

POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE



TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Riqualificazione energetica di fabbricati del Politecnico di
Torino. Analisi dinamica di interventi di ottimizzazione
dell'involucro

Relatori:
Vincenzo Corrado

Correlatori:
Ilaria Ballarini
Paola Lerario
Emanuele Loglisci

Candidato:
Gianmarco Cicero

Anno accademico 2024-2025

Sommario

Abstract	1
1.Introduzione.....	3
Cambiamenti climatici	3
Azioni a livello globale	4
Impatto degli edifici	5
Progresso nel settore dell'edilizia	6
Impatto degli edifici in Italia.....	7
Azioni del Politecnico di Torino	10
2.Direttive europee e normativa italiana sull'efficienza energetica degli edifici	13
Direttive Europee	13
Legislazione Italiana	17
Normative tecniche di riferimento	21
3.Inquadramento storico dell'edificio	23
Storia del Politecnico	23
Sede centrale	24
Ampiamiento delle maniche	25
Ampiamiento dell'edificio oggetto di studio	26
4.Descrizione dello stato di fatto dell'edificio	29
Contesto climatico.....	29
Descrizione edificio	30
Descrizione dei sub-sistemi costituenti l'involucro	32
Facciate e coperture	32
Paramenti e solai	35
Serramenti	46
Impianti di climatizzazione	48
Impianto ventilazione:.....	50
5. Metodo di calcolo delle prestazioni energetiche dell'edificio	52
Dati di input	53
Algoritmo di calcolo	53
Software EDILCLIMA	55

6. Zonizzazione dell'edificio.....	56
Definizione delle zone termiche	56
Dati di input delle zone termiche	57
7. Analisi dei consumi e calibrazione del modello	61
Consumi dell'edificio 4A.....	61
Calibrazione del modello	63
Risultati diagnosi energetica	66
Rendering 3D	68
8. Misure di efficientamento energetico.....	70
L'influenza dell'involucro edilizio.....	70
Sistemi di isolamento dell'involucro	70
Isolamento interno.....	71
Intercapedine a cassa vuota.....	71
Facciata ventilata.....	72
Isolamento esterno	74
Proprietà dei materiali isolanti	75
Conduktività termica e massa volumica	75
Resistenza alla diffusione del vapore.....	76
Comportamento al fuoco.....	76
Tipologie di pannelli isolanti	77
Materiali di origine minerale.....	78
Materiali di origine naturale.....	79
Materiali di origine sintetica	80
9. Interventi di efficientamento proposti.....	83
Stratigrafie degli elementi murari analizzati	84
Xps	86
Eps.....	87
Aeropan.....	87
Canapa.....	88
Fibra di legno	88
Sughero	88
Lana di vetro	89

Lana di roccia.....	90
Pir/Pur	90
Resina fenolica.....	91
Stratigrafie intervento su elementi orizzontali	91
Xps	93
Fibra di legno	93
Sughero	94
Lana di roccia.....	94
Pir/Pur	94
Resina fenolica.....	95
10. Analisi dei consumi post-intervento	96
1. Energia primaria invernale post-intervento sulle pareti	97
2. Consumo per il riscaldamento invernale post-intervento sulle pareti.....	98
3. Energia primaria estiva post-intervento sulle pareti.....	99
4. Consumo per il raffrescamento estivo post-intervento sulle pareti.....	100
5. Energia primaria invernale post-intervento solaio	101
6. Consumo per il riscaldamento invernale post-intervento solaio	102
7. Energia primaria estiva post-intervento solaio.....	103
8. Consumo per il raffrescamento estivo post-intervento solaio.....	104
11. Analisi dei costi	106
Analisi economica dei singoli interventi.....	111
Analisi economica interventi su paramenti verticali.....	112
Analisi economica interventi su elementi orizzontali	114
Considerazioni su pacchetti migliori.....	115
12. Intervento combinato sulla struttura opaca	117
Stratigrafie intervento combinato.....	117
Analisi dei consumi post-intervento	118
1. Energia primaria invernale post-intervento combinato.....	118
2. Consumo per il riscaldamento invernale post-intervento combinato.....	120
3. Energia primaria estiva post-intervento combinato	121
4. Consumo per il raffrescamento estivo post-intervento combinato	122
Analisi economica dell'intervento combinato	123

Considerazioni combinazione migliore	124
Interpretazione dei Risultati	126
13.Valutazione intervento complessivo.....	127
Analisi dei consumi post-intervento complessivo	127
Analisi dei costi intervento completo.....	129
14.Conclusioni.....	130
Bibliografia.....	131
Fonti	131
Bibliografia generale.....	132
Indice figure	136
Indice tabelle	137
Allegati	140
Schede tecniche.....	140
Zone termiche	159

Abstract

Il settore edilizio è responsabile di una quota significativa dei consumi energetici globali e delle emissioni di gas serra, rendendolo un ambito chiave per il raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione. In particolare, gli edifici esistenti presentano spesso elevati livelli di dispersione termica, con conseguente inefficienza energetica e alti costi operativi. La riduzione del fabbisogno energetico attraverso interventi sull'involucro edilizio rappresenta quindi una strategia fondamentale per migliorare le prestazioni energetiche e ridurre l'impatto ambientale del patrimonio edilizio.

Questa tesi si inserisce nel piano di decarbonizzazione del Politecnico di Torino e si concentra sull'ottimizzazione dell'involucro opaco di un edificio universitario, con l'obiettivo di migliorarne l'efficienza energetica e ridurre le dispersioni termiche. Lo studio è stato condotto insieme ad un collega del Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare, con il quale è stata condotta un'attività di collaborazione tra due diversi ma complementari ambiti della progettazione, quella edile e quella impiantistica. Il modello energetico dell'edificio mediante il software Edilclima EC700, adottando il metodo di calcolo dinamico su base oraria, per stimare il fabbisogno energetico dell'edificio e valutarne le prestazioni post-intervento.

La fase di calibrazione del modello ha richiesto un'analisi parametrica sulle volumetrie del complesso edilizio, poiché non erano disponibili misurazioni dirette dei consumi del singolo edificio, ma solo dati aggregati dell'intero blocco. Una volta calibrato il modello, il lavoro è stato suddiviso: questa tesi si è focalizzata sull'analisi dell'involucro opaco, mentre il collega ha approfondito l'ottimizzazione degli impianti.

L'analisi ha valutato diversi scenari di miglioramento dell'isolamento termico, con interventi sulle pareti perimetrali e sui solai, sia singolarmente che in combinazione. Sono stati considerati molteplici criteri di valutazione, tra cui la riduzione del fabbisogno energetico, l'abbattimento delle emissioni, il costo degli interventi e il tempo di ritorno dell'investimento. Di conseguenza, il lavoro non fornisce un unico risultato ottimale, ma uno spettro di soluzioni, la cui efficacia varia a seconda del criterio predominante nella scelta progettuale.

Alla fine dello studio, le due analisi (sull'involucro opaco e sugli impianti) sono state riunite per ottenere una valutazione complessiva dell'intervento sull'edificio. Questo approccio permette di definire strategie integrate per l'efficientamento energetico degli edifici esistenti, fornendo indicazioni utili per la riqualificazione sostenibile del patrimonio edilizio universitario e per la riduzione delle emissioni nel settore edilizio.

1.Introduzione

Cambiamenti climatici

Nel corso della storia del Pianeta i cambiamenti climatici si sono verificati più volte ma il riscaldamento globale a cui stiamo assistendo da circa un secolo è differente in quanto causato principalmente dall'uomo e dalle sue attività. Dalla rivoluzione industriale ad oggi milioni di tonnellate di anidride carbonica e altri gas serra sono stati immessi in atmosfera; gli scienziati di tutto il mondo hanno raccolto dati e verificato, tramite studi approfonditi, l'esistenza di una chiara relazione tra l'aumento dei livelli di CO₂ e l'incremento delle temperature registrate sulla Terra. La temperatura media del Pianeta è aumentata di 0,98 °C rispetto ai livelli preindustriali e, senza interventi per limitare e mitigare questo fenomeno, la tendenza è destinata a peggiorare nei prossimi decenni.

Negli ultimi 40 anni l'Europa ha registrato un significativo aumento delle temperature con una media, negli ultimi cinque anni, di 2,2 °C più alta rispetto alla fine del XIX secolo. I fenomeni meteorologici si sono intensificati come effetto del riscaldamento globale, aumentando la frequenza e l'impatto degli eventi estremi. In tutta l'area Mediterranea l'intensità delle precipitazioni è incrementata del 22% negli ultimi 50 anni, le inondazioni gravi sono diventate più frequenti, gli incendi sono eventi sempre più comuni provocando la distruzione di interi boschi e foreste, il ghiaccio marino artico è diminuito in media del 12,85% per decennio. L'Italia è uno dei Paesi europei più colpiti dai cambiamenti del clima e le conseguenze non sono solamente di tipo ambientale ma si ripercuotono anche sulla società e sull'economia dei Paesi. Temperature più elevate possono causare un aumento della mortalità soprattutto tra le fasce più vulnerabili della popolazione, portare ad una riduzione della produttività, danni a infrastrutture, edifici ed aziende, e possono avere ripercussioni sull'agricoltura.

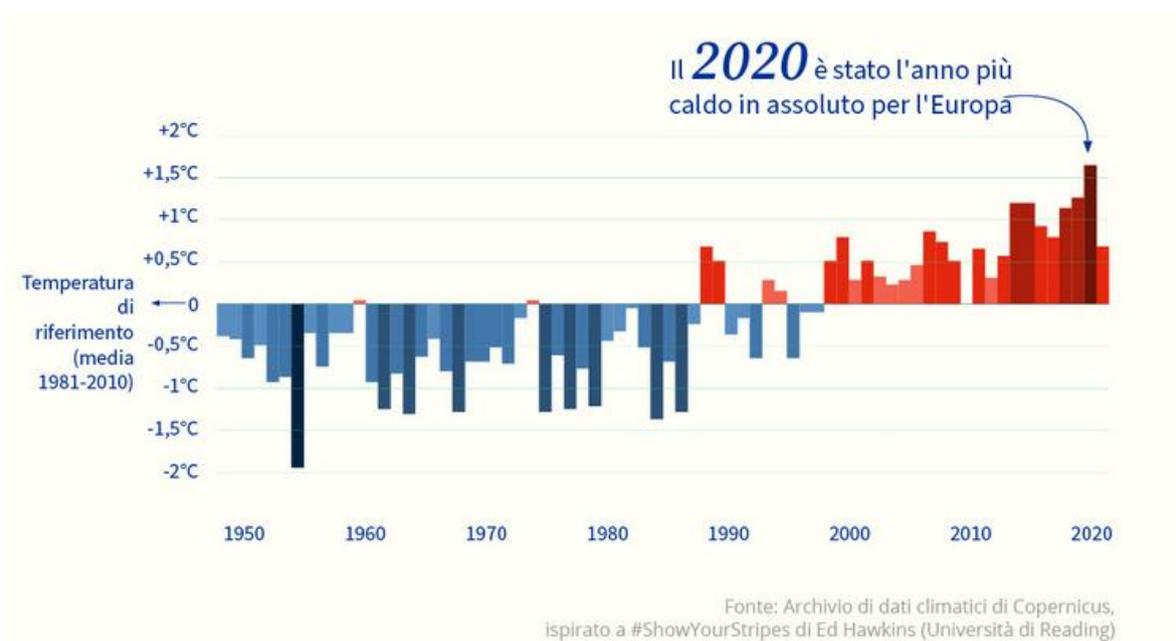


Figura 1 – Evoluzione temperatura di riferimento media nel periodo 1981-2020

Azioni a livello globale

Il problema della tutela ambientale e dell'efficientamento energetico è al centro delle politiche odierne ma il tema risulta in discussione già da più di un cinquantennio, il primo passo a livello internazionale è stata la Conferenza di Stoccolma (1972) che anche se non vincolante, ha steso la strada per la cooperazione tra stati in tema di tutela ambientale.

La convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC), approvata a New York il 9 maggio 1992, rappresenta la risposta a livello globale per contrastare e ridurre gli effetti del cambiamento climatico con l'obiettivo principale di stabilizzare la concentrazione dei gas serra. Il Protocollo di Kyoto, firmato nel dicembre 1997 durante la COP3, prevedeva l'obbligo per i 160 Paesi firmatari di ridurre le emissioni globali dei gas ritenuti responsabili del riscaldamento del pianeta. Primo tra tutti è l'anidride carbonica (CO₂) mentre gli altri gas interessati furono il metano (CH₄), l'ossido di azoto (N₂O), l'esafluoruro di zolfo (SF₆), gli idrofluorocarburi (HFCs) e i perfluorocarburi (PFCs).

Nel 2015 i governi di 194 Paesi, firmando l'Accordo di Parigi, si sono decisi a intraprendere un'azione concreta al fine di mantenere il riscaldamento globale al di sotto di 2 °C rispetto ai livelli preindustriali, con l'obiettivo, se possibile, di limitarlo a 1,5 °C e contrastare gli effetti dei cambiamenti climatici. Secondo il rapporto sul riscaldamento globale 2021 eseguito dall'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) l'obiettivo di limitare a 1,5 °C il riscaldamento sarà irraggiungibile se non con un intervento immediato su scala globale.

I Paesi dell'Unione Europea si sono attivati maggiormente per una concreta azione di lotta ai cambiamenti climatici: dal 1990 al 2018 l'UE è stata in grado di ridurre le sue emissioni di gas serra del 23%. Nel dicembre 2019 i leader dell'UE riuniti in sede di Consiglio europeo hanno raggiunto un accordo riguardante il conseguimento della neutralità climatica entro il 2050, in linea con gli obiettivi dell'accordo di Parigi, presentando una tabella di marcia definita nel Green Deal. Con neutralità climatica si intende l'emissione in atmosfera della sola quantità di gas serra che può essere assorbita dalla natura ma tale fine può essere raggiunto solo se i Paesi dell'UE ridurranno drasticamente le loro emissioni, trovando soluzioni per compensare le emissioni inevitabili. La transizione ecologica deve essere efficiente in termini economici ma al tempo stesso socialmente equilibrata ed equa, tenendo in considerazione le differenti situazioni delle nazioni e i diversi mix energetici attuali.

Nel dicembre 2020 gli stessi leader hanno definito un passo intermedio verso il grande obiettivo del 2050, convenendo che entro il 2030 le emissioni di gas serra dell'UE dovranno essere ridotte di almeno il 55% rispetto ai livelli del 1990. Nel luglio 2021 a tal proposito è entrata in vigore la legge europea sul clima che obbliga i paesi dell'UE a raggiungere gli obiettivi climatici prefissati definendo un quadro di azioni da adottare al fine di ridurre progressivamente le emissioni fino alla neutralità climatica entro il 2050. La normativa prevede l'istituzione di un comitato consultivo scientifico sui cambiamenti climatici con il compito di fornire consulenza in merito agli obiettivi fissati e alle misure intraprese dall'UE.

Un ulteriore impegno dell'UE verso la neutralità climatica è assicurato tramite il pacchetto "Pronti per il 55%" (Fit for 55) che comprende proposte di revisione della legislazione vigente e nuove iniziative per garantire l'allineamento delle politiche dei differenti Paesi con gli obiettivi concordati

dal Consiglio e dal Parlamento europeo. Il pacchetto prevede inoltre norme in termini di energia, trasporti, scambio e riduzione delle emissioni e utilizzo del suolo.

Il percorso di transizione ecologica intrapreso richiede sicuramente ingenti investimenti pubblici e privati e per questo motivo i Paesi si sono impegnati a spendere il 30% del bilancio dell'UE per il periodo 2021-2027 in progetti legati al clima.

Impatto degli edifici

Secondo il report “Energy Efficiency 2023” dell’International Energy Agency (IEA), nel 2022 il consumo finale di energia a livello globale è stato circa 440 exajoule (EJ); il settore industriale si è confermato come maggiore responsabile con uno share del 38%, seguito dal settore edilizio (30%) e dal settore dei trasporti (26%). Gli edifici, dunque, hanno un impatto notevole sul consumo energetico globale, considerando sia l’energia impiegata durante la loro costruzione sia quella necessaria al riscaldamento, raffrescamento, illuminazione e alle diverse attività quotidiane. Questo settore è responsabile del 26% delle emissioni globali, di cui un 8% sono emissioni dirette degli edifici dovute al riscaldamento e impiego del gas per cucinare mentre un 18% sono indirette derivanti dalla produzione di elettricità richiesta. Gli edifici ad uso residenziale hanno emissioni più elevate, circa il 60% del totale, dovuto al fatto che rappresentano l’80% del patrimonio edilizio esistente. Il settore non residenziale invece impatta maggiormente dal punto di vista del consumo di elettricità.

Nel periodo tra il 2010 e il 2022 il settore edilizio ha registrato un incremento annuo dell’1,1% dei consumi energetici globali, circa 133 EJ, con un andamento differente nelle diverse aree del mondo. In Cina e India l’incremento è stato più elevato, rispettivamente 4,8% e 1,9% annuo, negli USA il consumo è rimasto stabile, nei Paesi dell’UE e in Giappone si è registrata una riduzione del 1,3% e 1,1% annuo come risultato dei progressi a livello di efficienza.

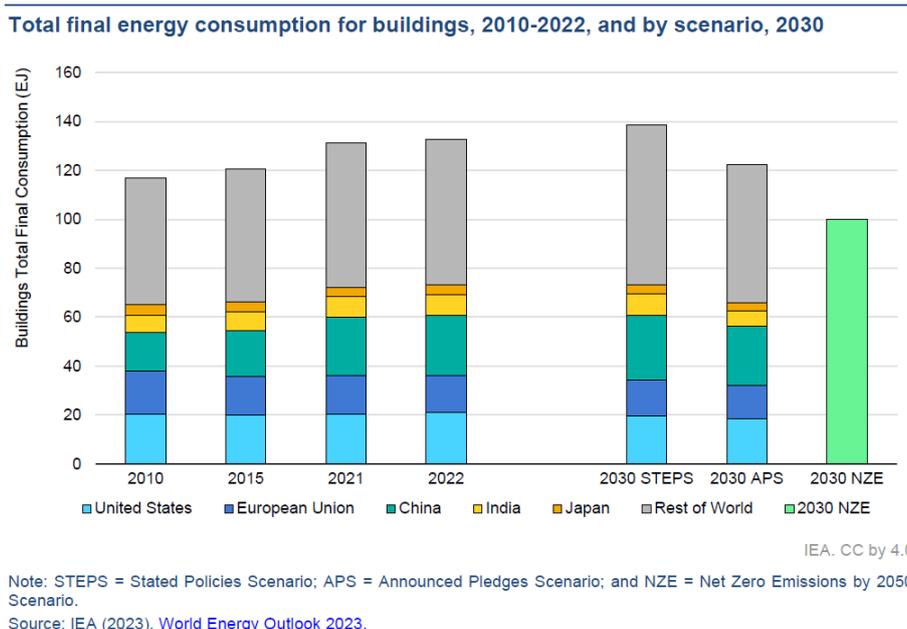


Figura 2 – Consumo di energia per edifici durante il periodo 2010-2022 e scenario per il 2030

L'efficientamento energetico del settore edilizio ha dunque un ruolo significativo nella transizione energetica; la superficie globale degli edifici è in continuo aumento, soprattutto nei Paesi in via di sviluppo dove si assiste ad un rapido aumento della popolazione. Secondo una previsione delle Nazioni Unite, la popolazione globale è destinata a crescere da circa 7,6 miliardi nel 2019 fino a 9,4-10,1 miliardi nel 2050 e, in aggiunta, un continuo processo di urbanizzazione porterà ad una crescita dal 54% al 66% della popolazione nelle città. In generale, a livello mondiale, la crescita degli standard di vita, della ricchezza e del benessere stanno portando sempre più consumatori ad accedere a numerosi servizi che se da un lato migliorano la vita, dall'altro comportano un aumento delle richieste energetiche.

I sistemi legati ai servizi per il riscaldamento e raffrescamento hanno il maggior potenziale per un incremento dell'efficienza e corrispondente riduzione dei consumi. Attualmente il riscaldamento degli edifici, nella maggior parte dei casi, è ottenuto impiegando energia da fonti fossili ma vi è un'opportunità di elettrificazione andando ad impiegare le pompe di calore, più efficienti e con la possibilità di essere alimentate da fonti rinnovabili. È dimostrato come le pompe di calore utilizzino dalle tre alle cinque volte meno energia rispetto ai sistemi tradizionali. Il raffrescamento degli ambienti, ottenuto tramite impianti di condizionamento dell'aria, rileva la crescita più rapida tra i consumi legati agli edifici negli ultimi anni; ciò è dovuto anche alle ondate di calore sempre più intense e frequenti in tutto il mondo e più in generale all'incremento delle temperature e all'allungamento delle stagioni più calde.

Progresso nel settore dell'edilizia

L'incremento dell'efficienza negli edifici è di grande importanza visto il grande impatto ed è dunque importante allinearsi con gli obiettivi energetici prefissati senza affliggere il comfort termico e la qualità della vita delle persone. I progressi del settore edilizio non sono attualmente in linea con i requisiti concordati per la decarbonizzazione definiti dall'IEA. Nel 2018 l'efficienza è aumentata dell'1,2%, non sufficiente se confrontato con il 3% annuo previsto e soprattutto inferiore all'incremento dell'1,7% e 2,5% rispettivamente registrati nel 2017 e 2000.

La previsione sul consumo energetico del settore edilizio nei prossimi anni, tuttavia, è determinata da una grande incertezza dovuta a diversi fattori: esistono aspetti politici, demografici, sociali, economici e tecnologici che possono portare a scenari differenti tra di loro ed è dunque fondamentale analizzarne diversi per comprendere la potenziale evoluzione ed agire di conseguenza.

La IEA ha sviluppato due diversi scenari per una decarbonizzazione del settore edilizio come risposta agli accordi di Parigi. Nello scenario di sviluppo sostenibile (SDS) l'obiettivo è di minimizzare le emissioni entro il 2070 mentre nello scenario delle emissioni nette zero (NZE 2050), l'obiettivo è di raggiungere le zero emissioni nette entro il 2050. In entrambi i casi è previsto un deciso incremento dell'uso di energia pulita e dell'efficienza energetica degli edifici. Nello SDS è previsto un taglio del 30% delle emissioni dirette entro il 2030 e una riduzione del 10% dei consumi totali entro il 2070 grazie a interventi di riqualificazione energetica sul parco esistente e con la costruzione di edifici ad alta efficienza. Prevede inoltre un'elettrificazione per i sistemi di riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria andando a sostituire gli attuali sistemi tradizionali alimentati da combustibili fossili con pompe di calore. Nello NZE 2050 è prevista una riduzione del 50% delle emissioni dirette e una più generica riduzione di quelle indirette tramite un taglio delle emissioni della produzione di elettricità del 60% entro il 2030. L'elettrificazione dei sistemi dovrebbe essere accoppiata da un

maggior uso di energia pulita arrivando a una quota del 75% del totale. L'efficienza energetica degli edifici dovrebbe migliorare tramite interventi sull'involucro degli edifici, sulla ventilazione e cambiamenti a livello di comportamento degli occupanti, portando a una riduzione del fabbisogno energetico del 65% entro il 2050.

Gli scenari di decarbonizzazione analizzati richiedono grandi investimenti che porterebbero a uno sviluppo economico e sociale ma che potrebbe andare incontro a diverse problematiche:

- L'impiego di energie da fonti pulite per sostituire i combustibili di origine fossile, la riqualificazione degli edifici esistenti e la realizzazione di nuovi edifici a zero emissioni richiedono investimenti economici che i Paesi sviluppati possono sostenere a differenza di quelli in via di sviluppo; una stima del costo globale di queste tipologie di interventi si aggira tra i 92 e 173 miliardi di dollari nei prossimi 40 anni.
- L'incertezza del costo dell'energia elettrica nei prossimi anni con una maggiore introduzione di energia pulita può portare a problematiche socioeconomiche.
- La decarbonizzazione richiede tecnologie avanzate di cui non tutti i Paesi del mondo sono a disposizione.
- L'impiego di materie prime, in particolare l'uso di minerali preziosi e terre rare, è destinato ad aumentare notevolmente ma la produzione di tali è riservata a poche regioni del globo.

Impatto degli edifici in Italia

In Italia il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica promuove l'efficientamento attraverso interventi di carattere regolatorio (certificazioni energetiche) e agevolativo (detrazioni e incentivi). Dal 2015 sono in vigore nuove normative riguardanti i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e per la redazione dell'Attestato di Prestazione Energetico (APE) con linee guida e strumenti decisi dallo Stato con le regioni.

Il sistema informativo sugli attestati di prestazione energetica (SIAPE) è lo strumento nazionale per la raccolta degli APE di edifici e unità immobiliari. È realizzato da ENEA mettendo insieme le informazioni raccolte dai dati degli APE provenienti dai catasti locali di Regioni e Province Autonome. Tale sistema ha l'obiettivo di restituire un'immagine dettagliata dello stato dell'arte del patrimonio immobiliare privato e pubblico e della riqualificazione energetica del parco edilizio nazionale considerando diversi aspetti come ad esempio la destinazione d'uso, l'anno di costruzione degli stabili, la classe energetica. ENEA e CTI utilizzano il database degli APE prima citato per redigere annualmente il rapporto sulla certificazione energetica degli edifici. Quattro edizioni sono state rilasciate dal 2020 ad oggi e ciascuna di essa si riferisce agli attestati presentati nell'anno precedente; analizzando i dati raccolti si possono fare alcune considerazioni rispetto alle prestazioni energetiche degli edifici. Questo strumento è utile infatti per definire strategie, misure e azioni sul parco edilizio in linea con gli obiettivi della transizione energetica.

Di seguito sono state raccolte alcune informazioni dal rapporto dell'edizione 2023 (riferita ai dati del 2022) per avere una panoramica sull'attuale patrimonio immobiliare italiano.

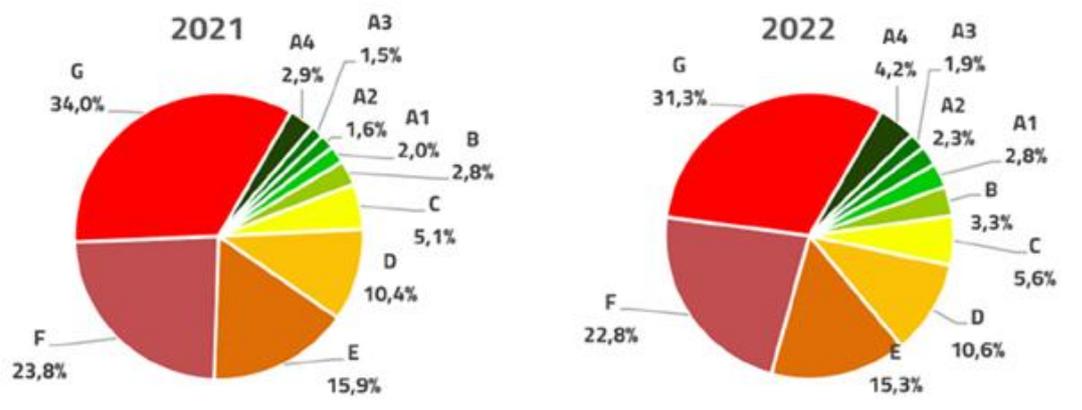


Figura 3 – Distribuzione degli APE emessi nel 2021 e 2022 per classe energetica [1]

La maggior parte degli edifici, circa il 55%, ricade ancora nelle classi energetiche più basse, la F e la G, ma da un confronto con i dati dell'anno precedente si osserva un miglioramento delle prestazioni energetiche degli immobili; la percentuale di edifici nelle classi F e G è diminuita a favore delle classi più alte A4-B.

I grafici sottostanti mostrano una più dettagliata distribuzione delle classi energetiche secondo una classificazione tra edifici residenziali e non residenziali:

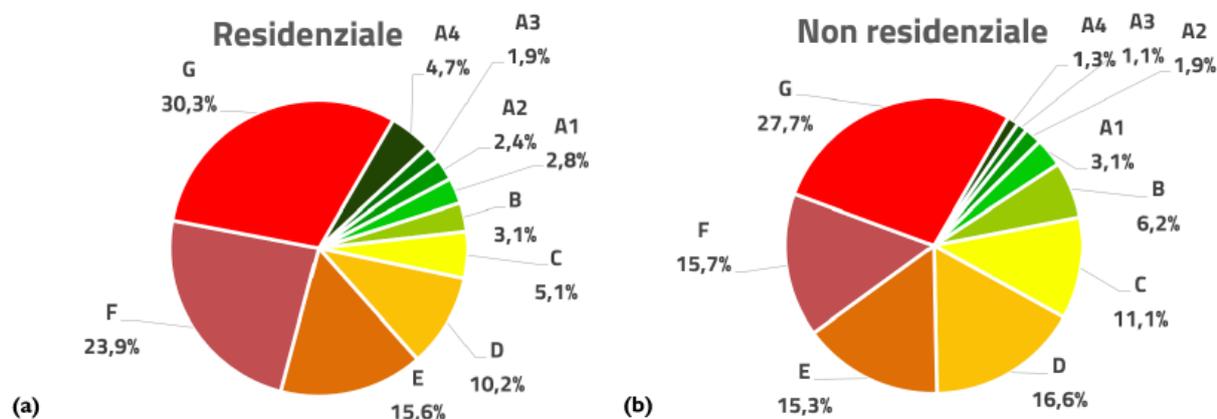


Figura 4 – Distribuzione percentuale degli APE per classe energetica per gli immobili residenziali (a) e non residenziali (b)[1]

Il settore residenziale ricalca l'andamento del campione totale con una distribuzione dei casi che, ad eccezione della classe A4, aumenta con il peggioramento della classe energetica. Il settore non residenziale è caratterizzato da una percentuale più elevata nelle classi A4-B e una inferiore nelle classi peggiori.

Nella tabella 1 sono riassunti i valori mediani di EP_{gl} , $EP_{gl,nren}$, $EP_{gl,ren}$, $EP_{H,nd}$ e di CO_2 per ciascuna classe energetica e suddivisi in settore residenziale e non residenziale. L' EP rappresenta l'indice di prestazione energetica, ovvero il fabbisogno di energia primaria in relazione alla superficie utile di riferimento ($gl \rightarrow$ globale ovvero include tutti i servizi, $nren \rightarrow$ quota di energia non rinnovabile, $ren \rightarrow$ quota di energia rinnovabile, $H,nd \rightarrow$ quota necessaria per il servizio di riscaldamento).

	Classe energetica	n.	EP _{gl} [kWh/m ² anno]	EP _{gl,nren} [kWh/m ² anno]	EP _{gl,ren} [kWh/m ² anno]	EP _{H,nd} [kWh/m ² anno]	CO ₂ [kg/m ² anno]
Residenziale	A4	42.215	69,3	16,4	52,2	30,4	3,7
	A3	16.448	94,3	42,8	49,4	40,3	9,4
	A2	20.919	85,3	57,7	23,3	36,5	12,2
	A1	24.451	91,2	71,5	12,5	41,4	14,9
	B	27.197	104,8	86,9	8,8	50,5	18,0
	C	44.677	120,7	104,4	5,3	57,9	21,5
	D	88.376	139,7	127,2	3,4	69,6	25,8
	E	132.927	160,9	152,6	2,4	84,7	30,6
F	197.170	196,3	189,4	1,9	109,3	37,7	
G	246.592	290,2	282,8	1,9	166,9	56,2	
Non residenziale	A4	1.526	97,0	28,8	65,1	52,2	6,6
	A3	1.392	160,5	81,0	77,0	73,4	19,1
	A2	2.353	202,4	115,9	75,5	80,1	26,5
	A1	3.942	251,8	162,4	75,6	82,5	37,0
	B	7.582	323,0	220,7	89,6	97,4	49,9
	C	13.918	341,6	257,3	53,8	115,9	56,7
	D	20.779	345,1	289,3	33,4	137,9	61,7
	E	18.456	313,9	280,3	20,2	152,2	58,1
F	17.740	278,8	259,8	9,7	154,8	52,8	
G	31.094	254,6	245,9	1,8	154,5	48,6	

Tabella 1 - Distribuzione dei valori medi dell'EP_{gl}, dell'EP_{gl,nren}, dell'EP_{gl,ren}, dell'EP_{H,nd} e delle emissioni di CO₂ per classe energetica per gli immobili [1]

La tabella di seguito evidenzia un miglioramento nel tempo delle prestazioni energetiche con una riduzione dell'EP globale e in particolare una riduzione dell'EP non rinnovabile e un aumento dell'EP rinnovabile. Vi è stata una decrescita delle emissioni di CO₂ abbinata al miglioramento degli indici.

	Anno di emissione dell'APE	n.	EP _{gl} [kWh/m ² anno]	EP _{gl,nren} [kWh/m ² anno]	EP _{gl,ren} [kWh/m ² anno]	EP _{H,nd} [kWh/m ² anno]	CO ₂ [kg/m ² anno]
Residenziale	2018	439.388	192,55	181,04	2,08	102,44	35,58
	2019	472.906	188,05	176,32	2,17	99,30	35,00
	2020	469.827	188,98	176,18	2,48	100,34	35,41
	2021	727.402	191,63	176,57	2,65	101,79	35,46
	2022	840.972	181,79	165,20	3,07	96,67	33,23
Non residenziale	2018	86.421	342,43	298,03	23,77	154,03	61,53
	2019	90.063	324,21	280,65	22,29	146,77	58,63
	2020	78.817	313,09	269,49	21,37	142,93	56,52
	2021	111.005	297,22	254,21	19,47	137,90	53,32
	2022	118.782	292,60	249,31	19,27	137,21	52,31

Tabella 2 - Distribuzione dei valori medi dell'EP_{gl}, dell'EP_{gl,nren}, e dell'EP_{gl,ren} per anno di emissione dell'APE per gli immobili [1]

I grafici di seguito mostrano la distribuzione degli edifici secondo l'anno di costruzione e la classe energetica appartenente.

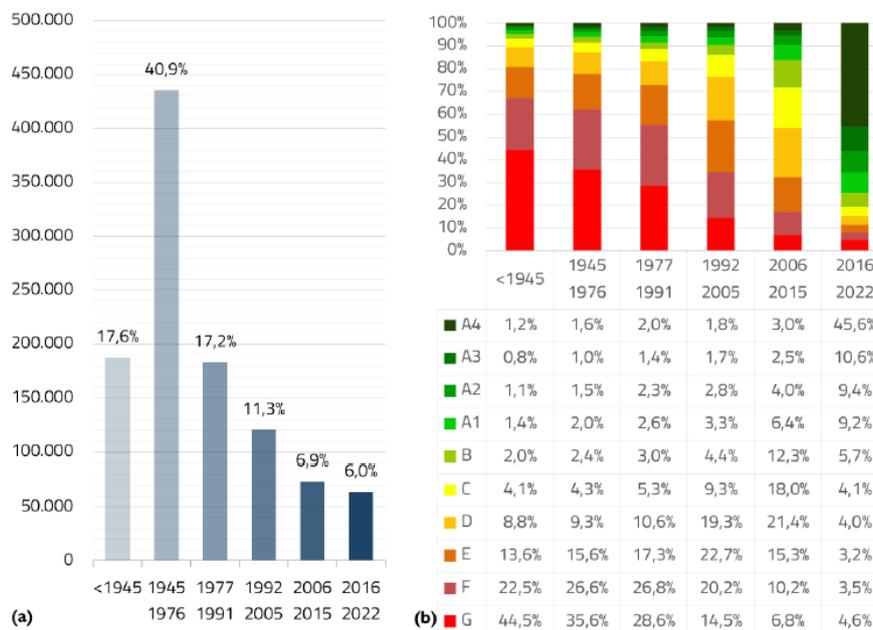


Figura 5 - Distribuzione degli APE per periodo di costruzione (a) e distribuzione percentuale degli APE per periodo di costruzione e classe energetica (b) [1]

Una prima osservazione riguarda il fatto che più della metà degli edifici sottoposti ad APE siano stati realizzati prima del 1991 quando non vi erano ancora normative per la costruzione e per i consumi energetici delle abitazioni e per questo motivo appartengono nella quasi totalità alle classi energetiche peggiori. La distribuzione dal punto di vista delle prestazioni energetiche migliora con gli edifici di più recente realizzazione grazie all'evoluzione della normativa vigente che richiede requisiti sempre più stringenti. Quasi la metà degli edifici realizzati nel periodo 2016-2022 appartiene alla migliore classe energetica (A4).

Azioni del Politecnico di Torino

L'obiettivo delle emissioni nette zero di gas serra entro il 2040, prefissato dagli accordi di Parigi e Glasgow, è di fondamentale rilevanza se si intende limitare i cambiamenti climatici e mitigarne gli effetti.

Il Politecnico di Torino ha aderito alla campagna globale "Race To Zero" supportata dall'UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*), in cui attori non statali tra cui aziende, università, regioni, città e istituzioni di varia tipologia, si impegnano ad intraprendere azioni rigorose e immediate per ridurre le emissioni entro il 2030. Dal 2020, oltre 14 mila membri hanno aderito alla campagna con piani d'azione trasparenti e con solidi obiettivi a breve termine.

L'ateneo ha deciso di anticipare al 2040 l'obiettivo della neutralità carbonica tramite un Piano pluriennale di Decarbonizzazione, avviando un significativo progetto di analisi delle emissioni di CO₂ e di programmazione delle possibili azioni da intraprendere. Il Politecnico ha sviluppato il proprio inventario delle emissioni climalteranti seguendo gli standard del protocollo "GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard (2004)", analizzando le emissioni dirette (Scope 1), indirette generate dall'energia acquistata e consumata (Scope 2) e tutte le altre emissioni indirette generate dall'Ateneo (Scope 3).

Di seguito è rappresentata la sintesi delle emissioni per il periodo 2018-2023.

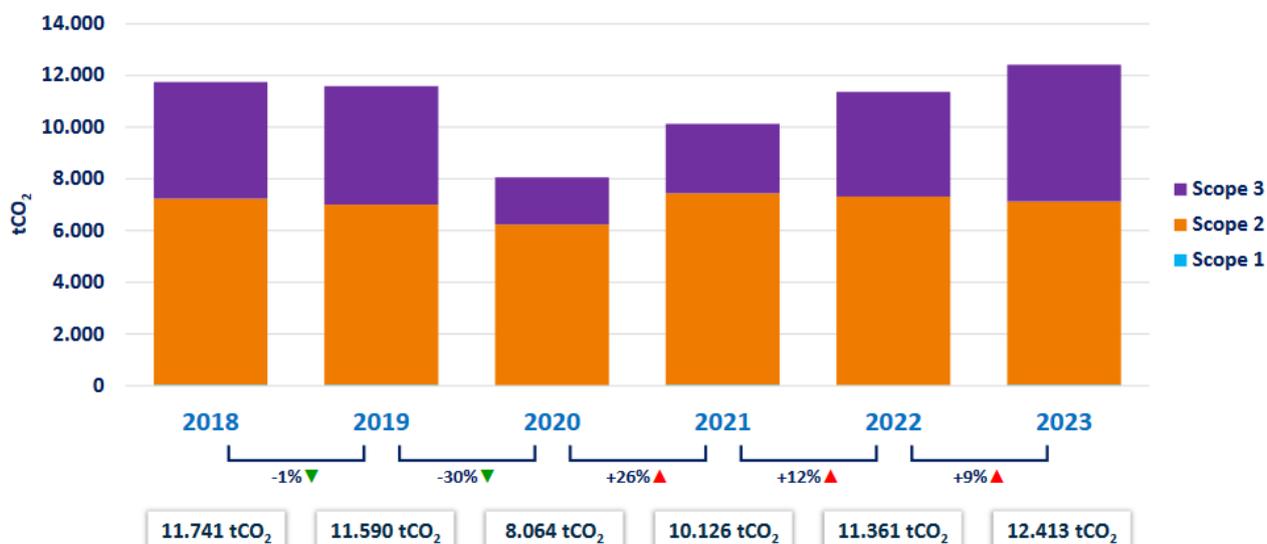


Figura 6 – Sintesi emissioni Politecnico periodo 2018-2023 [2]

Focus sugli Scope 2 e 3:

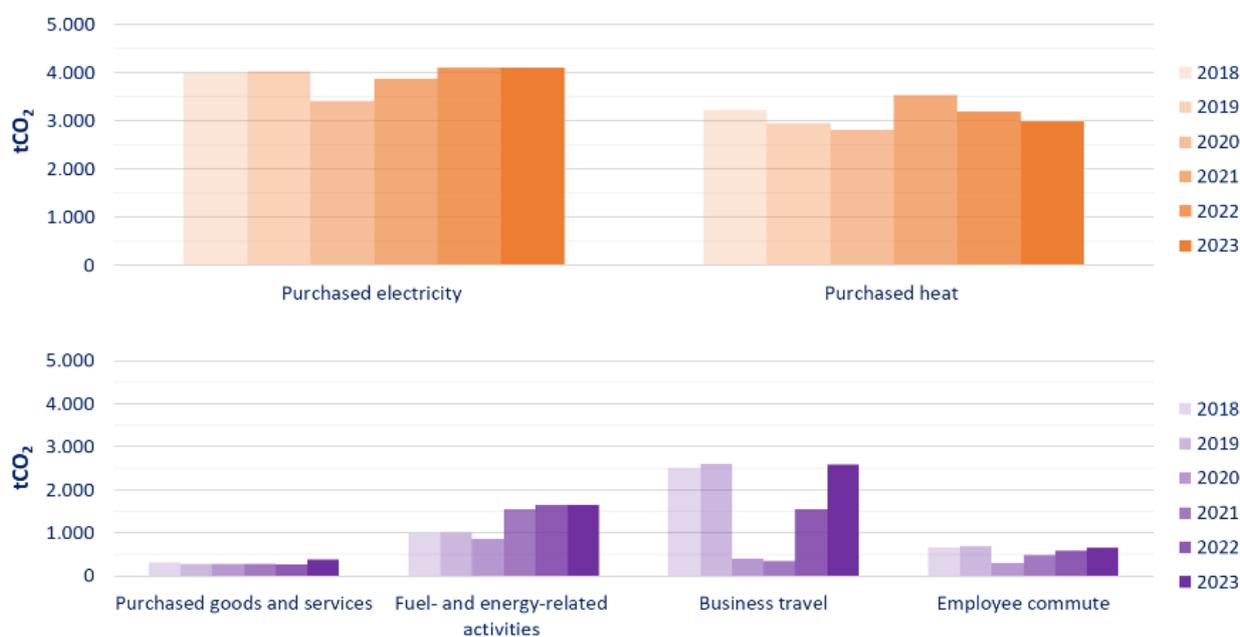


Figura 7 – Analisi ambiti di produzione di CO₂ [2]

L'analisi sopra descritta ha messo in risalto alcuni aspetti, tra cui gli ambiti prioritari di produzione di CO₂ (riscaldamento, elettricità e mobilità), la necessità di coinvolgimento della comunità accademica per la valutazione complessiva delle azioni, la necessità di incrementare il livello di dettaglio (ad esempio l'impatto dei singoli edifici), la necessità di distinzione tra emissioni legate ad attività di ricerca e al funzionamento ordinario.

Fin dal 2012 il Politecnico ha introdotto il concetto di sostenibilità tra i Principi dello Statuto e dal 2014 nel Piano Strategico di Ateneo vi è una linea specifica dedicata a questo ambito. È presente inoltre il Green Team, un gruppo di professori, ricercatori, personale amministrativo e studenti che

promuove e incoraggia la stessa università ad un'integrazione globale della sostenibilità nella ricerca, nell'insegnamento e nelle diverse attività svolte. L'ideale del Team è fondato sul rendere concreta l'attuazione delle linee del piano strategico sul campus sostenibile per una riduzione dei consumi ma anche per contribuire alla formazione, allo sviluppo e all'esperienza del personale e degli studenti del Politecnico.

Le prime azioni a breve termine decise dall'Ateneo riguardano:

- Contenimento dei consumi di energia elettrica supportato da un'indagine sui carichi elettrici nei periodi di inattività e azioni per la riduzione ed eliminazione degli assorbimenti impropri
- Contenimento dei consumi di energia termica e frigorifera con sostituzione o ottimizzazione degli impianti termici
- Efficientamento degli impianti di illuminazione tramite una mappatura dei sistemi e la sostituzione di essi con nuova illuminazione a LED più efficiente
- Monitoraggio energetico tramite mappatura dei consumi nei locali e nelle strutture dell'Ateneo
- Potenziamento degli impianti fotovoltaici
- Sostituzione dei serramenti
- Coibentazione dell'involucro edilizio

L'Ateneo si è posto l'obiettivo di raggiungere la neutralità carbonica entro il 2040, concentrandosi su cinque ambiti tematici: Energia e Clima, Educazione, Inclusione, Risorse, Mobilità e Trasporti. Per questo è stato avviato il Piano pluriennale di Decarbonizzazione finalizzato alla riduzione delle emissioni di CO₂ che viene sostenuto con specifiche assegnazioni di budget e aggiornato annualmente

Nel programma di efficientamento energetico rientra l'edificio denominato 4°, che costituisce il caso studio di questa tesi.

Uno dei pilastri strategici per la transizione ecologica e sociale dell'Ateneo e del suo Campus è rappresentato dallo sviluppo del concetto di "Sostenibilità" e si declina attraverso azioni di mitigazione della produzione di gas climalteranti, azioni di adattamento al cambiamento climatico, iniziative mirate a ridurre l'impatto ambientale, gestione responsabile delle risorse e progetti di collaborazione su filoni di attività che vedono centrale il "Piano di Decarbonizzazione".

Ma anche e soprattutto una strutturata azione di manutenzione ordinaria e straordinaria degli involucri edilizi e degli impianti, ambito nel quale si inserisce il progetto di riqualificazione energetica degli edifici che assumiamo a "caso studio" nell'ambito di questa trattazione di tesi.

Ma prima di entrare nel dettaglio degli interventi specifici, si è ritenuto opportuno fare un richiamo alle principali direttive normative che regolano l'efficientamento energetico, come la EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) e la RED (Renewable Energy Directive), nonché alle loro applicazioni a livello nazionale, esse rappresentano un fondamentale quadro di riferimento che orienta le politiche energetiche e la pianificazione degli interventi sia a livello europeo che nazionale.

2. Direttive europee e normativa italiana sull'efficienza energetica degli edifici

Prima di entrare nella descrizione degli interventi si è ritenuto opportuno richiamare le principali direttive e normative che regolano le misure di efficientamento energetico, partendo dal contesto europeo per poi addentrarsi nelle applicazioni nazionali.

Direttive Europee

A livello europeo, in materia di efficienza energetica e di fonti rinnovabili, sono state introdotte e aggiornate a più riprese numerose direttive per indicare ai Paesi membri la strada da percorrere. Questi atti giuridici stabiliscono i principi e gli obiettivi che gli Stati dell'Unione Europea sono tenuti a conseguire, sebbene poi spetti ad essi definire le modalità di attuazione tramite le disposizioni nazionali. Di seguito sono riportate le direttive più importanti introdotte:

- EPBD (Direttiva 2002/91)

La direttiva EPBD (*Energy Performance of Buildings Directive*) è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea il 16 dicembre 2002, con lo scopo di dare un indirizzo, comune a tutti gli Stati membri, in materia di miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici. Le disposizioni contenute in essa riguardano:

- il quadro generale di una metodologia per il calcolo della prestazione energetica integrato degli edifici;
- l'applicazione di requisiti minimi in materia di prestazione energetica degli edifici di nuova costruzione e di quelli esistenti sottoposti a importanti ristrutturazioni;
- la certificazione energetica degli edifici obbligatoria per la costruzione, la compravendita o la locazione;
- l'ispezione periodica delle caldaie e dei sistemi di condizionamento dell'aria negli edifici al fine di limitare il consumo energetico e le emissioni di biossido di carbonio e per suggerire interventi migliorativi.

Il compito degli Stati membri era di recepire e applicare la direttiva con normative nazionali, per adeguarsi al progresso tecnologico e garantire una transizione sostenibile.

- EPBD II (Direttiva 2010/31)

La direttiva EPBD II è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea il 19 maggio 2010. Si tratta di una rifusione della precedente in cui si rafforzano gli obiettivi già presentati nel 2002 promuovendo ulteriormente l'efficienza energetica degli edifici e integrando nuove misure per ridurre le emissioni di gas serra e raggiungere gli obiettivi climatici dell'UE. Viene introdotto il concetto di "edifici a energia quasi zero" (nZEB), ovvero edifici ad altissima prestazione energetica con un fabbisogno molto basso o quasi nullo che dovrebbe essere coperto in misura significativa da energia proveniente da fonti rinnovabili. La direttiva prevede inoltre che:

- entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione siano edifici a energia quasi zero;
- a partire dal 31 dicembre 2018 gli edifici di nuova costruzione occupati da enti pubblici e di proprietà di questi ultimi siano edifici a energia quasi zero.
- Gli Stati membri elaborino piani nazionali finalizzati all'aumento del numero di edifici nZEB.

All'interno del documento viene trattata l'importanza di mettere a disposizione strumenti finanziari o di altro tipo per favorire il miglioramento delle prestazioni energetiche e il passaggio a edifici nZEB.

- EPBD III (Direttiva 2018/844)

La direttiva EPBD III è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea il 30 maggio 2018 per modificare la precedente direttiva sulla prestazione energetica degli edifici e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica. Le principali modifiche introdotte sono le seguenti:

- Gli Stati membri devono stabilire una strategia a lungo termine per trasformare il parco immobiliare nazionale in edifici ad alta efficienza e decarbonizzato entro il 2050;
- Le strategie devono includere una tabella di marcia con misure e indicatori di progresso misurabili stabiliti a livello nazionale con tappe intermedie per il 2030 e 2040;
- L'introduzione del concetto di "predisposizione degli edifici all'intelligenza" con la promozione di sistemi di automazione per monitorare, regolare e migliorare l'uso dell'energia negli edifici;
- Una maggiore attenzione verso la mobilità elettrica con la realizzazione di infrastrutture come punti di ricarica in edifici non residenziali di nuova costruzione o sottoposti a ristrutturazioni importanti con più di dieci posti auto;
- Aggiornamenti per l'ispezione degli impianti di riscaldamento e condizionamento dell'aria.

- EPBD IV (Direttiva 2024/1275)

La direttiva EPBD IV è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea il 24 aprile 2024 e si tratta della più recente rifusione in ambito di prestazioni energetiche degli edifici.

L'articolo 1 spiega che *"La presente direttiva promuove il miglioramento della prestazione energetica degli edifici e la riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra provenienti dagli edifici all'interno dell'Unione per conseguire un parco immobiliare a emissioni zero entro il 2050..."*.

Le principali modifiche introdotte sono le seguenti:

- Gli edifici di nuova costruzione dovranno essere ad emissione zero:
 1. A decorrere dal 1° gennaio 2028 per i nuovi edifici di proprietà degli enti pubblici;
 2. A decorrere dal 1° gennaio 2030 per tutti gli edifici;
- Gli Stati membri devono stabilire soglie massime di prestazione energetica per gli edifici non residenziali più energivori, garantendo che:
 1. Entro il 2030 il 16% del parco immobiliare nazionale superi la soglia definita;
 2. Entro il 2033 il 26% del parco immobiliare nazionale superi la soglia definita;
- Il consumo medio annuo di energia primaria in kWh/m² dell'intero parco immobiliare residenziale deve diminuire del:
 1. 16% rispetto al 2020 entro il 2030;
 2. 20-22% rispetto al 2020 entro il 2035;

-Almeno il 55% del calo del consumo medio di energia primaria deve essere ottenuto attraverso la ristrutturazione del 43% degli edifici residenziali con le prestazioni energetiche peggiori;

-I nuovi edifici dovrebbero essere progettati in modo da ottimizzare il loro potenziale di produzione di energia solare in base al livello di irraggiamento del sito. L'articolo 10 stabilisce che gli Stati membri assicurano l'installazione di impianti solari laddove tecnicamente ed economicamente fattibile, definendo le superfici coperte utili da raggiungere per ogni anno e categoria di edificio;

-Viene introdotto il concetto di "edificio a emissioni zero", ovvero un edificio che non genera emissioni in loco di carbonio da combustibili fossili e che il consumo totale annuo sia coperto da energia da fonti rinnovabili generata in loco o nelle vicinanze o da comunità energetiche

- RED (Direttiva 2009/28)

La direttiva RED (*Renewable Energy Directive*) è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea il 23 aprile 2009 e l'articolo 1 spiega che:

“La presente direttiva stabilisce un quadro comune per la promozione dell'energia da fonti rinnovabili. Fissa obiettivi nazionali obbligatori per la quota complessiva di energia da fonti rinnovabili sul consumo finale lordo di energia...”

Tali piani miravano a definire gli obiettivi nazionali per il 2020 comprensivi delle misure necessarie a raggiungerli. Tra gli obiettivi comuni figuravano i cosiddetti "obiettivi 20-20-20" ossia:

- Ridurre del 20% le emissioni di gas serra rispetto ai livelli del 1990;
- Raggiungere un miglioramento pari al 20% dell'efficienza energetica;
- Portare la quota di energia prodotta da fonti rinnovabili al 20% del consumo finale lordo di energia.

- RED II (Direttiva 2018/2001)

La direttiva RED II è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea l'11 dicembre 2018. Si tratta di una rifusione della precedente in cui venivano aggiornati gli obiettivi in vista del 2030 stabilendo che la quota di energia da fonti rinnovabili deve essere almeno pari al 32% sul consumo finale lordo dell'Unione. Una delle novità riguarda l'utilizzo di energia rinnovabile negli impianti di riscaldamento e raffrescamento. L'articolo 23 della direttiva stabilisce che gli Stati membri devono impegnarsi per incrementare la quota di energia rinnovabile in tale settore di circa 1,3 punti percentuali come media annuale per i periodi dal 2021 al 2025 e dal 2026 al 2030, rispetto alla quota nel 2020.

- RED III (Direttiva 2023/2413)

La direttiva RED III è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea il 18 ottobre 2023 e si tratta della più recente rifusione delle precedenti RED e RED II in ambito di promozione di energie rinnovabili. Le principali modifiche riguardano i seguenti aspetti:

- La quota di energia da fonti rinnovabili nel consumo energetico finale lordo dell'Unione deve essere almeno pari al 42,5% entro il 2030, con l'impegno collettivo di portare questo valore al 45%;
- L'introduzione dell'articolo 15-bis prevede che i membri stabiliscano una quota nazionale di energia rinnovabile nel consumo energetico del settore edilizio, tenendo in considerazione l'obiettivo dell'UE di raggiungere almeno il 49% entro il 2030;
- L'aumento della quota di energia rinnovabile nel settore del riscaldamento e del raffrescamento deve essere di almeno 0,8 punti percentuali come media annua calcolata per il periodo 2021-2025 e di almeno 1,1 punti percentuali per il periodo 2026-2030, rispetto alla quota del 2020.

- EED (Direttiva 2006/32)

La direttiva EED (Energy Efficiency Directive) è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea il 5 aprile 2006 con lo scopo di migliorare l'efficienza degli usi finali dell'energia negli Stati membri. L'obiettivo da conseguire è un risparmio energetico nazionale indicativamente pari al 9% entro il 2016 ottenuto attraverso misure di efficientamento energetico che variano da Stato a Stato. In particolare, la direttiva spiega come il settore pubblico debba coprire un ruolo esemplare con politiche e misure come, ad esempio, la ristrutturazione di edifici pubblici. Nell'allegato III si riportano per ciascun settore alcuni esempi di miglioramento dell'efficienza energetica ammissibili e tra quelli per il settore degli edifici si trovano:

- Installazione o aggiornamento di sistemi di climatizzazione con l'utilizzo di pompe di calore o nuove caldaie più efficienti;
- Isolamento della cavità murarie e dei tetti;
- Installazione di serramenti a doppio o triplo vetro;
- Impiego di illuminazione più efficiente con l'introduzione di sistemi di controllo digitale e l'uso di rilevatori di movimento;
- Sistemi del recupero del calore;
- Generazione domestica di energia rinnovabile che consenta di ridurre l'energia acquistata dalla rete.

- EED II (Direttiva 2012/27)

La direttiva EED II è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea il 25 ottobre 2012 e sostituisce la precedente EED. La novità principale è la modifica dell'obiettivo di efficienza energetica, alzato al 20% entro il 2020 e l'introduzione di basi per ulteriori miglioramenti oltre tale data. A supporto del ruolo esemplare che deve coprire il settore pubblico, ogni Stato membro deve garantire che dal 1° gennaio 2014 il 3% della superficie coperta utile totale di edifici di proprietà del governo, o da esso occupati, siano ristrutturati ogni anno. Per quanto riguarda le grandi imprese, queste devono effettuare un audit energetico ogni quattro anni in modo da individuare opportunità di risparmio energetico.

- EED III (Direttiva 2018/2002)

La direttiva EED III è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea l'11 dicembre 2018 e modifica la precedente direttiva del 2012. Viene introdotto il nuovo obiettivo in termini di efficienza energetica pari a 32,5% entro il 2030. Gli Stati membri devono garantire un risparmio annuo di energia finale almeno pari allo 0,8% dal 2021 al 2030, ottenuto attraverso misure di efficientamento energetico nei settori edilizi, industriale e dei trasporti.

- EED IV (Direttiva 2023/1791)

La direttiva EED IV è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea il 13 settembre 2023 ed è il più recente atto in termini di efficienza energetica. Con questa direttiva gli Stati membri sono tenuti a garantire una riduzione collettiva del consumo energetico pari almeno all'11,7% entro il 2030 rispetto alle proiezioni dello scenario di riferimento UE 2020, in modo da non superare i 763 Mtep (milioni di tonnellate equivalenti di petrolio). In aggiunta viene fissato un limite per il consumo di energia primaria da non superare pari a un volume di 992,5 Mtep nel 2030. I membri devono provvedere a ridurre dell'1,9% all'anno il consumo di energia finale degli enti pubblici rispetto ai valori del 2021. Sono introdotti obblighi di risparmio energetico pari:

- Dal 1° gennaio 2021 al 31 dicembre 2023, allo 0,8% del consumo annuo medio di energia finale realizzato nel triennio precedente il 1° gennaio 2019;
- Dal 1° gennaio 2024 al 31 dicembre 2025, all'1,3% del consumo annuo medio di energia finale realizzato nel triennio precedente il 1° gennaio 2019;
- Dal 1° gennaio 2026 al 31 dicembre 2027, all'1,5% del consumo annuo medio di energia finale realizzato nel triennio precedente il 1° gennaio 2019;
- Dal 1° gennaio 2028 al 31 dicembre 2030, all'1,9% del consumo annuo medio di energia finale realizzato nel triennio precedente il 1° gennaio 2019.

Legislazione Italiana

L'Italia, come ogni altro membro dell'Unione Europea, ha posto l'energia e il clima al centro della sua agenda politica. In particolare, per raggiungere gli obiettivi dell'Unione Europea, ha recepito le indicazioni derivanti dalle diverse direttive UE con una serie di decreti e provvedimenti che hanno modificato, integrato e attuato le disposizioni previste dai testi di recepimento. Le direttive dell'UE vincolano infatti gli Stati membri cui sono rivolte per quanto riguarda il risultato da raggiungere ma è compito delle autorità nazionali definire poi la forma e i mezzi con cui raggiungere tale scopo. Per far sì che la direttiva abbia effetto a livello nazionale, lo Stato membro deve adottare una legge per recepirla entro il termine indicato al momento dell'adozione della direttiva stessa. Di seguito sono riportati i decreti adottati per recepire le direttive descritte in precedenza.

- Decreto Legislativo 192/2005:

Il primo decreto derivante dalle politiche comunitarie è stato il D.Lgs. 192/2005 che recepiva a livello nazionale la Direttiva 2002/91 (EPBD) portando a stabilire i criteri, le condizioni e le modalità per il

miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici in Italia. Il fine era quello di favorire lo sviluppo, la valorizzazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili e la diversificazione energetica per contribuire a raggiungere gli obiettivi nazionali di riduzione delle emissioni di gas serra posti dal protocollo di Kyoto. I contenuti principali sono i seguenti:

- Introduzione di una metodologia per il calcolo della prestazione energetica degli edifici;
- Introduzione di requisiti minimi da rispettare in termini di prestazione energetica finalizzati al contenimento dei consumi che tengono conto di numerosi fattori, tra cui le caratteristiche dell'edificio, la destinazione d'uso, il clima esterno e interno, ecc.;
- Obbligo di dotare gli edifici in compravendita, in locazione o nuova costruzione di un attestato di certificazione energetica (ACE) che fornisca informazioni sulla classe energetica e sui consumi dell'edificio;
- Controllo periodico e manutenzione eseguiti sugli impianti termici con l'obbligo per l'operatore di redigere un rapporto di controllo tecnico;
- Promozione dell'uso razionale dell'energia.

Nell'allegato C vengono quindi introdotti i requisiti per quanto riguarda i valori limite di fabbisogno annuo di energia primaria, di trasmittanza termica delle strutture opache verticali e orizzontali e per le chiusure trasparenti. Tali valori sono successivamente stati aggiornati nel D.Lgs. 311/2006. Nell'allegato D vengono invece proposte indicazioni e raccomandazioni per l'integrazione di impianti solari termici e fotovoltaici e per l'allaccio alla rete del teleriscaldamento.

- Decreto Legislativo 63/2013:

Il decreto 63/2013 recepisce a livello nazionale la direttiva 2010/31 (EPBD II) apportando modifiche al D.Lgs. 192/2005. I punti chiave riguardano promuovere il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici, sostenere la diversificazione energetica e conseguire gli obiettivi nazionali in materia energetica e ambientale. Il decreto in particolare disciplina:

- la metodologia per il calcolo delle prestazioni degli edifici;
- i nuovi requisiti per fabbricati di nuova costruzione, soggetti a riqualificazione energetica o ristrutturazione importante;
- la definizione di un piano di azione per la promozione degli "edifici a energia quasi zero" (nZEB) che obbligava dal 31 dicembre 2018 gli edifici di nuova costruzione occupati da pubbliche amministrazioni o di loro proprietà ad essere edifici nZEB. Dal 1° gennaio 2021 tutti gli edifici di nuova realizzazione devono essere edifici nZEB.

Con questo decreto l'attestato di certificazione energetica viene sostituito dall'attestato di prestazione energetica (APE), con una validità di dieci anni e deve essere aggiornato in caso di ristrutturazione o riqualificazione che modifichi la classe energetica. Vengono inoltre introdotte detrazioni fiscali per interventi di efficientamento energetico nella misura del 65% delle spese sostenute, con alcune limitazioni.

- Legge 90/2013:

La legge 90 del 3 agosto 2013 rappresenta la conversione in legge, con alcune modifiche, del decreto legislativo 63/2013. In particolare, questa punta a rafforzare alcune disposizioni per rendere più rigorosa e applicabile la normativa in materia di efficienza energetica degli edifici. Un esempio riguarda l'obbligo di allegare l'APE ai contratti di compravendita o locazione, pena la nullità dell'atto e sanzioni amministrative. Inoltre, rafforza l'obbligo di pianificare un percorso concreto per quanto riguarda gli edifici nZEB, introducendo un meccanismo di controllo per verificare il rispetto degli standard. Viene introdotto l'obbligo di aggiornare periodicamente i requisiti minimi di prestazione energetica da rispettare con lo scopo di raggiungere gli obiettivi fissati a livello europeo.

- Decreti Ministeriali 26/06/2015:

Il 26 giugno 2015 sono stati emanati dal Ministero dello Sviluppo Economico tre provvedimenti fondamentali che hanno ulteriormente definito il quadro normativo nazionale in materia di efficienza energetica degli edifici:

- D.M. 26/06/2015 Requisiti minimi → definisce le modalità di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici adottando le specifiche tecniche UNI/TS 11300 e UNI EN 15193 con le successive modifiche e integrazioni; stabilisce inoltre i nuovi requisiti minimi sia per nuove costruzioni sia soggette a ristrutturazione;
- D.M. 26/06/2015 Linee guida APE → definisce le nuove regole di redazione dell'attestato di prestazione energetica stabilendo la metodologia di calcolo e il format del documento;
- D.M. 26/06/2015 Relazione Tecnica → definisce gli schemi tipo della relazione tecnica di progetto in funzione della tipologia di intervento sull'edificio.

- Decreto Legislativo 48/2020:

Il decreto 48/2020 recepisce a livello nazionale la direttiva 2018/844 (EPBD III) sulla prestazione energetica degli edifici. Vengono introdotti i criteri per la predisposizione di una strategia nazionale a lungo termine per la ristrutturazione di edifici pubblici e privati, residenziali e non residenziali, al fine di ottenere un parco immobiliare decarbonizzato e ad alta efficienza energetica entro il 2050. Tale strategia comprende:

- Una ricognizione del parco immobiliare nazionale;
- L'individuazione di approcci per una ristrutturazione efficace in termini di costi considerando la tipologia di immobile e la zona;
- Una revisione delle politiche e delle azioni in vigore;
- L'introduzione di nuove politiche per stimolare le ristrutturazioni importanti ed efficaci e per accelerare la riqualificazione energetica.

Viene istituito presso ENEA il portale nazionale sulla prestazione energetica degli edifici con lo scopo di fornire ai cittadini e alle imprese informazioni per le riqualificazioni energetiche efficaci. Il decreto infine introduce, in linea con la direttiva europea, un sistema di valutazione dell'intelligenza degli

edifici per identificare la capacità del fabbricato nel monitorare e ottimizzare i consumi tramite tecnologie di automazione e controllo.

La direttiva europea 2024/1275 (EPBD IV) è l'atto più recente relativo alle prestazioni energetiche degli edifici e dovrà essere recepita a livello nazionale entro il 2026.

- Decreto Legislativo 28/2011:

Il D.Lgs. 28/2011 rappresenta l'attuazione nazionale della direttiva 2009/28 (RED) sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili. In particolare, definisce gli strumenti, i meccanismi, gli incentivi e il quadro istituzionale, finanziario e giuridico necessari per il raggiungimento degli obiettivi per il 2020 in materia di quota di energia da fonti rinnovabili. Gli obiettivi nazionali prevedono di raggiungere una quota da fonti rinnovabili pari al 17% sul consumo finale lordo entro il 2020.

Un'azione immediata con risultati a breve termine non era assolutamente fattibile e per questo si sono posti obiettivi intermedi che sono riassumibili nella figura 8:

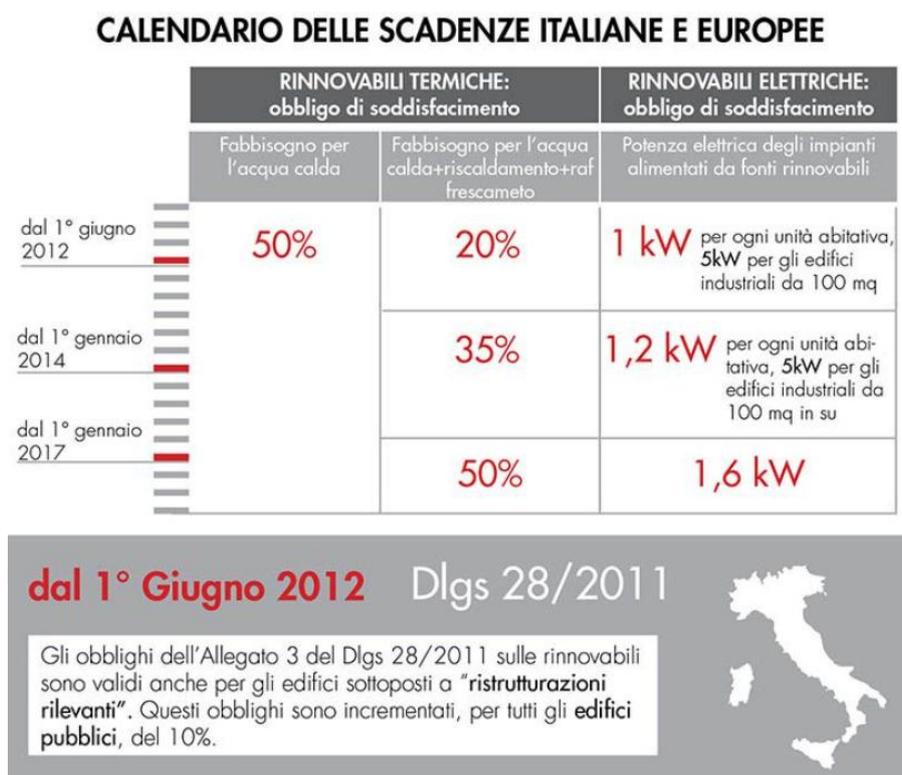


Figura 8 – Calendario scadenze italiane derivanti dalla direttiva RED

- Decreto Legislativo 199/2021:

Il D.Lgs. 199/2021 recepisce a livello nazionale la direttiva 2018/2001 (RED II) relativamente all'uso e alla promozione dell'energia da fonti rinnovabili. Con questo decreto gli obiettivi nazionali vengono aggiornati puntando a raggiungere una quota minima del 30% di energia da fonti rinnovabili sul consumo complessivo lordo entro il 2030. Viene inoltre introdotto un nuovo obiettivo relativo

all'incremento di energia da fonti rinnovabili nei consumi finali di riscaldamento e raffrescamento pari a 1,33 punti percentuali come media annua calcolata per i periodi dal 2021 al 2025 e dal 2026 al 2030.

La direttiva 2023/2413 (RED III) deve ancora essere recepita a livello nazionale.

- Decreto Legislativo 102/2014:

Il D.Lgs. 102/2014 recepisce a livello nazionale la direttiva 2012/27 (EED II) e include misure per la promozione e il miglioramento dell'efficienza energetica in tutti i settori. L'obiettivo nazionale fissato da questo decreto è la riduzione, entro il 2020, di 20 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio dei consumi di energia primaria. L'articolo 4, più precisamente, pone l'attenzione sugli immobili con la richiesta all'ENEA di proposte di intervento efficaci in termini di costi e differenziati in base al tipo di edificio e alla zona climatica. Il decreto inoltre stabilisce che ogni anno, nel periodo dal 2014 al 2020, si preveda la riqualificazione energetica di almeno il 3% della superficie coperta utile degli immobili appartenenti alla pubblica amministrazione, riducendo così il consumo e le emissioni di gas ad effetto serra. Tale obiettivo è stato successivamente prolungato fino al 2030 dal D.Lgs. 73/2020 che recepisce la direttiva 2018/2022.

Norme tecniche di riferimento

Una norma tecnica è un documento che stabilisce come applicare le regole stabilite dalle leggi definendo le specifiche tecniche, i criteri e i requisiti in relazione all'argomento che trattano. Possono diventare obbligatorie quando vengono richiamate in una legge o in un decreto. Di seguito sono riportate le due norme più importanti per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici.

- **UNI TS 11300:**

La specifica tecnica UNI TS 11300 nasce con l'obiettivo di definire una metodologia di calcolo univoca per la determinazione delle prestazioni energetiche degli edifici che dipendono dal sistema edificio-impianto, dalle caratteristiche termiche dell'involucro e dal rendimento degli impianti presenti. Questa norma stabilisce dunque i metodi per il calcolo del fabbisogno di energia per i servizi presenti nell'edificio (riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria, ventilazione, illuminazione, trasporto di persone) e per i rendimenti degli impianti termici. Si articola in sei parti:

- **UNI TS 11300-1:2014** “Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva e invernale”.
- **UNI TS 11300-2:2019** “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, la ventilazione e l'illuminazione”.
- **UNI TS 11300-3:2010** “Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva”.
- **UNI TS 11300-4:2016** “Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per riscaldamento di ambienti e preparazione acqua calda sanitaria”.
- **UNI TS 11300-5:2016** “Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 5: Calcolo dell'energia primaria e della quota di energia da fonti rinnovabili”.

- **UNI TS 11300-6:2016** “Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 6: Determinazione del fabbisogno di energia per ascensori, scale mobili e marciapiedi mobili”.

La UNI TS 11300 utilizza un approccio semplificato e statico basandosi su valori medi mensili per il calcolo delle prestazioni energetiche. In questo modo vengono considerate condizioni costanti per ogni mese dell'anno senza includere le variazioni giornaliere o orarie e quindi i parametri utilizzati, come temperature, irraggiamento, ecc., sono rappresentati da valori medi mensili. L'approccio usato è sicuramente più semplice e richiede meno risorse computazionali anche per il calcolo ma presenta alcuni limiti in quanto non considera il comportamento dinamico dell'edificio incidendo quindi sull'accuratezza del calcolo.

- **UNI EN ISO 52016:2018** “Prestazione energetica degli edifici – Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e raffrescamento”.

Questa norma tecnica internazionale definisce un metodo di calcolo dettagliato per analizzare il fabbisogno di energia dell'edificio e il bilancio termico dell'involucro dell'edificio, permettendo di ottenere l'andamento delle temperature interne e il carico termico richiesto all'impianto. La novità introdotta riguarda il nuovo approccio dinamico orario secondo cui il comportamento dell'edificio viene analizzato ora per ora tenendo quindi in considerazione anche le variazioni climatiche, dei carichi interni e dell'inerzia termica. Il vantaggio è che si ottiene una maggior accuratezza nel calcolo dei consumi e dei carichi. In aggiunta, la norma illustra le regole basilari per la definizione delle zone termiche, i dati di input necessari al calcolo, descrive gli algoritmi di risoluzione e i dati di output.

La UNI EN ISO 52016:2018 è una norma internazionale, recepita anche in Italia, che offre un approccio più avanzato per il calcolo delle prestazioni energetiche. Questa sta progressivamente integrando e sostituendo in alcune parti la UNI TS 11300 che è tuttora impiegata nelle certificazioni energetiche perché è più consolidata in quanto è stata sviluppata per adattarsi alle condizioni climatiche, normative e costruttive dell'Italia.

Una volta definite le normative che regolano l'intervento, risulta utile introdurre il contesto specifico in cui l'edificio oggetto d'esame si inserisce. Nel prossimo capitolo si analizzeranno le sedi del Politecnico, focalizzandosi sull'edificio scelto come caso di studio

3. Inquadramento storico dell'edificio

Storia del Politecnico

Il Politecnico di Torino nasce con la fusione di due istituzioni: la Regia Scuola di Applicazione, nata nel 1859, e il Regio Museo Industriale, inaugurato nel 1871.

Nel 1879 venne approvato un nuovo regolamento per il Regio Museo con la creazione di una nuova categoria di ingegneri detti industriali e grazie a ciò venne sancita la collaborazione fra il Regio Museo e la Regia Scuola di applicazione. Questa porgeva al problema della metodologia di preparazione degli ingegneri una soluzione soltanto transitoria mentre una soluzione definitiva si sarebbe potuta raggiungere soltanto per mezzo di una istituzione unica e propriamente organizzata.

Visto il crescente sviluppo, dal 1903 si iniziò ad avvertire l'esigenza di riformare i due istituti torinesi. Il 26 giugno 1905 l'onorevole Fortis, presidente del Consiglio dei ministri, presentò al Senato del Regno il progetto di legge per l'istituzione del Regio Politecnico di Torino che fondeva in sé la Regia Scuola e il Museo. L'intento non era quello di costituire un semplice istituto locale di istruzione tecnica superiore, bensì un ente nazionale per l'incremento dell'industria e dell'economia del Paese. Il disegno di legge divenne realtà nel 1906, anno in cui si inaugurò il primo anno del Politecnico.

Negli anni successivi, sia per l'aumento nel numero degli studenti nei tre anni di applicazione, sia per l'aumento degli anni di corso da tre a cinque, si ripresentò il problema dello spazio e dei locali limitati che, si può dire, non cessò mai di accompagnare il Politecnico durante la sua ormai lunga vita. Furono anni di espansione logistica dell'Istituto: dopo avere acquisito, come si rileva da un Decreto datato 5 gennaio 1908, gli stabili già della Scuola di Applicazione e del Regio Museo, ovvero il Castello del Valentino con tutte le sue attinenze ed il Palazzo del Museo industriale, il Regio Politecnico provvide ad ampliarli con la costruzione di nuove aule. Tuttavia, poiché a seguito di un continuo aumento nelle iscrizioni il problema dello spazio si era fatto nuovamente presente, furono conclusi degli accordi con il Governo e il Municipio di Torino per la costruzione di una nuova, unica e definitiva sede dell'Istituto. Così si pensava nel 1912 e mancò poco che essa non giungesse davvero alla tanto auspicata soluzione; purtroppo, lo scoppio della Prima guerra mondiale lo impedì.

Nel 1922 la direzione passò al Prof. Gustavo Colonnetti e, poco dopo, nell'aprile del 1923, il primo Politecnico di Torino si trasformava in Scuola di Ingegneria e in Scuola di Architettura.

A partire dal 1927 il Politecnico cominciò a ricevere forti contributi da enti pubblici e privati tra i quali spiccava la FIAT; nel 1938 Giovanni Agnelli annunciò al Consiglio d'amministrazione della sopracitata FIAT l'intenzione di stabilire al Lingotto una nuova sede del Politecnico, progetto però mai attuato a causa dello scoppio della Seconda guerra mondiale. Durante gli anni della guerra, la situazione non fece che peggiorare a causa di un bombardamento che nel 1942 colpì i fabbricati costituenti il Politecnico, che sorgevano sul terreno demaniale delimitato fra le vie Accademia Albertina, Giolitti, San Francesco da Paola e Cavour. I corsi di insegnamenti vennero trasferiti ad Acqui e nel 1944 Colonnetti inaugurò l'attività del Campo Universitario di Losanna dove professori e studenti, profughi dall'Italia, cercarono di ricomporre le basi per la ricostruzione, per la quale fu scelta l'area dell'ex Stadium Nazionale compresa fra i corsi Duca degli Abruzzi, Peschiera, Castelfidardo e Montevicchia.

Il progetto di costruzione della nuova sede si è valso dell'opera collegiale di un gruppo di professori di Istituto presieduto dal Prof. Arch. Giovanni Muzio ispirato al precedente progetto che fin dal 1940 era stato approntato per la costruzione del nuovo Politecnico sull'area della Cascina Ceresa in Regione Molinette, a quel tempo destinata a tale scopo. Detto progetto venne modificato e adattato alla configurazione della nuova area prescelta, adeguandolo alle esigenze della popolazione scolastica del tempo e tenendo conto degli incrementi futuri.

Nel frattempo, nel 1945 riaprì il Politecnico al Castello del Valentino e l'anno dopo, con la Proclamazione della Repubblica Italiana, si ebbe il passaggio dalla denominazione di Regio Politecnico a Politecnico di Torino

Sede centrale

Nel 1958, durante il rettorato di Antonio Capetti, venne inaugurata la nuova sede del Politecnico in corso Duca degli Abruzzi 24, dove furono trasferiti tutti gli istituti di Ingegneria, mentre la facoltà di Architettura rimase al Castello del Valentino. Il complesso degli edifici eretti nel '58, fu progettato e costruito in tre gruppi, aventi il fronte principale verso corso Duca degli Abruzzi.

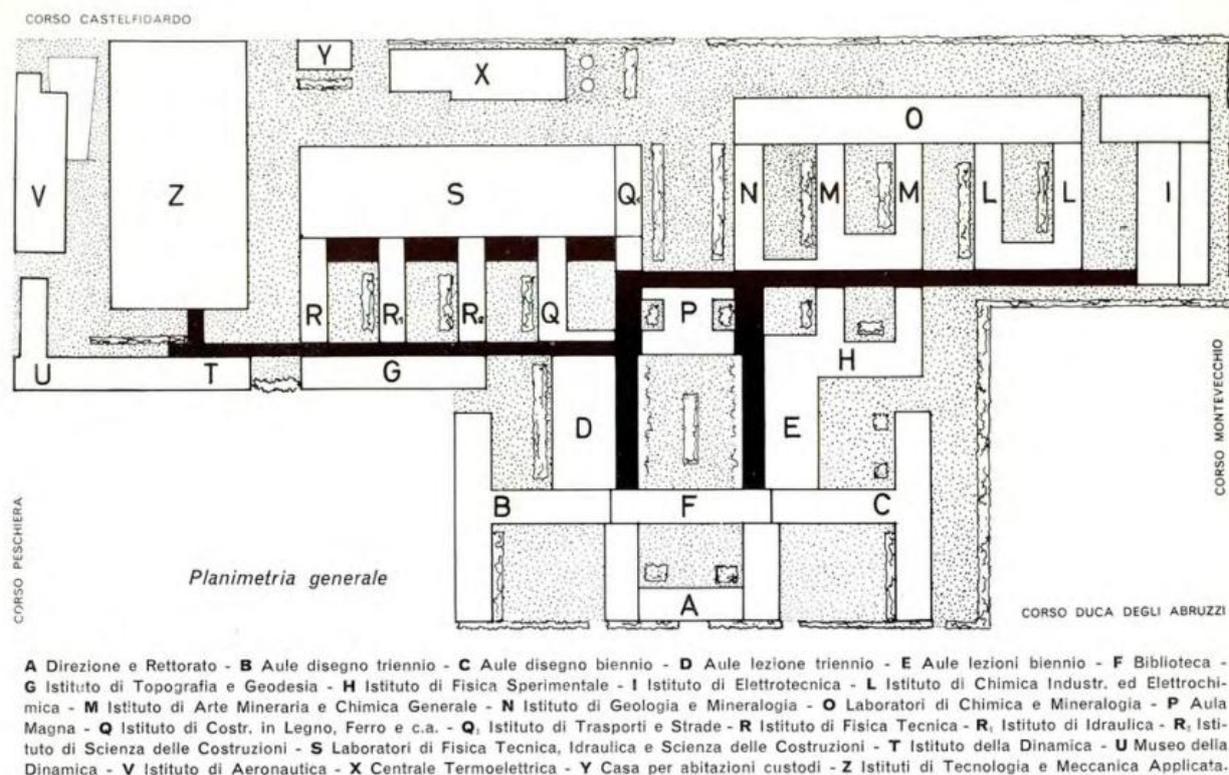


Figura 9 – Planimetria generale sede centrale Politecnico di Torino (1958)[4]

In un primo gruppo troviamo il Rettorato, il Palazzo della Direzione e gli Uffici amministrativi. A detto gruppo, formato da fabbricati a quattro o più piani fuori terra, si aggiunge l'edificio centrale dell'Aula Magna a due piani. Fa seguito un secondo ordine di edifici a tre o più piani destinati ai diversi Istituti, opportunamente intervallati da appositi cortili e distinti per complessi di categorie affini. Infine, segue un terzo gruppo di fabbricati a carattere prettamente industriale, destinato a laboratori sperimentali, che si salda alle testate dei rispettivi Istituti ed in cui trovano posto i macchinari e le attrezzature pesanti.

I dati caratteristici di questi edifici, che costituiscono il nucleo dell'attuale sede politecnica si possono invece così riassumere:

- Le strutture portanti, in tutti i fabbricati, sono state ottenute mediante ossature formate da pilastri disposti ad interassi modulati e solai in cemento armato con travi in spessore e chiusure perimetrali in muratura di mattoni a cassa vuota.
- Negli edifici di rappresentanza (il Rettorato e l'aula Magna) il rivestimento delle facciate è stato eseguito con lastre di pietra e la copertura dei tetti piani con un doppio ordine di solai debitamente impermeabilizzati
- Per gli Istituti ed annessi laboratori, invece le facciate sono state rivestite in piastrelle di litoceramica, mentre i tetti a falde inclinate sono stati costruiti con capriate in cemento armato del tipo prefabbricato.

Ampiamento delle maniche

Durante gli anni '80, a fronte del continuo incremento delle iscrizioni e quindi di una crescente inadeguatezza delle strutture, si inizia a pensare all'espansione del Politecnico nelle aree industriali dismesse delle Officine Grandi Riparazioni (OGR) comprese tra Corso Castelfidardo e Via Boggio, che però avverrà soltanto nel 2006. Per far fronte quindi alla crescente domanda di spazi da parte della popolazione del Politecnico, nell'88 viene avviato un progetto riguardo l'espansione di alcune strutture già esistenti all'interno della sede centrale. In una prima fase del lavoro sono state valutate le parti più idonee ad accogliere le proposte di ampliamento, veniva scartata ogni sopraelevazione delle maniche interne poiché non si voleva che i cortili, già assai ridotti, risultassero ulteriormente incassati.

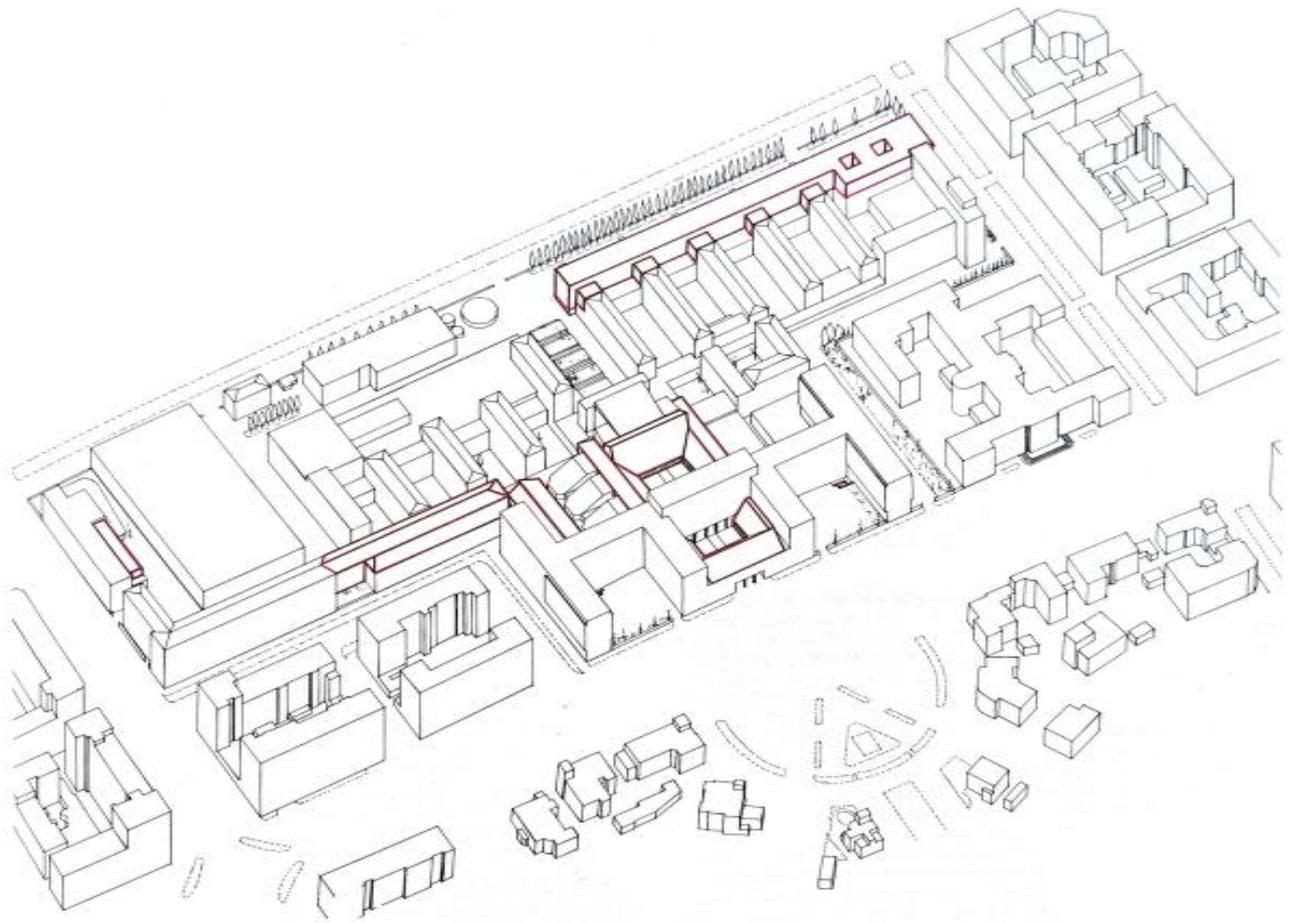


Figura 10 – Vista assonometrica interventi di ampliamento (1988) [6]

Le maniche oggetto di ampliamento sono state quella affacciata verso l'esterno su via Peano e quella a ridosso dei blocchi che si attestano su corso Castelfidardo nella parte più a Nord. I due nuclei individuati ospitavano quasi esclusivamente attività di tipo dipartimentale, la loro stessa disposizione, marginale e di appendice esistente, li rendeva adatti a soddisfare le esigenze di espansione dei laboratori e degli studi. I nuclei di ampliamento erano caratterizzati da una notevole e reciproca autonomia, conseguenza della loro dislocazione, non esisteva alcun punto di contatto diretto.

Ampliamento dell'edificio oggetto di studio

L'edificio oggetto di studio nella tesi risulta essere parte integrante dell'ampliamento a nord-ovest su corso Castelfidardo; esso prendeva spunto dalla semplicità dell'impianto esistente, ovvero maniche disposte a pettine attestate sul corridoio di collegamento.

Il fabbricato originario risale al 1958, anno di inaugurazione della nuova sede del Politecnico di Torino, e inizialmente era costituito da:

- una serie di bassi corpi di fabbrica, denominati "fabbricato O", adibiti a laboratori e collegati ad altri edifici più alti disposti "a pettine" dove erano collocati gli istituti di Geologia-Minerologia, di Arte Mineraria-Chimica Generale e Chimica Industriale-Elettrochimica;

- un basso fabbricato facente parte del “fabbricato I” dove trovava sede il Laboratorio di Elettrotecnica. I due edifici erano costituiti solamente da un piano fuori terra e da un piano in parte seminterrato.

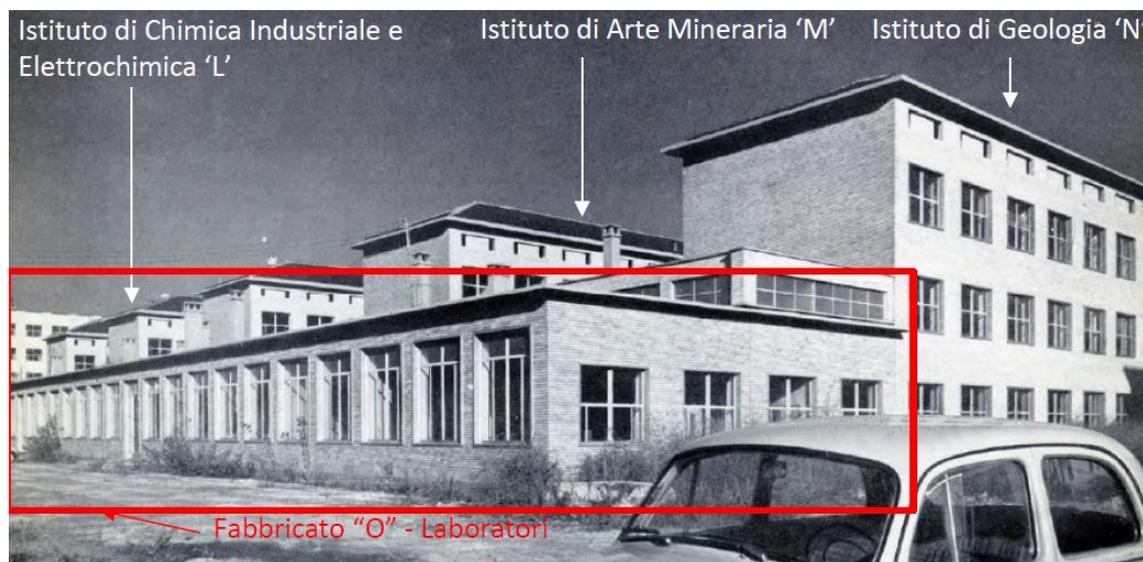


Figura 11 – Foto prima elevazione edificio oggetto di studio (1958) [5]

L'idea alla base del progetto di ampliamento di questo nucleo, prospiciente Corso Castelfidardo, era che in qualche modo si dovesse riprendere lo schema a pettine. Venivano pertanto sviluppate soluzioni che avevano tutte quella matrice. Da quei primi tentativi prendevano avvio i due progetti che si sarebbero concretati entrambi fino alla fase del progetto di massima. La soluzione infine adottata è stata quella presentata dall'architetto Sisto Giroidi, ci si è orientati verso un volume posto sopra i laboratori, dal fronte più lungo possibile in modo da assicurare la minima altezza possibile sui cortili e contemporaneamente il massimo di collegamenti possibili tra i blocchi degli istituti. Questo volume avrebbe avuto il fronte verso il corso il più chiuso possibile per tenere fuori il caldo dell'ovest e il rumore delle auto e dei treni ed avrebbe invece aperto liberamente gli uffici verso i cortili tranquilli. Il progetto prevede la costruzione di un blocco destinato ad ampliare gli spazi per i dipartimenti, al margine superiore del comparto, sovrapposto in parte ai laboratori esistenti.

Negli anni Ottanta iniziarono dunque i lavori di ampliamento su progetto di Sisto Giroidi, Pier Giuseppe Bardelli e Renato Piramide che terminarono nel 1992 e videro la realizzazione di una sopraelevazione di tre piani dei fabbricati originari e la realizzazione di “maniche di collegamento” verso gli Istituti adiacenti, sul lato Est dell'edificio. Sul lato Ovest furono inoltre realizzate cinque corpi scale in acciaio utilizzabili come vie di fuga in situazione di emergenza.

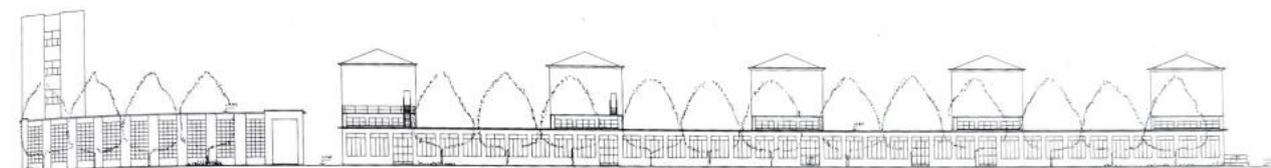


Figura 12 – Prospetto ovest pre-intervento di ampliamento [6]

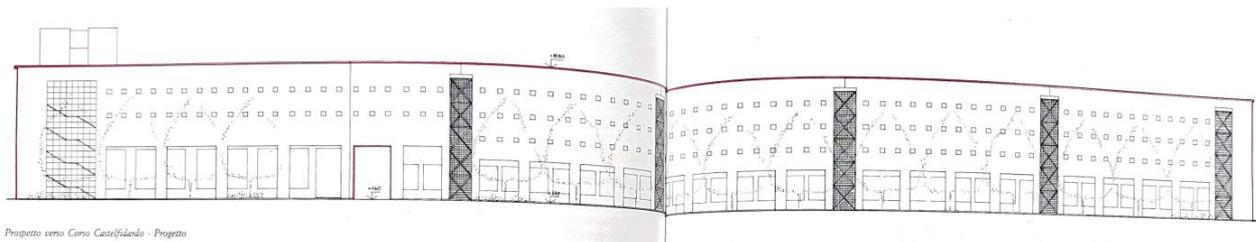


Figura 13 – Prospetto ovest post-intervento di ampliamento [6]

I laboratori non sono tutti eguali ed è possibile distinguere una piastra bassa a manica doppia, con una pilastrata centrale, ed un capannone, più alto con un'unica grande luce libera. Per questo l'edificio nuovo prevede tre piani sopra la piastra e solo due sopra il capannone, e per di più i piani presentano anche uno sviluppo diverso: sono a manica semplice nella parte sovrapposta ai laboratori, mentre sono a piastra con piccoli cortili interni nella parte sovrapposta al capannone.

La distribuzione orizzontale avviene attraverso corridoi dritti che completano la rete dei corridoi degli edifici esistenti mentre quella verticale avviene attraverso blocchi composti da scala ed ascensore, posti nei nodi del reticolo dei corridoi; sempre in questi nodi sono collocate le scale esterne di sicurezza. I tipi di spazi previsti vanno dall'unità standard minima (studio per due docenti o ricercatori) in serie lungo il corridoio, alle sale per riunioni, laboratori, biblioteche specializzate, disposte prevalentemente nei nodi di saldatura con i corpi esistenti e nella piastra a due piani.

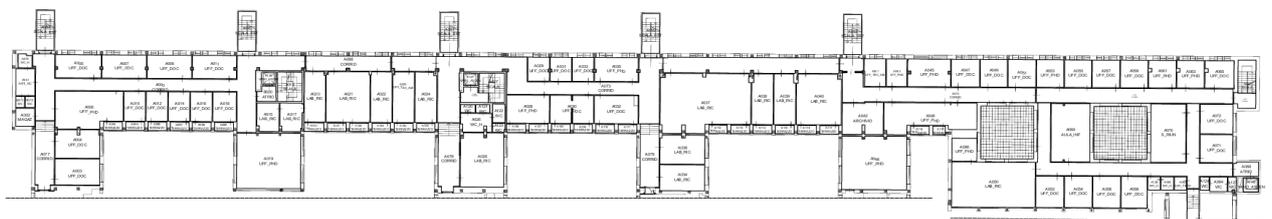


Figura 14 – Pianta secondo piano post-ampliamento[5]

L'ampliamento del corpo di fabbrica verso il Corso Castelfidardo (oggi denominato "Fabbricato 4A" e di cui si tratterà dettagliatamente nel successivo capitolo al fine di approfondirne l'analisi tecnica correlata con lo sviluppo della ricerca di tesi) ha pertanto consentito di disporre di nuovi spazi a laboratorio didattici e di ricerca, spazi ad ufficio e zone tecniche in coerenza con le esigenze e scelte strategiche dell'Ateneo.

4.Descrizione dello stato di fatto dell'edificio

L'edificio precedentemente descritto, identificato come Fabbricato 4A, è parte integrante della sede centrale del Politecnico di Torino di Corso Duca degli Abruzzi 24, nel comune di Torino. È situato ai limiti del quartiere Crocetta e al confine con zona Cenisia ed è dunque inserito in un contesto urbano circondato da alcune palazzine residenziali a nove piani fuori terra e da altri fabbricati del complesso edilizio del Politecnico. Essendo collocato quasi nel centro città, in territorio pianeggiante, le uniche cause di ombreggiamento sono costituite dagli edifici circostanti. La posizione precisa è identificata tramite le coordinate geografiche 45°03'51 N, 7°39'39 E.

Contesto climatico

L'edificio si colloca in zona climatica E secondo l'allegato A del Decreto del Presidente della Repubblica 412/93 in quanto il comune di Torino è caratterizzato da 2617 Gradi Giorno.

La temperatura esterna minima di progetto, secondo la UNI EN 12831-1:2018, è -8,0 °C e la temperatura massima estiva di progetto dell'aria esterna secondo norma è 31,0 °C. I dati climatici relativi alla posizione dello stabile sono decisi in base alla normativa e sono mostrati nell'immagine che segue.

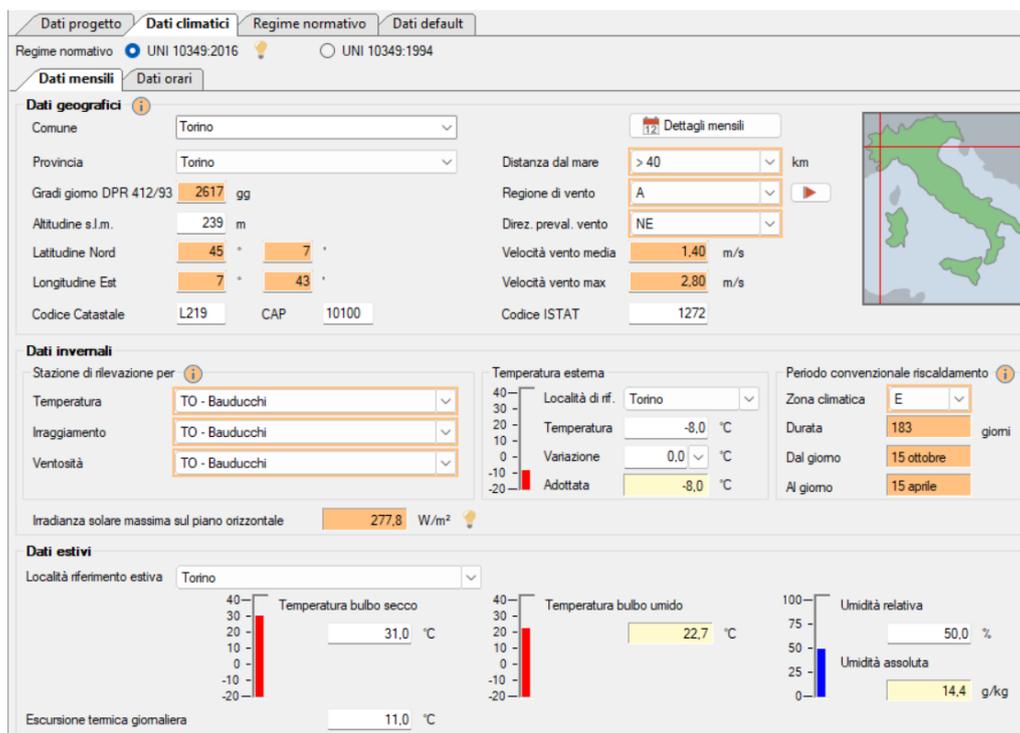


Figura 15 - Dati climatici [7]

La stazione di rilevazione dei dati climatici invernali è la stazione di Bauducchi nel comune di Moncalieri, a sud di Torino.

Descrizione edificio

Lo stabile è situato nel settore nord-ovest dell'università, disposto parallelamente a Corso Castelfidardo, con il lato Nord affacciato su corso Montevecchio.



Figura 16- Planimetria della sede centrale del Politecnico di Torino, con evidenziata la disposizione degli edifici e i relativi nomi [5]



Figura 17 - Vista satellitare dell'edificio

Allo stato attuale l'edificio è dunque costituito da un piano in parte seminterrato, quattro piani fuori terra e un piano sottotetto non abitabile e non riscaldato dove sono collocate le dorsali distributive

degli impianti meccanici. L'altezza complessiva è di circa 17 metri, la lunghezza si attesta sui 180 metri ed è possibile identificare due sezioni:

-una manica a pianta rettangolare, denominata “manica stretta”, con dimensioni 132x12m

-una manica a pianta rettangolare, denominata “manica ampia” con dimensioni 44x22m.



Figura 18 - Dettaglio dell'edificio con evidenza della manica singola (a sinistra) e della manica doppia (a destra)

Distribuzione degli spazi per piano

La superficie totale su cui si sviluppa il blocco 4A è di 11.334,12 m² ed ha un volume complessivo di 42.288,36 m³. L'edificio si compone di un piano seminterrato, quattro piani fuori terra e un piano sottotetto non abitabile per un'altezza complessiva di circa 17 metri.

Nella struttura trovano sede diversi spazi dedicati ai dipartimenti del Politecnico e, più precisamente, il Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI), il Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia (DISAT) e il Dipartimento Energia (DENERG). Questi sono suddivisi come descritto di seguito:

- Piano seminterrato manica stretta → laboratori didattici e di ricerca del DIATI e del DISAT, magazzini e locali tecnici.
- Piano seminterrato manica ampia → laboratori del DENERG, magazzini e locali tecnici.
- Piano terra manica stretta → laboratori didattici e di ricerca del DIATI e DISAT, uffici del DIATI, biblioteca DISAT, magazzini.
- Piano terra manica ampia → laboratori didattici e di ricerca del DENERG, due uffici dello stesso dipartimento, cabina elettrica.

- Primo piano manica stretta → sala riunioni DIATI e DISAT, laboratori ricerca DIATI e DISAT, uffici, magazzini.
- Primo piano manica ampia → il laboratorio DENERG del primo piano si sviluppa per un'altezza tale da occupare anche il secondo piano.
- Secondo piano manica stretta → uffici e laboratori di DISAT E DIATI.
- Secondo piano manica ampia → uffici e laboratori del DENERG, sala riunioni; in mezzo alla pianta di questa sezione sono presenti due cortili aperti.
- Terzo piano → uffici DISAT e DIATI su tutto il piano.
- Quarto piano → sottotetto non abitabile che ospita solo le dorsali degli impianti meccanici.

Al secondo piano e ai piani superiori la manica stretta e la manica ampia sono collegate tra loro grazie alla sopraelevazione realizzata nel 1992.

L'edificio viene classificato E.2 in base alla destinazione d'uso secondo l'art. 3 del DPR 412/93 e dunque rientra nella categoria "Edifici adibiti a uffici e assimilabili: pubblici o privati, indipendenti o contigui a costruzioni adibite anche ad attività industriali o artigianali, purché siano da tali costruzioni scorporabili agli effetti dell'isolamento termico".

Descrizione dei sub-sistemi costituenti l'involucro

Facciate e coperture

L'edificio è caratterizzato da una facciata massiccia rivestita in klinker, i prospetti esterni sul lato ovest mostrano un aspetto unitario, chiuso e monolitico con numerose finestre di piccola dimensione dove i pieni prevalgono sui vuoti. Un alto porticato conferisce all'edificio la sensazione di sollevamento dal terreno.



Figura 19 – Dettaglio prospetto ovest su C.so Castelfidardo [5]

Sul lato est i fronti interni sono invece aperti con fitte logge completamente vetrate per gli studi dei docenti.



Figura 20 – Dettaglio logge interne [5]

Il locale sottotetto è realizzato con una carpenteria in acciaio zincato con una copertura in lamiera grecata semplice a falda unica nella manica stretta e a falda doppia nella restante parte di copertura; la pendenza si attesta sul 9%. L'altezza è molto ridotta tanto che in alcuni punti raggiunge un minimo di 70 cm, il che rende poco agevoli i lavori di manutenzione in questi spazi. Le strutture sono in carpenteria metallica con travi reticolari appoggiate alla soletta.

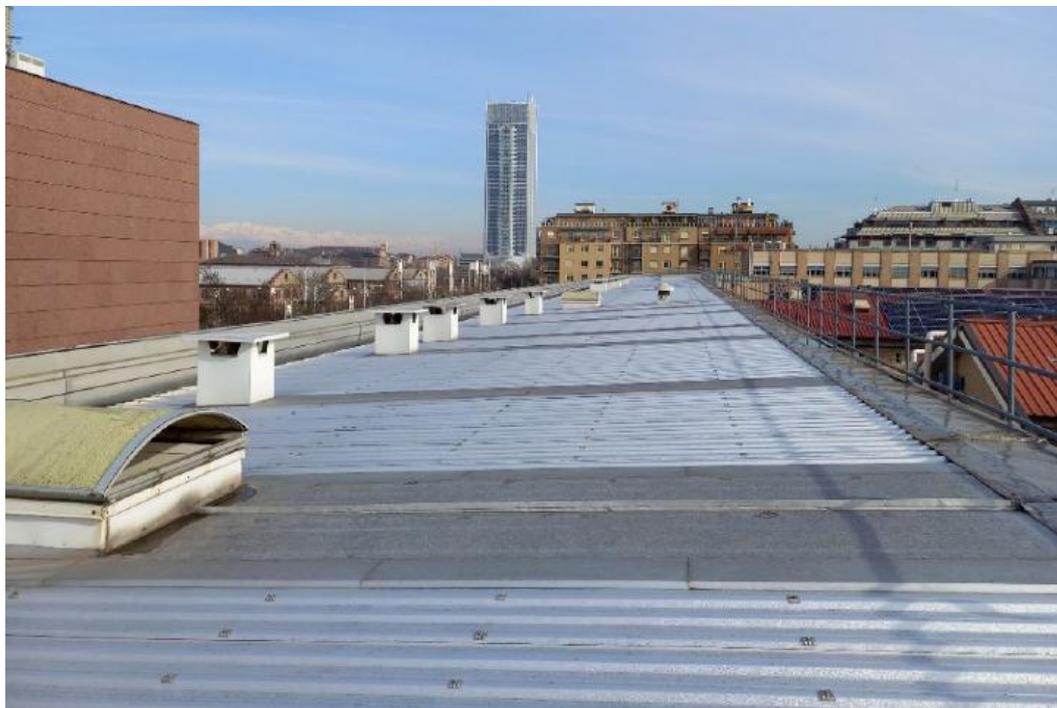


Figura 21 – Dettaglio della copertura [5]



Figura 22 – Dettaglio interno del sottotetto [5]

Il tetto piano degli avancorpi lato cortile è costituito da una soletta in laterizio e travetti non calpestabile, rivestito con guaina bituminosa

Paramenti e solai

Le strutture del fabbricato originario così come quelle della sopraelevazione sono state realizzate in cemento armato, con orizzontamenti in laterocemento e/o lastre predalles.

Le pareti lungo il perimetro sono del tipo a cassavuota, costituite da mattoni forati intermezzati da un'intercapedine non ventilata; nell'intermezzo sono inoltre presenti alcuni pluviali e ulteriori tubazioni a servizio degli impianti.

Sono state identificate cinque tipologie di pareti verticali che racchiudono i locali dell'edificio. Nella tabella di seguito sono riportate le caratteristiche di ciascuno, in particolare: spessore, trasmittanza termica, temperatura esterna invernale di progetto e verifica termoigrometrica.

Codice	Tipo	Descrizione	Spessore [mm]	Trasmittanza termica * (U) [W/(m ² K)]	Temperatura esterna di progetto [°C]	Verifica termo-igrometrica
M1	T	SDF_Pareti perimetrali	380	1,154	-8,0	✗
M2	G	SDF_Parete controterra	381	0,248	-8,0	✓
M3	D	SDF_Parete verso le scale	300	0,330	-	-
M4	D	SDF_Parete divisoria interna 1	110	2,186	-	-
M5	D	SDF_Parete divisoria interna 2	230	1,084	-	-

Tabella 3 - Tipologia delle pareti con spessore, trasmittanza e verifica termo-igrometrica. [3][5]

La tipologia delle pareti presenti è definita come:

- T → da locale climatizzato verso esterno;
- G → da locale climatizzato verso terreno;
- D → divisorio interno alla zona climatizzata.

M1 – Pareti Perimetrali → separano gli ambienti interni climatizzati dall'esterno e sono presenti in tutti i piani e lungo l'intero perimetro. Allo stato attuale la verifica termoigrometrica non è superata e dunque necessitano di intervento.

M2 – Parete Controterra → la parete in questione è collocata al piano seminterrato e divide l'ambiente interno climatizzato dal terreno circostante. Questo piano è sotto il livello stradale dal lato di Corso Castelfidardo e sui lati Nord e Sud. La verifica termoigrometrica è rispettata.

M3 – Parete verso le Scale → divisorio interno degli ambienti climatizzati, in particolare separa le scale di comunicazione tra piani dagli ambienti adiacenti. È impiegata in tutti i piani.

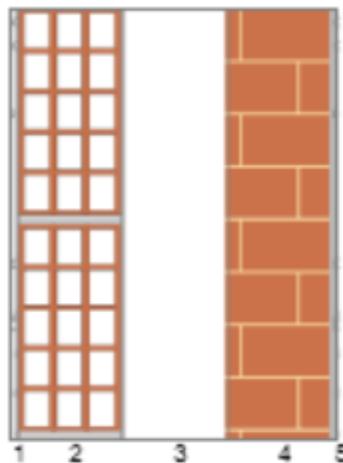
M4 – Parete Divisoria Interna 1 → divisorio interno prevalentemente impiegato e presente in tutto l’edificio. La parete è stata utilizzata per dividere i locali climatizzati presenti.

M5 – Parete Divisoria Interna 2 → altra tipologia di divisorio interno meno impiegato rispetto al muro M4 e differente per spessore e composizione interna.

Le pareti sopra descritte sono di seguito analizzate per mostrare in dettaglio la stratigrafia di ciascuna.

Le proprietà termofisiche dei materiali riportate nelle varie tabelle sono state estratte dal database di Edilclima, basato sulla norma UNI 10351:2021 [3]

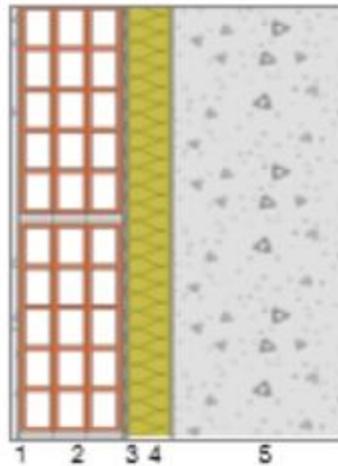
- M1 – Pareti perimetrali



N. Strato (da interno verso esterno)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduktività termica [W/(mK)]	Resistenza termica [m ² K/W]	Massa volumica [kg/m ³]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Intonaco di calce e gesso	10	0,700	0,014	1400	1,00	10
2	Mattone forato	120	0,387	0,310	717	0,84	9
3	Intercapedine non ventilata	120	0,667	0,180	-	-	-
4	Mattone pieno	120	0,800	0,150	1800	0,84	9
5	Malta di calce o di calce e cemento	10	0,900	0,011	1800	1,00	22

Tabella 4 – Stratigrafia parete M1 [3][5]

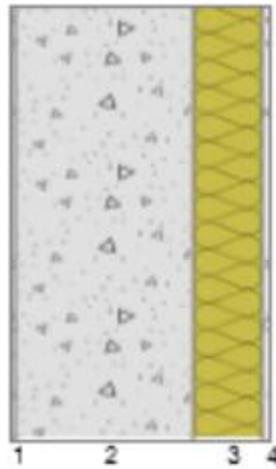
- M2 – Parete Controtterra



N. Strato (da interno verso esterno)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduttività termica [W/(mK)]	Resistenza termica [m ² K/W]	Massa volumica [kg/m ³]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Intonaco di gesso	10	0,570	0,018	1300	1,00	10
2	Mattone forato	120	0,387	0,310	717	0,84	9
3	Impermeabilizzazione con bitume	1	0,170	0,006	1200	1,00	188000
4	Polistirene espanso sint. in lastre	50	0,040	1,250	25	1,45	44
5	C.l.s. di sabbia e ghiaia	200	2,150	0,093	2400	1,00	96

Tabella 5 - Stratigrafia parete M2 [3][5]

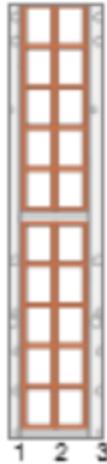
- M3 – Parete Verso le Scale



N. Strato (da interno verso esterno)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduktività termica [W/(mK)]	Resistenza termica [m ² K/W]	Massa volumica [kg/m ³]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Intonaco di gesso	10	0,400	0,025	1000	1,00	10
2	C.I.S. in genere	200	0,730	0,274	1600	1,00	96
3	Polistirene espanso, estruso con pelle	80	0,033	2,424	35	1,45	60
4	Cartongesso in lastre	10	0,210	0,048	700	1,00	10

Tabella 6 - Stratigrafia parete M3 [3][5]

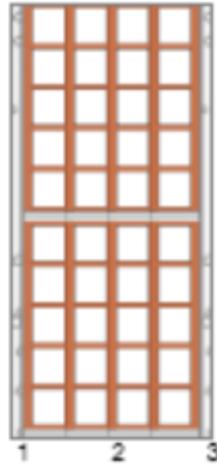
- M4 – Parete divisoria interna 1



N. Strato (da interno verso esterno)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduttività termica [W/(mK)]	Resistenza termica [m ² K/W]	Massa volumica [kg/m ³]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Intonaco di gesso e sabbia	15	0,8	0,019	1600	1,00	10
2	Muratura in laterizio pareti interne	80	0,5	0,160	1400	1,00	7
3	Intonaco di gesso e sabbia	15	0,8	0,019	1600	1,00	10

Tabella 7 - Stratigrafia parete M4 [3][5]

- M5 – Parete divisoria interna 2



N. Strato (da interno verso esterno)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduktività termica [W/(mK)]	Resistenza termica [m ² K/W]	Massa volumica [kg/m ³]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Intonaco di gesso e sabbia	15	0,80	0,019	1600	1,00	10
2	Muratura in laterizio alveolato	200	0,32	0,625	870	1,00	5
3	Intonaco di gesso e sabbia	15	0,80	0,019	1600	1,00	10

Tabella 8 - Stratigrafia parete M5 [3][5]

Sono state identificate quattro tipologie di solai a separazione dei piani dell'edificio. Nella tabella di seguito sono riportate le caratteristiche e in particolare: spessore, trasmittanza termica, temperatura esterna invernale di progetto e verifica termoigrometrica.

Codice	Tipo	Descrizione	Spessore [mm]	Trasmittanza termica [W/(m ² K)]	Temperatura esterna di progetto [°C]	Verifica termo-igrometrica
P1	G	SDF_Solaio contro terra	610	0,251	-8,0	✓
P2	D	SDF_Solaio interpiano	453	0,541	-	-
P3	T	SDF_Solaio su porticato lato Ovest	330	1,439	-8,0	✗
P4	T	SDF_Solaio sottotetto	450	0,577	-8,0	✗

Tabella 9 - Tipologia dei solai con spessore, trasmittanza e verifica termo-igrometrica. [3][5]

La tipologia dei solai presenti è definita come:

- T → da locale climatizzato verso esterno;
- G → da locale climatizzato verso terreno;
- D → divisorio interno alla zona climatizzata.

P1 – Solaio Controterra → divisorio presente solamente nel piano seminterrato, separa il terreno dai locali climatizzati.

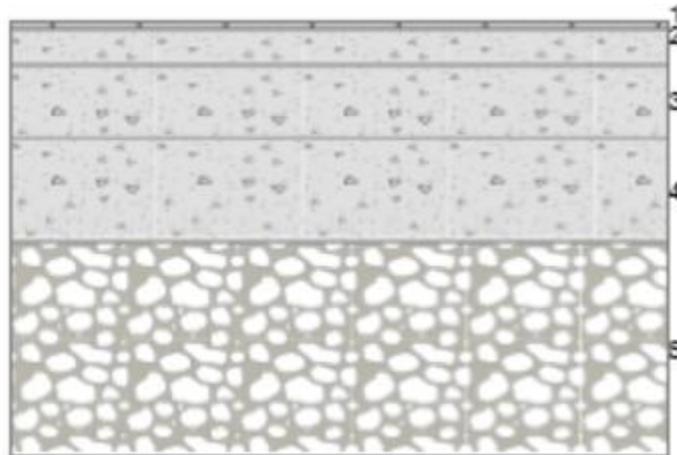
P2 – Solaio interpiano → il solaio in questione è impiegato come divisorio interno tra i differenti piani dello stabile e separa solamente ambienti climatizzati.

P3 – Solaio sul Porticato → il solaio è presente al secondo piano ed è il soffitto del porticato collocato sul lato Ovest; esso è dunque la struttura che separa i locali climatizzati presenti al di sopra del porticato dall'ambiente esterno. La verifica termoigrometrica non è rispettata ed è quindi necessario un intervento.

P4 – Solaio Verso Tetto → solaio dell'ultimo piano climatizzato che lo divide dal locale sottotetto non climatizzato. La struttura non rispetta i requisiti minimi per la trasmittanza termica e dunque è necessario un intervento.

Analogamente a quanto riportato per le pareti, anche le proprietà termofisiche dei materiali dei solai sono state estratte dal database Edilclima, basato sulla norma UNI 10351: 2021. Di seguito sono mostrate e analizzate le stratigrafie dei differenti solai presenti all'interno dell'edificio.

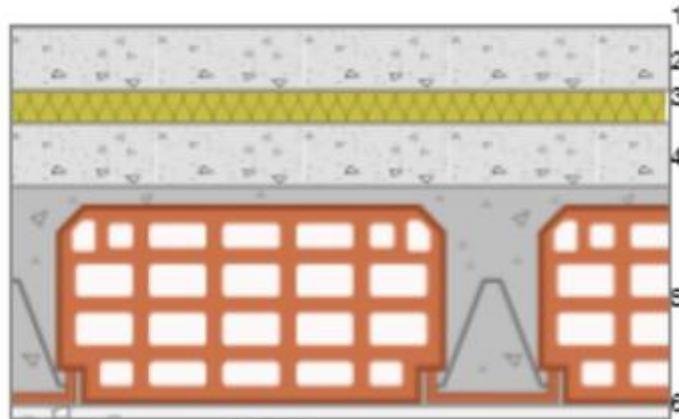
- P1 – Solaio controterra nel piano seminterrato



N. Strato (dall'alto verso il basso)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conducibilità termica [W/(mK)]	Resistenza termica [m ² K/W]	Massa volumica [kg/m ³]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Piastrelle in ceramica	10	1,30	0,008	2300	0,84	9999999
2	Sottofondo di cemento magro	50	0,90	0,056	1800	0,88	30
3	C.l.s. di argilla espansa	100	0,94	0,106	1500	1,00	96
4	C.l.s. di sabbia e ghiaia	150	2,15	0,070	2400	1,00	96
5	Ghiaia grossa senza argilla	300	1,20	0,250	1700	1,00	5

Tabella 10 - Stratigrafia solaio P1 [3][5]

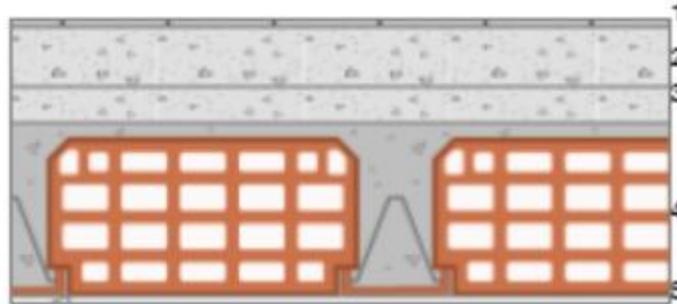
- P2 – Solaio interpiano



N. Strato (dall'alto verso il basso)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduttività termica [W/(mK)]	Resistenza termica [m ² K/W]	Massa volumica [kg/m ³]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Linoleum	3	0,170	0,018	1200	1,40	1000
2	Sottofondo di cemento magro	70	0,900	0,078	1800	0,88	30
3	Polistirene espanso sint. in lastre	40	0,041	0,976	20	1,45	44
4	C.l.s. armato	70	2,300	0,030	2300	1,00	130
5	Soletta in laterizio	250	0,660	0,379	1100	0,84	7
6	Intonaco di calce e gesso	20	0,700	0,029	1400	1,00	10

Tabella 11 - Stratigrafia solaio P2 [3][5]

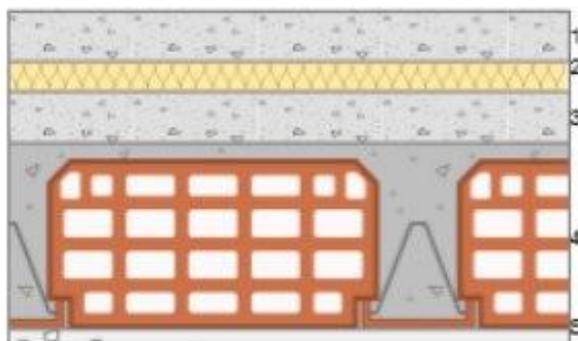
- P3 – Solaio sul Porticato



N. Strato (dall'alto verso il basso)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduttività termica [W/(mK)]	Resistenza termica [m ² K/W]	Massa volumica [kg/m ³]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Piastrelle in ceramica	10	1,30	0,008	2300	0,84	999999
2	Sottofondo di cemento magro	70	0,70	0,100	1600	0,88	20
3	C.l.s. di sabbia e ghiaia	40	1,26	0,032	2000	1,00	96
4	Soletta in laterizio	200	0,66	0,303	1100	0,84	7
5	Malta di calce o di calce e cemento	10	0,90	0,011	1800	1,00	22

Tabella 12 - Stratigrafia solaio P3 [3][5]

- P4 – Solaio Verso Tetto



N. Strato (dall'alto verso il basso)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduttività termica [W/(mK)]	Resistenza termica [m ² K/W]	Massa volumica [kg/m ³]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Sottofondo di cemento magro	70	0,900	0,078	1800	0,88	30
2	Polistirene espanso sint. in lastre	40	0,041	0,976	20	1,45	44
3	C.l.s. armato	70	2,300	0,030	2300	1,00	130
4	Soletta in laterizio	250	0,660	0,379	1100	0,84	7
5	Intonaco di calce e gesso	20	0,700	0,029	1400	1,00	10

Tabella 13 - Stratigrafia solaio P4 [3][5]

La copertura dell'ultimo piano è realizzata in lamiera grecata semplice e divide il locale sottotetto non climatizzato dall'ambiente circostante; la sua stratigrafia è mostrata di seguito:

- S1 – Copertura del locale sottotetto



N. Strato (dall'alto verso il basso)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduttività termica [W/(mK)]	Resistenza termica [m ² K/W]	Massa volumica [kg/m ³]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Acciaio	40	52,00	0,001	7800	0,45	9999999
2	Barriera vapore in bitume puro	1	0,17	0,006	1050	1,00	50000

Tabella 14 - Stratigrafia copertura sottotetto [3][5]

Serramenti

L'edificio presenta numerosi serramenti che variano per geometria: sulla facciata Ovest, nei piani primo, secondo e terzo sono presenti finestre piccole e quadrate con dimensione 80x80 cm che conferiscono alla parte superiore dell'edificio un aspetto chiuso e monolitico. Sullo stesso lato, sotto l'alto porticato, finestre di grandi dimensioni permettono un grande afflusso luminoso sui laboratori collocati al pian terreno ma differiscono per geometria dalla manica stretta a quella ampia. Sul lato Est i serramenti sono di media-grande dimensione e di diversa tipologia in quanto variano per forma. Per quanto riguarda i materiali utilizzati, tutti i serramenti sono di tipologia a vetro singolo mentre i telai sono prevalentemente in PVC ad eccezione dei finestroni al pian terreno che essendo di più vecchia costruzione sono in metallo. Allo stato di fatto sono presenti tende e veneziane esterne su alcune finestre del lato Est.

I principali parametri tecnici dei serramenti sono di seguito riassunti:

- Trasmittanza termica del serramento $U_w = 2,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- Trasmittanza termica del vetro $U_g = 2,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Nella tabella 15 sono riassunti i componenti finestrati dell'edificio con le dimensioni e i valori di trasmittanza termica associati.

Codice	Tipo	Descrizione	Larghezza [cm]	Altezza [cm]	Trasmittanza termica [W/(m ² K)]
W1	T	SDF_Serramento 80x80 P1-2-3	80	80	2,2
W2	T	SDF_Serramento 265x219	265	219	2,2
W3	T	SDF_Serramento 265x219_2	265	219	2,2
W4	T	SDF_Serramento Laboratorio Chimica	240	306	2,2
W5	T	SDF_Serramento Laboratorio Chimica Alluminio	270	480	2,2
W6	T	SDF_Serramento Laboratori prospetto Est	270	225	2,2
W7	T	SDF_Serramento prospetto Est	350	250	2,2
W8	T	SDF_Serramento prospetto Est loggiato	265	265	2,2
W9	T	SDF_Serramento prospetto Est_3	180	265	2,2
W10	T	SDF_Serramento prospetto Nord	270	270	2,2
W11	T	SDF_Serramento prospetto Ovest	220	220	2,2
W12	T	SDF_Serramento prospetto Est_ST	255	123	2,2
W13	T	SDF_Serramento prospetto Est_ST	255	247	2,2

Tabella 15 - Tabella riassuntiva delle finestre con relative dimensioni. [5]

La tipologia delle pareti presenti è definita come:

- T → da locale climatizzato verso esterno.



Figura 23 – Dettaglio elementi finestrati [5]

Impianti di climatizzazione

All'interno dell'edificio sono presenti i servizi di riscaldamento e di raffrescamento con un impianto centralizzato per ciascuno dei due, la ventilazione dei laboratori per un corretto ricambio d'aria e la fornitura di acqua calda sanitaria la cui produzione è combinata con il riscaldamento.

Generazione:

La climatizzazione estiva della sede centrale è soddisfatta da diversi gruppi frigorifero per una potenza complessiva di 5 MW a servizio dell'intero Politecnico. Due macchine frigorifere con potenza di 668,8 e 913,7 kW sono invece a servizio del gruppo di fabbricati noto come TO_CEN 04, di cui fa parte l'edificio 4A. Queste macchine sono alimentate tramite energia elettrica e di seguito sono riportate alcune caratteristiche e prestazioni:

- Produttore: EMICON
- Anno di installazione: 2016
- Fluido refrigerante: R134a
- Potenza frigo nominale = 615 kW
- Indice di efficienza energetica EER = 3,2

La potenza frigorifero nominale a servizio del fabbricato è stata stimata sulla base delle volumetrie servite in quanto non vi è alcun dispositivo per la contabilizzazione dei consumi del singolo edificio.

La climatizzazione invernale è soddisfatta tramite la rete di teleriscaldamento di Torino, progettata e gestita da IREN Energia, attraverso una sottostazione dove l'energia termica della rete cittadina è trasmessa al circuito dell'impianto di riscaldamento dell'edificio. La potenza utile nominale è di 918,6 kW.

Distribuzione:

La distribuzione principale, costituita da due dorsali, è collocata nel sottotetto e lungo essa si trovano i diversi stacchi che, tramite le colonne montanti, permettono di servire i numerosi terminali collocati sui diversi piani dell'edificio. La rete in copertura è realizzata in acciaio con un isolamento in lana minerale e finitura superficiale in nastratura in PVC (isogenopac). Ogni stacco è sezionato con valvole a farfalla o a sfera filettate su quelli con diametro minore. La rete di distribuzione, realizzata nel 1993, attualmente risulta obsoleta e dunque necessita di una sostituzione.



Figura 24 – Dettaglio della dorsale di distribuzione [5]

Terminali:

I locali adibiti a servizi igienici sono serviti da una rete di radiatori a funzionamento continuo in cui circola acqua con una temperatura fissa di mandata a 70 °C. Nel resto dell'edificio una rete di ventilconvettori idronici a due tubi con inversione stagionale in centrale permette sia il riscaldamento sia il raffrescamento dei locali. Durante la climatizzazione invernale nei ventilconvettori circola acqua ad una temperatura media di 45 °C mentre nel funzionamento estivo la temperatura è di 7 °C. Il funzionamento di questi terminali è di tipo ON-OFF e la loro regolazione è manuale tramite i comandi di bordo.



Figura 25 – Foto ventilconvettore [5]



Figura 26 – Foto radiatore [5]

Impianto ventilazione:

Nei laboratori del dipartimento di chimica sono presenti estrattori per la ventilazione degli spazi che tramite condotti verticali permettono lo sfogo dell'aria al di sopra della copertura.



Figura 27 – Foto sfogo estrattori per la ventilazione dei laboratori [5]

5. Metodo di calcolo delle prestazioni energetiche dell'edificio

Partendo dall'analisi dello stato di fatto del fabbricato risulta fondamentale studiare prima di tutto le prestazioni energetiche attuali. Questo passaggio permette di comprendere al meglio le aree dove si può intervenire, ottimizzando i consumi e migliorando il confort degli ambienti interni.

Nel presente lavoro di tesi si è scelto di calcolare le prestazioni energetiche dell'edificio oggetto di studio utilizzando il metodo dinamico orario, secondo la norma tecnica UNI EN ISO 52016-1:2018. Tale norma rappresenta un'evoluzione della UNI EN ISO 13790:2008 da cui deriva la specifica tecnica UNI/TS 11300-1:2014, attualmente in vigore in Italia per i calcoli di legge come la verifica dei requisiti minimi e la certificazione energetica, e basata su un approccio di calcolo mensile. Il metodo dinamico orario offre una maggiore accuratezza rispetto al metodo mensile ma al momento è impiegato solamente per la diagnosi energetica o la progettazione avanzata, in quanto non richiesto dalla normativa vigente.

La UNI EN ISO 52016-1:2018 permette di calcolare, su base oraria e per un periodo annuale, i seguenti parametri:

- il **carico termico sensibile** per riscaldamento e raffrescamento;
- il **carico latente** per umidificazione e deumidificazione;
- la **temperatura interna**, comprensiva di temperatura dell'aria, temperatura media radiante e temperatura operativa;
- il **carico di progetto sensibile** per riscaldamento e raffrescamento;
- il **carico di progetto latente** per umidificazione e deumidificazione.

Il metodo orario è finalizzato a esaminare l'effetto dinamico delle variazioni orarie e giornaliere delle condizioni meteo e delle attività interne sui sistemi di riscaldamento e raffrescamento. In particolare, il calcolo della temperatura interna di una stanza o di una zona avviene risolvendo, su base oraria, un sistema di equazioni che descrive lo scambio termico tra l'ambiente esterno e quello interno, attraverso gli elementi opachi e trasparenti dell'involucro edilizio.

Questo metodo si distingue per la capacità di analizzare separatamente i flussi di calore attraverso i vari componenti edilizi, esposti a diverse condizioni ambientali, come la copertura e il pavimento controterra, senza doverli aggregare in un unico calcolo generale. Questo approccio supera un limite dei tradizionali metodi di analisi energetica, che tendevano a semplificare i vari flussi termici combinandoli in un unico valore per ridurre il carico computazionale e per la mancanza di dati specifici. Il metodo orario, al contrario, consente di mantenere separate le caratteristiche termiche di ciascun elemento costruttivo, modellando con maggiore precisione l'interazione dinamica tra ciascun elemento e l'ambiente esterno.

Dati di input

Per poter applicare il metodo dinamico orario, la UNI EN ISO 52016-1:2018 richiede prima di tutto, la disponibilità di dati climatici dettagliati per ogni ora, tra cui:

- **Temperatura dell'aria esterna** della località in esame ($^{\circ}\text{C}$);
- **Il contenuto di umidità** dell'aria esterna (kg/kg di aria secca);
- **L'irradianza solare oraria**, sia diretta che diffusa, misurata su un piano orizzontale e su superfici inclinate orientate rispetto i quattro punti cardinali (W/m^2);
- La **velocità del vento** (m/s).

Successivamente per ogni zona termica condizionata dell'edificio e per ogni intervallo orario, devono essere definiti vari parametri relativi all'utilizzo della zona e agli impianti presenti. Questi parametri includono:

- il **set-point della temperatura interna** per riscaldamento (in $^{\circ}\text{C}$) e per raffrescamento (in $^{\circ}\text{C}$);
- la **potenza disponibile dell'impianto** per riscaldamento (in W) e per raffrescamento (in W);
- il **flusso di ventilazione in ingresso** (m^3/s);
- gli **apporti interni complessivi** divisi tra il calore generato dagli occupanti (in W/m^2), dalle apparecchiature (in W/m^2) e dall'illuminazione (in W/m^2).

Questi dati permettono di descrivere in dettaglio il comportamento energetico di ogni zona condizionata, tenendo in considerazione i contributi specifici legati alla climatizzazione, alla ventilazione e agli apporti di calore interni.

Algoritmo di calcolo

Questo approccio considera ogni strato costruttivo in modo distinto, utilizzando un modello resistivo-capacitivo in cui le "resistenze" rappresentano le resistenze termiche degli strati e le "capacità" le relative capacità termiche.

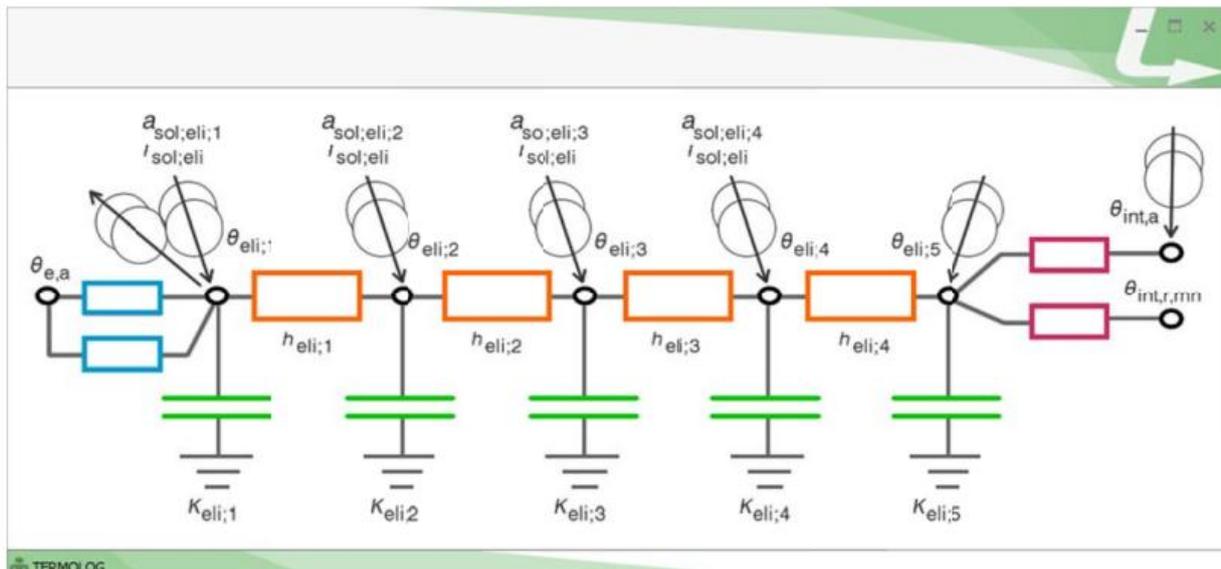


Figura 28 – Schematizzazione modello resistivo-capacitivo [8]

Il modello, illustrato nella figura schematica, mostra:

- 5 nodi per le temperature e i flussi di calore,
- 4 resistenze termiche che rappresentano la capacità di ciascun strato di opporsi al flusso di calore,
- 5 condensatori che indicano la capacità di accumulo termico degli strati.

A questa struttura di base si aggiungono ulteriori nodi e resistenze per calcolare:

- 1 nodo per la temperatura dell'aria interna nella zona termica,
- 1 nodo per la temperatura dell'aria esterna,
- 2 resistenze convettive, che regolano il passaggio di calore tra i diversi ambienti,
- 2 resistenze radiative, che rappresentano lo scambio di calore tramite irraggiamento.

Il processo di calcolo poi si sviluppa in più passaggi:

1. Si calcola la temperatura operativa interna, assumendo che non ci siano impianti in funzione, e si confronta con i valori di set-point per il riscaldamento e il raffrescamento. Se la temperatura è nel range desiderato, l'impianto non viene attivato;
2. Se necessario, si calcolano le potenze di riscaldamento o raffrescamento per raggiungere la temperatura di set-point;
3. Si verifica se la potenza disponibile dell'impianto di riscaldamento o raffrescamento è sufficiente per coprire il fabbisogno energetico calcolato nel passaggio precedente;
4. Se la potenza non è adeguata, si ricalcola la temperatura operativa interna, che potrebbe non trovarsi più nel range di set-point, e si determinano le temperature dei nodi delle strutture;

5. Infine, si calcola il carico effettivo di energia necessario per il riscaldamento o il raffrescamento.

Per calcolare le temperature dei nodi delle strutture, l'algoritmo richiede la risoluzione di un sistema di equazioni di bilancio energetico, considerando sia la zona nel suo insieme che i singoli elementi costruttivi, l'analisi e la risoluzione di questi bilanci termici richiedono l'uso di software capaci di gestire un complesso sistema matriciale.

Software EDILCLIMA

Il Decreto Ministeriale 26 giugno 2015 oltre a definire le modalità di applicazione del metodo di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, ne stabilisce anche gli strumenti necessari per il corretto calcolo. Gli strumenti e i software sono validati dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI) e devono garantire un'accuratezza elevata nei calcoli degli indici di prestazione energetica, con uno scostamento massimo di $\pm 5\%$ rispetto ai corrispondenti parametri determinati con l'applicazione dello strumento nazionale di riferimento. Tale garanzia viene fornita tramite una dichiarazione del CTI dopo una verifica del rispetto dell'accuratezza.

Un esempio di software conforme a tali requisiti è EC700 di Edilclima, validato dal CTI e inserito nel Registro dello Strumento Nazionale. Questo software supporta calcoli energetici per gli edifici utilizzando sia il metodo mensile che quello dinamico orario e permette di realizzare diagnosi energetiche, progettare soluzioni integrate e produrre attestati di prestazione energetica.

Il software costituisce l'elemento di calcolo base e, grazie all'integrazione con fogli di calcolo Excel, consente di assolvere a tutti gli obiettivi posti dalla presente tesi.

6. Zonizzazione dell'edificio

Il metodo di calcolo delle prestazioni energetiche dell'edificio definito nella norma UNI EN ISO 52016:2018 prevede che i calcoli siano eseguiti separatamente per le diverse zone termiche dell'immobile, che possono essere tra loro accoppiate o meno. La norma inoltre fornisce alcune indicazioni per la valutazione delle zone termiche.

Definizione delle zone termiche

Una zona termica è definita come parte dell'ambiente climatizzato mantenuta a temperatura e, possibilmente, umidità costante attraverso l'impiego della stessa tipologia di impianti e di regolazione durante la climatizzazione. La suddivisione dell'intero edificio in zone termiche può essere eseguita secondo vari criteri, solitamente è consigliato includere in una zona i locali con condizioni di utilizzo e di tipologia di climatizzazione simile. Nell'edificio sotto studio sono state identificate 26 zone termiche, le cui caratteristiche sono riassunte nella tabella 16.

Zona	Descrizione	Superficie in pianta netta [m ²]	Volume lordo [m ³]	Superficie disperdente lorda [m ²]	Rapporto di forma S/V [m ⁻¹]
1	ZONA LAB ST OVEST	213,33	1012,27	492,56	0,49
2	ZONA COMUNE ST	930,18	4318,68	1600,62	0,37
3	ZONA LAB ST EST	653,6	2977,63	953,53	0,32
4	ZONA SERVIZI ST	17,74	86,22	23,05	0,27
5	ZONA LAB PT OVEST	827,8	5308,14	698,86	0,13
6	ZONA LAB PT EST	442,36	2838,8	275,47	0,1
7	ZONA UFFICI PT EST	291,73	1949,88	358,08	0,18
8	ZONA COMUNE PT	754,51	4875,83	355,95	0,07
9	ZONA SERVIZI PT	19,61	134,08	21,47	0,16
10	ZONA COMUNE P1	570,36	2057,4	459,04	0,22
11	ZONA SERVIZI P1	42,2	160,58	37,72	0,23
12	ZONA LAB P1 EST	590,89	2024,79	263,96	0,13
13	ZONA UFFICI P1 OVEST	106,6	378,13	80,91	0,21
14	ZONA UFFICI P1 EST	199,93	715,56	148,31	0,21
15	ZONA COMUNE P2	772,65	2757,65	539,47	0,2
16	ZONA LAB P2 EST	490,71	1697,66	247,97	0,15
17	ZONA SERVIZI P2	57,53	221,83	49,89	0,22
18	ZONA UFFICI P2 OVEST	339,91	1228,07	295,67	0,24

19	ZONA UFFICI NORD P2	192,48	691,47	155,09	0,22
20	ZONA UFFICI P2 EST	353,51	1247,6	230,71	0,18
21	ZONA COMUNE P3	682,65	2429,35	441,3	0,18
22	ZONA SERVIZI P3	65,67	260,73	78,88	0,3
23	ZONA UFFICI NORD P3	30,58	109,45	22,43	0,2
24	ZONA UFFICI P3 OVEST	432,34	1570,46	381,54	0,24
25	ZONA UFFICI P3 EST	586,58	2093,76	452,34	0,22
26	ZONA UFFICI PT OVEST	100,39	662,24	104,31	0,16

Tabella 16 - Tabella delle zone termiche dell'edificio

Una planimetria generale che evidenzia in modo più chiaro le differenti zone termiche per tutti i cinque piani dell'edificio è disponibile nell'allegato [Zone Termiche](#)

La suddivisione è stata realizzata considerando:

- Tipologia di utilizzo degli ambienti: sono stati identificati locali per uffici, laboratori, servizi e zone comuni (scale, corridoi e sale riunioni).
- I differenti piani dell'edificio: seminterrato (ST), piano terra (PT) e i tre piani fuori terra (P1, P2 e P3).
- La differente esposizione dei locali: principalmente EST e OVEST in quanto l'edificio ha una forma stretta e lunga.

Al di sopra del terzo piano è presente un sottotetto non climatizzato in cui sono presenti le condotte per gli impianti. Tale locale è stato modellato come zona non climatizzata e di seguito sono riportate le caratteristiche:

Descrizione	Superficie utile [m ²]	Volume netto [m ³]	Fattore di correzione $b_{tr,u}$
Zona sottotetto	2085,2	2482	0,8

Tabella 17 - Zone dell'edificio non climatizzate

Dati di input delle zone termiche

In ciascuna zona termica è necessario definire un profilo orario in cui vengono definiti i seguenti parametri:

- Set point di temperatura invernale
- Set point di temperatura estiva
- Set point ridotto per utilizzo invernale ed estivo in condizioni di utilizzo parziale
- Profilo di occupazione delle zone

- Profilo dell'andamento della temperatura durante i giorni feriali e festivi
- Apporti interni dovuti a persone, illuminazione, apparecchiature.

Il software Edilclima include un database con profili orari e valori suggeriti sulla base del tipo di utilizzo degli ambienti. Per rendere il modello dell'edificio più veritiero possibile, questi profili sono stati adattati in fase di modellazione e calibrazione secondo le informazioni a disposizione e attraverso l'analisi e il confronto dei consumi simulati e reali.

I valori di set point di temperatura utilizzati sono:

	Riscaldamento	Raffrescamento
Set point di temperatura	19,5 °C	27°C
Set point ridotto di temperatura	16 °C	/

Tabella 18 - Set point di temperatura considerati

Gli apporti interni sono stati definiti in funzione delle condizioni d'uso:

	Apporti Interni [W/m ²]	
	Persone	Apparecchiature/ Illuminazione
Zona Laboratori	4,7	12
Zona Uffici	4,7	12
Zona Locali Comuni	3,6	15
Zona servizi	3,6	15

Tabella 19 - Apporti interni in funzione delle destinazioni d'uso

Questi dati, così come i fattori di occupazione dei locali e i fattori di utilizzo degli apporti interni sensibili, sono presi dalle norme ISO 18523-1:2016 e UNI EN 16798-1:2019.

La figura 29 riporta il profilo orario di occupazione e il profilo di temperatura utilizzato per i giorni feriali dal lunedì al venerdì in tutte le zone climatizzate.

Ore del giorno	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Media	
OCCUPAZIONE																										
focc [.]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,60	0,60	0,70	0,70	0,40	0,60	0,70	0,70	0,60	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	
TEMPERATURA																										
θH.int [°C]	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	-	
θC.int [°C]	-	-	-	-	-	-	-	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	-	-	-	-	-	-	-	-	
UMIDITA'																										
UR,HU.int [%]	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	-	
UR,DHU.int [%]	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	-	
APPORTI INTERNI SENSIBILI																										
φint.P [W/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,94	2,82	2,82	3,29	3,29	1,88	2,82	3,29	3,29	2,82	0,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,18	
fint.A [.]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,60	0,60	0,70	0,70	0,40	0,60	0,70	0,70	0,60	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	
φint.A [W/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,20	9,60	9,60	11,20	11,20	6,40	9,60	11,20	11,20	9,60	3,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	
fint.L [.]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,60	0,60	0,70	0,70	0,40	0,60	0,70	0,70	0,60	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	
φint.L [W/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
APPORTI INTERNI LATENTI																										
Gwv.P [(g/h)/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,71	2,12	2,12	2,47	2,47	1,41	2,12	2,47	2,47	2,12	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,88	
Gwv.A [(g/h)/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Figura 29 – Profilo orario giorni feriali (ad esclusione del sabato)

La figura 30 riporta il profilo orario utilizzato per i sabati in tutte le zone climatizzate.

Profilo orario Grafici

Copia su tutti i feriali | Copia su un periodo specifico | + Nuovo periodo speciale | Duplica su periodo speciale | X Elimina periodo speciale

← Sabato → Descrizione periodo: Sabato Periodo da 01/01/2023 a 31/12/2023

Ore del giorno	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Media	
OCCUPAZIONE																										
focc [.]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
TEMPERATURA																										
θH.int [°C]	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	-	
θC.int [°C]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
UMIDITA'																										
UR,HU.int [%]	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	-	
UR,DHU.int [%]	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	-	
APPORTI INTERNI SENSIBILI																										
φint.P [W/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
fint.A [.]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
φint.A [W/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
fint.L [.]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
φint.L [W/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
APPORTI INTERNI LATENTI																										
Gwv.P [(g/h)/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Gwv.A [(g/h)/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Figura 30 – Profilo orario considerato per i sabati

Per i giorni festivi è stata considerato lo spegnimento totale degli impianti di climatizzazione.

Nel corso dell'anno sono previsti periodi di chiusura dell'Ateneo che sono stati presi in considerazione per il funzionamento degli impianti. In particolare, è previsto lo spegnimento di tali durante il periodo natalizio e durante la settimana di Ferragosto.

Per quanto riguarda la ventilazione, questa rappresenta un aspetto importante da considerare nella modellazione in quanto è sempre necessario mantenere una qualità dell'aria interna adatta al tipo di utilizzo dei locali. Impostando su Edilclima la destinazione d'uso dei singoli locali, il software procede a calcolare in automatico sulla base dello standard UNI 10339:1995 la portata d'aria necessaria.

Nel fabbricato 4A, la ventilazione è controllata meccanicamente solamente nei laboratori mentre in tutti i restanti locali la ventilazione è naturale considerando un ricambio d'aria dovuto all'apertura delle finestre.

Nella figura 31 si riporta un esempio di locale con ventilazione naturale:

Ventilazione

Ventilazione Naturale Meccanica Ibrida

Metodo di calcolo

Categoria edificio

Sottocategoria

Portata d'aria esterna Qop $10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s pers}$

Indice di affollamento ns pers / m^2

fve.t

Portate di aria esterna di riferimento

Potenza invernale	qve.0_p,H	<input type="text" value="61,12"/>	m^3/h		<input type="text" value="0,44"/>	Vol/h
Energia invernale	qve.0_e,H	<input type="text" value="36,06"/>	m^3/h		<input type="text" value="0,26"/>	Vol/h
Energia estiva	qve.0_e,C	<input type="text" value="36,06"/>	m^3/h		<input type="text" value="0,26"/>	Vol/h

Calcolo orario

Portata d'aria	qve.0	<input type="text" value="36,06"/>	m^3/h		<input type="text" value="0,26"/>	Vol/h
----------------	-------	------------------------------------	-----------------------	--	-----------------------------------	-------

Figura 31 – Parametri per zone con ventilazione naturale

Nella figura 32 si riporta un esempio di laboratorio con ventilazione meccanica:

Ventilazione

Ventilazione Naturale Meccanica Ibrida

Metodo di calcolo

Categoria edificio

Sottocategoria

Portata d'aria esterna Qop $10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s pers}$

Indice di affollamento ns pers / m^2

fve.t

Portate di aria esterna di riferimento

Potenza invernale	qve.0_p,H	<input type="text" value="136,68"/>	m^3/h		<input type="text" value="1,48"/>	Vol/h
Energia invernale	qve.0_e,H	<input type="text" value="136,68"/>	m^3/h		<input type="text" value="1,48"/>	Vol/h
Energia estiva	qve.0_e,C	<input type="text" value="136,68"/>	m^3/h		<input type="text" value="1,48"/>	Vol/h

Calcolo orario

Portata d'aria	qve.0	<input type="text" value="136,68"/>	m^3/h		<input type="text" value="1,48"/>	Vol/h
----------------	-------	-------------------------------------	-----------------------	--	-----------------------------------	-------

Figura 32 – Parametri per zone con ventilazione meccanica

7. Analisi dei consumi e calibrazione del modello

La calibrazione è il processo in cui i parametri di input della simulazione sono regolati in modo preciso e specifico in modo da ottenere una corrispondenza più stretta possibile tra i risultati simulati tramite il software e quelli osservati reali.

La modellazione dell'edificio, eseguita sul programma Edilclima, include numerose variabili che possono essere non note e quindi affette da incertezza come, ad esempio, le specifiche dell'involucro edilizio, i profili di occupazione, le temperature di set point degli impianti, gli apporti termici, ecc. Questi parametri in una fase iniziale vengono dunque ipotizzati ma successivamente possono essere modificati e perfezionati per incrementare l'affidabilità del modello realizzato e per ottenere risultati più accurati. I risultati ottenuti dal software vengono confrontati con i dati effettivi di consumo dell'edificio ad ogni simulazione e il processo continua fino al raggiungimento dell'accuratezza desiderata. Nel caso analizzato, i dati reali a disposizione sono quelli relativi ai consumi di energia per il riscaldamento e per il raffrescamento dell'anno 2023.

Consumi dell'edificio 4A

Nella tabella 20 sono riportati i dati mensili di consumo di energia relativi al teleriscaldamento; l'impianto in questione è al servizio dell'intera sede centrale del Politecnico e non essendo presente un sistema di contabilizzazione dei consumi sui singoli edifici si è deciso di procedere con una valutazione sulla base del rapporto delle volumetrie.

Volume netto totale della sede centrale = 468.191,11 m³sotto

Volume netto totale dell'edificio 4A = 28.756,12 m³

→ Rapporto tra i volumi = 0,0614

	CONSUMO DI ENERGIA TERMICA – RISCALDAMENTO [kWh]	
	Sede Centrale Politecnico	Fabbricato 4A
Gennaio	2.011.000	123.515
Febbraio	1.566.000	96.183
Marzo	1.277.000	78.433
Aprile	304.000	18.672
Maggio	-	-
Giugno	-	-

Luglio	-	-
Agosto	-	-
Settembre	-	-
Ottobre	391.000	24.015
Novembre	1.369.000	84.083
Dicembre	2.104.000	129.227
TOTALE	9.022.000	554.128

Tabella 20 – Dati relativi al consumo di energia termica per il riscaldamento invernale

Nella tabella 21 sono riportati i dati mensili di consumo di energia elettrica del gruppo frigorifero CF3 del Politecnico per il raffrescamento; l'impianto in questione è al servizio del complesso di edifici nominato TO_CEN04, che include anche l'edificio 4A sotto studio. Come nella situazione precedente avendo a disposizione le volumetrie si è optato per una valutazione del consumo del singolo edificio considerando il rapporto tra volumi.

Volume netto totale del complesso TO_CEN04 = 101.853,20 m³

Volume netto totale dell'edificio 4A = 28.756,12 m³

→ Rapporto tra i volumi = 0,2823

	CONSUMO ENERGIA – RAFFRESCAMENTO		
	ENERGIA ELETTRICA [kWh]	ENERGIA FRIGORIFERA [kWh]	
		Complesso TO_CEN 04	Complesso TO_CEN 04
Maggio	1290	4127	1165
Giugno	25.312	80.999	22.868
Luglio	70.672	226.152	63.849
Agosto	46.404	148.492	41.924
Settembre	43.151	138.082	38.984
TOTALE	186.828	597.851	168.791

Tabella 21 – Dati relativi ai consumi di energia per il raffrescamento estivo

Calibrazione del modello

Noti i consumi reali dell'edificio, è possibile procedere con la calibrazione andando a modificare il modello realizzato sul software. L'obiettivo, come descritto in precedenza, è ottenere dei consumi simulati più simili possibili alla realtà in modo da rappresentare al meglio il comportamento energetico dell'edificio.

L'ASHRAE Guideline 14-2023 descrive due procedure che possono essere impiegate per verificare l'accuratezza della calibrazione dei modelli energetici di edifici:

- Tecniche di confronto grafico
- Tecniche di confronto statistico

Il primo metodo consente una visualizzazione grafica delle prestazioni dell'edificio tramite l'utilizzo della firma energetica, grafico in cui sono messi in correlazione i consumi energetici e le condizioni climatiche esterne. Il secondo metodo invece, tramite un approccio analitico, consente di validare la calibrazione effettuata per mezzo del calcolo di due indici:

- Hourly Mean Bias Error index (MBE) → è l'errore percentuale utilizzato per valutare quanto il consumo energetico previsto dal modello corrisponda ai dati reali misurati su base mensile o annuale.

$$MBE (\%) = \frac{\sum_{periodo} (S - M)_{intervallo}}{\sum_{periodo} M_{intervallo}} \times 100\%$$

S → Consumo energetico simulato

M → Consumo energetico misurato

Tale indice può essere affetto da errori compensativi tra i valori positivi e negativi dei diversi intervalli di tempo e dunque è necessario un secondo indice:

- Coefficient of the Root Mean Square Error (CV(RMSE)) → è l'errore percentuale che rappresenta una misura normalizzata della variabilità tra i dati misurati e quelli simulati; minore è il valore, migliore è la calibrazione.

$$CV(RMSE) (\%) = \frac{RMSE_{periodo}}{A_{periodo}} \times 100 \%$$

A → Media del consumo energetico misurato in un determinato periodo

RMSE → Errore quadratico medio (Root Mean Square Error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (S - M)_{intervallo}^2}{n_{intervallo}}}$$

n → Numero di intervalli di tempo nel periodo considerato

Considerando un calcolo con un intervallo di tempo mensile, i limiti imposti ai valori dei due indici per ritenere il modello calibrato devono essere:

- MBE compreso tra + 5 % e - 5 %
- $CV(RMSE) \leq 15 \%$

La calibrazione del modello dell'edificio oggetto di studio è stata eseguita partendo dal metodo grafico e successivamente è stata validata attraverso il calcolo degli indici.

Nella figura 33 viene riportata la firma energetica per il riscaldamento con la rappresentazione dei consumi dell'edificio in relazione alla temperatura media esterna. Il grafico mostra una serie di punti che descrivono come l'edificio si comporti dal punto di vista dei consumi energetici rispetto alla variazione delle condizioni climatiche durante l'anno. I punti in blu rappresentano i dati misurati, noti tramite le bollette, mentre i punti in arancione sono i dati ottenuti dalla simulazione tramite Edilclima. Tramite un'interpolazione lineare dei punti si possono ottenere due linee in cui:

- L'inclinazione è determinata da tutti i termini del bilancio energetico che dipendono dalla differenza tra temperatura interna ed esterna.
- Il valore costante dipende dagli apporti termici e dall'efficienza degli impianti.

L'obiettivo di questo approccio è ottenere la sovrapposizione delle due linee, ovvero ridurre la deviazione dei risultati simulati da quelli reali. Di seguito è rappresentato il grafico ottenuto alla fine del processo di calibrazione.

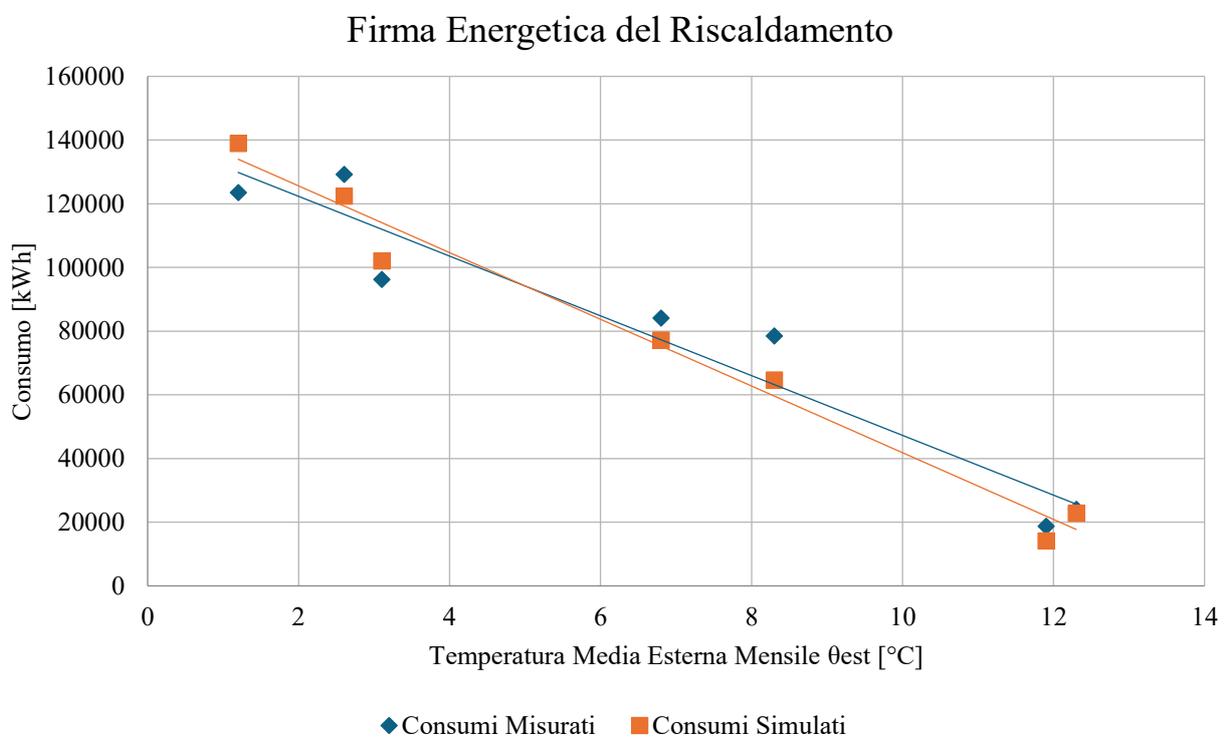


Figura 33 – Firma energetica per il riscaldamento

Questo metodo è basato su un'osservazione visiva e se da un lato offre un facile e rapido metodo di confronto, dall'altro può risultare meno accurato di altre strategie. Per questo motivo si è optato per il calcolo analitico dei coefficienti MBE e CV(RMSE) in modo da verificare l'accuratezza della calibrazione tramite il confronto dei valori ottenuti con i limiti imposti dalle linee guida dell'ASHRAE.

Nella tabella 22 sono riportati i valori dei consumi mensili e i risultati dei coefficienti calcolati. Sia l'MBE sia il CV(RMSE) rispettano i limiti imposti e, dunque, il modello può essere considerato calibrato dal punto di vista del riscaldamento.

	Riscaldamento					
	T _{est} [°C]	Consumo Misurato (M) – [kWh]	Consumo Simulato (S) – [kWh]	MBE [-]	RMSE [kWh]	CV(RMSE) [-]
Gennaio	1,2	123.515	138.877	-2,19%	9082,36	11,47%
Febbraio	3,1	96.183	101.994			
Marzo	8,3	78.433	64.618			
Aprile	11,9	18.672	14.095			
Ottobre	12,3	24.015	22.821			
Novembre	6,8	84.083	77.178			
Dicembre	2,6	129.227	122.389			

Tabella 22 - Consumi mensili di riscaldamento e relativi coefficienti di calibrazione

Lo stesso procedimento è stato eseguito per il raffrescamento e nella tabella 23 sono riassunti i risultati mensili. Anche in questo caso i coefficienti rispettano i limiti e il modello può essere considerato definitivamente calibrato.

	Raffrescamento					
	T _{est} [°C]	Consumo Misurato (M) – [kWh]	Consumo Simulato (S) – [kWh]	MBE [-]	RMSE [kWh]	CV(RMSE) [-]
Giugno	22,1	22.868	29.111	-3,52%	6100,00	14,56%
Luglio	23,6	63.849	65.906			
Agosto	22,6	41.924	47.896			
Settembre	19,1	38.985	30.620			

Tabella 23 - Consumi mensili di raffrescamento e relativi coefficienti di calibrazione

Risultati diagnosi energetica

In seguito al processo di calibrazione del modello, la simulazione ha riportato i seguenti risultati:

- Fabbisogno di Energia Primaria: si riferisce all'energia ottenuta direttamente dalle fonti primarie senza essere soggetta a nessun processo di trasformazione o conversione

	$E_{P,nren}$ [kWh]	$E_{P,ren}$ [kWh]	$E_{P,tot}$ [kWh]
RISCALDAMENTO	490.339	5916	496.255
RAFFRESCAMENTO	133.254	32.118	165.372
Globale	623.593	38.034	661.627

Tabella 24 - Consumi energetici per riscaldamento e raffrescamento, con valori per energia non rinnovabile, rinnovabile e totale.

$E_{P,nren}$ → Energia primaria non rinnovabile

$E_{P,ren}$ → Energia primaria rinnovabile

$E_{P,tot}$ → Energia primaria totale

- Indice di Prestazione Energetica: esprime il fabbisogno di energia primaria in relazione alla superficie utile di riferimento

	$EP_{,nren}$ [kWh/m ²]	$EP_{,ren}$ [kWh/m ²]	$EP_{,tot}$ [kWh/m ²]
RISCALDAMENTO	50,21	0,61	50,82
RAFFRESCAMENTO	13,64	3,29	16,93
Globale	63,85	3,90	67,75

Tabella 24 – Indici di prestazione energetica per riscaldamento e raffrescamento e totali

$EP_{,nren}$ → Indice di prestazione energetica non rinnovabile

$EP_{,ren}$ → Indice di prestazione energetica rinnovabile

$EP_{,tot}$ → Indice di prestazione energetica totale



Figura 34 - Indici di prestazione energetica

- Emissioni di CO₂ per vettore energetico e servizio

	Vettore energetico	Consumo annuo	Emissioni CO ₂ annue
Riscaldamento	Teleriscaldamento	542.882 kWh _t	162.865 kg
	Energia Elettrica	12.588 kWh _{el}	5791 kg
Raffrescamento	Energia Elettrica	68.336 kWh _{el}	31.434 kg

Tabella 25 - Consumo annuo e relative emissioni di CO₂

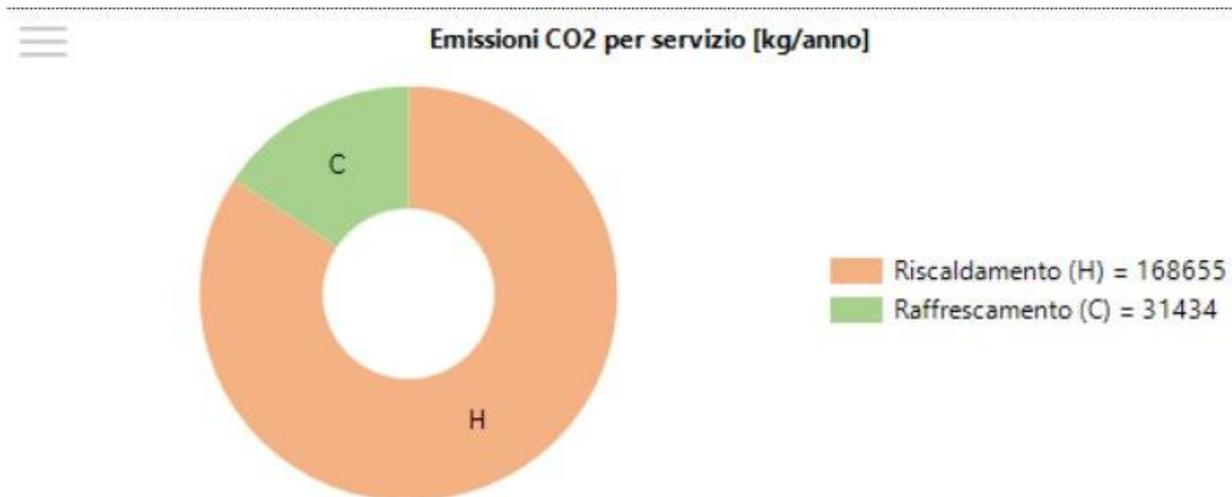


Figura 35 – Emissione di CO₂ per servizio

Rendering 3D

Di seguito sono riportate le rappresentazioni 3D del modello dell'edificio oggetto di studio alla conclusione della fase di modellazione su Edilclima.

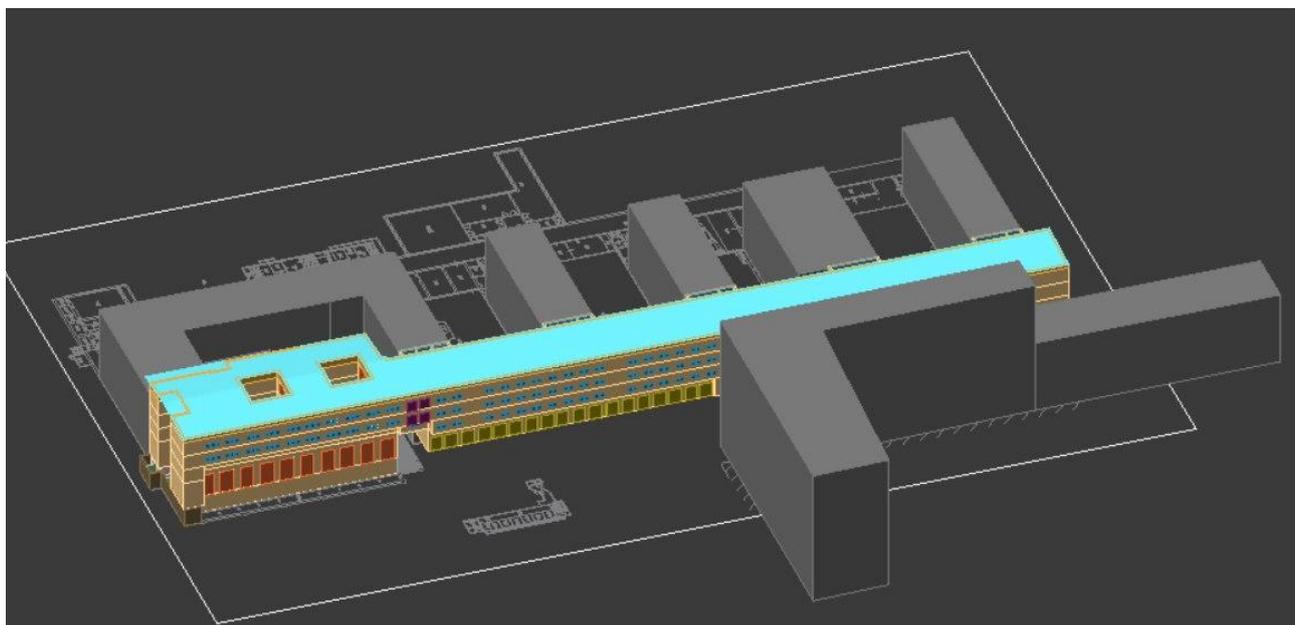


Figura 36 - Vista assonometrica da NORD-OVEST

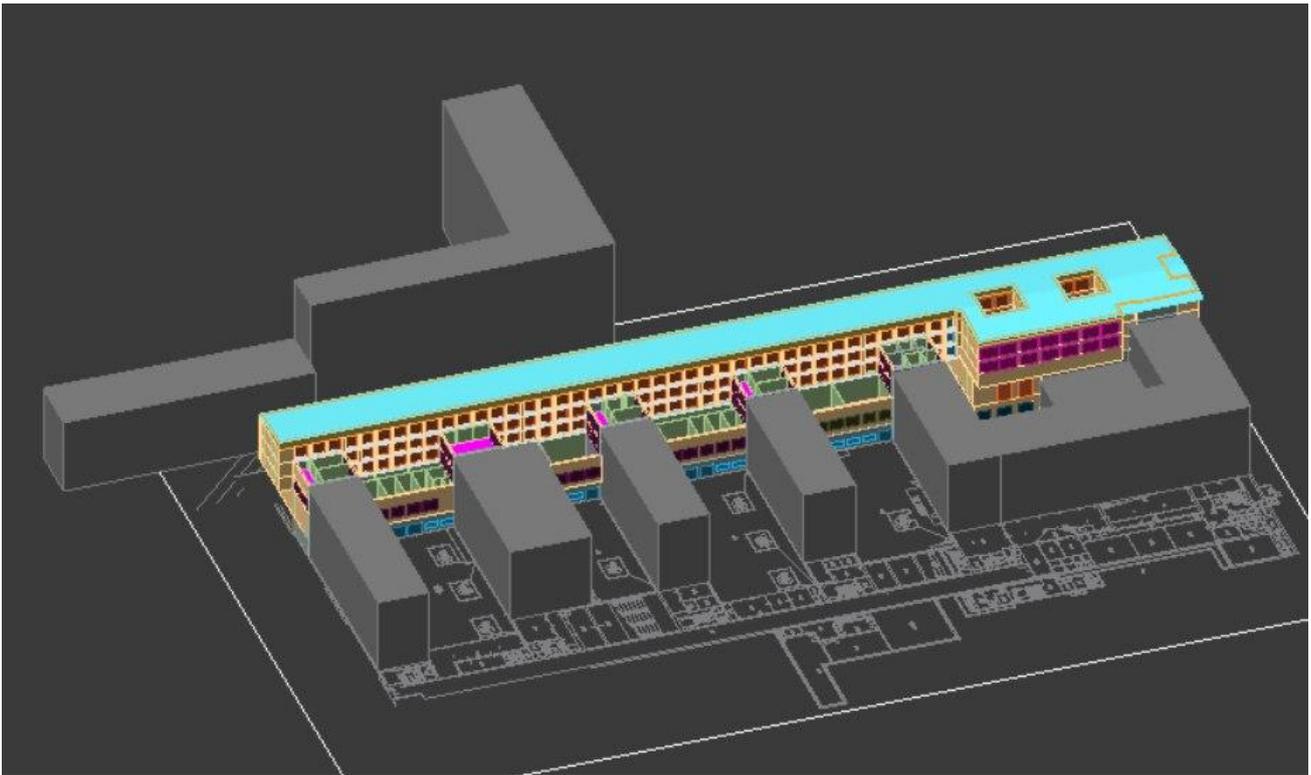


Figura 37- Vista assometrica da SUD-EST

La valutazione dei consumi attuali ha quindi posto le basi per indagare soluzioni di efficientamento mirate, ai fini di questa tesi ci si concentrerà con particolare attenzione all'involucro opaco. La scelta dei materiali isolanti e della loro disposizione all'interno della stratigrafia influisce direttamente sulla capacità dell'edificio di contenere le dispersioni e di garantire condizioni di comfort ottimali per gli occupanti. Per questo motivo, prima di analizzare nel dettaglio le possibili configurazioni di isolamento, è fondamentale comprendere il ruolo strategico dell'involucro edilizio, i diversi sistemi di isolamento adottabili e le caratteristiche principali dei materiali isolanti.

8. Misure di efficientamento energetico

L'influenza dell'involucro edilizio

L'involucro edilizio è l'elemento che separa e distingue gli ambienti in interni ed esterni, è fondamentale per determinare le prestazioni energetiche di un edificio. L'involucro regola gli scambi termici con l'esterno, influenzando direttamente sul fabbisogno energetico necessario per il riscaldamento e il raffrescamento ma anche sulla vivibilità e sull'usura della struttura nel tempo. Un involucro ben progettato riduce le dispersioni di calore, migliorando il bilancio energetico complessivo dell'edificio e contribuendo a una riduzione dei consumi.

L'isolamento termico rappresenta una delle soluzioni più efficaci per migliorare l'utilizzo dell'involucro, poiché consente di limitare la trasmissione del calore attraverso le superfici opache e di mantenere condizioni interne più stabili. Senza un adeguato isolamento, l'edificio è esposto a forti escursioni termiche: nei mesi freddi, il calore tende a disperdersi rapidamente, aumentando la dispersione di energia per il riscaldamento; in estate, le alte temperature e il riscaldamento delle pareti esterne fanno aumentare il calore degli ambienti interni, rendendo necessario un maggiore uso dei sistemi di climatizzazione. La mancanza di un efficace sistema di isolamento ha, come conseguenza, un aumento dei consumi energetici e dei costi di gestione, ma anche maggiore inquinamento dovuto alle emissioni di CO₂.

L'isolamento dell'involucro influisce anche sul comfort abitativo. Un edificio con pareti scarsamente isolate può presentare zone fredde in inverno e punti molto caldi in estate. Se le superfici interne hanno temperature molto diverse da quella dell'aria esterna, si generano correnti convettive e una sensazione di disagio termico per gli abitanti. L'utilizzo di un isolamento adeguato permette invece di mantenere temperature più uniformi all'interno degli ambienti, migliorando la qualità della vita.

Un ulteriore aspetto da considerare è il comportamento igroscopico dell'involucro, un isolamento progettato in modo errato può condurre alla formazione di condensa interstiziale o superficiale, con conseguente rischio per la qualità dell'aria interna e sulla durata del materiale. Se il vapore acqueo contenuto nell'aria incontra superfici con temperatura inferiore al punto di rugiada, avviene la condensazione del vapore, che può condurre alla formazione di muffe e funghi con conseguenti rischi per la salute all'interno dell'edificio. Una corretta progettazione dell'isolamento deve quindi prevedere una stratigrafia adeguata, in grado di evitare la formazione di condensa e garantire l'assenza dell'umidità

L'isolamento dell'involucro edilizio è fondamentale per il miglioramento dell'efficienza energetica e del comfort abitativo. Importante è scegliere il sistema di isolamento più adatto in base alle caratteristiche dell'edificio, agli obiettivi di riqualificazione e ai vincoli tecnici. Anche l'applicazione del materiale isolante influisce sulle prestazioni complessive dell'involucro, determinando la distribuzione della temperatura all'interno della stratigrafia, la gestione dell'umidità e la durata dell'intervento nel tempo.

Sistemi di isolamento dell'involucro

Esistono diverse soluzioni per migliorare le prestazioni termiche delle superfici opache dell'involucro edilizio, che si realizzano aggiungendo uno strato di materiale isolante. Il posizionamento dell'isolante può avvenire in vari modi: all'esterno, all'interno o in intercapedine. La scelta della

posizione influisce sulla distribuzione della temperatura e sulla pressione di saturazione del vapore acqueo all'interno della parete, con impatti diretti sul benessere termo-igrometrico. Una stratigrafia mal progettata può infatti causare la formazione di condensa, che degrada i materiali di cui è costituito l'involucro, compromettendo sia l'efficienza energetica che la durata dell'edificio nel tempo. Ogni sistema di isolamento presenta vantaggi e svantaggi che devono essere valutati in relazione alle specifiche caratteristiche dell'edificio e ai vincoli tecnici ed economici dell'intervento.

I vari metodi di isolamento, presentano caratteristiche specifiche che verranno descritte nei capitoli successivi. Ognuno di questi è più o meno performante e va scelto in base alle esigenze progettuali e alle condizioni particolari dell'edificio.

Isolamento interno

In Italia, l'isolamento interno è meno comune rispetto agli altri, ma viene frequentemente adottato quando è necessario conservare l'aspetto estetico della facciata o in edifici vincolati, dove non è possibile intervenire esternamente. In questo caso, il materiale isolante viene applicato sulle pareti interne degli edifici, sui sottotetti e sulle pareti controterra, intervenendo sulle superfici interne o sulle pareti che separano gli ambienti riscaldati da quelli non riscaldati.

L'isolamento interno offre vari vantaggi; consente di migliorare l'aspetto degli ambienti, poiché permette di ottenere una finitura perfetta delle pareti interne. Inoltre, rispetto ad altre soluzioni, la posa del materiale isolante è meno complessa e richiede costi inferiori, poiché non è necessario intervenire sulla facciata esterna o utilizzare ponteggi; l'intervento risulta essere più rapido, e per questo viene spesso scelto in contesti con budget limitati o dove sono previsti vincoli estetici e normativi che impediscono interventi esterni.

L'isolamento interno presenta alcune criticità significative. Il principale svantaggio è l'interruzione delle attività all'interno dei locali, che richiede la ri-allocazione temporanea del personale. Nel caso specifico del nostro studio, tale intervento avrebbe causato disagi organizzativi e produttivi difficili da gestire. Per questo motivo, questa ipotesi è stata scartata.

Un altro aspetto da considerare è che l'isolamento interno potrebbe ridurre leggermente lo spazio abitabile, poiché comporta l'aggiunta di uno strato di materiale sulle pareti.

L'isolamento interno resta comunque una valida soluzione in contesti particolari, come in edifici storici o dove vincoli estetici impediscono interventi esterni.

Intercapedine a cassa vuota

Le pareti con intercapedine sono costituite da due pareti con all'interno un vuoto. Una delle soluzioni per isolare questa tipologia di pareti è l'insufflaggio. Ciò consiste nel riempire la cavità fra le due pareti della parete con un materiale in grado di isolare, distribuito sotto forma di pallini (perlite o vermiculite espansa) o di fibra (la lana bassa densità come ad esempio la cellulosa).

Il processo inizia con la preparazione della parete: si individuano le aperture necessarie per l'insufflaggio, che vengono solitamente posizionate nella parte bassa e alta della muratura per garantire una distribuzione uniforme del materiale. Una volta che le aperture sono pronte, si procede con l'insufflaggio del materiale isolante, che riempie tutti gli spazi dell'intercapedine, creando un isolamento continuo e senza ponti termici. Dopo aver completato l'insufflaggio, le aperture vengono sigillate con malta o un altro materiale per ripristinare l'aspetto originale della parete.

L'isolamento per insufflaggio ha diversi vantaggi. In primo luogo, migliora l'efficienza energetica dell'edificio, riducendo significativamente la dispersione di calore attraverso le pareti. Inoltre, rispetto ad altre tecniche di isolamento, può essere meno invasivo e più economico, poiché non richiede lavori strutturali complessi.

Ma esistono anche alcuni svantaggi: il principale riguarda il fatto che non si ha alcun controllo visivo su come e dove si deposita il materiale isolante all'interno della muratura. Di conseguenza, non si può garantire che il materiale insufflato occupi in modo omogeneo e compatto tutto lo spazio, senza lasciare vuoti o accumuli in alcune zone.

Nel caso specifico dell'edificio oggetto d'esame, le pareti con intercapedine si presterebbero a questa tecnica, ma a causa della difficoltà nel verificare la presenza o l'assenza di materiale all'interno dell'intercapedine, l'alternativa non è stata presa in considerazione. I saggi limitati effettuati sulle pareti hanno mostrato una distribuzione non omogenea del materiale isolante all'interno dell'intercapedine. Non potendo garantire una distribuzione ottimale del materiale durante l'intervento, ha portato alla decisione di scartare l'insufflaggio.

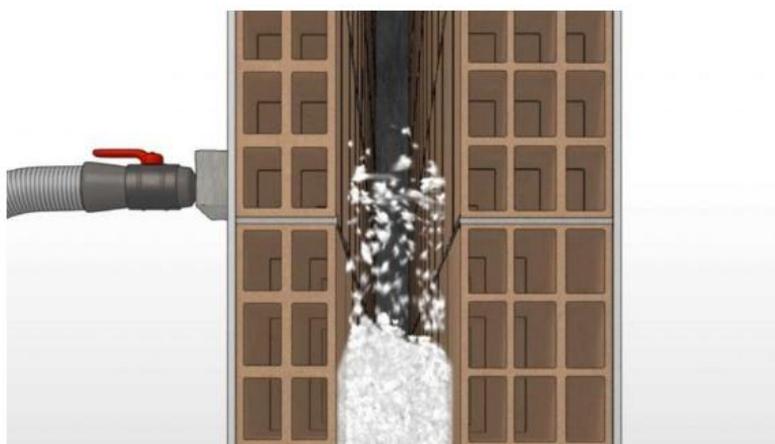


Figura 38 - Insufflaggio di schiuma in intercapedine per l'isolamento termico. [9]

Facciata ventilata

La facciata ventilata rappresenta una delle soluzioni più avanzate per migliorare le prestazioni termiche e acustiche degli edifici. Questo sistema prevede l'applicazione di un rivestimento esterno fissato alle pareti perimetrali dell'edificio tramite un'intelaiatura metallica, che consente di creare una camera d'aria tra il rivestimento e la parete esterna. All'interno di questa intercapedine si forma l'effetto camino, un fenomeno naturale che genera correnti d'aria grazie alla differenza di pressione

tra l'aria contenuta nella camera e quella esterna. Questo movimento dell'aria favorisce il raffreddamento o il riscaldamento degli ambienti interni, aumentando l'efficienza energetica dell'edificio, soprattutto in contesti climatici estremi.

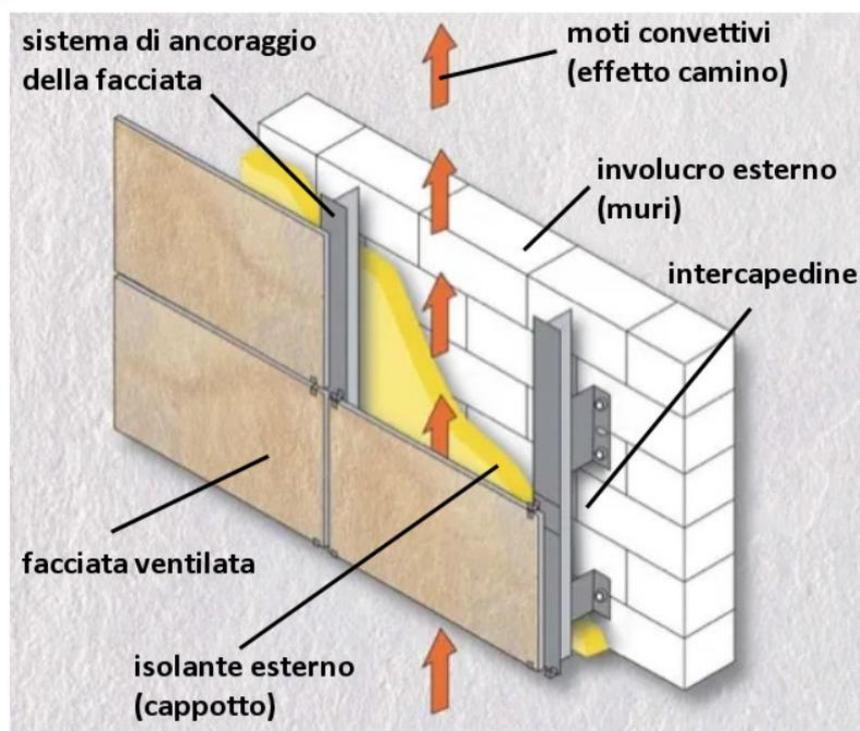


Figura 39 - Schema di una facciata ventilata [10]

La camera d'aria non ha solo un ruolo nel miglioramento termico, ma anche nella protezione acustica dell'edificio, creando una "zona cuscinetto" che riduce la trasmissione di suoni provenienti dall'esterno. Questo aspetto è molto utile per edifici situati in aree urbane trafficate o in prossimità di fonti di rumore costante, come ferrovie o autostrade.

Un altro vantaggio delle facciate ventilate è la loro durata; essendo costituito da materiali resistenti agli agenti atmosferici, come pietra o ceramica, il sistema è meno soggetto a deterioramenti. La ventilazione continua riduce il rischio di accumulo di umidità e la formazione di condensa all'interno della struttura muraria, migliorando la vita dell'edificio e la qualità dell'ambiente interno.

Nonostante questi benefici, le facciate ventilate presentano anche alcuni svantaggi: il principale è il costo elevato. La progettazione e la posa in opera richiedono investimenti costosi, soprattutto se si scelgono materiali di alta qualità per il rivestimento esterno. Inoltre, il sistema risulta essere vantaggioso soprattutto per edifici di grandi dimensioni, dove l'effetto camino può svilupparsi per aree più ampie, ma per edifici di piccole dimensioni o bassa altezza, l'efficacia del sistema si riduce notevolmente, poiché la ventilazione naturale nella camera d'aria non è altrettanto efficiente.

Un altro aspetto da considerare riguarda l'impatto estetico. L'installazione di una facciata ventilata implica un cambiamento significativo nell'aspetto esteriore dell'immobile. Questo può essere un vantaggio se si vuole modernizzare l'edificio, ma non è indicato per in edifici storici o protetti da vincoli. Nel caso specifico del nostro studio, l'edificio in esame è patrimonio storico del Politecnico

e l'applicazione di una facciata ventilata comporterebbe un cambiamento estetico che potrebbe risultare problematico, considerando il valore culturale e architettonico del prospetto.

Isolamento esterno

L'isolamento esterno è la soluzione maggiormente utilizzata per migliorare l'efficienza energetica degli edifici, sia in fase di ristrutturazione che nella costruzione di nuovi edifici. In particolare, il cappotto termico, che prevede l'applicazione di uno strato di materiale isolante sulla facciata esterna dell'edificio, è particolarmente efficace nel ridurre la dispersione di calore, mantenendo temperature interne più stabili e confortevoli.

Questo tipo di intervento, grazie a un rivestimento continuo che copre tutta la superficie esterna, previene la formazione di umidità e muffe negli ambienti interni e proteggendo l'edificio sia dalle alte temperature estive che dalle basse temperature invernali.

Uno dei motivi principali per cui è stato scelto questo sistema per il nostro caso studio è la migliore compatibilità con l'edificio oggetto d'esame rispetto ad altri metodi. La scelta dell'isolamento esterno è stata effettuata perchè permette di preservare l'integrità estetica dell'edificio, senza interferire con la disposizione interna degli spazi o causare disagi agli occupanti, o di modificare l'aspetto architettonico esterno.

Infatti, l'edificio in esame è di valore storico, ed è necessario mantenere invariato il prospetto esterno. L'isolamento esterno consente di migliorare le prestazioni energetiche senza alterare significativamente l'aspetto visivo dell'edificio, a differenza della facciata ventilata, che avrebbe comportato modifiche strutturali evidenti e incompatibili con il valore culturale edificio.

Pur presentando alcuni svantaggi, come la necessità di manutenzione periodica del rivestimento e l'esposizione agli agenti atmosferici, l'isolamento esterno rimane una delle soluzioni più efficienti e sostenibili dal punto di vista energetico.

Insieme all'analisi dei diversi tipi di intervento sull'involucro edilizio, è fondamentale considerare anche le caratteristiche specifiche dei materiali isolanti utilizzati. La scelta del materiale ha un ruolo determinante nelle prestazioni energetiche, nella durata e nella manutenzione dell'intervento. Nel caso dell'isolamento esterno, l'efficacia complessiva del sistema dipende, oltre che dalla tecnica di applicazione, anche dalle proprietà fisiche e termiche del materiale scelto.

Proprietà dei materiali isolanti

I materiali isolanti sono progettati per ridurre o impedire il trasferimento di calore, elettricità o suono, contribuendo a migliorare l'efficienza energetica, garantire la sicurezza e ottimizzare la vivibilità di un ambiente.

La caratteristica principale dei materiali isolanti è la loro bassa conducibilità termica. La scelta di un materiale isolante può dipendere a seconda dell'uso specifico come, ad esempio, la resistenza alla compressione o il comportamento al fuoco. Non esiste un materiale isolante che soddisfi perfettamente tutti i requisiti ecologici, di prestazione ed economico.

Conducibilità termica e massa volumica

Come appena scritto, la caratteristica principale dei materiali isolanti è la bassa conducibilità termica (λ), con cui si misura la capacità di un materiale di condurre il calore. Più precisamente, esprime la quantità di calore che attraversa 1 metro di spessore di materiale per una differenza di temperatura di 1 grado Kelvin tra le due superfici. È espressa in $W/(m \cdot K)$ (watt per metro per kelvin). Un materiale con una conducibilità termica bassa permette un minor trasferimento di calore, quindi è un isolante più efficiente.

La maggior parte degli isolanti sono caratterizzati da una conducibilità compresa tra 0,03 e 0,05 $W/(m \cdot K)$, e, questo valore può essere definito buono.

La conducibilità termica dei materiali è influenzata da:

- umidità;
- calore specifico;
- macrostruttura e microstruttura;
- massa volumica.

La massa volumica, o densità, è definita come il rapporto tra la massa e il volume di un materiale, ed è espressa in kg/m^3 . Nei materiali isolanti, la massa volumica è una proprietà molto importante perché influisce direttamente sulla capacità isolante.

Materiali con una bassa densità solitamente contengono più aria intrappolata, che è un ottimo isolante termico. Più aria è trattenuta all'interno del materiale, minore sarà la capacità del materiale di trasportare calore. Ma, un materiale troppo leggero potrebbe non essere abbastanza resistente meccanicamente, soprattutto se esposto a pressioni o sollecitazioni esterne. Per questo motivo è importante bilanciare la massa volumica con altre proprietà meccaniche.

La resistenza termica di un materiale è la sua capacità di opporsi al passaggio del calore e dipende sia dalla conducibilità termica del materiale sia dal suo spessore. È definita come il rapporto tra lo spessore del materiale e la sua conducibilità termica, espressa in m^2K/W .

La formula è:

$$R = d/\lambda$$

Dove d è lo spessore del materiale in metri e λ è la conducibilità termica in $W/(m \cdot K)$.

Maggiore è il valore di R, migliore sarà la capacità del materiale di isolare. La resistenza termica è un parametro che dipende sia dalle proprietà intrinseche del materiale sia dal suo spessore, quindi due materiali con la stessa conduttività termica, ma spessori diversi, avranno resistenze termiche differenti.

Il calore specifico rappresenta la quantità di energia necessaria per aumentare la temperatura di 1 kg di materiale di 1 grado Kelvin ed è espresso in J/kg·K.

I materiali con alto calore specifico sono in grado di accumulare una maggiore quantità di energia termica prima di riscaldarsi e ciò contribuisce alla stabilità termica di un ambiente, riducendo l'instabilità di temperatura durante il giorno.

Resistenza alla diffusione del vapore

Un altro aspetto importante nella scelta dei materiali isolanti è la resistenza alla diffusione del vapore, per la protezione contro la condensa interna, migliorando la durata dell'involucro edilizio nel tempo e l'efficienza energetica complessiva dell'edificio. Essa definisce quanto un materiale è capace di impedire il passaggio del vapore acqueo attraverso la struttura, un fattore determinante per evitare problemi legati all'umidità, come la formazione di muffa e il degrado dei materiali.

La resistenza alla diffusione del vapore di un materiale viene espressa tramite il valore μ (mu), che rappresenta il rapporto tra la resistenza del materiale stesso alla diffusione del vapore e quella dell'aria. Un materiale con un valore μ elevato è meno permeabile al vapore, impedendo che esso attraversi la struttura e che si verifichi la condensa.

Comportamento al fuoco

Il comportamento al fuoco dei materiali è valutato secondo due principi fondamentali di reazione e resistenza al fuoco.

La capacità di un materiale da costruzione di mantenere le sue proprietà strutturali e funzionali quando è esposto a un incendio è nota come resistenza al fuoco. In altre parole, indica la durata in cui un materiale può resistere a un incendio senza deteriorarsi o perdere la sua integrità. La resistenza al fuoco è valutata attraverso prove standardizzate che valutano vari fattori, come la capacità di resistere alla temperatura, all'isolamento termico e alla tenuta al fumo e alle fiamme (UNI EN 13501-1:2019).

Il termine "reazione al fuoco" è invece usato per indicare come un determinato materiale reagisce al fuoco, esso comprende tutte le reazioni che il materiale può avere quando esposto al fuoco, come ad esempio la facilità di accensione, il tasso di propagazione dell'incendio, la produzione di fumi e quella di gocce o particelle incandescenti. Esistono dei test standardizzati che determinano la classi di reazione al fuoco e classificano i materiali in base alle loro prestazioni.

La norma europea UNI EN 13501-1:2019, intitolata "Classificazione al fuoco dei prodotti e degli elementi da costruzione - Parte 1: Classificazione in base ai risultati delle prove di reazione al fuoco", stabilisce le regole per classificare la reazione al fuoco dei materiali, che sono classificati secondo le Euroclassi A1, A2, B, C, D, E e F, dove i materiali in classe A1 sono considerati incombustibili, mentre quelli nelle classi A2, B, C, D, E e F hanno una combustione che aumenta progressivamente.

Table 1 — Classes of reaction to fire performance for construction products excluding floorings and linear pipe thermal insulation products			
Class	Test method(s)	Classification criteria	Additional classification
A1	EN ISO 1182 ^a and	$\Delta T \leq 30$ °C; and $\Delta m \leq 50$ %; and $t_f = 0$ s (i.e. no sustained flaming)	-
	EN ISO 1716	$PCS \leq 2,0$ MJ/kg ^a and $PCS \leq 2,0$ MJ/kg ^{b,c} and $PCS \leq 1,4$ MJ/m ² ^d and $PCS \leq 2,0$ MJ/kg ^e	-
A2	EN ISO 1182 ^a or	$\Delta T \leq 50$ °C; and $\Delta m \leq 50$ %; and $t_f \leq 20$ s	-
	EN ISO 1716 and	$PCS \leq 3,0$ MJ/kg ^a and $PCS \leq 4,0$ MJ/m ² ^b and $PCS \leq 4,0$ MJ/m ² ^d and $PCS \leq 3,0$ MJ/kg ^e	-
	EN 13823	$FIGRA_{0,2} MJ \leq 120$ W/s and $LFS <$ edge of specimen and $THR_{600s} \leq 7,5$ MJ	Smoke production ^f and Flaming droplets/particles ^g
B	EN 13823 and	$FIGRA_{0,2} MJ \leq 120$ W/s and $LFS <$ edge of specimen and $THR_{600s} \leq 7,5$ MJ	Smoke production ^f and Flaming droplets/particles ^g
	EN ISO 11925-2 ^h Exposure = 30 s	$F_s \leq 150$ mm within 60 s	
C	EN 13823 and	$FIGRA_{0,4} MJ \leq 250$ W/s and $LFS <$ edge of specimen and $THR_{600s} \leq 15$ MJ	Smoke production ^f and Flaming droplets/particles ^g
	EN ISO 11925-2 ^h Exposure = 30 s	$F_s \leq 150$ mm within 60 s	
D	EN 13823 and	$FIGRA_{0,4} MJ \leq 750$ W/s	Smoke production ^f and Flaming droplets/particles ^g
	EN ISO 11925-2 ^h Exposure = 30 s	$F_s \leq 150$ mm within 60 s	
E	EN ISO 11925-2 ^h Exposure = 15 s	$F_s \leq 150$ mm within 20 s	Flaming droplets/particles ^h
F	EN ISO 11925-2 ^h Exposure = 15 s	$F_s > 150$ mm within 20 s	

Tabella 26 - Classi di reazione al fuoco dei materiali da costruzione [11]

Tipologie di pannelli isolanti

I materiali isolanti presenti oggi sul commercio sono numerosissimi. Per il presente lavoro di tesi sono stati scelti alcuni dei più rappresentativi.

È importante classificare i materiali isolanti, sia in funzione della loro origine sia della struttura del materiale stesso, come mostrato in Fig.

Esistono tuttavia anche altre tipologie di materiali, ad esempio compositi, che non rientrano strettamente in una categoria, ma anche materiali isolanti di nuova generazione che si contraddistinguono per le loro tecnologie innovative.

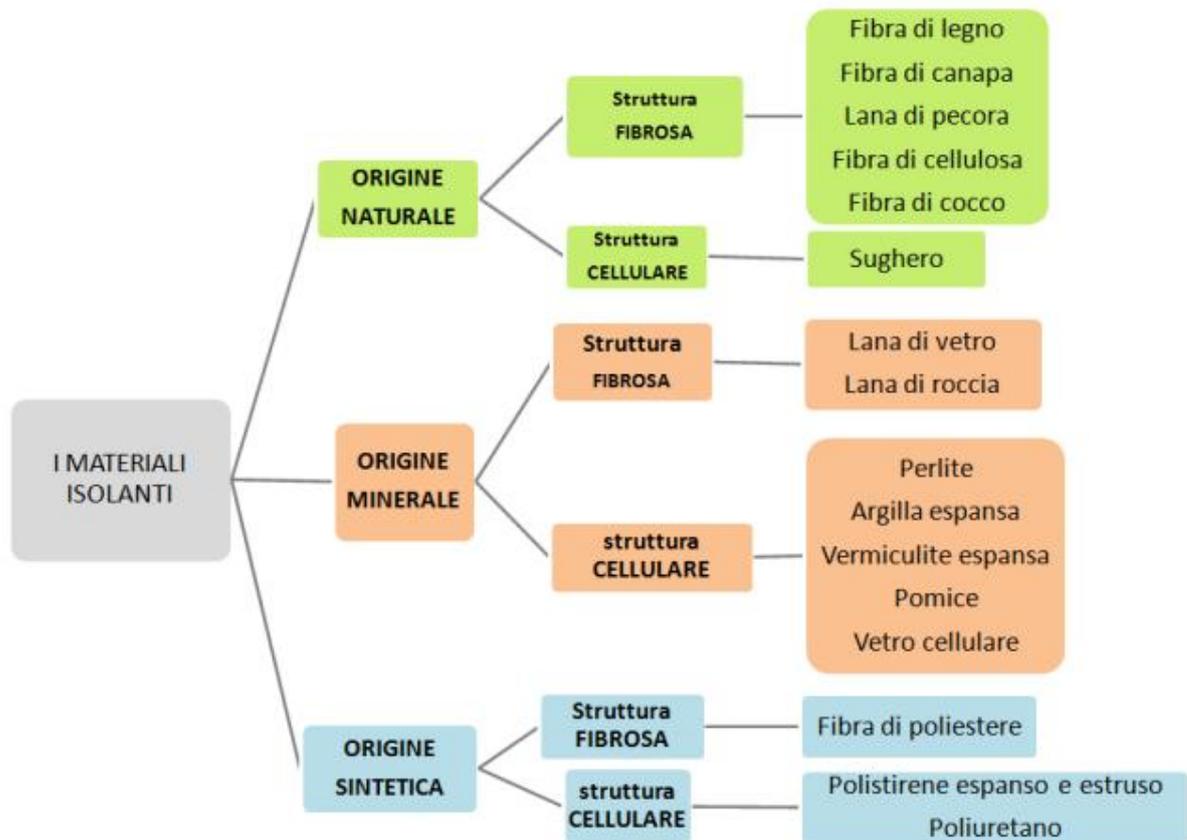


Figura 40 - Schema riassuntivo dei principali materiali isolant [12]

Materiali di origine minerale

Questi materiali sono derivati da materie prime naturali come rocce vulcaniche, vetro riciclato e sabbia, e subiscono processi industriali per essere trasformati in prodotti utilizzabili in ambito edilizio. Tra i principali materiali minerali utilizzati come isolanti troviamo la lana di roccia e la lana di vetro, caratterizzati da una struttura costituita da fibre sottili intrecciate che creano uno strato di aria intrappolata; la conduttività termica di questi materiali è leggermente superiore a quella dei materiali sintetici ma rimane comunque sufficientemente bassa, e offre buone capacità isolanti.

Una delle principali qualità dei materiali isolanti minerali è la loro resistenza al fuoco. Essendo costituiti da materiali come il vetro e le rocce vulcaniche, questi isolanti sono incombustibili e offrono una protezione passiva contro gli incendi.

Un altro vantaggio importante dei materiali isolanti minerali è la loro permeabilità al vapore. A differenza di molti altri materiali, che tendono a trattenere l'umidità all'interno delle strutture, i materiali minerali permettono il passaggio del vapore acqueo ciò consente di prevenire la formazione di condensa e muffe.

Lana di vetro

La lana di vetro è uno dei materiali isolanti più utilizzati nel settore dell'edilizia ed è composta da fibre di vetro ricavate dalla fusione di sabbia, soda e altri minerali.

Oltre alla bassa conduttività termica che la rende un ottimo isolante termico, la lana di vetro offre un buon isolamento acustico grazie alla sua struttura fibrosa che assorbe e attenua le onde sonore.

Inoltre, è resistente al fuoco perché è incombustibile e non contribuisce alla propagazione delle fiamme, è anche resistente alle muffe e ai funghi, rendendola un'opzione sicura per ambienti umidi ma è necessario installarla correttamente perché, può perdere alcune delle sue proprietà isolanti se esposta a umidità eccessiva o infiltrazioni d'acqua.

Tra gli svantaggi, il potenziale rischio per la salute durante l'installazione è uno dei principali: le fibre di vetro possono causare irritazioni alla pelle, agli occhi e alle vie respiratorie; per tanto è fondamentale utilizzare i dispositivi di protezione personale appropriati durante la manipolazione di materiali.

Lana di roccia

La lana di roccia, conosciuta anche come lana minerale, è realizzata dalla fusione di rocce vulcaniche e minerali, è molto simile alla lana di vetro poiché la sua natura fibrosa, si presta come un ottimo isolante sia termico che acustico.

La resistenza al calore è una delle principali differenze tra i due materiali. La composizione della lana di roccia è a base di rocce vulcaniche, che hanno temperature di fusione più elevate rispetto ai materiali utilizzati per la lana di vetro, e le consente di resistere a temperature più elevate senza deteriorarsi.

Un'altra considerazione importante sono i costi di produzione e di acquisto. La lana di vetro è generalmente meno costosa e la rende un'opzione più conveniente per molti progetti. Anche se il costo iniziale della lana di roccia è maggiore, può essere giustificato quando si tratta di applicazioni che richiedono una maggiore resistenza al fuoco e isolamento acustico.

Materiali di origine naturale

Questi materiali provengono principalmente da fonti rinnovabili come il legno, la canapa, il lino e la lana di pecora, e sono apprezzati per essere biodegradabili e a basso impatto ambientale, sia in fase di produzione che di smaltimento, e offrono comunque una sufficientemente bassa conduttività termica, superiore ma comunque paragonabile a quella dei materiali sintetici.

Una delle caratteristiche distintive dei materiali isolanti naturali è il loro calore specifico, superiore rispetto ai materiali sintetici e minerali. Ciò significa che essi sono in grado di accumulare una maggiore quantità di calore, contribuendo a ridurre le variazioni di temperatura all'interno degli edifici.

Anch'essi, come i primi, sono dotati di una notevole traspirabilità, tale da impedire la formazione di muffe, ma al contrario, essendo materiali organici, molti di essi tendono a essere infiammabili se non trattati con additivi ritardanti di fiamma.

Canapa

La fibra di canapa è un materiale naturale che ha molte proprietà, viene estratta dalla pianta di canapa (*Cannabis sativa*), ed è famosa per la sua versatilità e resistenza. Essa rappresenta una scelta ecologica per l'isolamento degli edifici sia assorbendo le onde sonore e riducendo il rumore circostante che per la sua bassa conducibilità termica.

In caso d'imbibizione accidentale conserva inalterate le proprie caratteristiche una volta asciutto ed è resistente alle muffe. Queste qualità lo rendono un materiale eccellente anche per la riqualificazione

energetica di edifici esistenti con particolari problemi di umidità e permettono di semplificare le operazioni di stoccaggio in cantiere, dato che il materiale può bagnarsi senza subire danneggiamenti.

Il taglio può essere facilmente eseguito mediante sega circolare, manuale o da banco, o seghe multiuso elettriche. In fase di lavorazione viene prodotta poca polvere, il contatto e l'inalazione delle fibre non causano irritazioni cutanee alle vie respiratorie e non provoca allergie. A differenza di altri materiali fibrosi (lana di vetro, lana di roccia) la lavorazione in sicurezza non richiede particolari dispositivi di protezione come maschere antipolvere, occhiali protettivi, guanti e tute.

Sughero

In edilizia, il sughero è uno dei materiali naturali più antichi usati per l'isolamento, è un prodotto naturale e rinnovabile che è apprezzato per le sue qualità ecologiche e isolanti termiche e acustiche.

Il sughero viene raccolto senza danneggiare l'albero, la corteccia da cui si ricava è una risorsa rinnovabile che si rigenera completamente ogni 9-12 anni.

Grazie alla sua struttura cellulare è un ottimo isolante termico, la sua conducibilità termica anche se maggiore è comunque paragonabile a quella di altri materiali isolanti di origine naturale o sintetica; inoltre è traspirante, il che consente la regolazione dell'umidità negli edifici e riduce la formazione di muffe e la condensa, è resistente al fuoco, autoestinguento e durante la combustione non produce gas nocivi.

Ci sono alcuni svantaggi da tenere in considerazione. Il fattore più importante è il costo, che è generalmente maggiore rispetto ad altri materiali isolanti, sia sintetici che naturali. Inoltre, la produzione di sughero è limitata a poche aree del mondo, principalmente nel Mediterraneo, e questo riduce la disponibilità, rendendolo meno competitivo a livello globale.

Fibra di legno

La fibra di legno è un materiale isolante naturale ottenuto dagli scarti di lavorazione del legno. La sua conducibilità termica varia a seconda della densità e della lavorazione del materiale, la produzione di questi pannelli è un processo poco energivoro e non necessita di sostanze nocive.

Come isolante, la fibra di legno presenta molti vantaggi: è traspirante, garantendo una buona regolazione dell'umidità interna, ed è ottimo per l'isolamento termico e acustico oltre ad essere un'opzione ecologica e sostenibile. Ha anche una capacità elevata di accumulo termico, che lo rende ideale per proteggere gli edifici dal calore estivo. Tuttavia, è più costoso rispetto ai materiali sintetici e, poiché è sensibile all'acqua, deve essere accuratamente protetto dall'umidità.

Nonostante la classe di reazione al fuoco E, la combustione dei pannelli viene rallentata dall'alta capacità termica, che impedisce alla temperatura di salire e forma uno strato di cenere sulla loro superficie.

Materiali di origine sintetica

I materiali isolanti di origine sintetica vengono prodotti attraverso processi chimici industriali, principalmente a partire da derivati del petrolio e la loro produzione richiede un significativo consumo energetico. Oggi l'industria sta sviluppando nuove soluzioni per migliorare la sostenibilità di questi materiali, attraverso l'introduzione di tecnologie che usano PET riciclato.

La loro struttura interna è spesso costituita da celle chiuse che intrappolano l'aria, riducendo la densità e il passaggio del calore per conduzione; sono estremamente leggere e quindi più facili da trasportare e installare.

Essendo derivati dal petrolio, tendono a essere infiammabili e, in caso di incendio, possono rilasciare fumi tossici.

Xps

L'XPS, noto anche come polistirolo estruso, è un isolante resistente a cellule chiuse fatto di polistirolo. In un estrusore, questo granulato viene trasformato in pannelli di schiuma rigida. L'XPS è utilizzato principalmente per isolare freddi ambienti che sono particolarmente umidi e sottoposti a elevate sollecitazioni meccaniche.

Il materiale ha una forte resistenza al vapore, quindi è importante installare uno spessore di isolante appropriato per evitare che la temperatura della parete favorisca la condensazione dell'umidità presente.

Poiché il polistirene è combustibile in natura, devono essere aggiunti ritardanti di fiamma. Rispetto ad altri isolanti sintetici, non ha un calore specifico elevato.

Polistirene Espanso Sinterizzato (EPS)

L'EPS, noto anche come polistirene espanso sinterizzato, è ottenuto dall'espansione dei granuli di polistirene, è un materiale sintetico composto da circa il 98% di aria, leggero e con buone capacità di isolamento, in particolare termico.

In confronto con XPS, ha anche una resistenza a compressione inferiore, quindi comunemente utilizzato per l'isolamento a cappotto delle pareti perimetrali. Le considerazioni per l'EPS riguardanti il comportamento in caso di incendio e calore sono le stesse del XPS.

Resine fenoliche

Le resine fenoliche sono materiali sintetici principalmente utilizzati in applicazioni industriali e in edifici ad alte prestazioni. Le resine fenoliche offrono un'ottima resistenza al fuoco (Classe A) e sono molto efficaci nel fornire isolamento termico.

Un vantaggio importante delle resine fenoliche è la loro stabilità meccanica e chimica. Anche quando questi materiali sono esposti a sostanze chimiche corrosive e a temperature estreme, le loro proprietà rimangono inalterate.

A causa dei loro costi elevati e del processo produttivo più complesso, non sono molto utilizzate rispetto ad altri materiali isolanti. Allo stesso modo, la natura chimica dei componenti utilizzati nella loro fabbricazione, ha un impatto ambientale significativo, anche se possono essere riciclate.

Pir/Pur

Tra le soluzioni più praticate per l'isolamento delle superfici, ci sono le lastre di poliuretano espanso pannelli composti da schiuma di poliuretano isolante PIR e PUR.

Il PUR è prodotto dalla reazione chimica tra polioli e isocianati. La struttura a celle chiuse rende il PUR uno dei materiali più isolante tra quelli disponibili. È adatto per applicazioni in tetti, facciate e

sistemi di isolamento a cappotto perché è molto leggero, ha una buona resistenza meccanica ed è impermeabile all'acqua.

Il PIR è una versione migliorata del PUR che è stata creata attraverso modifiche al processo di produzione che hanno portato alla formazione di più legami isocianurati. Ciò significa che il PIR è più resistente al fuoco e più stabile alle alte temperature del PUR. Il PIR viene spesso utilizzato in applicazioni che richiedono un'elevata resistenza al fuoco e alte prestazioni, come coperture, facciate ventilate e sistemi di isolamento industriale.

Nonostante derivino da fonti petrolchimiche, dal punto di vista ambientale, molti produttori stanno sviluppando schiume PIR e PUR con componenti parzialmente rinnovabili e processi di produzione a basso impatto ambientale, rispondendo alla crescente domanda di materiali più sostenibili.

Aerogel

L'aerogel è uno dei progressi più recenti nel settore dei materiali isolanti. La sua struttura è porosa ed è formata principalmente da aria e silice, ma esistono anche varianti basate su altri materiali come carbonio e alluminio. La bassa conducibilità termica dell'aerogel lo rende uno degli isolanti più efficienti attualmente, con valori di conducibilità termica fino a $0.013 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Essendo uno dei materiali più leggeri conosciuti, è adatto anche per ambienti e applicazioni ad alte temperature perché ha una buona resistenza al fuoco e può sopportare alte temperature senza danneggiare la sua struttura.

Il costo di produzione è elevato rispetto ad altri materiali isolanti; quindi, potrebbe non essere adatto ad essere utilizzato su larga scala.

9. Interventi di efficientamento proposti

Come già introdotto, nel capitolo precedente, l'involucro edilizio gioca un ruolo fondamentale nella gestione delle trasmissioni termiche, influenzando direttamente le esigenze di riscaldamento e raffrescamento degli ambienti.

Tra le componenti più importanti dell'involucro vi sono le pareti perimetrali, esse rappresentano una delle principali vie di scambio termico con l'ambiente esterno, inoltre, le loro proprietà termiche sono determinanti nel bilancio energetico degli edifici.

Come descritto nel capitolo dedicato alla caratterizzazione dell'involucro, le pareti perimetrali sono le M1, esse costituiscono la muratura che separa gli ambienti riscaldati dall'esterno. Esse si estendono per una superficie totale di circa 9440 m², lungo tutto il perimetro dell'edificio e sono responsabili del 46,6% delle dispersioni termiche complessive per trasmissione.

Per ridurre le richieste energetiche e limitare le dispersioni per trasmissione si è scelto di procedere quindi all'installazione di pannelli isolanti sulle pareti. La stratigrafia dell'intervento è riportata nella tabella 27, e consiste semplicemente nell'applicazione di un isolamento esterno sulle pareti M1

L'analisi è stata condotta applicando di volta in volta diversi pannelli isolanti realizzati con diversi materiali isolanti e aventi diversi spessori, in modo da valutare le prestazioni energetiche associate a ogni possibile opzione di isolamento, confrontando oltre ai benefici di riduzione dei consumi e emissioni anche i ritorni economici.

Per tutti i materiali, è stato fatto riferimento alla UNI 10351:2021 come indicato nei capitoli precedenti. Per i pannelli isolanti, invece, sono stati utilizzati i dati forniti dalle schede tecniche di vari produttori, che sono riportate nell'allegato [schede tecniche](#).

N. Strato (da interno verso esterno)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduttività termica [W/(mK)]	Resistenza termica [m ² K/W]	Massa volumica [kg/m ³]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Intonaco di calce e gesso	10	0,700	0,014	1400	1,00	10
2	Mattone forato	120	0,387	0,310	717	0,84	9
3	Intercapedin e non ventilata	120	0,667	0,180	-	-	-
4	Mattone pieno	120	0,800	0,150	1800	0,84	9
5	Pannello isolante	variabile	variabile	variabile	variabile	variabile	variabile
6	Malta di calce o di calce e cemento	10	0,900	0,011	1800	1,00	22

Tabella 27 – Stratigrafia analizzata per l'intervento sulle pareti

Ragionamenti analoghi valgono per il solaio di copertura, che presenta un'estensione di 2050 m² ed è correlato a circa il 13% delle totali dispersioni termiche dell'edificio; per questo motivo è stato preso in considerazione, dapprima in maniera separata e poi in combinazione con l'isolamento delle strutture verticali, anche l'intervento di isolamento termico del suddetto elemento.

Anche per questo elemento, come per il precedente, sono stati analizzati diversi materiali isolanti al fine di valutare le prestazioni energetiche associate a ogni opzione di isolamento

N. Strato (da interno verso esterno)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduttività termica [W/(mK)]	Resistenza termica [m ² K/W]	Massa volumica [kg/m ³]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Sottofondo di cemento magro	70	0,900	0,078	1800	0,88	30
2	Pannello isolante	variabile	variabile	variabile	variabile	variabile	variabile
3	C.I.s. armato	70	2,300	0,030	2300	1,00	130
4	Soletta in laterizio	250	0,660	0,379	1100	0,84	7
5	Intonaco di calce e gesso	20	0,700	0,029	1400	1,00	10

Tabella 28 – Stratigrafia analizzata per l'intervento sul solaio

Stratigrafie degli elementi murari analizzati

Per valutare i possibili interventi di miglioramento energetico sulle strutture verticali dell'edificio, è stato effettuato, in maniera preliminare, il calcolo della trasmittanza termica di diversi pacchetti murari. Questo passaggio è stato fondamentale per determinare quali configurazioni rispettassero i requisiti minimi di prestazione energetica previsti dalla normativa italiana vigente e per verificare se fossero in grado di soddisfare anche i criteri più stringenti richiesti dal Conto Termico, uno strumento di incentivazione economica che supporta interventi di efficientamento energetico e produzione di energia termica da fonti rinnovabili, il quale verrà introdotto più nel dettaglio nel capitolo relativo all'analisi economica.

In Italia, la normativa vigente che definisce i valori limite di trasmittanza termica (U) per le strutture edilizie è il Decreto Ministeriale 26 giugno 2015, noto come "Decreto Requisiti Minimi". Questo decreto stabilisce i requisiti di prestazione energetica degli edifici, con valori differenziati in base alla zona climatica e al tipo di struttura.

Per quanto riguarda le strutture opache verticali (es. pareti perimetrali), i valori limite di trasmittanza termica U (espressi in $W/(m^2K)$) sono:

- **Zona climatica A e B:** $\leq 0,45 W/(m^2K)$
- **Zona climatica C:** $\leq 0,40 W/(m^2K)$
- **Zona climatica D:** $\leq 0,34 W/(m^2K)$
- **Zona climatica E:** $\leq 0,28 W/(m^2K)$
- **Zona climatica F:** $\leq 0,22 W/(m^2K)$

Per quanto riguarda invece le richieste del Conto Termico [14], i valori di trasmittanza termica (U) sono generalmente più stringenti rispetto ai requisiti minimi di legge, come si può vedere di seguito.

- **Zona climatica A e B:** $\leq 0,38 W/(m^2K)$
- **Zona climatica C:** $\leq 0,30 W/(m^2K)$
- **Zona climatica D:** $\leq 0,26 W/(m^2K)$
- **Zona climatica E:** $\leq 0,23 W/(m^2K)$
- **Zona climatica F:** $\leq 0,22 W/(m^2K)$

Questi valori più restrittivi garantiscono una maggiore efficienza energetica e incentivano l'adozione di tecnologie avanzate e materiali isolanti di alta qualità.

La zona climatica per il territorio di Torino, assegnata con Decreto del Presidente della Repubblica n. 412 del 26 agosto 1993 e successivi aggiornamenti fino al 31 ottobre 2009, risulta essere la zona climatica E.

Tipologia di intervento	Trasmittanza termica [$W/(m^2K)$]
Requisiti Minimi (DM)	$\leq 0,28$
Conto Termico	$\leq 0,23$

Tabella 29 - Requisiti di trasmittanza termica per le pareti

Per valutare l'efficacia dei diversi pannelli isolanti selezionati, sono state elaborate diverse tabelle, ciascuna dedicata a un tipo di materiale.

In ogni tabella è stato riportato lo spessore del pannello analizzato oltre alla trasmittanza termica (U) della parete ($M1$) dopo l'applicazione di tale isolante. Questo approccio consente di confrontare direttamente le prestazioni termiche della parete isolata in relazione ai requisiti normativi.

Per facilitare l'interpretazione dei risultati, i valori di trasmittanza termica (U) sono stati evidenziati utilizzando un sistema di colori:

- **In verde** sono stati evidenziati gli spessori di isolante che rispettano i limiti del Decreto Ministeriale Requisiti Minimi.
- **In giallo** sono stati evidenziati gli spessori che, oltre a soddisfare i requisiti minimi di legge, sono idonei a rispettare i limiti più stringenti del Conto Termico.

- Non sono infine evidenziati i valori di trasmittanza, che non rispettano nessuno dei requisiti precedenti, e che quindi non sono stati analizzati oltre.

Tutti i parametri che caratterizzano i vari isolanti, come già detto, sono riportati in [allegato](#). Questi documenti forniranno informazioni aggiuntive sulle proprietà dei materiali, come la resistenza termica, la conducibilità termica, e altri dati rilevanti per la valutazione delle performance energetiche complessive.

Xps

Le pareti con XPS garantiscono un buon isolamento termico, per spessori da 10cm in su rispettano i minimi richiesti dalla normativa vigente, ma solo per spessori superiori a 12 cm rispettano i limiti del Conto Termico,

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	Trasmittanza termica [W/(m ² K)]
XPS	ELYFOAM	3	0,537
		4	0,462
		5	0,420
		6	0,361
		8	0,315
		10	0,268
		12	0,233
	STYRODUR	3	0,545
		4	0,469
		5	0,412
		6	0,368
		8	0,302
		10	0,257
		12	0,223
	ISOVER	3	0,529
		4	0,447
		5	0,398
		6	0,353
		8	0,290
		10	0,245
		12	0,213

Tabella 30 - Trasmittanza termica delle pareti isolate con pannelli di XPS di vari produttori, in funzione dello spessore.

Eps

L'EPS offre un isolamento termico adeguato ed è una soluzione economica. Tuttavia, per la struttura di riferimento come visto per l'XPS, solo a partire da 12 cm soddisfa i requisiti del Conto Termico.

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	Trasmittanza termica [W/(m ² K)]
EPS	WEBER	3	0,512
		4	0,437
		5	0,382
		6	0,339
		8	0,276
		10	0,233
		12	0,202
	FASSA	3	0,520
		4	0,446
		5	0,390
		6	0,346
		8	0,283
		10	0,239
		12	0,207

Tabella 31 - Trasmittanza termica delle pareti isolate con pannelli di EPS di vari produttori, in funzione dello spessore

Aeropan

Disponibile solo in spessori ridotti (2-3 cm), Aeropan non consente un abbassamento sufficiente della trasmittanza termica della parete in esame per rientrare nei parametri né dei requisiti minimi né del Conto Termico.

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	Trasmittanza termica [W/(m ² K)]
Aeropan	AMA	2	0,436
		3	0,338

Tabella 32 - Trasmittanza termica delle pareti isolate con pannelli AEROPAN,, in funzione dello spessore

Canapa

L'isolamento in canapa ISOLKENAF con uno spessore di 10 cm soddisfa i requisiti minimi di trasmittanza previsti dalla normativa, ma né con 10 cm né con 12 cm raggiunge i valori richiesti per l'accesso agli incentivi del Conto Termico.

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	Trasmittanza termica [W/(m ² K)]
CANAPA	ISOLKENAF	4	0,506
		5	0,427
		6	0,382
		8	0,315
		10	0,268
		12	0,233

Tabella 33 - Trasmittanza termica delle pareti isolate con pannelli di CANAPA di vari produttori, in funzione dello spessore

Fibra di legno

Le pareti realizzate con Fibra di Legno FIBERTHERM, con spessori variabili tra 6 e 12 cm, non soddisfano i requisiti del Conto Termico, che impone una trasmittanza inferiore a 0,230 W/(m²K). Nonostante le buone prestazioni in termini di isolamento, nessuna delle configurazioni di spessore analizzate consente di accedere agli incentivi previsti.

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	Trasmittanza termica [W/(m ² K)]
FIBRA DI LEGNO	BETONWOOD	6	0,395
		8	0,324
		10	0,266
		12	0,233

Tabella 34 - Trasmittanza termica delle pareti isolate con pannelli di FIBRA DI LEGNO, in funzione dello spessore

Sughero

Le pareti sono state isolate con Sughero Biopan e Betonwood, con spessori compresi tra 3 e 12 cm ma anche con uno spessore di 12 cm, la parete con Sughero Biopan raggiunge una trasmittanza appena sopra il limite di 0,230 W/(m²K) richiesto dal Conto Termico; quindi, non soddisfa i requisiti per gli incentivi. D'altro canto, Betonwood non riesce mai a scendere sotto 0,257 W/(m²K), risultando idoneo solo ai limiti normativi ma non agli incentivi.

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	Trasmittanza termica [W/(m ² K)]
SUGHERO	BIOPAN	3	0,559
		4	0,484
		5	0,427
		6	0,382
		8	0,315
		10	0,268
		12	0,231
	BETONWOOD	3	0,593
		4	0,518
		5	0,460
		6	0,414
		8	0,344
		10	0,295
		12	0,257

Tabella 35 - Trasmittanza termica delle pareti isolate con pannelli di SUGHERO di vari produttori, in funzione dello spessore

Lana di vetro

Il comportamento delle pareti isolate con lana di vetro è analogo a quello con materiali sintetici quali XPS e EPS, analizzati precedentemente, per rispettare il Conto Termico, la lana di vetro necessita di almeno 12 cm di spessore, ma già a partire da spessori di 10 cm la parete risulterebbe conforme alle richieste minime.

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	Trasmittanza termica [W/(m ² K)]
LANA DI VETRO	ISOVER	4	0,462
		5	0,405
		6	0,361
		8	0,296
		10	0,251
		12	0,218
	URSA	2,5	0,592
		5	0,412
		10	0,257
		12	0,223

Tabella 36 - Trasmittanza termica delle pareti isolate con pannelli di LANA DI VETRO di vari produttori, in funzione dello spessore

Lana di roccia

Ragionamento analogo al precedente per uno delle due tipologie di pannelli analizzati, ma data la mancanza di pannelli da 12 cm dell'altro produttore questa opzione non è stata vagliata.

Materiale	Prodotto	Spessore [cm]	Trasmittanza termica [W/(m ² K)]
LANA DI ROCCIA	<u>ISOVER</u>	4	0,454
		5	0,397
		6	0,353
		8	0,290
		10	0,245
		12	0,213
	<u>KNAUF</u>	4	0,477
		5	0,420
		6	0,375
		8	0,309
		10	0,266

Tabella 37 - Trasmittanza termica delle pareti isolate con pannelli di LANA DI ROCCIA di vari produttori, in funzione dello spessore

Pir/Pur

I pannelli di PIR grazie alla loro bassa lambda sono altamente performanti per l'isolamento delle pareti. Già con spessori che partono da 8 cm, le soluzioni di isolamento con questi materiali raggiungono trasmittanze ben al di sotto del limite richiesto dal Conto Termico.

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	Trasmittanza termica [W/(m ² K)]
PIR/PUR	<u>FIVE</u>	3	0,494
		4	0,420
		5	0,365
		6	0,323
		8	0,262
		10	0,221
		12	0,191
	<u>ISOVER</u>	3	0,431
		4	0,361
		5	0,310
		6	0,272
		8	0,218
		10	0,182
		12	0,156

Tabella 38 - Trasmittanza termica delle pareti isolate con pannelli di PUR di vari produttori, in funzione dello spessore

Resina fenolica

Le resine fenoliche sono tra i materiali più performanti per l'isolamento termico. Questi materiali sono ideali per l'isolamento delle pareti e rispettano i requisiti del Conto Termico anche con spessori ridotti, come già avveniva con il pur già da 8 cm. A spessori maggiori, come 12 cm, la trasmittanza può scendere fino a 0,138 W/(m²K), rispettando ampiamente i limiti imposti.

Materiale	Prodotto	Spessore [cm]	Trasmittanza termica [W/(m ² K)]
RESINA FENOLICA	WEBER	3	0,395
		4	0,327
		5	0,280
		6	0,243
		8	0,194
		10	0,161
		12	0,138
	ISOLMEC	3	0,411
		4	0,344
		5	0,296
		6	0,261
		8	0,210
		10	0,175
		12	0,150

Tabella 39 - Trasmittanza termica delle pareti isolate con pannelli in RESINA FENOLICA di vari produttori, in funzione dello spessore

Stratigrafie intervento su elementi orizzontali

Dopo aver esaminato i requisiti normativi e le possibilità di intervento per le pareti verticali, è utile estendere le stesse considerazioni alle strutture orizzontali, come i solai.

Anche per queste strutture, esistono limiti di trasmittanza termica, derivanti sia dal decreto requisiti minimi, e quindi dalla normativa italiana, sia dal Conto termico, che, anche se più stringenti contrariamente ai primi non impongono un vincolo obbligatorio.

Come nel caso delle strutture verticali, il Conto Termico sarà trattato in modo più approfondito nella sezione dedicata alla valutazione economica, dove verranno analizzati gli incentivi economici e i benefici derivanti dagli interventi, compresi i dettagli relativi ai valori limite di trasmittanza termica e alle cifre economiche connesse.

I valori richiesti dal Decreto Requisiti Minimi sono i seguenti:

- **Zona climatica A e B:** $\leq 0,38$ W/(m²K)
- **Zona climatica C:** $\leq 0,36$ W/(m²K)
- **Zona climatica D:** $\leq 0,30$ W/(m²K)
- **Zona climatica E:** $\leq 0,24$ W/(m²K)

- **Zona climatica F:** $\leq 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Nella normativa italiana, nel caso di strutture delimitanti lo spazio riscaldato verso ambienti non climatizzati (sottotetti o intercapedini, come nel caso in esame), per il calcolo della trasmittanza termica è previsto l'utilizzo di un fattore di riduzione β sempre ≤ 1 .

Questo fattore viene moltiplicato per la trasmittanza termica (U) calcolata dopo l'applicazione dei diversi pannelli isolanti, ottenendo così un valore di trasmittanza "corretto", che poi può essere confrontato con i valori limite stabiliti dalla normativa.

I valori di β sono indicati anch'essi nel Decreto Requisiti Minimi e derivano dalla norma UNI EN ISO 13789:2018, e per i solai verso sottotetto non riscaldato (caso in esame), il valore di $\beta = 0,8$. [17]

Mentre per accedere al Conto Termico, i valori di trasmittanza termica (U) richiesti per le strutture orizzontali sono, come già visto per le strutture verticali, più stringenti rispetto ai minimi di legge:

- **Zona climatica A e B:** $\leq 0,30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- **Zona climatica C:** $\leq 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- **Zona climatica D:** $\leq 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- **Zona climatica E:** $\leq 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- **Zona climatica F:** $\leq 0,18 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Contrariamente a quanto previsto dalla normativa generale per il calcolo della trasmittanza termica dei solai, nel caso degli interventi finalizzati al soddisfacimento dei requisiti del Conto Termico, non viene applicato il fattore di riduzione β . In questo caso, la trasmittanza termica (U) calcolata, deve rispettare direttamente i valori limite stabiliti senza alcuna modifica, e quindi il valore ottenuto deve essere confrontato con i requisiti più stringenti previsti dal Conto Termico

Come già anticipato nel capitolo sulle strutture verticale, la città di Torino ricade in zona climatica E, perciò i valori di trasmittanza da rispettare, risultano i seguenti:

Tipologia di intervento	Trasmittanza termica [W/(m ² K)]
Requisiti Minimi (DM)	$\leq 0,24$
Conto Termico	$\leq 0,20$

Tabella 40 - Requisiti di trasmittanza termica del solaio

Per facilitare l'interpretazione dei risultati, come già fatto per le strutture verticali, i valori di trasmittanza termica (U) sono stati evidenziati utilizzando un sistema di colori:

- **In verde** sono stati evidenziati gli spessori di isolante che rispettano i limiti del Decreto Ministeriale Requisiti Minimi.
- **In giallo** sono stati evidenziati gli spessori che, oltre a soddisfare i requisiti minimi di legge, sono idonei a rispettare i limiti più stringenti del **Conto Termico**.

- Non sono infine evidenziati i valori di trasmittanza, che non rispettano nessuno dei requisiti precedenti, e che quindi non sono stati analizzati oltre.

I pannelli di isolante sono generalmente disponibili in commercio con spessori fino a 12 cm. Quindi, per i pacchetti da 14 cm e 16 cm, che non sono disponibili sul mercato, sono stati considerati abbinamenti di due strati: per il pacchetto da 16 cm, due strati da 8 cm mentre per quello da 14 cm uno strato da 8 e uno da 6 cm.

Si sottolinea che questa scelta, che riguarda la composizione dei pacchetti, poiché essa avrà implicazioni nell'analisi economica che ne seguirà, influenzando i costi e quindi la valutazione complessiva degli interventi.

Xps

Le pareti isolate con ELYFOAM soddisfano i requisiti minimi a partire da 12 cm e il Conto Termico da 14 cm, mentre quelli isolati con ISOVER rispettano i requisiti minimi già a 10 cm e raggiungono il Conto Termico a 14 cm. In sintesi, le pareti con ISOVER sono efficaci anche con spessori inferiori.

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	Trasmittanza termica (U) [W/(m ² K)]	U*β _{tr} [W/(m ² K)]
XPS	<u>ELYFOAM</u>	10	0,289	0,2601
		12	0,249	0,2241
		14	0,219	0,1971
		16	0,196	0,1764
	<u>ISOVER</u>	10	0,265	0,2385
		12	0,225	0,2025
		14	0,198	0,1782
		16	0,177	0,1593

Tabella 41 - Trasmittanza termica dei solaio isolato con pannelli di XPS di vari produttori, in funzione dello spessore

Fibra di legno

Le pareti isolate fibra di legno soddisfano i requisiti minimi a partire da 12 cm mentre il Conto Termico da 16 cm, indicando la necessità di un pacchetto combinato per accedere all'eventuale incentivo.

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	Trasmittanza termica (U) [W/(m ² K)]	U*β _{tr} [W/(m ² K)]
FIBRA DI LEGNO	<u>BETONWOOD</u>	10	0,29	0,261
		12	0,25	0,225
		14	0,22	0,198
		16	0,196	0,1764

Tabella 42 - Trasmittanza termica dei solaio isolato con pannelli di FIBRA DI LEGNO, in funzione dello spessore

Sughero

Le pareti isolate con pannelli di sughero soddisfano i requisiti minimi a partire da spessori diversi, per il Betonwood si è scelto di spingersi contrariamente agli altri materiali fino a spessori di 20 cm, per analizzare anche in questo caso il contributo del conto termico.

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	Trasmittanza termica (U) [W/(m ² K)]	U*β _{tr} [W/(m ² K)]
SUGHERO	<u>BIOPAN</u>	10	0,29	0,261
		12	0,25	0,225
		14	0,22	0,198
		16	0,196	0,1764
	<u>BETONWOOD</u>	10	0,323	0,2907
		12	0,277	0,2493
		14	0,244	0,2196
		16	0,218	0,1962
		20	0,198	0,1782

Tabella 43 - Trasmittanza termica dei solaio isolato con pannelli di SUGHERO di vari produttori, in funzione dello spessore

Lana di roccia

Per le pareti con lana di roccia sono stati analizzati due materiali, di cui uno con densità inferiore. Per i solai, invece, è preferibile utilizzare un prodotto con densità intorno ai 100 kg/m³, che garantisce migliori prestazioni. Con spessori da 10 a 12 cm, soddisfa i requisiti minimi mentre con spessori da 14 e 16 cm raggiunge i limiti del Conto Termico.

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	Trasmittanza termica (U) [W/(m ² K)]	U*β _{tr} [W/(m ² K)]
LANA DI ROCCIA	<u>ISOVER</u>	10	0,265	0,2385
		12	0,227	0,2043
		14	0,199	0,1791
		16	0,177	0,1593

Tabella 44 - Trasmittanza termica dei solaio isolato con pannelli di LANA DI ROCCIA, in funzione dello spessore

Pir/Pur

I pannelli di PIR, grazie alla loro bassa conducibilità termica (lambda), offrono alte prestazioni per l'isolamento delle pareti. In particolare, per una delle due tipologie di pannelli di PIR esaminati, si raggiungono i requisiti del Conto Termico senza la necessità di combinazioni, contrariamente a quanto osservato finora per i solai.

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	Trasmittanza termica (U) [W/(m ² K)]	U*β _{tr} [W/(m ² K)]
PIR/PUR	<u>FIVE</u>	8	0,285	0,2565
		10	0,235	0,2115
		12	0,202	0,1818
		14	0,177	0,1593
		16	0,157	0,1413
	<u>ISOVER</u>	8	0,233	0,2097
		10	0,192	0,1728
		12	0,164	0,1476

Tabella 45 - Trasmittanza termica dei solaio isolato con pannelli di PUR di vari produttori, in funzione dello spessore

Resina fenolica

Come già detto nel paragrafo riguardanti gli interventi murari sono tra i materiali più performanti per l'isolamento termico, ma dato il loro alto costo si è scelto di analizzare come per i PIR solo pacchetti di isolante che non richiedessero combinazione.

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	Trasmittanza termica (U) [W/(m ² K)]	U*β _{tr} [W/(m ² K)]
RESINA FENOLICA	<u>WEBER</u>	6	0,26	0,234
		8	0,206	0,1854
		10	0,169	0,1521
		12	0,143	0,1287
	<u>ISOLMEC</u>	6	0,285	0,2565
		8	0,224	0,2016
		10	0,185	0,1665
		12	0,157	0,1413

Tabella 46 - Trasmittanza termica dei solaio isolato con pannelli in RESINA FENOLICA di vari produttori, in funzione dello spessore

10. Analisi dei consumi post-intervento

In questo capitolo vengono presentati i consumi energetici dopo gli interventi di efficientamento, evidenziando i benefici ottenuti in termini sia di risparmio energetico sia d'impatto ambientale. Le simulazioni dei vari interventi hanno fornito nuovi indici di prestazione energetica, ciò ha permesso di quantificare l'impatto dei vari interventi facendo il confronto con gli indici di prestazione dello stato di fatto.

Prima di procedere con l'illustrazione dei risultati, è opportuno richiamare il significato dei principali parametri utilizzati nell'analisi.

Innanzitutto, occorre introdurre il concetto di “Energia primaria”: con questo termine ci si riferisce all'energia che viene estratta direttamente dalla natura, senza alcuna trasformazione, e rappresenta il fabbisogno energetico complessivo per un determinato processo. Per calcolare il consumo di energia primaria in un edificio, è necessario applicare dei fattori di conversione che tengano conto dell'energia richiesta per produrre e fornire l'energia finale utilizzata nell'edificio, secondo la seguente formulazione:

$$E_p = E_f \times f_p$$

E_p = Energia primaria (kWh)

E_f = Energia finale utilizzata (kWh)

f_p = Fattore di conversione dell'energia primaria

I fattori di conversione utilizzati per questa analisi sono:

	Teleriscaldamento	Energia elettrica
$f_{p,ren}$	0	0,47
$f_{p,nren}$	0,858	1,95
$f_{p,tot}$	0,858	2,42

Tabella 47 – Fattori di conversione energia primaria [16]

In particolare, sono stati analizzati i seguenti parametri:

EP_{nren} (Indice di energia primaria non rinnovabile): rappresenta l'energia primaria non rinnovabile necessaria annualmente per soddisfare il fabbisogno energetico dell'edificio, diviso l'area della superficie utile climatizzata [kWh/m²]

EP_{ren} (Indice di energia primaria rinnovabile): rappresenta l'energia primaria rinnovabile necessaria annualmente per soddisfare il fabbisogno energetico dell'edificio, diviso l'area della superficie utile climatizzata [kWh/m²]

EP_{tot} (Indice di energia primaria totale): è la somma di EP_{nren} e EP_{ren} e rappresenta l'energia totale (sia rinnovabile che non rinnovabile) utilizzata per soddisfare i consumi energetici dell'edificio. Anche questa grandezza si esprime [kWh/m²]

Consumo in termini di teleriscaldamento (kWh): misura del consumo di energia per il riscaldamento invernale, utilizzando il teleriscaldamento.

Consumo in termini di energia elettrica (kWh_e): misura del consumo di energia elettrica per il raffrescamento estivo oltre all'aliquota richiesta dal teleriscaldamento.

Emissioni di CO₂: quantificazione delle emissioni di anidride carbonica annue, in relazione ai consumi energetici.

Le analisi sono state condotte sia per il riscaldamento invernale che per il raffrescamento estivo, e i risultati sono riportati in otto tabelle separate. Le tabelle sono organizzate come segue:

- **Quattro tabelle per i consumi di energia primaria**, distinte per interventi sulle pareti e sul solaio, e per riscaldamento invernale e raffrescamento estivo.
- **Quattro tabelle per i consumi di teleriscaldamento, elettricità e produzione di CO₂**, anch'esse separate per interventi sulle pareti e sul solaio, per riscaldamento invernale e raffrescamento estivo.

1. Energia primaria invernale post-intervento sulle pareti

L'applicazione del cappotto termico contribuisce a ridurre le dispersioni termiche attraverso le pareti migliorando l'efficienza energetica dell'edificio, ciò comporta inoltre un minor fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento, come si può notare dalla tabella 48, che evidenzia il confronto tra la situazione pre e post-intervento, quantificando il risparmio percentuale di energia primaria ottenuto.

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	$EP_{,nren}$ [kWh/m ²]	$\Delta EP_{,nren}$ [%]	$EP_{,ren}$ [kWh/m ²]	$\Delta EP_{,ren}$ [%]	$EP_{,tot}$ [kWh/m ²]	$\Delta EP_{,tot}$ [%]
STATO DI FATTO			50,2		0,61		50,8	
XPS	ELYFOAM	10	32,19	-35,88	0,37	-39,34	32,56	-35,91
		12	31,25	-37,75	0,36	-40,98	31,61	-37,78
	STYRODUR	10	31,94	-36,37	0,37	-39,34	32,31	-36,40
		12	31,23	-37,79	0,36	-40,98	31,59	-37,81
	ISOVER	10	31,69	-36,87	0,37	-39,34	32,06	-36,89
		12	31,00	-38,25	0,36	-40,98	31,36	-38,27
EPS	WEBER	8	32,40	-35,46	0,37	-39,34	32,77	-35,49
		10	31,42	-37,41	0,36	-40,98	31,78	-37,44
		12	30,76	-38,73	0,35	-42,62	31,11	-38,76
	FASSA	10	31,55	-37,15	0,36	-40,98	31,91	-37,19
		12	30,88	-38,49	0,36	-40,98	31,24	-38,50
CANAPA	ISOLKENAF	10	32,19	-35,88	0,37	-39,34	32,56	-35,91
		12	31,46	-37,33	0,36	-40,98	31,82	-37,36
FIBRA DI LEGNO	BETONWOOD	10	32,33	-35,60	0,37	-39,34	32,70	-35,63
		12	31,46	-37,33	0,36	-40,98	31,82	-37,36
SUGHERO	BIOPAN	10	32,19	-35,88	0,37	-39,34	32,56	-35,91
		12	31,46	-37,33	0,36	-40,98	31,82	-37,36
	BETONWOOD	12	32,00	-36,25	0,37	-39,34	32,37	-36,28
LANA DI VETRO	ISOVER	10	31,81	-36,63	0,37	-39,34	32,18	-36,65
		12	31,11	-38,03	0,36	-40,98	31,47	-38,05
	URSA	10	31,94	-36,37	0,37	-39,34	32,31	-36,40

		12	31,23	-37,79	0,36	-40,98	31,59	-37,81
LANA DI ROCCIA	ISOVER	10	31,68	-36,89	0,37	-39,34	32,05	-36,91
		12	31,00	-38,25	0,36	-40,98	31,36	-38,27
PIR/PUR	FIVE	8	32,03	-36,20	0,37	-39,34	32,40	-36,22
		10	31,15	-37,95	0,36	-40,98	31,51	-37,97
		12	30,52	-39,20	0,35	-42,62	30,87	-39,23
	PIR PLUS ISOVER	6	32,20	-35,86	0,37	-39,34	32,57	-35,89
		8	31,05	-38,15	0,36	-40,98	31,41	-38,17
		10	30,29	-39,66	0,35	-42,62	30,64	-39,69
		12	29,75	-40,74	0,34	-44,26	30,09	-40,77
RESINA FENOLICA	WEBER	6	31,58	-37,09	0,36	-40,98	31,94	-37,13
		8	30,52	-39,20	0,35	-42,62	30,87	-39,23
		10	29,82	-40,60	0,34	-44,26	30,16	-40,63
		12	29,34	-41,55	0,34	-44,26	29,68	-41,57
	ISOLMEC	6	32,00	-36,25	0,37	-39,34	32,37	-36,28
		8	30,88	-38,49	0,36	-40,98	31,24	-38,50
		10	30,14	-39,96	0,35	-42,62	30,49	-39,98
		12	29,62	-41,00	0,34	-44,26	29,96	-41,02

Tabella 48 - Energia primaria invernale post-intervento sulle pareti

2. Consumo per il riscaldamento invernale post-intervento sulle pareti

L'isolamento delle pareti tramite cappotto termico limita le dispersioni di calore e migliora l'inerzia termica dell'edificio, riducendo il carico termico invernale, questo comporta una diminuzione del consumo energetico necessario. I dati presentati nella tabella 49 mostrano il risparmio energetico conseguito rispetto alla condizione senza isolamento, mettendo in evidenza l'efficacia dell'intervento nel ridurre il fabbisogno di energia per il riscaldamento e la produzione di CO₂.

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	Consumo teleriscaldamento [kWh _t]	Consumo elettrico teleriscaldamento [kWh _{e,t}]	CO ₂ prodotta [Kg]
STATO DI FATTO			542764	12587	168619
XPS	ELYFOAM	10	345778	7732	108190
		12	338709	7488	105736
	STYRODUR	10	346115	7668	107362
		12	338458	7483	104980
	ISOVER	10	347499	7703	106508
		12	335968	7423	104205
EPS	WEBER	8	351048	7788	108897
		10	340532	7533	105625
		12	333408	7361	103408
	FASSA	10	341956	7567	106068
		12	334962	7392	103808
CANAPA	ISOLKENAF	10	348832	7734	108190
		12	341002	7557	105736
FIBRA DI LEGNO	BETONWOOD	10	350357	7745	108211
		12	340903	7538	105987
SUGHERO	BIOPAN	10	348835	7734	108208

		12	340948	7544	105755
	BETONWOOD	12	346787	7685	107572
LANA DI VETRO	ISOVER	10	344739	7635	106934
		12	337208	7453	104591
	URSA	10	346958	7671	107357
		12	338442	7483	104975
LANA DI ROCCIA	ISOVER	10	343364	7601	106506
		12	335962	7423	104203
PIR/PUR	FIVE	8	347099	7692	107668
		10	337619	7463	104719
		12	330795	7299	102596
	PIR PLUS ISOVER	6	348931	7736	108238
		8	336521	7436	104377
		10	328301	7238	101820
		12	322488	7099	100012
RESINA FENOLICA	WEBER	6	342194	7573	106142
		8	330759	7297	102584
		10	323292	7118	100262
		12	318051	6993	98632
	ISOLMEC	6	346744	7683	107577
		8	334639	7391	103792
		10	326664	7199	101311
		12	321003	7064	99560

Tabella 49 - Consumo per il riscaldamento invernale post-intervento sulle pareti

3. Energia primaria estiva post-intervento sulle pareti

L'installazione del cappotto termico modifica il comportamento termico dell'edificio anche in estate. Questo effetto può portare a un miglior comfort abitativo, ma anche a un incremento della domanda di raffrescamento, poiché il calore accumulato dalle pareti viene rilasciato più lentamente. La tabella riporta i valori di energia primaria necessari per la climatizzazione estiva dopo l'intervento, permettendo di valutare l'incremento del fabbisogno rispetto alla situazione attuale.

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	$EP_{s,ren}$ [kWh/m ²]	$\Delta EP_{s,ren}$ [%]	$EP_{s,ren}$ [kWh/m ²]	$\Delta EP_{s,ren}$ [%]	$EP_{s,tot}$ [kWh/m ²]	$\Delta EP_{s,tot}$ [%]
STATO DI FATTO			13,64		3,29		16,93	
XPS	ELYFOAM	10	14,90	9,24	3,59	9,12	18,49	9,21
		12	14,99	9,90	3,61	9,73	18,60	9,86
	STYRODUR	10	14,92	9,38	3,60	9,42	18,52	9,39
		12	15,01	10,04	3,62	10,03	18,63	10,04
	ISOVER	10	14,99	9,90	3,61	9,73	18,60	9,86
		12	15,04	10,26	3,62	10,03	18,66	10,22
EPS	WEBER	8	14,87	9,02	3,59	9,12	18,46	9,04
		10	14,99	9,90	3,61	9,73	18,60	9,86
		12	15,07	10,48	3,63	10,33	18,70	10,45
	FASSA	10	14,97	9,75	3,61	9,73	18,58	9,75

		12	15,05	10,34	3,63	10,33	18,68	10,34
CANAPA	ISOLKENAF	10	14,89	9,16	3,59	9,12	18,48	9,16
		12	14,98	9,82	3,61	9,73	18,59	9,81
FIBRA DI LEGNO	BETONWOOD	10	14,89	9,16	3,59	9,12	18,48	9,16
		12	14,98	9,82	3,61	9,73	18,59	9,81
SUGHERO	BIOPAN	10	14,89	9,16	3,59	9,12	18,48	9,16
		12	14,98	9,82	3,61	9,73	18,59	9,81
	BETONWOOD	12	14,92	9,38	3,61	9,73	18,53	9,45
LANA DI VETRO	ISOVER	10	14,94	9,53	3,60	9,42	18,54	9,51
		12	15,03	10,19	3,62	10,03	18,65	10,16
	URSA	10	14,92	9,38	3,60	9,42	18,52	9,39
		12	15,01	10,04	3,62	10,03	18,63	10,04
LANA DI ROCCIA	ISOVER	10	14,95	9,60	3,60	9,42	18,55	9,57
		12	15,04	10,26	3,62	10,03	18,66	10,22
PIR/PUR	FIVE	8	14,91	9,31	3,59	9,12	18,50	9,27
		10	15,02	10,12	3,62	10,03	18,64	10,10
		12	15,10	10,70	3,64	10,64	18,74	10,69
	PIR PLUS ISOVER	6	14,89	9,16	3,59	9,12	18,48	9,16
		8	15,03	10,19	3,62	10,03	18,65	10,16
		10	15,12	10,85	3,65	10,94	18,77	10,87
		12	15,19	11,36	3,66	11,25	18,85	11,34
RESINA FENOLICA	WEBER	6	14,96	9,68	3,61	9,73	18,57	9,69
		8	15,09	10,63	3,64	10,64	18,73	10,63
		10	15,18	11,29	3,66	11,25	18,84	11,28
		12	15,25	11,80	3,67	11,55	18,92	11,75
	ISOLMEC	6	14,91	9,31	3,59	9,12	18,50	9,27
		8	15,05	10,34	3,63	10,33	18,68	10,34
		10	15,14	11,00	3,65	10,94	18,79	10,99
		12	15,21	11,51	3,67	11,55	18,88	11,52

Tabella 50 - Energia primaria estiva post-intervento sulle pareti

4. Consumo per il raffrescamento estivo post-intervento sulle pareti

Come evidenziato in precedenza, l'isolamento delle pareti riduce le oscillazioni termiche interne, influenzando anche la gestione del calore nei mesi estivi. Se da un lato si limita l'ingresso del calore esterno, dall'altro il calore accumulato di giorno viene smaltito più lentamente, con un possibile aumento della richiesta di raffrescamento. La tabella riporta i consumi energetici post-intervento.

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	Consumo raffrescamento [kWh _{el}]	CO ₂ prodotta [Kg]
STATO DI FATTO			68336	31434
XPS	ELYFOAM	10	74597	34315
		12	75080	34519
	STYRODUR	10	74742	34381
		12	75176	34581
	ISOVER	10	74932	34451
		12	75317	34646

EPS	WEBER	8	74489	34265
		10	75050	34523
		12	75464	34713
	FASSA	10	74971	34487
		12	75391	34680
CANAPA	ISOLKENAF	10	74584	34315
		12	74902	34519
FIBRA DI LEGNO	BETONWOOD	10	74583	34308
		12	74902	34510
SUGHERO	BIOPAN	10	74585	34309
		12	75028	34513
	BETONWOOD	12	74700	34362
LANA DI VETRO	ISOVER	10	74819	34417
		12	75249	34617
	URSA	10	75180	34383
		12	75180	34583
LANA DI ROCCIA	ISOVER 32K	10	74894	34451
		12	75318	34646
PIR/PUR	FIVE	8	74677	34351
		10	75211	34597
		12	75612	34781
	PIR PLUS ISOVER	6	74566	34300
		8	75259	34619
		10	75742	34842
		12	76097	35005
RESINA FENOLICA	WEBER	6	74932	34469
		8	75587	34770
		10	76035	34976
		12	76360	35125
	ISOLMEC	6	74684	34355
		8	75365	34668
		10	75838	34885
		12	76182	35044

Tabella 51 - Consumo per il raffrescamento estivo post-intervento sulle pareti

5. Energia primaria invernale post-intervento solaio

Analogamente a quanto detto per l'adozione del sistema a cappotto, anche l'isolamento del solaio di copertura riduce le dispersioni termiche limitando le perdite di calore durante il periodo invernale. Questo si traduce in una minore richiesta di energia per il riscaldamento, con un impatto diretto sulla riduzione dell'energia primaria necessaria per soddisfare il fabbisogno termico. La tabella 52 evidenzia il confronto tra la situazione pre e post-intervento, quantificando il risparmio ottenuto in termini di energia primaria, questo risparmio risulta più contenuto rispetto a quello ottenuto dall'installazione del sistema a cappotto.

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	$EP_{,nren}$ [kWh/m ²]	$\Delta EP_{,nren}$ [%]	$EP_{,ren}$ [kWh/m ²]	$\Delta EP_{,ren}$ [%]	$EP_{,tot}$ [kWh/m ²]	$\Delta EP_{,tot}$ [%]
STATO DI FATTO			50,2	-	0,61	-	50,8	-
XPS	ELYFOAM	12	46,69	-6,99	0,56	-8,20	47,25	-6,99
		14	46,41	-7,55	0,56	-8,20	46,97	-7,54
		16	46,3	-7,77	0,55	-9,84	46,85	-7,78
	Isover	10	46,93	-6,51	0,56	-8,20	47,49	-6,52
		12	46,53	-7,31	0,56	-8,20	47,09	-7,30
		14	46,26	-7,85	0,55	-9,84	46,81	-7,85
		16	46	-8,37	0,55	-9,84	46,55	-8,37
FIBRA DI LEGNO	BETONWOOD	12	46,79	-6,79	0,56	-8,20	47,35	-6,79
		14	46,46	-7,45	0,56	-8,20	47,02	-7,44
		16	46,21	-7,95	0,55	-9,84	46,76	-7,95
SUGHERO	BIOPAN	12	46,69	-6,99	0,56	-8,20	47,25	-6,99
		14	46,46	-7,45	0,56	-8,20	47,02	-7,44
		16	46,21	-7,95	0,55	-9,84	46,76	-7,95
	BETONWOOD	16	46,46	-7,45	0,56	-8,20	47,02	-7,44
		20	46,05	-8,27	0,55	-9,84	46,6	-8,27
LANA DI ROCCIA	ISOVER	10	46,93	-6,51	0,56	-8,20	47,49	-6,52
		12	46,53	-7,31	0,56	-8,20	47,09	-7,30
		14	46,23	-7,91	0,55	-9,84	46,78	-7,91
		16	46	-8,37	0,55	-9,84	46,55	-8,37
PIR/PUR	FIVE	10	46,63	-7,11	0,56	-8,20	47,19	-7,11
		12	46,27	-7,83	0,55	-9,84	46,82	-7,83
		14	46	-8,37	0,55	-9,84	46,55	-8,37
		16	45,79	-8,78	0,55	-9,84	46,34	-8,78
	PIR PLUS ISOVER	8	46,59	-7,19	0,56	-8,20	47,15	-7,19
		10	46,16	-8,05	0,55	-9,84	46,71	-8,05
		12	45,86	-8,65	0,55	-9,84	46,41	-8,64
RESINA FENOLICA	WEBER	6	46,9	-6,57	0,56	-8,20	47,46	-6,57
		8	46,3	-7,77	0,55	-9,84	46,85	-7,78
		10	45,92	-8,53	0,55	-9,84	46,47	-8,52
		12	45,65	-9,06	0,55	-9,84	46,2	-9,06
	ISOLMEC	8	46,5	-7,37	0,56	-8,20	47,06	-7,36
		10	46,08	-8,21	0,55	-9,84	46,63	-8,21
		12	45,79	-8,78	0,55	-9,84	46,34	-8,78

Tabella 52 - Energia primaria invernale post-intervento solaio

6. Consumo per il riscaldamento invernale post-intervento solaio

I dati presentati nella tabella 53 mostrano il risparmio energetico conseguito rispetto alla condizione senza isolamento, mettendo in evidenza l'efficacia dell'intervento nel ridurre il fabbisogno di energia per il riscaldamento e la produzione di CO₂, ovviamente anche in questa tabella come nella precedente si osserva un calo delle emissioni più contenuto, rispetto agli interventi sulle pareti.

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	Consumo teleriscaldamento [kWh _t]	Consumo elettrico teleriscaldamento [kWh _{el}]	CO ₂ prodotta [Kg]
STATO DI FATTO			542764	12587	168619
XPS	ELYFOAM	12	504960	11629	151488
		14	501989	11555	150597
		16	499770	11499	149931
	ISOVER	10	507574	11694	152272
		12	503290	11587	156317
		14	500280	11500	155780
		16	497564	11444	154543
FIBRA DI LEGNO	BETONWOOD	12	506049	11657	157177
		14	502559	11569	156090
		16	499827	11501	155239
SUGHERO	BIOPAN	12	505002	11630	156851
		14	501499	11546	155730
		16	498679	11589	154082
	BETONWOOD	16	502519	11569	156077
		20	498105	11459	154703
LANA DI ROCCIA	ISOVER	10	507571	11694	157650
		12	503285	11587	156316
		14	500068	11507	155313
		16	497560	11444	154532
PIR/PUR	FIVE	10	504836	11615	156658
		12	500483	11517	155443
		14	497564	11444	154354
		16	495296	11388	153827
	PIR PLUS ISOVER	8	503974	11604	156530
		10	499325	11488	155082
		12	496055	11407	154064
RESINA FENOLICA	WEBER	6	507311	11688	157570
		8	500873	11526	155553
		10	496662	11422	154253
		12	493744	11349	153344
	ISOLMEC	8	503943	11578	156209
		10	498448	11466	154809
		12	495294	11388	153827

Tabella 53 - Consumo per il riscaldamento invernale post-intervento solaio

7. Energia primaria estiva post-intervento solaio

L'isolamento del solaio, come quello delle pareti, non solo influisce sulle prestazioni invernali, ma modifica anche il comportamento termico dell'edificio in estate. La tabella presenta i valori di energia primaria richiesti per la climatizzazione estiva post-intervento, consentendo di valutare l'effetto dell'isolamento sul fabbisogno complessivo di energia. Anche per questo intervento si osserva un incremento della richiesta di energia primaria necessaria per il raffrescamento anche se, con valori molto più contenuti.

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	EP_{nren} [kWh/m ²]	ΔEP_{nren} [%]	EP_{ren} [kWh/m ²]	ΔEP_{ren} [%]	EP_{tot} [kWh/m ²]	ΔEP_{tot} [%]
STATO DI FATTO			13,64		3,29		16,93	
XPS	ELYFOAM	12	13,69	0,37	3,30	0,30	16,99	0,35
		14	13,69	0,37	3,30	0,30	16,99	0,35
		16	13,69	0,37	3,30	0,30	16,99	0,35
	ISOVER	10	13,68	0,29	3,30	0,30	16,98	0,30
		12	13,69	0,37	3,30	0,30	16,99	0,35
		14	13,70	0,44	3,30	0,30	17,00	0,41
		16	13,70	0,44	3,30	0,30	17,00	0,41
FIBRA DI LEGNO	BETONWOOD	12	13,68	0,29	3,30	0,30	16,98	0,30
		14	13,69	0,37	3,30	0,30	16,99	0,35
		16	13,69	0,37	3,30	0,30	16,99	0,35
SUGHERO	BIOPAN	12	13,69	0,37	3,30	0,30	16,99	0,35
		14	13,69	0,37	3,30	0,30	16,99	0,35
		16	13,69	0,37	3,30	0,30	16,99	0,35
	BETONWOOD	16	13,69	0,37	3,30	0,30	16,99	0,35
		20	13,69	0,37	3,30	0,30	16,99	0,35
LANA DI ROCCIA	ISOVER	10	13,68	0,29	3,30	0,30	16,98	0,30
		12	13,69	0,37	3,30	0,30	16,99	0,35
		14	13,69	0,37	3,30	0,30	16,99	0,35
		16	13,70	0,44	3,30	0,30	17,00	0,41
PIR/PUR	FIVE	10	13,69	0,37	3,30	0,30	16,99	0,35
		12	13,69	0,37	3,30	0,30	16,99	0,35
		14	13,70	0,44	3,30	0,30	17,00	0,41
		16	13,70	0,44	3,30	0,30	17,00	0,41
	PIR PLUS ISOVER	8	13,69	0,37	3,30	0,30	16,99	0,35
		10	13,70	0,44	3,30	0,30	17,00	0,41
		12	13,70	0,44	3,30	0,30	17,00	0,41
RESINA FENOLICA	WEBER	6	13,68	0,29	3,30	0,30	16,98	0,30
		8	13,69	0,37	3,30	0,30	16,99	0,35
		10	13,70	0,44	3,30	0,30	17,00	0,41
		12	13,71	0,51	3,30	0,30	17,01	0,47
	ISOLMEC VT	8	13,69	0,37	3,30	0,30	16,99	0,35
		10	13,70	0,44	3,30	0,30	17,00	0,41
		12	13,70	0,44	3,30	0,30	17,00	0,41

Tabella 54 - Energia primaria estiva post-intervento solaio

8. Consumo per il raffrescamento estivo post-intervento solaio

Come evidenziato in precedenza, l'isolamento del solaio come quello delle pareti, può ridurre le oscillazioni termiche interne, ma questa maggiore capacità di isolamento può rallentare il rilascio del calore accumulato, andando a incrementare i consumi e quindi emissioni relative al raffrescamento estivo

La tabella 55 riporta i consumi energetici per la climatizzazione e la CO₂ prodotta dopo l'intervento, ovviamente dato il limitato impatto già evidenziato nella tabella 54 in termini di energia primaria, anche in termini di consumi e emissioni l'aumento è abbastanza trascurabile.

Materiale	Produttore	Spessore [cm]	Consumo raffrescamento [kWh _{el}]	CO ₂ prodotta [Kg]
STATO DI FATTO			68336	31434
XPS	ELYFOAM	12	68543	31530
		14	68566	31540
		16	68582	31548
	ISOVER	10	68513	31516
		12	68550	31533
		14	68570	31544
		16	68603	31557
FIBRA DI LEGNO	FIBERTHERM	12	68518	31518
		14	68549	31533
		16	68572	31543
SUGHERO	BIOPAN	12	68537	31527
		14	68549	31533
		16	68572	31543
	BETONWOOD	16	68554	31530
		20	68582	31548
LANA DI ROCCIA	ISOVER	10	68513	31516
		12	68550	31533
		14	68580	31547
		16	68603	31558
PIR/PUR	FIVE	10	68540	31529
		12	68576	31545
		14	68603	31577
		16	68626	31568
	PIR PLUS ISOVER	8	68544	31530
		10	68587	31550
		12	68618	31564
RESINA FENOLICA	WEBER	6	68515	31517
		8	68573	31544
		10	68612	31561
		12	68643	31576
	ISOLMEC	8	68553	31535
		10	68595	31554
		12	68626	31568

Tabella 55 - Consumo per il raffrescamento estivo post-intervento solaio

11. Analisi dei costi

Nel presente lavoro l'analisi dei costi è stata effettuata facendo riferimento alla norma europea EN 15459 1:2017 "Energy performance of building–Economic evaluation procedure for energy system in building Part 1: Calculation procedures". Per ognuno dei singoli interventi e scenari esaminati l'analisi si è basata sui seguenti indicatori economici:

- Valore attuale netto (VAN);
- Tempo di ritorno dell'investimento;
- Costo globale;

Il **Valore Attuale Netto (VAN)** rappresenta la somma dei flussi di cassa netti futuri attualizzati, ottenuti dalla differenza tra ricavi e costi generati dall'intervento nel corso del suo ciclo di vita. Poiché tali flussi di cassa si verificano in momenti diversi nel tempo, è necessario attualizzarli applicando un opportuno fattore di sconto. A questo scopo, si utilizza il flusso di cassa attualizzato ($CF_{disc,t}$) che consente di esprimere il valore reale di ogni singolo flusso di cassa, tenendo conto del tasso di attualizzazione.

Il VAN è un parametro fondamentale per valutare la convenienza economica dell'intervento, poiché indica se l'investimento genera un valore positivo nel lungo periodo. Un VAN positivo suggerisce che i benefici attualizzati superano i costi, rendendo l'intervento economicamente vantaggioso.

Le formule adottate sono le seguenti:

$$CF_{disc,t} = (R - C)_{disc,t} = \frac{(R - C)_{(t)}}{(1 + r)^t} = CF_{(t)} \times DF_{(t)}$$

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{CF_{(t)}}{(1 + r)^t} = \sum_{t=0}^n CF_{(t)} \times DF_{(t)}$$

dove:

- $(R - C)_{(t)} = CF_{(t)}$ rappresenta il flusso di cassa netto dell'anno t , ottenuto dalla differenza tra ricavi (R) e costi (C) legati all'intervento per quell'anno;
- $DF_{(t)}$ = è il fattore di attualizzazione, che serve a riportare i flussi di cassa futuri al valore attuale;
- t indica il periodo di riferimento (espresso in anni) in cui avviene il flusso di cassa.
- r è il tasso di attualizzazione,
- n è il numero di anni di valutazione,

Il **Periodo di Ritorno** dell'Investimento (Payback Period) rappresenta il tempo necessario per recuperare l'investimento iniziale, esso viene calcolato sulla base dei flussi di cassa generati

dall'intervento, indica quindi il numero di anni necessari affinché la somma dei flussi di cassa raggiunga o superi l'investimento iniziale.

L'**Indice di Redditività (IR)** invece è un indicatore che misura la redditività di un investimento, rappresenta il rapporto tra il valore attualizzato dei flussi di cassa (VAN) e l'investimento iniziale. Viene utilizzato per valutare se un progetto è economicamente vantaggioso in relazione al capitale investito.

Formula:

$$IR = \left[\frac{\sum_{t=1}^n \frac{CF(t)}{(1+i)^t}}{\text{Investimento Iniziale}} \right]$$

Un **IR > 1** indica che l'investimento è conveniente, mentre un **IR < 1** suggerisce che non è redditizio.

Alla luce dei parametri presi in considerazione, l'analisi dei costi condotta nel presente lavoro è caratterizzata dai seguenti parametri di input:

- Durata periodo considerato pari a 30 anni;
- Aumento costo medio annuo energia elettrica 1,7%
- Aumento costo medio annuo teleriscaldamento 2%
- Tasso di sconto 5%;
- Costo attuale vettore energia elettrica pari a 0,245 €/kWh [13]
- Costo attuale vettore teleriscaldamento pari a 0,08€/kWh [13]

Prima di proseguire con l'analisi dei risultati, è utile fare una breve digressione sugli incentivi economici, concentrandosi in particolare sul Conto Termico, che gioca un ruolo fondamentale nella valutazione degli interventi di riqualificazione energetica.

Agevolazioni per gli interventi

Gli incentivi fiscali sono strumenti fondamentali per promuovere gli interventi di efficientamento energetico, con vantaggi che riguardano il patrimonio edilizio esistente ma anche per le nuove costruzioni. L'obiettivo di questa tipologia di interventi è la riduzione dei consumi con un conseguente risparmio in termini economici sebbene l'investimento iniziale possa essere significativo. La predisposizione di incentivi permette a chi ne beneficia di far rientrare l'investimento più velocemente rendendo più convenienti gli interventi di ristrutturazione e riqualificazione energetica e quindi stimolandone la domanda. Esistono diverse tipologie di agevolazioni destinate a soggetti pubblici o privati e che ogni anno vengono aggiornate dallo Stato. Questi incentivi, tuttavia, prevedono restrizioni e requisiti specifici da rispettare per poterne usufruire come un avanzamento di classe energetica da ottenere, limiti di spesa da rispettare, interventi ammessi, ecc. Queste restrizioni sono importanti al fine di incentivare solo gli interventi che effettivamente hanno come obiettivo l'aumento dell'efficienza energetica di un edificio. Tra le soluzioni disponibili per le pubbliche

amministrazioni vi è il Conto Termico che è l'agevolazione che è stata sfruttata in questo lavoro di tesi per l'efficientamento energetico dell'edificio del Politecnico di Torino.

- Conto Termico

Quando si parla di Conto Termico si fa riferimento, dal punto di vista normativo, al Decreto MISE 16/02/2016, un decreto interministeriale di “*aggiornamento della disciplina per l'incentivazione di interventi di piccole dimensioni per l'incremento dell'efficienza energetica e per la produzione di energia termica da fonti rinnovabili*”.

In conformità a quanto previsto da questo Decreto, sono incentivabili gli interventi di riqualificazione energetica in edifici esistenti o parti di essi. I soggetti beneficiari previsti dal Decreto sono sia le Amministrazioni Pubbliche (PA), sia i soggetti privati. Per quanto concerne le PA, d'interesse per il caso studio analizzato in questa tesi, il Conto Termico finanzia una percentuale che varia dal 40% al 65% delle spese sostenute per gli interventi di manutenzione sull'involucro e sugli impianti che ne incrementano l'efficienza energetica. La percentuale di incentivo varia a seconda della tipologia di intervento, con un tetto massimo erogabile per ciascuna categoria. Di seguito viene riportato un estratto della tabella riassuntiva con gli incentivi disponibili in relazione ai tipi di intervento che saranno analizzati in seguito.

TIPOLOGIA INTERVENTO	PERCENTUALE SPESA RICONOSCIBILE E INCENTIVO MASSIMO EROGABILE
1.A Isolamento termico di superfici opache	40% (*) (**) 400.000 €
* Per interventi realizzati nelle zone climatiche E e F, la percentuale incentivata della spesa ammissibile è pari al 50%.	
1.G Installazione di tecnologie di building automation degli impianti termici ed elettrici degli edifici	40% 50.000 €

Figura 41 – Incentivi presi in considerazione nel caso studio [14]

Gli interventi incentivabili riguardano le categorie riportate in Fig.42 e per ciascuna sono previsti requisiti precisi per averne accesso:



Figura 42 - Interventi incentivabili con conto termico [14]

1.A) Coibentazione

“L’intervento incentivabile consiste nell’isolamento di coperture, pavimenti/solai e pareti perimetrali di edifici esistenti, parti di edifici esistenti o unità immobiliari esistenti di qualsiasi categoria catastale, dotati di impianto di climatizzazione.”

Per ogni tipologia di superficie opaca (copertura, pavimento o parete) è definito un valore limite massimo di trasmittanza da rispettare per beneficiare dell’incentivo, in funzione della zona climatica:

[Tabella 1 – Allegato I – DM 16.02.16]		
Tipologia di intervento	Requisiti tecnici di soglia per la tecnologia	
Strutture opache orizzontali: isolamento coperture	Zona climatica A	≤ 0,27 W/m ² K
	Zona climatica B	≤ 0,27 W/m ² K
	Zona climatica C	≤ 0,27 W/m ² K
	Zona climatica D	≤ 0,22 W/m ² K
	Zona climatica E	≤ 0,20 W/m ² K
	Zona climatica F	≤ 0,19 W/m ² K
Strutture opache orizzontali: isolamento pavimenti	Zona climatica A	≤ 0,43 W/m ² K
	Zona climatica B	≤ 0,40 W/m ² K
	Zona climatica C	≤ 0,30 W/m ² K
	Zona climatica D	≤ 0,28 W/m ² K
	Zona climatica E	≤ 0,25 W/m ² K
	Zona climatica F	≤ 0,23 W/m ² K
Strutture opache verticali: isolamento pareti perimetrali	Zona climatica A	≤ 0,38 W/m ² K
	Zona climatica B	≤ 0,38 W/m ² K
	Zona climatica C	≤ 0,30 W/m ² K
	Zona climatica D	≤ 0,26 W/m ² K
	Zona climatica E	≤ 0,23 W/m ² K
	Zona climatica F	≤ 0,22 W/m ² K

Tabella 56 – Requisiti minimi di trasmittanza per accedere all’incentivo [15]

Di seguito sono riportati i valori necessari per il calcolo dell’incentivo:

[Tabella 5 – Allegato II - DM 16.02.16]			
Tipologia di intervento	Percentuale incentivata della spesa ammissibile (% _{spesa})	Costo massimo ammissibile (C _{max})	Valore massimo dell’incentivo (I _{max}) [€]
i. Strutture opache orizzontali¹³: isolamento coperture			(i+ii+iii) ≤ 400.000
Esterno	40 (*) (**)	200 €/m ²	
Interno	40 (*) (**)	100 €/m ²	
Copertura ventilata	40 (*) (**)	250 €/m ²	
ii. Strutture opache orizzontali: isolamento pavimenti			
Esterno	40 (*) (**)	120 €/m ²	
Interno	40 (*) (**)	100 €/m ²	
iii. Strutture opache verticali: isolamento pareti perimetrali			
Esterno	40 (*) (**)	100 €/m ²	
Interno	40 (*) (**)	80 €/m ²	
Parete ventilata	40 (*) (**)	150 €/m ²	

(*) Per interventi realizzati nelle zone climatiche E e F la percentuale incentivata della spesa ammissibile è pari al 50%.

Tabella 57 – Quote incentivabili per l’intervento di coibentazione [15]

1.G) Building Automation

“L’intervento incentivabile consiste nell’installazione di tecnologie di gestione e controllo automatico (Building Automation - BA) degli impianti termici ed elettrici degli edifici esistenti, parti di edifici esistenti o unità immobiliari esistenti di qualsiasi categoria catastale, dotati di impianto di climatizzazione, compresa l’installazione di sistemi di termoregolazione e contabilizzazione del calore.”

Di seguito di riportano i valori necessari per il calcolo dell’incentivo:

[Tabella 5 – Allegato II - DM 16.02.16]		
Tipologia di intervento	Costo massimo ammissibile (C _{max})	Valore massimo dell’incentivo I _{max} [€]
Installazione di tecnologie di <i>Building Automation</i>	25 €/m ²	50.000

Tabella 58 - Quote incentivabili per l’intervento di building automation [15]

È importante sottolineare che il contributo del Conto Termico 2.0 non incide sul costo totale dell’intervento, l’incentivo viene dilazionato in un arco temporale massimo di 5 anni, durante i quali l’azienda o i proprietari riceveranno i pagamenti previsti dall’incentivo. Questo contributo viene preso in considerazione nell’analisi dei flussi di cassa, andando quindi a incrementare il VAN e a ridurre il periodo di ritorno dell’investimento

Analisi economica dei singoli interventi

Nel presente capitolo vengono presentati i risultati delle analisi economiche, associati agli interventi di efficientamento energetico proposti per l’edificio.

I parametri principali considerati includono il VAN a 30 anni, conformità ai requisiti del Conto Termico, il tempo di ritorno dell’investimento e il costo complessivo dell’intervento oltre il costo al metro quadrato.

Di seguito vengono spiegate brevemente le voci considerate nel calcolo del costo totale dell’intervento:

1. Costo dei materiali

I costi dei materiali utilizzati per gli interventi sono stati estrapolati da prezziari forniti da vari produttori selezionati per ciascun tipo di materiale isolante. In particolare, sono stati considerati i costi per unità di superficie [€/m²], in base alle caratteristiche specifiche dei pannelli isolanti scelti per l’isolamento delle strutture verticali (pareti) e orizzontali (solai).

2. Costo della mano d’opera

Per quanto riguarda i costi legati alla manodopera, sono stati utilizzati i dati del **Prezziario Piemonte 2023**, riferiti alle voci specifiche per l’installazione dei pannelli isolanti. In particolare:

- **Voce 03.A07.A01.005** Realizzazione di isolamento termico a cappotto con lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e deposito a qualsiasi piano del fabbricato. Sono compresi inoltre gli oneri relativi a: incollaggio e/o tassellatura e

sagomatura dei pannelli, rasatura, stesura di fissativo, applicazione del rasante a base di calce idraulica naturale steso con spatola d'acciaio, compresa la posa di rete d'armatura e di ogni altro onere necessario per dare l'opera finita a perfetta regola d'arte.(esclusa la fornitura dell'isolante) Su superfici esterne verticali.

- **Voce 03.A07.A01.010** Realizzazione di isolamento termico a cappotto con lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e deposito a qualsiasi piano del fabbricato. Sono compresi inoltre gli oneri relativi a: incollaggio e/o tassellatura e sagomatura dei pannelli, rasatura, stesura di fissativo, applicazione del rasante a base di calce idraulica naturale steso con spatola d'acciaio, compresa la posa di rete d'armatura e di ogni altro onere necessario per dare l'opera finita a perfetta regola d'arte. (esclusa la fornitura dell'isolante) Su superfici esterne orizzontali.

Analisi economica interventi su paramenti verticali

La seguente tabella riporta i risultati economici relativi agli interventi sugli elementi verticali, evidenziando i principali parametri di valutazione.

		Costo totale	Costo specifico	Conto termico	TIR	VAN (30 Anni)
XPS	ELYFOAM 10CM	- 807.247,09 €	88,28 €/m ²	NO	22 ANNI	160.292,42 €
	ELYFOAM 12CM	- 855.621,50 €	93,57 €/m ²	NO	23 ANNI	160.514,50 €
	STYRODUR 10CM	- 808.070,10 €	88,37 €/m ²	NO	22 ANNI	159.048,13 €
	STYRODUR 12CM	- 876.105,18 €	95,81 €/m ²	SI	16 ANNI	248.276,15 €
	ISOVER 10	- 738.571,90 €	80,77 €/m ²	NO	21 ANNI	171.394,27 €
	ISOVER 12	- 782.008,27 €	85,52 €/m ²	SI	14 ANNI	272.004,97 €
EPS	WEBER 10CM	- 880.860,32 €	96,33 €/m ²	NO	23 ANNI	151.308,33 €
	WEBER 12CM	- 953.193,31 €	104,24 €/m ²	SI	17 ANNI	238.620,44 €
	FASSA 10CM	- 767.011,29 €	83,88 €/m ²	NO	21 ANNI	175.333,64 €
	FASSA 12CM	- 815.842,92 €	89,22 €/m ²	SI	14 ANNI	267.832,72 €
CANAPA	ISOLKENAF 10CM	- 745.887,50 €	81,57 €/m ²	NO	22 ANNI	169.049,21 €

	ISOLKENAF 12CM	-	790.512,66 €	86,45 €/m ²	NO	22 ANNI	172.050,17 €
FIBRA DI LEGNO	BETONWOOD 10CM	-	678.401,09 €	74,19 €/m ²	NO	18 ANNI	181.861,92 €
	BETONWOOD 12CM	-	709.583,83 €	77,60 €/m ²	NO	18 ANNI	191.058,42 €
SUGHERO	BETONWOOD 12CM	-	1.035.768,15 €	113,27 €/m ²	NO	26 ANNI	105.291,38 €
	BIOPAN 10CM	-	948.621,06 €	103,74 €/m ²	NO	25 ANNI	122.130,31 €
	BIOPAN 12CM	-	998.275,70 €	109,17 €/m ²	NO	25 ANNI	113.853,25 €
LANA DI VETRO	ISOVER 10CM	-	629.295,12 €	68,82 €/m ²	NO	18 ANNI	202.648,47 €
	ISOVER 12CM	-	653.070,82 €	71,42 €/m ²	SI	11 ANNI	284.897,62 €
	URSA 10CM	-	641.731,64 €	70,18 €/m ²	NO	18 ANNI	193.583,87 €
	URSA 12CM	-	666.238,90 €	72,86 €/m ²	SI	11 ANNI	281.366,58 €
LANA DI ROCCIA	ISOVER 10CM	-	637.799,51 €	69,75 €/m ²	NO	18 ANNI	202.931,33 €
	ISOVER 12CM	-	660.203,53 €	72,20 €/m ²	SI	11 ANNI	286.101,70 €
PIR/PUR	FIVE 8CM	-	823.615,75 €	90,07 €/m ²	NO	23 ANNI	153.904,93 €
	FIVE 10CM	-	890.370,60 €	97,37 €/m ²	SI	16 ANNI	246.403,98 €
	FIVE 12CM	-	955.753,77 €	104,52 €/m ²	SI	17 ANNI	242.260,34 €
	ISOVER 6CM	-	722.386,13 €	79,00 €/m ²	NO	21 ANNI	174.396,83 €
	ISOVER 8CM	-	784.111,51 €	85,75 €/m ²	SI	14 ANNI	271.013,78 €
	ISOVER 10CM	-	843.733,65 €	92,27 €/m ²	SI	15 ANNI	272.291,04 €
	ISOVER 12CM	-	909.756,94 €	99,49 €/m ²	SI	16 ANNI	266.294,04 €
RESINA FENOLICA	WEBER 6CM	-	1.102.614,44 €	120,58 €/m ²	NO	26 ANNI	97.435,97 €

	WEBER 8CM	-	1.264.929,32 €	138,33 €/m ²	SI	22 ANNI	170.937,88 €
	WEBER 10CM	-	1.410.875,54 €	154,29 €/m ²	SI	24 ANNI	149.135,47 €
	WEBER 12CM	-	1.574.379,20 €	172,17 €/m ²	SI	26 ANNI	119.641,64 €
	ISOLMEC 6CM	-	914.146,30 €	99,97 €/m ²	NO	24 ANNI	133.608,69 €
	ISOLMEC 8CM	-	1.053.142,70 €	115,17 €/m ²	SI	19 ANNI	213.657,66 €
	ISOLMEC 10CM	-	1.153.732,20 €	126,17 €/m ²	SI	20 ANNI	203.198,62 €
	ISOLMEC 12CM	-	1.263.466,20 €	138,17 €/m ²	SI	22 ANNI	186.852,78 €

Tabella 59 - Analisi economica interventi su paramenti verticali

Analisi economica interventi su elementi orizzontali

Similmente, i risultati relativi agli interventi sui solai sono presentati nella tabella 60, indicando i medesimi parametri.

			Costo totale	Costo specifico	Conto termico	TIR	VAN (30 Anni)
XPS	ELYOFOAM 12	-	174.826,05 €	81,22 €/m ²	NO	22 ANNI	41.638,33 €
	ELYOFOAM 14	-	210.191,63 €	97,65 €/m ²	NO	24 ANNI	29.237,83 €
	ELYOFOAM 16	-	213.075,98 €	98,99 €/m ²	SI	18 ANNI	53.013,56 €
	ISOVER 10CM	-	147.166,43 €	68,37 €/m ²	NO	22 ANNI	33.285,87 €
	ISOVER 12CM	-	157.390,80 €	73,12 €/m ²	NO	21 ANNI	39.023,02 €
	ISOVER 14CM	-	167.399,93 €	77,77 €/m ²	SI	14 ANNI	61.864,88 €
	ISOVER 16CM	-	177.516,68 €	82,47 €/m ²	SI	14 ANNI	65.713,64 €
FIBRA DI LEGNO	BETONWOOD 12CM	-	140.343,00 €	65,20 €/m ²	NO	17 ANNI	37.788,14 €
	BETONWOOD 14CM	-	147.833,70 €	68,68 €/m ²	NO	17 ANNI	42.655,87 €
	BETONWOOD 16CM	-	155.302,88 €	72,15 €/m ²	SI	11 ANNI	64.063,80 €
SUGHERO	BIOPAN 12CM	-	230.683,43 €	107,17€/m ²	NO	27 ANNI	18.815,48 €
	BIOPAN 14CM	-	253.069,43 €	117,57 €/m ²	NO	27 ANNI	20.342,93 €
	BIOPAN 16CM	-	275.455,43 €	127,97 €/m ²	SI	19 ANNI	51.745,93 €

	BETONWOOD 16CM	-	257.374,43 €	119,57 €/m ²	NO	27 ANNI	17.355,09 €
	BETONWOOD 20CM	-	296.851,28 €	137,91 €/m ²	SI	19 ANNI	50.966,58 €
PIR/PUR	FIVE 10CM	-	182.897,93 €	84,97 €/m ²	NO	24 ANNI	30.237,17 €
	FIVE 12CM	-	198.288,30 €	92,12 €/m ²	NO	24 ANNI	34.859,18 €
	FIVE 14CM	-	222.611,55 €	103,42 €/m ²	SI	16 ANNI	60.496,68 €
	FIVE 16CM	-	238.001,93 €	110,57 €/m ²	SI	16 ANNI	62.983,53 €
	PIR PLUS 8CM	-	157.907,40 €	73,36 €/m ²	NO	22 ANNI	37.610,74 €
	PIR PLUS 10M	-	171.920,18 €	79,87 €/m ²	SI	14 ANNI	63.034,58 €
	PIR PLUS 12CM	-	187.461,23 €	87,09 €/m ²	SI	14 ANNI	67.402,67 €
RESINA FENOLICA	WEBER 6CM	-	232.857,45 €	108,18 €/m ²	NO	28 ANNI	13.954,70 €
	WEBER 8CM	-	271.064,33 €	125,93 €/m ²	NO	27 ANNI	17.284,86 €
	WEBER 10CM	-	305.418,23 €	141,89 €/m ²	SI	19 ANNI	52.613,35 €
	WEBER 12CM	-	343.904,93 €	159,77 €/m ²	SI	20 ANNI	53.648,70 €
	ISOLMEC 8CM	-	188.494,43 €	87,57 €/m ²	NO	24 ANNI	30.683,21 €
	ISOLMEC 10CM	-	221.212,43 €	102,77 €/m ²	SI	16 ANNI	58.988,98 €
	ISOLMEC 12CM	-	244.889,93 €	113,77 €/m ²	SI	17 ANNI	62.190,27 €
LANA DI ROCCIA	ISOVER 10 CM	-	123.445,88 €	57,35 €/m ²	NO	21 ANNI	38.779,68 €
	ISOVER 12CM	-	128.719,50 €	59,80 €/m ²	NO	21 ANNI	45.665,92 €
	ISOVER 14 CM	-	134.897,18 €	62,67 €/m ²	NO	14 ANNI	65.913,17 €
	ISOVER 16CM	-	140.278,43 €	65,17 €/m ²	SI	14 ANNI	70.028,90 €

Tabella 60 - Analisi economica interventi su elementi orizzontali

Considerazioni su pacchetti migliori

Selezione delle Combinazioni di Interventi migliori.

Nel contesto del progetto di tesi l'obiettivo finale è determinare la combinazione ottimale di interventi sulle pareti e sui solai che massimizzi il ritorno economico e minimizzi i consumi post-intervento. Tuttavia, dato il gran numero di possibili combinazioni tra le opzioni per le pareti (36 interventi analizzati) e i solai (33 interventi analizzati), il totale delle combinazioni possibili risulta essere 1188. Questo numero è troppo elevato per poter analizzare ogni singola possibilità in modo approfondito.

Affinché il numero di combinazioni venga ridotto, è stata effettuata una classificazione su tre principali criteri: principali: Costo Totale, Consumi post-intervento e Payback period. Tali criteri facilitano il processo decisionale, stabilendo le principali combinazioni.

Metodologia di Selezione delle Combinazioni

Processo di Classificazione e Rango

Ciascun intervento è stato esaminato e classificato per mezzo della funzione di rango (RANK) di Excel, la quale assegna a ogni intervento un punteggio basandosi sul valore assegnato a ciascun criterio. Il ranking ha perciò ordinato gli interventi, dando priorità agli interventi in base ai consumi post-operativi, al periodo di ritorno dell'investimento e infine al costo totale. Il valore assegnato a ciascun criterio dal rango identifica come miglior intervento quello con il valore maggiore, (ovvero, il minor payback period, il consumo più basso e il costo totale più basso) e come peggior intervento il valore inferiore

I punteggi ottenuti per i tre criteri (costo, consumi, payback period) sono stati infine sommati per ogni intervento, ottenendo così un punteggio complessivo per ciascun intervento. Il punteggio totale più elevato indica l'intervento più vantaggioso, ovvero quello che ha ottenuto il miglior compromesso tra il costo totale, consumi e tempo di ritorno.

Selezione dei Migliori Interventi

Una volta ottenuti i punteggi complessivi, i primi 4 interventi per il solaio e i primi 4 interventi per le pareti sono stati isolati e annotati in una tabella separata. Questi interventi sono quelli che, in base alla somma dei punteggi, risultano essere i più promettenti e che successivamente sono stati esaminati in combinazione.

Posizione	Intervento		Costo Totale	Consumo post-intervento [kWh]	TIR	Punteggio Totale
1°	LANA DI ROCCIA	ISOVER 12CM	660.203,53 €	335962	11	97
2°	LANA DI VETRO	ISOVER 12CM	653.070,82 €	337208	11	95
3°	XPS	ISOVER12	782.008,27 €	335968	14	85
4°	PIR/PUR	ISOVER 10CM	843.733,65 €	328301	15	84

Tabella 61 – Migliori interventi relativi alle pareti

Posizione	Intervento		Costo Totale	Consumo post-intervento [kWh]	TIR	Punteggio Totale
1°	LANA DI ROCCIA	ISOVER 16CM	140.278,43 €	497560	14	85
2°	FIBRA DI LEGNO	BETONWOOD 16CM	155.302,88 €	499827	11	79
3°	PIR/PUR	PIR PLUS 12CM	187.461,23 €	496055	14	75
4°	XPS	ISOVER 16CM	177.516,68 €	497564	14	73

Tabella 62 – Migliori interventi relativi al solaio

Tuttavia, nonostante questi interventi siano risultati i più promettenti e siano stati sicuramente studiati in maniera approfondita, si è ritenuto utile effettuare un'analisi a campione anche su altri tipi di intervento. Questo approccio ha permesso di esplorare ulteriori soluzioni che potrebbero rivelarsi valide, garantendo una visione più ampia e una maggiore completezza nell'analisi. I risultati delle permutazioni saranno presentati e discussi nei capitoli successivi, evidenziando le configurazioni più vantaggiose dal punto di vista economico-energetico.

12. Intervento combinato sulla struttura opaca

Stratigrafie intervento combinato

Analogamente a quanto effettuato per i singoli pacchetti di parete e solaio, per ogni combinazione sono stati calcolati i valori di trasmittanza termica sia per i solai che per le pareti

Per ogni combinazione analizzata, attraverso una scala di colori, è stata effettuata una classificazione che sintetizza il rispetto dei requisiti del conto termico da parte dei pacchetti di solaio e parete:

- **Giallo:** Entrambi i pacchetti (solaio e parete) soddisfano i requisiti del conto termico.
- **Verde:** Nessuno dei due pacchetti rispetta i requisiti del conto termico.
- **Arancione:** Solo uno dei due pacchetti soddisfa i requisiti del conto termico.

Oltre alla precedente classificazione, per ciascun pacchetto è stata aggiunta una colonna, la quale specifica chiaramente se il singolo elemento (solaio o parete) rispetta o meno i criteri previsti.

	Impiego	Materiale	Produttore	Spessore [cm]	Trasmittanza termica * (U) [W/(m ² K)]	Conto Termico
C1	CAPPOTTO	LANA DI ROCCIA	ISOVER	12	0,213	SI
	SOLAIO	LANA DI ROCCIA	ISOVER	16	0,177	SI
C2	CAPPOTTO	LANA DI VETRO	ISOVER	12	0,218	SI
	SOLAIO	FIBRA DI LEGNO	BETONWOOD	16	0,196	SI
C3	CAPPOTTO	RESINA FENOLICA	WEBER	12	0,138	SI
	SOLAIO	RESINA FENOLICA	WEBER	12	0,143	SI
C4	CAPPOTTO	EPS	FASSA	12	0,207	SI
	SOLAIO	RESINA FENOLICA	WEBER	12	0,143	SI
C5	CAPPOTTO	EPS	FASSA	12	0,207	SI
	SOLAIO	LANA DI ROCCIA	ISOVER	16	0,177	SI
C6	CAPPOTTO	EPS	ISOVER	12	0,207	SI
	SOLAIO	XPS	ISOVER	16	0,177	SI
C7	CAPPOTTO	PIR	FIVE	12	0,156	SI
	SOLAIO	XPS	ISOVER	16	0,177	SI
C8	CAPPOTTO	LANA DI ROCCIA	ISOVER	10	0,245	NO
	SOLAIO	LANA DI ROCCIA	ISOVER	10	0,265	NO
C9	CAPPOTTO	LANA DI ROCCIA	ISOVER	10	0,245	NO
	SOLAIO	LANA DI ROCCIA	ISOVER	16	0,177	SI
C10	CAPPOTTO	EPS	WEBER	8	0,276	NO
	SOLAIO	LANA DI ROCCIA	ISOVER	10	0,265	NO
C11	CAPPOTTO	EPS	WEBER	10	0,233	NO
	SOLAIO	RESINA FENOLICA	WEBER	12	0,143	SI
C12	CAPPOTTO	LANA DI VETRO	ISOVER	12	0,218	SI
	SOLAIO	FIBRA DI LEGNO	BETONWOOD	12	0,25	NO
C13	CAPPOTTO	LANA DI ROCCIA	ISOVER	12	0,213	SI

	SOLAIO	PIR	ISOLMEC	12	0,164	SI
C14	CAPPOTTO	LANA DI VETRO	ISOVER	12	0,218	SI
	SOLAIO	PIR	ISOLMEC	12	0,164	SI
C15	CAPPOTTO	RESINA FENOLICA	WEBER	12	0,138	SI
	SOLAIO	RESINA FENOLICA	WEBER	16	0,120	SI
C16	CAPPOTTO	XPS	ISOVER	12	0,213	SI
	SOLAIO	XPS	ISOVER	16	0,177	SI

Tabella 63 – Stratigrafie analizzate e rispettive caratteristiche

*Nel caso dei solai, non è stato considerato il coefficiente β in quanto qua il confronto vuole evidenziare esclusivamente il soddisfacimento o meno dei requisiti del conto termico.

Analisi dei consumi post-intervento

Dopo aver valutato separatamente l'effetto dell'isolamento del solaio di copertura e del cappotto sui consumi sia in termini di energia primaria, sia in termini di consumi totali, si procede ora all'analisi degli effetti dei possibili interventi combinati. L'azione congiunta di questi due elementi consente di ridurre in modo significativo le dispersioni termiche invernali e di migliorare l'inerzia termica estiva, influenzando sia il fabbisogno energetico sia per il riscaldamento che per il raffrescamento. Tuttavia, occorre sottolineare che l'effetto congiunto, non è semplicemente la somma dei singoli interventi, ma si generano delle interazioni che influenzano in maniera diversa il fabbisogno energetico sia estivo che invernale.

L'obiettivo è comprendere in che misura la combinazione di entrambi gli interventi ottimizzi le prestazioni dell'edificio rispetto alle singole soluzioni adottate separatamente.

Le tabelle seguenti presentano i risultati relativi all'energia primaria e ai consumi energetici per il riscaldamento e il raffrescamento nelle possibili configurazioni post-intervento. Per semplificare la lettura e focalizzare l'attenzione sui dati essenziali, non verrà più riportato il nome del produttore all'interno delle tabelle.

1. Energia primaria invernale post-intervento combinato

L'azione combinata dell'isolamento delle pareti e del solaio riduce in modo significativo le dispersioni termiche attraverso l'involucro migliorando l'efficienza energetica dell'edificio, ciò comporta inoltre un minor fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento, come si può notare dalla tabella 64, che evidenzia il confronto tra la situazione pre-intervento e le possibili combinazioni di interventi, quantificando il risparmio percentuale di energia primaria ottenuto.

*sono indicati prima le pareti e poi i solai		EP _{nren} [kWh/m ²]	Δ EP _{nren} [%]	EP _{ren} [kWh/m ²]	Δ EP _{ren} [%]	EP _{tot} [kWh/m ²]	Δ EP _{tot} [%]
STATO DI FATTO		50,20		0,61		50,80	
C1	LANA DI ROCCIA 12CM	26,10	-48,01	0,29	-52,46	26,39	-48,05
	LANA DI ROCCIA 16CM						
C2	LANA DI VETRO 12CM	26,44	-47,33	0,30	-50,82	26,74	-47,36
	FIBRA DI LEGNO 16CM						
C3	RESINA FEN.12CM	24,00	-52,19	0,27	-55,74	24,27	-52,22
	RESINA FEN.12CM						
C4	EPS 12 CM	25,59	-49,02	0,29	-52,46	25,88	-49,06
	RESINA FEN.12CM						
C5	EPS 12 CM	25,98	-48,25	0,29	-52,46	26,27	-48,29
	LANA DI ROCCIA 16 CM						
C6	EPS 12 CM	25,98	-48,25	0,29	-52,46	26,27	-48,29
	XPS 16 CM						
C7	PIR 12 CM	26,22	-47,77	0,30	-50,82	26,52	-47,80
	XPS 16 CM						
C8	LANA DI ROCCIA 10 CM	27,84	-44,54	0,32	-47,54	28,16	-44,57
	LANA DI ROCCIA 10 CM						
C9	LANA DI ROCCIA 10 CM	26,83	-46,55	0,30	-50,82	27,13	-46,59
	LANA DI ROCCIA 16 CM						
C10	EPS 8 CM	28,53	-43,17	0,33	-45,90	28,86	-43,19
	LANA DI ROCCIA 10CM						
C11	EPS 10 CM	26,17	-47,87	0,30	-50,82	26,47	-47,89
	RESINA FEN.12CM						
C12	LANA DI VETRO 12CM	37,07	-26,16	0,31	-49,18	37,38	-26,42
	FIBRA DI LEGNO 12 CM						
C13	LANA DI ROCCIA 12 CM	25,94	-48,33	0,29	-52,46	26,23	-48,37
	PIR 12CM						
C14	LANA DI VETRO 12CM	26,06	-48,09	0,29	-52,46	26,35	-48,13
	PIR 12CM						
C15	RESINA FEN. 12CM	23,60	-52,99	0,26	-57,38	23,86	-53,03
	RESINA FEN. 16 CM						
C16	XPS 12 CM	26,10	-48,01	0,29	-52,46	26,39	-48,05
	XPS 16 CM						

Tabella 64 - Energia primaria invernale post-intervento combinato

2. Consumo per il riscaldamento invernale post-intervento combinato

La riduzione delle dispersioni termiche grazie all'isolamento di solaio e pareti comporta un minor fabbisogno energetico per mantenere condizioni di comfort invernale. Rispetto agli interventi separati, l'effetto combinato massimizza l'efficienza termica complessiva, riducendo ulteriormente la domanda di energia per il riscaldamento e le emissioni ed essa legate andando la maggior parte delle volte quasi a dimezzare tali valori.

*sono indicati prima le pareti e poi i solai		Consumo teleriscaldamento [kWh _t]	Consumo elettrico teleriscaldamento [kWh _{el}]	CO ₂ prodotta [Kg]
STATO DI FATTO		542764	12587	168619
C1	LANA DI ROCCIA 12CM	283131	6127	87758
	LANA DI ROCCIA 16CM			
C2	LANA DI VETRO 12CM	286211	6216	88902
	FIBRA DI LEGNO 16CM			
C3	RESINA FEN. 12CM	260498	5590	80721
	RESINA FEN.12CM			
C4	EPS 12 CM	277611	5996	86041
	RESINA FEN. 12CM			
C5	EPS 12 CM	281831	6096	87354
	LANA DI ROCCIA 16 CM			
C6	EPS 12 CM	281229	6096	87353
	XPS 16 CM			
C7	PIR 12 CM	284411	6158	88156
	XPS 16 CM			
C8	LANA DI ROCCIA 10 CM	3091920	6579	93603
	LANA DI ROCCIA 10 CM			
C9	LANA DI ROCCIA 10 CM	291060	6317	90224
	LANA DI ROCCIA 16 CM			
C10	EPS 8 CM	309405	6759	95931
	LANA DI ROCCIA 10CM			
C11	EPS 10 CM	283951	6147	88013
	RESINA FEN.12CM			
C12	LANA DI VETRO 12CM	293603	6379	91015
	FIBRA DI LEGNO 12 CM			
C13	LANA DI ROCCIA 12 CM	281471	6088	87242
	PIR 12CM			
C14	LANA DI VETRO 12CM	282750	6118	87639
	PIR 12CM			

C15	RESINA FEN. 12CM	256198	5489	79384
	RESINA FEN.16 CM			
C16	XPS 12 CM	283183	6127	87759
	XPS 16 CM			

Tabella 65 - Consumo per il riscaldamento invernale post-intervento combinato

3. Energia primaria estiva post-intervento combinato

L'incremento dell'inerzia termica derivante dall'isolamento modifica il comportamento termico dell'edificio anche in estate con effetti che riprendono quelli già osservati per i singoli interventi, il calore accumulato durante il giorno viene smaltito più lentamente.

La tabella riporta i valori di energia primaria necessari per la climatizzazione estiva dopo l'intervento, permettendo di valutare l'incremento del fabbisogno rispetto alla situazione attuale

*sono indicati prima le pareti e poi i solai		EP _{,nren} [kWh/m ²]	Δ EP _{,nren} [%]	EP _{,ren} [kWh/m ²]	Δ EP _{,ren} [%]	EP _{,tot} [kWh/m ²]	Δ EP _{,tot} [%]
STATO DI FATTO		13,64		3,29		16,93	
C1	LANA DI ROCCIA 12CM	15,22	11,58	3,67	11,55	18,89	11,58
	LANA DI ROCCIA 16CM						
C2	LANA DI VETRO 12CM	15,19	11,36	3,66	11,25	18,85	11,34
	FIBRA DI LEGNO 16CM						
C3	RESINA FEN. 12CM	15,46	13,34	3,72	13,07	19,18	13,29
	RESINA FEN.12CM						
C4	EPS 12 CM	15,26	11,88	3,68	11,85	18,94	11,87
	RESINA FEN.12CM						
C5	EPS 12 CM	15,23	11,66	3,67	11,55	18,90	11,64
	LANA DI ROCCIA 16 CM						
C6	EPS 12 CM	15,23	11,66	3,67	11,55	18,90	11,64
	XPS 16 CM						
C7	PIR 12 CM	15,2	11,44	3,66	11,25	18,86	11,40
	XPS 16 CM						
C8	LANA DI ROCCIA 10 CM	15,08	10,56	3,63	10,33	18,71	10,51
	LANA DI ROCCIA 10 CM						
C9	LANA DI ROCCIA 10 CM	15,13	10,92	3,65	10,94	18,78	10,93
	LANA DI ROCCIA 16 CM						
C10	EPS 8 CM	14,99	9,90	3,61	9,73	18,60	9,86
	LANA DI ROCCIA 10CM						
C11	EPS 10 CM	15,18	11,29	3,66	11,25	18,84	11,28
	RESINA FEN. 12CM						

C12	LANA DI VETRO 12CM	15,16	11,14	3,65	10,94	18,81	11,10
	FIBRA DI LEGNO 12 CM						
C13	LANA DI ROCCIA 12 CM	15,23	11,66	3,67	11,55	18,90	11,64
	PIR 12CM						
C14	LANA DI VETRO 12CM	15,21	11,51	3,67	11,55	18,88	11,52
	PIR 12CM						
C15	RESINA FEN.12CM	15,49	13,56	3,73	13,37	19,22	13,53
	RESINA FEN.16 CM						
C16	XPS 12 CM	15,22	11,58	3,67	11,55	18,89	11,58
	XPS 16 CM						

Tabella 66 - Energia primaria estiva post-intervento combinato

4. Consumo per il raffrescamento estivo post-intervento combinato

L'isolamento combinato delle pareti e del solaio può ridurre ulteriormente le oscillazioni termiche interne, ma questa maggiore capacità di isolamento può rallentare il rilascio del calore, andando a incrementare i consumi e quindi emissioni relative al raffrescamento estivo; tuttavia, occorre sottolineare che gli interventi combinati mostrano un incremento delle emissioni più contenuto se confrontato con la somma degli incrementi relativi ai singoli interventi

*sono indicati prima le pareti e poi i solai		Consumo raffrescamento [kWh _{el}]	CO ₂ prodotta [Kg]
STATO DI FATTO		68336	31434
C1	LANA DI ROCCIA 12CM	76211	35057
	LANA DI ROCCIA 16CM		
C2	LANA DI VETRO 12CM	76076	34995
	FIBRA DI LEGNO 16CM		
C3	RESINA FEN. 12CM	77449	35626
	RESINA FEN.12CM		
C4	EPS 12 CM	76397	35143
	RESINA FEN. 12CM		
C5	EPS 12 CM	76288	35093
	LANA DI ROCCIA 16 CM		
C6	EPS 12 CM	76288	35093
	XPS 16 CM		
C7	PIR 12 CM	76135	35022
	XPS 16 CM		
C8	LANA DI ROCCIA 10 CM	75510	34735
	LANA DI ROCCIA 10 CM		
C9	LANA DI ROCCIA 10 CM	75749	34845
	LANA DI ROCCIA 16 CM		

C10	EPS 8 CM	75090	34541
	LANA DI ROCCIA 10CM		
C11	EPS 10 CM	76022	34970
	RESINA FENOLICA 12CM		
C12	LANA DI VETRO 12CM	76037	34925
	FIBRA DI LEGNO 12 CM		
C13	LANA DI ROCCIA 12 CM	76252	35076
	PIR 12CM		
C14	LANA DI VETRO 12CM	76177	35041
	PIR 12CM		
C15	RESINA FEN. 12CM	77575	35684
	RESINA FEN 16 CM		
C16	XPS 12 CM	75210	35056
	XPS 16 CM		

Tabella 67 - Consumo per il raffrescamento estivo post-intervento combinato

Analisi economica dell'intervento combinato

Nel presente capitolo vengono analizzate le considerazioni economiche relative agli interventi combinati di isolamento del solaio di copertura e delle pareti perimetrali. I dati riportati si basano sulle analisi precedenti, dove sono stati presi in considerazione il costo dei materiali, della manodopera e l'eventuale contributo del Conto Termico 2.0 per ogni singolo intervento.

	Costo totale	Costo specifico	Conto termico	TIR	Consumo Teleriscaldamento [kWh]
C1	712.422,38 €	63,06 €/m ²	SI	11	283131
C2	705.289,67 €	62,43 €/m ²	SI	11	286211
C3	1.815.200,09 €	160,68 €/m ²	SI	25	260498
C4	1.056.663,82 €	93,53 €/m ²	SI	17	277611
C5	853.037,32 €	75,51 €/m ²	SI	13	281831
C6	901.038,07 €	79,76 €/m ²	SI	14	281229
C7	994.952,08 €	88,07 €/m ²	SI	16	284411
C8	658.161,35 €	58,26 €/m ²	NO	18	309192
C9	674.993,90 €	59,75 €/m ²	SOLO SU SOLAIO	17	291060
C10	794.048,62 €	70,29 €/m ²	NO	20	309405
C11	1.121.681,21 €	99,29 €/m ²	SOLO SU SOLAIO	21	283951
C12	690.329,79 €	61,11 €/m ²	SOLO SU PARETE	13	293603
C13	755.343,23 €	66,86 €/m ²	SI	12	281471
C14	748.210,52 €	66,23 €/m ²	SI	12	282750
C15	1.917.056,39 €	169,70 €/m ²	SI	26	256198

C16	856.871,42 €	75,85 €/m ²	SI	13	283183
-----	--------------	------------------------	----	----	--------

Tabella 68 - Analisi economica dell'intervento combinato

Considerazioni combinazione migliore

L'analisi condotta ha l'obiettivo di individuare le soluzioni di riqualificazione energetica più vantaggiose per l'edificio in esame. A tal fine, sono state valutate diverse combinazioni di interventi su pareti e solai, utilizzando la stessa metodologia applicata per la valutazione dei singoli elementi.

Non esiste una soluzione univocamente ottimale, poiché la scelta dipende dalla priorità attribuita ai vari parametri in base agli obiettivi e ai vincoli economici del decisore.

Metodologia di Valutazione

La metodologia utilizzata per l'analisi delle combinazioni riprende quella adottata per i singoli interventi, basandosi sul ranking con Microsoft Excel. Ogni soluzione è stata classificata rispetto a parametri chiave quali:

- Tempo di ritorno dell'investimento;
- Costo totale dell'intervento;
- Consumo energetico post-opera.

Risultati delle Analisi

I risultati sono sintetizzati nelle seguenti tabelle, che riportano i valori dei principali indicatori per ciascuna combinazione di interventi.

Classificazione generale delle combinazioni di interventi

Combinazione	Costo Totale	Consumo [kWh]	TIR	Punteggio Costo	Punteggio Consumo	Punteggio TIR	Punteggio Totale
Combinazione 1	712.422,38 €	283131	11	12	9	15	36
Combinazione 2	705.289,67 €	286211	11	13	5	15	33
Combinazione 3	1.815.200,09 €	260498	25	2	15	2	19
Combinazione 4	1.056.663,82 €	277611	17	4	14	6	24
Combinazione 5	853.037,32 €	281831	13	8	11	10	29
Combinazione 6	901.038,07 €	281229	14	6	13	9	28
Combinazione 7	994.952,08 €	284411	16	5	6	8	19
Combinazione 8	658.161,35 €	309192	18	16	2	5	23
Combinazione 9	674.993,90 €	291060	17	15	4	6	25
Combinazione 10	794.048,62 €	309405	20	9	1	4	14
Combinazione 11	1.121.681,21 €	283951	21	3	7	3	13
Combinazione 12	690.329,79 €	293603	13	14	3	10	27
Combinazione 13	755.343,23 €	281471	12	10	12	13	35
Combinazione 14	748.210,52 €	282750	12	11	10	13	34
Combinazione 15	1.917.056,39 €	256198	26	1	16	1	18
Combinazione 16	856.871,42 €	283183	13	7	8	10	25

Tabella 69 - Classificazione generale delle combinazioni di interventi

Dalla tabella generale sono state estratte ulteriori quattro tabelle che evidenziano i migliori pacchetti in base ai diversi parametri considerati.

Migliori pacchetti per minor tempo di ritorno

	Costo Totale	Consumo [kWh]	TIR	Punteggio TIR
Combinazione 1	712.422,38 €	283131	11	15
Combinazione 2	705.289,67 €	286211	11	15
Combinazione 13	755.343,23 €	281471	12	13
Combinazione 14	748.210,52 €	282750	12	13

Tabella 70 – Classificazione migliori pacchetti per minor tempo di ritorno

Migliori pacchetti per minor costo totale

	Costo Totale	Consumo [kWh]	TIR	Punteggio Costo
Combinazione 8	658.161,35 €	309192	18	16
Combinazione 9	674.993,90 €	291060	17	15
Combinazione 12	690.329,79 €	293603	13	14
Combinazione 2	705.289,67 €	286211	11	13

Tabella 71 - Classificazione migliori pacchetti per minor costo totale

Migliori pacchetti per minor consumo energetico post-opera

	Costo Totale	Consumo [kWh]	TIR	Punteggio Consumo
Combinazione 15	1.917.056,39 €	256198	26	16
Combinazione 3	1.815.200,09 €	260498	25	15
Combinazione 4	1.056.663,82 €	277611	17	14
Combinazione 6	901.038,07 €	281229	14	13

Tabella 72 - Classificazione migliori pacchetti per minor consumo post-intervento

Migliori pacchetti in base al punteggio totale

	Costo Totale	Consumo [kWh]	TIR	Punteggio Totale
Combinazione 1	712.422,38 €	283131	11	36
Combinazione 13	755.343,23 €	281471	12	35
Combinazione 14	748.210,52 €	282750	12	34
Combinazione 2	705.289,67 €	286211	11	33

Tabella 73 - Classificazione migliori pacchetti per maggior punteggio totale

Interpretazione dei Risultati

L'analisi svolta ha mostrato come, a fronte di un aumento dell'efficienza energetica, vi siano compromessi da considerare in termini di costi sostenuti, ritorno dell'investimento e sostenibilità ambientale. Ad esempio, le soluzioni con un miglior isolamento dell'involucro mostrano consumi energetici significativamente ridotti, a fronte però di un investimento iniziale più elevato, d'altro canto le soluzioni più economiche non sono in grado di garantire le stesse performance in termini di risparmio energetico.

Per questa analisi, si scelto di valutare con pari importanza i punteggi ottenuti per i tre fattori analizzati: consumo energetico, costo totale e tempo di ritorno. Nonostante questa scelta consenta di avere una panoramica generale, si riconosce che sarebbe possibile ottenere risultati migliori se si fosse applicata un'analisi pesata; assegnare pesi diversi ai vari parametri in base all'importanza che ognuno riveste per il committente potrebbe portare a soluzioni più mirate e adatte alle reali necessità di progetto.

In questa tesi, l'analisi è stata focalizzata principalmente sul miglioramento delle prestazioni dell'involucro opaco, con particolare attenzione al miglioramento dell'isolamento per ottimizzare il risparmio energetico. Tuttavia, è fondamentale sottolineare che l'efficienza complessiva dell'edificio non dipende esclusivamente dall'involucro, ma anche dalla gestione e ottimizzazione degli impianti, che devono essere progettati e integrati in sinergia con l'involucro per massimizzare le prestazioni energetiche.

Per tale motivo, il lavoro di questa tesi si inserisce in un contesto di collaborazione con un collega del corso di ingegneria energetica, il quale ha analizzato le soluzioni impiantistiche. Pur trattandosi di due ambiti distinti, l'integrazione delle rispettive analisi ci ha permesso di valutare complessivamente l'intervento, combinando i miglioramenti apportati all'involucro con l'ottimizzazione degli impianti per individuare la soluzione che meglio risponde agli obiettivi di efficienza energetica e sostenibilità economica per l'edificio in esame. Il dettaglio delle soluzioni impiantistiche e l'analisi integrata dei due ambiti sono approfonditi nel prossimo capitolo.

13.Valutazione intervento complessivo

L'intervento completo oggetto di analisi si basa sull'integrazione tra la riqualificazione dell'involucro opaco, sviluppata in questa tesi, e le modifiche impiantistiche analizzate in uno studio parallelo condotto da un collega del Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare. In particolare, è stato adottato il sistema di isolamento a cappotto C1, individuato come la soluzione più efficace nell'analisi delle stratigrafie opache, applicandolo al modello energetico dell'edificio che include gli interventi di efficientamento impiantistico e l'installazione di un impianto fotovoltaico.

Al fine di garantire una valutazione economica e prestazionale complessiva, sono stati considerati i costi delle modifiche impiantistiche forniti dal collega e integrati con quelli relativi alla riqualificazione dell'involucro

Analisi dei consumi post-intervento complessivo

Questo capitolo si concentra sull'analisi dei consumi energetici e dell'impatto ambientale derivanti dai seguenti scenari di intervento:

1. **Stato di fatto:** la situazione iniziale, senza alcuna modifica.
2. **Intervento sull'involucro opaco (C1):** il miglioramento dell'efficienza energetica tramite l'intervento sull'involucro opaco dell'edificio, senza modifiche agli impianti.
3. **Intervento completo:** l'ottimizzazione sia dell'involucro opaco che degli impianti termici.

Le tabelle riportano i consumi di energia primaria, i consumi per riscaldamento e raffrescamento, e le relative emissioni di CO2 per ciascuno di questi scenari. L'analisi si concentra sulla comparazione dei benefici ottenuti in termini di risparmio energetico e impatto ambientale, al fine di mettere in evidenza le differenze tra i vari interventi

1.Energia primaria invernale post-intervento complessivo

L'analisi dell'energia primaria invernale evidenzia come l'intervento completo, che agisce sia sull'involucro opaco che sugli impianti, garantisca una riduzione molto più marcata rispetto al solo miglioramento dell'involucro (C1). L'energia primaria non rinnovabile si riduce del 66,89% nell'intervento completo, contro il 48,01% di C1. Anche l'energia primaria totale segue lo stesso andamento, dimostrando come l'ottimizzazione degli impianti sia determinante per massimizzare l'efficienza energetica.

	EP _{nren} [kWh/m ²]	Δ EP _{nren} [%]	EP _{ren} [kWh/m ²]	Δ EP _{ren} [%]	EP _{tot} [kWh/m ²]	Δ EP _{tot} [%]
STATO DI FATTO	50,20	-	0,61	-	50,80	-
INTERVENTO COMPLETO	16,62	-66,89	0,40	-34,43	17,02	-66,50
C1	26,10	-48,01	0,29	-52,46	26,39	-48,05

Tabella 74 - Energia primaria invernale post-intervento complessivo

2. Consumo per il riscaldamento invernale post-intervento complessivo

Nel consumo per il riscaldamento invernale, emerge chiaramente l'impatto positivo dell'aggiornamento impiantistico. Con l'intervento completo, il teleriscaldamento cala drasticamente (-65%), e il contributo del fotovoltaico permette di eliminare del tutto il prelievo di elettricità dalla rete, con una conseguente riduzione del 66,3% delle emissioni di CO₂. Il solo intervento sull'involucro (C1) porta comunque a una riduzione significativa dei consumi, ma lascia ancora un'impronta ambientale importante.

	Consumo teleriscaldamento [kWh _t]	Consumo elettrico da fotovoltaico [kWh _{el}]	Consumo elettrico da rete [kWh _{el}]	CO ₂ prodotta [Kg]
STATO DI FATTO	542764	-	12587	168619
INTERVENTO COMPLETO	189203	3383	0	56761
C1	283131	-	6127	87758

Tabella 75 - Consumo per il riscaldamento invernale post-intervento complessivo

3. Energia primaria estiva post-intervento complessivo

Dal punto di vista dell'energia primaria estiva, l'intervento completo mostra risultati eccellenti: l'energia non rinnovabile viene azzerata e il contributo da fonti rinnovabili aumenta, consentendo una riduzione complessiva del 61,43% dell'energia primaria totale. Il miglioramento dell'involucro opaco da solo (C1), invece, si rivela controproducente in estate, con un aumento dell'11,58% dei consumi totali, segno che senza un intervento sugli impianti il raffrescamento risulta meno efficiente

	EP _{nren} [kWh/m ²]	Δ EP _{nren} [%]	EP _{ren} [kWh/m ²]	Δ EP _{ren} [%]	EP _{tot} [kWh/m ²]	Δ EP _{tot} [%]
STATO DI FATTO	13,64	-	3,29	-	16,93	-
INTERVENTO COMPLETO	0,00	-100,00	6,53	98,48	6,53	-61,43
C1	15,22	11,58	3,67	11,55	18,89	11,58

Tabella 76 - Energia primaria estiva post-intervento complessivo

4. Consumo per il raffrescamento estivo post-intervento complessivo

Infine, per il raffrescamento estivo, il beneficio della riqualificazione impiantistica è evidente; con l'intervento completo, tutto il fabbisogno viene coperto dal fotovoltaico, eliminando il prelievo dalla rete e azzerando le emissioni di CO₂. Al contrario, il solo intervento sull'involucro (C1) non impedisce un consumo significativo di energia dalla rete (76211 kWh) e mantiene emissioni di CO₂ elevate (35057 kg)

	Consumo elettrico prelevate da rete [kWh _{el}]	Consumo elettrico da fotovoltaico [kWh _{el}]	CO ₂ prodotta [Kg]
STATO DI FATTO	68336	-	31434
INTERVENTO COMPLETO	0	63727	0
C1	76211	-	35057

Tabella 77 - Consumo per il raffrescamento estivo post-intervento complessivo

Analisi dei costi intervento completo

L'analisi economica dell'intervento di efficientamento energetico conferma che l'intervento completo, che include sia la riqualificazione dell'involucro opaco (C1) che l'ottimizzazione degli impianti, è la soluzione più vantaggiosa nel lungo periodo. I parametri principali considerati includono il VAN a 30 anni, il tempo di ritorno dell'investimento (payback period) e il costo complessivo dell'intervento, che rappresenta un indicatore chiave della redditività dell'investimento.

Per quanto riguarda il costo totale dell'intervento completo, questo ammonta a 2.632.875,22 € (come visibile in tabella) e comprende diverse componenti:

- 712.422,38 € per la riqualificazione dell'involucro opaco, che rappresenta la stessa voce di spesa dell'intervento C1.
- 1.387.836 € per l'efficientamento degli impianti termici, che include i miglioramenti ai sistemi di riscaldamento e raffrescamento.
- 532.817 € per l'installazione dell'impianto fotovoltaico, fondamentale per ridurre i consumi da rete e migliorare l'autosufficienza energetica.

	COSTO TOTALE	CONTO TERMICO	TIR	VAN (30 ANNI)	CONSUMO RISCALDAMENTO [kWh]
INTERVENTO COMPLETO	- 2.632.875,22 €	SI	20	339.134,90 €	189203
C1	- 712.422,38 €	SI	11	377.206,19 €	283131

Tabella 78 – Risultati analisi economica intervento completo

L'analisi economica rafforza quanto già emerso dai dati energetici, evidenziando come l'intervento completo, sebbene più oneroso inizialmente, offra i maggiori benefici in termini di riduzione dei consumi e di sostenibilità economica nel lungo periodo. Con un investimento di 2.632.875,22 €, questa soluzione garantisce un significativo abbattimento del consumo per il riscaldamento, che scende a 189.203 kWh (come riportato nella stessa tabella), grazie alla combinazione dell'isolamento dell'involucro e all'efficientamento degli impianti. Il payback period è di 20 anni, un tempo relativamente lungo, ma giustificato dai risparmi energetici e dal VAN positivo a 30 anni, pari a 339.134,90 €, che conferma la convenienza dell'investimento nel lungo termine.

14. Conclusioni

Questa tesi si è focalizzata sulle potenzialità di miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici attraverso interventi sull'involucro opaco, non con l'obiettivo di voler identificare una soluzione unica e migliore, ma bensì sottolineando la possibilità di uno spettro di opzioni. Le diverse combinazioni di interventi analizzate sono state esaminate in base ai loro impatti sui consumi energetici, sui costi e sul ritorno economico, lasciando al decisore la possibilità di scegliere la soluzione più adatta alle proprie priorità.

I risultati mostrano come l'intervento di isolamento dell'involucro opaco sia un intervento chiave per migliorare l'efficienza energetica di un edificio, esso riduce notevolmente il consumo per il riscaldamento e le emissioni totali. Tuttavia, l'efficienza complessiva dell'edificio non può essere ottenuta solo con l'intervento sull'involucro, ma richiede anche un'analisi dettagliata degli impianti termici e eventualmente l'introduzione di soluzioni impiantistiche più moderne come il fotovoltaico, che contribuiscono in modo significativo alla riduzione dei consumi energetici.

L'efficientamento degli impianti è quindi da considerarsi come un complemento necessario all'isolamento dell'involucro, poiché consente di massimizzare i risparmi energetici e migliorare inoltre il comfort termico dell'edificio.

D'altra parte, l'analisi ha evidenziato che un intervento limitato al solo involucro, come nel caso della soluzione C1 (isolamento in lana di roccia, 12 cm per le pareti e 16 cm per il solaio di copertura), presenta vantaggi economici nel breve periodo, con un investimento iniziale più contenuto e un tempo di ritorno più rapido. Tuttavia, questa opzione comporta un consumo di riscaldamento ancora elevato, nettamente superiore rispetto all'intervento completo, e un peggioramento dei consumi estivi segnale che l'assenza di un'ottimizzazione impiantistica può avere effetti negativi sull'efficienza complessiva e sul comfort abitativo.

Sebbene la parte sugli impianti non sia stata il focus principale di questa ricerca, emerge chiaramente che una strategia integrata, che combini la riqualificazione dell'involucro con interventi sugli impianti, consente di ottenere risultati più efficaci e sostenibili nel lungo periodo.

Bibliografia

Fonti

[1] ENEA. [Rapporto sulla Certificazione Energetica degli Edifici 2023](#)

[2] Politecnico di Torino. [Inventario delle emissioni](#)

[3] [UNI 10351:2021](#)

[4] **Politecnico di Torino Nuova Sede**, Ministero dei Lavori Pubblici Provveditorato alle Opere Pubbliche per il Piemonte, Ufficio del Genio Civile di Torino, 1958.

[5] **Documenti appartenenti al Piano di fattibilità tecnico economica, Interventi di decarbonizzazione della sede centrale fabbricati C.so Castelfidardo, TO_CEN04A, PROGES 2023**

[6] **Per la sede di Corso Duca degli Abruzzi**, Brusasco, Fiameni, Gabetti, Giriodi, Mamino, Martineo, Novello, Tamagno, Torretta, 1988

[7] **EC700 - Calcolo prestazioni energetiche degli edifici**, Edilclima Engineering & Software, 2023. Disponibile su [Edilclima](#).

[8] **“In arrivo il nuovo calcolo dinamico italiano”**, Efficienza Energetica Edifici, [Logical](#)

[9] **Insufflagio schiuma**, 3GUA Energia. Disponibile su [3GUA Energia](#).

[10] **Facciata ventilata: caratteristiche e vantaggi**, Coibentare Casa. Disponibile su [Coibentare Casa](#)

[11] [UNI EN 13501-1:2019](#)

[12] Fassi, A., Maina, L., & Butera, F. M. (2009). *L'isolamento ecoefficiente: guida all'uso dei materiali naturali*. Edizione Ambiente.

[13] Dati estrapolati dalle bollette dell'anno 2023

[14] **GSE - Gestore dei Servizi Energetici**. [Quote incentivabili del Conto Termico](#)

[15] [Allegati D.M 16-02-2016](#)

[16] **FVG Energia**. [Tabella fattori di conversione in energia primaria](#) (derivata dal Decreto Ministeriale 26 giugno 2015) per quanto riguarda l'energia elettrica, per il teleriscaldamento, invece, il fattore di conversione non è univoco, poiché varia in base al tipo di generazione; pertanto, non è utilizzato quello previsto dalla normativa, ma è stato indicato specificamente in funzione della configurazione del sistema

[17] **ANIT - Associazione Nazionale per l'Isolamento Termico e acustico**, [Isolamento dei locali non riscaldati](#)

Bibliografia generale

Rapporto sulla Certificazione Energetica degli Edifici 2023, ENEA. [Rapporto sulla Certificazione Energetica degli Edifici 2023](#)

Vite umane e denaro: il duplice costo dei cambiamenti climatici, Consiglio dell'Unione Europea. [Vite umane e denaro: il duplice costo dei cambiamenti climatici](#).

Enel Green Power. Transizione energetica e cambiamento climatico: cause e conseguenze. Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. [Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica](#).

L'UE e l'Accordo di Parigi: verso la neutralità climatica, Parlamento Europeo. [L'UE e l'Accordo di Parigi: verso la neutralità climatica](#).

L'Unione Europea e il clima, Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. [L'Unione Europea e il clima](#).

Cambiamenti climatici: il contributo dell'UE, Consiglio Europeo, Consiglio dell'Unione Europea. [Cambiamenti climatici: il contributo dell'UE](#).

Accordo di Parigi, Consiglio dell'Unione Europea. [Accordo di Parigi](#).

Energy Efficiency 2023, International Energy Agency (IEA). [Energy Efficiency 2023](#).

Present and Future Consumption of Buildings, A. R. Jafari, J. M. Ries. [Present and Future Consumption of Buildings](#).

The Critical Role of Buildings in Energy Efficiency, International Energy Agency (IEA). [The Critical Role of Buildings in Energy Efficiency](#).

Efficienza energetica degli edifici, Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. [Efficienza energetica degli edifici](#).

Piano di decarbonizzazione, Politecnico di Torino. [Piano di decarbonizzazione](#).

Inventario delle emissioni, Politecnico di Torino. [Inventario delle emissioni](#).

Documento programmatico Green Team 2017, Politecnico di Torino Green Team. [Documento programmatico Green Team 2017](#).

2022 Global Status Report for Buildings and Construction - United Nations Environment Programme (UNEP) [Global Status Report for Buildings and Construction 2022 - UNEP](#)

Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni [Comunicazione della Commissione COM\(2020\)](#)

Climate Change 2023 Synthesis Report – IPCC. [Climate Change 2023 Synthesis Report - IPCC](#)

EPBD (Direttiva 2002/91): Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) - EUR-Lex

EPBD II (Direttiva 2010/31): [Energy Performance of Buildings Directive 2010/31 - EUR-Lex](#)

EPBD III (Direttiva 2018/844): [Energy Performance of Buildings Directive 2018/844 - EUR-Lex](#)

RED (Direttiva 2009/28): [Renewable Energy Directive 2009/28 - EUR-Lex](#)

RED II (Direttiva 2018/2001): [Renewable Energy Directive 2018/2001 - EUR-Lex](#)

EED (Direttiva 2006/32): [Energy Efficiency Directive 2006/32 - EUR-Lex](#)

EED II (Direttiva 2012/27): [Energy Efficiency Directive 2012/27 - EUR-Lex](#)

EED III (Direttiva 2018/2002): [Energy Efficiency Directive 2018/2002 - EUR-Lex](#)

Decreto Legislativo 192/2005: [Decreto Legislativo 192/2005 - Normattiva](#)

Decreto Legislativo 63/2013: [Decreto Legislativo 63/2013 - Normattiva](#)

Legge 90/2013: [Legge 90/2013](#)

Politecnico di Torino Nuova Sede, Ministero dei Lavori Pubblici Provveditorato alle Opere Pubbliche per il Piemonte, Ufficio del Genio Civile di Torino, 1958.

Storia del Politecnico di Torino, Giuseppe Maria Pugno, 1959.

Per la sede di Corso Duca degli Abruzzi, Brusasco, Fiameni, Gabetti, Giriodi, Mamino, Martineo, Novello, Tamagno, Torretta, 1988

Documenti appartenenti al Piano di fattibilità tecnico economica, Interventi di decarbonizzazione della sede centrale fabbricati C.so Castelfidardo, TO_CEN04A, PROGES 2023

Progetto esecutivo nuovi volumi zona nord, Arch. Renato Piramide, fornito da Masterplan d'ateneo

"In arrivo il nuovo calcolo dinamico italiano", Efficienza Energetica Edifici, [Logical](#)

Linee guida per la diagnosi energetica degli edifici pubblici, ENEA, gennaio 2019. Disponibile su [ENEA](#).

Materiale del corso "Energy Audt and certification of buildings", Prof. Vincenzo Corrado, Prof. Ilaria Ballarini

Calcolo dinamico orario secondo la UNI EN ISO 52016, Logical Soft, Quaderni Tecnici, Ing. Annachiara Castagna. Disponibile su [Logical Soft](#).

EC700 – Manuale d'uso, Edilclima Engineering & Software, 2023. Disponibile su [Edilclima](#).

Validazione software: verifica degli strumenti di calcolo ai sensi dell'art.7 del D.M. 26 giugno 2015, CTI - Comitato Termotecnico Italiano, *Doc. Tecnici CTI*, 2 dicembre 2019. Disponibile su [CTI](#).

EC700 - Calcolo prestazioni energetiche degli edifici, Edilclima Engineering & Software, 2023. Disponibile su [Edilclima](#).

ENEA. (2019). Tecnologie per l'efficienza e il risparmio energetico negli edifici. Disponibile [Enea](#)
NORMA [UNI 10351:2021](#)

L'ASHRAE Guideline 14-2023

Efficientamento energetico degli edifici, Edilportale. Disponibile su [Edilportale](#).

Isolamento edilizio esterno e interno, BibLus ACCA. Disponibile su [BibLus ACCA](#).

Isolamento dell'intercapedine: come realizzarlo, BibLus ACCA. Disponibile su [BibLus ACCA](#).

Insufflaggio schiuma, 3GUA Energia. Disponibile su [3GUA Energia](#).

Facciata ventilata: caratteristiche e vantaggi, Coibentare Casa. Disponibile su [Coibentare Casa](#).

Focus sull'isolamento termico, Il Sole 24 Ore. Disponibile su [Il Sole 24 Ore](#).

Materiali isolanti green e verifiche CAM, Ingenio Web. Disponibile su [Ingenio Web](#).

Materiale del corso "Degradamento dei materiali" Prof. Giovanni Maizza

Pitture, rasanti e isolamento termico, ANIT. Disponibile su [ANIT](#)

Manuale per l'applicazione del sistema a cappotto, CORTEXA, Disponibile su [CORTEXA](#)

Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici, [D.M 26 GIUGNO 2015](#)

PREZZIARIO REGIONALE PIEMONTE 2023, [ALLEGATO B](#)

GSE - Gestore dei Servizi Energetici. [Quote incentivabili del Conto Termico](#)

• Norme per la Caratterizzazione dell'involucro:

- **UNI EN ISO 6946:2018** Componenti ed elementi per edilizia – Resistenza termica e trasmittanza termica – Metodo di calcolo
- **UNI EN ISO 10077-1:2018** Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti – Calcolo della trasmittanza termica – Parte 1: Generalità
- **UNI EN ISO 10077-2:2018** Prestazione termica di finestre, porte e chiusure – Calcolo della trasmittanza termica – Metodo numerico per i telai
- **UNI EN ISO 10211:2018** Ponti termici in edilizia – Flussi termici e temperature superficiali – Calcoli dettagliati
- **UNI EN 13363-1:2008** Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate - Calcolo della trasmittanza solare e luminosa - Parte 1: Metodo semplificato
- **UNI EN 13363-2:2006** Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate - Calcolo della trasmittanza solare e luminosa - Parte 2: Metodo di calcolo dettagliato
- **UNI EN ISO 13370:2018** Prestazione termica degli edifici – Trasferimento di calore attraverso il terreno – Metodi di calcolo
- **UNI EN ISO 13786:2018** Prestazione termica dei componenti per edilizia – Caratteristiche termiche dinamiche – Metodi di calcolo
- **UNI EN ISO 13788:2013** Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e condensazione interstiziale – Metodo di calcolo

- **UNI EN ISO 13789:2018** Prestazione termica degli edifici – Coefficienti di trasferimento del calore per trasmissione e ventilazione – Metodo di calcolo
 - **UNI EN ISO 14683:2018** Ponti termici in edilizia – Coefficiente di trasmissione termica lineica – Metodi semplificati e valori di riferimento
- Norme di supporto:
- **UNI 10349:2016** Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici
 - **UNI 10351:2021** Materiali da costruzione – Conduttività termica e permeabilità al vapore
 - **UNI 10355:1994** Murature e solai – Valori di resistenza termica e metodo di calcolo
 - **UNI EN 410:2011** Vetro per edilizia – Determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate
 - **UNI EN 673:2011** Vetro per edilizia – Determinazione della trasmittanza termica (valore U) – Metodo di calcolo
 - **UNI EN ISO 7345:2018** Isolamento termico – Grandezze fisiche e definizioni

Indice figure

Figura 1 – Evoluzione temperatura di riferimento media nel periodo 1981-2020.....	3
Figura 2 – Consumo di energia per edifici durante il periodo 2010-2022 e scenario per il 2030.....	5
Figura 3 – Distribuzione degli APE emessi nel 2021 e 2022 per classe energetica [1].....	8
Figura 4 – Distribuzione percentuale degli APE per classe energetica per gli immobili residenziali (a) e non residenziali (b)[1].....	8
Figura 5 - Distribuzione degli APE per periodo di costruzione (a) e distribuzione percentuale degli APE per periodo di costruzione e classe energetica (b) [1]	10
Figura 6 – Sintesi emissioni Politecnico periodo 2018-2023 [2].....	11
Figura 7 – Analisi ambiti di produzione di CO ₂ [2]	11
Figura 8 – Calendario scadenze italiane derivanti dalla direttiva RED	20
Figura 9 – Planimetria generale sede centrale Politecnico di Torino (1958)[4]	24
Figura 10 – Vista assonometrica interventi di ampliamento (1988) [6].....	26
Figura 11 – Foto prima elevazione edificio oggetto di studio (1958) [5]	27
Figura 12 – Prospetto ovest pre-intervento di ampliamento [6]	27
Figura 13 – Prospetto ovest post-intervento di ampliamento [6].....	28
Figura 14 – Pianta secondo piano post-ampliamento[5].....	28
Figura 15 - Dati climatici [7]	29
Figura 16- Planimetria della sede centrale del Politecnico di Torino, con evidenziata la disposizione degli edifici e i relativi nomi [5]	30
Figura 17 - Vista satellitare dell'edificio	30
Figura 18 - Dettaglio dell'edificio con evidenza della manica singola (a sinistra) e della manica doppia (a destra).....	31
Figura 19 – Dettaglio prospetto ovest su C.so Castelfidardo [5].....	33
Figura 20 – Dettaglio logge interne [5].....	33
Figura 21 – Dettaglio della copertura [5].....	34
Figura 22 – Dettaglio interno del sottotetto [5].....	34
Figura 23 – Dettaglio elementi finestrati [5].....	48
Figura 24 – Dettaglio della dorsale di distribuzione [5]	49
Figura 25 – Foto ventilconvettore [5]	50
Figura 26 – Foto radiatore [5]	50
Figura 27 – Foto sfogo estrattori per la ventilazione dei laboratori [5]	51
Figura 28 – Schematizzazione modello resistivo-capacitivo [8]	54
Figura 29 – Profilo orario giorni feriali (ad esclusione del sabato)	59
Figura 30 – Profilo orario considerato per i sabati.....	59
Figura 31 – Parametri per zone con ventilazione naturale.....	60
Figura 32 – Parametri per zone con ventilazione meccanica.....	60
Figura 33 – Firma energetica per il riscaldamento	64
Figura 34 - Indici di prestazione energetica.....	67
Figura 35 – Emissioni di CO ₂ per servizio.....	68
Figura 36 - Vista assonometrica da NORD-OVEST.....	68
Figura 37- Vista assonometrica da SUD-EST.....	69
Figura 38 - Insufflaggio di schiuma in intercapedine per l'isolamento termico. [9].....	72
Figura 39 - Schema di una facciata ventilata [10]	73

Figura 40 - Schema riassuntivo dei principali materiali isolant [12].....	78
Figura 41 – Incentivi presi in considerazione nel caso studio [14].....	108
Figura 42 - Interventi incentivabili con conto termico [14].....	109

Indice tabelle

Tabella 1 - Distribuzione dei valori mediani dell'EPgl, dell'EPgl,nren, dell'EPgl,ren, dell'EPH,nd e delle emissioni di CO2 per classe energetica per gli immobili [1]	9
Tabella 2 - Distribuzione dei valori mediani dell'EPgl, dell'EPgl,nren, e dell'EPgl,ren per anno di emissione dell'APE per gli immobili [1]	9
Tabella 3 - Tipologia delle pareti con spessore, trasmittanza e verifica termo-igrometrica. [3][5] ...	35
Tabella 4 – Stratigrafia parete M1 [3][5]	36
Tabella 5 - Stratigrafia parete M2 [3][5]	37
Tabella 6 - Stratigrafia parete M3 [3][5]	38
Tabella 7 - Stratigrafia parete M4 [3][5]	39
Tabella 8 - Stratigrafia parete M5 [3][5]	40
Tabella 9 - Tipologia dei solai con spessore, trasmittanza e verifica termo-igrometrica. [3][5].....	41
Tabella 10 - Stratigrafia solaio P1 [3][5]	42
Tabella 11 - Stratigrafia solaio P2 [3][5].....	43
Tabella 12 - Stratigrafia solaio P3 [3][5]	44
Tabella 13 - Stratigrafia solaio P4 [3][5]	45
Tabella 14 - Stratigrafia copertura sottotetto [3][5]	46
Tabella 15 - Tabella riassuntiva delle finestre con relative dimensioni. [5].....	47
Tabella 16 - Tabella delle zone termiche dell'edificio.....	57
Tabella 17 - Zone dell'edificio non climatizzate.....	57
Tabella 18 - Set point di temperatura considerati.....	58
Tabella 19 - Apporti interni in funzione delle destinazioni d'uso.....	58
Tabella 20 – Dati relativi al consumo di energia termica per il riscaldamento invernale.....	62
Tabella 21 – Dati relativi ai consumi di energia per il raffrescamento estivo.....	62
Tabella 22 - Consumi mensili di riscaldamento e relativi coefficienti di calibrazione.....	65
Tabella 23 - Consumi mensili di raffrescamento e relativi coefficienti di calibrazione	66
Tabella 24 – Indici di prestazione energetica per riscaldamento e raffrescamento e totali.....	67
Tabella 25 - Consumo annuo e relative emissioni di CO2.....	67
Tabella 26 - Classi di reazione al fuoco dei materiali da costruzione [11]	77
Tabella 27 – Stratigrafia analizzata per l'intervento sulle pareti	83
Tabella 28 – Stratigrafia analizzata per l'intervento sul solaio	84
Tabella 29 - Requisiti di trasmittanza termica per le pareti	85
Tabella 30 - Trasmittanza termica delle pareti isolate con pannelli di XPS di vari produttori, in funzione dello spessore.	86
Tabella 31 - Trasmittanza termica delle pareti isolate con pannelli di EPS di vari produttori, in funzione dello spessore	87
Tabella 32 - Trasmittanza termica delle pareti isolate con pannelli AEROPAN,, in funzione dello spessore	87

Tabella 33 - Trasmittanza termica delle pareti isolate con pannelli di CANAPA di vari produttori, in funzione dello spessore	88
Tabella 34 - Trasmittanza termica delle pareti isolate con pannelli di FIBRA DI LEGNO, in funzione dello spessore	88
Tabella 35 - Trasmittanza termica delle pareti isolate con pannelli di SUGHERO di vari produttori, in funzione dello spessore	89
Tabella 36 - Trasmittanza termica delle pareti isolate con pannelli di LANA DI VETRO di vari produttori, in funzione dello spessore	89
Tabella 37 - Trasmittanza termica delle pareti isolate con pannelli di LANA DI ROCCIA di vari produttori, in funzione dello spessore	90
Tabella 38 - Trasmittanza termica delle pareti isolate con pannelli di PUR di vari produttori, in funzione dello spessore	90
Tabella 39 - Trasmittanza termica delle pareti isolate con pannelli in RESINA FENOLICA di vari produttori, in funzione dello spessore	91
Tabella 40 - Requisiti di trasmittanza termica del solaio	92
Tabella 41 - Trasmittanza termica dei solaio isolato con pannelli di XPS di vari produttori, in funzione dello spessore	93
Tabella 42 - Trasmittanza termica dei solaio isolato con pannelli di FIBRA DI LEGNO, in funzione dello spessore	93
Tabella 43 - Trasmittanza termica dei solaio isolato con pannelli di SUGHERO di vari produttori, in funzione dello spessore	94
Tabella 44 - Trasmittanza termica dei solaio isolato con pannelli di LANA DI ROCCIA, in funzione dello spessore	94
Tabella 45 - Trasmittanza termica dei solaio isolato con pannelli di PUR di vari produttori, in funzione dello spessore	95
Tabella 46 - Trasmittanza termica dei solaio isolato con pannelli in RESINA FENOLICA di vari produttori, in funzione dello spessore	95
Tabella 47 – Fattori di conversione energia primaria [16]	96
Tabella 48 - Energia primaria invernale post-intervento sulle pareti	98
Tabella 49 - Consumo per il riscaldamento invernale post-intervento sulle pareti	99
Tabella 50 - Energia primaria estiva post-intervento sulle pareti	100
Tabella 51 - Consumo per il raffrescamento estivo post-intervento sulle pareti	101
Tabella 52 - Energia primaria invernale post-intervento solaio	102
Tabella 53 - Consumo per il riscaldamento invernale post-intervento solaio	103
Tabella 54 - Energia primaria estiva post-intervento solaio	104
Tabella 55 - Consumo per il raffrescamento estivo post-intervento solaio	105
Tabella 56 – Requisiti minimi di trasmittanza per accedere all’incentivo [15]	110
Tabella 57 – Quote incentivabili per l’intervento di coibentazione [15]	110
Tabella 58 - Quote incentivabili per l’intervento di building automation [15]	111
Tabella 59 - Analisi economica interventi su paramenti verticali	114
Tabella 60 - Analisi economica interventi su elementi orizzontali	115
Tabella 61 – Migliori interventi relativi alle pareti	116
Tabella 62 – Migliori interventi relativi al solaio	116
Tabella 63 – Stratigrafie analizzate e rispettive caratteristiche	118

Tabella 64 - Energia primaria invernale post-intervento combinato.....	119
Tabella 65 - Consumo per il riscaldamento invernale post-intervento combinato.....	121
Tabella 66 - Energia primaria estiva post-intervento combinato	122
Tabella 67 - Consumo per il raffrescamento estivo post-intervento combinato	123
Tabella 68 - Analisi economica dell'intervento combinato.....	124
Tabella 69 - Classificazione generale delle combinazioni di interventi.....	124
Tabella 70 – Classificazione migliori pacchetti per minor tempo di ritorno.....	125
Tabella 71 - Classificazione migliori pacchetti per minor costo totale.....	125
Tabella 72 - Classificazione migliori pacchetti per minor consumo post-intervento.....	125
Tabella 73 - Classificazione migliori pacchetti per maggior punteggio totale.....	125
Tabella 74 - Energia primaria invernale post-intervento complessivo.....	127
Tabella 75 - Energia primaria invernale post-intervento complessivo.....	128
Tabella 76 - Energia primaria invernale post-intervento complessivo.....	128
Tabella 77 - Consumo per il raffrescamento estivo post-intervento complessivo	129
Tabella 78 – Risultati analisi economica intervento completo	129

Allegati

Schede tecniche

- XPS

Conformità ai C.A.M. della gamma Elyfoam.

DM 11 Ottobre 2017 sui **Criteri Ambientali Minimi (C.A.M. Edilizia)** riporta le regole da seguire in tema di sostenibilità ambientale per l'affidamento di servizi e progettazione di lavori per la nuova costruzione, la ristrutturazione e la manutenzione di edifici pubblici.

Il decreto raccoglie una serie di criteri che gli edifici ed i componenti edilizi devono rispettare nell'ottica della sostenibilità ambientale e del consumo sostenibile delle risorse. **I prodotti della gamma ELYFOAM rispondono al decreto C.A.M.** per i seguenti aspetti:

• **2.4.1.1** - Disassemblabilità: almeno il 50% (peso su peso) dei componenti edilizi deve essere disassemblabile e deve essere sottoponibile a fine vita a demolizione selettiva. I prodotti della gamma ISOTEC sono facilmente disassemblabili e, dopo essere stati rimossi dal supporto, possono essere demoliti in maniera selettiva.

• **2.4.1.2** - Materia recuperata o riciclata: il contenuto di materia riciclata o recuperata nei materiali utilizzati per l'edificio deve essere pari ad almeno il 15% in peso valutato sul totale. **I prodotti della gamma ELYFOAM contengono del materiale recuperato o riciclato e vanno a contribuire al raggiungimento di tale limite.**

• **2.4.1.3** - Sostanze pericolose: **i prodotti della gamma ISOTEC non contengono sostanze pericolose.**

• **2.4.2.9** - Isolanti termici ed acustici:

I prodotti della gamma ELYFOAM:

- **non sono prodotti utilizzando ritardanti di fiamma**

- **non sono prodotti con agenti espandenti con un potenziale di riduzione dell'ozono**

- **non sono prodotti con catalizzatori al piombo**

- **contengono agenti espandenti inferiori al 6% sul peso del prodotto finito**

- **contengono una percentuale di riciclato superiore al 5% sul peso dell'isolante** in ottemperanza alla tabella posta in decreto.



Il documento è disponibile nelle aree download dei siti ww.brianzaplastica.it ed elyfoam.brianzaplastica.it; per ulteriori approfondimenti, contattare sales-insulation@brianzaplastica.it

CARATTERISTICA	um	VALORE	METODO DI PROVA
Densità	kg/m ³	30 ÷ 32	UNI EN 1602
Resistenza alla compressione al 10% di deformazione α_{10}	kPa	≥ 250 sp. < 60 mm	UNI EN 826
		≥ 300 sp. ≥ 60 mm	
Conducibilità termica λ_1 (valore iniziale)	W/mK	0,024 < 60 mm	UNI EN 12667
		0,026 ≥ 60 mm	
Conducibilità termica λ_D (valore invecchiato ponderato per 25 anni di esercizio)	W/mK	0,033 < 60 mm	UNI EN 13164
		0,036 ≥ 60 mm	
Resistenza alla diffusione del vapore acqueo μ	-	≥ 100	UNI EN 12086
Assorbimento d'acqua per immersione per lungo periodo W_L	%	< 0,7	UNI EN 12087
Calore specifico	J/kgK	1450	UNI EN ISO 10456
Temperatura limite di utilizzo	°C	75	UNI EN 14706
Stabilità dimensionale DS (70, -)	%	≤ 5	UNI EN 1604
Reazione al fuoco	euro classe	E	UNI EN 13501-1 UNI EN ISO 11925-2

Prodotto marcato CE in accordo al regolamento 305/2011/CE, norme UNI EN 13164:2015 e UNI EN 13172:2012 - Sistema 3 - Organismo notificato CSI

Scheda Tecnica Styrodur® 3035 CS

Pannelli isolanti in polistirene espanso estruso – XPS

Proprietà	Unità di misura	Codifica secondo EN 13164	Valore	Norma di prova
Finitura perimetrale sui quattro lati			Con battente	
Superficie			Liscia	
Lunghezza x larghezza	mm		1265x615	
Spessori	mm		30,40,50,60,80,100	
Percentuale media di celle chiuse	%	CV(95)	95	ISO 4590
Tolleranza sullo spessore				
	<i>Spessore < 50 mm</i>	mm	-2/+2	EN 823
	<i>50 mm ≤ Spessore ≤ 120 mm</i>	mm	-2/+3	
	<i>Spessore > 120 mm</i>	mm	-2/+6	
Conducibilità termica dichiarata				
	<i>Spessore 30 mm</i>	W/m²K	λ _D	EN 13164
	<i>Spessore 40 mm</i>	W/m²K	λ _D	
	<i>Spessore 50 mm</i>	W/m²K	λ _D	
	<i>Spessore 60 mm</i>	W/m²K	λ _D	
	<i>Spessore 80 mm</i>	W/m²K	λ _D	
	<i>Spessore 100 mm</i>	W/m²K	λ _D	
Resistenza termica dichiarata R _D				
	<i>Spessore 30 mm</i>	m²K/W	R _D	EN 13164
	<i>Spessore 40 mm</i>	m²K/W	R _D	
	<i>Spessore 50 mm</i>	m²K/W	R _D	
	<i>Spessore 60 mm</i>	m²K/W	R _D	
	<i>Spessore 80 mm</i>	m²K/W	R _D	
	<i>Spessore 100 mm</i>	m²K/W	R _D	
Resistenza a compressione con schiacciamento del 10%	kPa	CS(10/Y)300	≥ 300	EN 826
Resistenza a compressione a 50 anni con schiacciamento ≤2%(creep)	kPa	CC(2/1,5/50)130	≥ 130	EN 1606
Resistenza a compressione sotto fondazione				
	kPa	σ _{cos}	≥ 130	DIBt
	kPa	f _{CD}	≥ 185	Z-23.34-1325
Modulo elastico a compressione				
	A breve termine	kPa	E	EN 826
	A lungo termine	kPa	E ₅₀	
Stabilità dim. 70°C e 90% um.rel.	%	DS(TH)	≤ 5	EN1604
Comportamento alla deformazione:carico 40 kPa e temp 70°C	%	DLT(2)5	≤ 5	EN 1605
Coefficiente di dilatazione termica lineare				
	<i>Nella lunghezza</i>	mm/m·K	0,08	DIN 53752
	<i>Nella larghezza</i>	mm/m·K	0,06	
Reazione al fuoco		E	E	EN13501-1
Assorbimento di acqua per immersione	%	WL(T)0,7	0,2	EN12090
Assorbimento di umidità per diffusione e condensazione	%	WD(V)3	< 3	EN12088
Resistenza alla diffusione del vapore				
	<i>Spessore ≤ 50 mm</i>	μ	150	EN 13164
	<i>Spessore > 50 mm</i>	μ	100	EN 13164
Comportamento al gelo-disgelo	% Vol	FTCD1	≤ 1	EN12091
Temperatura limite di utilizzo	°C		75	EN14706
Calore specifico	J/Kg·K		1450	EN10456

Dati Tecnici

<u>Caratteristica</u>	<u>Normativa</u>	<u>Valore</u>	<u>Unità di misura</u>
Conducibilità termica dichiarata spessore 30	EN 12667	0.031	W/(m·K)
Conducibilità termica dichiarata spessore 40	EN 12667	0.032	W/(m·K)
Conducibilità termica dichiarata spessore 50-60	EN 12667	0.033	W/(m·K)
Conducibilità termica dichiarata spessore 80-100	EN 12667	0.034	W/(m·K)
Conducibilità termica dichiarata spessore 120	EN 12667	0.035	W/(m·K)
Resistenza alla compressione con deformazione del 10%	EN 826	≥300	kPa
Classe di reazione al fuoco	EN 13501-1	E	-
Resistenza alla diffusione del vapore acqueo	EN 12086	100 (150 sp. 30)	-
Calore specifico		1450	J/Kg·K
Stabilità dimensionale a 70° C e 90% U.R.	EN1604	≤ 5	%
Densità		33 +/- 10%	kg/m ³
Media celle chiuse		>96	%
Resistenza a comp. dopo 50 anni con schiacciamento ≤ 2%	EN 1606	≥130	kPa
Assorbimento d'acqua per immersione (28 giorni)	EN 12087	≤ 0,7	EN 12087
Assorbimento d'acqua per diffusione (28 giorni)	EN 12088	≤ 3	Vol %
Resistenza alla diffusione del vapore acqueo (μ)	EN 12086	150 (spess 30mm) 100	
Comportamento al gelo (alternanza gelo - disgelo) dopo assorbimento d'acqua per diffusione a lungo termine	EN 12091	≤ 1	EN 12087

-EPS



webertherm G100 ECO

Pannelli in polistirene espanso sinterizzato (EPS) additivato con grafite

- Contenuto di riciclato certificato
- Conforme ai CAM

CAMPI DI IMPIEGO

Pannello in polistirene espanso sinterizzato (EPS) additivato con grafite. Conforme ai **CAM** (Criteri Ambientali Minimi).

Il pannello è indicato per applicazioni di isolamento termico a cappotto.

CARATTERISTICHE DI PRODOTTO

Confezioni:	singola lastra da 0,5 mq in pacchi
Colori:	grigio
Dimensioni:	1000 x 500 mm
Spessore pannello:	da 20 a 240 mm
Stoccaggio:	stoccare al riparo dalla pioggia e dai raggi del sole

DATI TECNICI*

Reazione al fuoco:	EUROCLASSE E
Assorbimento d'acqua:	$W_1 \leq 3\%$ (EN 12087)
Coefficiente di resistenza al passaggio di vapore:	$\mu : 20 \div 40$ (EN 12086)
Stabilità dimensionale:	DS(n) 2 = $\pm 0,2\%$ (EN 1603)
Calore specifico:	1450 J/kg K
Conduttività termica:	$\lambda_0 = 0,031$ W/mK
Tolleranza:	<ul style="list-style-type: none">• (EN 822) Lunghezza : L2 = ± 2 mm• (EN 822) Larghezza : W2 = ± 2 mm• (EN 823) Spessore : T2 = ± 2 mm• (EN 824) Ortogonalità: S2 = $\pm 2/1000$ mm• (EN 825) Planarità : P3 = ± 3 mm
Resistenza alla trazione perpendicolare alle facce:	TR ≥ 150 Kpa (EN 1607)

* Questi valori derivano da prove di laboratorio in ambiente condizionato e potrebbero risultare sensibilmente modificati dalle condizioni di messa in opera.



Caratteristiche tecniche

La classificazione delle Lastre in EPS 100 con Grafite secondo la norma EN 13163 prevede che le caratteristiche vengano dichiarate sotto forma di codici di designazione, che riportano a specifici limiti superiori o inferiori.

Caratteristiche	Codice di designazione	Unità di misura	EPS 100	Norma di prova
Resistenza a compressione al 10% della deformazione	CS (10)	KPa	≥ 100	EN 826
Resistenza a trazione perpendicolare alle facce	TR	KPa	≥ 150	EN 1607
Resistenza a flessione	BS	KPa	≥ 150	EN 12089
Lunghezza	L	mm	L2 (± 2)	EN 822
Larghezza	W	mm	W2 (± 2)	EN 822
Spessore	T	mm	T2 (± 1)	EN 823
Planarità	P	mm	P4 (± 5)	EN 825
Ortogonalità	S	mm/m	S2 (± 2)	EN 824
Conducibilità termica dichiarata	λ_D	W/m·K	0,031	EN 12667
Massa volumica	-	kg/m ³	17 (± 6%)	-
Fattore di resistenza alla diffusione del vapore acqueo	μ	-	30-70	EN 12086
Modulo di taglio	G_m	KPa	≥ 1000	EN 12090
Resistenza al taglio	F_{tk}	KPa	≥ 20	EN 12090
Assorbimento d'acqua a lungo periodo per immersione	WL(T)	%	≤ 2	EN 12087
Assorbimento d'acqua per immersione parziale	Wlp	kg/m ²	≤ 0,5	EN 12087
Permeabilità al vapore in campo secco	δ_a	kg/m·s·Pa	3,6·10 ⁻¹²	EN 13163
Permeabilità al vapore in campo umido	δ_u	kg/m·s·Pa	9·10 ⁻¹²	EN 13163
Capacità termica specifica	C_s	J/Kg·K	1.450	EN 10456
Stabilità dimensionale	DS	%	DS(N)2	EN 1603
Reazione al fuoco	-	Classe	Euroclasse E	EN 13501-1

- LANA DI VETRO

Scheda tecnico-commerciale
Isover Mupan33 4+
Isover Mupan33 K 4+

<u>Caratteristica</u>	<u>Valore</u>	<u>U.M.</u>	<u>Normativa</u>
Resistenza alla diffusione del vapore acqueo (μ) Mupan 4+	1	-	EN 12086
Resistenza alla diffusione del vapore acqueo (μ) Mupan K 4+	3.000	-	EN 12086
Assorbimento d'acqua a breve periodo	≤ 1	Kg/m ²	EN 1609
Tolleranze dimensionali: lunghezza	± 2	%	EN 822
Tolleranze dimensionali: larghezza	$\pm 1,5$	%	EN 822
Tolleranze dimensionali: spessore	T2	mm	EN 823
Squadratura	≤ 5	mm/m	EN 824
Planarità	≤ 6	mm	EN 825
Stabilità dimensionale	≤ 1	%	EN 1604
Calore specifico	1.030	J/Kg*K	EN ISO 10456
Costante di attenuazione acustica	85	dB/m	EN ISO 717-1
Resistività al flusso d'aria	13	kPa*s/m ²	EN 29053

	<u>Spessore (mm)</u>	<u>Resistenza termica dichiarata R_D (m²K/W)</u>	<u>Dimensioni (m)</u>	<u>m² pallet</u>
Mupan33 4+ Mupan33 K 4+	40	1,20	0,60 x 1,45	208,80
	50	1,50	0,60 x 1,45	167,40
	60	1,80	0,60 x 1,45	139,20
	80	2,40	0,60 x 1,45	111,36
	100	3,00	0,60 x 1,45	83,52
	120	3,60	0,60 x 1,45	69,60

Scheda tecnica di prodotto

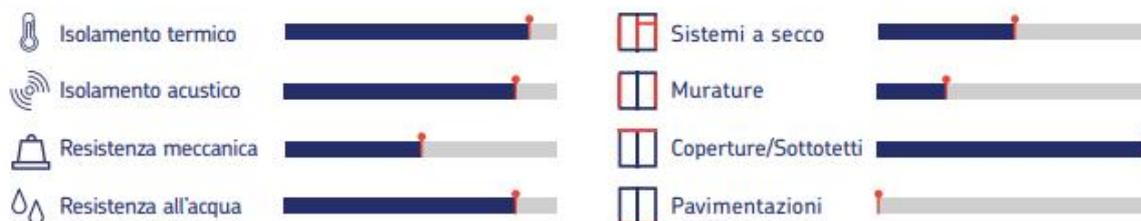
URSA GLASSWOOL SF 34

Feltro arrotolato idrorepellente in lana di vetro trattata con speciali resine termoindurenti marcato CE in conformità alla norma EN 13162, realizzato con tecnologia di produzione URSA BiOnic Performance.

Rif. DoP - URSA GLASSWOOL SF 34



Livello prestazionale



Prestazioni tecniche principali

Dimensioni pannelli EN 822 - EN 823



Download disponibili

- [Catalogo applicazioni](#)
- [Dossier conformità CAM](#)
- [Brochure sostenibilità](#)

Proprietà termiche EN 12667

Spessore [mm]	25	50	100	120	140	160	180	200
Conducibilità termica λ_D [W/mK]	0,034							
Resistenza termica R_D [m ² K/W]	0,70	1,45	2,90	3,50	4,10	4,70	5,25	5,85

URSA GLASSWOOL SF 34

Ulteriori prestazioni

Dati tecnici

Proprietà	Valore	Unità di misura	Codice di designazione	Norma
Reazione al fuoco - Euroclasse	A1	-	-	EN 13501
Tolleranza sullo spessore	-5/+15	mm	T2	EN 823
Stabilità dimensionale (variazione)	< 1	%	DS(T+)	EN 1604
Resistenza al vapore acqueo	1	-	MU1	EN 12086
Resistenza al flusso d'aria	≥ 5	kPa · s/m ²	AFr5	EN 29053
Calore specifico	1.030	J/kgK	-	EN 12524

- LANA DI ROCCIA

Caratteristiche Tecniche

<u>Caratteristica</u>	<u>Valore</u>	<u>U.M.</u>	<u>Normativa</u>
Conducibilità termica dichiarata (λ_D)	0,032	W/mK	EN 12667
Densità nominale	32	Kg/m ³	-
Classe di reazione al fuoco Arena32 (senza rivestimento)	A1	-	EN 13501-1

Saint-Gobain Italia S.p.A.
Via G. Bensi, 8 - 20152 Milano
info.italy@isover-saint-gobain.com | www.isover.it

ISOVER
SAINT-GOBAIN

Scheda tecnico-commerciale
Isover Arena32
Isover Arena32 K
Isover Arena32 Alu

<u>Caratteristica</u>	<u>Valore</u>	<u>U.M.</u>	<u>Normativa</u>
Resistenza alla diffusione del vapore acqueo (μ) Arena32	1	-	EN 12086
Resistenza alla diffusione del vapore acqueo (μ) Arena32 K	3.000	-	EN 12086
Resistenza alla diffusione del vapore acqueo (μ) Arena32 Alu	9.000	-	EN 12086
Assorbimento d'acqua a breve periodo	≤ 1	Kg/m ²	EN 1609
Tolleranze dimensionali: lunghezza	± 2	%	EN 822
Tolleranze dimensionali: larghezza	± 1,5	%	EN 822
Tolleranze dimensionali: spessore	T2	mm	EN 823
Squadratura	≤ 5	mm/m	EN 824
Planarità	≤ 6	Mm	EN 825
Stabilità dimensionale	≤ 1	%	EN 1604
Calore specifico	1.030	J/Kg*K	EN ISO 10456
Costante di attenuazione acustica	136	dB/m	EN ISO 717-1
Resistività al flusso d'aria	27	kPa*s/m ²	EN 29053
Assorbimento acustico (α_w) - 60 mm	1,0	-	EN ISO 11654

SmartRoof Xtra

Pannello rigido isolante in lana minerale senza rivestimento

Dati tecnici

CARATTERISTICHE	VALORE	NORMA
Spessori disponibili	50, 60, 80, 100 mm	-
Dimensioni pannelli	1200 x 2000 mm	-
Conducibilità termica λ_D	0,039 W/mK	EN 13162 - EN 12667
Reazione al fuoco (Euroclasse)	A1	EN 13501-1
Resistenza al passaggio del vapore acqueo μ	1	EN 12086
Assorbimento d'acqua a breve termine - WS	$\leq 1,0$ kg/m ²	EN 1609
Assorbimento d'acqua a lungo termine - WL(P)	$\leq 3,0$ kg/m ²	EN 12087
Caratteristiche di durabilità	DS(70,90)	EN 1604
Resistenza a compressione con schiacciamento al 10% - CS(10)	≥ 100 kPa	EN 826
Resistenza al carico puntuale - PL(5)	1.000 N	EN 12430
Calore specifico (Cp)	1.030 J/kg K	EN 10456
Densità nominale (range)	175-185 kg/m ³	-
Codice DOP	R4308HPCPR	-

BIOPAN / scheda tecnica

CARATTERISTICHE TECNICHE

Densità	da 105 a 125 kg/m ³
Coefficiente di conducibilità termica dichiarata a 10 °C	da 0,036 a 0,040 W/mk
Calore specifico	1900 J/kgK
Resistenza alla diffusione del vapore	$\mu = 7 - 14$
Permeabilità al vapore	386 ng/Pa.sm ²
Reazione al fuoco	Euroclasse E
Reazione al fuoco - sistema ETICS	B-s1,d0
Tensione a rottura	da 1,4 a 2,0 Kgf/cm ²
Resistenza alla compressione (deformazione 10%)	≥ 100 Kpa
Valori di isolamento termico (R e m ² k/W e Kem W/m ² k)	Spessore 40 mm / R 1,000 / W 1,000 Spessore 50 mm / R 1,250 / W 0,800 Spessore 60 mm / R 1,500 / W 0,667 Spessore 80 mm / R 2,000 / W 0,500

Sfasamento termico = ritardo 13 ore (per 20 cm)

È la **differenza di tempo** che intercorre tra l'ora in cui si ha la **massima temperatura all'esterno** e l'ora in cui si ha la **massima temperatura all'interno**. Maggiore è lo sfasamento, più lungo sarà il tempo di passaggio del calore all'interno dell'edificio. Questa differenza **deve essere superiore a 9 ore**, ovvero il tempo medio di esposizione giornaliera al sole in estate. Un tempo di ritardo superiore impedisce il surriscaldamento della parete durante il giorno e favorisce il rinfrescamento durante la sera, in modo da ricominciare il ciclo il mattino seguente.



Caratteristiche tecniche

Caratteristiche	Valori
Densità kg/m ³	150÷160
Reazione al fuoco secondo Circ.Min.Interno 14/09/1961, n. 91	Classe 2
Coeff. di conduttività termica λ_D W/(m·K)	0,041
Calore specifico J/(kg·K)	1674
Resistenza alla diffusione del vapore μ	10÷13
Resistenza a compressione a 1mm di deformazione (kPa)	86,3
Resistenza a compressione al 50% di deformazione (kPa)	1269,96
Resistenza a flessione (kPa)	335,39
Resistenza a trazione (parallela alle facce) (kPa)	294,2
Potere fonoisolante (parete) 3 cm pareti esterne (dB)	58
Potere fonoisolante (parete) 4 cm pareti divisorie (dB)	52
Assorbimento acustico Tra 800/5000 Hz - sp. 3 cm	0,73

- FIBRA DI LEGNO



Spessore mm	Formato mm	Superf. reale mm	kg/m ²	pannelli/pallet	m ² /pallet	kg/pallet
180	1880 x 600	1855 x 575	18,0	12	12,8	ca. 295
200	1880 x 600	1855 x 575	20,0	12	12,8	ca. 325
220	1880 x 600	1855 x 575	22,0	10	10,6	ca. 300
240	1880 x 600	1855 x 575	24,0	10	10,6	ca. 325

Caratteristiche tecniche

Caratteristiche	Valori
Fabbricazione controllata secondo la norma	DIN EN 13171
Codice identificativo	WF - EN 13171 - T5 - CS(10\Y)50 - TR10 - WS1,0 - MU3
Densità kg/m ³	110
Reazione al fuoco secondo la norma EN13501-1	E
Coeff. di conduttività termica λ_D W/(m·K)	0,037
Calore specifico J/(kg·K)	2100
Resistenza alla diffusione del vapore μ	3
Valore s_d (m)	0,18(60)/0,24(80)/0,3(100)/0,36(120)/0,42(140)/0,48(160)/0,54(180)/0,6(200)/0,66(220)/0,72(240)/0,78(260)/0,84(280)/0,9(300)
Resistenza termica R_D (m ² ·K)/W	1,60(60)/2,15(80)/2,70(100)/3,20(120)/3,75(140)/4,30(160)/4,85(180)/5,40(200)/5,90(220)/6,45(240)/7,00(260)/7,55(280)/8,10(300)
Sollecitazione di compressione per 10% di distorsione σ_{10} (N/mm ²)	0,05
Resistenza a compressione (kPa)	50
Resistenza a trazione perpendicolare (kPa)	10
Assorbimento d'acqua istantaneo (kg/m ²)	≤ 1,0
Componenti	Fibra di legno, resina PUR, paraffina

Stoccaggio & trasporto

- Rispettare le regole in vigore per il trattamento delle polveri.
- Accatastare in orizzontale, all'asciutto: anche se i pallet risultano con protetti da pellicola trasparente, stoccare il materiale sempre all'asciutto.
- Evitare, sia nello stoccaggio che durante il trasporto, la degradazione dei bordi.
- Togliere la pellicola del pallet quando questo si trova su un suolo piano, stabile e asciutto.
- Altezza max di sovrapposizione dei pallet : 2 bancali.
- L'area di stoccaggio e di posa deve essere protetta da umidità ed agenti atmosferici.

- CANAPA



ISOLKENAF

Pannelli isolanti termici e acustici ecosostenibili in canapa e Kenaf



Caratteristiche morfologiche e fisico-meccaniche		
Parametro	Unità	Isolkenaf
Struttura	-	Fibre vegetali naturali termolegate
Materia prima	-	Fibre vegetali di Kenaf e canapa
Spessore pannello	mm	Da 20 a 100
Densità	Kg/m ³	Da 20 a 100
Conducibilità termica	λ	0,039 W/m °K (30 kg/m ³) 0,036 W/m °K (50 kg/m ³)
Calore Specifico	J/ Kg °C	2050
Reazione al fuoco	Euroclasse	F
Umidità di assorbimento	%	8-10
Resistenza alla compressione 10%	KPa	5,5
Rigidità Dinamica	MN/m ³	3,5
Traspirabilità al vapore	μ	5
Permeabilità al vapore	Kg/m s Pa	40 x 10 ⁻¹²



I dati esposti sono forniti in buona fede e valori ricavati dalle produzioni attuali.
Ci riserviamo di modificare o aggiornare le prestazioni e caratteristiche senza preavviso.
Non ci compete nessuna responsabilità sull'uso improprio del prodotto e delle informazioni

Descrizione prodotto

Isolante in fibre naturali di canapa e Kenaf, termolegate tridimensionalmente grazie ad un nuovo processo produttivo ad alta tecnologia. La disposizione geometrica delle fibre naturali assicura prestazioni termiche elevate sia contro il freddo invernale che contro il caldo estivo. L'utilizzo di fibre di vari spessori e lunghezze permette ai pannelli una fonoassorbenza ottimale anche in situazioni particolarmente difficile da trattare acusticamente.

Principali impieghi

Isolkenaf S è disponibile in pannelli o rotoli a densità variabile da 20 a 100 Kg/m³ e in diversi spessori. La flessibilità di spessori e densità rendono Isolkenaf S idoneo per ogni tipo applicazione a pavimento o in copertura e, grazie alla sua struttura innovativa, anche in muri di facciata o per l'isolamento termico con sistemi a secco. Non contenendo collanti chimici o additivi inquinanti, è interamente riciclabile in fase di smontaggio, rendendolo un prodotto ECOSOSTENIBILE ed altamente prestazionale durante l'intero ciclo di vita.

Il particolare processo di termofissaggio delle fibre naturali e l'utilizzo di materie con ottime caratteristiche di traspirabilità, lo rendono un isolante insensibile agli effetti della umidità e installabile senza barriera al vapore. Isolkenaf infatti, favorisce il ciclo di traspirazione dell'involucro edilizio: ne regola il grado di umidità, trattenendo le eccedenze nei mesi freddi e rilasciandole nei mesi caldi.

Poiché durante il processo di termolegatura le sostanze proteiche contenute dalle fibre vegetali vengono volatilizzate, non è necessario effettuare alcun trattamento contro insetti, quali tarne e coleotteri.

- 1- Ecologico e naturale - accreditato LEED
- 2- Ottimo isolante termico
- 3- Ottimo isolante acustico
- 4- Termo-legato senza colle
- 5- Non necessita di maschere o guanti durante la posa
- 6- Insensibile all'umidità
- 7- Traspirante non necessita di barriere al vapore
- 8- Inerte agli insetti, roditori e volatili

- PIR/PUR

Isover Pir Premium

spessore (mm)	Resistenza termica dichiarata (m ² K/W)	pannelli /pacco	m ² / pacco	m ² / pallet
60	2,70	8	5,76	57,60
80	3,60	6	4,32	43,20
100	4,50	5	3,60	36,00
120	5,45	4	2,88	28,80

Caratteristica	Normativa	Valore	Unità di misura
Conducibilità termica	EN 13165	0.022	W/(m·K)
Resistenza alla compressione con deformazione del 10%	EN 826	≥ 150	kPa
Resistenza a trazione perpendicolare alle facce		≥ 80	kPa
Stabilità dimensionale 48h, 70°C, 90%RH		DS(70,90)3: ΔEI,b ≤ 2 / ΔEd ≤ 6	
Stabilità dimensionale 48h, -20°C		DS(-20,-)1: ΔEI,b ≤ 1 / ΔEd ≤ 2	
Classe di reazione al fuoco	EN 13501-1	F	-
Resistenza alla diffusione del vapore acqueo μ		50-100	-
Deformazione sotto l'azione di compressione e temperatura		DLT(2) ≤ 5%	
Assorbimento d'acqua a lungo termine	EN 13165	< 2 %	
Calore Specifico		1400 J/(kg.K)	
Densità		32 ±10%	kg/m ³

SCHEMA TECNICA / ISOCAP8

Caratteristiche	Unità di misura	Codifica secondo EN 13165	Valore/ livello	Norma di prova
CARATTERISTICHE TERMOIGROMETRICHE				
Conducibilità termica dichiarata (alla T media di 10°C)				
Spessore da 20 a 70 mm	W/mK	λ_D	0,028	EN 12667
Spessore da 80 a 100 mm	W/mK	λ_D	0,026	
Spessore da 120 a 160 mm	W/mK	λ_D	0,025	
Resistenza termica dichiarata				
Spessore 20 mm	m ² K/W	R _D	0,70	EN 12667
Spessore 30 mm	m ² K/W	R _D	1,05	
Spessore 40 mm	m ² K/W	R _D	1,40	
Spessore 50 mm	m ² K/W	R _D	1,75	
Spessore 60 mm	m ² K/W	R _D	2,10	
Spessore 70 mm	m ² K/W	R _D	2,50	
Spessore 80 mm	m ² K/W	R _D	3,05	
Spessore 90 mm	m ² K/W	R _D	3,45	
Spessore 100 mm	m ² K/W	R _D	3,80	
Spessore 120 mm	m ² K/W	R _D	4,80	
Spessore 140 mm	m ² K/W	R _D	5,60	
Spessore 160 mm	m ² K/W	R _D	6,40	
Assorbimento d'acqua per immersione totale a 28 gg				
Spessore < 50 mm	Vol.%	WL(T)2	≤ 2	EN 12087
Spessore ≥ 50 mm	Vol.%	WL(T)1,6	≤ 1,6	
Assorbimento d'acqua per immersione parziale				
	Kg/m ²	WS(P)0,09	≤ 0,09	EN 1609
Planarità dopo bagnatura da una faccia				
	mm	FW2	≤ 10	EN 825
Resistenza alla diffusione del vapore				
	m ² ·h·Pa/mg	Z	1,88 - 9	EN 12086
Valore per spessore 80 mm		μ	43	
CARATTERISTICHE MECCANICHE				
Resistenza a compressione (al 10% di deformazione)				
	kPa	CS(10/Y)150	≥ 150	EN 826
Modulo elastico a compressione				
	kPa	E	6500 ± 1000	
Resistenza a compressione (al 2% di deformazione)				
	Kg/m ²	CS(2/Y)5000	≥ 5000	EN 1606
Resistenza a compressione a 50 anni (deformazione ≤ 2%)				
	kPa	CC(2/1,5/50)	50	
Resistenza a trazione perpendicolare alle facce				
	kPa	TR80	≥ 80	EN 1607
Modulo di taglio				
	N/mm ²	G	> 1,8	EN 12089
CARATTERISTICHE FISICHE				
Tolleranza sullo spessore				
Spessore < 50 mm	mm	T2	± 2	EN 823
50 mm ≤ Spessore ≤ 70 mm	mm	T2	± 3	
Spessore ≥ 80 mm	mm	T2	-2; +5	
Tolleranza su larghezza e lunghezza (L)				
L < 1000 mm	mm		± 5	EN 822
1000 mm ≤ L ≤ 2000 mm	mm		± 7,5	
2000 mm ≤ L ≤ 4000 mm	mm		± 10	
L > 4000 mm	mm		± 15	
Scostamento dalla planarità				
	mm	S _{max}	≤ 5	EN 825
Scostamento ortogonale				
	mm/m	S _b	≤ 5	EN 824
Reazione al fuoco				
		E	E	EN 13501-1

Continua a pag.3 →

- RESINA FENOLICA



webertherm PF022

Pannelli in schiuma di resina fenolica espansa

- Eccellente potere isolante
- Ottimo comportamento al fuoco
- Basse emissioni di VOC
- Conforme al CAM

CAMPI DI IMPIEGO

Pannello costituito da schiuma fenolica a cellule chiuse, espansa senza CFC e HCFC, rivestito su entrambi i lati da uno strato di velo vetro saturato, viene impiegato come componente del sistema **webertherm plus ultra 022**, viene utilizzato per la posa di sistemi a cappotto sia nelle nuove costruzioni che nelle ristrutturazioni, ove si voglia contenere al massimo lo spessore dell'isolamento:

- Passaggi pedonali e carrabili, vari scala, e balconi
- Piani pilotis e porticati
- Gronde e davanzali poco sporgenti
- Spallette dei serramenti

È inoltre indicato per altre applicazioni, quali: isolamento di coperture piane sotto manti sintetici a vista o appesantiti e sotto manti bituminosi applicati a freddo; isolamento di coperture a falde; isolamento di pavimenti (isolamento del solaio contro terra, isolamenti di pavimento con riscaldamento radiante, isolamento di pavimenti industriali e celle frigorifere). Pannello conforme al **decreto CAM**.

CARATTERISTICHE DI PRODOTTO

Confezioni:	lastre da 0,72 mq e in 1,44 mq (spessori 20 e 30 mm) in pacchi
Colori:	rosa
Dimensioni:	600x1200 mm e 1200x1200 (per spessori 20 e 30 mm)
Spessore pannello:	from 20 to 160 mm
Stoccaggio:	stoccare al riparo da raggi UV e pioggia

DATI TECNICI*

Resistenza a compressione:	CS(10) ≥ 150 kPa (EN 826)
Resistenza a flessione:	BS ≥ 250 kPa (EN 12080)
Reazione al fuoco:	EUROCLASSE B-s1,d0
Coefficiente di resistenza al passaggio di vapore:	μ = 40 (EN 12086)
Stabilità dimensionale:	D5(n) 2 ± 1,5% (EN 1604)
Densità:	~ 35 kg/mc
Calore specifico:	1750 J/kgK
Conduktività termica:	(λ ₂₅) W/mK spessore 20 - 70 : 0,021 (λ ₂₅) W/mK spessore 80 - 160 : 0,019
Tolleranza:	Sulla planarità (EN 13166): sp < 50 ± 0,10 mm sp 50 + 100 ± 0,75 mm sp > 100 ± 0,5 mm 1,5% su larghezza, lunghezza e spessore (EN 1603)
Resistenza alla trazione perpendicolare alle facce:	TR ≥ 80 kPa (EN 1607)

* Questi valori derivano da prove di laboratorio in ambiente condizionato e potrebbero risultare sensibilmente modificati dalle condizioni di messa in opera.

FASCICOLO TECNICO DI PRODOTTO	DATA EMISSIONE	REVISIONE	CODICE SCHEDA
PANNELLI SCHIUMA FENOLICA	01/11/2021	3	RF.P.RFVV.0
Tutti la documentazione tecnica ISOLMEC, ha validità solamente se supportata da Documento di Trasporto e accompagnata con dichiarazione di conformità rilasciata dalla stessa.			

Denominazione commerciale:

PANNELLO RESINA FENOLICA PANN. ISO FEN ISOLMEC – VIT VV

Codice prodotto: individuabile a seconda del sito produttivo

CARATTERISTICHE:

Pannelli rigidi in resina fenolica espansa a cellule chiuse, senza l'impiego di CFC e HCFC rivestiti su due facce con velo vetro saturato. Risponde ai Criteri Ambientali Minimi (CAM) e quindi idoneo per impiego Superbonus 110%.

DIMENSIONI STANDARD:

Larghezza: mm. 600

Lunghezza: mm. 1200

(per dimensioni diverse interpellare il nostro ufficio commerciale)

Spessore: mm. 30/40/50/60/70/80/90/100/120/130/140/150/160

Densità: 35 Kgmc (+/- 1.5 Kgmc³)

Rivestimento: Velo vetro saturato su due facce

Tolleranze spessore:

mm 30/40	mm 50/60/70/80/90/100	mm 120/130/140/150/160
mm -2/+2	mm -2/+3	mm -2/+5

CAMPI D'IMPIEGO:

Isolamento di coperture piane sotto manti sintetici a vista o appesantiti e sotto manti bituminosi applicati a freddo. Isolamento di coperture a falde. Isolamento di pareti e/o pavimenti, applicazione rivestimento a cappotto. Facciate ventilate.

TEMPERATURA LIMITE D'IMPIEGO: + 120 °C / - 50 °C in continuo.

CALORE SPECIFICO: 1750 J/kg K

RESISTENZA AL VAPORE ACQUEO: pannello nudo μ 30

riv. con velo vetro saturato μ 40

RESISTENZA ALLA COMPRESSIONE: > 150 kPa EN 826

COMPORTAMENTO AL FUOCO: Euroclasse B-s1 d0

ASSORBIMENTO ACQUA PER IMMERSIONE: =< 1 Kg/m² EN 1609

PRESTAZIONI TERMICHE: (EN 13166)

spessore	mm	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	180	
conduttività/lambda	W/mK	0,021											0,019					
Res. Termica	m ² K/W	0,95	1,43	1,90	2,38	2,86	3,33	4,21	4,74	5,26	5,79	6,32	6,84	7,37	7,89	8,42	9,47	

IMBALLO: in polietilene termoretraibile e pallettizzazione

STABILITA' DIMENSIONALE:

spessore: 48h a 70°C |



resina fenolica

tecniche ISOLMEC

AEROPAN

AMA Composites Divisione Edilizia
Via della Resistenza, 60 | 42018 San Martino in Rio | Reggio Emilia - Italy
Tel. +39 - 0522 - 636204 | Fax +39 - 052 - 522502
www.aeropan.it | www.ama.composites.it | Aeropan | @ama_aeropan



Aeropan® è un pannello studiato per l'isolamento termico di quelle strutture edilizie che necessitano del maggior grado di coibentazione nel minor spazio possibile. È composto da un isolante nanotecnologico in Aerogel accoppiato a una membrana traspirante in polipropilene armato con fibra di vetro ed è pensato per la realizzazione di isolamenti termici a basso spessore.

Con uno spessore di 10 mm - e una conducibilità termica pari a 0,015 W/mK - Aeropan® permette di ridurre la dispersione energetica recuperando spazio negli edifici civili, commerciali e residenziali.

Le proprietà del pannello - minima conduttività termica, flessibilità e resistenza alla compressione, idrofobicità e facilità di posa - ne fanno un prodotto indispensabile per garantire il massimo isolamento termico sia nelle strutture nuove che da riqualificare.

È il prodotto ideale per applicazioni su pareti perimetrali esterne e pareti interne, intradossi, imbotti delle finestre, solai e per la risoluzione dei ponti termici. Aeropan® si pone quale scelta ottimale per le ristrutturazioni esterne e interne, nonché nel recupero edilizio e negli edifici storici sottoposti a vincoli architettonici che abbiano bisogno del massimo comfort abitativo.

LE PRESTAZIONI

Aeropan® è un pannello isolante semi-rigido formato da fibre rinforzate ad alta densità, completamente saturate di Aerogel nanoporoso a bassissima conducibilità termica e una finitura in PP armato con fibra di vetro.

In soli 10 mm di spessore il pannello è in grado di offrire un isolamento termico da -50°C a +450°C.

Queste caratteristiche rendono Aeropan® estremamente adatto all'utilizzo nelle più svariate condizioni ambientali, senza che queste possano alterare le prestazioni e la durabilità nel tempo.

Il pannello deve essere posato con la scritta Aeropan® rivolta verso il lato esterno che riceverà la rasatura di finitura.

CAPITOLATO PER CAPPOTTO ESTERNO/INTERNO

Realizzazione di isolamento termico del tipo a cappotto esterno/interno, per superfici verticali ed orizzontali, quali aggetti di balconi o simili, costituito da un pannello semirigido, formato da uno strato di Aerogel di silice rinforzata con fibre di vetro parzialmente riciclata (feltro) accoppiati ad una membrana traspirante in polipropilene armato con fibra di vetro, del tipo Aeropan®, idrorepellente e traspirante, fornito in pannelli da mm 1400x720, per uno spessore nominale di mm 10 (o in pannelli aventi spessore di 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm) con densità volumetrica pari a 230 kg/m³, conducibilità termica pari a 0,015 W/mK, resistenza termica Rd pari a 0,67 m²K/W a cm di spessore, temperatura di impiego compresa fra -50°C / +450°C, permeabile alla diffusione del vapore (μ 7), impermeabile all'acqua di superficie e/o di immersione con angolo di contatto all'acqua non inferiore a 150°, steso su superfici piane o curve, verticali o orizzontali, previo incollaggio, posato assicurandosi che il fondo sia liscio, asciutto, non polveroso, perfettamente integro e privo di asperità acuminata.



APPLICAZIONI



DATI TECNICI	VALORI	UNITÀ	METODO DI PROVA
Formato pannello	1400x720	mm	
Spessori	6/10/20/30/40/50/60	mm	
Conducibilità termica (λ) a 10 °C	0,015	W/mk	EN12667
Conducibilità termica (λ 90/90)	0,016	W/mk	EN13162
Permeabilità al vapore acqueo	0,07	m	EN12086
Temperature limite di impegno	-50 +450	°C	
Resistenza alla compressione (per una deformazione del 10%)	80	KPa	EN826
Calore specifico	1.000	J/kgK	ASTM E 1269
Densità nominale	230 ± 10%	kg/m ³	
Classe di reazione al fuoco*	BS, D _s		EN 13501-1
Assorbimento di acqua a lungo termine per immersione parziale	Wp ≤ 0,01	kg/m ²	EN 1609
Colore	bianco		

RESISTENZA TERMICA

Spessore	6	10	20	30	40
R (m ² k/W)	0,40	0,67	1,34	2,01	2,68

PIANTA ZONE TERZO PIANO



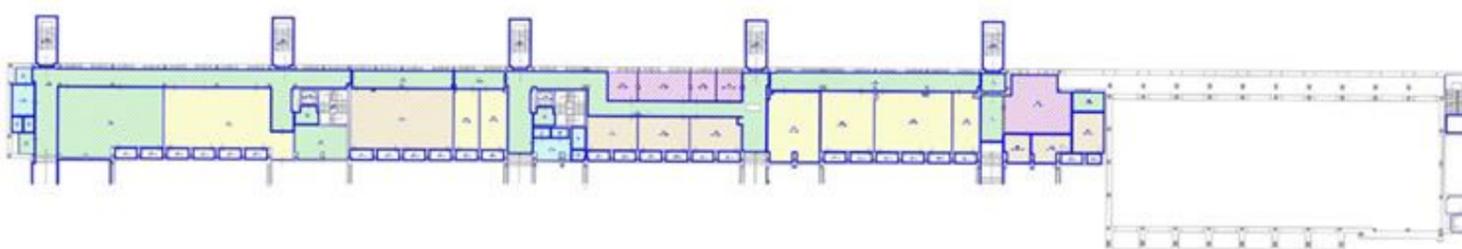
ZONA UFFICI NORD P3 ZONA LABORATORI EST P3 ZONA COMUNI P3 ZONA SERVIZI P3 ZONA UFFICI OVEST P3 ZONA UFFICI EST P3

PIANTA ZONE SECONDO PIANO



ZONA UFFICI NORD P2 ZONA LABORATORI EST P2 ZONA COMUNI P2 ZONA SERVIZI P2 ZONA UFFICI OVEST P2 ZONA UFFICI EST P2

PIANTA ZONE PRIMO PIANO



ZONA LABORATORI EST P1 ZONA COMUNI P1 ZONA SERVIZI P1 ZONA UFFICI OVEST P1 ZONA UFFICI EST P1

PIANTA ZONE PIANO TERRA



ZONA LABORATORI OVEST PT ZONA LABORATORI EST PT ZONA COMUNI PT ZONA SERVIZI PT ZONA UFFICI OVEST PT ZONA UFFICI EST PT

PIANTA ZONE PIANO INTERRATO



ZONA LABORATORI OVEST ST ZONA LABORATORI EST ST ZONA COMUNI ST ZONA SERVIZI ST