	78	446.6	0.175	0.02	20.99	0.0030
altamente isolato						

Tabella 18 – Caratteristiche termiche dei pacchetti ipotizzati: parete con paramento in mattoni.

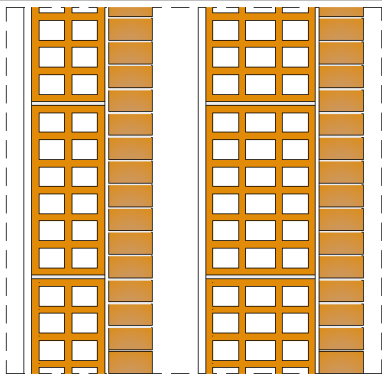
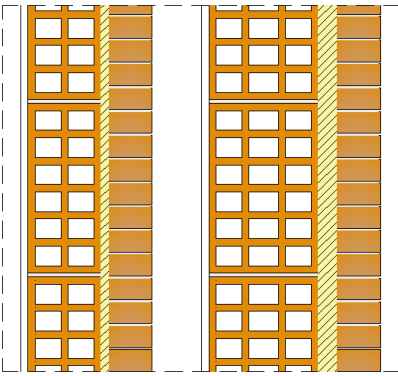
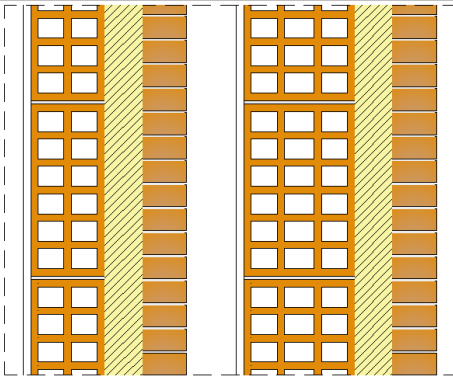
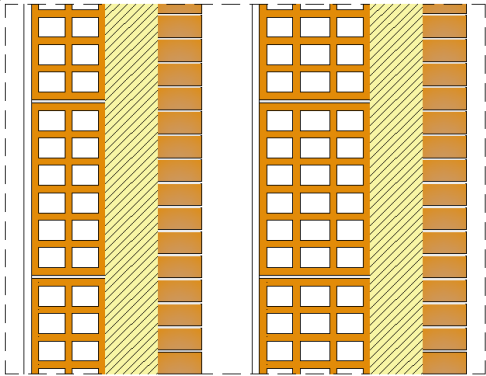
Parete con paramento in mattoni - 1		s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
	non isolato	29	360.0	1.246	0.45	8.22	0.5619
		39	434.8	0.853	0.26	11.72	0.2227
	scarsamente isolato	31	361.3	0.751	0.34	9.95	0.2567
		41	436.1	0.588	0.17	13.46	0.1012
	mediamente isolato	34	363.3	0.473	0.28	10.74	0.1342
		44	438.0	0.402	0.13	14.24	0.0528
	isolato	39	366.5	0.293	0.25	11.62	0.0724
		49	441.3	0.264	0.11	15.12	0.0284
	altamente isolato	43	369.1	0.224	0.23	12.41	0.0512
		53	443.9	0.207	0.10	15.91	0.0201

Tabella 19 – Caratteristiche termiche dei pacchetti ipotizzati: parete con paramento in mattoni.

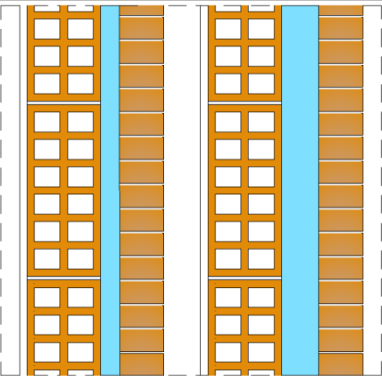
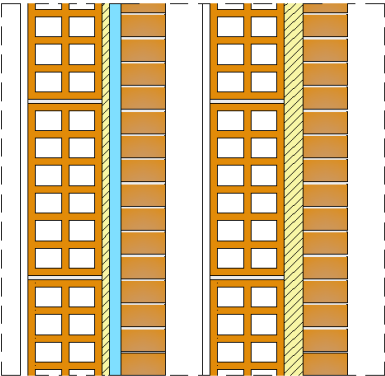
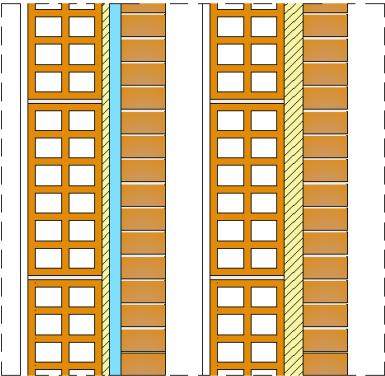
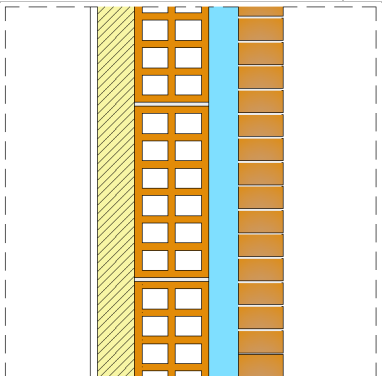
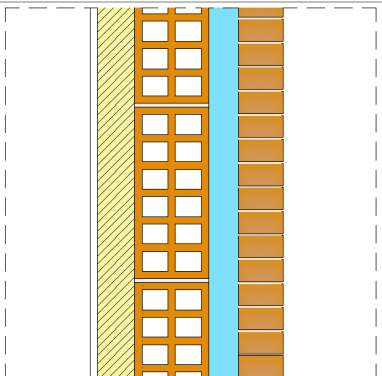
Parete con paramento in mattoni - 2		s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
 non isolato		34	360.0	1.02	0.40	9.11	0.411
		39	360.0	1.02	0.40	9.11	0.411
		44	434.8	0.74	0.22	12.62	0.162
		49	434.8	0.74	0.22	12.62	0.162
 scarsamente isolato		34	361.3	0.66	0.32	10.19	0.213
		39	361.3	0.66	0.32	10.19	0.213
		44	436.1	0.53	0.16	13.69	0.084
		49	436.1	0.53	0.16	13.69	0.084
	 mediamente isolato	39	363.3	0.44	0.28	10.85	0.121
		49	438.0	0.37	0.13	14.35	0.047
		34	363.3	0.47	0.28	10.74	0.134
		44	438.0	0.40	0.13	14.24	0.053
 isolato		44	366.5	0.28	0.19	12.06	0.053
		49	366.5	0.28	0.19	12.06	0.053
		54	441.3	0.25	0.08	15.49	0.021
		59	441.3	0.25	0.08	15.49	0.021
 altamente isolato		48	369.1	0.22	0.17	12.85	0.038
		53	369.1	0.22	0.17	12.85	0.038
		58	443.9	0.20	0.08	16.28	0.015
		63	443.9	0.20	0.08	16.28	0.015

Tabella 20 – Caratteristiche termiche dei pacchetti ipotizzati: parete con paramento in pietra.

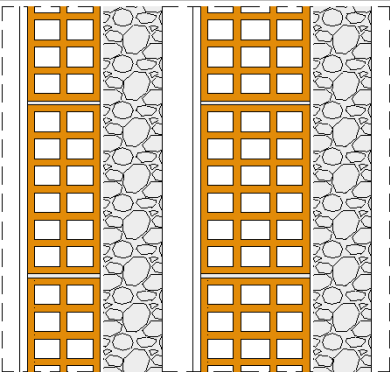
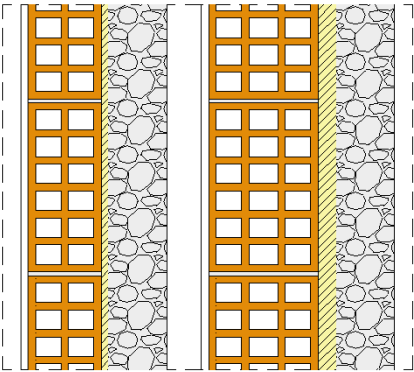
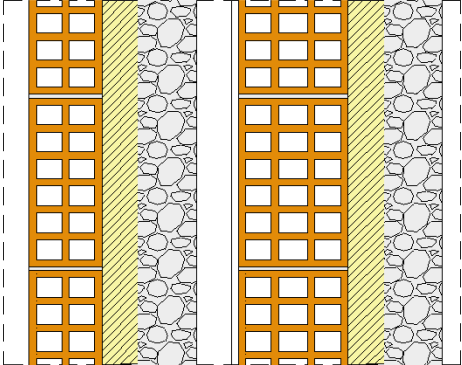
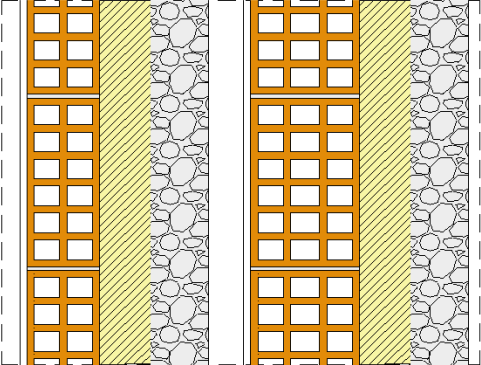
Parete con paramento in pietra - 1		s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
	non isolato	33	544.0	1.397	0.38	8.81	0.526
		43	618.8	0.922	0.23	12.30	0.209
	scarsamente isolato	35	545.3	0.804	0.27	10.75	0.215
		45	620.1	0.619	0.14	14.26	0.085
	mediamente isolato	38	547.3	0.493	0.22	11.50	0.108
		48	622.0	0.417	0.10	15.01	0.042
	isolato	43	550.5	0.300	0.19	12.34	0.057
		53	625.3	0.270	0.08	15.85	0.023
	altamente isolato	47	553.1	0.229	0.18	13.11	0.040
		57	627.9	0.211	0.08	16.62	0.016

Tabella 21 – Caratteristiche termiche dei pacchetti ipotizzati: parete con paramento in pietra.

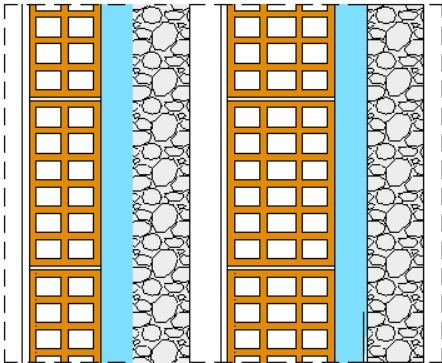
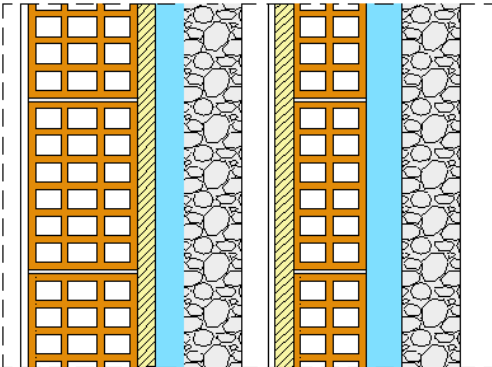
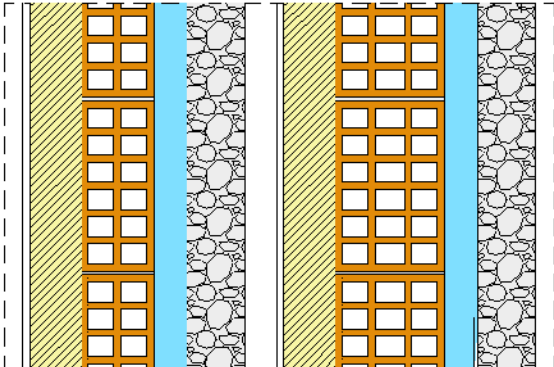
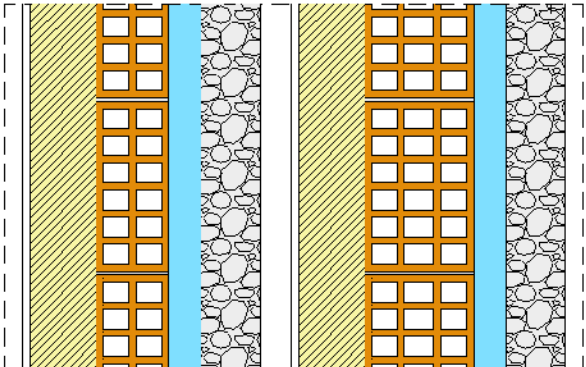
Parete con paramento in pietra - 2		s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
 non isolato		38	544.0	1.116	0.33	9.87	0.3636
		43	544.0	1.116	0.33	9.87	0.3636
		48	618.8	0.791	0.18	13.37	0.1439
		53	618.8	0.791	0.18	13.37	0.1439
 scarsamente isolato mediamente isolato		38	545.3	0.702	0.25	10.98	0.1758
		43	545.3	0.702	0.25	10.98	0.1758
		48	620.1	0.557	0.12	14.49	0.0692
		53	620.1	0.557	0.12	14.49	0.0692
		38	547.3	0.493	0.22	11.50	0.1081
		43	547.3	0.453	0.19	11.97	0.0872
		48	584.6	0.435	0.15	13.49	0.0648
		53	622.0	0.387	0.09	15.42	0.0345
		58	622.0	0.387	0.09	15.42	0.0345
		43	547.3	0.453	0.21	11.61	0.0966
		53	622.0	0.387	0.10	15.12	0.0380
 isolato		48	550.5	0.285	0.17	12.81	0.0475
		53	550.5	0.285	0.17	12.81	0.0475
		58	625.3	0.257	0.07	16.26	0.0189
		63	625.3	0.257	0.07	16.26	0.0189
 altamente isolato		52	553.1	0.220	0.15	13.60	0.0338
		57	553.1	0.220	0.15	13.60	0.0338
		62	627.9	0.203	0.07	17.05	0.0134
		67	627.9	0.203	0.07	17.05	0.0134

Tabella 22 – Caratteristiche termiche dei pacchetti ipotizzati: parete con blocco termico e cappotto.

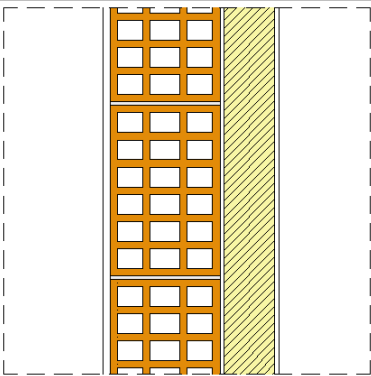
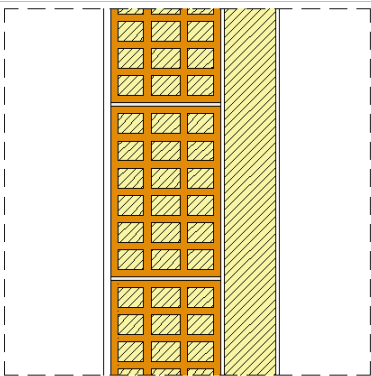
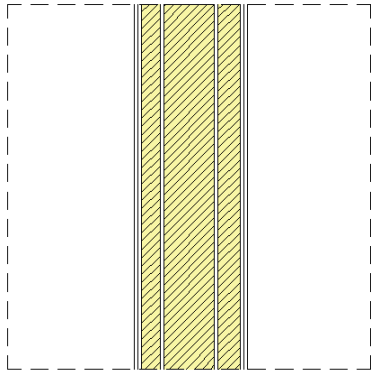
Parete con blocco termico	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
 isolato	44	288.0	0.21	0.01	20.81	0.003
 altamente isolato	44	288.0	0.13	0.00	11.71	0.000
	48	229.2	0.17	0.09	14.06	0.016

Tabella 23 – Caratteristiche termiche dei pacchetti ipotizzati: parete leggera.

Parete leggera	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
 altamente isolato	30	105.0	0.19	0.21	12.62	0.039
	33	147.0	0.15	0.17	13.78	0.025
	33	133.5	0.17	0.25	11.60	0.042
	38	155.4	0.18	0.05	18.75	0.009

2.2.2.2 Involucro edilizio: componenti opache orizzontali

Analogamente alle componenti opache verticali, anche per le componenti orizzontali opache sono state definite le più diffuse tipologie costruttive e sono state calcolate le caratteristiche termiche a partire da dati di Letteratura disponibili e da studi precedentemente condotti [35, 36, 37]. In questo caso, le componenti orizzontali sono state suddivise in: solaio di copertura, solaio di interpiano, solaio di fondazione. Per ognuna di queste sono state desunte le principali tipologie edilizie maggiormente diffuse nel territorio, riportate in Tabella 24.

Tabella 24 – Tipologie e nomenclatura delle componenti opache orizzontali maggiormente diffuse in Italia.

N.	Tipologia	Materiale	Nomenclatura	codice
1	Solaio di copertura	legno	solaio in legno	1
		misto	solaio in laterocemento	2
		misto	solaio alleggerito con EPS	3
2	Solaio di fondazione	legno	solaio in legno	4
		calcestruzzo	solaio in calcestruzzo	5
		igloo	solaio in calcestruzzo e igloo	6
		misto	solaio in laterocemento	7
		misto	solaio alleggerito con EPS	8
3	Solaio di interpiano	legno	solaio in legno	9
		misto	solaio in acciaio e volterrane	10
		misto	solaio in acciaio e tavelloni	11
		misto	solaio alleggerito con EPS	12
		misto	solaio in laterocemento	13

Le tipologie edilizie comuni ai tre raggruppamenti di componenti orizzontali sono i solai in legno, i solai in laterocemento e i solai in EPS; quest'ultimi sono solai di più recente costruzione, pertanto saranno caratterizzati da livelli di isolamento tali da soddisfare i requisiti delle normative più recenti. I solai di fondazione in legno erano principalmente utilizzati ad inizio 1900, e risultano ormai in disuso, così come i due solai di interpiano in acciaio principalmente impiegati fino al 1950. Entrambi, pertanto, saranno caratterizzati da un livello di isolamento nullo o comunque limitato. Un discorso diverso è stato adottato per le altre tipologie, le quali possono essere caratterizzate da tutti i livelli di isolamento termico precedentemente definiti per le componenti verticali opache.

Sulla base di queste considerazioni generali, al fine di definire delle caratteristiche termiche rappresentative del parco edilizio italiano, valendosi dell'esperienza e del supporto di dati presenti in Letteratura, è stato fatto riferimento ai materiali riportati Tabella 25, per i quali sono stati considerati dei valori standard medi sia della conducibilità termica che della densità e del calore specifico, tipici di quel materiale.

Tabella 25 – Caratteristiche termiche dei materiali costituenti le strutture opache orizzontali.

Materiale	Spessore [m]	Conducibilità termica [W/(m K)]	Densità [kg/m³]	Calore specifico [J/kg K]
intonaco	0.02	0.7	1500	1000
tavolato in legno	0.02-0.08	0.12	450	2200
calcestruzzo	0.1-0.6	1.70	2400	1000
massetto in calcestruzzo	0.05-0.10	2.02	2200	1000
tavole in laterizio	0.04-0.06	0.333-0.429	800	840
solaio in laterocemento	0.18-0.30	0.72	1800	840
soletta alleggerita con EPS	0.25-0.40	0.22-0.25	800-940	≅ 1000
tegole	0.02	0.575	1350	840
pavimentazione	0.01	1.30	2300	840
isolante – 1	0.02-0.18	0.045	100	840
isolante – 2	0.02-0.18	0.032	30	1250

Anche in questo caso sono state, quindi, definite delle possibili stratigrafie per le quali sono stati calcolati gli stessi parametri calcolati precedentemente considerati per i componenti verticali (spessore, massa superficiale, trasmittanza termica, fattore di attenuazione, sfasamento, trasmittanza termica periodica). I valori calcolati sono riportati da Tabella 26 a Tabella 38 per ogni tipologia di componente orizzontale opaco individuata. Si precisa che, relativamente ai componenti isolati, i valori riportati nelle tabelle rappresentano i valori medi delle 2 o più configurazioni ipotizzate (ad esempio tipo di isolante diverso ma di uguale spessore). Tutti i risultati sono riportati al variare dello spessore ipotizzato, della configurazione di isolamento Tabella 5 e della stratigrafia della parete assunta (riportata graficamente nelle stesse tabelle).

Tabella 26 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio in legno confinante verso l'esterno.

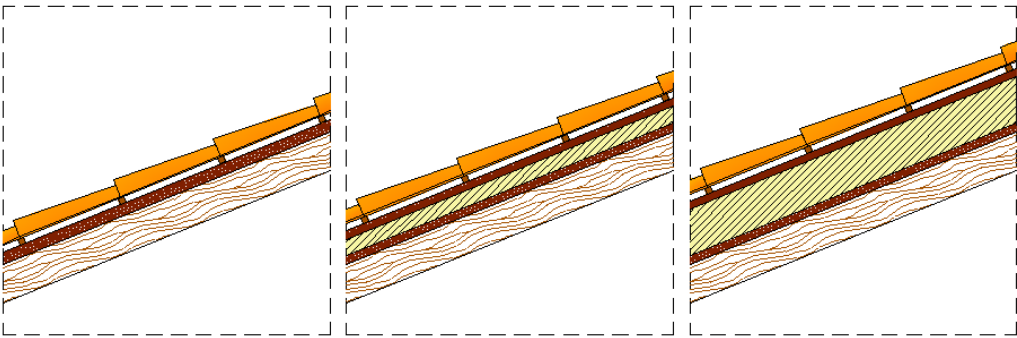
Solaio in legno confinante verso l'esterno						
						
Configurazione isolamento	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
non isolato	8	45.0	1.497	0.95	1.90	1.4194
scarsamente isolato	10	46.3	0.836	0.93	2.49	0.7749
mediamente isolato	13	48.3	0.505	0.90	2.98	0.4568
isolato	18	51.5	0.305	0.87	3.80	0.2651
altamente isolato	22	54.1	0.231	0.83	4.61	0.1919
	26	56.7	0.187	0.78	5.56	0.1437

Tabella 27 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio in laterocemento confinante verso l'esterno.

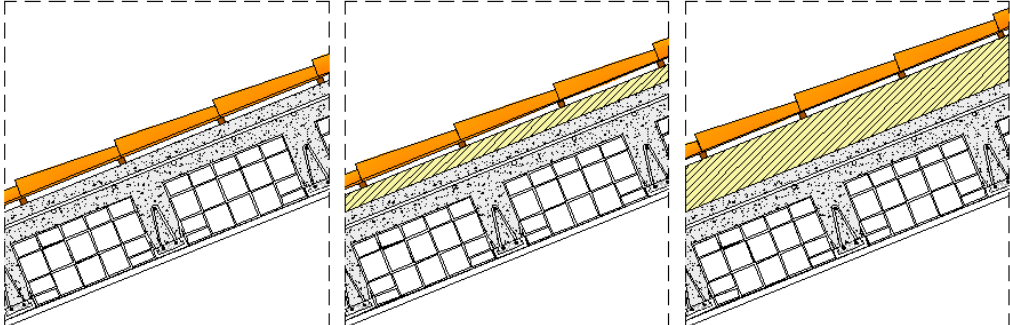
Solaio in laterocemento confinante verso l'esterno						
						
Configurazione isolamento	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
non isolato	24	381.0	1.630	0.38	7.46	0.6115
	28	453.0	1.495	0.29	8.78	0.4295
	36	597.0	1.282	0.17	11.44	0.2134
scarsamente isolato	26	382.3	0.876	0.27	8.16	0.2343
	30	454.3	0.836	0.20	9.47	0.1646
	38	598.3	0.764	0.11	12.12	0.0820
mediamente isolato	29	384.3	0.520	0.23	8.55	0.1210
	33	456.3	0.505	0.17	9.85	0.0851
	41	600.3	0.478	0.09	12.50	0.0424
isolato	34	387.5	0.310	0.21	9.24	0.0660
	38	459.5	0.305	0.15	10.55	0.0464
	46	603.5	0.295	0.08	13.20	0.0232
altamente isolato	38	390.1	0.234	0.20	9.99	0.0471
	42	462.1	0.231	0.14	11.29	0.0332
	50	606.1	0.225	0.07	13.95	0.0165

Tabella 28 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio alleggerito in EPS confinante verso l'esterno.

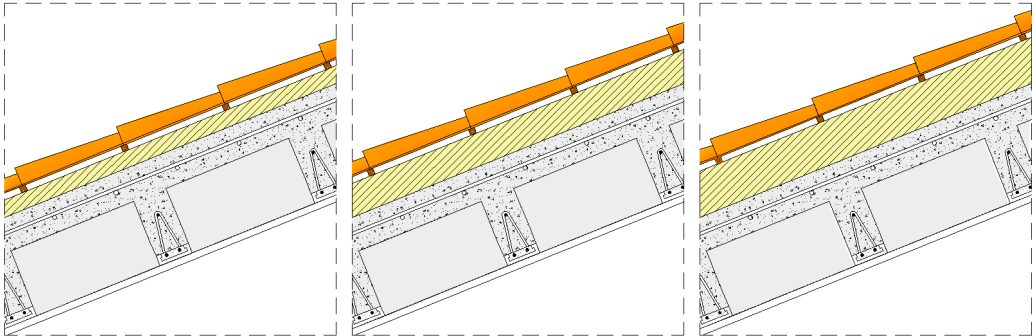
Solaio alleggerito in EPS confinante verso l'esterno						
						
Configurazione isolamento	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
mediamente isolato	36	294.3	0.358	0.10	13.62	0.0353
	41	316.3	0.337	0.07	15.06	0.0243
	51	379.3	0.302	0.03	18.45	0.0100
isolato	41	297.5	0.244	0.08	14.43	0.0197
	46	319.5	0.234	0.06	15.87	0.0136
	56	382.5	0.216	0.03	19.26	0.0056
altamente isolato	45	300.1	0.194	0.07	15.22	0.0141
	50	322.1	0.188	0.05	16.66	0.0097
	60	385.1	0.177	0.02	20.05	0.0040

Tabella 29 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio in legno confinante verso il terreno.

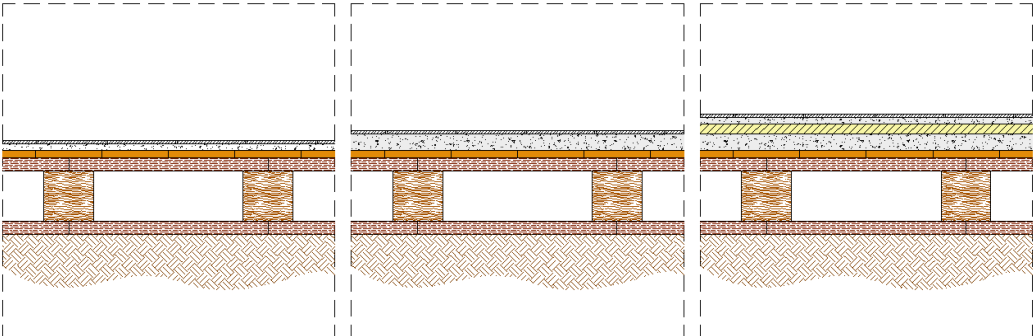
Solaio in legno confinante verso il terreno						
						
Configurazione isolamento	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
non isolato	14	27.0	1.075	0.89	2.69	0.9577
	16	27.0	1.075	0.89	2.69	0.9577
	24	183.0	1.092	0.40	6.08	0.4420
	29	293.0	1.063	0.24	7.22	0.2604
scarsamente isolato	18	28.3	0.685	0.85	3.48	0.5828
	29	286.0	0.821	0.20	9.23	0.1614
mediamente isolato	21	30.3	0.446	0.81	4.13	0.3593
	32	289.0	0.530	0.14	10.12	0.0741

Tabella 30 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio in calcestruzzo confinante verso terreno.

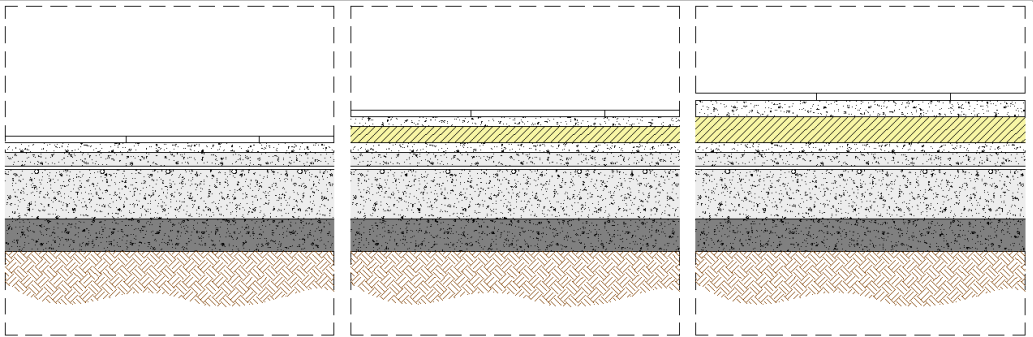
Solaio in calcestruzzo confinante verso terreno						
						
Configurazione isolamento	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
non isolato	36	733.0	2.414	0.23	9.34	0.5555
scarsamente isolato	43	844.3	1.036	0.09	12.86	0.0923
mediamente isolato	46	846.3	0.583	0.10	12.26	0.0627
isolato	51	849.5	0.330	0.09	12.95	0.0292

Tabella 31 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio in calcestruzzo e igloo verso il terreno.

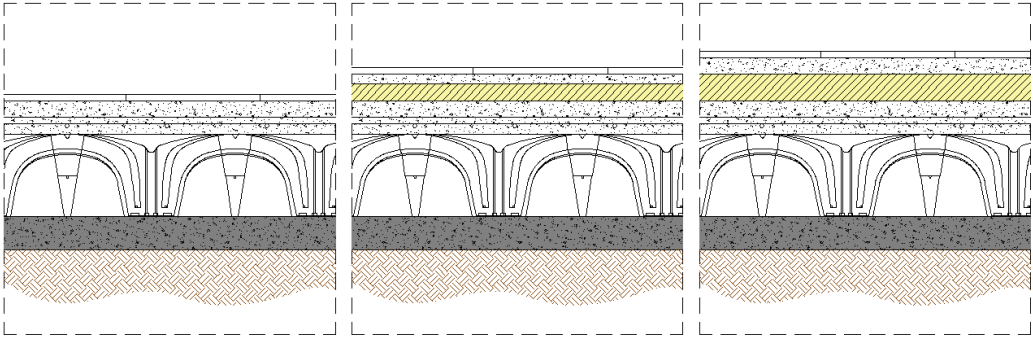
Solaio in calcestruzzo e igloo verso il terreno						
						
Configurazione isolamento	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
non isolato	58	515.0	0.962	0.13	9.74	0.1298
	78	515.0	0.791	0.11	10.18	0.0831
scarsamente isolato	65	626.3	0.627	0.08	12.58	0.0485
	85	626.3	0.550	0.06	13.03	0.0310
mediamente isolato	68	628.3	0.420	0.07	12.98	0.0279
	88	628.3	0.384	0.05	13.43	0.0178
isolato	73	631.5	0.272	0.06	13.74	0.0160
	93	631.5	0.256	0.04	14.19	0.0102

Tabella 32 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio in laterocemento confinante verso terreno.

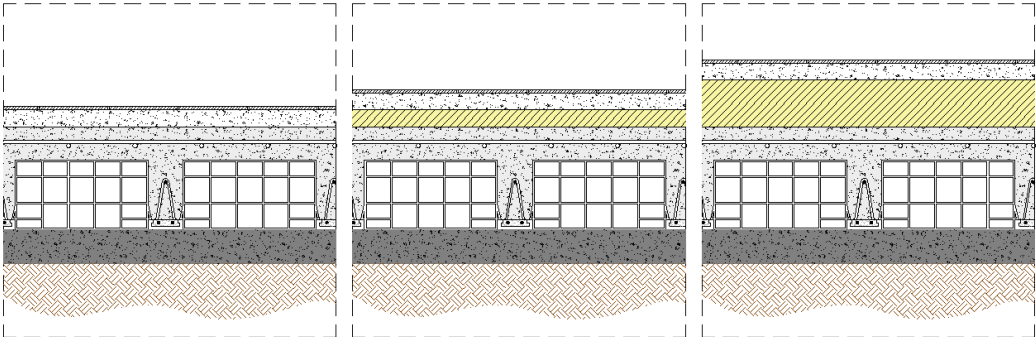
Solaio in laterocemento confinante verso terreno						
						
Configurazione isolamento	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
non isolato	34	617.0	1.574	0.20	10.85	0.3199
	38	689.0	1.447	0.16	12.18	0.2256
	46	833.0	1.247	0.09	14.86	0.1121
scarsamente isolato	36	618.3	0.860	0.12	12.11	0.1000
	40	690.3	0.820	0.09	13.45	0.0706
	48	834.3	0.752	0.05	16.12	0.0351
mediamente isolato	39	620.3	0.514	0.09	12.57	0.0485
	43	692.3	0.499	0.07	13.90	0.0342
	51	836.3	0.473	0.04	16.58	0.0170
isolato	44	623.5	0.308	0.08	13.98	0.0247
	48	695.5	0.303	0.06	15.31	0.0175
	56	839.5	0.293	0.03	17.98	0.0087
altamente isolato	48	626.1	0.233	0.08	14.00	0.0182
	52	698.1	0.230	0.06	15.33	0.0128
	60	842.1	0.224	0.03	18.01	0.0064

Tabella 33 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio alleggerito in EPS confinante verso terreno.

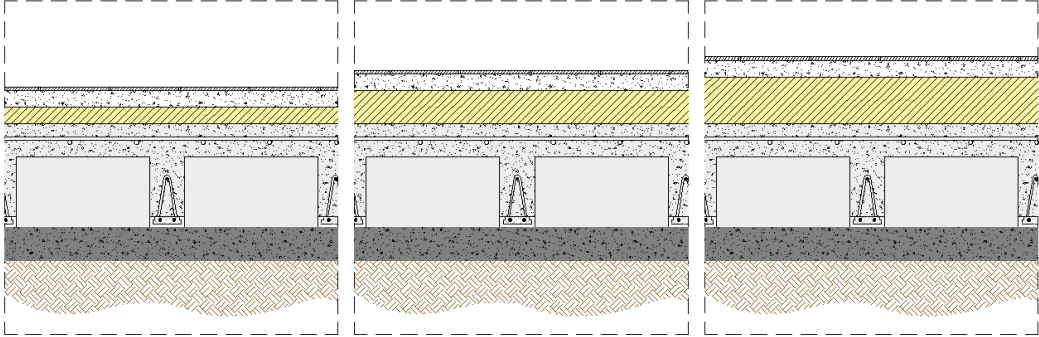
Solaio alleggerito in EPS confinante verso terreno						
						
Configurazione isolamento	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
mediamente isolato	46	530.3	0.355	0.03	18.67	0.0096
	51	552.3	0.335	0.02	20.13	0.0065
	61	615.3	0.300	0.01	23.53	0.0027
isolato	51	533.5	0.243	0.03	19.81	0.0063
	56	555.5	0.233	0.02	21.26	0.0043
	66	618.5	0.215	0.01	0.66	0.0018
altamente isolato	55	536.1	0.194	0.02	20.13	0.0036
	60	558.1	0.187	0.01	21.60	0.0024
	70	621.1	0.176	0.01	1.00	0.0010

Tabella 34 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio in legno confinante verso zone non riscaldate.

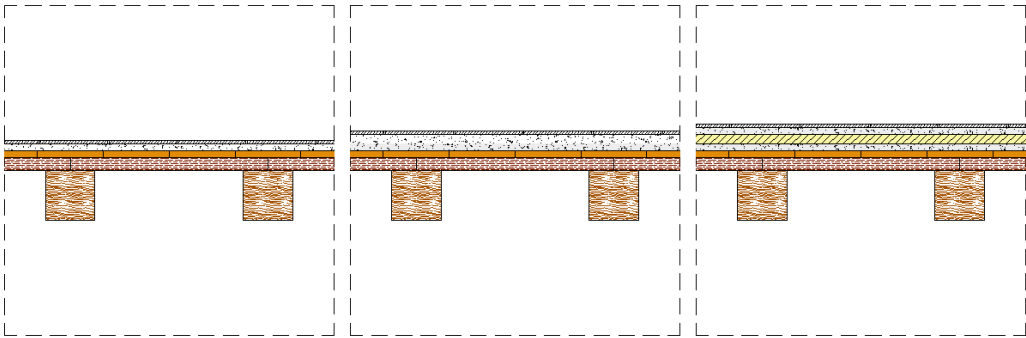
Solaio in legno confinante verso zone non riscaldate						
						
Configurazione isolamento	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
non isolato	12	174.0	2.178	0.87	2.89	1.8916
	17	284.0	2.066	0.69	4.45	1.4199
scarsamente isolato	19	286.0	1.077	0.37	7.11	0.3996
mediamente isolato	22	289.0	0.627	0.29	7.78	0.1812

Tabella 35 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio in acciaio e volterrane confinante verso zone non riscaldate.

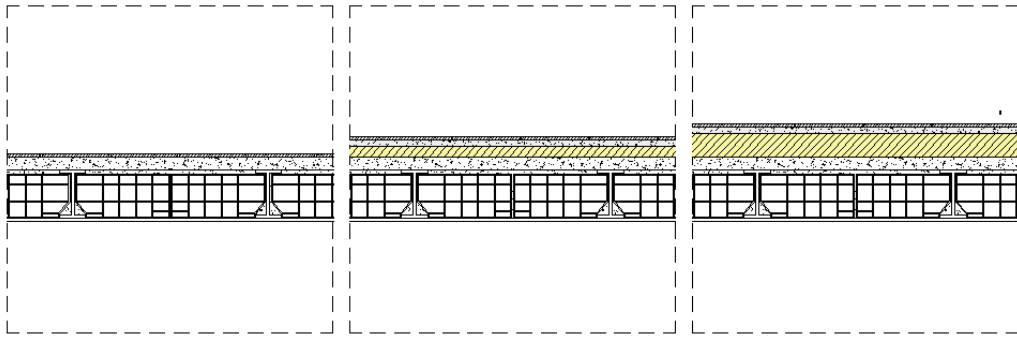
Solaio in acciaio e volterrane confinante verso zone non riscaldate						
						
Configurazione isolamento	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
non isolato	20	379.0	2.720	0.63	5.50	1.7175
scarsamente isolato	22	380.3	1.119	0.41	7.51	0.4581
mediamente isolato	25	382.3	0.597	0.35	8.02	0.2116

Tabella 36 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio in acciaio e tavelloni confinante verso zone non riscaldate.

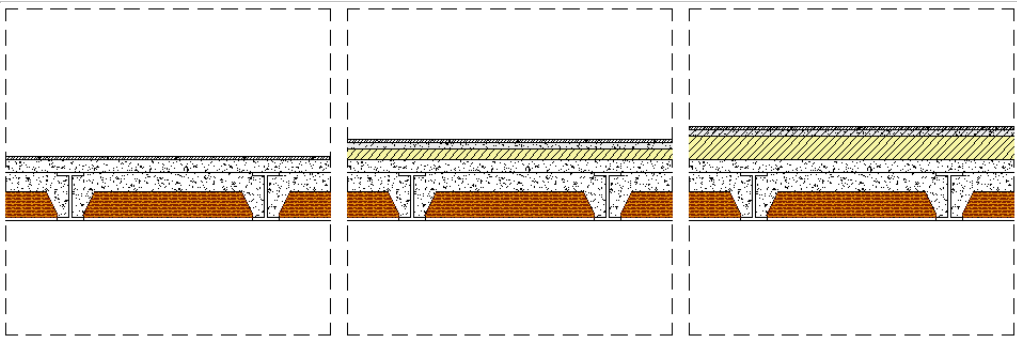
Solaio in acciaio e tavelloni confinante verso zone non riscaldate						
						
Configurazione isolamento	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
non isolato	24	420.0	2.562	0.54	5.76	1.3936
scarsamente isolato	26	421.3	1.091	0.25	8.16	0.2771
mediamente isolato	29	423.3	0.589	0.21	8.62	0.1222

Tabella 37 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio alleggerito in EPS confinante verso zone non riscaldate o l'esterno.

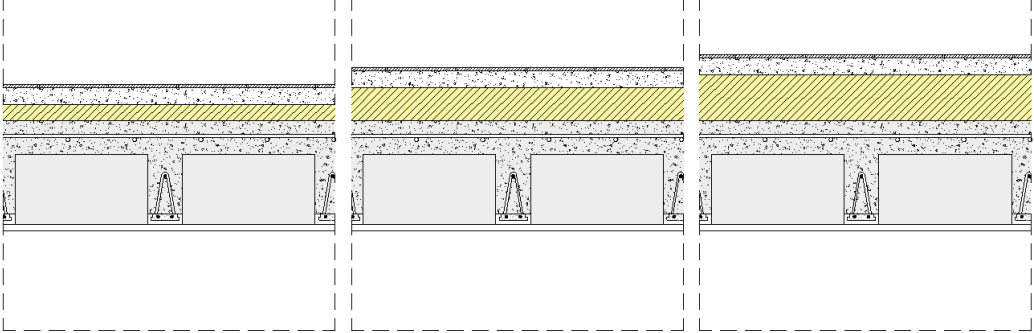
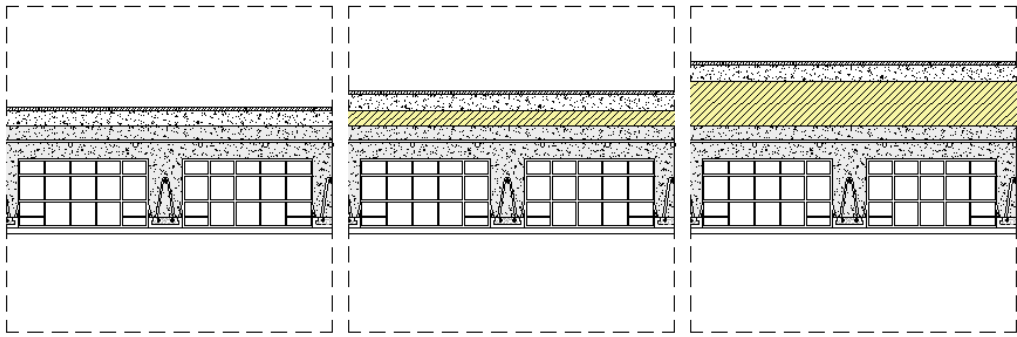
Solaio alleggerito in EPS confinante verso zone non riscaldate						
						
Configurazione isolamento	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
mediamente isolato	38	400.3	0.380	0.09	15.05	0.0353
	43	422.3	0.357	0.07	16.49	0.0242
	53	485.3	0.317	0.03	19.88	0.0100
isolato	43	403.5	0.254	0.07	15.87	0.0188
	48	425.5	0.243	0.05	17.30	0.0129
	58	488.5	0.224	0.02	20.70	0.0053
altamente isolato	47	406.1	0.201	0.07	16.63	0.0133
	52	428.1	0.194	0.05	18.07	0.0092
	62	491.1	0.182	0.02	21.47	0.0038

Tabella 38 – Caratteristiche termiche medie dei pacchetti ipotizzati: solaio in laterocemento confinante verso zone non riscaldate.

Solaio in laterocemento confinante verso zone non riscaldate						
						
Configurazione isolamento	s [cm]	Ms [kg/m ²]	U [W/m ² K]	Fd [-]	φ [h]	ψ [W/m ² K]
non isolato	26	487.0	2.217	0.46	7.54	1.0231
	30	559.0	1.974	0.37	8.88	0.7207
	38	703.0	1.619	0.22	11.56	0.3575
scarsamente isolato	28	488.3	1.023	0.26	9.50	0.2647
	32	560.3	0.968	0.19	10.81	0.1860
	40	704.3	0.873	0.11	13.46	0.0926
mediamente isolato	31	490.3	0.568	0.21	10.00	0.1219
	35	562.3	0.551	0.16	11.30	0.0857
	43	706.3	0.519	0.08	13.96	0.0427
isolato	36	493.5	0.327	0.19	10.69	0.0631
	40	565.5	0.321	0.14	12.00	0.0444
	48	709.5	0.310	0.07	14.65	0.0221
altamente isolato	40	496.1	0.244	0.18	11.41	0.0445
	44	568.1	0.241	0.13	12.72	0.0313
	52	717.0	0.268	0.07	15.69	0.0178

2.2.2.3 Involucro edilizio: componenti vetrati

I componenti trasparenti sono l'ultimo aspetto analizzato relativo alle caratteristiche dell'involucro costruttivo tipico del parco edilizio italiano. Relativamente alla componente vetrata, in riferimento a dati di letteratura, precedentemente alla prima legge in ambito energetico [6] gli infissi erano caratterizzati prevalentemente da vetri singoli. A seguito delle prime leggi energetiche, si iniziarono ad installare vetrocamera con aria nell'intercapedine in sostituzione del vetro singolo, e dopo il 2000, vetrocamera con gas nell'intercapedine. Oggi sono molto diffusi vetrocamera basso-emissivi con gas nell'intercapedine, caratterizzati da prestazioni termiche molto performanti.

Il telaio maggiormente utilizzato, invece, risulta essere il legno, impiegato già prima della legge n. 373 del 76 [6], e tutt'ora in uso grazie alle sue ottime prestazioni termiche. Oltre al legno, fino agli anni 80', era molto adottato il metallo senza taglio termico, successivamente sostituito da telai con taglio termico più performanti realizzati con diverso materiale.

Ai fini del presente lavoro, le caratteristiche termiche degli infissi sono state definite con il supporto della normativa tecnica [21]; queste sono riportate in Tabella 39 e in Tabella 40 rispettivamente per il vetro e per il telaio.

Tabella 39 – Caratteristiche termiche medie dei vetri [21].

Tipologia di vetro	emissività [-]	Trasmittanza termica – U [W/m²K]				
		senza intercapedine	con intercapedine			
			Aria	Argon	Krypton	Xenon
vetro singolo	1.00	5.35	-	-	-	-
vetro doppio	0.89	-	2.92	2.76	2.66	2.60
	0.20	-	2.14	1.90	1.68	1.62
	0.15	-	2.04	1.78	1.58	1.48
	0.10	-	1.96	1.68	1.42	1.36
	0.05	-	1.84	1.50	1.26	1.18
vetro triplo	0.89	-	2.10	1.93	1.70	1.63
	0.20	-	1.50	1.27	0.97	0.83
	0.15	-	1.47	1.20	0.90	0.80
	0.10	-	1.40	1.10	0.80	0.70
	0.05	-	1.30	1.00	0.70	0.57

Tabella 40 – Caratteristiche termiche medie dei telai degli infissi [21].

Tipologia telaio	Trasmittanza termica – U [W/m²K]	
	media	deviazione standard
Poliuretano	2.8	-
PVC	1.6	0.516
Legno duro	1.925	0.219
Legno tenero	1.675	0.262
Metallo con taglio termico	2.04	0.621
Metallo senza taglio termico	7	-

Come evidenziato al paragrafo 2.2.1, le dimensioni minime degli infissi negli edifici residenziali sono definite dal Regolamento Edilizio [34] che impone una superficie finestrata apribile minima non inferiore a 1/8 della superficie del pavimento. Pertanto, ai fini del presente lavoro, le dimensioni delle finestre saranno definite conseguentemente alla definizione delle dimensioni geometriche dei modelli di simulazione oggetto di analisi e in accordo con le dimensioni medie riscontrate nelle precedenti attività di ricerca [35, 36].

Un concetto simile è stato applicato per la definizione delle caratteristiche termiche dell'intero componente finestrato (telaio + vetro); infatti, come è noto, la sua trasmittanza termica è influenzata dalle dimensioni geometriche, dalla percentuale di telaio e vetro, nonché dal coefficiente di trasmissione lineica del ponte termico associato, calcolabile in accordo alla UNI EN ISO 14683 [43] o mediante calcolo agli elementi finiti. Pertanto, anche il calcolo delle caratteristiche termiche dell'intero componente finestrato sarà effettuato conseguentemente con la definizione del modello di simulazione.

A titolo esemplificativo, nel caso dell'area del telaio pari al 20% dell'intera finestra e in presenza di comuni distanziatori di vetrate, è possibile fare riferimento alla Tabella 41 [21] che fornisce i valori tipici della trasmittanza termica del componente finestrato al variare delle prestazioni termiche del vetro e del telaio.

In aggiunta alla trasmittanza termica, in accordo con la metodologia fornita dalla UNI/TS 11300-1 [21], per il componente finestrato sarebbe inoltre necessario considerare dei fattori di riduzione e delle resistenze termiche aggiuntive, in funzione del tipo di tenda e della chiusura oscurante presente, per i quali si rimanda sempre alla normativa di riferimento [21].

Tabella 41 – Trasmittanza termica dell'infisso in funzione delle caratteristiche termiche del vetro e del telaio [21].

vetro	U_{vetro} [W/m ² K]	U_{telaio} [W/m ² K]												
		0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.6	3.0	3.4	3.8	7.0
singolo	5.7	4.7	4.8	4.8	4.8	4.9	4.9	5.0	5.0	5.1	5.2	5.2	5.3	6.0
doppio o triplo	3.3	3.0	3.0	3.0	3.1	3.1	3.2	3.2	3.3	3.4	3.5	3.5	3.6	4.1
	3.2	2.9	2.9	3.0	3.0	3.0	3.1	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.5	4.0
	3.1	2.8	2.8	2.9	2.9	3.0	3.0	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.9
	3.0	2.7	2.8	2.8	2.8	2.9	2.9	3.0	3.1	3.1	3.2	3.3	3.4	3.9
	2.9	2.6	2.7	2.7	2.8	2.8	2.8	2.9	3.0	3.1	3.1	3.2	3.3	3.8
	2.8	2.6	2.6	2.6	2.7	2.7	2.8	2.8	2.9	3.0	3.1	3.1	3.1	3.7
	2.7	2.5	2.5	2.6	2.6	2.6	2.7	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.1	3.6
	2.6	2.4	2.4	2.5	2.5	2.6	2.6	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.5
	2.5	2.3	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	2.7	2.8	2.9	3.0	3.5
	2.4	2.2	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4	2.5	2.6	2.6	2.7	2.8	2.9	3.4
	2.3	2.2	2.2	2.2	2.3	2.3	2.4	2.4	2.5	2.6	2.7	2.7	2.8	3.3
	2.2	2.1	2.1	2.2	2.2	2.2	2.3	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.7	3.2
	2.1	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	2.2	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	3.1
	2.0	2.0	2.0	2.1	2.1	2.1	2.2	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	3.1
	1.9	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	2.1	2.3	2.3	2.4	2.5	2.6	3.1
	1.8	1.8	1.9	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.2	2.3	2.3	2.4	2.5	3.0
	1.7	1.7	1.8	1.8	1.9	1.9	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.3	2.4	2.9
	1.6	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.9	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.3	2.8
	1.5	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.7
	1.4	1.5	1.5	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.9	1.9	2.0	2.1	2.2	2.7
	1.3	1.4	1.5	1.5	1.5	1.6	1.6	1.7	1.8	1.9	1.9	2.0	2.1	2.6
	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.9	2.0	2.5
	1.1	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.9	2.4
	1.0	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.3
	0.9	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.5	1.5	1.6	1.7	1.8	2.3
	0.8	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	1.7	2.2
	0.7	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	2.1
	0.6	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.5	2.0
	0.5	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5	1.9

2.2.3 Indagine delle caratteristiche impiantistiche

L'analisi delle caratteristiche impiantistiche è stata condotta facendo riferimento sia a dati Istat disponibili online [27], che rielaborando dati di Letteratura. Sono stati quindi analizzati i dati Istat del 2013 per i diversi servizi energetici presenti all'interno degli edifici, i quali, però fanno riferimento solo ad edifici residenziali. Relativamente al riscaldamento (Figura 13), nelle regioni italiane è prevalentemente presente un impianto di tipo autonomo, seguito da impianti di tipo centralizzato nel nord Italia e da apparecchi mobili o fissi nelle

zone centrali e del sud Italia. Solo in Sardegna si evidenzia una netta prevalenza di impianti fissi o portatili rispetto agli impianti autonomi.

Il vettore energetico impiegato negli impianti di riscaldamento è invece riportato in Figura 14; da questo si evince come il combustibile maggiormente usato sia il metano (oltre il 70% degli impianti nella maggior parte delle regioni), seguito dalle biomasse (valor medio di poco inferiore al 20%) e dal gasolio (media del 6.9%). In Sardegna, regione in cui non vi è il metano, è prevalentemente utilizzata la Biomassa (40.2%), seguita dal GPL (21.2%) e dall'energia elettrica (19.7%).

Altro aspetto rilevante ai fini del presente lavoro, riguarda il numero di ore effettive di accensione dell'impianto termico (Figura 15), il quale permetterà di definire, nel secondo anno di attività, dei profili di utenza più realistici. I dati Istat del 2013 [27] forniscono una media nazionale di 7.9 ore/giorno per gli impianti centralizzati, 7.30 per gli impianti autonomi e di 9.3 per gli altri apparecchi. Il numero di ore medio stimato per ciascuna regione è riportato in Figura 15, da cui si osserva un trend decrescente passando dalle regioni a Nord (più fredde) verso quelle a Sud (meno fredde).

Relativamente agli impianti di raffrescamento (Figura 16), invece, dai dati Istat si evince come nelle diverse regioni italiane sia prevalentemente presente un climatizzatore caldo/freddo (media nazionale maggiore del 70%) seguito da condizionatori, ossia impianti funzionanti solo per il raffrescamento estivo (media nazionale del 25%). Il numero medio di ore di accensione, come era lecito attendersi, presenta un trend crescente passando dalle regioni a Nord (meno calde) verso quelle a Sud (più calde). Mediamente, su tutto il territorio italiano, circa il 37% delle persone accendono solo occasionalmente l'impianto di climatizzazione estiva, quindi solo se veramente necessario; circa il 26%, invece, lo accende quotidianamente, mentre quasi il 23% lo accende qualche giorno a settimana. La ripartizione nazionale delle percentuali di utilizzo dell'impianto di raffrescamento è riportata in Figura 17.

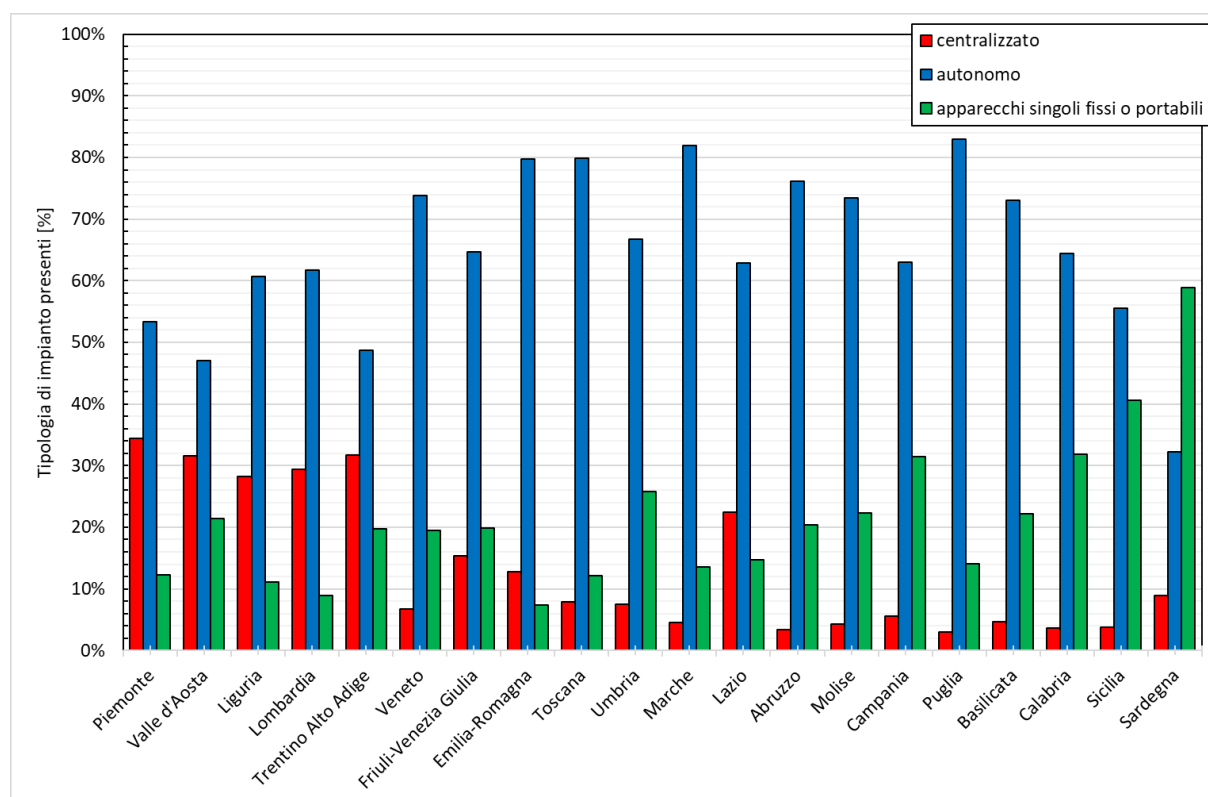


Figura 13 – Percentuale del campione indagato suddiviso per la tipologia impiantistica: riscaldamento (elaborazione dati da [27]).

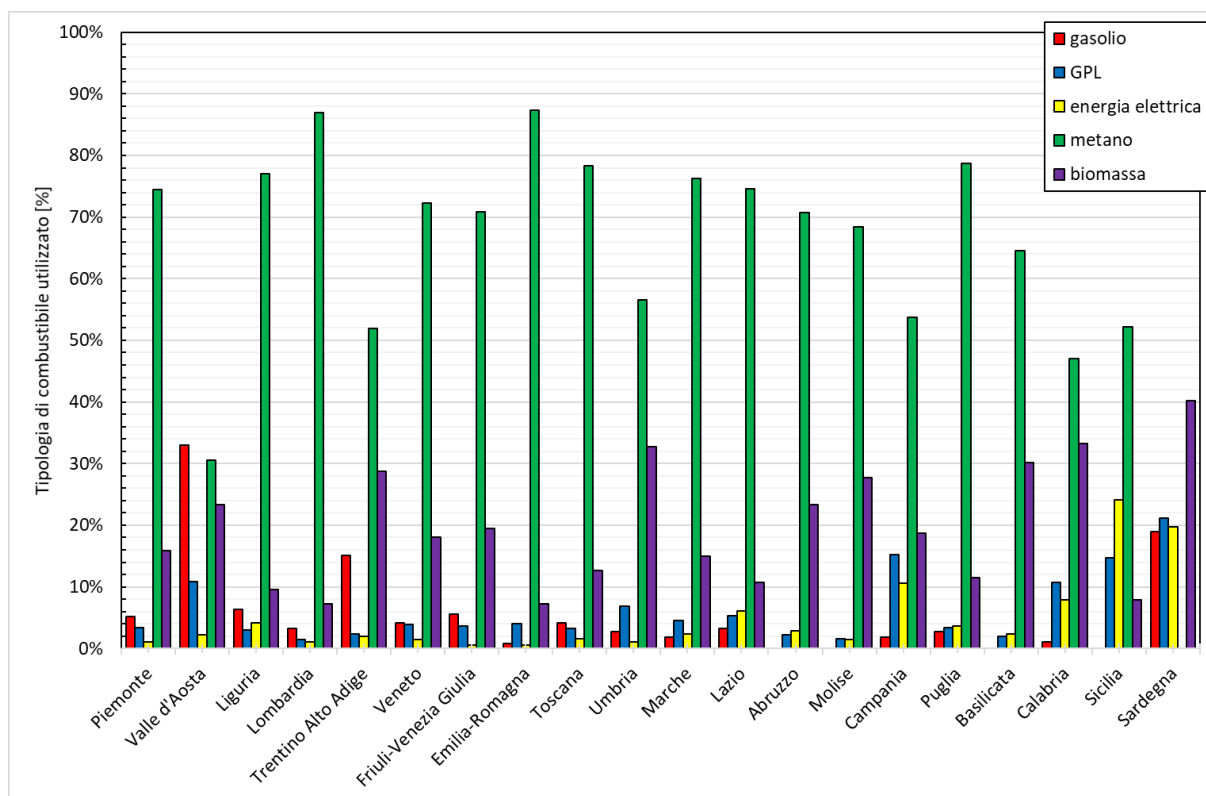


Figura 14 – Percentuale del campione indagato suddiviso per combustibile utilizzato: riscaldamento (elaborazione dati da [27]).

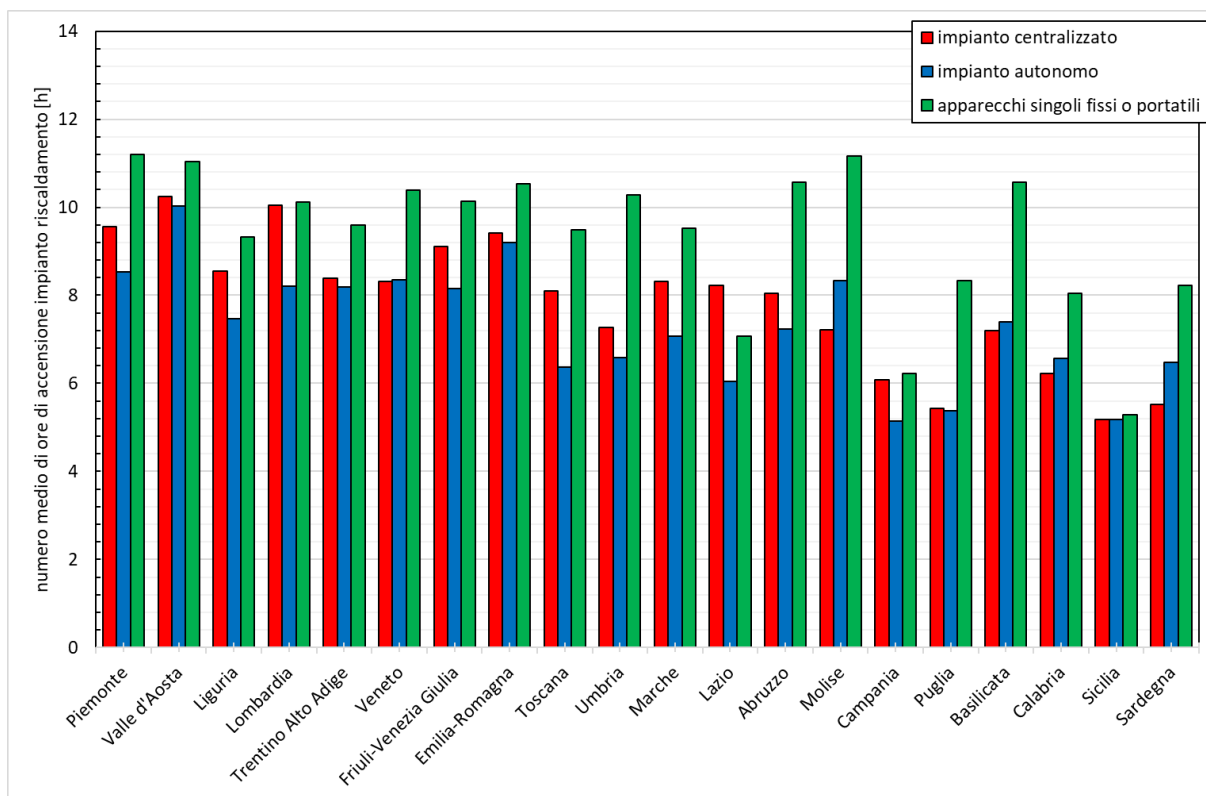


Figura 15 – Numero medio di ore di accensione dell'impianto di riscaldamento (elaborazione dati da [27]).

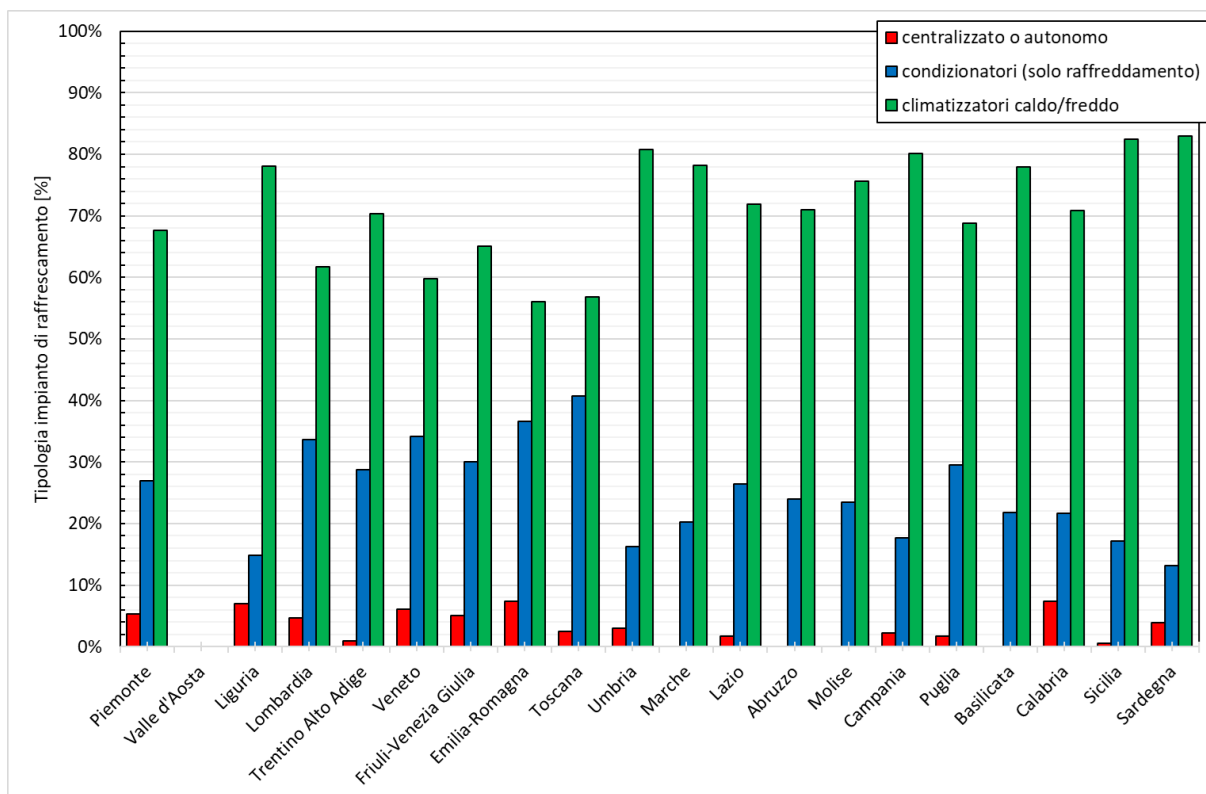


Figura 16 – Percentuale del campione indagato suddiviso per tipologia impiantistica: raffrescamento (elaborazione dati da [27]).

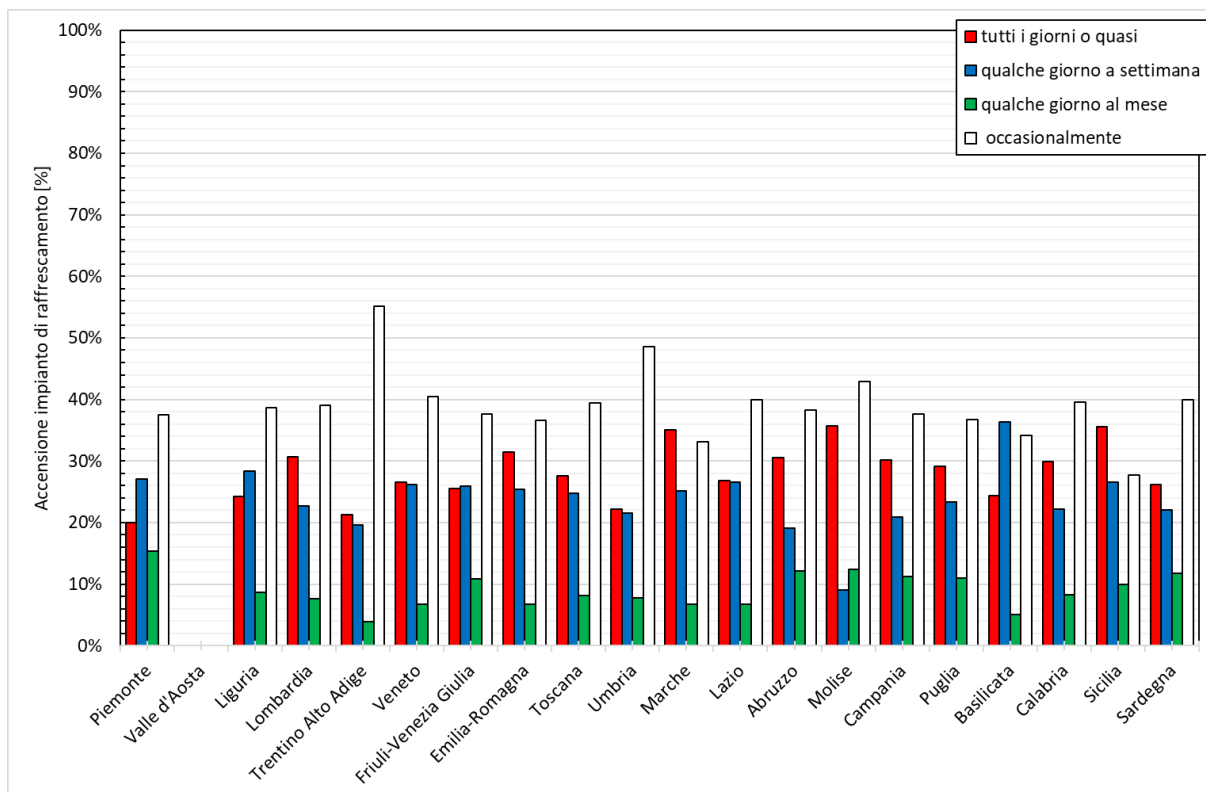


Figura 17 – Percentuale del campione indagato raggruppato per tipologia di accensione dell'impianto di raffrescamento (elaborazione dati da [27]).

L'acqua calda sanitaria, infine, viene prevalentemente prodotta utilizzando impianti di tipo autonomi, seguito da impianti centralizzati nel nord Italia e da scaldabagni nelle zone centrali e del sud (Figura 18). Anche in questo caso il combustibile maggiormente impiegato (Figura 19) è il metano (quasi il 70% a livello nazionale), seguito dall'energia elettrica (14.8%) e GPL (9.2%).

In riferimento alla Figura 19, circa lo 0.6% della produzione di acqua calda sanitaria deriva dall'energia solare; in considerazione delle nuove politiche energetiche e dei requisiti minimi da soddisfare in caso di nuove costruzioni, è lecito, ad oggi, attendersi delle percentuali associate alle fonti energetiche rinnovabili più elevate, non solo nel servizio energetico analizzato.

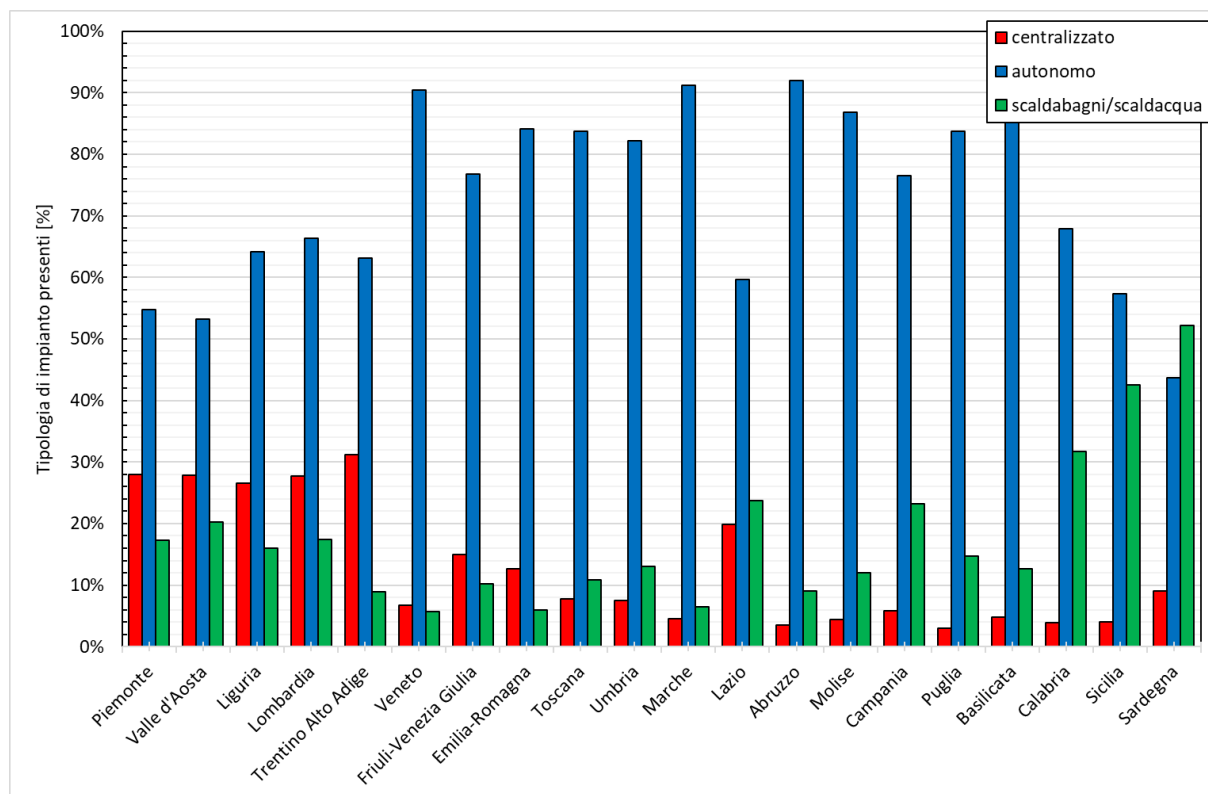


Figura 18 – Percentuale del campione indagato per tipologia impiantistica: produzione acqua calda sanitaria (elaborazione dati da [27]).

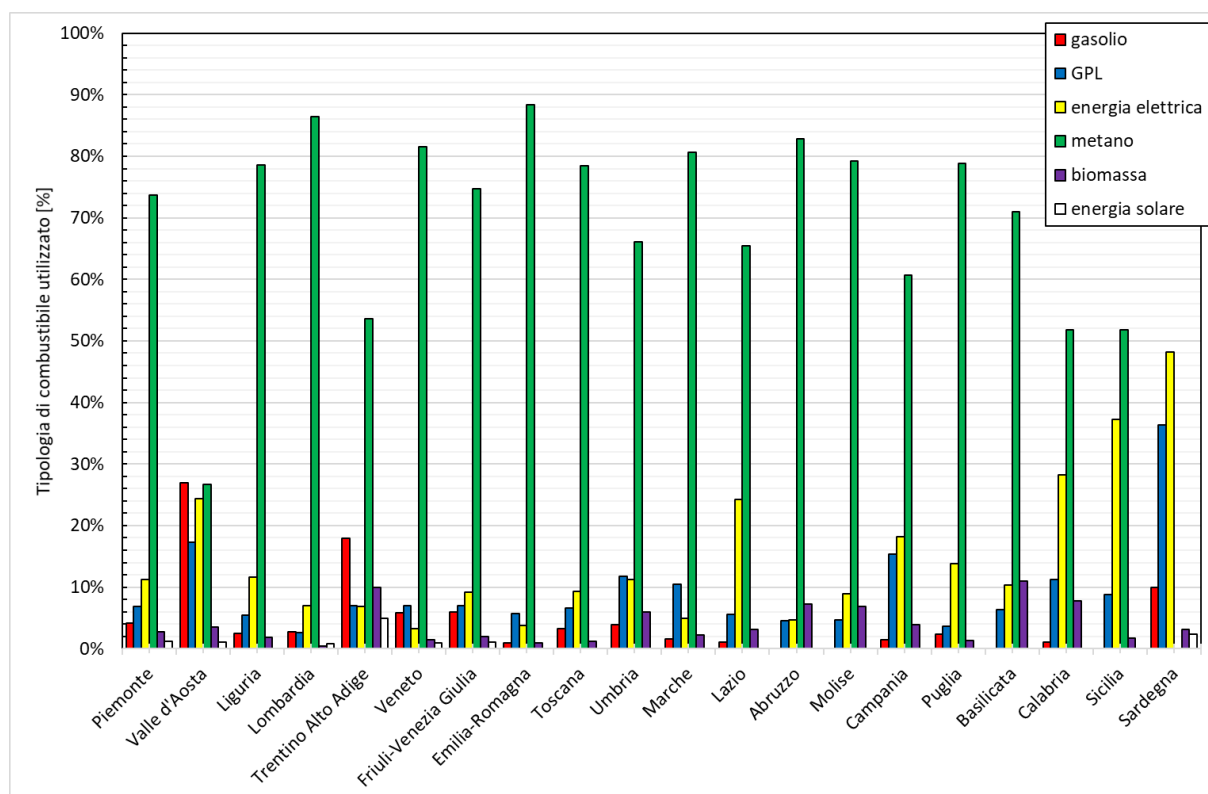


Figura 19 – Percentuale del campione indagato per tipo di combustibile utilizzato per produrre l'acqua calda sanitaria (elaborazione dati da [27]).

L'analisi dei dati Istat ha evidenziato la tipologia di impianto installato nei diversi edifici italiani, ma non ha permesso di inquadrarne la tecnologia. Per tale motivo, il lavoro è proseguito andando a studiare le tecnologie impiantistiche potenzialmente installabili per ciascun servizio energetico. Questo aspetto sarà maggiormente approfondito e verificato successivamente con l'analisi del SIAPE.

Definire delle tipologie standard utilizzabili per tutte le destinazioni d'uso, è un'analisi di non semplice esecuzione, anche in considerazione delle notevoli differenze del territorio italiano.

In generale, gli impianti possono essere classificati in funzione delle grandezze che permettono di controllare. Nello specifico, si possono distinguere:

1. impianti di riscaldamento: permettono il controllo della sola temperatura dell'aria;
2. impianti di climatizzazione: permettono il controllo della sola temperatura dell'aria ma in condizioni invernali ed estive;
3. impianti di condizionamento: consentono di controllare più grandezze (temperatura, umidità relativa, velocità e purezza dell'aria) in condizioni sia invernali che estive;
4. apparecchi autonomi: permettono il controllo della sola temperatura ma in un numero limitato di locali.

Sia negli impianti di riscaldamento che in quelli climatizzazione, è possibile delineare una analoga configurazione impiantistica anche se, come descritto, gli impianti di climatizzazione possono inviare sia acqua calda, che acqua refrigerata ai terminali di immissione.

Gli impianti di climatizzazione, a loro volta, possono essere suddivisi in:

1. autonomi: impianti caratterizzati da un generatore di calore di potenza intorno ai 30 kW a servizio di un'unica utenza;
2. centralizzati: indicati generalmente anche come impianti condominiali. Queste sono tipologie nelle quali il generatore di calore (di elevata potenza) è collocato in apposito locale (centrale termica) da cui si dirama tutta la rete di distribuzione, a servizio di molteplici utenze.

Gli impianti di condizionamento possono essere invece suddivisi in sistemi a tutt'aria e sistemi misti aria-acqua, a seconda della tipologia di fluido impiegato per il controllo delle grandezze (temperatura, umidità relativa, purezza e velocità).

Per tutte le tipologie di impianto brevemente descritte, indipendentemente dal servizio energetico servito, è sempre possibile individuare i seguenti sottosistemi:

1. Sistema di generazione del calore: sottosistema che ingloba tutte le tipologie impiantistiche che permettono la generazione del calore o del freddo;
2. Sistema di distribuzione: sottosistema che racchiude tutte le componenti impiantistiche necessarie per portare il calore generato ai terminali di emissione;
3. Sistema di regolazione: sottosistema che permette di regolare l'entità dell'energia da fornire agli ambienti;
4. Sistema di emissione: sottosistema che permette di immettere il calore generato all'interno dell'ambiente da climatizzare o condizionare.

Per ciascun sottosistema, inoltre, in conformità con la normativa vigente [21, 22, 23, 24, 25, 26], viene calcolato e attribuito un rendimento che rappresenta l'efficienza dello specifico sistema considerato.

Relativamente al sistema di generazione del calore, si riscontra una ampia gamma di tipologie, tra le quali:

1. caldaie a modulazione di fiamma: sistemi capaci di modulare la potenza del bruciatore;
2. caldaie a temperatura scorrevole: permettono di ottenere una variazione della temperatura massima di mandata del fluido termovettore secondo una logica prefissata;
3. caldaie a condensazione: permettono il recupero del calore latente contenuto nel vapor d'acqua presente nei fumi;
4. caldaie a più passaggi di fumi: realizzano più passaggi dei fumi all'interno della caldaia.

Più in generale è possibile distinguere le caldaie in funzione della temperatura dei fumi; se la temperatura dei fumi è dell'ordine di 70-80°C, i generatori sono classificati come a condensazione, mentre nel caso di temperature superiori a 100°C si definiscono standard.

Oltre a questi è possibile climatizzare un ambiente anche sfruttando altri sistemi, quali le pompe di calore. Questi sono sistemi termodinamici che permettono di trasferire calore da una sorgente a temperatura inferiore ad una a temperatura superiore sfruttando un fenomeno di compenso che può essere sotto forma di lavoro meccanico (nel caso di macchine a compressione) o di calore (nel caso macchine ad assorbimento). Dal punto di vista concettuale, una pompa di calore non differisce da una macchina frigorifera se non per la fase utile: in una macchina frigorifera, infatti, questa avviene nell'ambiente da raffreddare (sorgente a temperatura inferiore), nella pompa di calore, invece, avviene nell'ambiente da riscaldare (sorgente a temperatura superiore). Una stessa macchina, inoltre, può funzionare sia in estate che in inverno, quindi come macchina frigorifera o come pompa di calore; in questo caso, nella configurazione impiantistica è presente una valvola che inverte il ciclo.

La forma di energia utilizzata come fenomeno di compenso può essere una prima classificazione delle pompe di calore; una seconda classificazione può essere quella in funzione della tipologia della sorgente fredda e del fluido riscaldato.

Infine, si segnalano sistemi a portata di refrigerante variabile, che vanno sotto il nome di VRV o VRF, ovvero Variant Refrigerant Volume o Variant Refrigerant Flow. Questi sono sistemi a espansione diretta in cui, a differenza dei sistemi tradizionali, nella rete di distribuzione circola il gas refrigerante proveniente dall'unità motocondensante esterna. Si tiene a precisare come questi ultimi sistemi sono principalmente utilizzati per la climatizzazione di grossi ambienti, quindi, solitamente tipici del settore non residenziale.

Tra i terminali di immissione, si segnala l'utilizzo di limitate tipologie sia per edifici residenziali che non residenziali. Tra questi si hanno:

- ✓ radiatori: terminali alimentati ad acqua caratterizzati da un'altezza, numero di colonne e numero di elementi variabile in funzione della dimensione dell'ambiente da riscaldare. Sono elementi dimensionati per lavorare ad alte temperature (70-80°C) e possono essere realizzati con diverso

materiale, quale ad esempio alluminio, acciaio e ghisa (quest'ultimo utilizzato prevalentemente negli edifici più datati);

- ✓ pannelli radianti: sistemi costituiti da tubazioni di piccolo diametro posizionate a serpentina e poste all'interno di pareti, soffitti o più comunemente nei pavimenti. Sono sistemi che lavorano a bassa temperatura (30-35°C se installati nei pavimenti e soffitti, intorno ai 40°C se installati nelle pareti), pertanto occupano superfici molto estese;
- ✓ ventilconvettori: sistemi dotati di batterie di scambio termico, filtri e vaschette per il funzionamento estivo, che permettono di climatizzare l'ambiente mediante un flusso d'aria che viene riscaldato o raffreddato per convezione forzata. Sono dimensionati per lavorare a temperature medio-basse (40-45°C);
- ✓ split: sono i terminali maggiormente utilizzati con i sistemi a pompa di calore aria-aria per la climatizzazione dell'ambiente. Sono terminali progettati per lavorare a temperature medio-basse;
- ✓ bocchette d'aria: soluzioni tipiche degli impianti di condizionamento, climatizzazione e ricircolo dell'aria, nei quali è richiesta sia la regolazione della portata d'aria che della direzione del getto.

I sistemi di regolazione, infine, sono sistemi che necessitano una analisi molto accurata a causa dell'elevata influenza che hanno sul rendimento complessivo del sistema impiantistico. Tra questi, si segnalano sistemi del tipo ON-OFF e ad azione proporzionale. I primi sono gli algoritmi di regolazione più semplici, dove una volta raggiunto il valore prefissato della variabile controllata (generalmente la temperatura), il sistema passa a OFF; quando la variabile scende al di sotto del limite inferiore del differenziale statico, il sistema ritorna a ON. I sistemi ad azione proporzionale, invece, agiscono in maniera proporzionale allo scostamento tra la variabile controllata e il valore di set-point desiderato.

In virtù di quanto descritto, è chiaro, che l'analisi del sistema impiantistico risulta essere molto complessa richiedendo una conoscenza molto accurata di ogni sottosistema. Per maggiori approfondimenti si rimanda alla Letteratura in merito [30, 35, 36, 44, 45].

2.3 Analisi del SIAPE

I risultati delle precedenti analisi hanno permesso di evidenziare alcuni dei tratti più comuni del parco edilizio nazionale dal punto territoriale, dimensionale e impiantistico. Tuttavia, è necessario approfondire e allargare la ricerca per ottenere un quadro più esaustivo.

Per questo motivo, l'analisi delle caratteristiche edilizie del patrimonio italiano è stata svolta anche sui dati contenuti all'interno del Sistema Informativo sugli Attestati di Prestazione Energetica (SIAPE), contenente la banca dati nazionale per gli APE.

Il SIAPE, istituito secondo il Decreto Interministeriale 26 giugno 2015, è realizzato e gestito da ENEA e alimentato da Regioni e Province autonome attraverso l'uso di un tracciato XML unico condiviso, che fa da raccordo tra il catasto nazionale e quelli regionali e provinciali.

Allo stato attuale, 8 Regioni e 2 Province autonome hanno effettuato l'accesso al SIAPE, mentre altre 8 Regioni hanno fatto richiesta per le credenziali. Il numero di APE contenute all'interno del SIAPE, a fine 2019, è di quasi 1,300,000.

Tutte le elaborazioni esposte di seguito sono state condotte utilizzando una copia dei dati contenuti all'interno del SIAPE, con lo scopo di studiare ed effettuare una riorganizzazione dello stesso finalizzata ad ottimizzare ed accelerare sia il recupero dei dati, che le successive analisi. Maggiori dettagli in merito alla riorganizzazione del SIAPE sono descritti al paragrafo 2.3.1.

Le analisi degli APE, riportate nei paragrafi 2.3.3, 2.3.4 e 2.3.5, fanno riferimento a dati preliminarmente verificati (paragrafo 2.3.2), appartenenti ad APE che sono stati emessi dal 2016 al 2019, periodo considerato nella sua totalità, per garantire una maggiore omogeneità dei risultati, a causa anche della frammentarietà sul territorio nella acquisizione della nuova procedura di certificazione.

La validità delle analisi effettuate è dimostrata dalla rappresentatività degli APE a livello territoriale rispetto all'intero patrimonio edilizio nazionale; confrontando infatti la numerosità dei comuni presenti all'interno del SIAPE con quelli a livello nazionale, secondo i dati ricavati dall'Allegato A del DPR 412/93 [8], aggiornati al 2019 da ENEA sulla base delle fusioni/creazioni di nuovi comuni, in funzione della zona climatica (Figura 20), si evince una buona correlazione tra le due distribuzioni nelle sei zone climatiche. In particolar modo, un'ottima rappresentatività è stata riscontrata per le zone climatiche E e F, mentre la discrepanza maggiore è stata riscontrata per la zona climatica C. Tuttavia, questo risultato è dovuto al fatto che le regioni maggiormente interessate da questa zona climatica non hanno ancora effettuato l'accesso al SIAPE.

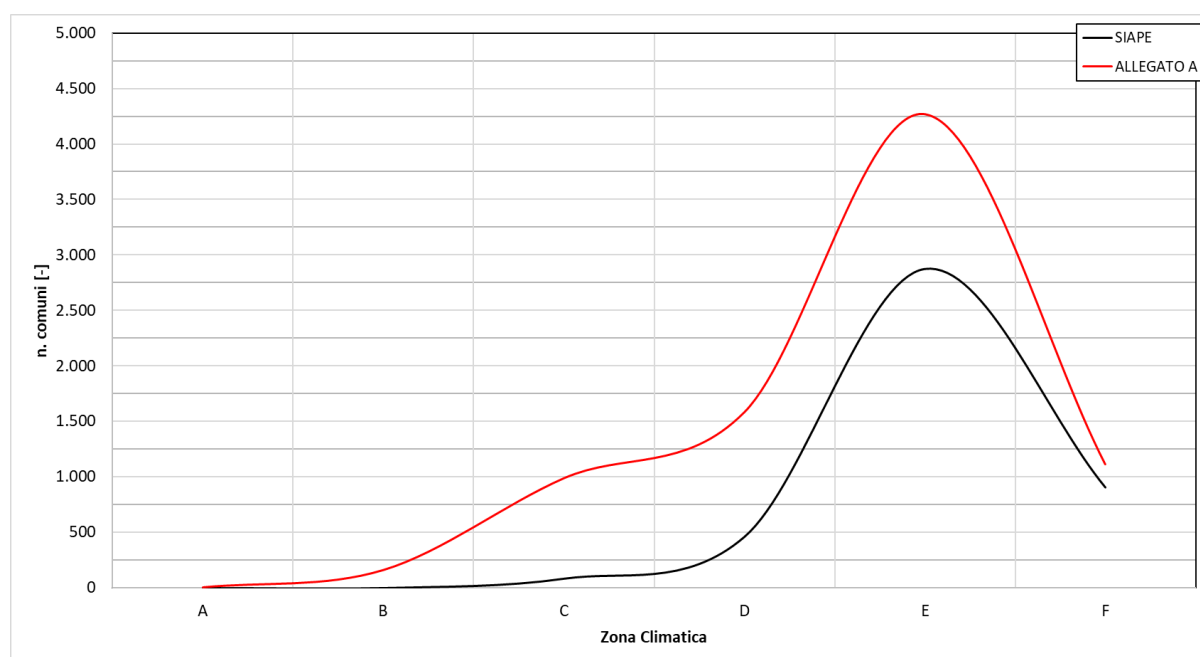


Figura 20 – Confronto della numerosità dei Comuni italiani riscontrati nel SIAPE con quelli dichiarati nel D.P.R. 412/93 [8].

2.3.1 Riorganizzazione del database

Come anticipato, le analisi dei dati contenuti nel SIAPE sono state precedute da uno studio approfondito sullo stesso, al fine di comprenderne l'organizzazione del database; esso è composto da un insieme di dati aggregati logicamente e strutturati in circa 70 tabelle correlate tra loro, ognuna afferente a una sezione o a un set di informazioni previste nello schema dell'APE fornito dalla norma vigente [19]. In particolare, si è riscontrata una perfetta aderenza tra la struttura del database e quella del documento ufficiale XML dell'APE. I risultati di tale analisi hanno confermato che la struttura esistente del SIAPE è funzionale per gli scopi prefissati all'epoca della sua creazione, come ad esempio la velocità di memorizzazione, ma risulta poco efficace per effettuare delle interrogazioni interattive di analisi dei dati, per le quali è fondamentale che ci siano tempi di esecuzione molto bassi.

Queste considerazioni preliminari sono quelle che hanno portato alla necessità di una riorganizzazione della struttura esistente del database del SIAPE. L'operazione è stata possibile grazie al fatto di poter lavorare su una copia del SIAPE, esportando la versione corrente del database sia dal punto di vista dei dati, che della struttura.

La riorganizzazione del database, o più in generale la creazione di un database, deve passare attraverso una serie di fasi, riportate in maniera schematica in Figura 21 [46]. Nel caso specifico del SIAPE, la riorganizzazione della copia, è iniziata con la cosiddetta fase "Requirements Collection and Analysis" ed è terminata con la fase di "Data Conversion and Loading", come descritto in seguito.

La "Requirements Collection and Analysis" è iniziata dall'analisi del documento standard ufficiale dell'APE, il tracciato XML, e dalla struttura del database del SIAPE. Evidenziate le criticità e gli obiettivi desiderati, si è passati ad una fase di "Database Design", basata sulla progettazione concettuale di un nuovo database. Il prodotto di questa fase è uno schema Entità-Relazione (ER), mostrato in Figura 22 (le entità sono rappresentate con dei rettangoli, mentre le relazioni con dei rombi), in cui gli attributi delle entità sono stati omessi per questione di leggibilità dello schema.

Lo schema ER ottenuto è stato utilizzato per effettuare la progettazione logica del database ("Logical Design"), che ha prodotto uno schema logico dello stesso, composto da un insieme di tabelle principali, accompagnate da altre di supporto, contenenti elenchi e tipologie standardizzati, quali ad esempio la nomenclatura associata a ciascun codice numerico inserito nelle tabelle e/o le unità di misure associate ad una generica grandezza.

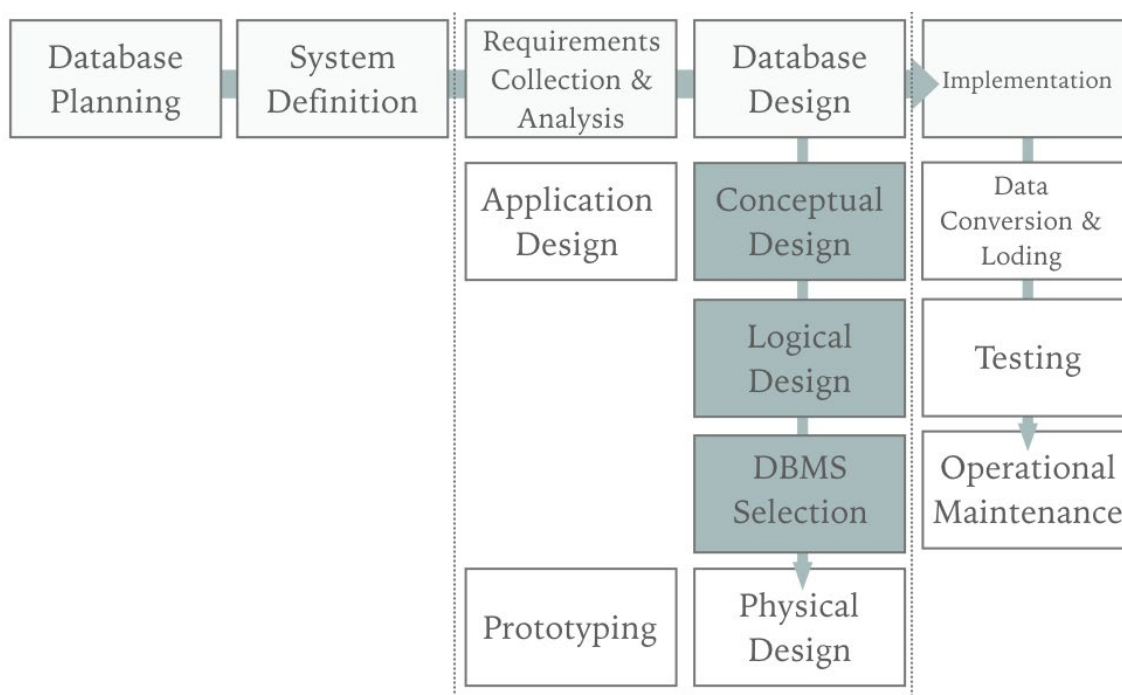


Figura 21 – Ciclo di vita di un Database [46].

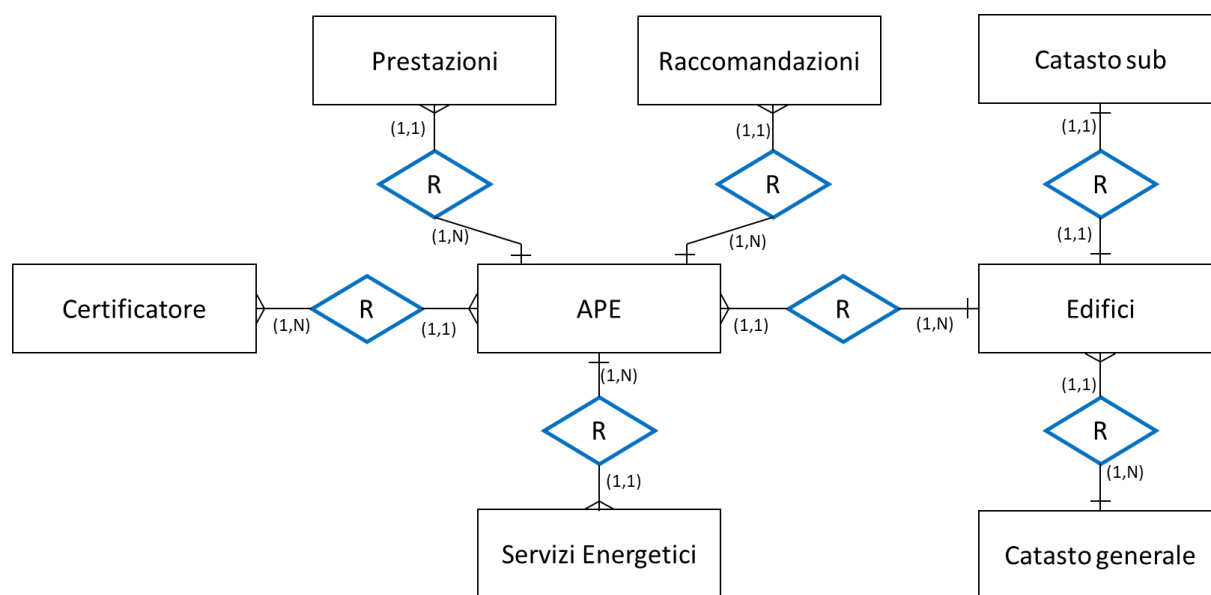


Figura 22 – Schema Entità Relazione dei dati APE.

Le tabelle principali e le informazioni in esse contenute sono elencate sinteticamente di seguito:

1. Edificio: dati generali e identificativi dell'edificio;
2. APE: principali indicatori energetici previsti dal Decreto e riportati nell'APE;
3. Servizi energetici: informazioni inerenti ad ogni servizio energetico presente nell'immobile oggetto di certificazione;
4. Certificatore: informazioni riguardanti il soggetto certificatore;
5. Prestazioni: stima dei consumi di energia, ossia le informazioni inerenti le fonti energetiche utilizzate;
6. Raccomandazioni: informazioni fornite dal soggetto certificatore relative a potenziali interventi di miglioramento energetico (tipologia di intervento raccomandato);
7. Catasto generale: dati catastali identificativi dell'immobile (comune, sezione, foglio, particella);
8. Catasto subalterni: subalterni riportati nei dati identificativi dell'immobile. La possibilità di riportare più subalterni per lo stesso APE, contrariamente ai dati riportati nella tabella al punto 8, ha fatto nascere la necessità di realizzare una tabella a parte per questo set di dati.

Si tiene a precisare che il numero di tabelle ottenute nella riorganizzazione del database è fortemente ridotto rispetto alla versione originale del SIAPE; questa semplificazione ha permesso di raggruppare i dati in un numero più limitato di tabelle, permettendo di facilitare la scrittura delle interrogazioni e di ridurre i tempi di esecuzione delle stesse.

Progettato logicamente il database, si è quindi proceduto con la fase di implementazione stessa del database ("DBMS selection"), per la quale lo schema logico prodotto è stato tradotto in uno schema fisico con l'utilizzo del software DBMS opensource PostgreSQL. L'istanza creata del database è stata, quindi, posizionata in un server, rendendo così il database raggiungibile da remoto.

Una volta riorganizzato, è stato possibile programmare una procedura software (scritta nel linguaggio di programmazione Python) di esportazione dati, o lettura, dal database originale del SIAPE e di importazione dati, o scrittura, nel nuovo database (Data Loading). Quest'ultima fase ha riguardato l'esecuzione della procedura di esportazione/importazione dati che, dato l'elevato numero di APE (circa 1,300,000), ha richiesto alcuni mesi per il suo completamento.

Completate tutte le fasi previste, e grazie alla nuova riorganizzazione del database, la base dati utilizzata per la successiva analisi è stata composta da un campione di APE pari a 1,259,313.

2.3.2 Verifica dei dati: analisi preliminari

Prima di procedere con l'analisi delle informazioni riportate negli APE del SIAPE, sono state condotte delle verifiche sui dati di partenza, al fine di restituire dei risultati e delle statistiche più coerenti e rilevanti. Infatti, nonostante il Decreto Ministeriale 26 giugno 2015 stabilisca che Regioni e Province autonome debbano farsi carico del controllo annuale di almeno il 2% degli APE depositati nei catasti di competenza, il SIAPE non è ancora dotato di un sistema automatizzato che permetta di filtrare i dati in esso contenuti. I risultati delle suddette verifiche hanno permesso di costituire la base di partenza, comprendente 1,245,677 APE, cui sono stati applicati ulteriori controlli specifici per ciascun parametro analizzato.

In dettaglio, in questa fase di verifica sono stati applicati i seguenti criteri:

1. Zona Climatica: è stata verificata la corrispondenza tra zona climatica dichiarata e quella ricalcolata a partire dal Comune dichiarato;
2. Anno di costruzione del fabbricato: in cui tutti gli anni superiori all'anno in corso o della data di emissione sono stati considerati come non attendibili;
3. Parametri dimensionali:
 - ✓ superficie utile: in accordo con il Regolamento Edilizio [34], i fabbricati accattasti come residenziali non possono avere una superficie utile inferiore a 28 m², mentre non è previsto un valore minimo per le altre destinazioni d'uso. Pertanto si sono considerati non attendibili, in assenza di un controllo sul campo, limitatamente alla destinazione d'uso E.1 (residenziale), gli APE in cui è stata dichiarata una superficie inferiore a quella indicata dal Regolamento Edilizio. Per le altre destinazioni d'uso, invece, si è deciso di scartare quelli che presentano un valore inferiore a 10 m², valore minimo ritenuto ammissibile;
 - ✓ volume lordo: in questo caso si sono ritenuti non attendibili, e quindi scartati, gli APE riportanti un volume pari o inferiori a zero, o comunque troppo bassi o elevati, rispetto agli altri parametri dimensionali per essere considerati attendibili in assenza di un controllo sul campo;
 - ✓ superficie disperdente: si sono ritenuti non attendibili, e quindi scartati, gli APE riportanti una disperdente pari o inferiori a zero, o comunque troppo bassi o elevati, rispetto agli altri parametri dimensionali per essere considerati attendibili in assenza di un controllo sul campo;
 - ✓ rapporto di forma (S/V): si è proceduto con il ricalcolo del rapporto S/V a partire dai dati di superficie disperdente e di volume già verificati e, quindi, considerati attendibili. Per questo parametro, si sono ritenuti non attendibili, e quindi scartati, gli APE che presentavano uno scostamento tra il valore dichiarato e quello ricalcolato dell'1%;
 - ✓ trasmittanza termica periodica (ψ): in considerazione dei valori tipici che assume questo parametro per le diverse componenti edilizie, si è deciso di considerare poco attendibili, in assenza di un controllo sul campo, valori troppo eccessivamente elevati;
 - ✓ area solare equivalente estiva per unità di superficie utile ($A_{sol}/A_{suputile}$): anche per questo parametro, valori troppo elevati non sono stati considerati attendibili in assenza di un controllo sul campo, e pertanto sono stati esclusi.

Il primo controllo effettuato, quello relativo alla zona climatica, riportato sinteticamente in Tabella 42, ha evidenziato una perfetta correlazione nel 98.9% dei casi. Lo 0.5% degli APE, invece, ha presentato una zona climatica dichiarata con minori Gradi Giorno di quella corretta (dichiarata prevalentemente una zona E invece di F), mentre in meno dello 0.1% è stata dichiarata una zona climatica con Gradi Giorno maggiori di quelli reali. Si precisa, inoltre, che per circa lo 0.5% non è stato possibile effettuare il controllo in quanto il comune dichiarato risulta non esistente. Complessivamente, il criterio adottato ha portato all'esclusione di quasi 1.1% del campione (poco più di 13600 APE).

Tabella 42 – Verifica preliminare della Zona Climatica: percentuale del campione degli APE non verificato raggruppato per le sei zone climatiche.

Zona Climatica	Verifiche Zona Climatica Teorica						
	A	B	C	D	E	F	non verificabile
A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C	0.00	0.00	4.62	0.03	0.02	0.00	0.00
D	0.00	0.00	0.03	20.15	0.09	0.00	0.11
E	0.00	0.00	0.00	0.02	69.12	0.41	0.21
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	5.03	0.14

Analogamente sono stati verificati gli altri criteri precedentemente descritti, ottenendo un campione da escludere diverso da parametro a parametro. Nello specifico, in Tabella 43, sono mostrate le percentuali del campione considerabili attendibili e non attendibili per ogni parametro analizzato e per i settori residenziale e non residenziale. Mediamente è stata considerata sempre attendibile una percentuale di casi superiore all'80%, ad eccezione per la trasmittanza termica periodica, per la quale il campione considerato attendibile scende al 78.8%.

Nei successivi paragrafi, così come nel paragrafo 2.2, sono state riportate le analisi ritenute più rilevanti ai fini di questo studio, condotte sul campione considerato attendibile. Si tiene a precisare che, una volta che il SIAPE disporrà dei dati di tutte le regioni italiane, sarà possibile effettuare delle verifiche molto più accurate su ciascun dato inserito, nonché definire dei valori limite più plausibili per ciascun parametro di controllo. Inoltre l'informatizzazione e la disponibilità dei dati del SIAPE permetteranno non solo un confronto con dati più aggiornati rispetto a quelli trattati in precedenza relativamente a specifici parametri, ma anche di effettuare delle analisi incrociate tra diversi parametri dimensionali e termici, al fine di trovare eventuali correlazioni e definire con maggiore precisione i modelli di simulazione che saranno oggetto nel secondo anno di attività.

Si tiene a precisare che, come si evince, i parametri che sono stati oggetto di controllo preliminare sono solo quelli associati direttamente all'immobile oggetto di certificazione (quali superficie utile, volume lordo riscaldato, superficie disperdente, ecc), in quanto, oltre ad essere tra loro legati, è stato possibile stabilire dei range di valori plausibili a partire da dati di Letteratura. Per quelli relativi al sistema impiantistico, invece, non è stato possibile effettuare alcun tipo di controllo preliminare, non potendo ancora mettere in relazione i dati del SIAPE con quelli riportati nel catasto impianti di ogni Regione.

Tabella 43 – Percentuale del campione degli APE ritenuto attendibile e non attendibile per ciascun parametro di controllo considerato, rispettivamente per il settore residenziale e non residenziale.

Parametro di controllo	Attendibili		Non attendibili	
	E.1	NO E.1	E.1	NO E.1
Anno di costruzione	83.3	15.6	0.9	0.2
Superficie Utile	83.3	15.5	1.0	0.2
Volume lordo	82.3	15.4	2.0	0.3
Superficie Disperdente	82.8	15.5	1.5	0.3
Rapporto di forma (S)	82.9	15.5	1.4	0.2
Trasmittanza termica Periodica (ψ)	78.8	14.4	5.5	1.3
Area solare equivalente estiva per unità di superficie utile ($A_{sol}/A_{suputile}$)	80.3	14.4	3.9	1.3

2.3.3 Analisi delle caratteristiche geometriche

La prima analisi di dettaglio dei dati del SIAPE ha riguardato la distribuzione degli immobili certificati secondo la classificazione del D.P.R. 412/93 [8], che riporta la suddivisione degli edifici secondo la destinazione d'uso. In dettaglio, il campione di dati analizzato suddiviso per le diverse destinazioni d'uso è riportato in Figura 23; come si evince, circa l'85% del campione è relativo ad edifici ad uso residenziale, seguono gli edifici adibiti ad attività commerciale (6.28%), quelli ad uso industriale e artigianale (3.75%) e ad uso ufficio (3.62%). Questi risultati trovano giustificazione anche nella motivazione della redazione dell'APE (Figura 24), che vede circa l'80% dei casi analizzati soggetti a passaggio di proprietà e locazione, delle procedure cui sono maggiormente soggetti gli edifici residenziali.

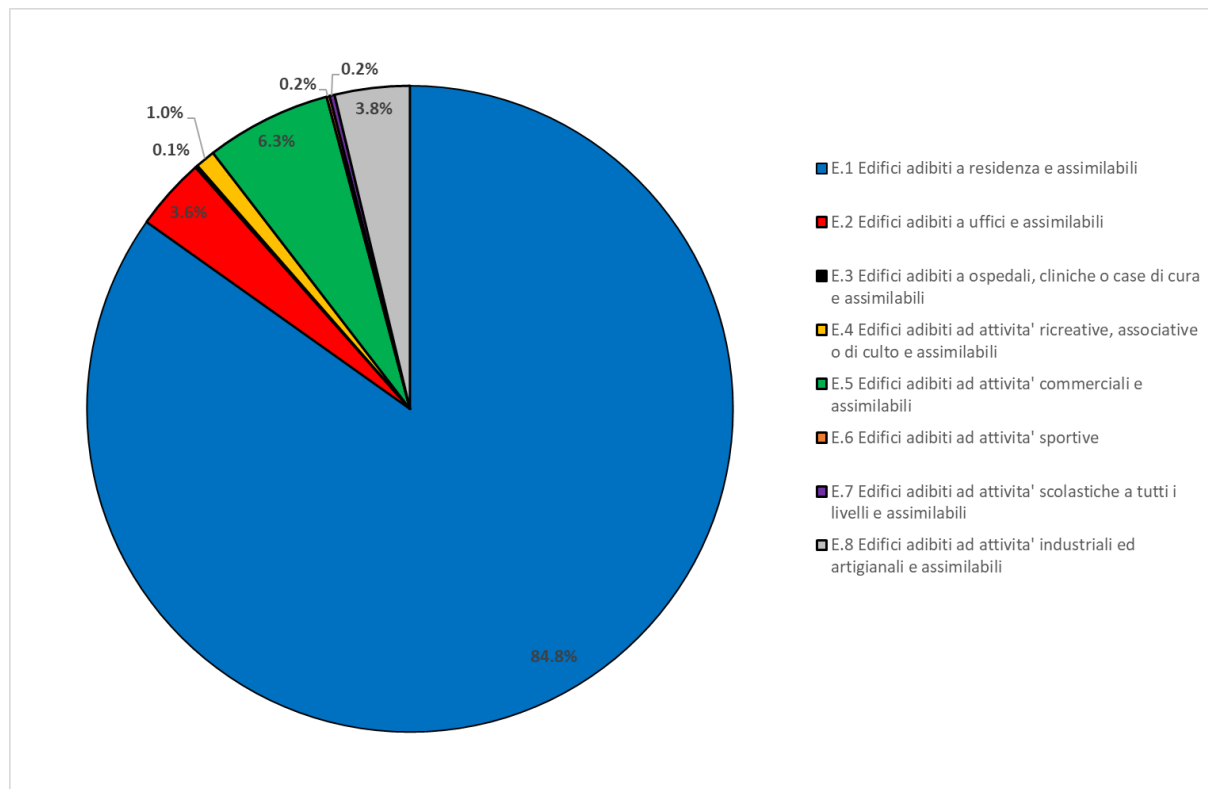


Figura 23 – Distribuzione percentuale degli APE secondo destinazione d'uso secondo il DPR. 412/93.

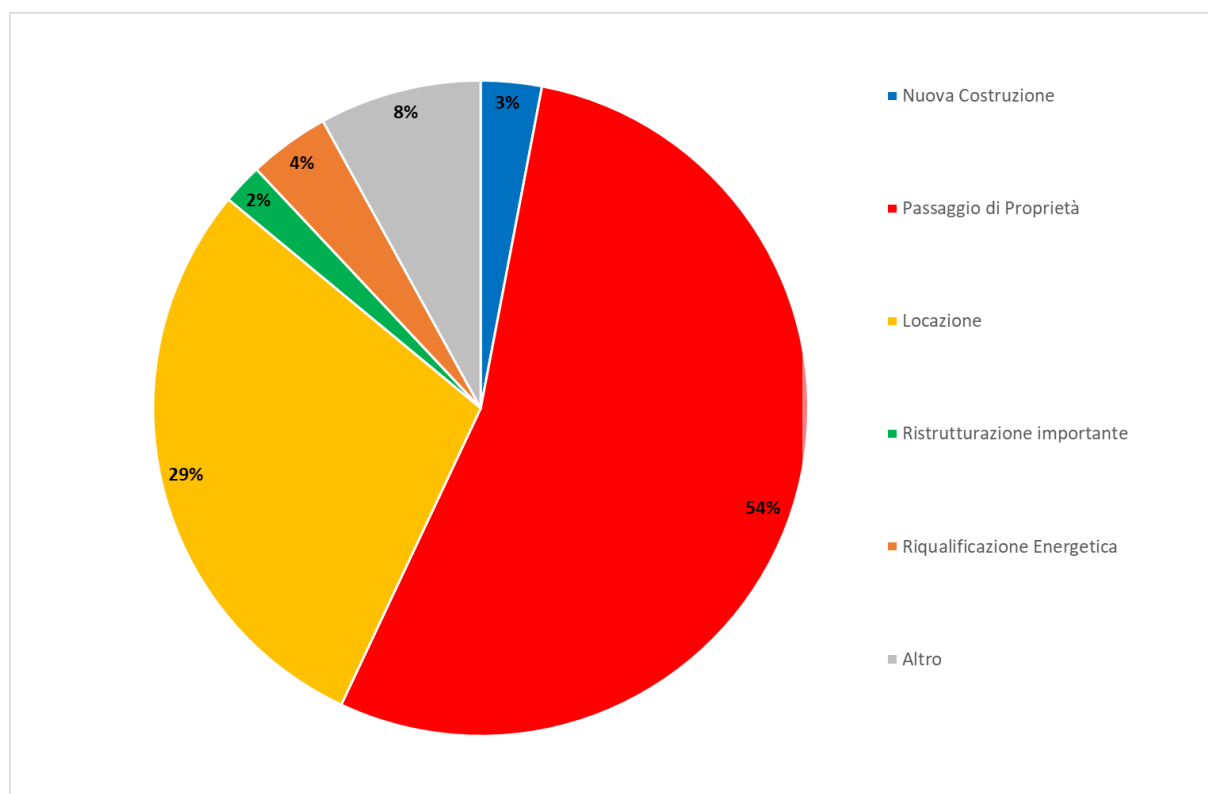


Figura 24 – Distribuzione percentuale degli APE per motivazione.

Per rendere più facilmente interpretabili le informazioni ottenute, alcune delle analisi sulle caratteristiche analizzate degli edifici sono mostrate con dati aggregati, ossia accorpendo i risultati secondo due categorie di destinazione d'uso prevalenti: residenziale, che include le categorie E.1, E.1 (1), E.1(2) e E.1 (3) del DPR 412/93, e non residenziale, comprendente le restanti categorie.

Dall'analisi degli edifici censiti nel SIAPE risulta che la maggior parte è antecedente al 1991 (oltre il 75%), con un picco (circa il 22%) nella decade tra il 1961 e il 1970 (Figura 25). Circa il 10% degli APE è relativi ad edifici costruiti tra il 2011 ad oggi.

Come per i dati Istat, sono stati indagati la superficie utile, quella disperdente e il volume lordo riscaldato tipici degli immobili certificati. I risultati di queste analisi sono riportati da Figura 26 a Figura 28, in cui si è fatto uso di grafici dotati del doppio asse orizzontale; in quello in basso sono riportati i range adottati per gli edifici aggregati come residenziali, mentre nell'asse in alto i range definiti per gli immobili non residenziali.

In accordo con Figura 26, la distribuzione ottenuta per gli edifici residenziali è approssimabile ad una curva con un picco incentrato nel range 61-70 m² e che decresce all'aumentare della superficie utile; la maggior parte degli immobili classificabili come E.1, inoltre, ricade all'interno del range 41-100 m² (oltre il 60% del campione). Per il settore non residenziale, invece, la distribuzione ottenuta è ben approssimata da una funzione esponenziale, che decresce con l'aumentare della superficie utile. In questo caso, la maggior parte del campione esaminato presenta una superficie utile compresa tra 10 e 125 m² (oltre il 50% del campione), ma a differenza degli edifici residenziali, si riscontrano percentuali significative anche per valori ben maggiori a 300 m² (circa il 25% del campione non residenziale).

Relativamente alla superficie disperdente (Figura 27), invece, la distribuzione riscontrata per gli edifici residenziali risulta essere concentrata prevalentemente nel range 51-400 m² (85% del campione) con un picco del 20% per valori della superficie compresi tra 101-150 m². Trend analogo ma meno marcato si riscontra anche per gli edifici non residenziali, per i quali, però, si riscontra una percentuale significativa (circa il 14% del campione) anche per valori molto più elevati e rientranti nel range 1501-2000 m².

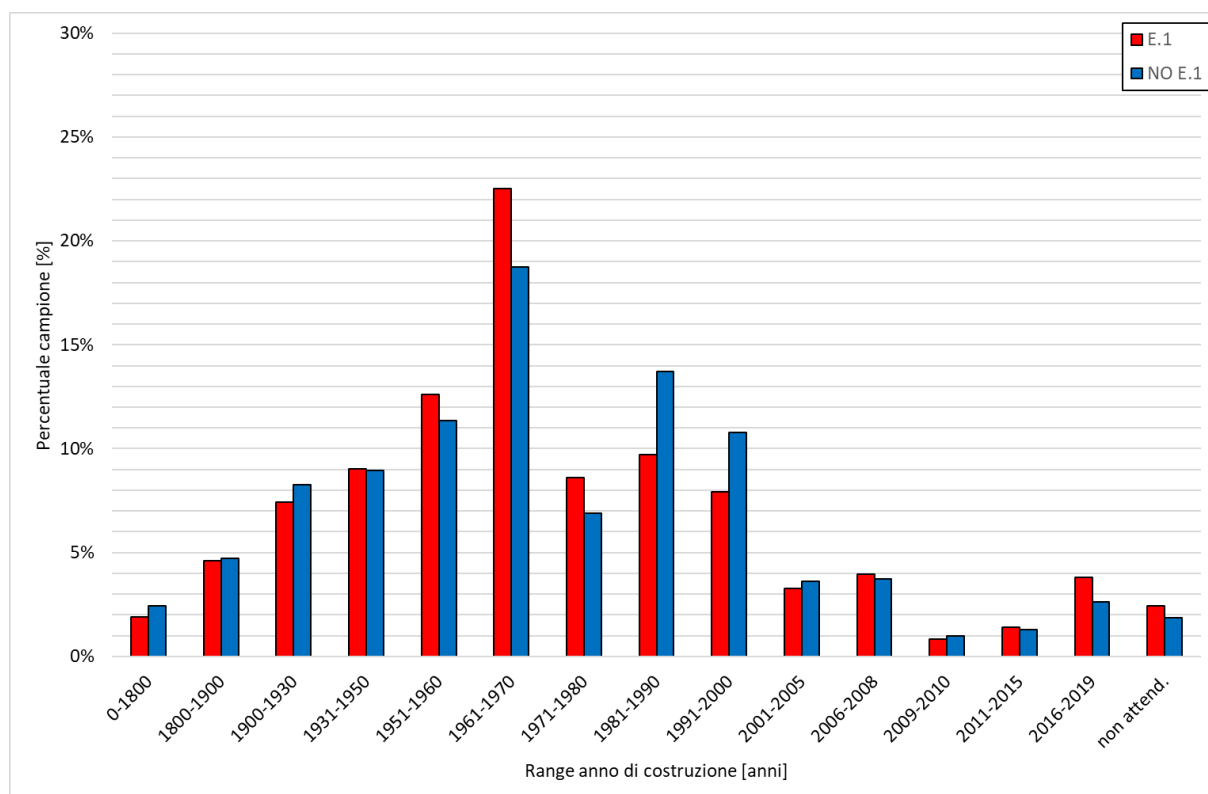


Figura 25 – Distribuzione percentuale del campione degli APE raggruppato per periodo di costruzione.

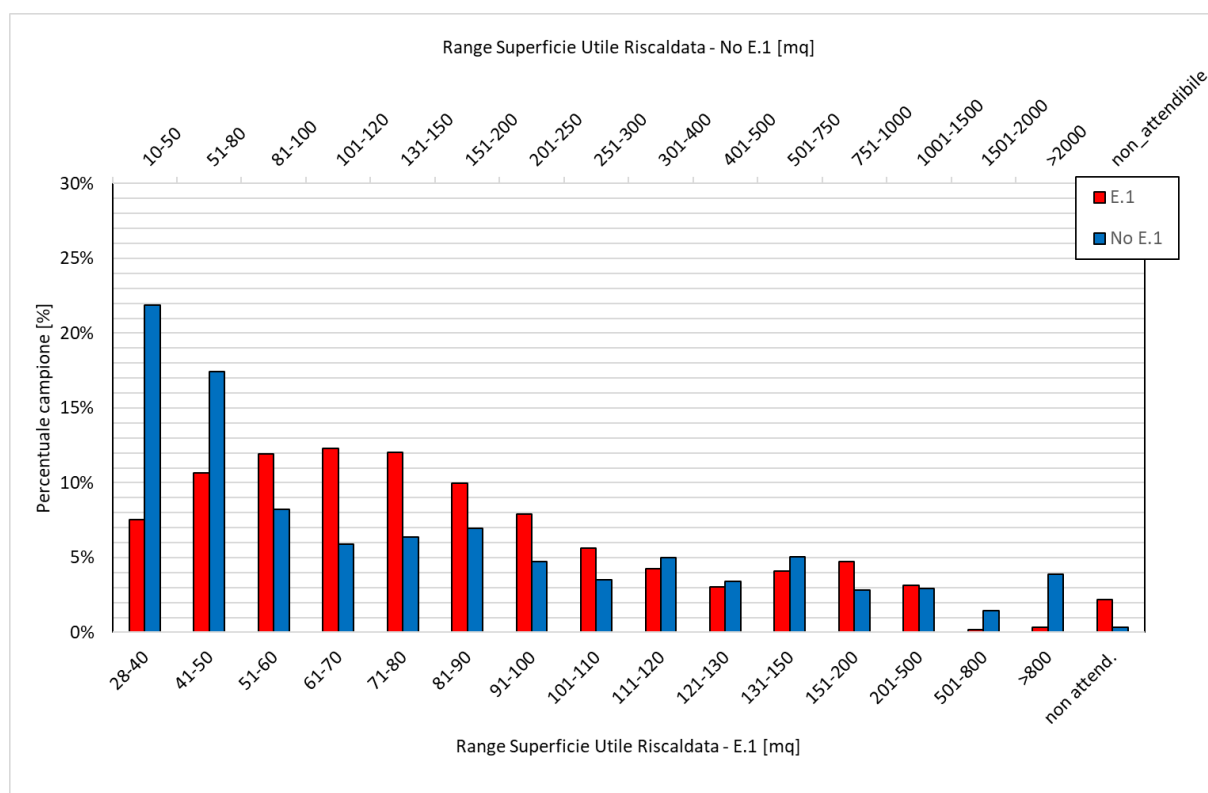


Figura 26 – Distribuzione percentuale del campione degli APE raggruppato per range di superficie utile.

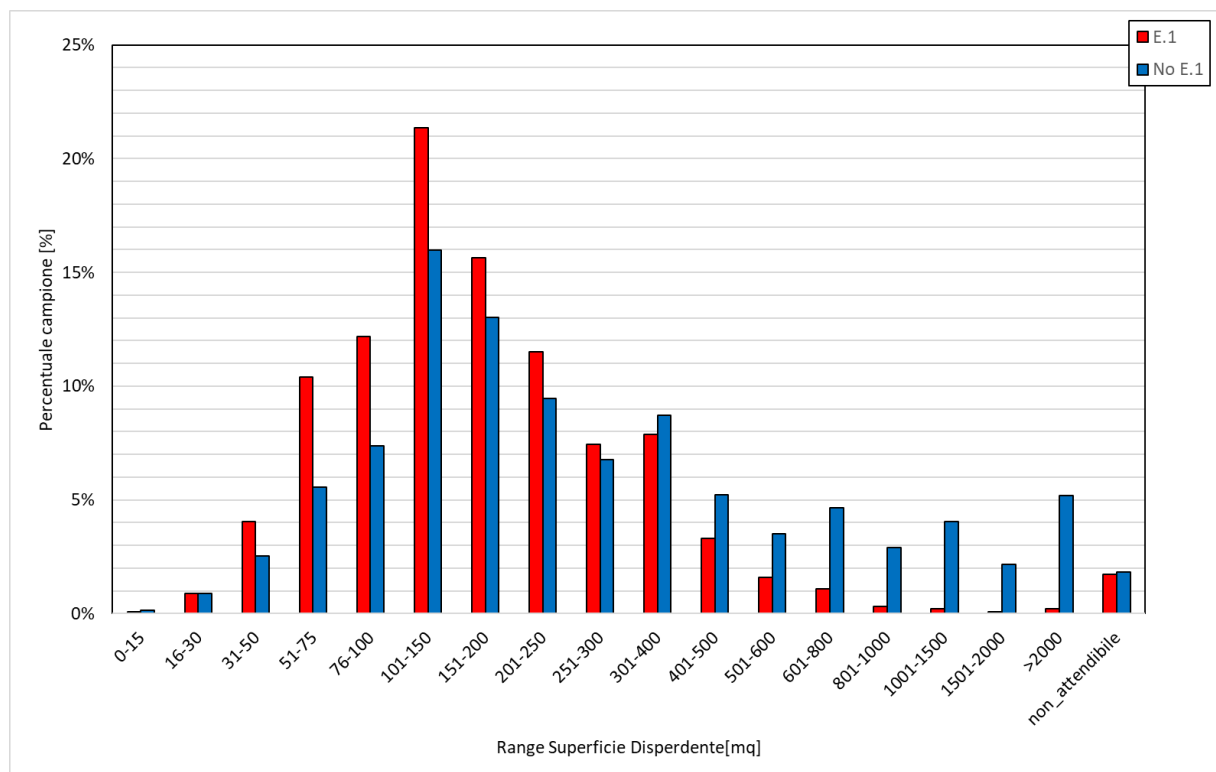


Figura 27 – Distribuzione percentuale del campione degli APE raggruppato per prefissati range di superficie disperdente.

Lo stesso trend riscontrato per la superficie negli edifici residenziali, è stato ritrovato per il volume lordo riscaldato. Ciò fatto è facilmente giustificabile dal fatto che mediamente gli edifici residenziali presentano un'altezza, al netto dello spessore degli elementi orizzontali, pressoché uguale (generalmente pari a 2.7 m) salvo in alcuni casi dove è possibile avere altezze nette di piano leggermente superiori. Pertanto, come mostrato nella Figura 28, oltre il 70% degli edifici residenziali presentano un volume lordo riscaldato prevalentemente tra 150-900 m³, con percentuali decrescenti all'aumentare del volume stesso. Per il non residenziale, invece, la distribuzione ottenuta si discosta significativamente da quella ottenuta in Figura 26. In questo caso la maggior parte del campione ricade all'interno del range 101-600 m³ (oltre il 50% degli APE) con un valore massimo (oltre il 17%) riscontrato per valori molto più elevati (range 2501-3000 m³).

Parametro correlato alla superficie disperdente e il volume lordo riscaldato è il rapporto di forma (S/V), parametro di fondamentale importanza per capire l'entità delle dispersioni di calore legate alla geometria dell'edificio. La distribuzione percentuale del campione ottenuta per prefissati range del rapporto S/V è riportata in Figura 29. Il grafico mostra un trend assai diverso per le due destinazioni d'uso; per gli edifici non residenziali è assimilabile ad un andamento a campana con un picco nel range 0.51-0.60, mentre per gli edifici residenziali risulta essere molto più altalenante con più picchi rispettivamente nei range 0.31-0.40 e 0.61-0.70. Si tiene a precisare come la percentuale dei casi in cui il rapporto di forma è superiore a 0.90, sia abbastanza limitata (circa il 10%) per entrambe le destinazioni considerate.

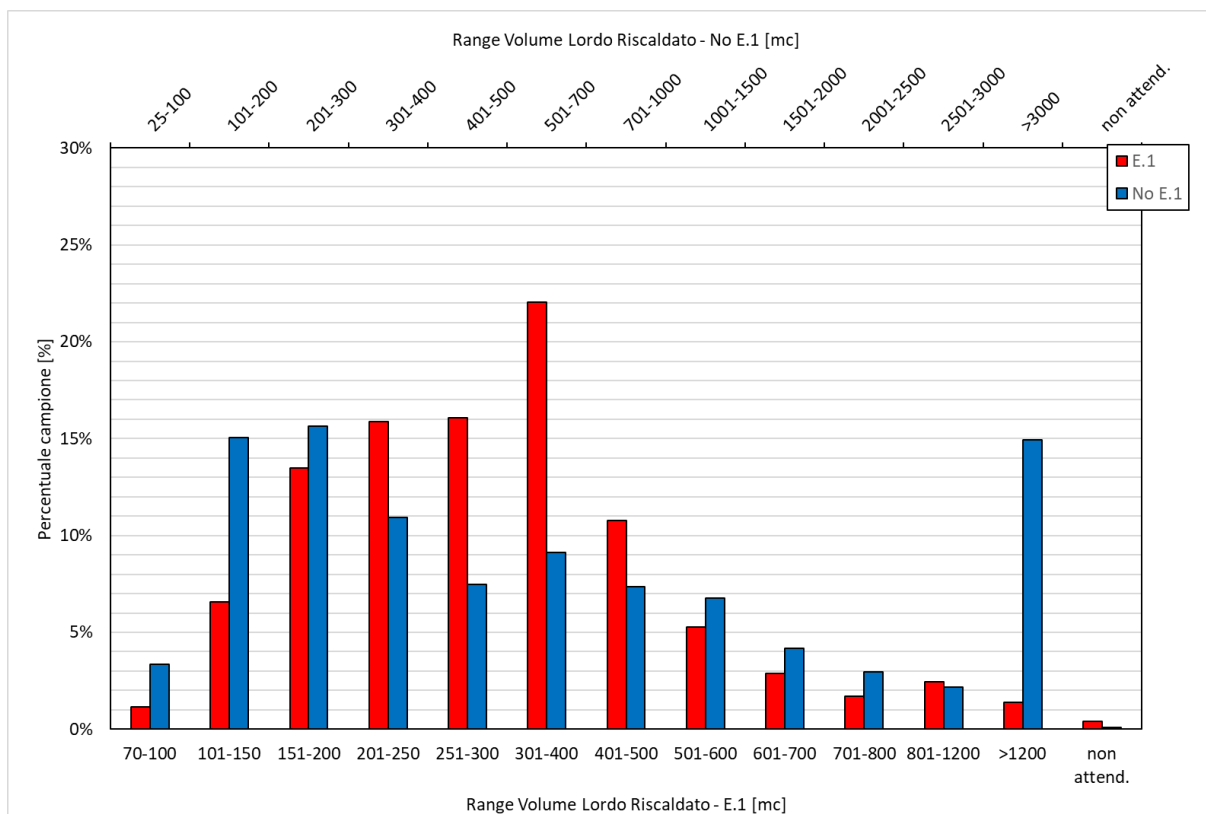


Figura 28 – Distribuzione percentuale del campione degli APE raggruppato per prefissati range di volume lordo riscaldato.

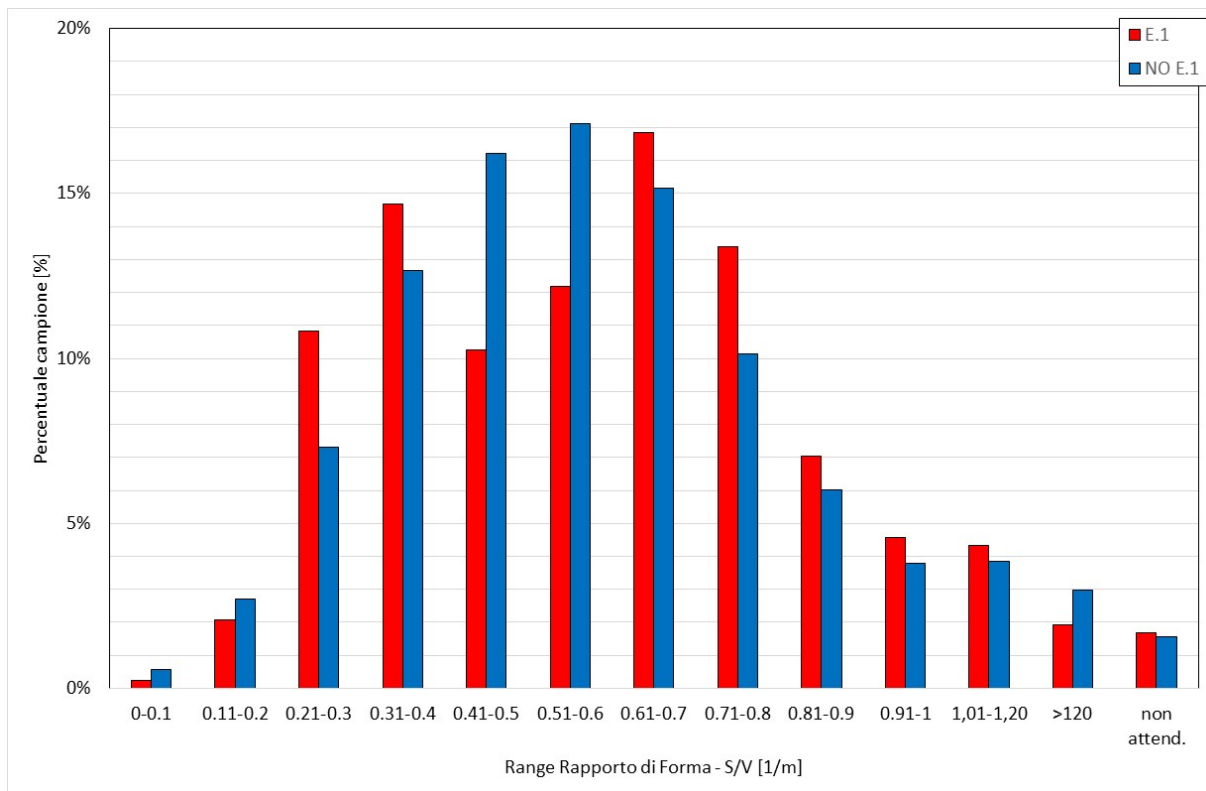


Figura 29 – Distribuzione percentuale del campione degli APE raggruppato per prefissati range di rapporto di forma (S/V).

Come anticipato, oltre alle elaborazioni riportate, è stato possibile analizzare i dati effettuando una doppia interpolazione tra diversi parametri. I risultati sono stati restituiti mediante delle tabelle, dove per una migliore comparazione dei valori, nonché una più facile lettura della tabella, le percentuali in termini assoluti sono state riportate in formato numerico nelle singole celle, mentre il peso di ciascun dato rispetto i parametri selezionati è evidenziato con una tonalità che varia dal bianco al verde all'aumentare del peso stesso. Pertanto, con il simbolo numerico si è voluto indicare l'effettiva percentuale riscontrata del campione esaminato, mentre con il colore si è cercato di indicare l'effettivo peso che ha quel valore per i range dei parametri selezionati.

La prima correlazione ha riguardato l'influenza tra l'anno di costruzione e la superficie utile per gli edifici residenziali (Tabella 44) e per quelli non residenziali (Tabella 45). Il trend ottenuto rispecchia perfettamente quanto emerso al paragrafo 2.2, non riscontrando una netta correlazione tra l'anno di costruzione e la superficie utile dell'immobile. Al contrario, per il settore residenziale essa sembra oscillare all'interno del range 50-100 m² indipendentemente dall'epoca di costruzione. Discorso analogo vale per le destinazioni d'uso classificate come non residenziali, per le quali, però, si è riscontrata una percentuale nettamente crescente del campione avente una superficie utile maggiore di 800 m².

Tabella 44 – Percentuale di APE per specifici range di superficie utile e per fissati periodi di costruzione – edifici residenziali.

Superficie utile riscaldata [m ²]	Anno di costruzione					
	<1960	1961-1980	1981-1990	1991-2005	2006-2015	2016-2019
28-40	10.42	5.63	5.59	6.88	8.19	7.58
41-50	12.58	9.06	7.70	11.54	13.97	11.94
51-60	13.55	12.22	8.61	11.53	12.83	10.93
61-70	12.84	13.13	10.27	12.52	13.32	11.80
71-80	11.03	13.77	13.09	12.74	11.52	10.49
81-90	8.66	11.91	12.27	9.64	8.42	8.94
91-100	6.75	9.09	10.56	7.93	6.83	8.07
101-110	4.85	6.36	7.22	5.50	5.26	6.24
111-120	3.83	4.59	5.25	4.24	4.18	4.92
121-130	2.84	3.17	3.68	3.09	3.06	3.83
131-150	3.98	3.87	5.04	4.43	4.21	5.03
151-200	4.77	4.01	6.05	5.63	4.70	5.79
201-250	1.76	1.41	2.28	2.20	1.70	2.04
251-300	0.74	0.60	0.97	0.88	0.67	0.82
301-400	0.60	0.42	0.63	0.59	0.53	0.63
401-500	0.23	0.14	0.20	0.19	0.17	0.28
501-600	0.11	0.08	0.11	0.10	0.09	0.18
601-800	0.13	0.11	0.11	0.11	0.07	0.14
>800	0.33	0.44	0.38	0.26	0.27	0.36

Tabella 45 – Percentuale di APE per specifici range di superficie utile e per fissati periodi di costruzione – edifici non residenziali.

Superficie utile riscaldata [m ²]	Anno di costruzione					
	<1960	1961-1980	1981-1990	1991-2005	2006-2015	2016-2019
10-50	33.47	21.89	10.89	10.47	12.26	13.86
51-80	21.17	17.71	13.35	13.86	15.01	14.43
81-100	8.82	8.77	7.19	7.43	8.06	7.54
101-120	6.19	6.05	5.51	5.67	5.86	5.69
131-150	6.29	6.65	6.32	6.11	6.70	7.30
151-200	6.30	6.98	7.46	7.57	8.20	7.54
201-250	3.64	4.90	5.80	5.68	5.44	4.94
251-300	2.40	3.58	4.92	4.54	4.37	3.60
301-400	2.97	4.86	7.48	7.30	6.00	6.16
401-500	1.67	3.26	5.75	5.36	4.24	3.90
501-750	2.30	4.82	8.75	7.61	6.83	7.07
751-1000	1.24	2.61	4.59	4.73	4.00	3.76
1001-1500	1.15	2.67	4.64	5.04	4.50	4.64
1501-2000	0.58	1.36	2.17	2.46	2.34	2.58
>2000	1.80	3.90	5.17	6.17	6.18	7.01

La seconda analisi è stata condotta comparando l'anno di costruzione e la superficie disperdente per il settore residenziale (Tabella 46) e quello non residenziale (Tabella 47). Anche in questo caso non si è osservata una netta correlazione tra i due parametri. Per gli edifici residenziali, le maggiori percentuali sono state rilevate nel range di superficie disperdente tra 76-250 m². Il periodo di costruzione non sembra influenzare in maniera significativa la variazione di tale parametro. Per gli edifici non residenziali, invece, sono stati individuati due trend diversi: gli edifici realizzati fino 1981 presentano una percentuale significativa nel range 101-205 m², mentre quelli realizzati dopo il 1981 presentano una variazione più ampia compresa tra i 101-400 m². Importante osservare come per il settore non residenziali si abbiano delle percentuali rilevanti anche per valori della superficie disperdente maggiore di 2000 m².

L'analisi sono proseguite correlando l'anno di costruzione con il volume lordo riscaldato e l'anno di costruzione con il rapporto di forma per i settori residenziale e non residenziale (Tabella 48 - Tabella 51). In merito agli edifici residenziali (Tabella 48) la maggior parte dei casi, a prescindere dal periodo di costruzione, ha dei valori di volume lordo riscaldato che variano dai 151 ai 400 m³; tuttavia, è possibile osservare una netta prevalenza di casi costruiti tra il 1961-1990 ricadenti tra 301-400 m³. Gli edifici non residenziali (Tabella 49) seguono un andamento diverso: prima del 1960 la maggior parte dei casi ricade tra i 100 e i 400 m³, ma già dopo gli anni '60 la percentuale di edifici con volume lordo maggiore di 3000 m³ raddoppia, fino ad attestarsi tra il 20 e il 25% del totale in tutte le epoche di costruzione considerate.

Infine, la correlazione tra il rapporto di forma (S/V) e l'anno di costruzione (Tabella 50 e Tabella 51) non evidenzia una netta dipendenza; tuttavia, i risultati mostrano una maggior peso nei range 0.31-0.40 e 0.61-0.70 per gli edifici residenziali e 0.61-0.70 per quelli non residenziali, indipendentemente dall'epoca di costruzione.

Tabella 46 – Percentuale di APE per range di superficie disperdente e per fissati periodi di costruzione – edifici residenziali.

Superficie disperdente [m ²]	Anno di costruzione					
	<1960	1961-1980	1981-1990	1991-2005	2006-2015	2016-2019
0-15	0.11	0.07	0.06	0.03	0.06	0.04
16-30	1.30	0.76	0.72	0.65	0.70	0.57
31-50	5.05	3.95	2.83	3.54	3.79	3.08
51-75	11.52	11.43	7.93	9.43	9.65	8.32
76-100	12.35	13.72	10.84	11.74	11.76	10.47
101-150	21.43	22.84	19.86	21.60	22.50	20.68
151-200	15.54	15.24	16.09	17.58	17.67	16.34
201-250	10.96	11.48	14.16	12.03	11.63	12.19
251-300	7.21	7.27	9.14	7.63	7.23	8.60
301-400	7.63	7.18	9.89	8.56	8.13	10.08
401-500	3.31	2.86	4.13	3.51	3.47	4.71
501-600	1.54	1.38	2.07	1.71	1.61	2.31
601-800	1.10	0.95	1.37	1.22	1.04	1.47
801-1000	0.36	0.24	0.36	0.33	0.33	0.44
1001-1500	0.27	0.19	0.23	0.22	0.25	0.34
1501-2000	0.10	0.11	0.08	0.07	0.06	0.16
>2000	0.21	0.32	0.25	0.16	0.15	0.20

Tabella 47 – Percentuale di APE per range di superficie disperdente e per fissati periodi di costruzione – edifici non residenziali.

Superficie disperdente [m ²]	Anno di costruzione					
	<1960	1961-1980	1981-1990	1991-2005	2006-2015	2016-2019
0-15	0.18	0.15	0.07	0.12	0.16	0.08
16-30	1.24	0.85	0.54	0.69	0.74	0.49
31-50	3.59	2.41	1.53	1.55	2.28	1.67
51-75	7.87	5.54	3.22	3.19	3.87	3.62
76-100	10.03	7.51	4.28	4.87	5.49	4.78
101-150	20.24	16.67	11.42	11.74	12.30	11.42
151-200	15.25	13.50	11.11	10.77	10.96	11.23
201-250	10.14	10.02	8.91	8.83	8.74	8.39
251-300	6.78	7.25	6.92	6.61	7.16	6.50
301-400	7.83	9.29	9.94	9.25	10.47	9.72
401-500	4.29	5.39	6.48	6.18	6.29	7.04
501-600	2.50	3.54	4.96	4.73	4.49	4.78
601-800	2.96	4.70	6.90	6.66	6.64	6.72
801-1000	1.58	2.77	4.80	4.61	3.92	4.80
1001-1500	1.89	3.71	7.21	7.18	5.49	5.59
1501-2000	0.97	1.85	3.89	4.01	3.19	3.02
>2000	2.66	4.85	7.84	9.01	7.82	10.15

Tabella 48 – Percentuale di APE per range di volume lordo riscaldato e per fissati periodi di costruzione – edifici residenziali.

Volume lordo riscaldato [m³]	Anno di costruzione					
	<1960	1961-1980	1981-1990	1991-2005	2006-2015	2016-2019
70-100	1.72	1.02	0.96	0.56	0.58	0.45
101-150	7.72	5.28	5.77	7.24	8.11	5.84
151-200	14.64	11.75	10.32	15.67	17.74	13.91
201-250	16.38	16.43	12.83	16.57	17.13	13.93
251-300	14.76	17.79	16.65	16.81	15.24	14.37
301-400	19.74	25.29	25.98	20.10	18.27	20.40
401-500	10.24	11.15	12.20	9.80	9.69	12.73
501-600	5.40	4.66	6.02	5.04	5.20	7.23
601-700	3.08	2.27	3.36	2.87	2.84	3.91
701-800	1.87	1.32	1.89	1.71	1.66	2.36
801-1200	2.79	1.85	2.66	2.43	2.32	3.02
>1200	1.66	1.18	1.35	1.20	1.22	1.85

Tabella 49 – Percentuale di APE per range di volume lordo riscaldato e per fissati periodi di costruzione – edifici non residenziali.

Volume lordo riscaldato [m³]	Anno di costruzione					
	<1960	1961-1980	1981-1990	1991-2005	2006-2015	2016-2019
25-100	5.21	2.97	1.72	1.66	2.13	2.30
101-200	21.54	15.54	8.36	8.46	9.52	9.76
201-300	19.59	16.12	11.55	11.72	12.10	11.68
301-400	12.49	11.52	8.96	9.21	9.75	8.49
401-500	8.25	7.63	6.53	6.51	6.68	7.42
501-600	5.62	5.55	4.78	4.71	5.21	4.51
601-700	3.92	3.78	3.68	3.61	4.13	5.20
701-800	2.95	3.04	2.84	2.84	2.82	3.76
801-900	2.17	2.40	2.63	2.41	2.73	2.63
901-1000	1.86	1.98	2.29	1.98	2.54	2.02
1001-1500	5.28	6.95	8.40	8.09	7.36	8.15
1501-2000	2.58	4.16	6.19	5.63	5.26	5.01
2001-2500	1.57	2.83	4.59	4.40	3.84	3.82
2501-3000	1.01	2.10	3.59	3.38	2.76	2.81
>3000	5.95	13.42	23.89	25.41	23.18	22.44

Tabella 50 – Percentuale di APE per range di rapporto di forma (S/V) e per fissati periodi di costruzione – edifici residenziali.

Rapporto di Forma S/V [1/m]	Anno di costruzione					
	<1960	1961-1980	1981-1990	1991-2005	2006-2015	2016-2019
0-0.1	0.11	0.07	0.06	0.03	0.06	0.04
0.11-0.2	1.30	0.76	0.72	0.65	0.70	0.57
0.21-0.3	5.05	3.95	2.83	3.54	3.79	3.08
0.31-0.4	11.52	11.43	7.93	9.43	9.65	8.32
0.41-0.5	12.35	13.72	10.84	11.74	11.76	10.47
0.51-0.6	21.43	22.84	19.86	21.60	22.50	20.68
0.61-0.7	15.54	15.24	16.09	17.58	17.67	16.34
0.71-0.8	10.96	11.48	14.16	12.03	11.63	12.19
0.81-0.9	7.21	7.27	9.14	7.63	7.23	8.60
0.91-1	7.63	7.18	9.89	8.56	8.13	10.08
1.01-1.2	3.31	2.86	4.13	3.51	3.47	4.71
>1.2	1.54	1.38	2.07	1.71	1.61	2.31

Tabella 51 – Percentuale di APE per range di rapporto di forma (S/V) e per fissati periodi di costruzione – edifici non residenziali.

Rapporto di Forma S/V [1/m]	Anno di costruzione					
	<1960	1961-1980	1981-1990	1991-2005	2006-2015	2016-2019
0-0.1	0.18	0.15	0.07	0.12	0.16	0.08
0.11-0.2	1.24	0.85	0.54	0.69	0.74	0.49
0.21-0.3	3.59	2.41	1.53	1.55	2.28	1.67
0.31-0.4	7.87	5.54	3.22	3.19	3.87	3.62
0.41-0.5	10.03	7.51	4.28	4.87	5.49	4.78
0.51-0.6	20.24	16.67	11.42	11.74	12.30	11.42
0.61-0.7	15.25	13.50	11.11	10.77	10.96	11.23
0.71-0.8	10.14	10.02	8.91	8.83	8.74	8.39
0.81-0.9	6.78	7.25	6.92	6.61	7.16	6.50
0.91-1	7.83	9.29	9.94	9.25	10.47	9.72
1.01-1.2	4.29	5.39	6.48	6.18	6.29	7.04
>1.2	2.50	3.54	4.96	4.73	4.49	4.78

2.3.4 Analisi delle caratteristiche termiche dell'involucro edilizio

I dati riportati all'interno del SIAPE hanno permesso, inoltre, di valutare anche le caratteristiche termiche degli edifici certificati; infatti, negli APE sono riportati parametri quali trasmittanza termica periodica e area solare equivalente estiva per unità di superficie utile, che forniscono indicazioni medie sulle performance dell'involucro edilizio opaco e trasparente.

Gli edifici residenziali presentano un trend decrescente quasi esponenziale all'aumentare dei valori di trasmittanza termica periodica ψ (Figura 30), con un picco nel range 0.101-0.150 W/m²K. Un andamento perfettamente analogo è riscontrabile anche per gli edifici non residenziali, per i quali, però, si sono

riscontrate delle percentuali inferiori rispetto al residenziale fino al range 0.551-0.600 W/m²K, e percentuali maggiori per valori crescenti. Si ritiene rilevante evidenziare come per il settore non residenziale si abbia una percentuale significativa di edifici (superiore al 6%) aventi un valore superiore a 1.2 W/m²K. Va tuttavia sottolineato che la ψ risultante in molti APE abbia valori considerati poco attendibili perché ritenuti troppo elevati, forse anche a causa di semplificazioni adottate nel modello di simulazione.

Infine, l'analisi dell'area solare equivalente estiva per unità di superficie utile $A_{sol}/A_{supopaco}$ (Figura 31) evidenzia come gli edifici residenziali presentino un trend di tipo esponenziale decrescente all'aumentare dei valori del rapporto $A_{sol}/A_{supopaco}$, con un picco riscontrato nel range 0.011-0.020. Un andamento analogo è riscontrabile anche per il settore non residenziale, ma con una minore velocità di decremento rispetto al residenziale. Si tiene a precisare che valori bassi di tale parametro derivano anche dalla presenza di schermature e/o ombreggiamenti esterni che riducono gli apporti solari attraverso il componente vetrato; pertanto, in accordo con i risultati mostrati, sarà necessario prevedere nei modelli di simulazione opportuni sistemi di schermature e/o di ombreggiamento.

I risultati ottenuti da questi due parametri permetteranno di adottare e scegliere oculatamente quali tipologie costruttive adottare tra quelle riportate nell'analisi dello stato dell'arte del patrimonio edilizio, nonché di definire i sistemi oscuranti da applicare sulle componenti trasparenti.

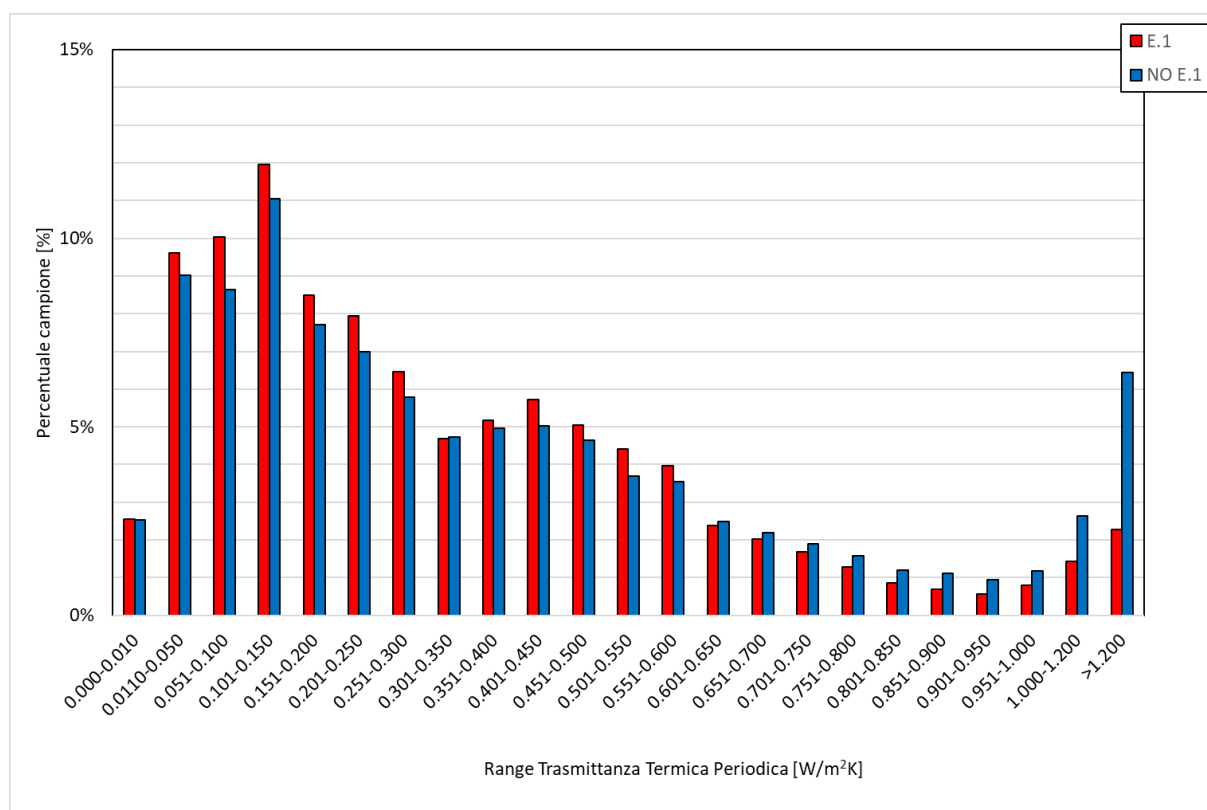


Figura 30 – Distribuzione percentuale degli APE per fissati range di trasmittanza termica periodica.

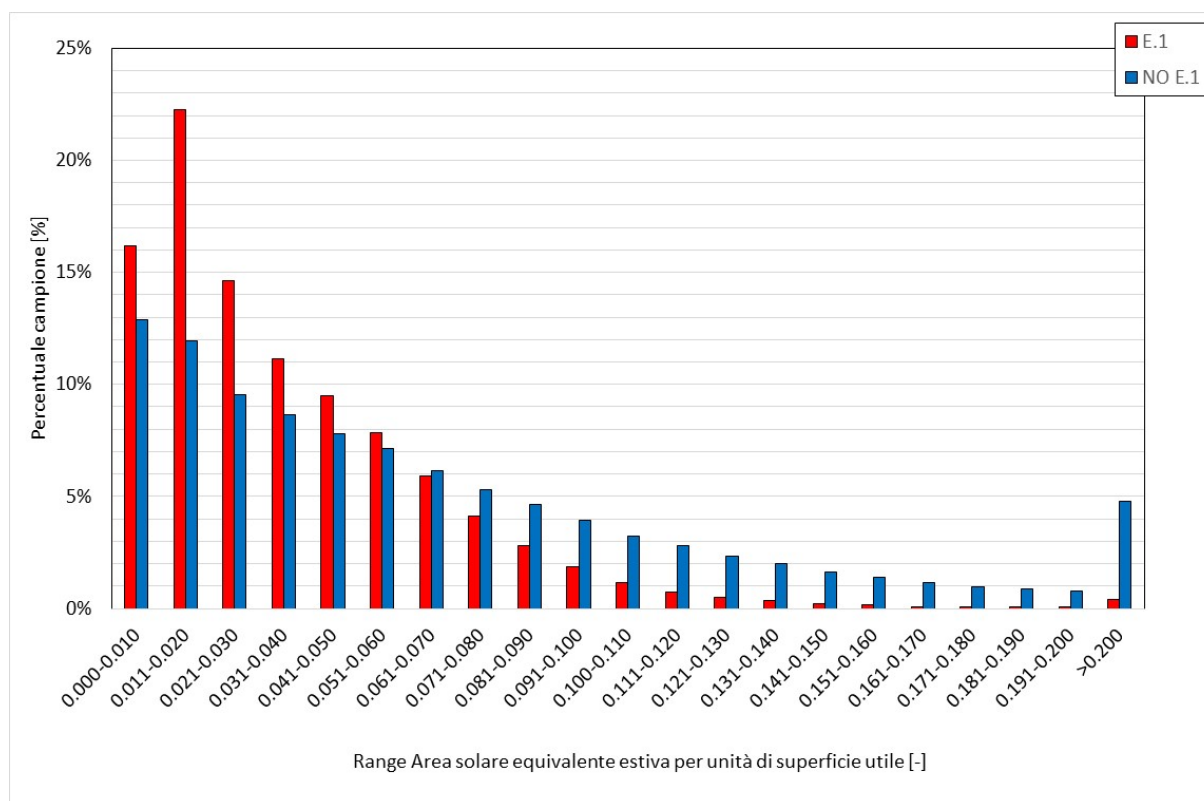


Figura 31 – Distribuzione percentuale degli APE per fissati range dell'area solare equivalente estiva per unità di superficie utile.

Anche in questo caso i parametri termici analizzati sono stati studiati secondo l'evoluzione temporale del costruito. Come per i precedenti, i risultati sono stati restituiti mediante delle tabelle, in cui le percentuali in termini assoluti sono state riportate in formato numerico nelle singole celle, mentre il peso di ciascun dato rispetto i parametri selezionati, è evidenziato con una tonalità che varia dal bianco al verde all'aumentare del peso stesso.

La correlazione tra trasmittanza termica periodica e anno di costruzione dichiarato è mostrata nella Tabella 52 per il residenziale e in Tabella 53 per il non residenziale. Il trend ottenuto rispecchia perfettamente quanto emerso al paragrafo 2.2.2.1; infatti, l'andamento del valore di trasmittanza termica periodica tende a variare significativamente con l'epoca di costruzione degli edifici. Gli edifici più datati sono caratterizzati da valori di ψ altalenanti, ma sempre con una percentuale significativa dal range 0.011-0.30 W/m²K. Tuttavia, in particolare tra il 1961 e 2005, una significativa percentuale di edifici ricade in range di ψ molto elevati (superiori a 1.2), mentre gli edifici più recenti presentano dei valori sempre più bassi, in particolare nel range 0.00-0.15 W/m²K, segno di una migliore prestazione termica globale del fabbricato. Gli edifici non residenziali, invece, mostrano un andamento più lineare, con una percentuale sempre più concentrata nel range 0.011-0.25 W/m²K. In particolare, valori maggiori e quasi costanti si riscontrano nel range 0.101-0.150 W/m²K fino al 2005. A seguire, anche in questo caso, si osserva lo stesso trend riscontrato per il settore residenziale, con la percentuale maggiore di edifici nei range 0.011-0.15 W/m²K.

Tabella 52 – Percentuale di APE per diversi range di trasmittanza termica periodica e per fissati periodi di costruzione – edifici residenziali.

Trasmittanza termica periodica [W/m ² K]	Anno di costruzione					
	<1960	1961-1980	1981-1990	1991-2005	2006-2015	2016-2019
0.000-0.010	3.34	1.23	1.19	1.92	4.41	6.85
0.0110-0.050	12.34	4.49	4.95	6.85	15.12	22.95
0.051-0.100	10.84	5.56	5.66	8.44	11.59	15.64
0.101-0.150	13.43	9.42	7.97	9.79	13.12	12.86
0.151-0.200	8.52	6.67	7.46	7.37	8.58	7.80
0.201-0.250	7.35	6.85	6.51	7.14	6.95	6.22
0.251-0.300	5.90	5.75	5.71	6.36	5.60	3.32
0.301-0.350	4.31	5.09	5.06	5.30	4.68	3.44
0.351-0.400	4.24	5.95	5.73	5.30	3.88	2.72
0.401-0.450	4.26	6.58	5.60	4.94	3.48	2.51
0.451-0.500	4.07	6.00	5.29	4.23	3.08	2.16
0.501-0.550	3.12	5.01	4.14	3.35	2.48	1.74
0.551-0.600	2.84	4.92	4.38	3.26	2.08	1.12
0.601-0.650	2.02	3.27	2.90	2.55	1.68	0.85
0.651-0.700	1.68	2.93	2.71	2.19	1.36	1.20
0.701-0.750	1.37	2.53	2.46	2.03	1.35	0.83
0.751-0.800	1.23	2.06	2.04	1.67	0.99	0.52
0.801-0.850	0.90	1.49	1.58	1.38	0.94	0.52
0.851-0.900	0.81	1.36	1.65	1.19	0.75	0.68
0.901-0.950	0.61	1.17	1.45	1.12	0.68	0.37
0.951-1.000	0.76	1.33	1.67	1.65	0.85	0.91
1.000-1.200	1.89	3.15	3.58	3.33	1.88	1.35
>1.200	4.16	7.19	10.33	8.62	4.47	3.42

Tabella 53 – Percentuale di APE per diversi range di trasmittanza termica periodica e per fissati periodi di costruzione – edifici non residenziali.

Trasmittanza termica periodica [W/m²K]	Anno di costruzione					
	<1960	1961-1980	1981-1990	1991-2005	2006-2015	2016-2019
0.000-0.010	1.69	1.17	1.92	1.80	6.64	11.84
0.0110-0.050	8.65	4.93	6.97	9.66	21.68	34.25
0.051-0.100	10.00	6.25	8.57	13.37	17.24	21.19
0.101-0.150	13.17	9.62	11.22	14.35	15.50	10.52
0.151-0.200	9.26	7.25	8.59	10.79	9.23	4.92
0.201-0.250	8.82	7.46	8.27	9.17	6.75	3.31
0.251-0.300	6.74	6.60	7.16	7.60	4.68	2.36
0.301-0.350	4.86	5.09	5.25	4.96	3.14	1.45
0.351-0.400	5.09	6.16	6.06	4.99	2.76	1.50
0.401-0.450	4.98	7.82	6.77	4.91	2.76	1.31
0.451-0.500	4.97	6.78	5.20	3.78	2.01	1.00
0.501-0.550	3.96	6.38	4.70	3.13	1.67	1.09
0.551-0.600	3.53	5.93	4.29	2.59	1.35	0.85
0.601-0.650	2.24	3.36	2.66	1.54	0.75	0.84
0.651-0.700	1.88	2.94	2.20	1.24	0.64	0.63
0.701-0.750	1.50	2.45	1.92	1.11	0.56	0.39
0.751-0.800	1.23	1.84	1.28	0.85	0.38	0.34
0.801-0.850	0.85	1.19	0.93	0.57	0.26	0.23
0.851-0.900	0.71	0.92	0.77	0.47	0.20	0.24
0.901-0.950	0.60	0.72	0.58	0.33	0.17	0.18
0.951-1.000	0.78	1.01	0.97	0.59	0.34	0.21
1.000-1.200	1.63	1.76	1.50	0.80	0.42	0.40
>1.200	2.89	2.40	2.22	1.38	0.85	0.95

L'analisi dell'area solare equivalente estiva per unità di superficie utile è, invece, mostrata in Tabella 54 per gli edifici residenziali e in Tabella 55 per quelli non residenziali; questa evidenza come tutti gli edifici presentano prevalentemente valori molto bassi indipendentemente dall'epoca di costruzione. Per il residenziale i picchi si riscontrano nel range 0.00-0.02, mentre nel non residenziale prevalentemente nel range 0.011-0.020.

Tabella 54 – Percentuale di APE per diversi range di area solare equivalente estiva per unità di superficie e per fissati periodi di costruzione – edifici residenziali.

Asol/Asup_utile [-]	Anno di costruzione					
	<1960	1961-1980	1981-1990	1991-2005	2006-2015	2016-2019
0.000-0.010	12.99	11.62	13.97	13.37	13.75	14.64
0.011-0.020	13.04	11.20	10.80	11.43	11.64	13.58
0.021-0.030	10.54	8.54	8.64	9.09	9.87	11.68
0.031-0.040	9.32	7.76	8.35	8.26	9.10	10.33
0.041-0.050	8.18	7.23	7.57	7.86	8.66	7.32
0.051-0.060	7.40	6.87	7.06	6.80	7.49	6.86
0.061-0.070	6.33	6.22	5.93	6.06	5.89	5.76
0.071-0.080	5.29	5.58	5.17	5.24	5.06	4.80
0.081-0.090	4.54	5.03	4.74	4.30	4.31	4.17
0.091-0.100	3.85	4.26	3.90	3.90	4.10	3.05
0.100-0.110	3.07	3.71	3.21	3.28	2.68	2.37
0.111-0.120	2.58	3.12	3.10	2.71	2.82	2.31
0.121-0.130	2.11	2.66	2.49	2.47	2.00	1.93
0.131-0.140	1.82	2.33	1.85	2.02	1.87	1.65
0.141-0.150	1.37	1.93	1.82	1.66	1.43	0.95
0.151-0.160	1.19	1.81	1.52	1.28	1.28	0.99
0.161-0.170	0.98	1.38	1.32	1.27	0.89	0.78
0.171-0.180	0.79	1.15	1.05	0.99	0.72	0.99
0.181-0.190	0.65	1.05	0.97	0.99	0.84	0.76
0.191-0.200	0.67	0.86	0.86	0.86	0.55	0.68
>0.200	3.27	5.70	5.68	6.17	5.05	4.40

Tabella 55 – Percentuale di APE per diversi range di area solare equivalente estiva per unità di superficie e per fissati periodi di costruzione – edifici non residenziali.

Asol/Asup_utile [-]	Anno di costruzione					
	<1960	1961-1980	1981-1990	1991-2005	2006-2015	2016-2019
0.000-0.010	16.45	13.97	18.08	17.52	16.80	18.93
0.011-0.020	20.91	21.60	25.77	25.39	22.04	19.57
0.021-0.030	15.23	13.85	14.70	14.64	14.09	15.58
0.031-0.040	12.04	10.68	10.34	10.74	11.09	11.05
0.041-0.050	9.84	9.66	8.59	8.88	9.55	10.55
0.051-0.060	7.84	8.45	6.92	7.28	7.84	7.66
0.061-0.070	5.77	6.68	5.14	5.18	5.92	5.64
0.071-0.080	3.91	4.88	3.55	3.45	4.06	3.74
0.081-0.090	2.69	3.44	2.22	2.35	2.73	2.11
0.091-0.100	1.71	2.33	1.54	1.56	1.99	1.69
0.100-0.110	1.09	1.44	0.91	0.91	1.23	1.07
0.111-0.120	0.71	0.91	0.63	0.59	0.72	0.62
0.121-0.130	0.47	0.56	0.38	0.39	0.48	0.42
0.131-0.140	0.38	0.41	0.24	0.24	0.30	0.34
0.141-0.150	0.20	0.24	0.16	0.17	0.21	0.19
0.151-0.160	0.15	0.15	0.15	0.12	0.16	0.15
0.161-0.170	0.09	0.11	0.08	0.07	0.09	0.10
0.171-0.180	0.06	0.09	0.07	0.07	0.08	0.08
0.181-0.190	0.06	0.06	0.05	0.05	0.07	0.07
0.191-0.200	0.05	0.06	0.05	0.05	0.04	0.08
>0.200	0.34	0.43	0.41	0.35	0.50	0.38

2.3.5 Analisi delle caratteristiche impiantistiche

Come anticipato, gli APE contenuti nel SIAPE hanno permesso di effettuare ulteriori considerazioni, e in particolare, di approfondire la tipologia impiantistica utilizzata per i principali servizi energetici. In Figura 32 si riporta la tipologia impiantistica dichiarata all'interno degli APE, per i tre servizi energetici principali: climatizzazione invernale (in rosso), climatizzazione estiva (in blu) e produzione acqua calda sanitaria (in giallo). Come era lecito attendersi, la climatizzazione estiva è realizzata prevalentemente con macchine frigorifere aventi aria come sorgente esterna (più del 96% del campione esaminato), di cui quasi l'80% utilizzando aria come fluido termovettore. Maggiore variabilità è stata invece riscontrata per la climatizzazione invernale; circa il 55% degli edifici è riscaldato tramite caldaie tradizionali, oltre il 25% con un generatore a condensazione, mentre solo il 9% degli edifici certificati si scalda sfruttando una pompa di calore. Le stesse tipologie impiantistiche riscontrate per la climatizzazione invernale, sono state individuate come quelle principalmente impiegate anche per la produzione di acqua calda sanitaria; tuttavia per questo servizio energetico sono molto impiegati sistemi quali boiler e scaldabagno autonomi (entrambi pari al 12.8% del campione).

Individuate le principali tecnologie impiantistiche, si è quindi andati a valutare il vettore energetico impiegato per la produzione dell'energia termica; questa analisi è stata condotta utilizzando i dati riportati all'interno della tabella "fonti energetiche utilizzate" degli APE. Il risultato, mostrato in Figura 33, conferma come l'energia elettrica sia il principale vettore energetico utilizzato (oltre il 99%) per la climatizzazione estiva,

mentre il gas naturale risulta essere il principale vettore energetico utilizzato per gli altri due servizi energetici.

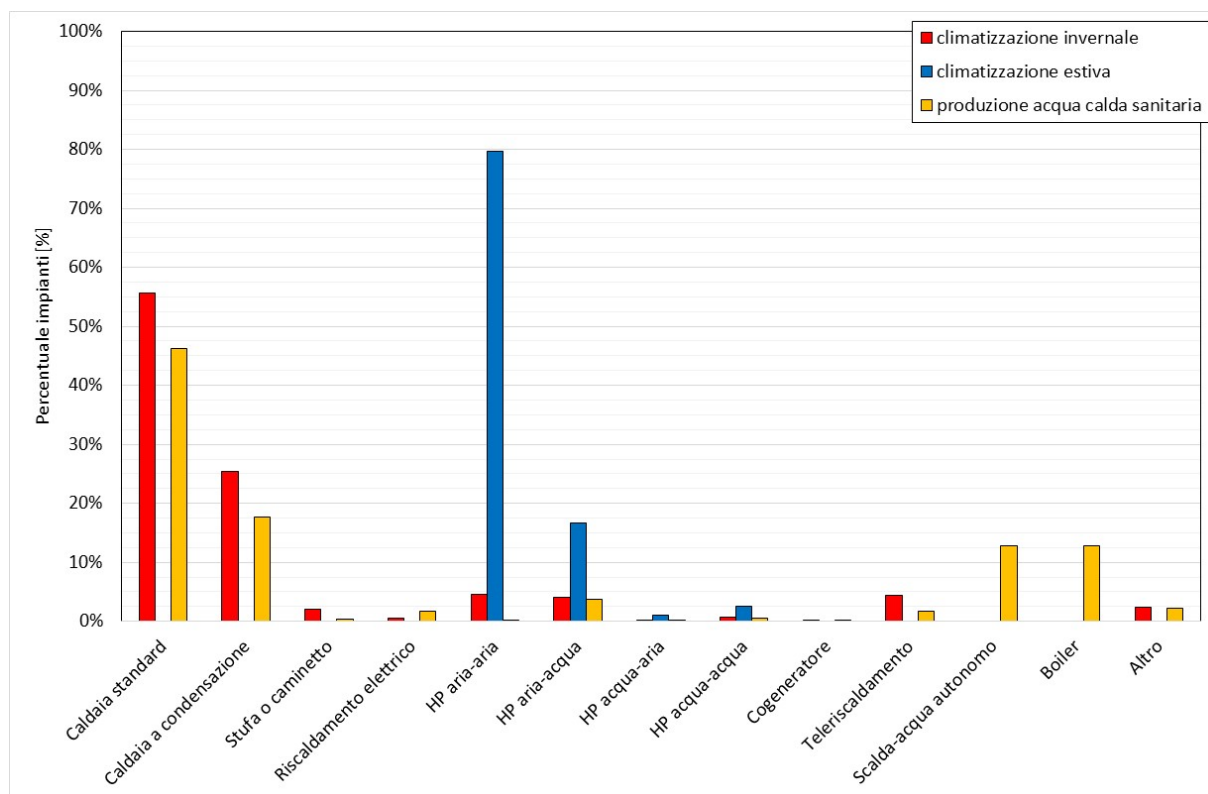


Figura 32 – Distribuzione percentuale degli APE per tipologia impiantistica dichiarata.

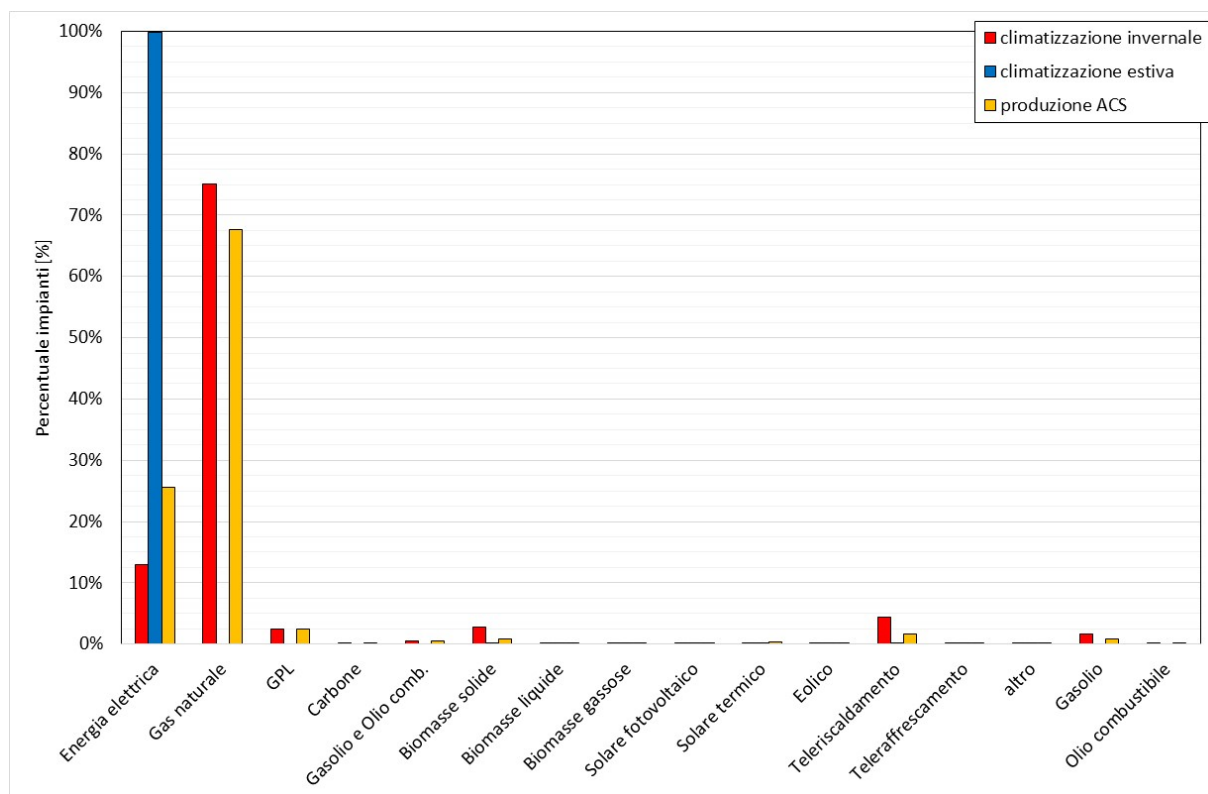


Figura 33 – Distribuzione percentuale degli APE per tipologia di combustibile dichiarato.

Il risultato ottenuto conferma in parte quanto emerso dall'indagine condotta con dati Istat; si tiene a precisare inoltre che è lecito attendersi, quando tutte le regioni alimenteranno il SIAPE, delle percentuali più elevate per fonti come biomasse, GPL e gasolio, che come evidenziato nell'indagine Istat, sono quelle maggiormente impiegate nelle regioni in cui non è presente il gas naturale (come ad esempio la Sardegna). Altro aspetto indagato ha riguardato l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili. In accordo con i dati contenuti nel SIAPE, solo una piccola percentuale di edifici dispone di impianti a fonti energetica rinnovabile; di questi, come mostrato in Figura 34, l'impianto solare termico e l'impianto fotovoltaico risultano essere quelli maggiormente installati (oltre il 50% degli edifici che dichiara un impianto a fonti rinnovabili, produce energia termica con il solare termico mentre il 42% produce energia elettrica mediante l'impianto fotovoltaico). L'illuminazione degli edifici è un altro servizio energetico di rilevanza per il presente studio, specialmente per gli edifici classificati come non residenziali (uffici, attività commerciali, ecc). In particolare, l'analisi degli APE ha permesso di confermare le tipologie di lampade maggiormente utilizzate: ad incandescenza, fluorescenti, LED e a scarica. La distribuzione del campione esaminato in percentuale è riportato Figura 35 che evidenzia come solo poco più del 16.4% degli edifici certificati presenti un'illuminazione a LED. Si tiene a precisare che, specialmente per gli edifici non residenziali, sarebbero disponibili informazioni anche sugli altri servizi energetici previsti da normativa (ventilazione e trasporto di persone e cose); tuttavia, il campione a disposizione per questi ulteriori servizi energetici risulta essere ancora molto esiguo, pertanto, non è stato ritenuto statisticamente significativo (meno del 1% degli APE presenti).

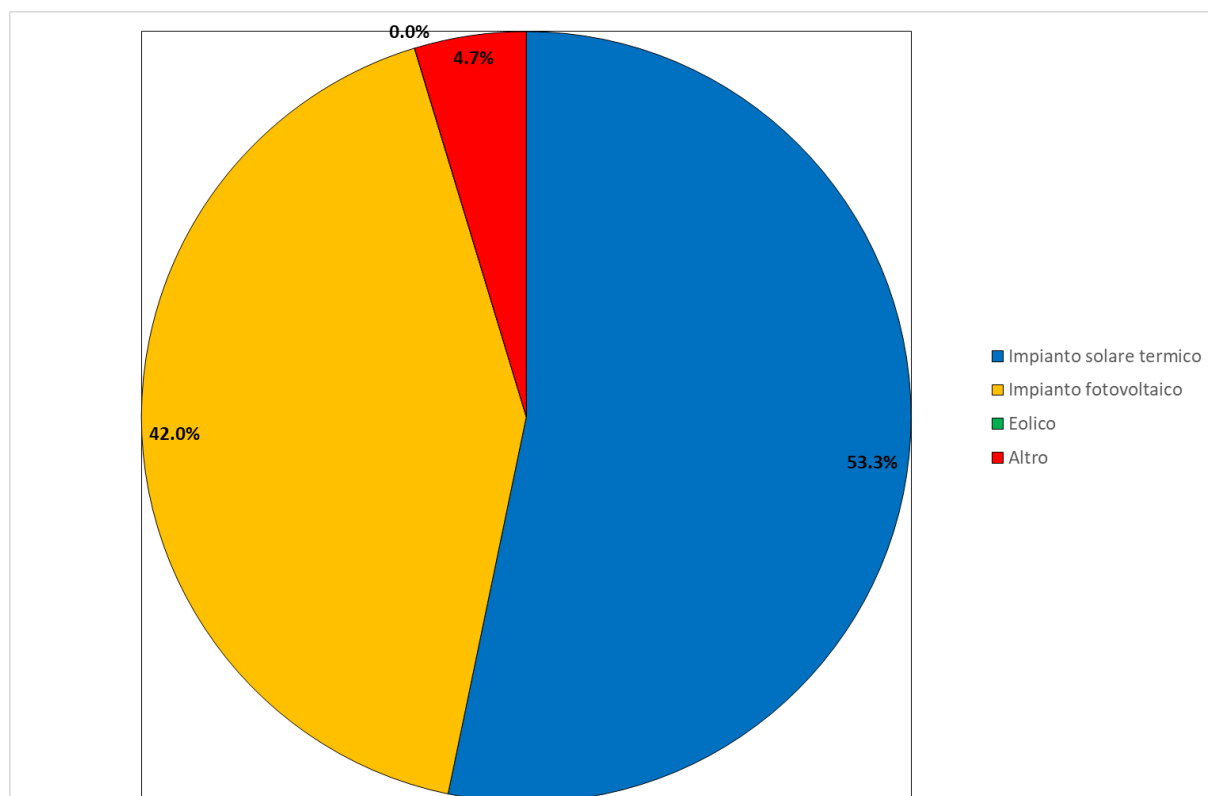


Figura 34 – Distribuzione percentuale degli APE per tipologia impiantistica a fonte energetica rinnovabile.

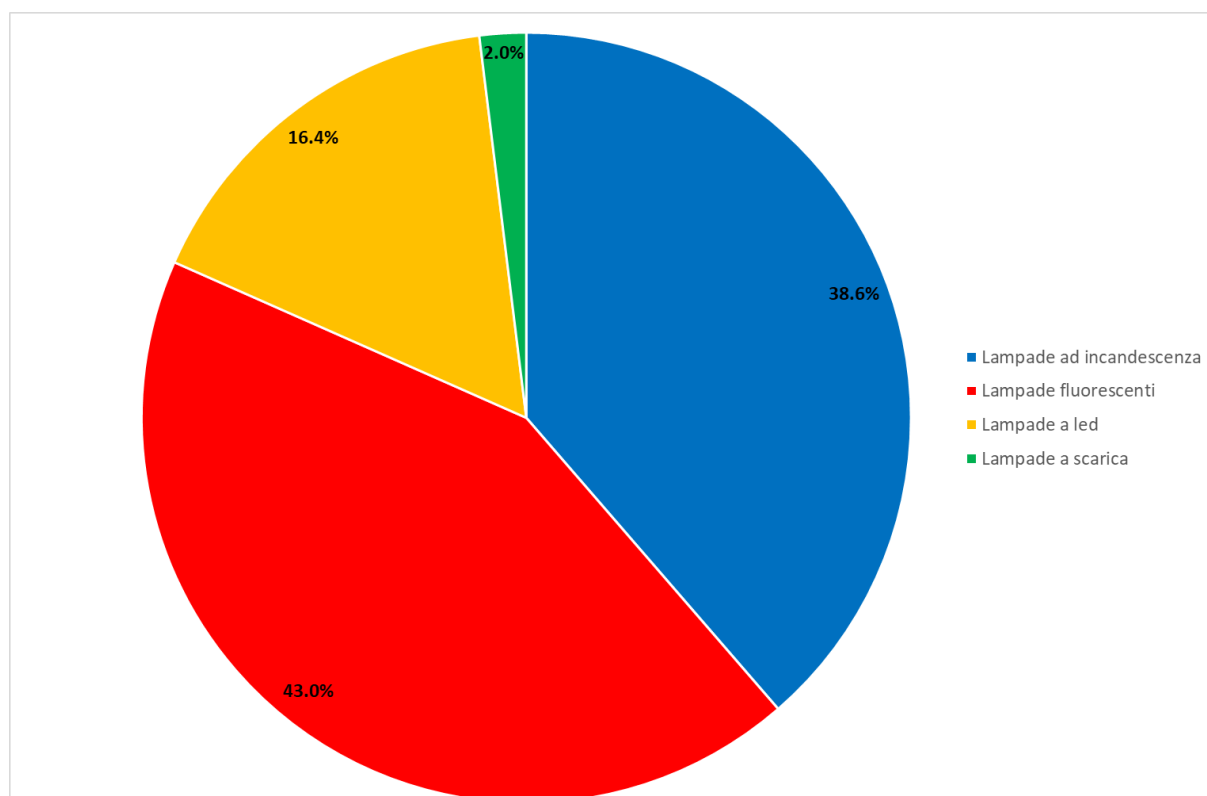


Figura 35 – Distribuzione percentuale per tipologia di lampade installate.

Infine, sfruttano i dati contenuti nel SIAPE, e in considerazione dei risultati fin qui emersi, si andati a verificare l'esistenza o meno di una correlazione tra i diversi parametri; si precisa che non è stata riscontrata alcuna significativa correlazione tra la soluzione impiantistica dichiarata e la superficie utile o il volume lordo riscaldato, pertanto, per brevità di sintesi, questa analisi non è stata riportata.

È risultato, invece, rilevante l'analisi della tipologia impiantistica con la destinazione d'uso dichiarata. I risultati, come riportato nei precedenti paragrafi, sono restituiti mediante delle tabelle, in cui, le percentuali in termini assoluti sono state riportate in formato numerico nelle singole celle, mentre il peso di ciascun dato rispetto i parametri selezionati è evidenziato con una tonalità che varia dal bianco al verde all'aumentare del peso stesso. Pertanto, con il simbolo numerico si è voluto indicare l'effettiva percentuale riscontrata del campione esaminato, mentre con il colore si è cercato di indicare l'effettivo peso che ha quel valore per i range dei due parametri selezionati.

Le analisi sono state effettuate considerando le tipologie impiantistiche maggiormente riscontrate per lo specifico servizio energetico indagato. Per la climatizzazione invernale si sono considerate: caldaia tradizionale (1), caldaia a condensazione (2), stufa o caminetto (3), riscaldamento elettrico (4) e pompa di calore (5). I risultati relativi alla climatizzazione invernale sono mostrati in Tabella 56, dove si è adottata la nomenclatura numerica appena riportata per la definizione degli impianti.

La prima tabella mostra una correlazione rilevante tra la tipologia impiantistica e la destinazione d'uso; in particolar modo per gli edifici residenziali, dove oltre il 52% del campione classificato come E.1 presenta una caldaia di tipo standard, il 20% un generatore a condensazione e solo il 3.6% una pompa di calore. Il generatore di calore risulta essere la tipologia maggiormente utilizzata anche per le altre destinazioni d'uso. Risulta di interesse evidenziare come per la categoria E.5, la caldaia standard sia ancora la tipologia maggiormente utilizzata, ma subito seguita dalla pompa di calore.

Le stesse considerazioni emergono considerando la produzione di acqua calda sanitaria come servizio energetico (Tabella 57); per gli edifici residenziali, l'utilizzo dei generatori di calore standard risulta essere preminente rispetto boiler (6) e scaldabagno autonomi (7), mentre nel non residenziale le due tecnologie sembrano egualmente utilizzate al variare della destinazione d'uso.

Tabella 56 – Distribuzione percentuale degli APE per destinazione d’uso e tipologia impiantistica per la climatizzazione invernale.

Classificazione destinazione d’uso del DPR 413/93 [8]	Tipologia impiantistica					
	1	2	3	4	5	Altre
E.1	52.76	20.58	1.88	0.24	3.69	5.97
E.1.1	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
E.1.2	0.60	0.23	0.09	0.03	0.07	0.14
E.1.3	0.13	0.06	0.01	0.00	0.05	0.01
E.2	1.93	0.92	0.02	0.03	0.66	0.26
E.3	0.07	0.04	0.00	0.00	0.04	0.02
E.4	0.38	0.14	0.03	0.02	0.25	0.06
E.5	2.16	0.75	0.04	0.07	1.13	0.41
E.6	0.07	0.04	0.00	0.00	0.02	0.02
E.7	0.15	0.12	0.00	0.00	0.02	0.03
E.8	1.72	0.42	0.06	0.06	0.47	0.73

Tabella 57 – Distribuzione percentuale degli APE per destinazione d’uso e tipologia impiantistica per la produzione di acqua calda sanitaria.

Classificazione destinazione d’uso del DPR 413/93 [8]	Tipologia impiantistica							
	1	2	3	4	5	6	7	Altre
E.1	45.81	13.68	0.33	1.15	1.64	11.46	12.47	4.25
E.1.1	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
E.1.2	0.46	0.18	0.01	0.04	0.02	0.46	0.02	0.11
E.1.3	0.12	0.06	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.02
E.2	1.17	0.37	0.00	0.14	0.08	1.16	0.04	0.25
E.3	0.06	0.03	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01
E.4	0.30	0.09	0.00	0.02	0.02	0.21	0.02	0.05
E.5	1.31	0.31	0.00	0.17	0.08	1.39	0.08	0.29
E.6	0.05	0.04	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01
E.7	0.08	0.05	0.00	0.01	0.01	0.11	0.00	0.03
E.8	0.75	0.18	0.01	0.12	0.03	0.86	0.04	0.16

Per la climatizzazione estiva, invece, è stato possibile osservare la tipologia di pompa di calore maggiormente impiegata; i risultati di questa ulteriore analisi sono mostrati in Tabella 58. I risultati mostrano una netta prevalenza di pompe di calore a compressione rispetto a quelle ad assorbimento, nonché un maggior utilizzo dell’aria come sorgente esterna. In accordo con la Figura 33 e con la Tabella 58, le pompe di calore a compressione che sfruttano l’aria come sorgente esterna, risultano essere la soluzione maggiormente impiegata in tutte le destinazioni d’uso indagate.

Tabella 58 – Distribuzione percentuale degli APE per destinazione d'uso e tipologia impiantistica per la climatizzazione estiva.

Pompa di calore		compressione				assorbimento				altre
Sorgente esterna		aria	aria	acqua	acqua	aria	aria	acqua	acqua	
Sorgente interna		aria	acqua	aria	acqua	aria	acqua	aria	acqua	
Classificazione DPR 413/93 [8]	E.1	9.20	1.63	0.07	0.28	0.07	0.05	0.00	0.01	0.04
	E.1.1	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	E.1.2	0.14	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	E.1.3	0.10	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	E.2	0.74	0.25	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
	E.3	0.07	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	E.4	0.25	0.06	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	E.5	1.14	0.23	0.02	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00	0.01
	E.6	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	E.7	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	E.8	0.22	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

La correlazione tra i diversi parametri, ha permesso di osservare come, per la climatizzazione invernale degli edifici residenziali, la potenza degli impianti sia prevalentemente compresa tra 21-30 kW, così come per gli edifici classificati come E.2 e E.5 (Tabella 59). Stesso risultato emerge per la produzione di acqua calda sanitaria (Tabella 60) anche se con percentuali leggermente diverse; questo è facilmente spiegabile dal fatto che i due servizi sono generalmente serviti dallo stesso impianto.

Si tiene a precisare che i valori di potenza più piccoli riscontrati nelle tabelle, sono legati prevalentemente a impianti di piccola taglia, quali boiler, scaldabagno (relativamente alla sola produzione di acqua calda sanitaria) e pompe di calore, mentre i valori più elevati sono associabili a impianti di tipo centralizzato.

Tabella 59 – Distribuzione percentuale degli APE per destinazione d'uso e fissati range di potenza termica dell'impianto di riscaldamento.

Classificazione DPR 413/93 [8]	Potenza dell'impianto termico [kW]										
	0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-75	76-100	101-150	151-200	201-250	>250
E.1	5.76	3.72	43.25	5.88	0.77	2.21	2.36	3.37	2.68	2.59	12.54
E.1.1	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
E.1.2	0.18	0.09	0.41	0.09	0.02	0.04	0.05	0.08	0.05	0.03	0.14
E.1.3	0.03	0.01	0.07	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03
E.2	0.39	0.21	1.06	0.28	0.07	0.20	0.19	0.21	0.15	0.16	0.94
E.3	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05
E.4	0.16	0.09	0.27	0.11	0.02	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02	0.08
E.5	0.81	0.34	1.39	0.29	0.06	0.19	0.15	0.21	0.16	0.14	0.83
E.6	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03
E.7	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.13
E.8	0.37	0.16	0.76	0.56	0.14	0.35	0.20	0.24	0.12	0.11	0.47

Tabella 60 – Distribuzione percentuale degli APE per destinazione d’uso e fissati range di potenza termica dell’impianto di produzione acqua calda sanitaria.

Classificazione DPR 413/93 [8]	Potenza dell’impianto termico [kW]										
	0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-75	76-100	101-150	151-200	201-250	>250
E.1	16.09	8.00	50.55	5.56	0.48	1.02	0.80	0.99	0.72	0.63	3.25
E.1.1	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
E.1.2	0.55	0.06	0.43	0.08	0.01	0.02	0.03	0.04	0.01	0.01	0.06
E.1.3	0.03	0.01	0.07	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02
E.2	1.37	0.15	1.01	0.17	0.02	0.06	0.07	0.05	0.04	0.03	0.23
E.3	0.03	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.04
E.4	0.26	0.05	0.28	0.08	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02
E.5	1.68	0.20	1.27	0.16	0.02	0.04	0.03	0.04	0.03	0.02	0.15
E.6	0.02	0.01	0.03	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02
E.7	0.12	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05
E.8	1.02	0.09	0.58	0.18	0.02	0.04	0.03	0.03	0.02	0.01	0.10

Stessa correlazione è stata effettuata per l’impianto di climatizzazione estiva (Tabella 61), che permette di confermare quanto detto in precedenza; infatti, in accordo con la Tabella 61, gli impianti di climatizzazione estiva sono prevalentemente di modesta potenza (il 63% complessivo ricade all’interno del range 0-10 kW), con piccole percentuali per range via via più ampi.

Si segnala la presenza di impianti per questo servizio energetico aventi anche potenze significative; questo, potrebbe essere imputabile alla aggregazione di più impianti di piccola taglia a servizio della stessa zona termica. Si tiene a precisare, a tale riguardo, che i dati impiantistici riportati negli APE non sono verificabili senza un sopralluogo o senza poter correlare i dati con quelli contenuti nei catasti impianti regionali.

Tabella 61 – Distribuzione percentuale degli APE per destinazione d’uso e fissati range di potenza termica dell’impianto di raffrescamento.

Classificazione DPR 413/93 [8]	Potenza dell’impianto termico [kW]										
	0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-75	76-100	101-150	151-200	201-250	>250
E.1	63.07	3.43	1.19	0.49	0.29	0.79	0.48	0.45	0.37	0.45	1.38
E.1.1	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
E.1.2	0.45	0.04	0.02	0.01	0.00	0.04	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
E.1.3	0.21	0.06	0.05	0.04	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03	0.01	0.03
E.2	4.20	1.18	0.63	0.34	0.23	0.35	0.16	0.25	0.21	0.17	1.63
E.3	0.16	0.05	0.05	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.08
E.4	1.11	0.36	0.16	0.07	0.04	0.07	0.04	0.04	0.03	0.01	0.10
E.5	5.68	1.16	0.51	0.26	0.17	0.23	0.16	0.19	0.14	0.10	0.87
E.6	0.08	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
E.7	0.09	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02
E.8	2.60	0.68	0.37	0.20	0.13	0.23	0.10	0.12	0.05	0.03	0.19

Infine, l'ultima analisi condotta ha riguardato la tipologia impiantistica e la potenza installata. I risultati sono riportati da Tabella 62 a Tabella 64 rispettivamente per la climatizzazione invernale, la produzione di acqua calda sanitaria e la climatizzazione estiva. Si precisa che la nomenclatura utilizzata per gli impianti è la stessa definita nelle tabelle precedenti. I risultati ottenuti permettono di confermare quanto evidenziato in precedenza; per la climatizzazione invernale i generatori di calore presentano prevalentemente una potenza tra i 21-40 kW e, nel caso di impianti centralizzati, potenze superiori a 250 kW, mentre le pompe di calore (indicate con il numero 5) presentano mediamente una potenza compresa tra i 0-10 kW. Analoghe considerazioni possono essere fatte per gli impianti per la produzione di acqua calda sanitaria, per i quali però si osserva una importante percentuale di impianti autonomi, quali scaldabagno e boiler, con potenze inferiori a 10 kW. Come precedente evidenziato, invece, le macchine per la climatizzazione estiva sono prevalentemente di piccola taglia.

Tabella 62 – Distribuzione percentuale degli APE per fissati range di potenza installata e per tipologia impiantistica: climatizzazione invernale.

Potenza dell'impianto termico [kW]	Tipologia impiantistica					
	1	2	3	4	5	Altre
0-10	1.16	0.47	0.80	0.35	3.63	1.30
11-20	1.51	0.75	0.78	0.04	0.99	0.53
21-30	38.27	7.99	0.28	0.02	0.43	0.65
31-40	4.54	1.92	0.12	0.01	0.27	0.42
41-50	0.37	0.43	0.02	0.00	0.15	0.13
51-75	0.98	1.50	0.02	0.00	0.25	0.29
76-100	0.99	1.58	0.01	0.00	0.12	0.26
101-150	1.65	1.84	0.02	0.00	0.16	0.51
151-200	1.54	1.03	0.01	0.00	0.11	0.51
201-250	1.53	1.04	0.01	0.00	0.05	0.48
>250	8.17	4.06	0.02	0.03	0.22	2.65

Tabella 63 – Distribuzione percentuale degli APE per fissati range di potenza installata e per tipologia impiantistica: produzione di acqua calda sanitaria.

Potenza dell'impianto termico [kW]	Tipologia impiantistica							
	1	2	3	4	5	6	7	Altre
0-10	1.00	0.37	0.03	1.55	0.95	14.87	2.21	2.57
11-20	1.93	0.65	0.08	0.07	0.37	0.43	4.86	0.32
21-30	39.88	8.33	0.12	0.06	0.10	0.24	5.58	0.67
31-40	3.92	1.83	0.07	0.01	0.06	0.03	0.25	0.25
41-50	0.21	0.22	0.01	0.00	0.05	0.02	0.05	0.05
51-75	0.44	0.53	0.02	0.00	0.09	0.01	0.05	0.12
76-100	0.30	0.53	0.01	0.00	0.05	0.00	0.04	0.08
101-150	0.42	0.54	0.01	0.00	0.08	0.01	0.04	0.14
151-200	0.32	0.27	0.00	0.00	0.07	0.00	0.04	0.15
201-250	0.32	0.28	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.12
>250	1.78	1.09	0.00	0.02	0.09	0.18	0.11	0.71

Tabella 64 – Distribuzione percentuale degli APE per fissati range di potenza installata e per tipologia impiantistica: climatizzazione estiva.

Pompa di calore		compressione				assorbimento				altre
Sorgente esterna		aria	aria	acqua	acqua	aria	aria	acqua	acqua	
Sorgente interna		aria	acqua	aria	acqua	aria	acqua	aria	acqua	
Potenza dell'impianto termico [kW]	0-10	20.21	2.14	0.12	0.12	0.15	0.09	0.00	0.01	0.06
	11-20	1.45	0.69	0.04	0.03	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01
	21-30	0.65	0.27	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
	31-40	0.26	0.14	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	41-50	0.19	0.11	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
	51-75	0.30	0.24	0.02	0.19	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
	76-100	0.21	0.19	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
	101-150	0.16	0.20	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00
	151-200	0.07	0.10	0.01	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	201-250	0.09	0.19	0.00	0.05	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
	>250	0.21	0.41	0.04	0.12	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01

2.3.6 Analisi delle prestazioni energetiche degli edifici

Ultimo aspetto indagato sfruttando i dati del SIAPE, ha riguardato l'analisi dei consumi energetici degli immobili certificati. In particolare, si è andati a valutare il contributo rinnovabile e non rinnovabile calcolati in conformità con le normative vigenti [21-26], rispettivamente per gli edifici classificati come residenziali (E.1) e non residenziali (No E.1). Per evidenziare meglio il peso delle due destinazioni d'uso, le percentuali sono state calcolate rispetto al campione totale degli APE considerato come attendibile. In Figura 36 si riporta la percentuale del campione che presenta specifici range dell'indicatore energetico non rinnovabile (riportati sull'ascissa), mentre in Figura 37 è mostrato quello rinnovabile.

In merito al contributo non rinnovabile, si evince che la maggior parte degli edifici residenziali ricade all'interno del range 51-400 kWh/m²anno (poco meno dell'87% del campione totale degli edifici classificati come residenziale), mentre quelli non residenziali ricadono prevalentemente in range superiori compresi tra i 201 e i 600 kWh/m²anno (oltre il 60% del campione). Si ritiene molto interessante l'andamento riscontrato per il contributo rinnovabile; infatti, quasi il 90% del campione residenziale rientra all'interno del range 0-20 kWh/m²anno, mentre una distribuzione più uniforme è stata riscontrata per gli edifici non residenziali (circa il 91% del campione presenta un indicatore compreso tra 0-200 kWh/m²anno).

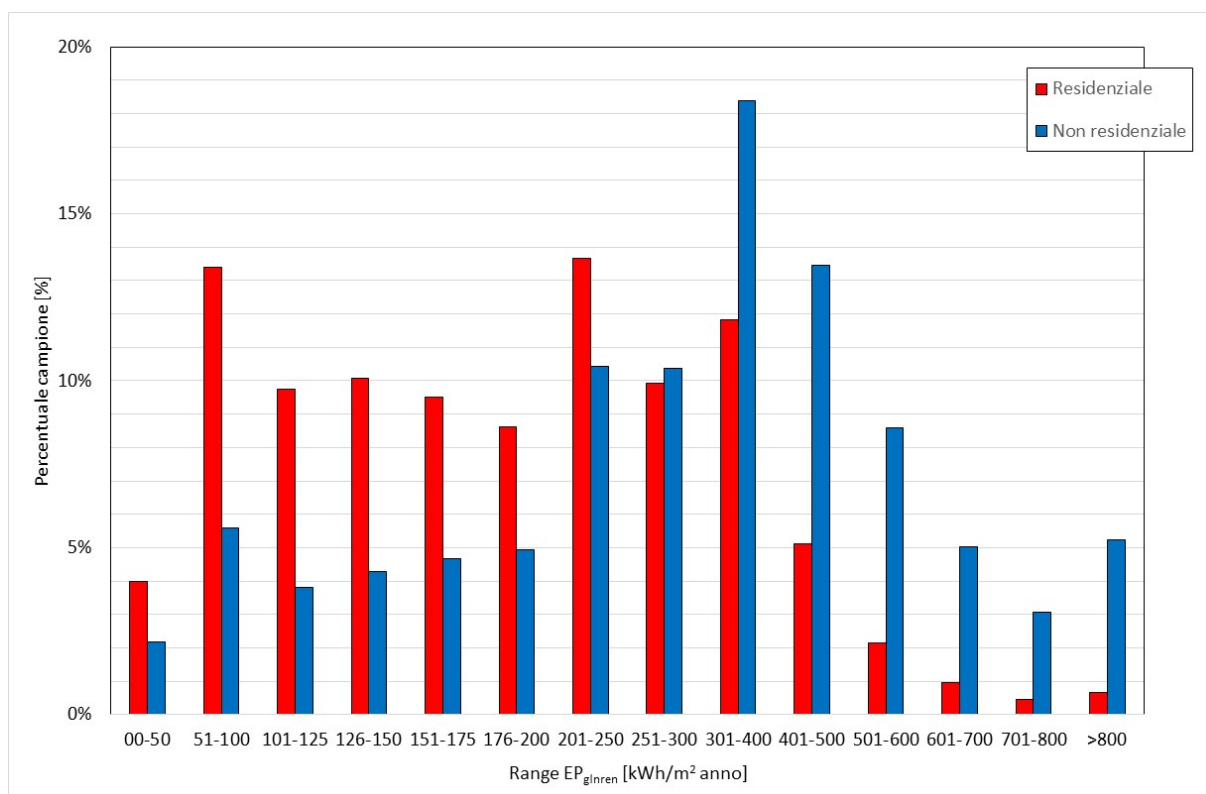


Figura 36 – Distribuzione percentuale del campione per fissati range dell'indice di Prestazione Energetica non rinnovabile.

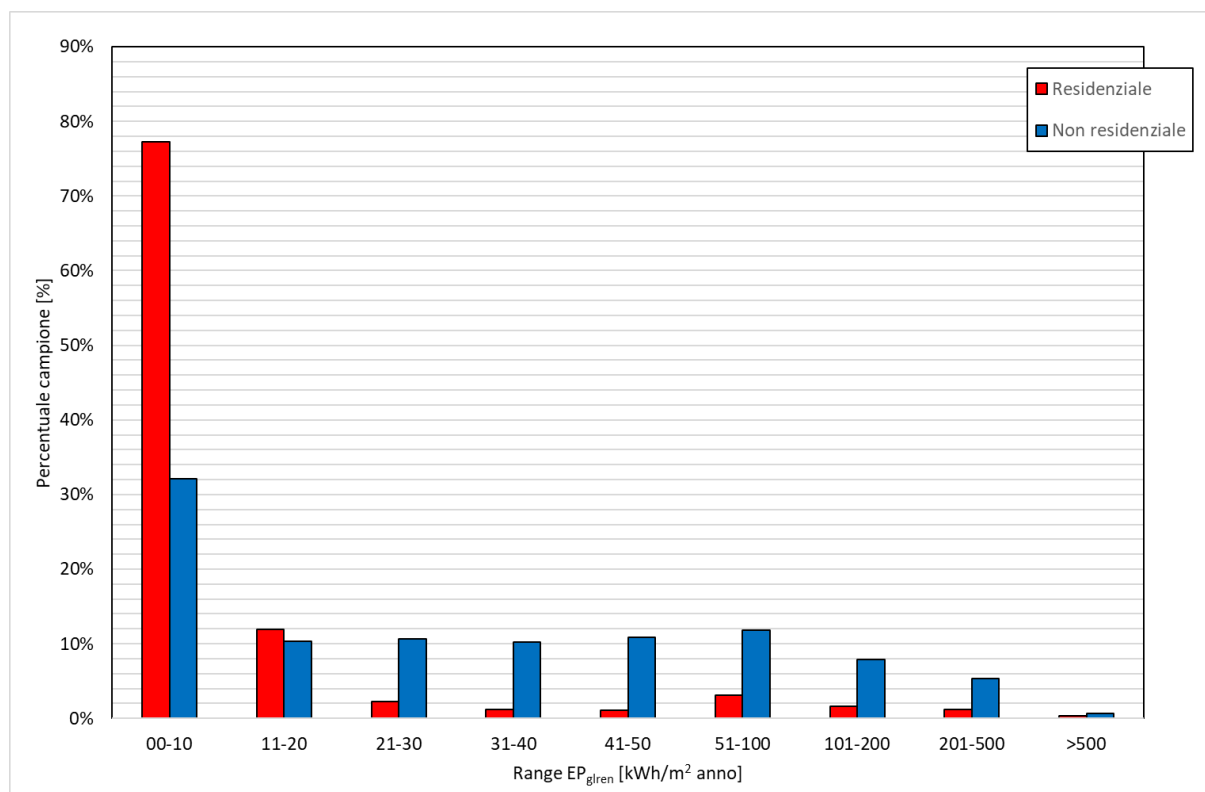


Figura 37 – Distribuzione percentuale del campione per fissati range dell'indice di Prestazione Energetica rinnovabile.

La distribuzione riscontrata per gli edifici non residenziali, è stata ulteriormente indagata andando a verificare quale specifica destinazione d'uso presenti una quota rinnovabile più significativa. Il risultato è mostrato in Figura 38. Da questo si può evincere che gli edifici classificati come E.4 siano quelli che presentano una maggior quota di rinnovabile, sebbene questi rappresentino meno dell'1% del campione totale. Tra le destinazioni d'uso maggiormente certificate (E.2, E.5 ed E.8), risulta interessante evidenziare la classificazione E.2 - uffici e assimilabili e la E.5 - attività commerciali e assimilabili, con una quota rinnovabile rispettivamente pari a 56.6 e 69.8 kWh/m²anno, rispetto alla classificazione E.8 - attività industriali, artigianali e assimilabili, che presenta un contributo pari a poco più di 35 kWh/m²anno. La classificazione E.5 e la E.8, inoltre, presentano un indicatore non rinnovabile molto simile tra loro (valore medio di circa 330 kWh/m²anno, mentre la destinazione E.2 presenta un indicatore non rinnovabile di poco inferiore e pari a circa 278 kWh/m²anno).

In accordo con i risultati ottenuti, pertanto, potrebbe essere interessante andare ad indagare, oltre agli edifici residenziali, gli immobili classificati come E.2 ed E.5 essendo sia tra quelli più rappresentativi che con il maggior contributo legato alle fonti energetiche rinnovabili.

Si tiene a precisare che tutti gli indicatori riportati sono calcolati sfruttando un profilo di utilizzo standard dell'edificio, pertanto si possono distogliere anche significativamente dai consumi reali dell'edificio. Pertanto, come previsto nel secondo anno di attività, sarebbe opportuno analizzare diversi profili di utilizzo dell'edificio, tra cui anche quello standard, con lo scopo di definire in maniera più accurata di benchmark per correlare i consumi reali con quelli derivanti da un profilo standard. A tale scopo, sarebbe opportuno fare uso anche di casi studio reali per i quali siano disponibili sia il profilo di utilizzo che il consumo effettivo. Pertanto, ulteriori analisi relative al consumo energetico degli immobili saranno condotte anche durante il secondo anno di attività.

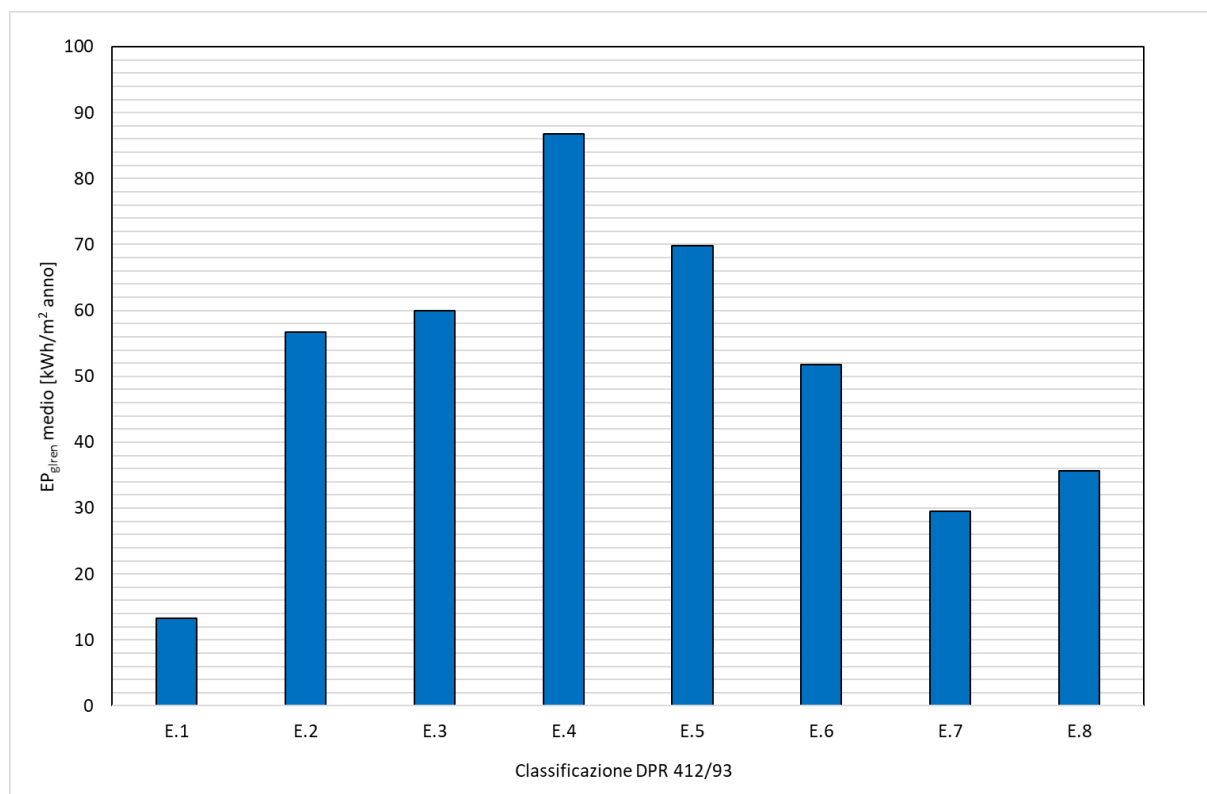


Figura 38 – Indice di Prestazione Energetica rinnovabile medio per le diverse destinazioni d'uso.

2.4 Risultati

Le analisi, effettuate utilizzando dati Istat, di Letteratura e quelli contenuti all'interno del SIAPE, hanno permesso di delineare i principali parametri del sistema edificio-impianto che dovranno caratterizzare i modelli di simulazione, oggetto del secondo anno di attività. A tale scopo, i risultati derivati dallo studio della documentazione disponibile in Letteratura sono stati confrontati con quelli riscontrati utilizzando i dati riportati negli APE che alimentano il SIAPE.

Il primo aspetto indagato ha riguardato la destinazione d'uso degli edifici da simulare, che dovrà vertere sicuramente verso i fabbricati appartenenti al settore residenziale. In accordo con i dati Istat, infatti, circa l'84% degli edifici facenti parte del parco edilizio nazionale (oltre 12,000,000 fabbricati) è ad uso residenziale, mentre il restante è prevalentemente ad uso commerciale-direzionale (2.2%) e produttivo (2.1%). I risultati sul settore residenziale delle analisi sugli APE contenuti nel SIAPE restituiscono percentuali analoghe, mentre per il settore non residenziale è stato possibile delineare tre destinazioni d'uso più rappresentative, elencate secondo la classificazione del D.P.R. 412/93:

- E.2 - Edifici adibiti a uffici e assimilabili (3.6%);
- E.5 - Edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili (6.3%);
- E.8 - Edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali e assimilabili (3.8%).

La scelta finale per i modelli di simulazione è ricaduta per le destinazioni d'uso classificate, come previsto da D.P.R. 412/93, E.1, E.2 ed E.5; quest'ultime, come descritto al paragrafo 2.3.6, sono state considerate più rappresentative e interessanti da indagare rispetto agli edifici E.8, in quanto risultano essere quelle con un indicatore energetico rinnovabile medio più significativo.

L'analisi dello stato dell'arte ha permesso di raggruppare i fabbricati in quattro tipologie principali, delineando per ciascuna sia le caratteristiche geometriche, che le condizioni al contorno:

1. Edificio unifamiliare - isolato: fabbricato di massimo due piani costituito da un'unica zona termica (appartamento) e avente tutte le pareti confinanti verso l'esterno o zone non riscaldate;
2. Edificio a schiera: fabbricato di massimo due piani costituito da una o più zone termiche indipendenti tra loro, ma aventi almeno un lato confinante verso un'altra zona termica;
3. Edificio in linea: fabbricato di massimo 3 piani costituito da più zone termiche aventi uno o più lati confinanti verso un'altra zona termica riscaldata o non riscaldata;
4. Edificio a torre: fabbricato di massimo 7 piani costituito da più zone termiche aventi uno o più lati confinanti verso un'altra zona termica riscaldata o non riscaldata.

Per ciascuna destinazione d'uso selezionata sono stati analizzati i principali parametri geometrici che caratterizzano il fabbricato (numero di piani, numero di appartamenti per fabbricato, altezza di piano, superficie utile, volume lordo riscaldata, superficie degli infissi); per ognuno di essi sono stati definiti dei range dimensionali desunti dagli esiti delle analisi dello stato dell'arte e delle informazioni contenute nel SIAPE. Inoltre, tramite le analisi svolte sui dati del SIAPE, è stato possibile effettuare delle correlazioni tra più elementi caratteristici del sistema edificio-impianto, come ad esempio la variazione di determinati parametri geometrici rispetto all'anno di costruzione e alla destinazione d'uso. I risultati di tali correlazioni sono mostrate in maniera dettagliata nel rapporto esteso.

Precedenti studi condotti su edifici ad uso ufficio [35-36] hanno evidenziato che la dimensione media degli infissi non è variata in maniera significativa nell'arco degli anni, così come il numero di finestre per stanza. Pertanto, facendo riferimento a dimensioni standard degli infissi, per gli edifici residenziali è stato scelto un numero di finestre tali da soddisfare il limite previsto dal Regolamento Edilizio (1/8 della superficie utile); per le altre destinazioni d'uso selezionate, sono state considerate le seguenti configurazioni:

1. E.2 o E.5 integrati con E.1: numero e dimensione minime delle finestre pari alla media riscontrate nei precedenti studi [35, 36], tali da garantire il limite 1/8;
2. E.2 o E.5 non integrati con E.1: numero e dimensione minime delle finestre pari alla media riscontrata nei precedenti studi [35, 36].

Con lo scopo di rappresentare una più ampia gamma di casistiche e di valutare correttamente l'effettivo impatto di queste sulle performance energetiche di un edificio, parte delle attività del secondo anno consisterà nell'effettuare delle simulazioni energetiche facendo variare le dimensioni della superficie finestrata, a partire da quelle che garantiscono la condizione limite di 1/8 della superficie utile.

Le principali caratteristiche dimensionali delineate a seguito dell'analisi dello stato dell'arte e del SIAPE sono riassunte in Tabella 65.

Grazie all'analisi dei dati contenuti nel SIAPE e dei dati Istat, sono state selezionate alcune città ritenute più rappresentative per numero di edifici costruiti e popolazione residente, dati per i quali si rimanda ai dati Istat, nonché per Gradi Giorno e Zona Climatica (Tabella 66). Tra le località elencate saranno scelte quelle da adottare per la stima dei fabbisogni energetici dei modelli di simulazione. Si tiene a precisare che le città selezionate non sono vincolanti: qualora si ritenesse opportuno o necessario, infatti, saranno scelti come località per le simulazioni anche altri comuni non riportati in tabella (ad esempio nel caso in cui fosse possibile analizzare un caso studio reale in un'altra città).

Successivamente alla definizione delle caratteristiche dimensionali che descriveranno i modelli di simulazione, sono state analizzate le caratteristiche termiche di ciascun componente opaco e trasparente. Le precedenti analisi sullo stato dell'arte hanno permesso di evidenziare l'evoluzione storica delle componenti opache verticali e orizzontali, per le quali sono state determinate le principali caratteristiche termiche: spessore (s), massa superficiale (Ms), trasmittanza termica (U), sfasamento (φ) e trasmittanza termica periodica (ψ).

Le tipologie costruttive analizzate sono caratteristiche di epoche di costruzione variabili e, di conseguenza, ognuna può essere contraddistinta da livelli di isolamento molto diversi. La muratura in pietra, la muratura a sacco e la muratura a cassa vuota, ad esempio, sono delle tipologie costruttive precedenti agli anni '30, pertanto sono strutture tipicamente non isolate. Al contrario, invece, le pareti in laterizio, così come quelle in calcestruzzo, sono caratteristiche di un periodo di costruzione molto più ampio, che va dal 1930 fino ai giorni attuali: pertanto possono essere caratterizzate da spessori e livelli di isolamento termico molto variabili. Infine, le pareti leggere impiegate maggiormente nelle nuove e recenti costruzioni, sono caratterizzate da spessori molto ridotti, ma, allo stesso tempo, da un livello di isolamento molto elevato.

Tabella 65 – Caratteristiche dimensionali dei modelli per destinazione d'uso.

Edificio		n. piani [-]	n. zone [-]	h media [m]	Sup. utile [m ²]	V. lordo [m ³]	Infissi		
							Sup. media [m ²]	n. [-]	limite
E.1	isolato	2	1	2.7-3.5	100-200	300-800	standard	-	1/8
E.1	a schiera	2	1	2.7	90-150	300-500	standard	-	1/8
E.1	in linea	3	12	2.7	60-150	200-500	standard	-	1/8
E.1	a torre	7	32	2.7	60-120	200-450	standard	-	1/8
E.2 - con E.1	in linea	3	4	2.7-3.0	60-150	200-600	3.30	1.70	1/8
E.2 - con E.1	a torre	7	4	2.7-3.0	60-120	200-500	3.30	1.70	1/8
E.2	-	1 - 7	1	≥ 3.0	60-750	200-2400	3.30	1.70	-
E.5 - con E.1	in linea	3	4	≥ 3.0	60-150	200-800	3.30	1.70	1/8
E.5 - con E.1	a torre	7	4	≥ 3.0	60-120	200-500	3.30	1.70	1/8
E.5	-	1 - 7	1	≥ 3.0	≥700	≥2400	3.30	1.70	-
E.8	-	1	1	≥ 4.0	≥700	≥2400	3.30	1.70	-

Tabella 66 –Zona Climatica e Gradi Giorno delle città scelte come le più rappresentative.

Città	Zona Climatica [-]	Gradi Giorno [GG]	Città	Zona Climatica [-]	Gradi Giorno [GG]
Messina	B	707	Foligno	D	1899
Palermo	B	751	Siena	D	1943
Catania	B	833	Pesaro	D	2083
Cagliari	C	990	Cesena	D	2130
Napoli	C	1034	Bologna	E	2259
Lecce	C	1133	Perugia	E	2289
Olbia	C	1142	Venezia	E	2345
Imperia	C	1201	Milano	E	2404
Benevento	C	1316	L'Aquila	E	2514
Cosenza	C	1317	Torino	E	2617
Roma	D	1415	Bolzano	E	2791
Genova	D	1435	Aosta	E	2850
Foggia	D	1530	Cuneo	F	3012
Empoli	D	1658	Belluno	F	3043
Ancona	D	1688	Susa	F	3108
Pescara	D	1718	Bormio	F	3838
Firenze	D	1821	Bellino	F	4264

Le componenti orizzontali sono state suddivise in: solaio di copertura, solaio di interpiano, solaio di fondazione. Per ognuna di queste sono state desunte le principali tipologie edilizie maggiormente diffuse nel territorio; tra queste, quelle comuni alle tre suddivisioni adottate, risultano essere solai in legno, solai in laterocemento e solai in EPS. Quest'ultima tipologia edilizia individuata risulta essere di più recente costruzione, pertanto sarà caratterizzata da livelli di isolamento tali da soddisfare i requisiti delle normative più recenti.

Per ciascun componente opaco evidenziato sono stati desunti dei periodi di costruzione in funzione dei quali assegnare le seguenti configurazioni di isolamento:

1. Pareti non isolate: periodo precedente alla Legge n.373 del 76 [6];
2. Pareti scarsamente isolate: periodo successivo alla prima normativa in ambito energetico (periodo 1976-1991) e caratterizzate da ridotti spessori di isolante termico;
3. Pareti mediamente isolate: periodo che parte dagli anni '90, a seguito della Legge 10/91 [7], caratterizzate da un isolamento termico di medio spessore (spessore pari a 5 cm);
4. Pareti isolate: periodo successivo al D.Lgs del 2005 [11] con uno spessore dell'isolamento termico di circa 10 cm;
5. Pareti altamente isolate: periodo successivo al D.M. del 2015 [19], contraddistinte da uno spessore dell'isolamento termico molto elevato (spessore maggiore di 14-16 cm).

Si precisa che, relativamente ai materiali isolanti, avvalendosi del supporto di dati presenti in Letteratura e dell'esperienza, sono stati considerati sia quelli naturali che sintetici, al fine di tener conto delle diverse caratteristiche termiche di questi (in termini sia di densità che di conducibilità termica).

Per ogni tipologia costruttiva sono state definite delle possibili stratigrafie e si è proceduto con il calcolo delle caratteristiche termiche di ogni configurazione ipotizzata. Complessivamente sono state analizzate quasi 700 configurazioni per le componenti verticali e quasi 200 per quelle orizzontali.

La tipologia costruttiva dei componenti opachi, i livelli di isolamento adottati, nonché i valori minimi e massimi di alcune delle principali caratteristiche termiche calcolate per ciascun componente sono riassunti in Tabella 67.

A titolo esemplificativo si mostra in Figura 39 uno dei possibili criteri di scelta per stabilire quale parete considerare nei modelli di simulazione, riportante l'andamento della trasmittanza termica rispetto lo spessore di alcune delle tipologie delle componenti verticali adottate. Come si osserva nell'esempio riportato, le componenti opache presentano un valore di trasmittanza termica approssimabile a una curva di tipo esponenziale: un possibile filtro potrebbe essere adottato considerando solo quelle componenti caratterizzate da trasmittanza termica e spessore diverse rispetto alle altre. Si tiene a precisare, comunque, che qualsiasi criterio di scelta che si deciderà di adottare, dovrà basarsi su più parametri termici calcolati e non solo su unico parametro, con lo scopo di poter utilizzare dei vincoli più ampi.

Tabella 67– Livello di isolamento e caratteristiche termiche minime e massime calcolate per le componenti opache verticali e orizzontali (copertura (C), fondazione (F) e solaio di intermedio (I)) maggiormente diffuse in Italia.

Componente opaco	Liv. isolamento					s [m]		Ms [kg/ m ²]		U [W/m ² K]		φ [h]		ψ [W/m ² K]	
	1	2	3	4	5	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
muratura in pietra	✓	x	✓	✓	x	20	94	460	2070	0.27	3.40	5.49	22.85	0.00	1.64
muratura in mattoni	✓	x	✓	✓	x	20	74	348	1150	0.24	2.31	5.88	22.70	0.00	1.29
muratura in cls	✓	✓	✓	✓	x	24	74	540	1510	0.27	2.90	6.97	20.33	0.00	1.09
muratura a sacco	✓	x	✓	✓	x	41	74	761	1390	0.25	1.52	12.37	23.20	0.00	0.22
muratura a cassa vuota	✓	x	✓	✓	x	41	94	636	2065	0.23	1.85	11.46	23.70	0.00	0.23
parete in calcestruzzo	✓	x	✓	✓	x	49	84	1020	1510	0.26	1.56	14.35	22.15	0.00	0.11
parete con forati	✓	✓	✓	✓	✓	19	58	174	377	0.17	1.48	4.63	17.10	0.01	1.11
parete a cassetta	✓	✓	✓	✓	✓	39	78	288	452	0.16	0.76	10.14	21.32	0.00	0.26
parete con riv. esterno	✓	✓	✓	✓	✓	29	67	360	633	0.17	1.40	8.22	17.39	0.01	0.56
parete con blocco termico	x	x	x	✓	✓	44	48	229	288	0.13	0.21	11.71	20.81	0.00	0.02
parete leggera	x	x	x	-	✓	30	38	105	155	0.15	0.19	11.60	18.75	0.01	0.04
C - solaio in legno	✓	✓	✓	✓	✓	6	22	45	45	0.20	1.50	1.9	5.0	0.17	1.42
C - solaio laterocemento	✓	✓	✓	✓	✓	24	50	381	381	0.19	1.63	7.5	14.3	0.01	0.61
C - solaio con EPS	x	x	✓	✓	✓	33	60	292	292	0.16	0.48	13.1	20.4	0.00	0.06
F - solaio in legno	✓	✓	✓	x	x	14	32	27	27	0.40	1.09	2.7	10.1	0.07	0.96
F - solaio in cls	✓	✓	✓	✓	x	36	51	733	733	0.28	2.41	9.3	14.2	0.02	0.56
F - solaio in cls e igloo	✓	✓	✓	✓	x	58	93	515	515	0.23	0.96	9.7	14.4	0.01	0.13
F - solaio laterocemento	✓	✓	✓	✓	✓	34	60	617	617	0.19	1.57	10.8	18.9	0.01	0.32
F - solaio con EPS	x	x	✓	✓	✓	43	70	528	528	0.16	0.47	0.1	23.5	0.00	0.02
I - solaio in legno	✓	✓	✓	x	x	12	22	174	174	0.63	2.18	2.9	7.8	0.18	1.89
I - solaio acciaio-volterrane	✓	✓	✓	x	x	26	52	487	487	0.20	2.22	7.5	15.7	0.01	1.02
I - solaio acciaio-tavelloni	✓	✓	✓	x	x	20	25	379	379	0.52	2.72	5.5	8.0	0.18	1.72
I - solaio con EPS	x	x	✓	✓	✓	24	29	420	420	0.51	2.56	5.8	8.6	0.10	1.39
I - solaio laterocemento	✓	✓	✓	✓	✓	38	62	399	399	0.16	0.41	15.0	21.8	0.00	0.04

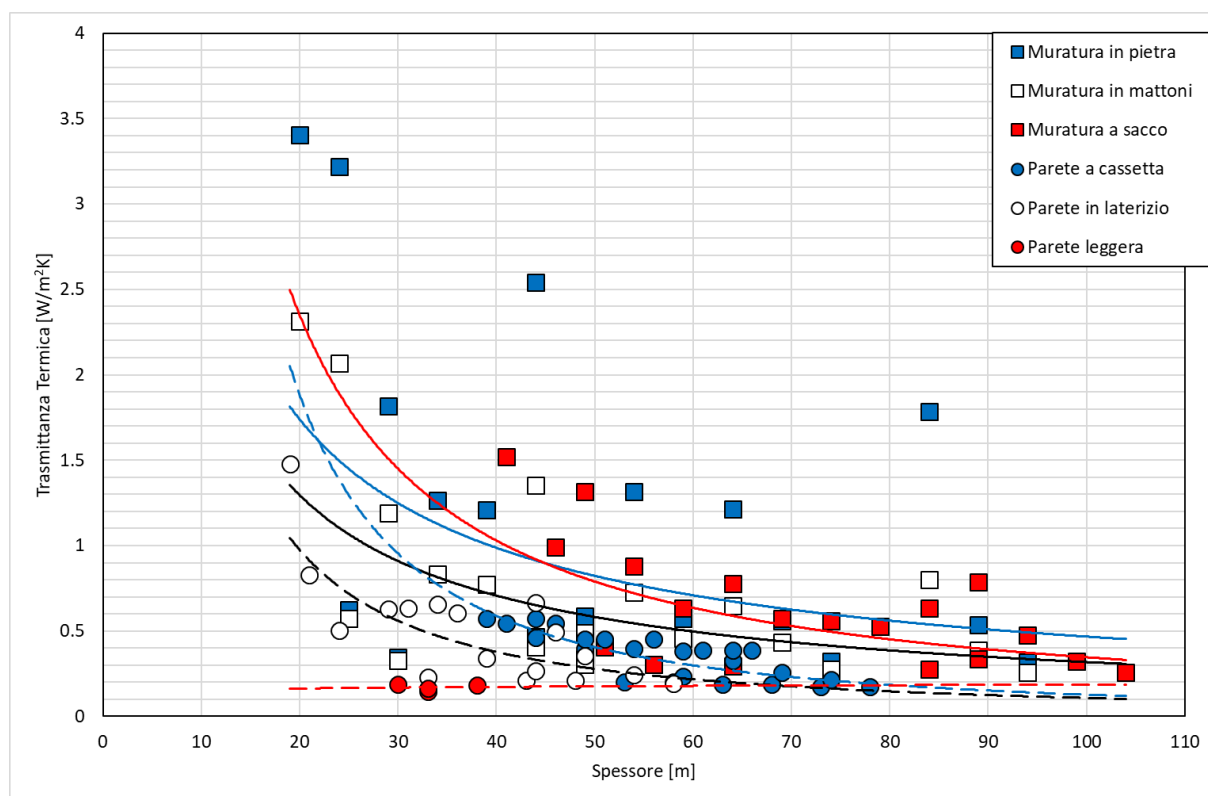


Figura 39 – Distribuzione della trasmittanza termica in funzione dello spessore del componente opaco verticale.

Relativamente alle caratteristiche dell'involucro edilizio, l'ultima componente analizzata è stata quella trasparente. Per gli edifici antecedenti il 1976 è stata riscontrata una prevalenza di superfici vetrate con vetro singolo, mentre, successivamente alle prime leggi in materia energetica, si riscontra l'installazione di vetrocamera con aria nell'intercapedine, in sostituzione del vetro singolo, e, dopo il 2000, vetrocamera con gas nell'intercapedine. Attualmente, una tipologia di involucro trasparente molto diffusa è il vetrocamera basso-emissivo con gas nell'intercapedine, caratterizzato da prestazioni termiche molto performanti, che permettono di soddisfare i limiti più stringenti di normativa.

Le analisi condotte sulla componente opaca degli infissi (telaio) hanno evidenziato un maggior utilizzo del legno e del PVC. Per gli scopi prefissati, essendo la sostituzione degli infissi uno degli interventi di riqualificazione energetica più semplice da applicare anche sugli edifici storici e considerando la loro forte influenza nelle performance dell'edificio, si è ritenuto importante considerare diverse configurazioni. Tutti i modelli saranno quindi implementati adottando queste configurazioni, riportate in Tabella 68, derivanti dalle analisi condotte nello stato dell'arte. Il calcolo delle prestazioni termiche degli infissi sarà effettuato di volta in volta, considerando sia l'effettiva dimensione geometrica che il relativo ponte termico.

Tabella 68– Configurazioni di telaio e componente vetrata.

Telaio	vetro		
	singolo	vetrocamera	vetrocamera basso-emissivo
Metallo senza taglio termico	✓	×	×
Legno duro	✓	✓	✓
Legno tenero	✓	✓	✓
Metallo con taglio termico	×	✓	✓
PVC	×	✓	✓

Ultimi aspetti analizzati per la corretta definizione del sistema edificio impianto sono stati i servizi energetici e la tipologia impiantistica utilizzata. Le relative informazioni sono state ricavate principalmente dall'analisi dei dati contenuti nel SIAPE, tramite i quali è stato possibile definire delle configurazioni per ciascuna delle principali destinazioni d'uso individuate. In particolare, relativamente ai servizi energetici, è emerso quanto segue:

1. E.1: per gli edifici residenziali, in accordo anche con quanto previsto da normativa vigente, i servizi energetici obbligatori sono la climatizzazione invernale e la produzione di acqua calda sanitaria. In aggiunta, in un numero considerevole di casi, si è anche riscontrato il servizio della climatizzazione estiva, che pertanto sarà un ulteriore servizio energetico da simulare. Solo in una percentuale molto limitata di casi, perlopiù in edifici di nuova costruzione, è stata riscontrata la presenza di impianti per la ventilazione meccanica;
2. E.2 – E.5: oltre ai servizi riscontrati per il settore residenziale, per questi si aggiunge l'illuminazione. Anche in questo caso, è stata riscontrata la presenza di ventilazione meccanica solo in un campione limitato.

In accordo con i risultati ottenuti, le configurazioni tra destinazione d'uso ritenute più rappresentative e i servizi energetici da impostare nei modelli di simulazione sono riportate in Tabella 69. Tutte le configurazioni con il servizio energetico legato alla ventilazione meccanica sono state considerate come non obbligatorie (☹️) essendo effettivamente presente su una percentuale molto bassa di casi. Si rimanda la scelta di definire o meno tale servizio in funzione dei casi studio esaminati nei prossimi anni di attività di ricerca.

Relativamente agli impianti meccanici-termici, sono state evidenziate le principali tipologie impiantistiche correlate ai servizi energetici di climatizzazione invernale, climatizzazione estiva e produzione di acqua calda sanitaria (Tabella 70), le quali saranno adottate nell'implementazione dei modelli di simulazione.

Le informazioni derivanti dal SIAPE hanno permesso, inoltre, di delineare la distribuzione dei valori di potenza degli impianti al variare della destinazione d'uso. A titolo di esempio si riporta in Tabella 71 il peso espresso in percentuale della frequenza in specifici range di potenza dell'impianto dichiarato per la climatizzazione invernale in base alla destinazione d'uso.

In accordo con i risultati di questa analisi, per gli impianti di climatizzazione invernale è stata riscontrata una netta prevalenza di casi con potenza compresa tra 21-30 kW (50.52%), mentre sia per la classe E.2 che E.5, le percentuali maggiori sono nei range 21-30 (rispettivamente 27.43% e 30.40%) e per valori maggiori di 250 kW (24.4% e 18.1%). Si precisa, inoltre, che le potenze indicate sono relative a generatori di calore (oltre il 72% del campione presenta una caldaia standard o una caldaia a condensazione), mentre i valori di potenza inferiori a 10 kW sono prevalentemente attribuibili a sistemi a pompa di calore (sistema dichiarato solo nel 3.7% del campione analizzato).

Tabella 69– Caratteristiche termiche dei materiali costituenti le strutture opache verticali.

Servizi energetici	Classificazione della destinazione d'uso – DPR 412/93 [8]		
	E.1	E.2	E.5
climatizzazione invernale	😊	😊	😊
climatizzazione estiva	😊	😊	😊
produzione acqua calda sanitaria	😊	😊	😊
illuminazione	☹️	😊	😊
ventilazione meccanica	☹️	☹️	☹️
trasporto persone o cose	☹️	☹️	☹️

Tabella 70– tipologie impiantistiche individuate per la climatizzazione invernale, climatizzazione estiva e la produzione di acqua calda sanitaria, per le destinazioni d’uso preminenti.

Tipologia impiantistica	E.1			E.2 - E.5		
	Climatizzazione invernale	Climatizzazione estiva	ACS	Climatizzazione invernale	Climatizzazione estiva	ACS
Caldaia standard	✓	×	✓	✓	×	✓
Caldaia a condensazione	✓	×	✓	✓	×	✓
Stufa o caminetto	✓	×	×	✓	×	×
PdC	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VRV	×	×	×	✓	✓	×
Boiler	×	×	✓	×	×	✓
Scaldabagno	×	×	✓	×	×	✓
Altro	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabella 71– Percentuale del campione di APE suddiviso per range di potenza degli impianti termici e per le destinazioni d’uso più rappresentative – scala di colore dal verde scuro (maggiore frequenza) al bianco (frequenza nulla).

Classificazione DPR 413/93 [8]	Potenza dell’impianto termico [kW]										
	0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-75	76-100	101-150	151-200	201-250	>250
E.1	6.89	4.41	50.52	6.93	0.92	2.62	2.80	4.01	3.18	3.03	14.69
E.2	10.22	5.55	27.43	7.26	1.74	5.15	4.93	5.36	3.85	4.11	24.39
E.5	17.71	7.36	30.40	6.35	1.35	4.06	3.34	4.70	3.52	3.10	18.10
altre	11.31	5.47	22.37	14.27	3.54	8.86	5.37	6.67	3.59	3.32	15.23

Per le tecnologie tipiche del servizio di illuminazione, i risultati hanno evidenziato l’installazione delle seguenti lampade: ad incandescenza (38.6%), fluorescenti (43.0%), LED (16.4) e a scarica (2.0%). Nonostante una percentuale ancora bassa di immobili presenta una illuminazione con lampade a LED, l’analisi ha evidenziato che risulta essere uno degli interventi migliorativi maggiormente consigliato.

In conclusione, le attività svolte nel primo anno della presente linea di ricerca hanno portato ad una analisi accurata del patrimonio edilizio nazionale sotto diversi punti di vista, spesso non indagati nel dettaglio nella precedente Letteratura in materia. Punto di forza di tale analisi è stata l’integrazione dello stato dell’arte con i dati provenienti dagli APE contenuti nel SIAPE, tramite i quali è stato possibile effettuare una serie di correlazioni tra diversi parametri territoriali, geometrici e termici, tipici del sistema edificio-impianto.

I risultati di queste estese analisi hanno portato a evidenziare le informazioni e le caratteristiche preponderanti degli edifici italiani in varie epoche di costruzione, che saranno poi utilizzati, ed eventualmente integrati, per la definizione di modelli di simulazione tramite i quali sarà possibile definire i benchmark per il calcolo più realistico dei consumi del fabbricato.

3 Conclusioni

L'obiettivo della attività di ricerca triennale è l'individuazione di benchmark di riferimento che, integrando il metodo di calcolo in condizioni standard (asset rating), permettano di restituire un consumo più realistico del fabbricato. A tale scopo, il primo anno del lavoro è stato focalizzato sull'individuazione delle principali proprietà geometriche e impiantistiche che caratterizzano il parco edilizio italiano; queste, infatti, dovranno essere il punto di partenza dell'attività prevista nel secondo anno finalizzata all'implementazione di modelli di simulazione che siano rappresentativi del parco edilizio italiano.

In considerazione della ricchezza delle informazioni richieste per la valutazione delle performance energetiche di un edificio, l'attività di ricerca è stata basata sia su documentazione presente in Letteratura che sui dati degli Attestati di Prestazione Energetica (APE) contenuti all'interno del Sistema Informativo sugli Attestati di Prestazione Energetica (SIAPE), realizzato e gestito da ENEA.

L'analisi dello stato dell'arte, condotta sfruttando sia dati Istat che documentazione disponibile in Letteratura, ha permesso di delineare non solo il numero e la destinazione d'uso preminente degli edifici costruiti sul territorio italiano, ma anche di evidenziare le caratteristiche geometriche e costruttive più rappresentative e comuni per tutte le tipologie di edificio. In particolare, sono state individuate quattro tipologie edilizie principali (alcune delle quali riconducibili a più destinazioni d'uso) e numerose tipologie di involucro edilizio associati a diversi periodi di costruzione. Particolare attenzione è stata posta alle proprietà termiche dell'involucro edilizio (quali massa superficiale, trasmittanza termica, trasmittanza termica periodica, sfasamento e attenuazione); relativamente alla componente opaca, sono state definite e analizzate quasi 700 configurazioni per gli elementi verticali e quasi 200 per quelli orizzontali, per tutte queste si sono fatte variare sia la tipologia di materiali che le condizioni di isolamento termico.

L'analisi degli APE contenuti nel SIAPE, invece, ha permesso di evidenziare non solo le caratteristiche geometriche (superficie utile, superficie disperdente e volume lordo) degli edifici certificati, ma anche di fornire informazioni molto più accurate sulla componente impiantistica adottata per i diversi servizi energetici. Sono state, infatti, individuate le più diffuse tipologie impiantistiche correlate ai principali servizi energetici (climatizzazione invernale, climatizzazione estiva e produzione di acqua calda sanitaria) per tutte le destinazioni d'uso e, successivamente, sono stati delineati i valori di potenza per ciascuna tipologia impiantistica individuata al variare sia del servizio energetico che della destinazione d'uso dell'immobile. A partire dagli indicatori di prestazione energetica globale rinnovabile e non rinnovabile, è stato inoltre possibile valutare la prestazione energetica media per le diverse destinazioni d'uso, fornendo un ulteriore criterio di selezione delle categorie di edificio più significative da analizzare nel secondo anno di attività.

L'analisi congiunta dello stato dell'arte con quella del SIAPE, ha quindi permesso di definire:

1. la categoria E.1 come la destinazione d'uso più rappresentativa del parco edilizio italiano, caratterizzata da dimensioni geometriche, proprietà termiche ed impiantistiche relative al sistema edificio-impianto, molto diversificate e variabili con il periodo di costruzione e/o ristrutturazione;
2. le categorie E.2 ed E.5 come le destinazioni d'uso più significative tra quelle non residenziali sia come numerosità che come aliquota più rilevante del contributo energetico rinnovabile;
3. le tipologie edilizie e le dimensioni geometriche più rappresentative che caratterizzano il parco edilizio italiano;
4. le tipologie e le proprietà termiche delle diverse componenti dell'involucro edilizio in funzione dell'epoca di costruzione, della tipologia costruttiva e al variare del livello di isolamento termico;
5. la tipologia impiantistica, la potenza e i vettori energetici utilizzati per i principali servizi energetici e per le diverse destinazioni d'uso.

Le attività svolte hanno quindi portato a una analisi accurata del patrimonio edilizio nazionale, andando ad indagare nel dettaglio anche aspetti poco analizzati nella precedente Letteratura in materia.

Il punto di forza dello studio è rappresentato dall'integrazione dello stato dell'arte con i dati del SIAPE, grazie ai quali è stato possibile effettuare una serie di correlazioni tra diversi parametri territoriali, geometrici e termici necessari per una corretta definizione del sistema edificio-impianto.

I risultati ottenuti in questo studio rappresentano il punto di partenza del lavoro previsto nel secondo anno; in particolare, i futuri modelli di simulazione si baseranno sulle informazioni acquisite e desunte, con lo scopo di determinare i consumi energetici al variare delle condizioni al contorno, delle caratteristiche dimensionali, termiche e impiantistiche relative al sistema edificio-impianto, nonché considerando diversi profili di utilizzo degli edifici stessi. I dati di partenza ottenuti, tuttavia, potranno essere integrati o eventualmente modificati, se ritenuto opportuno, nel secondo anno di attività al fine di definire dei modelli di simulazione più rappresentativi e utili per il calcolo dei dati necessari per la definizione di specifici benchmark di riferimento.

4 Riferimenti bibliografici

1. D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers, W.W. III Behrens. "The limits to growth - A Report for the Club of Rome's project on the Predicament of Mankind". Universe Books New York 1972.
2. Servizio affari internazionali: La politica energetica dell'Unione Europea n.109 gennaio 2009.
3. IEA. World Energy Outlook. 2012
4. European Environment Agency. Annual European Union greenhouse gas-inventory 1990-2010 and inventory report 2012; 27 May 2012.
5. www.eea.europa.eu/energy-efficiency-and-energy-consumption-in-the-household-sector. Available online: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/energy-efficiency-and-energy-consumption>; 2012.
6. Legge dello Stato 30/04/1976 n. 373. "Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici". G.U. 07 giugno 1976 n. 148.
7. Legge 10/91: Norme per l'attuazione del Piano Energetico Nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia, G.U. 16 gennaio 1991, n. 13.
8. D.P.R. 26 agosto 1993 n. 412: Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10, G.U. 14 ottobre 1993, n. 242.
9. D.P.R. 21 dicembre 1999, n.551: Regolamento recante modifiche al decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, in materia di progettazione, installazione, esercizio e manutenzione degli impianti termici degli edifici, ai fini del contenimento dei consumi di energia.
10. Direttiva Europea 2002/91/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio dell'Unione Europea del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico in edilizia, G.U. della Comunità Europea 4 gennaio 2003, n. L1/65
11. D. Lgs. 19/8/2005, n. 192: Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia, G.U. 23 settembre 2005, n. 222 – Supplemento Ordinario n. 158.
12. D. Lgs. 29/12/2006, n. 311: Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico in edilizia, G.U. 1 febbraio 2007, n. 26 – Supplemento Ordinario n. 26/L.
13. D.P.R. 59/2009: Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia.
14. D. M. 26/06/2009: Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici.
15. D.Lgs. 28/2011 n. 28: Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE. G.U. Serie Generale n.71 del 28-03-2011 - Suppl. Ordinario n. 81.
16. Direttiva Europea 2009/28/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio dell'Unione Europea del 23 aprile 2009 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE. G.U. della Comunità Europea 5 giugno 2009, n. L140.
17. Direttiva Europea 2010/31/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio dell'Unione Europea del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia, G.U. della Comunità Europea 18 giugno 2010, n. L153.
18. Legge 3 agosto 2013, n. 90: Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia, G.U. 3 agosto 2013, n.181.
19. D.M. 26/06/2015: Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici
20. Direttiva Europea 2018/844 del Parlamento Europeo e del Consiglio dell'Unione Europea del 30 maggio 2018 che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica. G.U. della Comunità Europea 19 giugno 2018, n. L156/75.
21. UNI TS 11300/2014 –1: Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 1: determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.

22. UNI TS 11300/2014 –2: Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 2: determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali.
23. UNI TS 11300/2010 –3: Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 3: determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva.
24. UNI TS 11300/2016 –4: Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 4: utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.
25. UNI TS 11300/2016 –5: Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 5: Calcolo dell'energia primaria e della quota di energia da fonti rinnovabili.
26. UNI TS 11300/2016 –6: Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 6: determinazione del fabbisogno di energia per ascensori, scale mobili e marciapiedi mobili.
27. Istat, <http://dati-censimentopopolazione.istat.it/Index.aspx?lang=it>
28. Istat, 15° Censimento della Popolazione e delle Abitazioni 2011. <https://www.istat.it/it/censimenti-permanenti/censimenti-precedenti/popolazione-e-abitazioni/popolazione-2011>.
29. Istat, Annuario Statistico Italiano 2019. <https://www.istat.it/it/archivio/236772>.
30. Cresme Ricerche S.p.A. Ricerca di Sistema Elettrico. Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto. Caratterizzazione del parco immobiliare ad uso residenziale. Rapporto RdS/2012/109. 2012
31. V. Corrado, I. Ballarini, S.P. Corgnati. National scientific report on the TABULA activities in Italy. Politecnico di Torino – Dipartimento Energia, 2012.
32. Corrado V., Ballarini I., Corgnati S.P. Building Typology Brochure – Italy. Fascicolo sulla Tipologia Edilizia Italiana. Politecnico di Torino – Dipartimento Energia, 2014.
33. Istat, 15° Censimento della Popolazione e delle Abitazioni 2011. Nota edifici e abitazioni. Anno 2011, Comunicato stampa, 11 agosto 2014. Disponibile online <https://www.istat.it/it/archivio/130202>
34. Decreto Ministeriale 5 luglio 1975. Modificazioni alle istruzioni ministeriali 20 giugno 1896, relativamente all'altezza minima ed ai requisiti igienico-sanitari principali dei locali di abitazione. G.U. n. 190 del 18 luglio 1975.
35. F. Margiotta, G. Puglisi. Ricerca di Sistema Elettrico. Caratterizzazione del parco edilizio nazionale Determinazione dell'edificio tipo per uso ufficio. Report RSE/2009/164. 2009.
36. Citterio Marco. Ricerca di Sistema Elettrico. Analisi statistica sul parco edilizio non residenziale e sviluppo di modelli di calcolo semplificati. Report RSE/2009/161. 2009.
37. UNI/TR 11552:2014. Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici - Parametri termofisici.
38. C. Buratti, D. Palladino, E. Moretti, R. Di Palma. Development and optimization of a new ventilated brick wall: CFD analysis and experimental validation. Energy and Buildings, 168 (2018), 284-297.
39. Z. Hu, W. He, X. Hong, J. Ji, Z. Shen. Numerical analysis on the cooling performance of a ventilated Trombe wall combined with venetian blinds in an office building. Energy and Buildings, 126 (2016), pp. 14-27.
40. S.H.L. Lee, C.Y. Jim. Transforming thermal-radiative study of a climber green wall to innovative engineering design to enhance building-energy efficiency. Journal of Cleaner Production. 224 (2019), 892-904
41. R. Castiglia Feitosa, S. J. Wilkinson. Small-scale experiments of seasonal heat stress attenuation through a combination of green roof and green walls. Journal of Cleaner Production. In Press, available online 26 November 2019.
42. UNI EN ISO 6946:2018. Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodi di calcolo, 2018.
43. UNI EN ISO 14683:2018. Ponti termici in edilizia - Coefficiente di trasmissione termica lineica - Metodi semplificati e valori di riferimento, 2018.
44. C. Buratti. Impianti di climatizzazione e condizionamento 2° edizione. Morlacchi Editore, Perugia, 2015.
45. N. Rossi. Manuale del termotecnico. Fondamenti, riscaldamento, condizionamento, refrigerazione, risorse energetiche. Hoepli, 2014.

46. T. Connolly, C. Begg, Database Systems: A Practical Approach to Design, Implementation, and Management 6th, Pearson, 2014.

5 Abbreviazioni ed acronimi

APE	Attestato di Prestazione Energetica
CRESME	Centro ricerche economiche sociali di mercato per l'edilizia e il territorio
E.1	Edifici adibiti a residenza e assimilabili
E.1 (1)	Edifici adibiti a residenza con carattere continuativo [...]
E.1 (2)	Edifici adibiti a residenza con occupazione saltuaria [...]
E.1 (3)	Edifici adibiti ad albergo, pensione ed attività simili [...]
E.2	Edifici adibiti a uffici e assimilabili
E.3	Edifici adibiti a ospedali, cliniche o case di cura e assimilabili [...]
E.4	Edifici adibiti ad attività ricreative, associative o di culto e assimilabili
E.4 (1)	Edifici adibiti a cinema e teatri, sale di riunione per congressi
E.4 (2)	Edifici adibiti a mostre, musei e biblioteche, luoghi di culto
E.4 (3)	Edifici adibiti a bar, ristoranti, sale da ballo
E.5	Edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili
E.6	Edifici adibiti ad attività sportive
E.6 (1)	Edifici adibiti ad attività sportive quali piscine, saune e assimilabili
E.6 (2)	Edifici adibiti ad attività sportive quali palestre e assimilabili
E.6 (3)	Edifici adibiti ad attività sportive quali servizi di supporto alle attività sportive
E.7	Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili
E.8	Edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali e assimilabili
ENEA	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile
EP	Indice di prestazione energetica
EPC	Energy Performance Certificate
EP_{gl}	Indice di prestazione energetica globale
$EP_{gl,nren}$	Indice di prestazione energetica globale non rinnovabile
$EP_{gl,ren}$	Indice di prestazione energetica globale rinnovabile
$EP_{gl,nren,rif,standard(2019/21)}$	Indice di prestazione energetica globale non rinnovabile dell'edificio di riferimento
FEN	Fabbisogno di energia normalizzato
ISEPC	Informative System of Energy Performance Certificate
ISTAT	Istituto Nazionale di Statistica
SIAPPE	Sistema Informativo degli Attestati di Prestazione Energetica
UE	Unione Europea