

POLITECNICO DI TORINO



**FACOLTÀ DI ARCHITETTURA**

Corso di Laurea Magistrale in Architettura per il Progetto Sostenibile  
A.A 2019-2020

*Tesi di Laurea Magistrale*

**Retrofit energetico di edifici residenziali con intonaci di ultima generazione**  
Potenzialità di riduzione della domanda energetica tramite applicazione su larga scala

**Candidato**

*Ulderico Marco Trocino s250893*

**Relatrice**

*Prof.ssa Valentina Serra*

**Correlatori**

*Arch. Stefano Fantucci*

*Dott.ssa Elisa Fenoglio*

*Prof. Alfonso Capozzoli*

Febbraio 2020

Retrofit energetico di edifici residenziali con intonaci di ultima generazione

Potenzialità di riduzione della domanda energetica tramite applicazione su larga scala

*di Ulderico Marco Trocino*







*“considerate la vostra semenza:  
fatti non foste a viver come bruti,  
ma per seguir virtute e canoscenza”*

Inferno - Canto XXVI, Dante Alighieri



## Indice

|                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Indice.....                                                                           | I   |
| Indice delle figure.....                                                              | III |
| Indice delle tabelle.....                                                             | V   |
| Abstract.....                                                                         | 1   |
| Abstract (English version) .....                                                      | 2   |
| 1 Introduzione.....                                                                   | 3   |
| 2 Stato dell'arte.....                                                                | 5   |
| 2.1 Il patrimonio edilizio Italiano .....                                             | 5   |
| 2.1.1 L'involucro e il suo isolamento.....                                            | 7   |
| 2.2 L'intonaco.....                                                                   | 10  |
| 2.2.1 Composizione .....                                                              | 12  |
| 2.2.2 I leganti.....                                                                  | 12  |
| 2.2.3 Gli aggregati .....                                                             | 13  |
| 2.2.4 Gli additivi .....                                                              | 13  |
| 2.3 Nuove soluzioni di retrofitting energetico .....                                  | 15  |
| 2.3.1 I termointonaci.....                                                            | 15  |
| 2.3.2 LWA: gli aggregati leggeri.....                                                 | 16  |
| 2.4 Analisi di Mercato .....                                                          | 40  |
| 2.5 Commento finale allo stato dell'arte sui termointonaci.....                       | 45  |
| 3 Analisi sull'applicazione dei prodotti a base aerogel .....                         | 46  |
| 3.1 Analisi del patrimonio edilizio .....                                             | 46  |
| 3.1.1 Criteri della selezione.....                                                    | 46  |
| 3.1.2 I casi studio scelti .....                                                      | 47  |
| 3.1.3 Scenari d'intervento.....                                                       | 49  |
| 3.2 Analisi simulativa.....                                                           | 51  |
| 3.2.1 Metodologia: l'analisi termica in regime dinamico:.....                         | 51  |
| 3.2.2 I Risultati.....                                                                | 58  |
| 3.3 Commento sull'analisi dinamica termica .....                                      | 82  |
| 3.4 Analisi del Pay Back Period (PBP).....                                            | 84  |
| 3.5 Valutazione dell'impatto delle strategie di retrofit sul parco edilizio Atc ..... | 88  |
| 4 Comparazione tra l'analisi simulativa termica e igrotermica dinamica.....           | 90  |
| 4.1 Metodologia.....                                                                  | 90  |
| 4.1.1 WUFI®Plus 3.2.0.1 .....                                                         | 90  |



|       |                                                                                                               |     |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2   | I Risultati.....                                                                                              | 100 |
| 4.2.1 | Stato di fatto.....                                                                                           | 100 |
| 4.2.2 | Scenario con TI_INT 6 cm .....                                                                                | 101 |
| 4.3   | Commento sulle analisi termoigrometriche effettuate .....                                                     | 103 |
| 4.4   | Pay Back Period (PBP) effettuato sui risultati dell'analisi termoigrometrica .....                            | 105 |
| 5     | Conclusioni .....                                                                                             | 106 |
|       | Ringraziamenti.....                                                                                           | 109 |
|       | Bibliografia e Sitografia .....                                                                               | 111 |
|       | Appendice 1: Tabella dei termointonaci a base di LWA presenti nella letteratura scientifica del settore ..... | 131 |
|       | Appendice 2: Tabella dei termointonaci e delle termorasature presenti sul mercato (indagine on-line) .....    | 141 |

## Indice delle figure

|                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Edifici residenziali anno per anno di costruzione - censimento Istat 2011 .....                                                                                         | 5  |
| Figura 2: Impieghi finali di energia per settore (Mtep), anni 1990-2016 (fonte RAEE 2018-<br>rielaborazione grafica) .....                                                        | 6  |
| Figura 3: Consumo energetico nel residenziale (tep/appartamento), anni 2000-2016 (fonte:<br>RAEE 2018 – rielaborazione grafica) .....                                             | 6  |
| Figura 4: Tecnologie più usate per le ristrutturazioni di strutture opache verticali (fonte:<br>rapporto ANIT 2013 – rielaborazione grafica) .....                                | 7  |
| Figura 5: Distribuzione percentuale del mercato degli isolanti stimata nel 2005 (fonte: rapporto<br>ANIT 2013 – rielaborazione grafica) .....                                     | 8  |
| Figura 6: strati che compongono l'intonaco (rielaborazione grafica) .....                                                                                                         | 10 |
| Figura 7: conducibilità delle malte con LWA artificiali trovate .....                                                                                                             | 20 |
| Figura 8: conducibilità delle malte con LWA minerali trovate .....                                                                                                                | 23 |
| Figura 9: conducibilità delle malte con LWA vegetali trovate .....                                                                                                                | 26 |
| Figura 10: conducibilità delle malte con PCM trovate .....                                                                                                                        | 28 |
| Figura 11: Invecchiamento ad alte temperature pannelli(a), intonaci(b); Invecchiamento ai cicli<br>climatici pannelli(c), intonaci(d) (fonte: [71]- rielaborazione grafica) ..... | 37 |
| Figura 12: conducibilità delle malte con aerogel trovate .....                                                                                                                    | 38 |
| Figura 13: confronto tra le conducibilità delle malte con i vari LWA .....                                                                                                        | 39 |
| Figura 14: mercato Europeo degli isolanti (2014)- (fonte: [111]– rielaborazione grafica) .....                                                                                    | 40 |
| Figura 15: previsioni di crescita per il mercato Europeo per il 2020 e il 2025 (fonte: [111] -<br>rielaborazione grafica) .....                                                   | 41 |
| Figura 16: Suddivisione degli intonaci isolanti in base alla natura dell'aggregato leggero<br>utilizzato (dato aggiornato rispetto al riferimento [113]) .....                    | 42 |
| Figura 17: Conducibilità dei termointonaci in commercio (dato aggiornato rispetto al<br>riferimento [113]) .....                                                                  | 44 |
| Figura 18: Conducibilità delle termorasature in commercio (dato aggiornato rispetto al<br>riferimento [113]) .....                                                                | 44 |
| Figura 19: Intervalli temporali scelti e interventi di retrofit previsti in ottemperanza alle norme<br>.....                                                                      | 47 |
| Figura 20: edifici costruiti nei 3 archi temporali e tipologie più diffuse .....                                                                                                  | 48 |
| Figura 21: logo di Design Builder e Energy Plus .....                                                                                                                             | 51 |
| Figura 22: interfaccia di Design Builder con un edificio modellato .....                                                                                                          | 51 |
| Figura 23: interpolazione lineare delle resistenze $R[m^2K/W]$ ottenute da precedenti analisi<br>[216] .....                                                                      | 53 |
| Figura 24: viste del modello a) lato interno, b) lato strada – CASO A .....                                                                                                       | 58 |
| Figura 25: Fabbisogno energetico diviso per i mesi dell'anno – CASO A .....                                                                                                       | 59 |
| Figura 26: Flussi istantanei dello stato di fatto- CASO A .....                                                                                                                   | 60 |
| Figura 27: bilancio di energia mensile (solo sensibile) – CASO A .....                                                                                                            | 60 |
| Figura 28: percentuale dei flussi dispersi per trasmissione attraverso gli elementi opachi e<br>trasparenti – CASO A .....                                                        | 61 |
| Figura 29: viste del modello a) lato interno, b) lato strada - CASO B .....                                                                                                       | 61 |
| Figura 30: Fabbisogno energetico diviso per i mesi dell'anno – CASO B .....                                                                                                       | 62 |
| Figura 31: Flussi istantanei dello stato di fatto - CASO B .....                                                                                                                  | 63 |
| Figura 32: bilancio di energia mensile (solo sensibile) – CASO B .....                                                                                                            | 63 |

|                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 33: percentuale dei flussi dispersi per trasmissione attraverso gli elementi opachi e trasparenti – CASO B ..... | 64  |
| Figura 34: viste del modello a) lato interno a), b) lato strada - CASO C.....                                           | 64  |
| Figura 35: Fabbisogno energetico diviso per i mesi dell'anno – CASO C .....                                             | 65  |
| Figura 36: Flussi istantanei dello stato di fatto - CASO C .....                                                        | 66  |
| Figura 37: bilancio di energia mensile (solo sensibile) – CASO C .....                                                  | 66  |
| Figura 38: percentuale dei flussi dispersi per trasmissione attraverso gli elementi opachi e trasparenti – CASO C ..... | 67  |
| Figura 39: fabbisogno energetico dei 3 casi studio .....                                                                | 67  |
| Figura 40: pianta tipo - schematizzazione interventi di retrofit CASO A.....                                            | 69  |
| Figura 41: domanda energetica nei differenti scenari di retrofit – CASO A.....                                          | 70  |
| Figura 42: Andamento giornaliero della temperatura nello stato di fatto e nello scenario 3 TI_INT 6 - CASO A .....      | 72  |
| Figura 43: confronto tra i flussi istantanei (kW) stato di fatto- scenario 3 TI_INT 6 - CASO A....                      | 73  |
| Figura 44: pianta tipo - schematizzazione interventi di retrofit CASO B .....                                           | 74  |
| Figura 45: domanda energetica nei differenti scenari di retrofit – CASO B.....                                          | 75  |
| Figura 46: pianta tipo - schematizzazione interventi di retrofit CASO C .....                                           | 77  |
| Figura 47: domanda energetica nei differenti scenari di retrofit – CASO C.....                                          | 78  |
| Figura 48: Andamento giornaliero della temperatura nello stato di fatto e nello scenario 5-6 TI_EST 6 cm - CASO C.....  | 80  |
| Figura 49: confronto tra i flussi istantanei (kW) nei diversi scenari – CASO C.....                                     | 81  |
| Figura 50: riduzione del fabbisogno di riscaldamento nei vari casi con intonaco dall'interno ..                         | 82  |
| Figura 51: confronto diminuzione dei fabbisogni .....                                                                   | 83  |
| Figura 52: schema delle aree considerate: a)pianta - b) e c) prospetti.....                                             | 85  |
| Figura 53: tempo di ritorno investimento in funzione dello spessore d'intonaco: a) interno, b) esterno .....            | 87  |
| Figura 54: esempio delle proprietà imputabili attraverso il plug-in di WUFI®Plus in SketchUp 2017.....                  | 92  |
| Figura 55: modello 3D del caso A esportato in WUFI®Plus.....                                                            | 92  |
| Figura 56:grafico sulla radiazione solare(a) e la pioggia battente(b).....                                              | 93  |
| Figura 57: zone termiche simulate con WUFI®Plus.....                                                                    | 94  |
| Figura 58: sottosezioni degli elementi di una zona in WUFI®Plus 3.2.0.1 .....                                           | 95  |
| Figura 59: numero degli occupanti di un piano tipo – Caso A.....                                                        | 98  |
| Figura 60: confronto dati analisi dinamica termica.....                                                                 | 100 |
| Figura 61: analisi dinamica igrotermica vs termica stato di fatto - Caso A .....                                        | 101 |
| Figura 62: analisi dinamica igrotermica vs termica scenario con aerogel TI_INT 6 cm - Caso A .....                      | 102 |
| Figura 63: U.R medie orarie interne delle due analisi igrotermiche dello scenario con aerogel .....                     | 103 |

## Indice delle tabelle

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabella 1: Classificazione delle malte indurite secondo la UNI EN 998-1 .....                                      | 11 |
| Tabella 2: Conduttività dei vari leganti .....                                                                     | 16 |
| Tabella 3: Proprietà fisiche degli intonaci con PCM trovati .....                                                  | 43 |
| Tabella 6: percentuale degli edifici con caratteristiche costruttive assimilabili nei 3 intervalli temporali.....  | 49 |
| Tabella 5: casi studi selezionati e interventi previsti .....                                                      | 49 |
| Tabella 6: Apporti interni sensibili UNI TS 11300-1 .....                                                          | 52 |
| Tabella 7: Rasatura di riferimento [216] .....                                                                     | 52 |
| Tabella 8: trasmittanza termica lineica ottenuta da interpolazione .....                                           | 53 |
| Tabella 9: casi studi selezionati e le principali caratteristiche dello stato di fatto .....                       | 54 |
| Tabella 10: stratigrafie chiusure.....                                                                             | 55 |
| Tabella 11: requisiti per gli edifici soggetti a riqualificazione energetica .....                                 | 56 |
| Tabella 12: requisiti per gli edifici soggetti a riqualificazione energetica maggiorati del 30%... 57              |    |
| Tabella 13: codici dei prodotti isolanti e scenari previsti .....                                                  | 57 |
| Tabella 14: fabbisogno energetico di riscaldamento e raffrescamento - CASO A.....                                  | 59 |
| Tabella 15: fabbisogno energetico di riscaldamento e raffrescamento - CASO B .....                                 | 61 |
| Tabella 16: fabbisogno energetico di riscaldamento e raffrescamento - CASO C .....                                 | 65 |
| Tabella 17: conducibilità dei materiali a base di aerogel .....                                                    | 68 |
| Tabella 18: trasmittanze involucro opaco e partizione dei 3 casi .....                                             | 68 |
| Tabella 19: scenari previsti nel CASO A.....                                                                       | 68 |
| Tabella 20: fabbisogno totale nei vari scenari – CASO A .....                                                      | 69 |
| Tabella 21: fabbisogno di riscaldamento nei vari scenari - CASO A.....                                             | 70 |
| Tabella 22: fabbisogno di raffrescamento nei vari scenari – CASO A .....                                           | 71 |
| Tabella 23: fabbisogno totale nei vari scenari – CASO B.....                                                       | 74 |
| Tabella 24: fabbisogno di riscaldamento nei vari scenari - CASO B .....                                            | 75 |
| Tabella 25: fabbisogno di raffrescamento nei vari scenari – CASO B .....                                           | 76 |
| Tabella 26: fabbisogno totale nei vari scenari – CASO C.....                                                       | 77 |
| Tabella 27: fabbisogno di riscaldamento nei vari scenari - CASO C.....                                             | 78 |
| Tabella 28: fabbisogno di raffrescamento nei vari scenari – CASO C .....                                           | 79 |
| Tabella 29: Area di facciata e Area netta interna delle pareti dei casi .....                                      | 85 |
| Tabella 30: tempo di ritorno dell'investimento basato sui dati dell'analisi dinamica termica ... 85                |    |
| Tabella 31: numero edifici per tipologia costruttiva presenti nel parco edilizio Atc di Torino ... 88              |    |
| Tabella 32: percentuale degli edifici con caratteristiche costruttive assimilabili nei 3 intervalli temporali..... | 88 |
| Tabella 33: valutazione del risparmio annuale sulle tipologie assimilabili dell'intero patrimonio Atc .....        | 89 |
| Tabella 34: T.e e U.R di Torino (da database WUFI®Plus 3.2.0.1).....                                               | 93 |
| Tabella 35: Superficie utile delle zone riscaldate - Caso A.....                                                   | 94 |
| Tabella 36: termointonaco interno a base di aerogel TI_INT .....                                                   | 95 |
| Tabella 37: Stratigrafia della parete esterna dello stato di fatto .....                                           | 96 |
| Tabella 38: Stratigrafia della parete interna dello stato di fatto .....                                           | 96 |
| Tabella 39: Stratigrafia della parete esterna con TI_INT 6 cm.....                                                 | 96 |
| Tabella 40: Stratigrafia della parete interna con TI_INT 6 cm .....                                                | 97 |

|                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabella 41: carichi sensibili e latenti costanti per zona imputati in WUFI®Plus per l'analisi numerica.....                                              | 97  |
| Tabella 42: schedule potenze termiche sensibili e portate di vapore emesse dal corpo umano (dal database di WUFI®Plus) .....                             | 98  |
| Tabella 43: Dati analisi termica dinamica DesignBuilder vs WufiPlus.....                                                                                 | 100 |
| Tabella 44: Dati analisi termica dinamica DesignBuilder vs igrotermica WufiPlus- stato di fatto .....                                                    | 101 |
| Tabella 45: Dati analisi termica dinamica DesignBuilder vs igrotermica WufiPlus- TI_INT 6 cm .....                                                       | 102 |
| Tabella 46: U.R interna media annuale analisi igrotermiche dello scenario con aerogel.....                                                               | 103 |
| Tabella 47: tempo di ritorno dell'investimento basato sui dati dell'analisi dinamica igrotermica- con carichi costanti.....                              | 105 |
| Tabella 48: tempo di ritorno dell'investimento basato sui dati dell'analisi dinamica igrotermica- con carichi variabile secondo schedule WUFI®Plus ..... | 105 |
| Tabella 49: malte e calcestruzzi trovati nella letteratura scientifica del settore .....                                                                 | 131 |
| Tabella 50: termointonaci e termorasature sul mercato (dato aggiornato rispetto al riferimento [113]) .....                                              | 141 |

## Abstract

La commissione Europea negli ultimi anni ha posto un'attenzione particolare alla lotta contro i cambiamenti climatici (EU Climate Action), promuovendo politiche ambiziose per raggiungere il suo obiettivo di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra. Tali obiettivi riguardano anche il comparto edilizio. Il settore delle costruzioni rappresenta ad oggi la più grande fonte di emissione di gas serra, ed è necessario operare su di esso per ottenere una drastica riduzione del consumo di energia e quindi, diminuire l'impatto ambientale. Questa riduzione delle emissioni può essere ottenuta attraverso misure atte a migliorare le prestazioni energetiche degli edifici di nuova costruzione, e soprattutto, a ridurre la richiesta energetica dello stock edilizio esistente. Ad oggi, una misura efficace per ridurre la domanda energetica è l'intervento sull'involucro. In alcuni casi risultano esserci però dei limiti inerenti l'applicazione dei tradizionali prodotti isolanti sulle costruzioni esistenti. Negli ultimi anni si stanno sperimentando possibili soluzioni alternative che includono l'utilizzo di prodotti cosiddetti "super-isolanti" in grado di dare una risposta più incisiva alle sempre maggiori richieste di riduzione dei consumi energetici. Una di queste soluzioni è l'uso di termointonaci a base di aerogel.

Il presente lavoro di tesi, ha avuto lo scopo di valutare, attraverso delle simulazioni, la riduzione della domanda energetica conseguente all'applicazione di termointonaci a base di aerogel su una serie di edifici esistenti selezionati all'interno della città di Torino. Le analisi presentate in questa tesi risultano in parte essere il tassello finale di un progetto chiamato **Wall-Ace** (Novel Wall Insulation System) finanziato dall'Unione Europea nell'ambito dell'Horizon 2020. Il progetto è volto alla ricerca e allo sviluppo di nuovi sistemi di isolamento a base di aerogel e ha visto la collaborazione tra diversi partner a livello europeo, tra cui il Politecnico di Torino e l'Atc (Agenzia territoriale per la casa).

Il lavoro si concentrerà sull'identificazione di 3 edifici sui circa mille di proprietà dell'ente Atc, costruiti nel comune di Torino. Questi immobili sono stati scelti in quanto possiedono caratteristiche costruttive assimilabili alla maggior parte dei fabbricati di edilizia sociale edificati dai primi del Novecento a fine anni 90. I casi studio saranno utilizzati per simulare l'impatto sui consumi energetici globali di tre tipologie di termointonaci a base di aerogel in diversi spessori: due termointonaci (per esterno, l'altro per l'interno) con spessori di 2-4-6 cm, e una termorasatura con spessore di 0.5 cm. Nello specifico, gli edifici in questione saranno oggetto di un'analisi simulativa in regime dinamico termico per valutare la riduzione della domanda energetica conseguente all'applicazione dei suddetti materiali. In seguito, saranno effettuate due analisi economiche semplificate: la prima per avere un'idea sulla differenza del tempo di ritorno dell'investimento iniziale fatto sui tre diversi edifici e nei diversi scenari di retrofit ipotizzati; l'altra, per comprendere il risparmio economico (ed energetico) annuale, derivante dall'applicazione del prodotto su tutte le tipologie assimilabili ai tre standard costruttivi presi in esame. Dopodiché, verrà eseguita, su un solo edificio, un'ulteriore analisi in regime dinamico igro-termico, per confrontare i risultati ottenuti con le simulazioni precedenti. Lo scopo è quello di verificare se un'analisi che tenga conto, non solo del trasporto di calore, ma anche di quello di vapore, porti a risultati differenti in termini di fabbisogno energetico dell'edificio. Il lavoro si concluderà con un'analisi economica semplificata sui risultati della simulazione igrotermica, per verificare se ci siano maggiorazioni del tempo di ritorno dell'investimento rispetto all'analisi effettuata precedentemente.

## Abstract (English version)

In recent years, the European Commission has paid particular attention to the fight against climate change (EU Climate Action), promoting ambitious policies to achieve its goal of reducing greenhouse gas emissions. These objectives also concern the building sector. The construction sector is today the largest source of greenhouse gas emissions, and it is necessary to operate on it to achieve a drastic reduction in energy consumption and thus, decrease the environmental impact. This reduction in emissions can be achieved through measures to improve the energy performance of new buildings, and above all, to reduce the energy demand of the existing building stock. To date, an effective measure to reduce energy demand is intervention on the building envelope. However, in some cases, there are limits to the application of traditional insulating products to existing constructions. In recent years, possible alternative solutions are being explored, including the use of so-called “super-insulating” products that can give a more incisive response to the increasing demands for reducing energy consumption. One of these solutions is the use of aerogel-based thermal insulating plasters.

The aim of this thesis has been to evaluate, through simulations, the reduction of the energy demand resulting from the application of aerogel-based thermal insulating plasters on a series of existing buildings selected within the city of Turin. The analyses presented in this thesis are in part the final piece of a project called Wall-Ace (novel Wall insulation System) funded by the European Union within the framework of Horizon 2020. The project aims at the research and development of new aerogel-based insulation systems and has seen collaboration between several partners at European level, including the Polytechnic of Turin and Atc (Territorial Agency for the Home).

The work will focus on the identification of 3 buildings on about one thousand of the property of the agency Atc, built in Turin. These properties have been chosen because they possess building characteristics comparable to most of the buildings of social housing built from the early twentieth century to the late 90s. The case studies will be used to simulate the impact on the overall energy consumption of three types of aerogel-based thermoplasters in different thicknesses: two thermal insulating plasters (for outdoor, the other for the interior) with thickness of 2-4-6 cm; and a coating-finishing with thickness of 0.5 cm. Specifically, the buildings in question will be subjected to a simulated dynamic thermal analysis to assess the reduction in energy demand resulting from the application of these materials. Then, two simplified economic analyses will be carried out. The first to get an idea on the difference in the return time of the initial investment made on the three different buildings and in the different scenarios of retrofit hypothesized; the other, to understand the economic saving (and energy) annual, resulting from the application of the product on all types comparable to the three construction standards considered. After that, a further dynamic hygrothermal analysis will be performed on a single building to compare the results obtained with the previous simulations. The aim is to verify whether an analysis, which takes into account not only the transport of heat, but also the transport of vapor, leads to different results in terms of the building's energy requirements. The work will conclude with a simplified economic analysis on the results of the hygienic simulation, to verify if there are increases in the return time of the investment compared to the analysis carried out previously.

# 1 Introduzione

Secondo il Climate Action della Commissione Europea [1] alcuni degli obiettivi chiave per l'Unione entro il 2030 saranno:

- ☒ la riduzione delle emissioni dei gas ad effetto serra almeno del 40% (rispetto al 1990)
- ☒ un aumento dell'uso di fonti rinnovabili almeno del 32%

Oltre il 40% delle emissioni di CO<sub>2</sub> del Vecchio Continente è prodotto dagli edifici adibiti ad uso residenziale e commerciale, seguito dal settore dei trasporti con il 32% e quello dell'industria con il 28% [2]. Ciò significa che il settore edilizio rappresenta la più grande fonte di emissioni di gas serra. Quindi è necessario attuare degli interventi che siano mirati soprattutto sugli edifici esistenti, per ottenere una drastica riduzione del consumo di energia, diminuire l'impatto ambientale e ottenere un risparmio economico. Il metodo ad oggi più diffuso per diminuire la domanda energetica di un edificio esistente è l'intervento sull'involucro. Semplici strategie sul patrimonio costruito, come ad esempio, isolare il tetto e le chiusure verticali degli edifici, che rappresentano la maggior parte delle dispersioni dopo le componenti trasparenti, in Europa potrebbero portare a:

- ☒ una riduzione delle emissioni di 460 milioni di tonnellate all'anno
- ☒ ridurre il consumo di energia di 3,3 milioni di barili di petrolio al giorno
- ☒ risparmiare in Europa 270 miliardi di euro all'anno in costi energetici [2]

Oggi, la ricerca si sta muovendo verso la sperimentazione di prodotti innovativi che impiegano l'uso di materiali "super-isolanti", capaci di rispondere in maniera più incisiva (sulle nuove costruzioni, ma soprattutto su quelle esistenti) alle sempre maggiori richieste sulla riduzione dei consumi. Tra questi, come si vedrà dalle ricerche fatte nella letteratura scientifica, negli ultimi anni stanno avendo un ampio sviluppo, gli intonaci isolanti. Questi, hanno la caratteristica di avere ottime qualità di resistenza termica legate ad una facile applicazione. Per cui, riescono a ridurre la trasmissione di calore, con il vantaggio di avere una stesura affine a quella dei tradizionali intonaci. Ciò li rende un'ottima alternativa ai tradizionali pannelli isolanti, in quanto, a differenza loro, sono avulsi da alcuni problemi di posa in cui si incorre soprattutto quando si deve intervenire sul patrimonio costruito (pareti fuori piombo, non allineate).

La presente tesi, ha avuto come oggetto particolari termointonaci a base di aerogel, un materiale considerato "super-isolante" per le sue prestazioni termiche migliori ( $\lambda=0.013-0.015$  W/mK) rispetto agli isolanti presenti oggi sul mercato edilizio. Lo scopo è stato quello di valutare, attraverso delle simulazioni, la riduzione della domanda energetica conseguente l'applicazione di questo speciale intonaco su una serie di edifici esistenti situati nella città di Torino. Il lavoro svolto, risulta in parte essere il tassello finale del progetto Wall-Ace, finanziato dall'Unione Europea nell'ambito dell'Horizon 2020. Il programma, concluso nel settembre del 2019, ha avuto come scopo la ricerca e lo sviluppo di 5 nuovi sistemi isolanti a base di aerogel. Questi prodotti altamente isolanti, sono integrativi per la nuova costruzione, ma anche e soprattutto per la riqualificazione energetica del costruito [8]. Il loro sviluppo è stato possibile grazie alla collaborazione tra diversi partner a livello europeo, tra cui il Politecnico di Torino e l'Atc (Agenzia territoriale per la casa). Qui il lavoro si concentrerà su tre di questi materiali a base di aerogel: **due**



**intonaci isolanti**, uno per interno e l'altro per esterno con spessori di 2-4-6 cm, e **una rasatura** da applicare in interno nello spessore di 0.5 cm. Le simulazioni energetiche dei differenti scenari di retrofit, saranno effettuate in un regime dinamico termico su 3 edifici individuati tra circa mille di proprietà dell'ente Atc, costruiti nel comune di Torino. L'obiettivo è quello di valutare l'impatto che queste diverse soluzioni di retrofit a base aerogel hanno sui consumi globali dell'edificio. In seguito, saranno effettuate due analisi economiche semplificate: la prima per avere un'idea sulla differenza del tempo di ritorno dell'investimento iniziale fatto sui tre diversi edifici e nei diversi scenari di retrofit ipotizzati; l'altra, per comprendere il risparmio economico (ed energetico) annuale, derivante dall'applicazione del prodotto su tutte le tipologie assimilabili ai tre standard costruttivi presi in esame.

Dopodiché, sarà eseguita, su un solo edificio, un'ulteriore analisi in regime dinamico igro-termico, per confrontare i risultati ottenuti con le simulazioni precedenti. Lo scopo è quello di verificare se un'analisi che tenga conto, non solo del trasporto di calore, ma anche di quello di vapore, porti a risultati differenti in termini di fabbisogno energetico dell'edificio. Il lavoro si concluderà con un'analisi economica semplificata sui risultati della simulazione igrotermica. Lo scopo è quello di verificare l'esistenza di eventuali maggiorazioni del tempo di ritorno dell'investimento rispetto all'analisi effettuata precedentemente.

Nelle seguenti pagine verranno mostrate le varie fasi in cui è stato articolato il lavoro e che hanno permesso il raggiungimento degli obiettivi prefissati, in particolare:

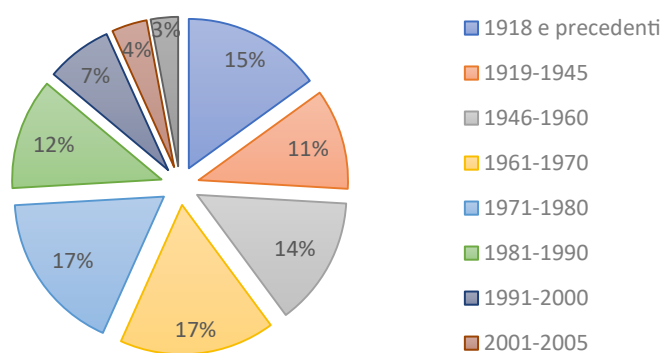
- ☒ Analisi dello stato dell'arte sui termointonaci
- ☒ Individuazione dei casi studio
- ☒ Analisi degli scenari di intervento
- ☒ La simulazione termica in regime dinamico
- ☒ Analisi termo-economica (Pay Back Period) semplificata sui dati dell'analisi termica dinamica
- ☒ Valutazione dell'impatto delle strategie di retrofit sui consumi globali del parco edilizio Atc
- ☒ Analisi termo-igrometrica in regime dinamico
- ☒ Confronto tra i risultati dell'analisi termica e igrotermica
- ☒ Analisi termo-economica (Pay Back Period) semplificata sui dati dell'analisi igrotermica dinamica

## 2 Stato dell'arte

### 2.1 Il patrimonio edilizio italiano

L'Italia è densamente edificata, secondo il 15° censimento Istat della popolazione e delle abitazioni condotto nel 2011, gli edifici ad uso residenziale del paese sono 12.187.698 e oltre 31 milioni di abitazioni [3]. Il 15% degli edifici (Figura 1) è stato costruito prima del 1918 e circa il 60% è stato costruito precedentemente alla prima legge che introduceva criteri per il risparmio energetico (L.373/1976). Solo il 7% del totale è stato edificato tra gli anni che vanno dal 2001 al 2011 e che quindi dovrebbero ottemperare alle normative per l'efficientamento energetico [4].

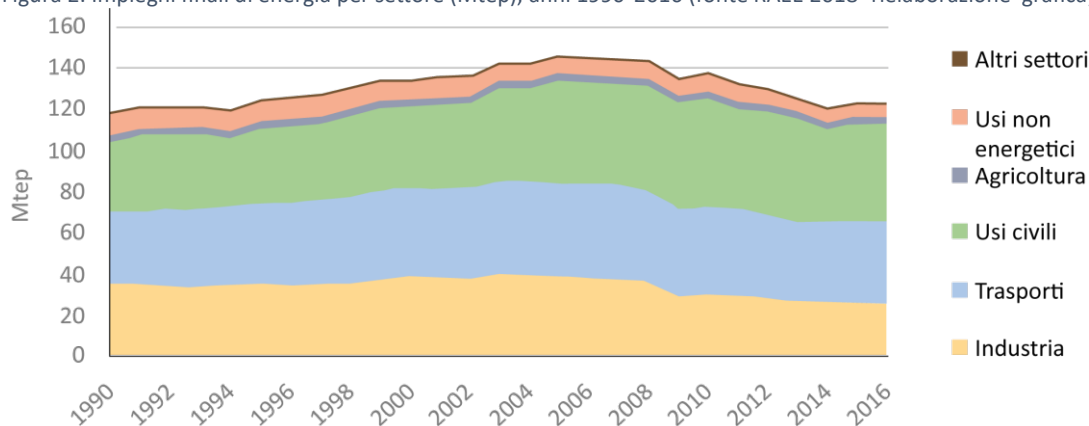
Figura 1: Edifici residenziali anno per anno di costruzione - censimento Istat 2011



Per capire quanto sia importante agire sul settore civile attraverso misure volte al risparmio energetico, basta notare come l'andamento dei consumi energetici settoriali nel periodo 1990-2016 ha modificato la sua distribuzione (Figura 2), il settore civile (di cui fa parte il settore residenziale e non residenziale) nel 2016 assorbe quasi il 40% (contro l'assorbimento del 29% del 1990) degli impieghi finali di energia con un consumo pari a 48,2 Mtep<sup>1</sup> (32,2 Mtep residenziale e 16 Mtep non residenziale) seguito dal settore dei trasporti, con una quota del 32% (39,1 Mtep) e dal settore dell'industria al 21% nel 2016 (pari a 25,6 Mtep) [5].

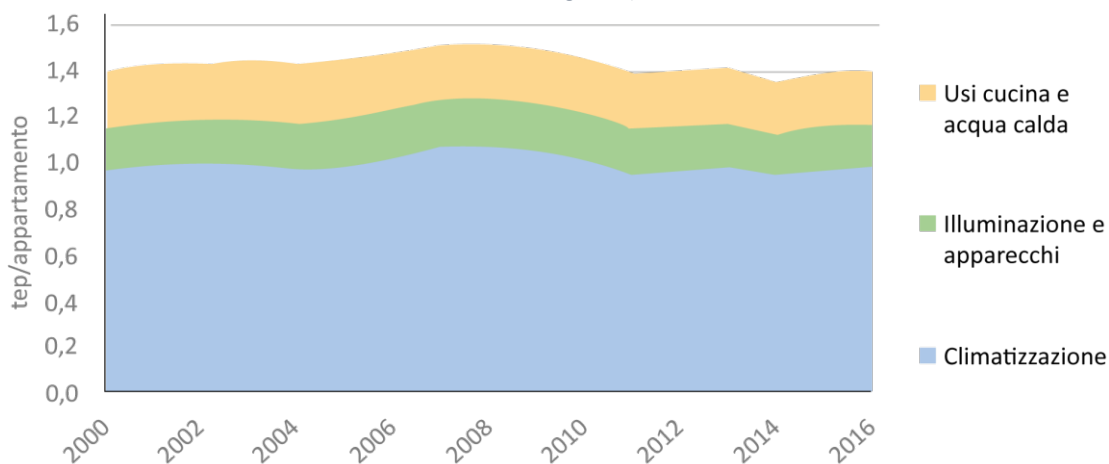
<sup>1</sup> Tonnellata equivalente di petrolio (tep): rappresenta la quantità di energia rilasciata convenzionalmente dalla combustione di una tonnellata di petrolio grezzo e vale circa 42 GJ (circa 11667 kWh). Il Mtep (Megatep) corrisponde a 1 milione di tep.

Figura 2: Impieghi finali di energia per settore (Mtep), anni 1990-2016 (fonte RAEE 2018- rielaborazione grafica)



Il consumo energetico per la climatizzazione (riscaldamento e raffrescamento) assorbe circa il 70% (Figura 3) dei consumi finali del settore residenziale.

Figura 3: Consumo energetico nel residenziale (tep/appartamento), anni 2000-2016 (fonte: RAEE 2018 – rielaborazione grafica)



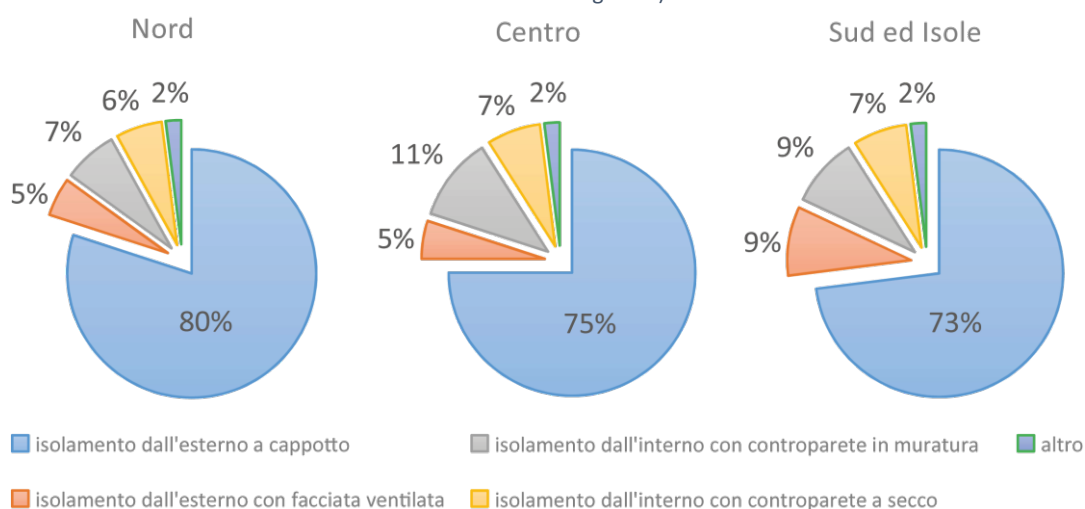
Per dare un freno alle emissioni quindi, non si può fare a meno di agire sul settore edilizio, la commissione Europea negli ultimi anni ha posto un'attenzione particolare al comparto edilizio promuovendo misure sempre più stringenti come ha dimostrato la direttiva 2002/91/CE "Rendimento Energetico nell'Edilizia" (EPBD Energy Performance Buildings Directive), successivamente aggiornata con la direttiva 2010/31/CE (EPBD2) che l'Italia ha recepito con i nuovi decreti Dlgs 192/05, il Decreto Legge 63/13 (convertito dalla Legge 90/13) e il Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015, entrati in vigore dal primo ottobre 2015 [6]. Il rispetto di tali normative richiede un'attenta analisi del sistema edificio-impianto e la definizione un progetto di riqualificazione energetica sul patrimonio esistente.

Una soluzione efficiente per riqualificare il costruito ad oggi è l'intervento sull'involucro. Infatti, come anticipato, esso risulta uno degli elementi maggiormente coinvolti nelle dispersioni e, di conseguenza, nell'incremento del fabbisogno energetico degli edifici.

### 2.1.1 L'involucro e il suo isolamento

L'involucro edilizio è formato da parti opache verticali, opache orizzontali e trasparenti; essi insieme costituiscono la pelle dell'edificio attraverso la quale passano i flussi energetici scambiati con l'ambiente esterno (34% delle dispersioni per quelle trasparenti, il 21% per le opache verticali, 12% per le parti opache orizzontali di copertura e 11% per le parti opache controterra) [7]. Sull'involucro è possibile intervenire attraverso soluzioni volte ad assicurare il giusto confort termico interno riducendo al contempo il consumo di energia. La più importante di queste soluzioni è l'**isolamento termico**. Questa soluzione viene attuata attraverso l'impiego di un isolante, ovvero un materiale che può presentarsi in forma di aggregato sfuso, di feltri, pannelli semirigidi o rigidi [7]. Le configurazioni dipendono prevalentemente dalla posizione dell'isolante rispetto alle chiusure. Da un'analisi sul mercato dei materiali isolanti fatta nel 2014 si evince come nelle **nuove costruzioni** del Nord Italia la configurazione predominante sia quella dove l'**isolante è posto all'esterno** (50%), ovvero la configurazione detta a "**cappotto**", a differenza del centro e del sud dove la configurazione predominante nelle nuove costruzioni è quella con l'isolante nell'intercapedine di una doppia parete (54% al centro e 51% al sud e nelle isole). Mentre nelle **ristrutturazioni** (Figura 4) sia al Nord che al Sud Italia l'**isolamento esterno** con cappotto risulta essere la configurazione prediletta nel caso di strutture opache verticali (80% delle ristrutturazioni al Nord, 75% al Centro e 73% al Sud), seguita dall'isolamento interno (13% al Nord, 18% al Centro e 16% al Sud) [7].

Figura 4: Tecnologie più usate per le ristrutturazioni di strutture opache verticali (fonte: rapporto ANIT 2013 – rielaborazione grafica)



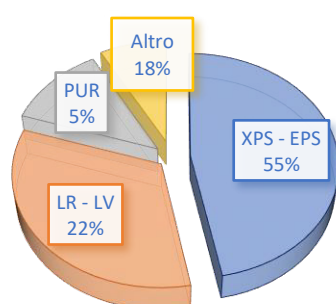
Generalmente i sistemi d'**isolamento dall'esterno** a cappotto riescono meglio a far raggiungere valori bassi di trasmittanza termica (U), in quanto consentono di ridurre più efficacemente i ponti termici e a sfruttare al meglio la capacità areica interna della muratura. Questa soluzione non sempre è attuabile, soprattutto nelle ristrutturazioni, quando non è possibile intervenire dall'esterno, come nel caso di un singolo appartamento condominiale, oppure quando si ha a che fare con edifici storici che hanno dei vincoli in facciata per cui non è possibile applicare l'isolante per non alterarne l'aspetto architettonico. In questo caso è possibile optare per l'**isolamento dall'interno**, e questo porta con sé alcuni svantaggi come ad esempio il fatto di non poter

eliminare alcuni ponti termici, la riduzione degli effetti dovuti all'inerzia termica delle pareti perimetrali e, se la scelta del materiale isolante non è ben ponderata, questa soluzione può portare a fenomeni di muffa e condensa.

Nel mercato attuale esistono varie tipologie di materiali isolanti da utilizzare per realizzare le varie configurazioni esistenti. I più comuni sono: il polistirene (che può essere espanso sinterizzato EPS o espanso estruso XPS), il poliuretano (PUR), la lana di roccia (LR) e la lana di vetro (LV), la fibra di legno e il sughero.

Il loro impiego, stando alle stime del mercato (in volume) degli isolanti in Italia del 2009 (Figura 5), è così distribuito:

Figura 5: Distribuzione percentuale del mercato degli isolanti stimata nel 2005 (fonte: rapporto ANIT 2013 – rielaborazione grafica)  
ANNO 2009



1. la famiglia dei prodotti a base stirene (EPS o XPS) occupa la posizione di maggior rilievo con oltre il 50% del mercato
2. le lane minerali (LR e LV) che coprono circa il 25 % del mercato
3. il poliuretano (PUR) con una percentuale del 5%
4. gli isolanti di varia natura ricoprono il restante 18% [7]

Gli isolanti che attualmente sono sul mercato però hanno alcune problematiche legate sostanzialmente alla forma, in particolare essi si presentano, come detto in precedenza, sotto forma di pannelli rigidi, semirigidi o feltri, che rendono difficoltosi alcuni interventi, soprattutto quelli di riqualificazione su edifici storici. Infatti, in questo tipo di costruzioni molto spesso non si può operare dall'esterno per vincoli di facciata e nemmeno internamente a causa di pareti non ortogonali, con irregolarità o fuori piombo che renderebbero difficoltosa l'applicazione del pannello. Un altro caso in cui l'applicazione dei pannelli isolanti potrebbe creare problemi è quello in cui si deve isolare unità abitative dall'interno, ma non si vuole ridurre di molto la volumetria dell'ambiente. In questi casi, è possibile trovare un compromesso tra il risparmio di spazio e quello energetico attraverso l'utilizzo di intonaci speciali che hanno caratteristiche isolanti: i **termointonaci**. Questi intonaci hanno formulazioni affini agli intonaci classici, ma nella formulazione, l'inerte tradizionale (generalmente la sabbia) è sostituito da aggregati leggeri isolanti a bassa conducibilità termica (**Light Weight Aggregate**) che possono essere di varia natura: minerale, vegetale, artificiale, oppure possono essere dei materiali innovativi e ad alte prestazioni come i PCM e l'**aerogel**. Oltre ai termointonaci esistono anche le termorasature che presentano granulometria dell'aggregato isolante minore del termointonaco. Esse costituiscono lo strato

più esterno del muro e possono essere applicate direttamente sull'intonaco esistente senza necessariamente rimuoverlo. Le termorasature vengono generalmente applicate con spessori più ridotti rispetto ai termointonaci, alcuni studi hanno dimostrato che la loro stesura interna può diminuire l'effetto dei ponti termici ed evitare la crescita microbica.

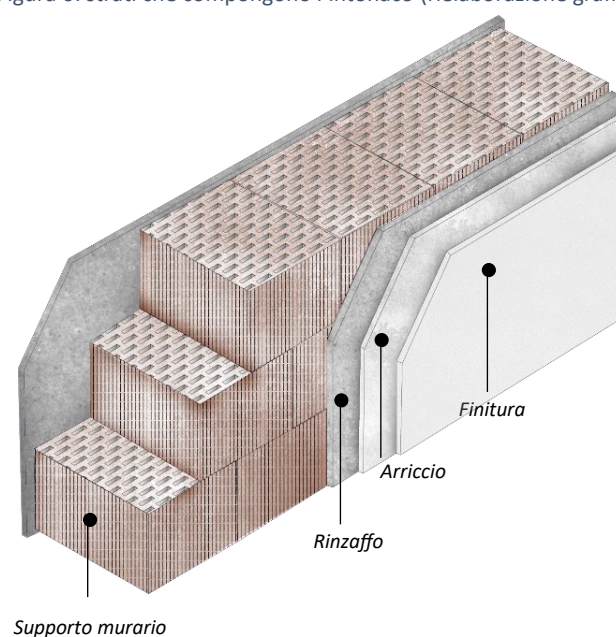
## 2.2 L'intonaco

Prima di addentrarsi nel corpo dell'argomento della tesi, è bene spiegare ciò che l'intonaco è stato nel corso dei secoli prima di giungere a noi adattandosi alle esigenze e alle normative richieste dal nuovo mercato dell'edilizia.

L'intonaco è un elemento costruttivo che svolge molteplici funzioni: estetica, protettiva e igienica. Essendo parte dell'involucro edilizio, contribuisce allo scambio di energia tra ambiente riscaldato e ambiente esterno. Nella sua forma tradizionale, l'intonaco risulta composto da molteplici strati che vanno dallo spessore di qualche millimetro a un massimo di 3 centimetri [9]. Lo spessore e la stratificazione sono molto importanti perché influiscono sulla resa e la durata dell'intonaco. Infatti, anche da queste due variabili dipende il manifestarsi o meno di screpolature e fessurazioni che potrebbero comportare degli interventi di manutenzione sulla superficie della muratura. Gli intonaci solitamente sono realizzati in tre strati successivi (Figura 6) che sono:

- ☒ Il rinzaffo, di spessore tra i 5 e i 10 mm, esso è a diretto contatto con la muratura ed ha il compito di livellare il supporto per le altre stesure. È il più ricco di legante e si ottiene con sabbia di granulometria grossolana che favorisce l'adesione, ovvero l'*aggrappo*, degli strati successivi.
- ☒ L'arriccio (o rustico o grezzo o corpo), di spessore tra i 15 e i 20 mm, è il secondo strato e si ottiene con sabbia di granulometria media al fine di ridurre le successive microfessurazioni dovute ai fenomeni di ritiro della malta, la sua funzione principale è quella di rendere la parete piana e uniforme
- ☒ Lo strato di finitura (o intonachino) è lo strato più esterno e sottile (2-5 mm). È costituito in genere da un legante aereo, e una granulometria minima rispetto agli strati precedenti. Questo strato deve essere molto permeabile per evitare fenomeni di condensa (soprattutto quando si ha a che fare col recupero di edifici storici) ed elastico e dato che è l'ultimo strato deve anche avere delle buone qualità estetiche [10].

Figura 6: strati che compongono l'intonaco (rielaborazione grafica)



Nella stratificazione è importante ricordare che l'intonaco deve avere una resistenza meccanica decrescente dall'interno verso l'esterno<sup>2</sup> e una porosità decrescente dall'esterno verso l'interno. Inoltre, si deve sempre permettere una corretta traspirazione del vapore acqueo attraverso la parete per evitare l'insorgere di condensa interstiziale che causerebbe danni alle parti interne danneggiando gli elementi portanti [10].

L'intonaco è costituito da una miscela di leganti, aggregati, additivi miscelati con acqua dosata a seconda delle prestazioni richieste.

Per essere immesse sul mercato, le malte da intonaco devono essere conformi alla norma UNI EN 998 parte 1 e ottenere la marcatura CE. Questa norma fa riferimento alle malte per intonaci preparate in fabbrica (e non confezionate in cantiere) per applicazioni a soffitto, pilastri e tramezzi [11]. In base alla loro destinazione d'uso vengono suddivise in:

- ☒ Malte generiche (GP)
- ☒ Malte leggere (LW, con densità della polvere inferiore a 1000 kg/m<sup>3</sup>)
- ☒ Malte colorate (CR)
- ☒ Malte monostrato (OC)
- ☒ Malte da risanamento (R)
- ☒ Malte termoisolanti (T)

La norma offre un'ulteriore suddivisione (Tabella 1) in merito alla resistenza a compressione della malta indurita (a 28 giorni):

| Tabella 1: Classificazione delle malte indurite secondo la UNI EN 998-1 |                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Categorie                                                               | Valori                                                  |
| Resistenza a compressione a 28 giorni [R <sub>c</sub> ]                 |                                                         |
| CS I                                                                    | 0.4- 2.5 Mpa                                            |
| CS II                                                                   | 1.5 – 5.0 Mpa                                           |
| CS III                                                                  | 3.5 – 7.5 MPa                                           |
| CS IV                                                                   | ≥ 6 MPa                                                 |
| Assorbimento capillare d'acqua                                          |                                                         |
| W <sub>c</sub> 0                                                        | Non specificato                                         |
| W <sub>c</sub> 1                                                        | $C \leq 0.40 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ min}^{0.5})$ |
| W <sub>c</sub> 2                                                        | $C \leq 0.20 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ min}^{0.5})$ |
| Conducibilità termica                                                   |                                                         |
| T <sub>1</sub>                                                          | ≤0.1 W/mK                                               |
| T <sub>2</sub>                                                          | ≤0.2 W/mK                                               |

<sup>2</sup> in generale l'intonaco deve essere costituito da leganti più deboli rispetto al supporto sul quale è steso



### 2.2.1 Composizione

Tutti gli intonaci anche quelli moderni presentano una composizione di base che poi, a seconda del tipo di malta viene implementata da altri materiali che conferiscono al prodotto finito differenti proprietà meccaniche, di isolamento termico e/o acustico, di permeabilità all'acqua e al vapore.

In sostanza, le malte da intonaco sono costituite da una miscela di acqua, aggregato fine e leganti, ai quali possono essere aggiunti degli additivi che consentono di conferire alcune proprietà specifiche alla miscela.

### 2.2.2 I leganti

I leganti sono ottenuti dalla cottura di materiali di origine minerale. Essi se mescolati con acqua formano un impasto capace di indurire aderendo irreversibilmente a qualunque superficie con la quale entrano in contatto. I materiali leganti si suddividono in leganti aerei e leganti idraulici. I leganti aerei sono impasti che fanno presa e induriscono solo a contatto con l'aria, i leganti idraulici, invece, fanno presa e induriscono sia in presenza d'aria che di acqua.

Fanno parte della famiglia dei leganti aerei il gesso e le calce aeree, mentre le calce idrauliche e il cemento appartengono ai leganti idraulici. A seconda delle materie prime da cui sono ricavati, dalla tipologia di lavorazione e dalla temperatura alla quale sono cotti, dai leganti si possono ottenere vari prodotti, tra cui appunto, le malte per intonaci.

Il gesso è il prodotto che si ottiene dalla cottura della pietra da gesso a temperature comprese tra 130°C e 170°C. Esso se mescolato con acqua, assorbe la quantità persa in fase di cottura ed è in grado di indurire in meno di un'ora. Le malte a base di gesso sono usate prevalentemente per ambienti interni, il gesso è un legante che ha una bassa resistenza meccanica a causa della sua porosità, ma d'altro canto, ha delle ottime proprietà ignifughe, e discrete qualità di isolante termico e acustico.

La calce aerea è composta da carbonato di calcio (calcare) che cuoce a circa 900°C. Da questa cottura si forma calce viva che si trasforma in calce "spenta"<sup>3</sup> a seguito dell'aggiunta di acqua. Le malte a base di calce aerea hanno una vasta applicazione negli ambienti interni grazie a elevate permeabilità al vapore, alla poca sensibilità alle variazioni di umidità relativa degli ambienti e alla buona tenuta in caso di sollecitazioni di natura termica [12].

La calce idraulica naturale (NHL) è ricavata dalla cottura delle marne o da miscele di carbonato di calcio e argilla. La caratteristica idraulicità dipende dalla presenza di silice ( $\text{SiO}_2$ ) e allumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) che reagendo durante cottura con l'ossido di calcio ( $\text{CaO}$ ) producono silicati e alluminati in grado di rapprendere e indurire a contatto con acqua. È possibile creare calce idraulica attraverso l'aggiunta alla calce aerea di scarti industriali come la loppa d'altoforno o, come si faceva tradizionalmente, di prodotti naturali come il tufo pozzolanico (pozzolana) o il cocciopesto derivante dal pestaggio di mattoni e altri laterizi. Ci sono anche le calce idrauliche denominate HL, esse sono una miscela di cemento Portland, filler<sup>4</sup> e piccole quantità di additivi aeranti [12].

---

<sup>3</sup> Lo spegnimento della calce viva in passato avveniva in cantiere, oggi avviene in stabilimento per ottenere una qualità migliore del prodotto.

<sup>4</sup> materiale inerte macinato finemente

Le malte a base di calce idraulica reagiscono meglio alle intemperie rispetto a quelle a base di calce aerea e hanno anche una rigidità più elevata. Inoltre, grazie ai loro tempi di indurimento rapidi e alla buona lavorabilità vengono usate per rivestire esternamente gli edifici [12].

Il cemento è anch'esso un legante idraulico ed è ricavato dalla miscela di acqua con vari materiali macinati e omogeneizzati. Le malte idrauliche a base di cemento sono quelle che hanno la maggiore rigidità e la minor traspirabilità, non applicabili in caso di restauro di edifici storici [10].

Un altro legante utilizzato per la creazione di malte per intonaco è l'argilla, essa è il legante più antico e conferisce all'intonaco ottime qualità di regolatore igrometrico. Grazie alla sua densità conferisce un'inerzia termica aggiuntiva al supporto utile per il confort termico nel periodo estivo e anche quando è presente un isolamento dall'interno [10].

Se si utilizza più di un legante (aereo/aereo, aereo/idraulico, idraulico/idraulico) allora la malta verrà definita mista o "bastarda" [10]. Per essere mista è necessario che i leganti nella malta siano in quantità più o meno eguale al fine di interferire sulle capacità e le proprietà finali del composto. Le malte quando vengono applicate al substrato cominciano a perdere acqua per aspirazione ed evaporazione durante le fasi di presa e indurimento [71]. Quando l'evaporazione dell'acqua è troppo rapida, le malte possono essere soggette a restringimenti che causano crepe e tensioni interne [71]. Dato che queste paste sono aderenti ad un background rigido quale è il muro, queste deformazioni sono ristrette e gli stress interni che si sviluppano negli intonaci possono essere trasferiti alla muratura favorendo l'insorgere di danni visibili sia sulla malta che sulla muratura soprattutto quando essa è friabile o debole [71]. Per evitare l'insorgere di queste problematiche è opportuno saper scegliere quali leganti usare e bisogna anche comprendere in quali condizioni climatiche adottare delle tecnologie d'involucro piuttosto che altre per garantire il confort dell'utente.

La calce aerea per esempio, a differenza del cemento può avere anche un elevato restringimento, ma conserva una certa duttilità sviluppando meno sollecitazioni o comunque sempre al di sotto del livello che può contribuire a ledere seriamente l'integrità del muro. Inoltre, l'assenza del cemento abbassa di molto la resistenza al vapore dell'intonaco evitando fenomeni di condensa superficiale e aumentando la compatibilità con il background preesistente [[70]-[71]].

### 2.2.3 Gli aggregati

Gli aggregati sono materiali che costituiscono lo scheletro strutturale della pasta. Tradizionalmente l'aggregato usato per la produzione dell'intonaco è la sabbia. Nel caso di malte, l'aggregato ha una granulometria fine<sup>5</sup> che va da un minimo di 0,1 mm a un massimo di 7 mm. Oggi è possibile adoperare altre tipologie di aggregati (che verranno presentate nei capitoli successivi) scelti in base all'uso, alle condizioni ambientali alle quali saranno esposte le malte e alle caratteristiche che si vorranno implementare (chimiche, fisiche, meccaniche).

### 2.2.4 Gli additivi

Gli additivi sono sostanze chimiche che, se aggiunte all'impasto, consentono di migliorare delle caratteristiche del materiale. I più utilizzati sono:

---

<sup>5</sup> A differenza di altri tipi di pasta, come nel caso del cls, in cui la granulometria dell'aggregato è mista: fine e grossolana.

- ☒ I fluidificanti: hanno lo scopo di aumentare la fluidità e la scorrevolezza del materiale, al fine di migliorarne la lavorabilità, riducendo anche il quantitativo di acqua (operazione questa che si attua soprattutto quando si ha a che fare con il calcestruzzo).
- ☒ Acceleranti o ritardanti che hanno lo scopo di modificare i tempi di presa e indurimento dell'impasto
- ☒ Aeranti hanno il compito di creare delle micro bolle all'interno del materiale così da conferirgli resistenza ai cicli di gelo/disgelo.

## 2.3 Nuove soluzioni di retrofitting energetico

### 2.3.1 I termointonaci

L'intonaco classico, attraverso la scelta accurata di leganti e di aggregati, può andare al di là delle sue originarie funzioni estetiche e di protezione dagli agenti atmosferici sviluppando caratteristiche fonoassorbenti, di isolamento termico, deumidificanti, ignifughi e impermeabilizzanti. Fanno parte di questa categoria di intonaci detti "speciali", i termoisolanti.

L'intonaco termoisolante è una malta da intonaco con ottime caratteristiche isolanti. È ottenuto da: legante, acqua e inerte sostituito in parte o tutto da aggregati leggeri (LWA) che possono essere di varia origine: artificiali, naturali e minerali, oppure con l'aggiunta di additivi aeranti che creano bolle all'interno dell'impasto. Un impasto leggero serve ad ottenere prestazioni termiche migliori in quanto si cerca di immagazzinare molecole d'aria nella struttura del materiale. Infatti l'aria, se è "ferma", rappresenta uno dei materiali più performanti dal punto di vista termico (con conducibilità 0.026 W/mK). Accanto agli aggregati di origine naturale, minerale e artificiale troviamo anche dei materiali innovativi come i PCM (materiali a cambiamento di fase) capaci di ridurre le fluttuazioni interne di temperatura, o dei super isolanti come l'**aerogel** capaci di far acquisire all'impasto indurito conducibilità ancor più ridotte. Secondo la norma UNI EN 998-1 l'intonaco isolante indicato con la lettera "T" è "una malta a prestazione garantita con proprietà isolanti specifiche", quello che distingue un intonaco classico da uno isolante è la sua conducibilità  $\lambda$ . Esistono due categorie di intonaci isolanti: la categoria "T1" alla quale appartengono tutti i termoisolanti che devono garantire una conducibilità  $\lambda$  minore di 0.1 W/mK e la categoria dei termointonaci "T2" con una conducibilità inferiore a 0.2 W/mK [11]. Il campo di applicazione dei termointonaci è vasto e, dato il mercato e le norme sempre più rigide riguardo all'efficientamento energetico degli edifici, sempre più necessario. Essi hanno un'elevata lavorabilità, e una facile posa in opera che è uguale a quella di un tradizionale intonaco.

Possono essere usati:

- ☒ Per isolare dall'interno degli edifici storici che presentano vincoli in facciata o su quelli in cui risulta difficile operare dall'esterno
- ☒ Su superfici curve, fuori quadro e non allineate dove risulta difficoltosa l'applicazione di pannelli isolanti
- ☒ Per risparmiare volumetria in caso di isolamento dall'interno
- ☒ Su edifici nuovi o che necessitano di un ripristino dell'intonaco
- ☒ Per migliorare la qualità dell'aria interna grazie alla loro elevata traspirabilità

Poi per quanto riguarda le termorasature:

- ☒ Per correggere i ponti termici in caso di applicazioni dall'interno andando ad aumentare la temperatura superficiale della parete

Infine, è bene ricordare che le caratteristiche termiche di un intonaco termoisolante dipendono molto non solo dal tipo di aggregato usato, ma anche dal tipo di legante (Tabella 2). Infatti gli intonaci cementizi sono poco porosi e dato che non sono traspiranti modificano drasticamente l'assetto igrometrico dell'appartamento. Il cemento essendo un materiale ad alta conducibilità

e ad alta densità trasferirà queste sue proprietà all'impasto, ne deriverà che si avrà una malta per intonaco con una conducibilità elevata (un intonaco a base cementizia ha  $\lambda$  intorno a 1,4 W/mK). Gli intonaci a base di calce o di gesso hanno una porosità maggiore dell'intonaco cementizio che permette all'edificio di "respirare" interagendo con l'ambiente esterno ed evitando così fenomeni di condensa. La calce idraulica ha una conduttività 1.05 W/mK, a seguire la calce aerea 0.93 W/mK e il gesso 0.34 W/mK [14].

| Tabella 2: Conduttività dei vari leganti |                         |
|------------------------------------------|-------------------------|
| Tipo                                     | Conducibilità $\lambda$ |
| Cemento Portland                         | 1.2-1.3 W/mK            |
| Calce idraulica                          | 1.05 W/mK               |
| Calce aerea                              | 0.93 W/mK               |
| Gesso                                    | 0.34 W/mK               |

### 2.3.2 LWA: gli aggregati leggeri

I LWA (Light Weight Aggregate) sono aggregati leggeri, a bassa densità (minore di 2000 kg/m<sup>3</sup>) che sono in grado di modificare alcune caratteristiche delle malte per intonaco (quelle termiche nel caso dei termointonaci). A seconda del loro processo produttivo la norma EN 13055:2016 [15] li suddivide in:

- ☒ Naturali: sono aggregati minerali soggetti al solo processo di frantumazione come la pietra pomice
- ☒ Artificiali: sono aggregati leggeri di origine minerali risultanti da un processo industriale che comporta modifiche termiche o di altro tipo come l'argilla espansa, la perlite, la vermiculite (esiste anche la diatomite, derivante da rocce sedimentarie costituite da gusci di alghe chiamate Diatomee) ecc.
- ☒ Artificiali derivanti da sottoprodotti dell'industria: sono aggregati provenienti da un processo industriale che hanno subito soltanto una successiva lavorazione meccanica, un esempio sono i granuli di vetro espanso, ceneri volanti, loppa d'altoforno

La norma come si può notare definisce prevalentemente gli standard per quei LWA di origine minerale e li suddivide in base al tipo di lavorazione e non in base alla loro natura, si può dare un'altra classificazione degli aggregati leggeri in base alla loro origine, per cui avremo:

- ☒ Artificiali: sono materie plastiche che, come esposto in precedenza, occupano la maggiore fetta del mercato dei prodotti isolanti più venduti in Italia e sono il polistirene espanso (EPS), poliuretano, polietilene tereftalato (PTE)
- ☒ Minerali: sono materie derivate dalla lavorazione di rocce come per esempio l'argilla espansa, la perlite espansa, la vermiculite espansa, la diatomite, la pietra pomice
- ☒ Vegetali: hanno un'origine naturale tra queste abbiamo il legno, il sughero, la canapa e altri materiali che molte volte fanno parte di scarti alimentari

- ☒ PCM: sono sostanze organiche (paraffine) o inorganiche (sali idrati), di origine naturale o di sintesi, e vengono impiegate per accumulare e rilasciare energia termica grazie al passaggio di fase tra lo stato solido e liquido (e viceversa), sfruttando la capacità termica e latente di fusione
- ☒ Aerogel: è una sostanza sintetizzata in laboratorio attraverso condizioni critiche di temperatura e pressione. È il materiale solido più leggero al mondo con una densità pari a 3 kg/m<sup>3</sup> e una bassa conducibilità pari a 0.014 W/mK.

#### 2.3.2.1 Termointonaci con aggregati artificiali

Cercando nella letteratura scientifica del settore sono stati trovati alcuni studi sugli aggregati di origine artificiale.

Gran parte degli studi trovati pongono l'attenzione sulla sostenibilità e l'importanza del riuso delle materie plastiche per implementare le proprietà delle malte. Gli studi sui quali si concentrerà la ricerca prendono come oggetto l'uso di quattro materie: il polistirene espanso (EPS), il poliuretano (PUR), il polietilene tereftalato (PET) e la gomma.

##### a) Il polistirene espanso

Il polistirene espanso (EPS) è un polimero termoplastico con una struttura a celle chiuse che deriva dalla lavorazione del petrolio, presenta delle proprietà interessanti di bassa densità, di isolamento termico, di idrofobicità e di resistenza chimica quando è esposto ad alcali e acidi. È composto dal 98% d'aria, non è velenoso e presenta delle caratteristiche chimiche che lo rendono immune da batteri o funghi. L'EPS per la sua caratteristica leggerezza e impermeabilità può essere usato in granuli come aggregato polimerico nelle malte. Il materiale non è considerato "biodegradabile" e quindi il suo riuso non concerne soltanto interessi tecnici ed economici, ma apporta anche benefici dal punto di vista ambientale.

Mas et al. [16] hanno dimostrato l'influenza dell'aggiunta di EPS nelle malte cementizie confrontando malte con diverse percentuali di granuli di EPS (10%-30%-50%-70% di sostituzione per volume di sabbia) con malte tradizionali evidenziandone le differenze in termini chimici, fisici e meccanici. I risultati mostrano che all'aumentare della percentuale di EPS nelle malte cementizie, la lavorabilità dell'impasto e la resistenza meccanica del prodotto finito decrescono. Mentre migliora il comportamento di queste malte ai cicli di gelo/disgelo in quanto l'eps assorbe la pressione di cristallizzazione e si ha un effetto positivo sulla durabilità della malta. Bicer et al. [17] hanno dimostrato che l'aggiunta di granuli di Eps (con granulometria compresa tra 0-3 mm) al legante gesso nelle malte apporta una diminuzione della conducibilità rispetto all'intonaco con solo gesso. In particolare, lo studio è stato condotto sperimentando malte con contenuti variabili di gesso (20%-40%-60%-80%), di Eps (20%-40%-60%-80%) e Tragacanth, una resina di origine vegetale (0%-0.5%-1%-1.5%). Dallo studio è emerso che in tutte le formulazioni la conduttività è minore a 0.26 W/mK (dove la resina vegetale è presente nella percentuale maggiore) e questo fa sì che ogni formulazione a base gesso+eps sia migliore dal punto di vista termico rispetto agli intonaci tradizionali a base cementizia in commercio (1.2 W/mK) e rispetto agli intonaci che hanno aggregati classici. La conducibilità minima ottenuta è pari a 0.047 W/mK (EPS all'80% e 1.5% di resina vegetale) è l'81 % inferiore rispetto ad un intonaco a base di gesso tradizionale (0.25 W/mK) e il 46% in meno rispetto a un termointonaco in EPS a base di calce idraulica ( $\lambda = 0.085$  W/mK) [18].

### b) Il poliuretano

I poliuretani sono polimeri termoindurenti e possono avere molte applicazioni. La loro sintesi è basata sulla reazione tra un di-isocianato (Metilene Difenil Diisocianato, MDI) e un poliolo, insieme a catalizzatori e altri additivi a seconda della forma e delle proprietà che si vogliono ottenere. Infatti, il PUR si presenta sul mercato sotto varie forme: pannelli rigidi, in forma spumosa, fibrosa ed elastica [19]. Il MDI è un allergene inalante etichettato R40, cioè potenzialmente cancerogeno. Sono stati fatti dei test sul PUR ed è risultato che l'emissione di MDI è in quantità minime per cui non rappresenta un pericolo per la salute umana [21]. Inoltre, se esposto al fuoco può diventare velenoso. Di solito però i materiali isolanti in poliuretano utilizzano un ritardante di fiamma come il TCPP, il TCEP o il TDCP. Su queste sostanze però, in base al rapporto pubblicato nel 2018 dall'Echa (Agenzia Europea per le sostanze chimiche), è stata adottata una restrizione nei materiali isolanti in poliuretano in quanto sembra che anche loro costituiscano un rischio per la salute umana e per l'ambiente [20]. Il poliuretano in forma schiumata ha una struttura a celle chiuse che gli conferiscono delle eccellenti proprietà termiche (conducibilità 0.025 W/mK) e di impermeabilità all'acqua. Gli usi della schiuma poliuretanica in campo edilizio sono svariati, tra gli altri può essere usata anche come aggregato per intonaci termoisolanti. In questo caso i granuli d'inerte plastico provengono perlopiù dalla frantumazione di materie poliuretaniche riciclate. Questi granuli sono chimicamente stabili e adatti ad essere immessi nelle paste per malte da intonaco e di allettamento. V. Våclavik et al. [22] hanno dimostrato che l'uso dei grani poliuretanici (granulometria da 1 e 4 mm) nelle malte da intonaco può diminuire la conducibilità della pasta fino a 0.06 W/mK mantenendosi sempre all'interno dei requisiti prestazionali racchiusi nella EN 998-1 (mentre se mischiato con il cemento per la produzione di calcestruzzi leggeri raggiunge conducibilità pari a 0.1 W/mK). In questo studio però non viene specificata la percentuale di aggregato di PUR usato.

### c) Il polietilene tereftalato

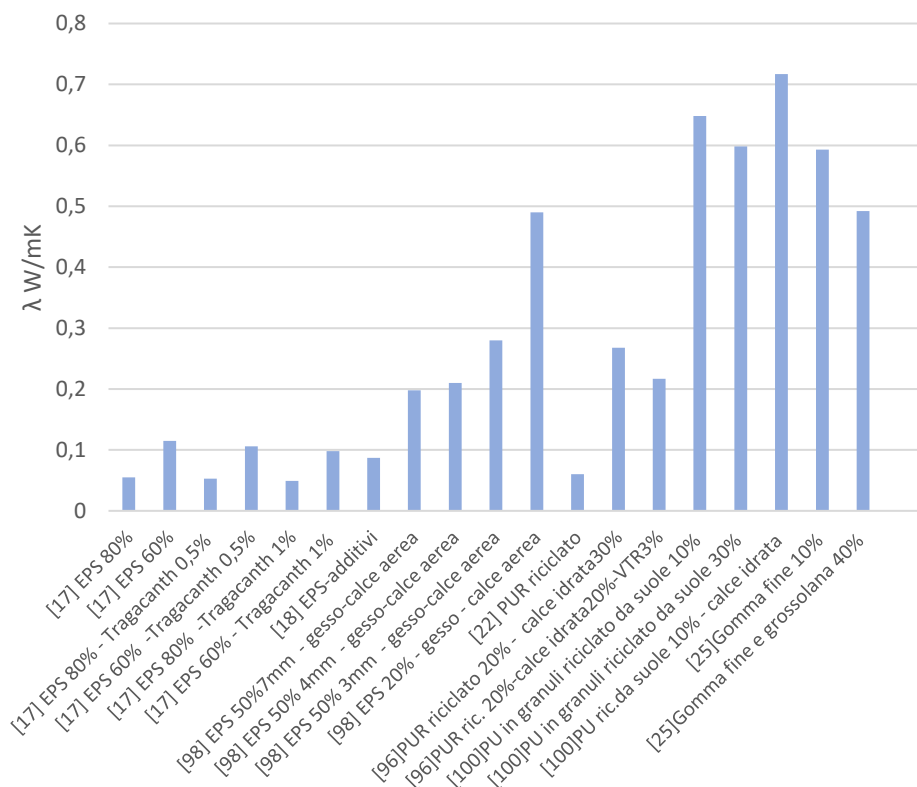
Il polietilene tereftalato, anche noto come PET o PETE è un polimero termoplastico appartenente ai poliesteri. È conosciuto per la sua caratteristica resistenza chimica, all'usura e all'abrasione. Sul mercato viene usato per vari scopi, i più conosciuti sono quelli alimentari. Infatti il PET viene usato per la produzione di vaschette alimentari, per confezionare bevande, nell'automotive e nei componenti elettronici. Il materiale plastico usato maggiormente per la produzione di bottiglie presenta delle buone caratteristiche termiche con una conduttività che varia da 0.13 a 0.24 W/mK e una densità assoluta di 1.35 g/cm<sup>3</sup> e anche un maggiore calore specifico compreso tra 1.0- 1.1 kJ/kgK se si compara con aggregati tradizionali (sabbia = 0.92 kJ/kgK, pietra calcarea = 0.84 kJ/kgK). Essendo un materiale plastico non è biodegradabile, per questo molti studi si sono incentrati sul riuso di questi rifiuti per evitare che finiscano in natura inquinando l'ecosistema. Alcune di queste ricerche riguardano l'uso del PET nelle malte cementizie. Gli studi riguardanti il PET sotto forma di aggregato, di solito usano questo materiale triturato rimpiazzando in parte o in tutto l'aggregato tradizionale presente nelle malte. S. Akcaozoglu et al. [24] hanno dimostrato che il PET come aggregato nelle paste cementizie è capace di rallentare la propagazione del calore e quindi ridurre la conduttività della pasta. Il valore di conduttività più basso pari a 0.392 W/mK è stato raggiunto con l'introduzione degli aggregati plastici con una percentuale del 60% in volume. All'aumentare degli aggregati di PET diminuiva la  $\lambda$  questo grazie alla bassa conducibilità del PET (0.15 W/mK) rispetto all'aggregato tradizionale (2 W/mK).

#### d) Gomma

La gomma artificiale è prodotta dalla sintesi di stirene  $C_6H_5=CH_2$  e butadiene  $CH_2=CH-CH=CH_2$ . Con questo tipo di gomma si producono gli pneumatici o le suole delle scarpe. Lo stock di pneumatici nelle discariche sta diventando considerevole, i siti stanno via via esaurendosi. Questi materiali sono pericolosi. Infatti, oltre a rappresentare una minaccia ambientale in quanto prodotti non biodegradabili, quando sono oggetto di incendi, liberano molti inquinanti nell'aria come  $CO_2$ ,  $NO_2$  e  $SO_2$ . Per questo sono molti gli studi che cercano di dare nuova vita a questo tipo di rifiuto. Tra questi ricordiamo le ricerche volte all'uso di pezzi di pneumatici nelle paste per asfalti, l'incenerimento di gomma per la produzione di vapore, il riuso di gomma macinata per la produzione di prodotti plastici. Oltre a queste scoperte, i ricercatori hanno sperimentato il riuso di gomme macinate come aggregato nelle malte. A. Fadiel et al. [25] hanno condotto la sperimentazione di un materiale da costruzione a base cementizia utilizzando come aggregati pezzi di pneumatici rimpiazzandoli con l'inerte classico al fine di stabilirne le caratteristiche termiche. Gli aggregati di gomma hanno rimpiazzato l'aggregato tradizionale secondo varie percentuali in volume (10%-20%-30%-40%). Sono stati usati due differenti diametri di inerti, introdotti singolarmente nella miscela o insieme (la mesh #30 costituita da aggregati molto fini da 0 a 0.6 mm e la mesh #10-20 formata da pezzi di gomma più grossolani da 0.84-2 mm). I test sono stati condotti avendo sempre come riferimento delle tradizionali malte cementizie ( $\lambda=0.682W/mK$ ) [25]. I risultati evidenziano come la conduttività della malta diminuisce all'aumentare del quantitativo di gomma. Inoltre, l'impasto con una granulometria grossolana è risultato essere più performante dal punto di vista termico rispetto agli inerti fini. Infatti, dai test, il valore inferiore di conducibilità è stato pari a 0.492 W/mK ottenuto con il 40% di sostituzione in volume di aggregato tradizionale con la mesh #10-20. Questo può essere attribuito al fatto che l'aggregato grossolano ha una superficie di contatto più ampia e dato che la gomma intrappola per sua natura aria, i pezzi con diametro maggiore ne hanno di più al loro interno rispetto a quelli di minor diametro [25].



Figura 7: conducibilità delle malte con LWA artificiali trovate



#### 2.3.2.2 Termointonaci con aggregati leggeri minerali

Esistono degli intonaci isolanti che come aggregato usano materie derivate dalla lavorazione di rocce. Questo tipo di inerte deve rispettare la norma europea EN 13055:2016 secondo cui gli aggregati di origine minerale per definirsi “leggeri” devono avere una massa volumica particellare non maggiore di 2000 kg/m<sup>3</sup> (2 Mg/m<sup>3</sup>) o massa volumica in mucchio non maggiore di 1200 kg/m<sup>3</sup> (1.2 Mg/m<sup>3</sup>) [15]. Le ricerche nella letteratura scientifica si concentreranno su cinque aggregati di origine minerale usati per confezionare malte da intonaco che sono: l’argilla espansa, la perlite, la vermiculite, la pietra pomice e la diatomite.

##### a) Argilla espansa

L’argilla espansa è un aggregato leggero di origine minerale. L’argilla viene riscaldata a circa 1150 °C in forni rotanti, alla fine di questo trattamento il prodotto aumenta il suo volume di 5 volte la sua forma originale assumendo l’aspetto di granuli sferici. Il nucleo di queste sfere è leggero e poroso, mentre a seguito della cottura si forma una crosta dura sulla superficie esterna [26]. A. M. Rashad [27] ha condotto degli studi sull’uso dell’argilla espansa come aggregato negli intonaci a base di cemento e ha visto che l’aggregato leggero è in grado di ridurre la conduttività della pasta fino a 0.27 W/mK, il 70% in meno rispetto al tradizionale intonaco cementizio usato come riferimento (0.97 W/mK). A. Daniel et al. [101] hanno dimostrato che la conduttività del calcestruzzo non dipende soltanto dal tipo di aggregato e dalla porosità della pasta, ma anche dal rapporto acqua/cemento e dal contenuto di umidità. Loro hanno condotto dei test su 4 tipi di calcestruzzi con aggregati leggeri (LWAC) prodotti con differenti rapporti Acqua/cemento (0.35-0.45-0.55-0.65) e con diversi inerti tra cui due tipi di argilla espansa (Leca e Argex) [101].

La conducibilità minima trovata con l'aggregato Leca è stata di 0.94 W/mK ( $\lambda_{dry}$ , provino cilindrico) con un rapporto a/c della matrice cementizia uguale a 0.55 ( $\lambda_{dry}$ , provino cilindrico), mentre con l'aggregato Argex è stato raggiunto un valore minimo di conduttività pari a circa 0.87 sempre con un rapporto a/c di 0.55 [101]. Mentre, con rapporti a/c più bassi e mantenendo stabile la densità, è stato notato che la conducibilità aumentava, da qui si è evinto che anche la porosità della pasta cementizia influenza le proprietà termiche. Infatti, la matrice risulta avere porosità maggiore con rapporti di a/c alti (data dall'evaporazione dell'acqua), questo incrementa la resistenza termica del prodotto indurito, a discapito però delle proprietà meccaniche.

#### b) Perlite

La perlite è una roccia vulcanica effusiva, con una composizione chimica identica a quella di rioliti e daciti[28]. Essa contiene al suo interno delle percentuali di acqua (comprese tra il 2-5%) rimasta confinata nella porosità chiusa della roccia a causa del repentino raffreddamento al momento della fuoriuscita del magma[28]. La perlite è in grado di aumentare il suo volume di 20 volte rispetto alla roccia originaria se è esposta ad alte temperature (comprese tra 550-900 °C) [28]. Questa espansione è dovuta alla vaporizzazione dell'acqua che genera all'interno dei granuli di roccia delle bolle che conferiscono al prodotto leggerezza e un potere termoisolante[28]. La perlite presenta i valori più bassi di conduttività (0.038-0.044 W/mK) rispetto ad altri LWA come la pietra pomice (che oscilla tra 0.074 W/mK a 0.092 W/mK) [30]. Questo si ha perché presenta una matrice vetrosa che è molto più leggera e sottile rispetto a quella di altri aggregati minerali [30]. In uno studio, l'intonaco cementizio a base di perlite ha avuto conduttività di 0.22W/mK, mentre un altro a base di gesso ha ottenuto una  $\lambda$  pari a 0.16 W/mK, minore dell'80% rispetto a un intonaco cementizio tradizionale (0.97 W/mK) [27].

#### c) Vermiculite

La vermiculite è un minerale che fa parte della famiglia delle miche. La roccia è soggetta a un trattamento termico denominato "esfoliazione", in cui il minerale viene riscaldato velocemente tra gli 870°C e i 1090 °C, questo ne fa aumentare il volume di circa 30 volte rispetto a quello originario [[29],[32],[33],[34]]. Durante l'esfoliazione il minerale perde acqua per vaporizzazione diventando molto leggero con una densità che varia da 60 a 150 kg/m<sup>3</sup> e di colore giallo-dorato[[29],[32],[33],[34]]. Il prodotto espanso oltre a essere un buon isolante termico con conduttività compresa tra 0.04-0.12 W/mK [[29],[32],[33],[34]], è un materiale incombustibile, impermeabile, atossico, è un buon regolatore di umidità, è imputrescibile ed ha un'ottima stabilità nel tempo. Molti sono gli usi in edilizia, infatti esso viene impiegato in forma sfusa in intercapedini di pareti perimetrali, coperture sottotetti non praticabili. Un'altra applicazione prevista è quella di inerte per malte da intonaco. L'intonaco cementizio che usa come aggregato la vermiculite ha una conduttività pari a 0.25 W/mK [27].

#### d) Pietra pomice

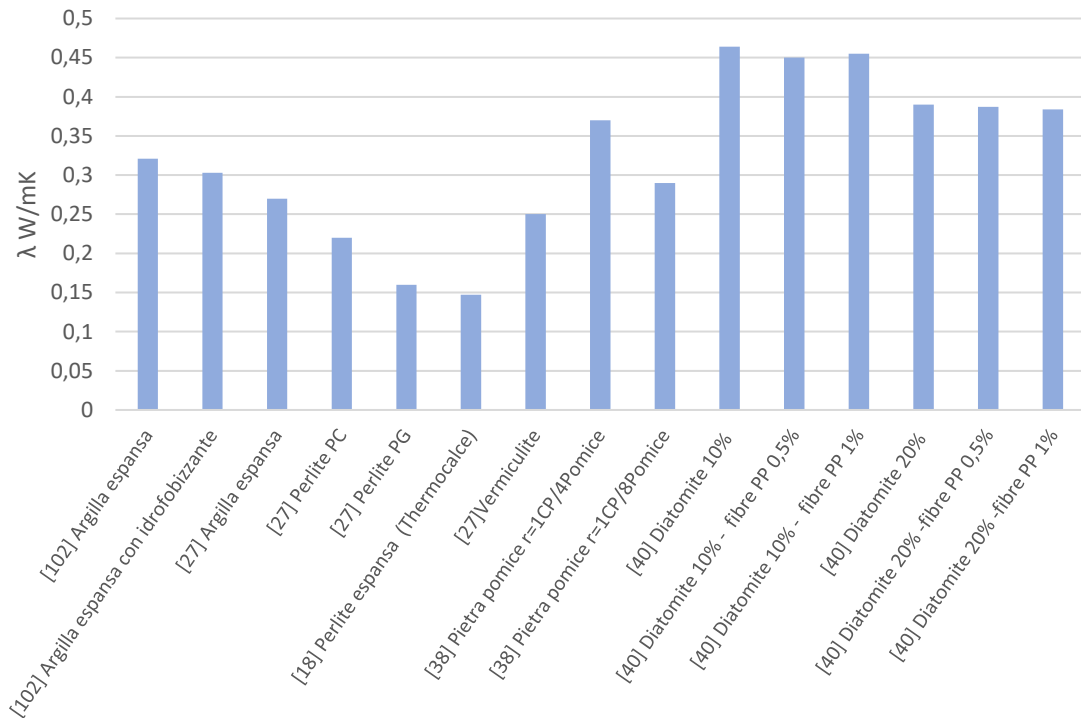
La pomice si forma in seguito al rilascio di gas durante la solidificazione della lava. Infatti durante il repentino raffreddamento del magma i gas contenuti nella struttura della pomice rimangono intrappolati formando bolle e vuoti d'aria [35]. La porosità della pietra pomice è prevalentemente chiusa. La pietra pomice è costituita per oltre il 75% da SiO<sub>2</sub>[35]. Esistono due categorie di pietra pomice, quella con caratteristiche acide e la basica e ciò dipende dai meccanismi che hanno portato alla solidificazione della lava e dai contenuti di SiO<sub>2</sub> e CaO/MgO[35]. Entrambe le

categorie hanno un'elevata percentuale di porosità, differiscono però nel peso, la densità della pomice acida va dai 500-1000 kg/m<sup>3</sup>, più bassa rispetto alla pomice basica la cui densità va dai 1000 ai 2000 kg/m<sup>3</sup> [35]. Inoltre, la pomice acida ha un colore che va dal bianco al grigio dato dalle sue più alte concentrazioni di silice, sodio e potassio e ciò la rende più adatta ad un'applicazione nel campo edilizio per la sua attività pozzolanica rispetto alla pomice basica che è di colore scuro ed è meno presente in natura [35]. S. Widodo et al. [38] hanno studiato l'effetto che la pomice ha sulla conduttività termica quando è utilizzata come aggregato nelle malte cementizie in varie composizioni [38]. Sono state confezionate 3 tipi di malta a base di pomice: la prima "MP1" avente un rapporto 1CP (cemento Portland):4 P(pomice), la seconda "MP2" 1CP:6P e la terza "MP3" 1CP:8P [38]. In tutte queste formulazioni la pomice ha rimpiazzato totalmente l'aggregato tradizionale e hanno avuto come confronto tre malte cementizie che avevano gli stessi rapporti, ma con la sabbia denominati MN1(1PC:4 Sabbia), MN2(1PC:6 S), MN3(1PC:8S) [38]. I risultati sulle modifiche alle proprietà termiche mostrano che le malte a base di pomice apportano un abbassamento della conduttività che varia da 0.37 W/mK per la formulazione MP1 a 0.29 W/mK della MP3; valori inferiori di oltre il 40% rispetto alle malte tradizionali [38].

#### e) Diatomite

La diatomite è una roccia sedimentaria morbida composta principalmente da scheletri fossili di fitoplancton [40]. Questo minerale è stato formato sia in acque dolci che salate nel periodo geologico dell'Eocene ed è costituito maggiormente da silice amorfa. Ha un colore che tende al giallo e una struttura porosa che gli conferisce una particolare leggerezza. Y.W. Jeong et al. [39] hanno fatto uno studio sull'introduzione della polvere di diatomite avente 30  $\mu m$  come parziale sostituto dell'aggregato tradizionale nei calcestruzzi normali e leggeri usati come riferimento (frammenti di pietre nel cls normale e ardesia in quello leggero), con una percentuale del 15% in volume. La conduttività del cls normale con il rimpiazzo di diatomite ha avuto una diminuzione della conduttività rispetto al riferimento pari al 41% (1.15 W/mK rispetto al riferimento di 1.94 W/mK), mentre il cls leggero con la diatomite ha raggiunto una conduttività pari a 0.87 W/mK minore circa del 30 % rispetto al calcestruzzo leggero tradizionale [39]. Gencel et al. [40] hanno studiato un nuovo intonaco a base di gesso contenente il 20% di diatomite e l'1% di fibre di polipropilene. È stato notato come all'aumento percentuale della diatomite corrisponda un aumento della porosità dell'intonaco fino a un massimo del 47.8%. Il valore inferiore di conduttività termica è risultato essere pari a 0.384 W/mK che corrisponde alla massima percentuale di diatomite (20%) e fibre (1%) [40].

Figura 8: conducibilità delle malte con LWA minerali trovate



### 2.3.2.3 Termointonaci con aggregati vegetali

Oggi l'impatto ambientale delle costruzioni, così come il confort degli occupanti è diventato di rilevante importanza. La qualità dell'aria interna è considerata una tra i maggiori fattori di rischio della salute umana, quindi sviluppare e implementare un aspetto all'interno dei componenti edilizi che abbia un basso impatto sull'ambiente è diventato un obiettivo comune per migliorare le prestazioni igrotermiche dell'ambiente interno. Per queste ragioni, materiali che l'uomo ha usato per migliaia di anni come il legno, il sughero, la paglia e altri materiali di origine vegetale sono considerati in grado di ottemperare a queste nuove esigenze. Di seguito verranno descritte le caratteristiche termiche, desunte dalla letteratura scientifica del settore, di alcune malte che usano aggregati di origine vegetale.

#### a) Legno

Il legno è un materiale naturale, che è presente in abbondanza su gran parte del globo ed è rinnovabile. Grazie alle sue caratteristiche fisico-meccaniche e ai suoi molteplici vantaggi tecnici e strutturali, il legno resta uno dei materiali più usati in edilizia. Molti studi si sono concentrati sul riuso degli scarti di legno nelle malte o nei calcestruzzi, questo perché sono presenti in cospicua abbondanza e hanno anche un impatto rilevante sull'ambiente. Infatti, se lasciati in discarica a marcire contribuiscono all'effetto serra a causa dei biogas (metano e anidride carbonica) prodotti dalla degradazione anaerobica, mentre alcuni rifiuti non possono essere bruciati a causa di prodotti velenosi con cui sono stati trattati come colla, vernice e insetticidi. La segatura derivante dalla lavorazione del legno ha molte qualità tra cui: una bassa densità, è igroscopica ed ha un potere calorifero che varia da specie a specie. V. Corinaldesi [41] ha condotto una ricerca sul riuso dei rifiuti derivanti dalla lavorazione del legno per produrre una malta leggera. Le malte cementizie oggetto di studio presentano tre differenti percentuali di sostituzione

(2.5%-5%-10%) della sabbia tradizionale con trucioli di legno (0-10 mm) e segatura (0-8 mm) derivanti prevalentemente da abete rosso [41]. Per quanto riguarda le proprietà termiche, la miscela più performante è stata quella contenente la segatura al 5% con aggiunta di calce e ceneri volanti che hanno contribuito alla diminuzione del contenuto di cemento all'interno della miscela con una conducibilità pari a 0.625 W/mK, risultata minore del 2% rispetto alla malta cementizia di riferimento con la sua stessa composizione, ma senza la segatura.

#### *b) Sughero*

Il sughero è un materiale molto usato in commercio soprattutto per l'imbottigliamento di bevande come il vino. È molto diffuso soprattutto nelle aree mediterranee, è ecologico, idrofobo, rinnovabile con delle caratteristiche termiche ed acustiche notevoli, in accordo con la sua microstruttura e porosità. M. Martins et al. [42] hanno studiato l'effetto che ha il sughero sulle proprietà termiche delle malte da intonaco. Le malte bastarde a base di calce idraulica naturale (NHL) e cemento sono state testate incorporando varie percentuali di sughero espanso rigranulato "REC" e sottoprodotti dell'industria del sughero (20%-40%-60%-80%-100% di sostituzione in volume di sabbia con il sughero) [42]. Sono state utilizzate tre differenti taglie di REC: R1 (D=1-4 mm), R2 (D=0.5-8 mm), e polvere di sughero R3 con diametro minore di 0.25 mm. Le malte utilizzate hanno un rapporto leganti/aggregati 1:3 (0.5 NHL:0.5 CEM II:3 aggregati) [42]. Le caratteristiche termiche sono risultate migliori con l'introduzione di REC nelle malte, infatti la conducibilità varia da un massimo di 0.44 W/mK (60% di R1), a un minimo di 0.11 W/mK (100% di sostituzione dell'aggregato); questi risultati sono inferiori ai valori di conducibilità di una malta a base di calce idraulica tradizionale pari a 0.8 W/mK. Questo perché l'elevata qualità termica degli agglomerati di sughero ( $\lambda = 0.045$  W/mK) abbassa notevolmente la  $\lambda$  della malta da intonaco [42].

#### *c) Fibre di palma*

Le fibre di palma sono rinnovabili e hanno interessanti caratteristiche termiche legate soprattutto alla loro porosità. Esse possono essere usate come aggregato sia negli intonaci che nei calcestruzzi. I. Amara et al. [43] hanno studiato le proprietà termiche di intonaci a base di gesso con l'impiego di fibre di palma provenienti dal tronco della palma. Queste hanno una densità di circa 290 kg/m<sup>3</sup> e una  $\lambda$  di 0.17 W/mK. Le fibre sono state tagliate in pezzetti aventi diametro compreso tra 0.7-1.1 mm e sono state introdotte all'interno della pasta in quattro percentuali diverse di sostituzione dell'aggregato tradizionale (0%-2%-5%-8%-10%) [43]. Gli esperimenti sulle malte hanno portato ad una riduzione della conducibilità proporzionale all'aumento delle percentuali di fibre incorporate. Infatti, si va da una  $\lambda$  pari a 0.3 W/mK per la malta con il 2% di palma a un minimo di 0.23 W/mK registrato nella malta con la percentuale massima di aggregato vegetale (10%). Questo dato è minore del 46% rispetto al risultato di conducibilità della malta a base di gesso usata come riferimento (0.431 W/mK) [43]. N. Benmansour et al. [44] hanno investigato sulle proprietà meccaniche e termiche delle malte cementizie con aggregato la palma. Hanno condotto delle analisi su malte che avevano tre diverse granulometrie di aggregati di palma: "DPF3" con diametro pari a 3mm, "DPF6" di 6mm e "DPFmix" che consisteva in un mix di entrambe le granulometrie [44]. Questi aggregati nelle malte hanno sostituito la sabbia in varie percentuali (5%-10%-15%-20%-25% e 30%) [44]. È stato riscontrato che per percentuali minori o uguali a 15% di DPF, la conducibilità è maggiore nelle malte contenenti DPF6 (varia da

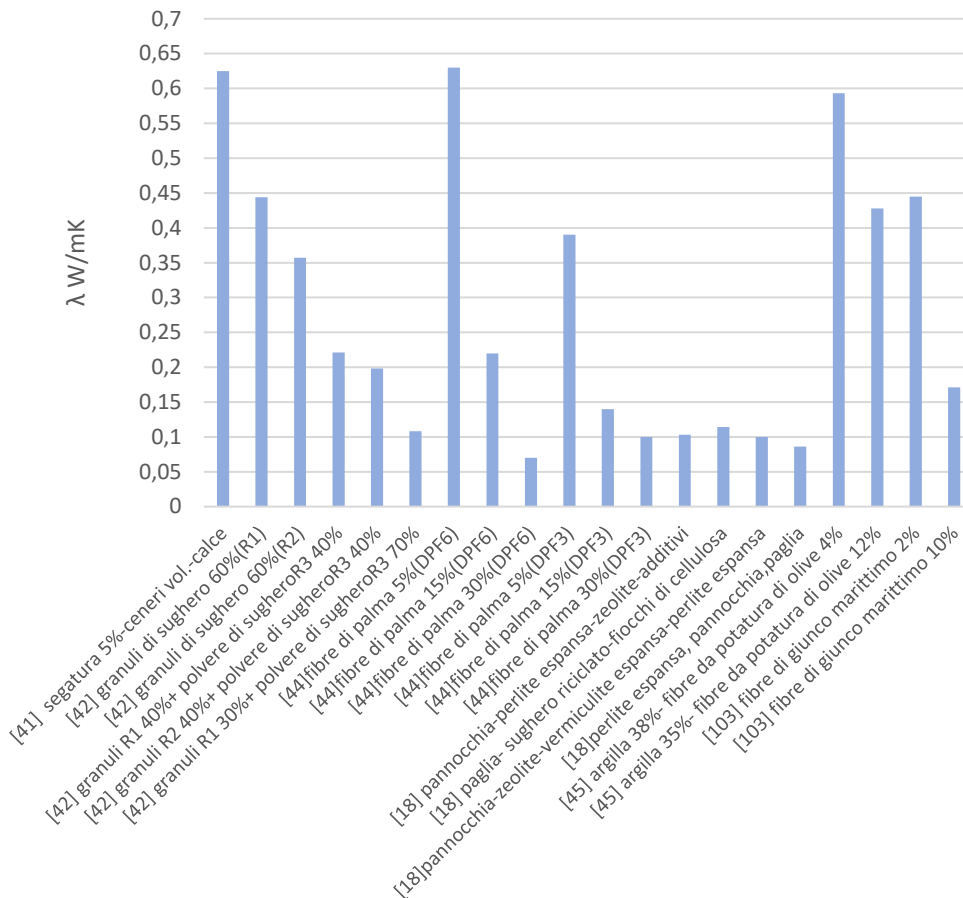
0.63 W/mK con il 5% a 0.22 W/mK con 15%) rispetto a quelle contenenti DPF3 (varia da 0.39 W/mK con il 5% a un minimo di 0.14 W/mK con il 15%) [44]. Con percentuali di DPF maggiori del 15% la conducibilità delle diverse malte tende ad eguagliarsi arrivando a un valore minimo si aggira intorno a 0.075 W/mK con il 30% di ogni aggregato (DPF6,6, mix) [44].

#### *d) Altri tipi di aggregati vegetali*

Il campo degli aggregati vegetali è molto vasto, oltre infatti a quelli sopra descritti esistono tanti altri tipi di LWA anche meno usuali che hanno però delle ottime qualità termiche. Carbonaro et al. [18] hanno condotto una ricerca su termointonaci che usano come aggregato materiali di scarto provenienti da processi industriali e agricoli, ponendo un'attenzione particolare sul concetto di Economia Circolare che ha cioè lo scopo di favorire uno sviluppo sostenibile dal punto di vista economico, ma anche ambientale, in cui i rifiuti tornano ad essere delle risorse e si cerca di limitare al minimo gli scarti effettivi. Lo studio si è concentrato sull'analisi di differenti formulazioni di intonaci a base vegetale/minerale: il "Cork\_001" a base di calce idraulica naturale (NHL), pannocchia di mais granulata, perlite espansa, zeolite e additivi, il "Bioart cork" a base di NHL, paglia granulata derivante dalla lavorazione del grano, sughero granulato e fiocchi di cellulosa, il "VGT\_001" a base di NHL, zeolite, vermiculite espansa, perlite espansa e di tutolo di mais granulato e infine il "VGT0\_14" a base di NHL, cemento Portland, cemento solfo-alluminoso, perlite espansa, tutolo di mais granulato e paglia granulata [18]. Questi intonaci sono stati confrontati con altre due malte commerciali: uno il "thermointonaco" a base di NHL, cemento Portland, EPS ed additivi, l'altro, la "Thermocalce" a base di NHL, cemento Portland, perlite espansa ed additivi [18]. Dalle analisi risulta che il termointonaco con la più bassa conduttività è il "VGT\_014" con una  $\lambda_{10^\circ\text{C}}=0.083$  W/mK, molto vicina a quella di 0.085 W/mK misurata nel "Thermointonaco" commerciale [18].

S.Liuzzi et al. [45] hanno condotto una ricerca su quattro differenti tipologie di intonaci a base di argilla contenenti diverse percentuali di foglie e piccoli rami derivanti dalla potatura delle olive 4%-6%-8%-12%. Dalle analisi termiche risulta che la conduttività varia da 0.593 W/mK a un minimo di 0.428 W/mK ottenuto dall'intonaco termoisolante a base di argilla con la più alta concentrazione di fibre di oliva (12%) [45].

Figura 9: conducibilità delle malte con LWA vegetali trovate



#### 2.3.2.4 Termointonaci a capacità termica migliorata

##### Storia

La scoperta dei PCM si deve al lavoro del fisico Alan Tower Waterman dell'università di Yale. Mentre studiava l'effetto termoionico di alcuni Sali, Waterman notò che la conducibilità della molibdenite ( $\text{MoS}_2$ ) poteva essere alterata progressivamente ad alte temperature [48]. Mentre il primo uso documentato dei PCM in edilizia fu nel 1948 grazie alla dott.ssa Maria Telkes. La ricercatrice ungherese associata al Massachusetts Institute of Technology (MIT) divenne una dei pionieri grazie anche alla prima vera costruzione che prevedeva l'utilizzo di PCM e progettata dall'architetto Eleanor Raymond. L'abitazione chiamata "Solar One" impiegava circa  $4\text{m}^2$  di Sale di Glauber contenuti in fusti e piazzati in spazi tra le camere principali ed era ventilata attraverso fancoil. Grazie alle capacità dei PCM la casa rimase in condizioni di confort termico per 11 giorni senza sole. Ma dopo 3 anni, l'esperimento fallì in quanto il sale aveva perso completamente la sua capacità di immagazzinare calore [53]. Da allora però la ricerca sui materiali a cambiamento di fase proseguì. I PCM oggi trovano molte applicazioni come ad esempio nei sistemi di facciate ventilate, all'interno di vetri, nei calcestruzzi, in pannelli di cartongesso e nelle paste da intonaco.

Molte analisi svolte per la determinazione del fabbisogno energetico di un edificio vengono effettuate in regime stazionario, in cui il bilancio energetico viene svolto come un confronto tra la temperatura esterna e interna avendo una parete con una trasmittanza costante nel tempo, trascurando altre proprietà come la massa della parete e ciò che ne comporta. Nella realtà però quando si analizza un elemento d'involucro opaco e il suo comportamento termico si deve distinguere tra fenomeni di trasmissione del calore e quelli di accumulo di calore. I componenti opachi (esterni ma anche interni) possono partecipare al bilancio energetico sia lasciandosi attraversare dal calore (qui si parlerà di trasmissione termica), sia immagazzinando e rilasciando il calore (qui si parlerà di accumulo termico). La trasmissione termica è dovuta a una differenza di temperatura tra un ambiente e l'altro. L'accumulo invece è strettamente legato ad aspetti dinamici che apportano un cambiamento della temperatura esterna da un'ora all'altra. Ecco perché quando si progetta si deve tener conto a due requisiti: l'isolamento termico e l'inerzia.

L'isolamento termico è indispensabile per apportare una riduzione della trasmissione di calore, questo funziona quando abbiamo a che fare con differenze di temperatura tra interno ed esterno elevate, soprattutto in climi freddi.

L'inerzia termica invece rappresenta l'attitudine di una parete, soggetta a sollecitazioni dinamiche (quindi variabili nel tempo), di ridurre e ritardare l'effetto di queste sollecitazioni. L'inerzia è legata molto alla massa della parete e al suo calore specifico, una muratura in mattoni spessa sarà più incline a smorzare elevati flussi termici entranti rispetto a una parete leggera in cartongesso. Non solo, la parete più "pesante" sarà anche più adatta a sfasare, cioè ritardare i picchi di temperatura giornaliera di qualche ora (per esempio durante la sera quando la temperatura esterna è più bassa rispetto al giorno), affinché il flusso entrante generi un confort interno anziché picchi di calore nell'ambiente indoor.

La ricerca negli ultimi anni si sta concentrando su particolari materiali che ottimizzano le fluttuazioni giornaliere della temperatura attraverso la riduzione dei picchi di calore interni, garantendo un risparmio energetico. Tra questi materiali troviamo i PCM (Phase Change Material). Queste sono sostanze organiche o inorganiche, di origine naturale o di sintesi, e vengono impiegate per accumulare e rilasciare energia termica grazie al passaggio di fase tra lo stato solido e liquido (e viceversa), sfruttando un elevato calore latente di fusione. I PCM sono in grado di accumulare il calore durante il giorno sottraendolo all'ambiente, rilasciandolo di notte [46]. La cessione del calore accumulato all'ambiente avviene durante il passaggio di stato ad un certo valore di soglia. Proprio per contenere questo passaggio di stato sono stati utilizzati dei sistemi di contenimento come il micro e macro incapsulamento, costituito da materiale inerte che non varia mai il suo stato fisico. È molto importante che la temperatura di soglia si aggiri intorno a quella di confort (di solito è intorno a 25°C) e che il volume del materiale sia adeguato per permettere la liquefazione e la solidificazione dell'intera massa. Risultati eccellenti sono stati raggiunti aggregando le nanosfere di PCM in pannelli di cartongesso o legno, nei sistemi di facciate trasparenti, in vari isolanti termici e anche nella pasta degli intonaci [46].

I materiali a cambiamento di fase si distinguono in:

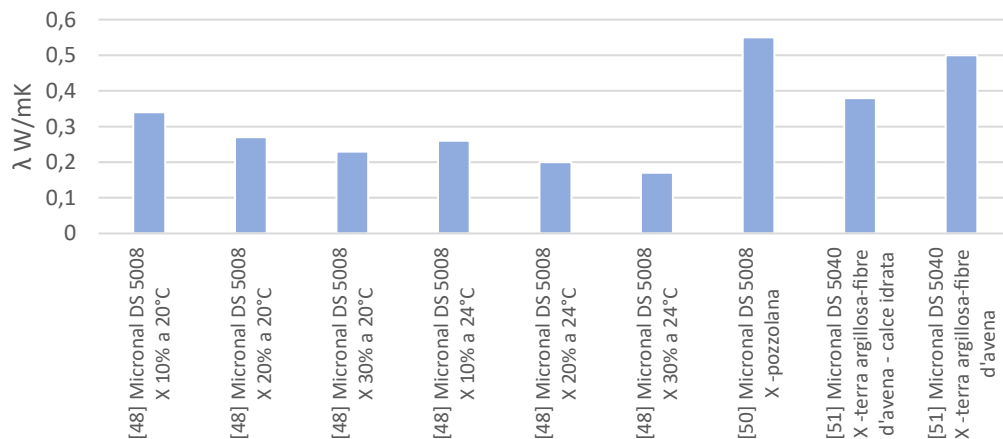
- ☒ organici: di cui fanno parte le paraffine, composti prodotti dalla raffinazione del petrolio che a temperatura ambiente hanno consistenza solida affine a quella della cera.



- ☒ inorganici: di cui fanno parte i sali idrati, sono meno costosi della paraffina, in questi composti inorganici non c'è un vero e proprio passaggio di fase, ma vi è un processo che consiste nell'idratazione e disidratazione del sale.
- ☒ eutettici: sono i meno presenti sul mercato e rappresentano delle miscele tra PCM. Possono essere organici-organici, organici-inorganici oppure inorganici-inorganici.

L'uso dei PCM negli intonaci serve ad aumentare l'inerzia termica del sistema parete per mantenere una temperatura di confort soprattutto nei climi caldi e in estate, ma in molte ricerche sono state raggiunte anche buone capacità di isolante termico. Molti sono gli studi nella letteratura scientifica che hanno come oggetto l'uso dei PCM nelle miscele d'intonaco. Zöller et al. [47] hanno aggiunto microcapsule di un PCM chiamato "Micronal®" alla miscela di un intonaco a base di gesso facendo un confronto tra un intonaco tradizionale e quello con i PCM usati all'interno della stessa stanza. È risultato che la temperatura della stanza con l'intonaco a capacità termica migliorata si è mantenuta superiore a 26°C solo 30 h contro le 160 h misurate con l'intonaco di gesso [47]. Jaworski et al. [48] si sono concentrati sulle proprietà termiche di intonaci a base di gesso che avevano diverse percentuali (10%-20%-30%) di Micronal® DS 5008 X, (paraffina con un punto di fusione a 23.5°C). La conduttività termica degli intonaci con di gesso è risultata variare da 0.35 W/mK a un minimo di 0.25 W/mK nel range di temperatura considerata dallo studio cioè da 19°C a 30°C con una riduzione all'aumentare di temperatura di circa il 30%. I valori di conduttività registrati con l'aggiunta del Micronal® sono risultati molto più bassi dell'intonaco a base di gesso di riferimento ( $\lambda$  che va da 0.1 W/mK a 0.3 W/mK) [48]. La malta con la concentrazione massima pari al 30% di PCM ha raggiunto valori di  $\lambda$  che vanno da 0.24 W/mK (a 19°C) a circa 0.07 W/mK (a 30°C) [48]. Pavlík et al. [50] hanno studiato le proprietà termiche di intonaci a base di calce aerea e pozzolana con l'aggiunta dello stesso PCM a base di paraffina usato nello studio precedente. La malta modificata dal PCM ha raggiunto valori di conduttività pari a 0.55 W/mK minore circa del 40% rispetto a quella senza il Micronal® (0.86 W/mK) [50]. Santos et al. [51] hanno condotto uno studio su intonaci a base di terra argillosa con parziale sostituzione della sabbia con i PCM e piccole quantità di fibre d'avena e calce idrata. La presenza delle microsfeere di Micronal® DS 5040 X e della calce aerea hanno ridotto la conduttività fino al valore di 0.38 W/mK, circa il 55% in meno rispetto al valore di un intonaco a base di terra cruda con aggregati tradizionali usato come riferimento (0.85 W/mK) [51].

Figura 10: conducibilità delle malte con PCM trovate



### 2.3.2.5 Gli intonaci a base di aerogel

#### Storia

L'aerogel, anche detto "fumo ghiacciato" o "fumo blu", è ad oggi la sostanza solida più leggera al mondo con una densità pari a  $3 \text{ kg/m}^3$ , composta al 99.8% di aria e dallo 0.2 % di silice amorfa, è conosciuto per la sua bassa conducibilità pari a  $0.014 \text{ W/mK}$  e anche per la sua elevata superficie specifica compresa tra 500 e  $1200 \text{ m}^2/\text{g}$ . Il termine "Aerogel" deriva dal fatto che il materiale proviene dal gel, ma in realtà esso è solido, rigido e asciutto [[55]-[56]-[79]-[80]]. La sua scoperta fu accidentale e risale al 1931 quando Samuel Steven Kistler, scienziato e ingegnere chimico, riuscì a vincere una scommessa fatta con il collega Charles Learned su chi fosse riuscito a sostituire il liquido contenuto nella "gelatina" senza causarne il collasso dovuto alla tensione superficiale esercitata dal liquido evaporante [[55]- [56]- [79]-[80]]. Lui ci riuscì sostituendo la fase liquida con un gas causando solo una leggera contrazione del gel. Kistler brevettò diversi aerogel, quello più comune e usato è quello a base di silice, ma ne preparò altri da vari materiali [82]. Il processo di produzione dell'aerogel usato da Kistler era molto lungo e dispendioso per questo non destò molto interesse fino al 1968, quando un team di ricercatori guidato dal professor Stanislaus J. Teichner dell'Università di Claude usò l'aerogel per lo stoccaggio del combustibile dei razzi [[81]-[82]]. Loro semplificarono la procedura utilizzata inizialmente da Kistler (che sintetizzava l'aerogel dal tradizionale processo sol-gel a bassa temperatura impiegando settimane per la produzione dell'aerogel) andando ad estrarre il solvente dal "wet gel" (proveniente dalla transizione sol-gel) attraverso l'essiccazione supercritica. La NASA utilizzò l'aerogel nei collettori della sonda Sturdust (nell'omonima missione spaziale) per campionare polvere interstellare proveniente dalla cometa Wild 2; le particelle stellari rimasero intrappolate nella struttura porosa dell'aerogel, e poterono essere analizzate grazie alla sua trasparenza [83]. La NASA condusse altre 2 missioni spaziali nel 1997, Mars Pathfinder e Mars Exploration Rovers, in cui adoperarono il nanomateriale per isolare parti elettroniche dei mezzi spaziali usati per l'esplorazione del pianeta rosso [83]. Da allora l'aerogel ebbe visibilità a livello mondiale e destò molto interesse soprattutto in ambito spaziale, nell'industria di elettrodomestici, nel campo delle sperimentazioni laser, nel campo dei combustibili e infine nel settore edilizio. L'aerogel a base di silice è quello più usato nei processi industriali, le sue caratteristiche di superisolamento lo rendono appetibile per il settore delle costruzioni e la sua ampia scala di applicazione nell'industria aerospaziale sta favorendo la crescita del mercato di silice a livello globale. Nel 2014 il mercato globale dell'aerogel ammontava a circa 250 milioni di euro con 10.680 tonnellate di nanomateriale prodotto, previsioni sul 2020 stimano che la cifra aumenterà fino ad arrivare a oltre 1700 milioni di euro con un tasso di crescita annuale del 36.4% [[92]-[93]]. Il settore dei combustibili è quello in cui il materiale è maggiormente utilizzato (74% del mercato globale), a seguire però troviamo il campo dell'isolamento termico ed acustico (8%) e il settore delle costruzioni (4%) [92]. Quello dell'isolamento rappresenta un mercato in via d'espansione (il mercato globale dei materiali isolanti nel 2014 ammontava a 34 miliardi di euro [92]) grazie al fatto che le direttive energetiche internazionali che diventano di anno in anno sempre più restrittive. Gli Stati Uniti sono il principale produttore di aerogel, mentre l'Europa è seconda in termini di produzione (ricopre il 36% del mercato globale nel 2014) [92]. Nonostante sia stato inventato molti anni fa, l'aerogel ha avuto molte difficoltà ad affermarsi nel mercato a causa principalmente del

costo elevato legato soprattutto al processo di sintesi del materiale. La crescente commercializzazione del materiale potrebbe però far scendere il prezzo al m<sup>3</sup> fino a 1500\$ (circa 1400€) nel 2020 (dal prezzo di 4000\$ al m<sup>3</sup> che si attestava nel 2012) [54].

La sintesi dell'aerogel può essere divisa in 3 fasi:

- ☒ la preparazione del gel attraverso il processo sol-gel: la matrice (il sol) è composta da una soluzione silicea (i solventi più utilizzati sono acetone, alcoli, diossano, tetraidrofurano) e attraverso l'aggiunta di catalizzatori (vari acidi tra cui il cloridrico, il solforico, l'acetico, il fluoridrico che possono essere aggiunti insieme ad un composto basico per ottenere il gel in tempi più ridotti) avviene la gelatura (il sol si trasforma in gel) [61]. Il sol è un liquido a bassa viscosità, quest'ultima aumenta gradualmente con l'avanzare del processo di gelificazione finché il materiale assume le caratteristiche di un solido elastico grazie all'interconnessione di un gran numero di particelle. La durata del processo di gelificazione dipende dal solvente, dal tipo di alcossidi utilizzati e dalla quantità d'acqua utilizzata per l'idrolisi[[80]-[84]].
- ☒ invecchiamento del gel: il gel preparato nella prima fase viene invecchiato nella sua soluzione madre per evitare che si restringa durante l'essiccazione [80].
- ☒ essiccamento: in questa fase, il liquido contenuto nei pori del gel invecchiato viene espulso. I piccoli pori del gel possono indurre al collasso l'intera struttura solida a causa di enormi forze capillari. L'evaporazione del liquido contenuto nel gel può avvenire in tre modi, e a seconda del tipo di essiccamento si possono avere diversi prodotti finali: essiccamento supercritico SCD, in cui il liquido contenuto nei pori è rimosso in condizioni di temperatura e pressione supercritiche del liquido interessato (le temperature supercritiche possono essere alte HTSCD o basse LTSCD, così come le pressioni a seconda del differente metodo di essiccamento supercritico) [80]. In questo caso non vi è nessuna tensione superficiale nell'interfaccia liquido-vapore e il prodotto finale sarà l'aerogel, caratterizzato da una bassa densità e una struttura altamente porosa. Il secondo metodo è l'essiccamento a pressione ambiente, in questo caso però la tensione superficiale tra il liquido e il vapore non può essere rimossa[80]. Il prodotto finale di questo essiccamento è lo xerogel o l'ambigel . il primo è un monolito semiporoso ottenuto dalla semplice evaporazione del solvente che dà luogo a ritiri del materiale e ad un cambiamento nella sua struttura [[80]-[85]]. Il secondo, a differenza dello xerogel, ha una bassa densità simile a quella dell'aerogel [[80]-[85]]. L'altro metodo è l'essiccamento tramite liofilizzazione (Freeze drying), qui la pressione capillare non gioca un ruolo importante perché non esiste come nel primo metodo una superficie di contatto tra la fase liquida e quella gassosa. Il liquido contenuto nei pori viene congelato e sublima sotto vuoto. Il materiale così ottenuto è chiamato cryogel. Comunque questo metodo risulta sconsigliato ed è il meno utilizzato, in quanto in alcuni casi la cristallizzazione del solvente nei pori causa dei danni alla rete dei capillari e quindi alla struttura del prodotto finale [80].

Gli aerogel sono caratterizzati da una rigidità che, a seconda della pressione esercitata può essere: elastica (a bassa pressione), plastica (a pressioni maggiori di una certa soglia che varia a seconda della composizione dell'aerogel), friabile e distruttiva a pressioni elevate (con una

frantumazione simile a quella del vetro) [86]. Oltre alle proprietà termiche di cui si è discusso all'inizio, l'aerogel possiede una natura igroscopica che lo rende un forte essiccante [[80]-[86]]. Il nanomateriale per sua natura è idrofilo a causa dei gruppi polari Si-OH presenti nella sua struttura in grado di promuovere l'assorbimento dell'acqua [[80]-[86]]. L'assorbimento di umidità può causare delle modificazioni all'interno del materiale, come la contrazione e il deterioramento [[80]-[86]]. Però, esistono due metodi per aumentare l'idrofobicità dell'aerogel: il primo è l'aggiunta di un agente all'interno della matrice che rende tutto il materiale idrofobo, il secondo consiste nel rendere repellente all'acqua solo la superficie dopo l'essiccamento. Quest'ultimo trattamento però lo rende più suscettibile al degrado rispetto al primo, soprattutto nel caso in cui una crepa penetri la superficie del materiale [[80]-[86]]. Schwertfeger et al. hanno constatato che, anche se idrofobizzato, l'aerogel esposto all'aria per un lungo lasso di tempo risulta assorbire lo stesso acqua [80]. Grazie alla loro composizione, pari a oltre il 99% di aria, il nanomateriale risulta essere un eccellente isolante acustico. La velocità del suono misurata nei blocchi di aerogel è minore di 40 m/s (nell'aria è circa 344 m/s) [61]. I blocchi di "fumo ghiacciato" idrofobo risultano essere non reattivi e non infiammabili, ecco perché è diffuso il suo uso come materiale ignifugo [61]. Al tatto l'aerogel si presenta come un solido semitrasparente, è detto anche "fumo blu" per la particolare colorazione azzurrognola semitrasparente che assume su sfondo scuro [86]. Questo fenomeno è chiamato "scattering di Rayleigh" e si verifica quando la dimensione delle particelle di un materiale sono simili alla lunghezza d'onda della luce incidente su di esso. Le piccole porosità all'interno dell'aerogel agiscono come "centri di scattering" [61]. Un'ultima attenzione va posta in merito all'impatto di questo materiale sulla salute umana, l'aerogel in commercio è composto da silice amorfa sintetica pura. Per l'Agenzia internazionale per la ricerca sul cancro (IARC) la silice amorfa sintetica non è considerata cancerogena per l'uomo, appartiene per questo motivo al Gruppo 3 (di cui fanno parte le sostanze non classificabili come cancerogene per l'uomo) [61]. Infatti, dagli studi epidemiologici condotti sui lavoratori che hanno avuto una lunga esposizione alla sostanza non è stata riscontrata alcuna presenza di silicosi e anche dalle analisi condotte sugli animali la silice amorfa è stata completamente eliminata dai polmoni [61]. L'INAIL (istituto nazionale per l'assicurazione contro gli infortuni sul lavoro) individua solo le forme cristalline della silice come responsabili di patologie a carattere invalidante per i lavoratori [87]. L'agenzia statunitense Food and Drug Administration (FDA) ne autorizza l'uso come eccipiente negli alimenti industriali e l'EFSA (European Food Safety Authority) lo classifica come un additivo alimentare (additivo E 551) [[88]-[89]].

L'aerogel fa parte di quei materiali detti "superisolanti", di cui fanno parte anche i VIP (Vacuum Insulation Panels). Questa classificazione dipende soprattutto dalla conduttività termica. Infatti, mentre i tipici isolanti in commercio oggi hanno una  $\lambda$  che si aggira intorno a 0.03-0.05 W/mK, i materiali "superisolanti" o "ad alte prestazioni d'isolamento" sono quelli che hanno come limite di conduttività 0.02 W/mK. L'aerogel deve la sua bassa conducibilità alla struttura porosa. Infatti è la sostanza meno densa (0.004-0.6 g/cm<sup>3</sup>) conosciuta con circa il 99.8% d'aria e solo il 0.2% di silice amorfa (la principale componente del vetro). All'interno dell'aerogel i pori hanno

diametri diversi e in base alla loro dimensione si dividono in: micropori, mesopori e macropori [80]. I mesopori costituiscono la maggior parte delle cavità presenti nella nanostruttura solida del materiale (quasi il 90%) con una dimensione compresa tra i 4 e i 20 nm. I pori limitano il trasporto convettivo e conduttivo del calore in quanto le loro dimensioni sono paragonabili o più ristrette rispetto al cammino libero medio delle particelle d'aria contenute al loro interno; quindi la cavità limita il movimento delle particelle di gas, le quali urtano alle pareti dei pori con più frequenza di quanto non lo facciano tra di loro (effetto Knudsen). Questo fa sì che la conduttività dell'aria, subisca una drastica diminuzione fino ad arrivare a valori intorno a 0.005 W/mK nei mesopori del gel. Anche la bassa densità, come detto, gioca un ruolo fondamentale in quanto la bassa presenza della parte solida (silice) fornisce percorsi limitati per la conduzione di calore attraverso di essa [[54]-[55]-[56]-[57]].

L'aerogel negli ultimi anni si sta facendo strada anche nel mondo dell'edilizia, grazie alla sua proprietà di super isolamento. Il nanomateriale è ancora impiegato poco rispetto agli isolanti tradizionali a causa del suo costo elevato (per raggiungere una  $U=0.2 \text{ W/m}^2\text{K}$  vengono impiegati 7.5 cm di aerogel con una  $\lambda=0.015 \text{ W/mK}$  il cui costo si attesta intorno ai 250€/m<sup>2</sup>) [54]. Ecco perché gli impieghi nel campo delle costruzioni riguardano molto poco la nuova costruzione e si concentrano invece su:

- ☒ rinnovo degli edifici storici
- ☒ protezione termica dei balconi
- ☒ luoghi in cui il guadagno di spazio compensa il costo aggiuntivo dell'aerogel, come per esempio in centro città.

L'aerogel può essere usato sotto 3 forme diverse [54]:

- ☒ aerogel monolitico: con spessore maggiore di 1 cm, può essere opaco oppure traslucido, quest'ultima tipologia trova impiego all'interno dei vetri dei serramenti riuscendo a ridurre la trasmittanza di una finestra a doppio vetro fino a 0.5 W/m<sup>2</sup>K;
- ☒ materiale sfuso: proviene da blocchi monolitici finemente tritati, i pezzetti possono avere diametro di circa 1 cm oppure può trattarsi di polveri con diametro di 1 mm, possono essere usati come riempitivo delle casse vuote degli edifici;
- ☒ materiale composito: costituito da aerogel con almeno un additivo incorporato nel gel aggiunto durante oppure dopo la sintesi come ad esempio fibre di varia natura che hanno permesso di creare pannelli flessibili per ovviare ad alcuni problemi di posa tipici dei pannelli rigidi.

I materiali compositi a base di aerogel stanno avendo un grande riscontro nel mondo edilizio, appunto per via delle sue caratteristiche. Dal 2010, per esempio, la Rockwool, ha annunciato il lancio sul mercato di un pannello rigido chiamato Aerowool® costituito da una matrice in lana di roccia combinata con aerogel la cui conduttività termica dichiarata dal produttore è pari a 0.019 W/mK [54]. Un altro pannello in aerogel reperibile sul mercato è Speceloft® sviluppato da Aspen Aerogels, Inc, è un pannello flessibile rinforzato con fibre feltrate con uno spessore di 10mm e una conducibilità termica dichiarata di 0.013 W/mK a 0°C il cui costo si aggira intorno ai 25€/m<sup>2</sup> (alto se consideriamo che un isolante sintetico parte dal costo di 6,50 €/m<sup>2</sup>, e uno minerale da 3,50 €/m<sup>2</sup>) [[59]-[61]].

Un'altra applicazione dell'aerogel che sta prendendo sempre più piede è l'impiego nel campo degli intonaci e delle rasature ad alte prestazioni termiche la cui applicazione può essere effettuata con le usuali macchine per intonaci [[54]-[58]]. La specificazione sulle macchine non è casuale, studi infatti [65-66] hanno dimostrato che la conducibilità degli intonaci a base di aerogel peggiora (e quindi aumenta) quando la stesura dell'intonaco avviene per mezzo delle macchine piuttosto che manualmente. Questo può essere spiegato dal fatto che quando si usa una macchina da spruzzo, l'alta pressione provoca un danneggiamento della struttura dell'aerogel e un'intrusione di molecole d'acqua nei nanopori dei granuli, il liquido intrappolato nelle cavità del nanomateriale impiega molto tempo ad asciugarsi. Dallo studio condotto da Th.Stahl et al. [70] è emerso come la sostituzione del cemento come legante riduca questa dipendenza della conduttività dalla pressione di applicazione. Tre diverse miscele di termointonaci: A (a base di cemento), B (senza cemento) e C (senza cemento ma con un mix non specificato), sono state sottoposte a differenti pressioni comprese tra 0 e 8 bar. La conducibilità del mix A aumentava drasticamente con l'aumentare della pressione (da circa 0.025 W/mK a 0 bar fino a 0.055 W/mK a 8 bar), mentre le altre avevano una minor dipendenza dall'aumento della pressione (il mix B ha avuto un leggero aumento da 0.030 W/mK a 0 bar fino a poco più di 0.035 W/mK a 8 bar, mentre la conducibilità della miscela C è rimasta pressoché identica a tutte le pressioni) [70].

Dall'analisi nella letteratura scientifica del settore è emerso che sono stati brevettati due intonaci isolanti a base di nanomateriali che sono: quello a base di leganti minerali e/organici con granuli di xerogel idrofobo (Achard et al. [69], brevetto numero WO/2011/083174 [91]), e l'altro invece è a base di calce con granuli di aerogel sviluppato dall'Empa (Swiss Federal Institute for materials Science and Technology) insieme all'azienda Fixit. Il nome del prodotto è Fixit\_222® (brevetto numero WO 2014/090790 [90]) e ad oggi si trova sul mercato. Utilizza più del 50% in volume di aerogel con una conducibilità termica pari a 0.028 W/mK e una densità a secco di 220 kg/m<sup>3</sup>. Il termointonaco dell'azienda svizzera negli ultimi anni ha avuto un calo di prezzo, attualmente infatti un sacco da 50 litri è compreso tra 100 e 150€, ovvero 2 o 3€ per chilogrammo secco così da presentarsi come una valida alternativa agli altri tipi di termointonaci [[54]-[58]-[59]]. Buratti et al. [60] hanno studiato le proprietà termiche di intonaci naturali a base di calce idrata con aggiunta di granuli di aerogel a base di silice in tre percentuali diverse (T1:80-90%; T2:91-95%; T3:96-99%). La conduttività della malta di riferimento a base di calce idrata risulta essere pari a 0.5 W/mK e una densità di circa 2200 kg/m<sup>3</sup>. Con la più bassa percentuale di aerogel aggiunta in questo studio (circa 90% in volume) la  $\lambda$  è diminuita fino ad arrivare a 0.05 W/mK con una  $\rho$  pari a 275 kg/m<sup>3</sup>. L'incremento della percentuale di aerogel ha fatto scendere il valore di  $\lambda$  fino a un minimo di 0.014 W/mK (con il 99% di granuli) e una  $\rho$  pari a 115 kg/m<sup>3</sup> quindi il 95% in meno rispetto a quella di riferimento [60]. Il costo di un intonaco a base di calce naturale si attesta intorno a 2€/m<sup>2</sup>(con uno spessore di 1 mm). Invece il costo di un termointonaco con percentuali di aerogel a base di silice pari all'80% si aggira intorno ai 10€/m<sup>2</sup>(s=1mm) [60]. Uno spessore più alto di 5 mm non è economicamente vantaggioso (per 1 cm di spessore il costo si aggira intorno ai 90€/m<sup>2</sup>), ma 2-3 mm di termointonaco a base di aerogel bastano per apportare una significativa riduzione delle trasmissioni di calore attraverso l'involucro [60].

Per quanto riguarda invece le miscele a base di leganti idraulici, il gruppo di ricerca BeTOP dell'università di Ryerson in collaborazione con ricercatori e studenti dell'Università di Bologna



hanno testato delle miscele di calcestruzzo leggero additivati con aerogel in varie percentuali (30%-33%-36%) e cemento Portland [[59]-[104]]. La conducibilità dei campioni di riferimento era compresa tra 1,7 e 2.5 W/mK. L'aggiunta dell'aerogel ha migliorato le caratteristiche termiche fino ad arrivare a un minimo di 0.15 W/mK [[59]-[62]-[104]]. Oltre a testare le miscele di calcestruzzo leggero, il team dell'università di Ryerson ha anche prodotto dei mix di intonaci a base di calce idraulica naturale e granuli di aerogel con differenti percentuali (da 25 a 70%); dai risultati il mix con le migliori proprietà termiche ottenute risulta essere stato quello composto dalla NHL con il 70% di granuli di aerogel con una conducibilità di 0.03 W/mK [104]. Liu et al. [63] invece hanno impiegato granuli di aerogel idrofobo a base di silice sostituendolo all'aggregato tradizionale (in percentuali dal 10% al 60%) di malte cementizie. L'aggiunta del nanomateriale alla pasta ha fatto diminuire la sua densità fino a un minimo di circa 1200 kg/m<sup>3</sup> (con il 60% di aerogel), valore minore del 40% rispetto a quello della malta di riferimento (2000 kg/m<sup>3</sup>). Per quanto riguarda invece le proprietà termiche, i risultati della conduttività variano da un massimo di 0.5 W/mK (con il 10% di aggiunta dei granuli) fino a un minimo di 0.15 W/mK con la massima percentuale di nanomateriale, che però resta molto alta rispetto alle previsioni dei ricercatori [63]. I due studi trovati che trattano l'inserimento dell'aerogel nelle paste a base di cemento hanno raggiunto i medesimi valori di conduttività (intorno allo 0.15 W/mK) che, tra gli studi analizzati [[64]-[65]-[66]], risultano essere le migliori in termini di proprietà termiche. Però questi valori rimangono ancora alti, è molto probabile che la matrice cementizia utilizzata in queste ricerche non sia omogenea o che l'introduzione dell'aerogel alteri la struttura interna della malta o ancora, per ottenere delle conducibilità basse bisogna usare delle percentuali molto alte (>90% in volume) come nello studio fatto da Buratti nelle malte naturali [60]. Risultati migliori però sono stati raggiunti con l'aerogel a base di silice usato nelle paste cementizie sotto forma di polvere. Khamidi et al. [67] hanno testato le proprietà termiche e meccaniche di provini cubici di calcestruzzo a base di OPC (Cemento Portland ordinario) aventi dimensione 50mmX50mmX50mm con quattro diversi quantitativi di polvere di aerogel: 5 ml (M5), 10 ml (M10), 15 ml (M15), 20 ml (M20). Dai test è risultato che la polvere di aerogel ha avuto l'effetto di diminuire la conduttività della pasta cementizia con molta più efficacia rispetto ai granuli citati sopra. Infatti, già dalla più bassa concentrazione (M5), la  $\lambda$  risulta pari 0.17 W/mK (valore che è molto vicino a quello riscontrato nei provini degli studi precedenti aventi però la massima concentrazione del nanomateriale in forma granulosa) fino ad arrivare a un minimo di 0.076 W/mK nella miscela M20. Quest'ultima risulta minore del 94% rispetto alla malta senza l'aerogel (1.19 W/mK) [67]. Kim et al. [68] hanno usato la polvere di aerogel nelle paste cementizie in varie percentuali (dallo 0.5 al 2% in peso) e hanno rimpiazzato gli aggregati tradizionali con il 20% di pozzolana misurando una conduttività minima di 0.1 W/mK (con il 2% in peso di polvere e il 20% di pozzolana) rispetto a quella della pasta cementizia di riferimento pari a 0.53 W/mK.

Dopo aver chiarito alcune differenze nei termointonaci a base di aerogel, è opportuno passare al loro campo d'applicazione in diversi scenari. Nei primi capitoli è stato sottolineato il fatto che quando si ha a che fare con edifici storici o che comunque hanno pareti datate è opportuno usare degli intonaci a base di leganti aerei che siano meccanicamente compatibili con i muri preesistenti in modo da proteggerli senza provocare danni, e anche nel caso dei termointonaci a base di aerogel vale questa regola.

In una ricerca che presenta alcune affinità con la presente tesi, è stato studiato l'effetto che un termointonaco a base di aerogel ha sul risparmio energetico e il confort interno di edifici di vecchia (dal 1948 al 1975) e di nuova costruzione (dal 1990 in poi) [72]. È risultato che l'applicazione del materiale super-isolante ha molto più effetto sugli edifici non isolati (<1975) dove la riduzione dei consumi energetici è molto più accentuata (i consumi in termini di kWh/m<sup>2</sup> nella maggior parte dei casi analizzati vengono dimezzati) e il rischio di discomfort dovuto al surriscaldamento nel periodo estivo è minimo (non eccede il 16% del tempo di occupazione delle case secondo il 90% degli occupanti soddisfatti). Mentre negli edifici di nuova costruzione (>1990) già isolati, l'applicazione del termointonaco non apporta dei grandi miglioramenti in termini energetici (non si eccede mai un miglioramento dei consumi pari al 30%), anzi la sua adozione risulta economicamente sveniente. In un clima Mediterraneo e durante la stagione estiva, negli edifici già isolati si verifica il fenomeno del surriscaldamento (che provoca un discomfort interno che, secondo il 90% degli occupanti, va oltre il 70% del tempo di occupazione) dovuto al fatto che la dissipazione del calore dall'interno delle abitazioni all'esterno risulta molto difficile se l'involucro è molto isolato [72].

Un altro importante aspetto che bisogna tenere in considerazione è l'interazione tra la superficie del materiale e l'umidità presente nell'ambiente abitato. L'umidità interna è un importante parametro per determinare la percezione che l'occupante ha della qualità interna degli ambienti, ed è anche la principale causa di alcuni processi dannosi che possono verificarsi sulle superfici dei materiali da costruzione, come la crescita microbica. E quindi l'umidità ha un duplice impatto, sulla durabilità del materiale e soprattutto, sulla salute degli occupanti. Tutti i materiali sono caratterizzati microscopicamente da una rete di pori e capillari, all'interno dei quali è presente aria, vapore e acqua in movimento strettamente in correlazione con le condizioni di temperatura e U.R dell'ambiente con cui sono a contatto. Materiali in grado di "adsorbire"<sup>6</sup> e rilasciare grandi quantità di vapore dagli ambienti sono definiti igroscopici [73]. Questi materiali fungono da "tampone igroscopico" (Moisture Buffering) risultando in grado cioè di prelevare umidità dall'ambiente circostante ed immagazzinarla nelle proprie cavità, per poi rilasciarla una volta che l'umidità dell'ambiente è diminuita, contribuendo a migliorare le condizioni igieniche e il confort interno [73]. Tra questi materiali ricordiamo il mattone, il cemento cellulare, il gesso, il legno, l'intonaco in sé, ma anche l'aerogel, grazie alla sua elevata porosità è considerato un Moisture Buffering. In particolare, alcuni studi si concentrano sull'efficacia dei prodotti a base di aerogel per migliorare la salubrità dell'aria indoor. Tra questi ricordiamo la ricerca fatta da Fantucci et al. [74] che si concentra sull'efficacia delle termorasature a base di aerogel per prevenire la crescita di muffe. I risultati dello studio confermano che l'applicazione di 12 mm di termorasante "R4" (a base di aerogel e altri LWA minerali) applicato nel centro parete di un edificio storico (quindi precedentemente non isolato) può aumentare la temperatura superficiale interna di circa 1.4°C con il conseguente abbassamento della U della parete di circa il 27% rispetto alla parete usata come riferimento (da 1.22 W/m<sup>2</sup>K a 0.9W/m<sup>2</sup>K dopo l'applicazione della termorasatura) [74]. L'innalzamento della temperatura superficiale di parete aumenta il

---

<sup>6</sup> Per "adsorbimento" si intende il processo per il quale le molecole di una sostanza, gassosa o liquida, possono fissarsi sulla superficie porosa di un corpo solido



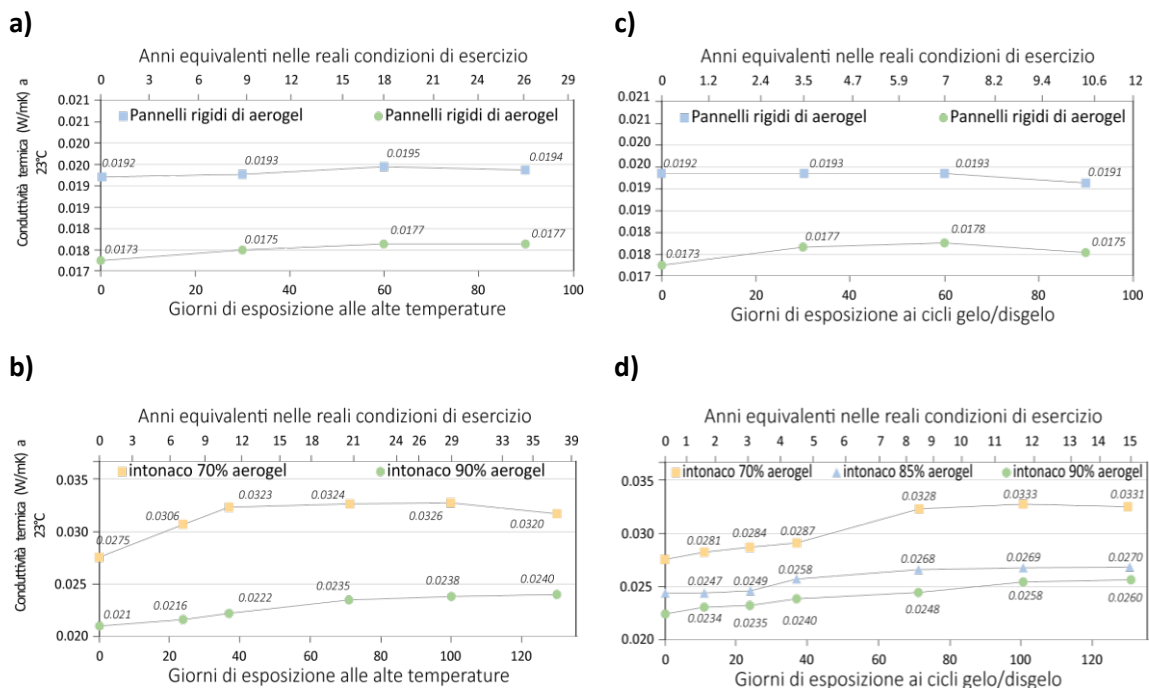
confort interno e riduce il rischio di condensa superficiale e di crescita microbica. Inoltre, la riduzione di circa il 30% del calore disperso attraverso il centro parete durante l'inverno va anche abbassare la domanda energetica di riscaldamento [74]. Un'altra analisi sul campo è stata quella di applicare la termorasatura sempre con lo stesso spessore di 12 mm in prossimità del nodo parete-finestra, in quanto la zona più affetta dalla presenza del ponte termico e sulla quale erano stati riscontrati fenomeni di condensa soprattutto a umidità relative interne del 70% (per il 30% del tempo di occupazione la  $T_{si}$  era al di sotto del punto di rugiada della  $T_{ambiente}$ ) [74]. Con l'applicazione del termorasante il rischio di condensa al 70% di U.R è stato neutralizzato in quanto la temperatura superficiale del punto critico è stata innalzata di circa 1.6°C rispetto a quella di riferimento (compresa tra 17.5°C e 18°C nel punto più prossimo alla finestra e quindi il più freddo) mantenendosi al di sopra del punto di rugiada [74].

Come è stato evidenziato nelle precedenti pagine, i termointonaci a base di aerogel offrono delle considerevoli resistenze termiche rispetto ai tipici isolanti reperibili sul mercato, per questo la loro futura applicazione nel campo edilizio sembra essere molto promettente. Però, in quanto materiale piuttosto recente nel settore, non è stato possibile esaminare affondo le sue prestazioni a lungo termine. Quindi, su come reagisca il materiale ad alcuni fattori ambientali (elevate temperature, cicli di gelo/disgelo, sbalzi termici e variazioni intense di umidità) non si conosce ancora molto. Per questo, Nosrati et al. [75] si sono concentrati sull'analisi delle performance a lungo termine dei materiali a base di aerogel esponendo vari prodotti a base aerogel a differenti stress climatici, molte volte eccedendo le condizioni d'uso effettive. Attraverso questi test "d'invecchiamento accelerato" è stato possibile comprendere il comportamento a lungo termine e l'aspettativa di vita dei prodotti a base del nanomateriale in tempi significativamente più brevi. I risultati ottenuti sulle prestazioni a lungo termine sono stati espressi in termini di variazioni della conducibilità termica. Nello specifico i test condotti sono stati 2: invecchiamento ad alte temperature, invecchiamento dovuto a cicli di gelo/disgelo per valutare l'azione dei cicli termici.

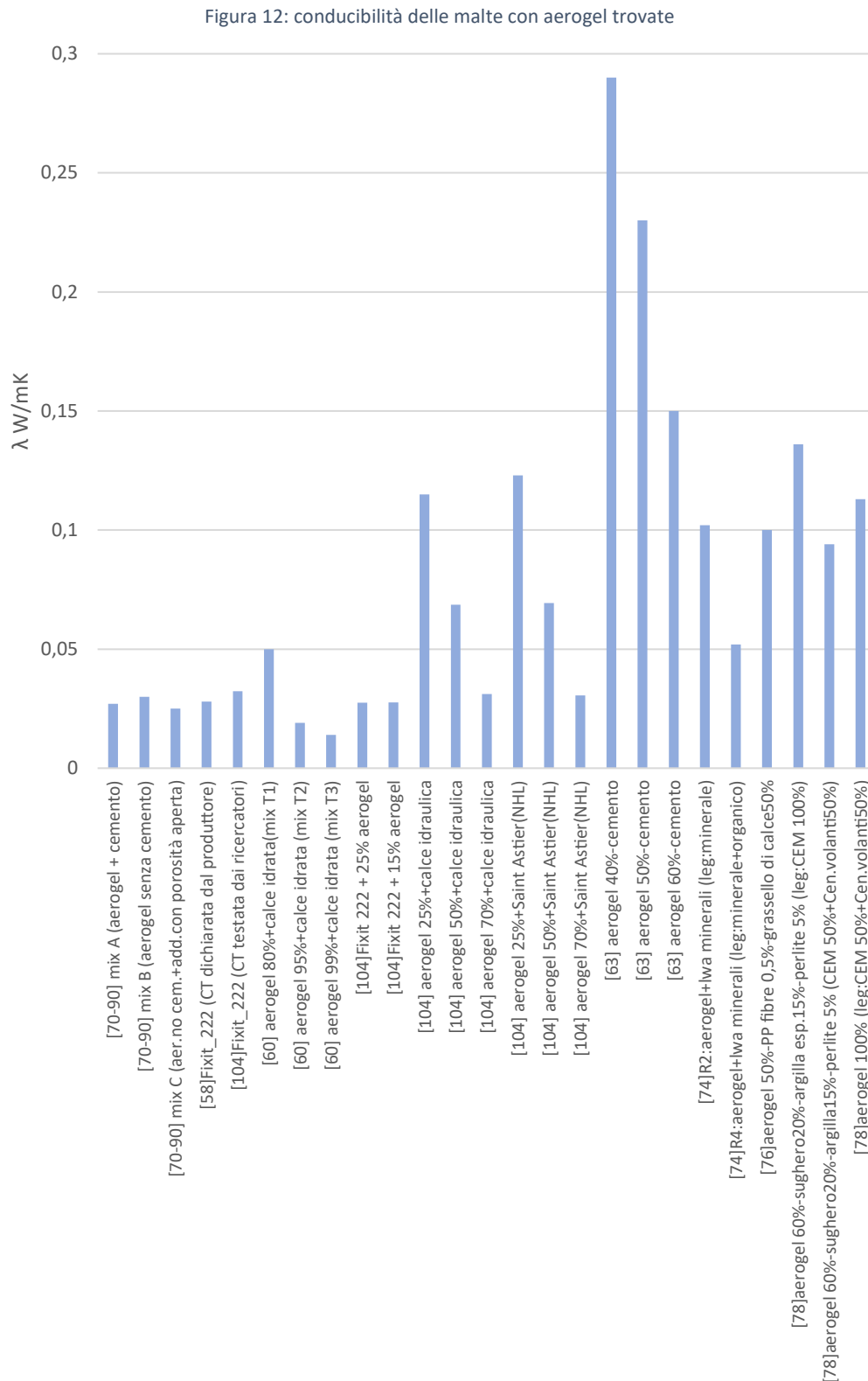
Questi test sono stati condotti su 3 tipologie di prodotti rinforzati con aerogel: pannelli rigidi a base di gesso e quelli a base di ossido di magnesio, pannelli flessibili a base di fibre, e 3 intonaci di cui uno commerciale (FIXIT 222) e due a base di calce idraulica naturale e aerogel (in percentuali comprese tra 25% e 95%) prodotti dagli studiosi per simularne il comportamento. L'analisi a lungo termine ha mostrato un simile comportamento per i pannelli rigidi e flessibili, entrambi non hanno riscontrato una forte variazione della conducibilità nei primi due test (invecchiamento ad alte temperature e a cicli di gelo disgelo Figura 11a-c). Mentre, per quanto riguarda i termointonaci, dalle analisi è emerso che la resistenza termica ha subito una riduzione con l'avanzare del tempo poco più accentuata rispetto ai pannelli [75]. Durante i test ad alte temperature (Figura 11.b), la conducibilità è aumentata del 15% nei primi 40 giorni di esposizione (equivalenti circa 12 anni di uso reale) negli intonaci con il 70% di aerogel passando da 0.0275 W/mK a 0.0323 W/mK per poi assestarsi intorno a questo valore fino alla fine dei giorni di esposizione [75]. Gli intonaci con maggior quantitativo di aerogel (90% in volume) sono risultati meno sensibili alle alte temperature registrando una minima variazione del 5% dopo i 40 giorni (passando da 0.021 W/mK a 0.0222 W/mK) per poi aumentare del 7.5% alla fine dei 130 giorni (passando da 0.0222 W/mK a 0.024 W/mK) [75]. La differenza tra i due tipi d'intonaco sta nel tempo in cui le prestazioni subiscono un decadimento, per il primo tipo di intonaco (con quantitativi di aerogel del 70%) si verifica una diminuzione delle proprietà termiche abbastanza repentina nei primi 12 anni

di esercizio per poi assestarsi sul valore di 0.032 W/mK, nel secondo tipo (con quantitativi di aerogel del 90% in volume) il calo delle performance avviene gradualmente e in maniera meno accentuata rispetto al primo. Risultati differenti sono stati raggiunti con i test d'invecchiamento causati da cicli climatici (gelo-disgelo Figura 11.d) effettuati sui diversi intonaci. Infatti, dalle prove è risultato che i termointonaci siano molto più sensibili ai cicli di gelo/disgelo rispetto alle alte temperature. Dopo solo 70 cicli (che corrispondono a 8 anni di esposizione nelle condizioni climatiche reali) la conduttività di ogni termointonaco supera i valori raggiunti dopo 40 anni di esposizione alle alte temperature, però comunque si raggiungono conducibilità che rimangono sempre intorno al valore di 0.03 W/mK (Figura 11.d) [75].

Figura 11: Invecchiamento ad alte temperature pannelli(a), intonaci(b); Invecchiamento ai cicli climatici pannelli(c), intonaci(d) (fonte: [75]-rielaborazione grafica)



L'aerogel è un materiale che in futuro potrà essere usato ampiamente nel settore dell'edilizia grazie alle sue incredibili caratteristiche di isolante termico, moisture buffering e leggerezza. Per adesso rimane ancora qualche perplessità in merito al costo e alle sue proprietà meccaniche, che nella maggior parte degli studi trovati non sono state approfondite fino in fondo. In alcune ricerche è stato sottolineato il fatto di usare l'aerogel insieme ad altri materiali quali fibre polimeriche, o minerali come perlite o di origine naturale come il sughero e argilla espansa serve ad aumentare le caratteristiche di resistenza a compressione e flessione [[74]-[76]-[77]-[78]]. Inoltre, il mix di materiali, insieme alla diminuzione dello spessore sembra essere la soluzione attuale per abbassare il costo. Un'altra considerazione in merito al prezzo è il fatto che in quanto nuovo materiale, non è ancora molto diffuso, è quindi possibile che man mano il suo uso si allargherà al mercato edilizio, maggiori quantità di produzione contribuiranno ad una diminuzione del costo.

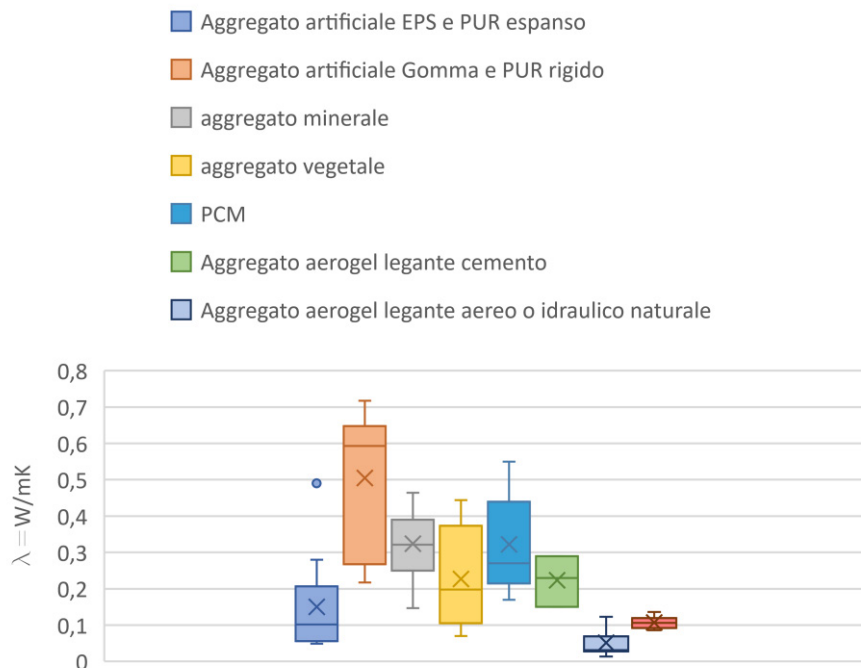


#### 2.3.2.6 Caratteristiche dei termointonaci della letteratura scientifica

Le ricerche compiute nell'ambito della letteratura scientifica del settore hanno delineato un quadro generale delle caratteristiche dei termointonaci con aggregati leggeri (Figura 13). Dagli

studi analizzati (Tabella 49) è emerso che l'intonaco più prestante dal punto di vista termico è quello con l'aerogel, con il quale si raggiungono valori minimi di conduttività intorno allo 0.02 W/mK, laddove le percentuali di questo materiale sono molto elevate [60]. Con concentrazioni minime di nanomateriale e leganti idraulici (soprattutto con il cemento Portland) nei termointonaci si sono riscontrate conduttività maggiori legate molto probabilmente al fatto che il cemento ha un'elevata conduttività (Tabella 2) rispetto a quella dell'aerogel. Successivamente, in termini di prestazioni termiche, dopo gli intonaci che impiegano un mix di LWA, troviamo i termointonaci con LWA artificiale. In particolare, quelli che usano l'EPS o il PUR nella sua forma espansa [22] (registrando un minimo rispettivamente di  $\lambda=0.049$  W/mK e 0.06 W/mK) [[96]-[100]-[25]]. Infine troviamo gli intonaci con i materiali a cambiamento di fase che presentano dei picchi di conducibilità intorno a 0.6 W/mK, ma riguardo questi materiali, come espresso nelle pagine dedicate a questo particolare tipo di LWA, c'è da sottolineare il fatto che il loro ruolo principale è quello di andare a smorzare le fluttuazioni interne di temperatura riducendo i picchi soprattutto nelle stagioni e nei climi caldi, assicurando così il confort interno dell'occupante.

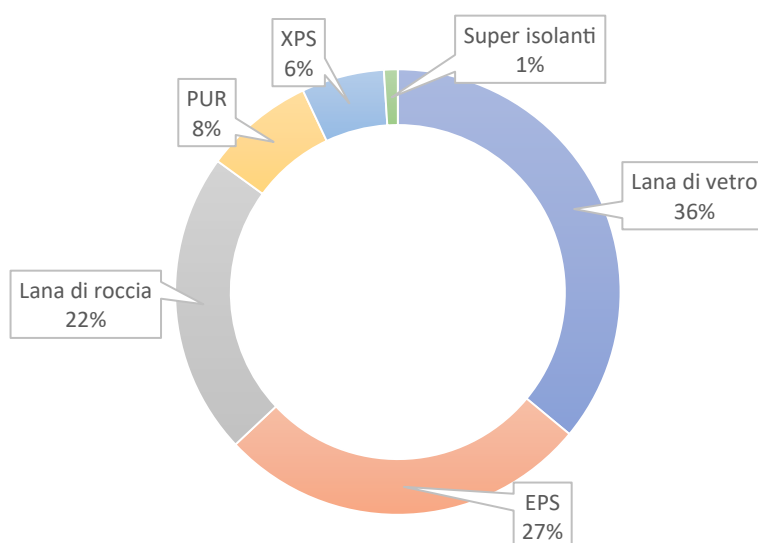
Figura 13: confronto tra le conducibilità delle malte con i vari LWA



## 2.4 Analisi di Mercato

L'impatto che un materiale può avere all'interno del mercato dipende sostanzialmente dalla prestazione che esso è in grado di fornire in base al suo costo. Ecco perché oggi il mercato europeo (Figura 14) e quello mondiale sono dominati da materiali inorganici derivati da minerali (ad esempio lana di roccia e vetro) e da materiali derivati da combustibili fossili organici (come le forme espanse di polistirene e poliuretano) che offrono buone proprietà isolanti legate ad un costo contenuto.

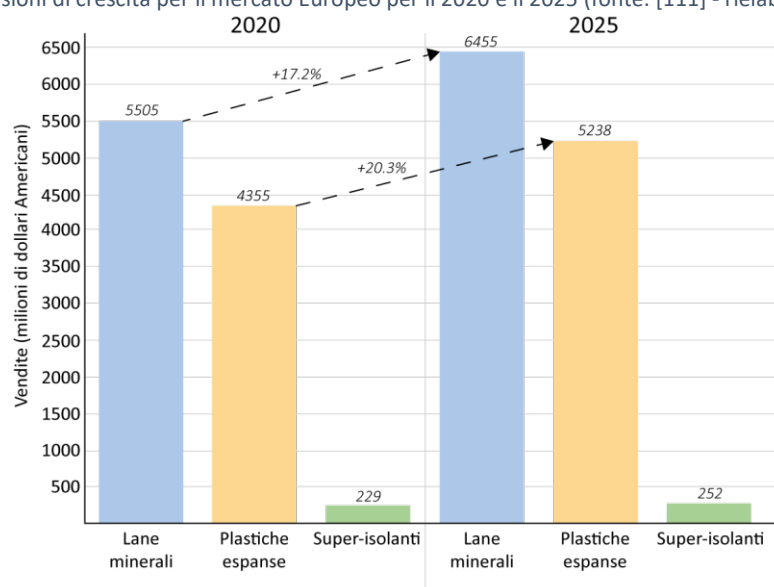
Figura 14: mercato Europeo degli isolanti (2014)- (fonte: [111]– rielaborazione grafica)



Si stima infatti che il mercato delle lane minerali nel 2025 (Figura 15) crescerà del 17.2% rispetto al 2020 arrivando a 6455\$ milioni, mentre quello delle materie plastiche espanse, con un aumento del 20.3% previsto per il 2025, arriverà a 5238\$ milioni [111].

Affianco a questi isolanti occupano una piccola fetta del mercato (Figura 14) quei materiali innovativi con caratteristiche di isolamento termico migliori rispetto a quelle degli altri prodotti in commercio (i cosiddetti “super-isolanti” come ad esempio: VIP e aerogel), ma con prezzi decisamente superiori per cui non è stata possibile una loro affermazione sul mercato. Negli ultimi anni però, l’aerogel viene impiegato sottoforma di aggregato sfuso in particolari intonaci ad alte prestazioni termiche. Di solito viene usato insieme ad altri tipi di aggregati per diminuire il costo del prodotto. L’entrata nel campo edilizio di questi intonaci termici ha permesso di affrontare i problemi riguardanti i consumi energetici degli edifici, con il vantaggio di avere una facile applicazione in situ analoga a quella dei tradizionali intonaci, una buona adesione anche su superfici curve o non allineate, dove un pannello rigido poco si adatterebbe. Un altro vantaggio del termointonaco è il ridotto spessore che consente di salvare spazio (aspetto che risulta importante soprattutto nei grandi centri urbani e per il retrofit interno).

Figura 15: previsioni di crescita per il mercato Europeo per il 2020 e il 2025 (fonte: [111] - rielaborazione grafica)



Barbero et al. [112] hanno condotto una ricerca per comprendere lo scenario degli intonaci termoisolanti al fine di definire i requisiti necessari affinché un termointonaco potesse essere competitivo sul mercato Europeo del 2014. Per far questo hanno unito le performance dei vari prodotti al loro costo [112]. Alla fine, i ricercatori hanno individuato **31 termointonaci** sul mercato europeo divisi in tre famiglie in base al tipo di legante [112]:

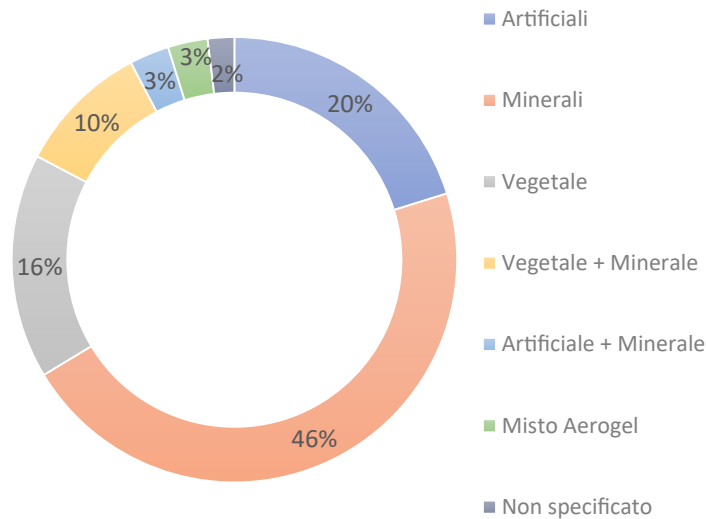
- ☒ 14 intonaci isolanti a base di legante cementizio e/o artificiale con aggregati plastici o minerali (tipo polistirene vergine o polvere diatomeica e silicea)
- ☒ 8 prodotti a base di legante cementizio e aggregati minerali espansi (tipo perlite)
- ☒ 9 termointonaci a base di calce idraulica naturale NHL

Nel 2017, a distanza di 3 anni è stata condotta in una tesi di laurea magistrale un'altra indagine di mercato in cui sono stati individuati **70 prodotti**, a riprova del crescente interesse verso i termointonaci [113].

Da un'indagine personale condotta on-line, ad oggi il dato rispetto al 2017 è aumentato fino a 104 prodotti (Tabella 50, i prodotti evidenziati sono frutto dell'indagine personale), **34 in più** rispetto al precedente lavoro, e continuerà a crescere nei prossimi anni anche perché molti intonaci sono in fase di sperimentazione. I produttori sono per la maggior parte europei.

Da come si può evincere dalla Figura 16, ad oggi il 46% degli intonaci isolanti sul mercato utilizza aggregati minerali, il più usato (ove specificato) è la perlite. A seguire troviamo i termointonaci con LWA artificiali che costituiscono il 20% dei prodotti trovati, dove le perle di EPS costituiscono la maggior parte degli LWA di questa tipologia (sia vergini che riciclate). Sughero e canapa invece sono gli inerti più usati negli intonaci vegetali. Emergono sviluppi nel campo degli intonaci a base di aerogel. Infatti, mentre nella letteratura scientifica del settore si è sempre indicato come unico intonaco a contenere aerogel il Fixit\_222 [90], oggi esistono altri due intonaci "Orbith 028" e "Orbith 036" [206], prodotti a partire dal 2017 dalla Dracholin [209], un'azienda tedesca. I due intonaci appena menzionati insieme alla Perlite e ad altri aggregati minerali contengono anche granuli di aerogel in diverse quantità non specificate dal produttore.

Figura 16: Suddivisione degli intonaci isolanti in base alla natura dell'aggregato leggero utilizzato (dato aggiornato rispetto al riferimento [113])



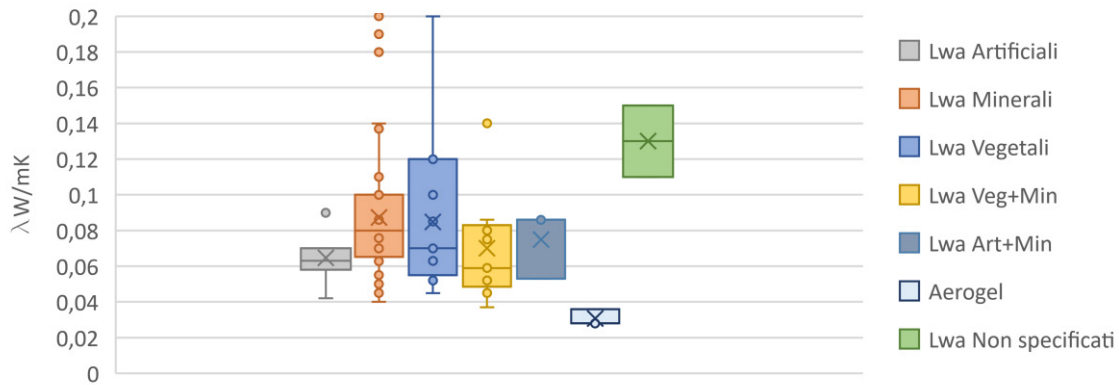
Un'attenzione particolare va posta poi sui PCM, nonostante non siano stati trovati degli intonaci che li usassero in forma di aggregati, molte fonti accreditate indicano il fatto che alcuni intonaci con i materiali a cambiamento di fase sono stati prodotti per la vendita in passato. In particolare l'azienda Maxit ha prodotto un intonaco a base di gesso che incorpora PCM chiamato "Maxit clima®" [[210][211]]. Questa malta è stata sviluppata tra il 1999 e il 2004 nell'ambito della ricerca tedesca "Innovative PCM Technologie", la quale ha permesso di mettere in commercio numerosi prodotti contenenti materiali a cambiamento di fase tra cui l'intonaco Maxit [210]. Quest'ultimo ha poi trovato applicazione in alcuni edifici d'Europa centrale tra cui: "casa Luwoge" a Ludwigshafen nel 2000, in un ufficio del nuovo palazzo del FhG-Ise (Fraunhofer Institute for Solar Energy System) a Friburgo nel 2002, e nella sede amministrativa di Maxit a Breisach nel 2003 [210]. Un altro intonaco contenente PCM è stato il "Weber.Mur Klima" prodotto dalla francese Saint-Gobaint [[211][212]]. È stato disponibile nelle versioni "Clima 23" e "Clima 26" che avevano intervalli di temperatura di cambiamento di fase rispettivamente 21-23°C e 23-26°C [212]. Anch'esso come il Maxit clima® era a base di gesso e incorporava aggregati leggeri minerali, additivi e PCM Micronal® dell'azienda tedesca BASF [211][212]. Anche l'azienda Polacca CSV ha prodotto un intonaco con materiali a cambiamento di fase chiamato "Klima 544 TYNK" [[211][212]]. Era una malta premiscelata che aveva come leganti il cemento e la calce aerea e come aggregati usava minerali leggeri e una percentuale del 20% di paraffina micro incapsulata Micronal® [[211][212]]. Esisteva anche un rasante a base di materiali a cambiamento di fase chiamato "ENERCIEL" prodotto dalla Winco Technologies che incorporava una percentuale elevata di PCM (50%) capace di far raggiungere una capacità termica di 184 kJ/m<sup>2</sup> con soli 3 mm di prodotto [[211][212]].

| Tabella 3: Proprietà fisiche degli intonaci con PCM trovati |                            |       |                 |                                   |                                     |                 |                         |                             |              |              |          |
|-------------------------------------------------------------|----------------------------|-------|-----------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------------------|--------------|--------------|----------|
| Nome prodotto                                               | Produttore                 | Paese | Legante         | Aggregato                         | $\lambda$<br>W/mK                   | $h_{PC}$<br>J/g | $h_{intonaco}$<br>kJ/kg | $\rho$<br>kg/m <sup>3</sup> | $\mu$<br>[-] | $R_c$<br>MPa | Tf<br>°C |
| Maxit.clima®                                                | maxit                      | D     | Gesso           | PCM Micro-nal®-aggregato minerale | -                                   | -               | 18                      | 1340                        | -            | -            | 21/23/26 |
| Weber.Mur Clima®                                            | Weber (Saint-Gobain Group) | F     | Gesso           | PCM Micro-nal®-aggregato minerale | >0.3<br>—<br>$\lambda_{10}$<br>0.19 | 100             | 18                      | 900                         | 10           | ≥ 1.5        | 23/26    |
| Klima 544 TYNK                                              | CSV                        | PO    | Cemento - Calce | PCM Micro-nal®-aggregato minerale | 0.47                                | 100             | 18                      | -                           | 14           | 1.8          | 26       |
| ENERCIEL                                                    | Winco Technologies         | F     | -               | PCM MCI Technologies              | -                                   | 184             | -                       | -                           | -            | -            | 23/26    |
| Paesi: D Germania   F Francia   PO Polonia                  |                            |       |                 |                                   |                                     |                 |                         |                             |              |              |          |

Nella Tabella 50 sono stati inseriti ,come anticipato, tutti i prodotti trovati in commercio che stando alle dichiarazioni dei vari produttori, hanno delle qualità di isolanti termici. Non tutti questi però rientrano negli intervalli di conducibilità richiesti per essere considerate delle malte termiche da intonaco “T” della norma UNI 998-1, ne sono un esempio l’intonaco “TL2” della Marmoline123[130] con una conducibilità pari a 0.47 W/mK, il Caleosana dell’Azichem [144] con  $\lambda = 0.3$  W/mK e il Maxit Ip 78 therm della maxit [152] con  $\lambda = 0.39$  W/mK. Da un’analisi delle conducibilità degli intonaci trovati in commercio (Figura 17) emerge che i valori minori appartengono ai termointonaci con aerogel. Successivamente troviamo le malte con LWA artificiali che non superano mai, tranne che in un caso, la conduttività di 0.08 W/mK. La categoria dove si hanno i valori di conducibilità più elevati è quella degli intonaci con aggregati minerali, dove in generale la maggior parte di essi comunque non supera il valore di  $\lambda$  pari a 0.1 W/mk se non in alcuni casi, nei quali però il valore della conducibilità non eccede 0.2 W/mK.

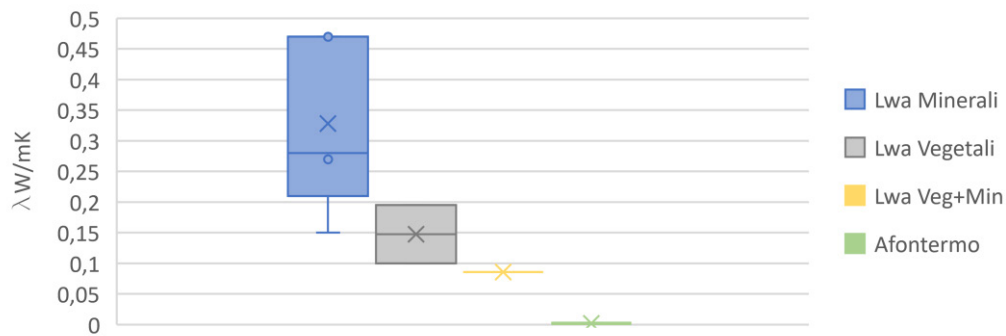


Figura 17: Conducibilità dei termointonaci in commercio (dato aggiornato rispetto al riferimento [113])



Un'altra ricerca di mercato è stata condotta sulle rasature termiche, queste rispetto ai termointonaci sono in netta minoranza e il più delle volte, anche se i produttori nelle informazioni generali attribuiscono delle buone prestazioni termiche a questo tipo di finiture, i valori di conducibilità sono piuttosto alti ( $\geq 0.2$ ) soprattutto quando gli aggregati sono di origine minerale (Figura 18).

Figura 18: Conducibilità delle termorasature in commercio (dato aggiornato rispetto al riferimento [113])



Buone qualità termiche sono state raggiunte dal rasante "Diathonite Cork Render" della Diasen a base di sughero e polveri diatomeiche con un conducibilità pari a 0.086 W/mK [195].

## 2.5 Commento finale allo stato dell'arte sui termointonaci

Nella presente tesi sono stati dapprima analizzati gli aspetti legati ai materiali isolanti oggi più diffusi sul mercato per poi concentrarsi sugli aspetti energetici e applicativi dei termointonaci desunti dalla letteratura scientifica del settore. Si è visto come la ricerca e lo sviluppo di questa nuova tecnologia edilizia in grado di apportare dei benefici dal punto di vista del confort interno e anche energetico è in costante crescita. Basti pensare che dal 2014 ad oggi, 73 nuovi prodotti tra termointonaci e termorasanti hanno invaso il mercato europeo e molti altri ancora sono in fase di sperimentazione. Ciò significa che forse un domani, l'avanzare delle ricerche e degli studi, permetteranno agli intonaci isolanti di raggiungere dei valori molto bassi di conducibilità, per cui saranno in grado di soppiantare il mercato dei pannelli rigidi e flessibili. Esistono ancora delle perplessità in merito alle caratteristiche meccaniche, in quanto esse sono inversamente proporzionali alle prestazioni termiche. I termointonaci a base aerogel hanno dimostrato di possedere le migliori qualità dal punto di vista termico rispetto a tutti gli altri intonaci isolanti, legate anche ad una bassa resistenza al vapore.

## 3 Analisi sull'applicazione dei prodotti a base aerogel

### 3.1 Analisi del patrimonio edilizio

L'analisi del patrimonio edilizio del comune di Torino dell'ATC<sup>7</sup> (costituito da circa 1000 edifici costruiti tra il 1900 e il 2012) ha avuto l'obiettivo di identificare una serie di edifici che potessero essere adottati come casi studio per:

- ☒ La simulazione in regime termico dinamico dei vari scenari di retrofit per valutare il potenziale di riduzione della domanda energetica;
- ☒ Valutare la scalabilità degli interventi e i potenziali benefici sulle diverse tipologie edilizie.

#### 3.1.1 Criteri della selezione

L'analisi simulativa ha riguardato la valutazione di tre diversi prodotti a base di aerogel: due intonaci (uno esterno, l'altro per l'interno) e una rasatura. Questi tre prodotti sono stati simulati secondo differenti spessori, nello specifico:

- ☒ È stato valutato l'impatto dell'intonaco interno ed esterno applicati negli spessori di 2 - 4 - 6 cm;
- ☒ la rasatura nell'unico spessore di 0.5 cm in due differenti applicazioni: sull'intera parete interna e sul perimetro delle finestre per andare a correggere solo i ponti termici.

La scelta di ogni singolo caso studio è stata basata valutando una serie di criteri tra cui:

- ☒ L'anno di costruzione
- ☒ La tecnologia costruttiva
- ☒ Un'altezza massima minore di 6 piani
- ☒ Il rapporto superficie/volume compresa tra 0.3 e 0.5

Il rapporto S/V compreso tra 0.3/0.5 risulta essere quello più diffuso in tutti gli edifici del patrimonio aventi un'altezza massima di 6 piani, i quali risultano avere forme molto compatte e semplici tipiche dei quartieri destinati all'edilizia sociale.

Per quanto riguarda il primo punto, sono stati 3 gli intervalli di tempo scelti come riferimento e sono:

- ☒ Dal **1900 al 1949**
- ☒ Dal **1950 al 1976**
- ☒ Dal **1977 al 1990**

La scelta di questi tre archi temporali non è stata casuale (Figura 19). Il primo intervallo (dal **1900 al 1949**) è stato scelto perché in Italia, secondo il Decreto Legislativo del 22 gennaio 2004 n° 42, i beni immobili la cui costruzione risalga ad oltre 70 anni sono considerati da tutelare. Questo significa che alcuni interventi, come per esempio la sostituzione dell'intonaco esterno o l'applicazione

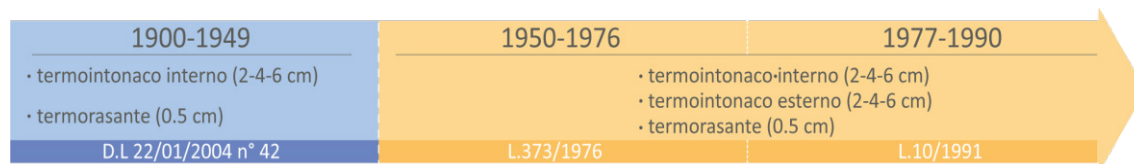
---

<sup>7</sup> Agenzia Territoriale per la Casa

cazione dell'isolamento a cappotto, non sono sempre concessi perché potrebbero andare a intaccare il valore storico dell'edificio<sup>8</sup>. Quindi su questa tipologia di edifici si è deciso di intervenire solo simulando l'applicazione dell'intonaco interno e della rasatura, evitando la stesura del termointonaco esterno. Dal **1950 in poi** i criteri di conservazione non sono più validi, per cui sugli edifici scelti è stato possibile simulare separatamente tutte e tre le soluzioni di retrofit.

La scelta degli edifici dopo il 1949 è stata caratterizzata da un'altra data importante, il 1976. Anno in cui è stata emanata la prima legge<sup>9</sup> che poneva l'attenzione sul risparmio energetico e su alcune soluzioni per la riduzione dei consumi (tra cui la sostituzione dei serramenti a vetro singolo con quelli a doppio vetro) che sono state considerate nelle simulazioni. L'ultimo arco temporale è quello che va dal **1977 al 1990**, questo perché nel 1991 è stata approvata la legge 10/91, la prima legge italiana che regolava le modalità progettuali e la gestione edificio-impianto [214]. Quindi ci si aspetta che gli edifici dal 1991 in poi siano dotati di soluzioni tecnologiche in involucro che ottemperino a norme sull'efficientamento energetico più attuali. Questa prima divisione temporale ha delineato poi le direttive da seguire nel secondo criterio di valutazione, ovvero quello **della tecnologia costruttiva**.

Figura 19: Intervalli temporali scelti e interventi di retrofit previsti in ottemperanza alle norme



### 3.1.2 I casi studio scelti

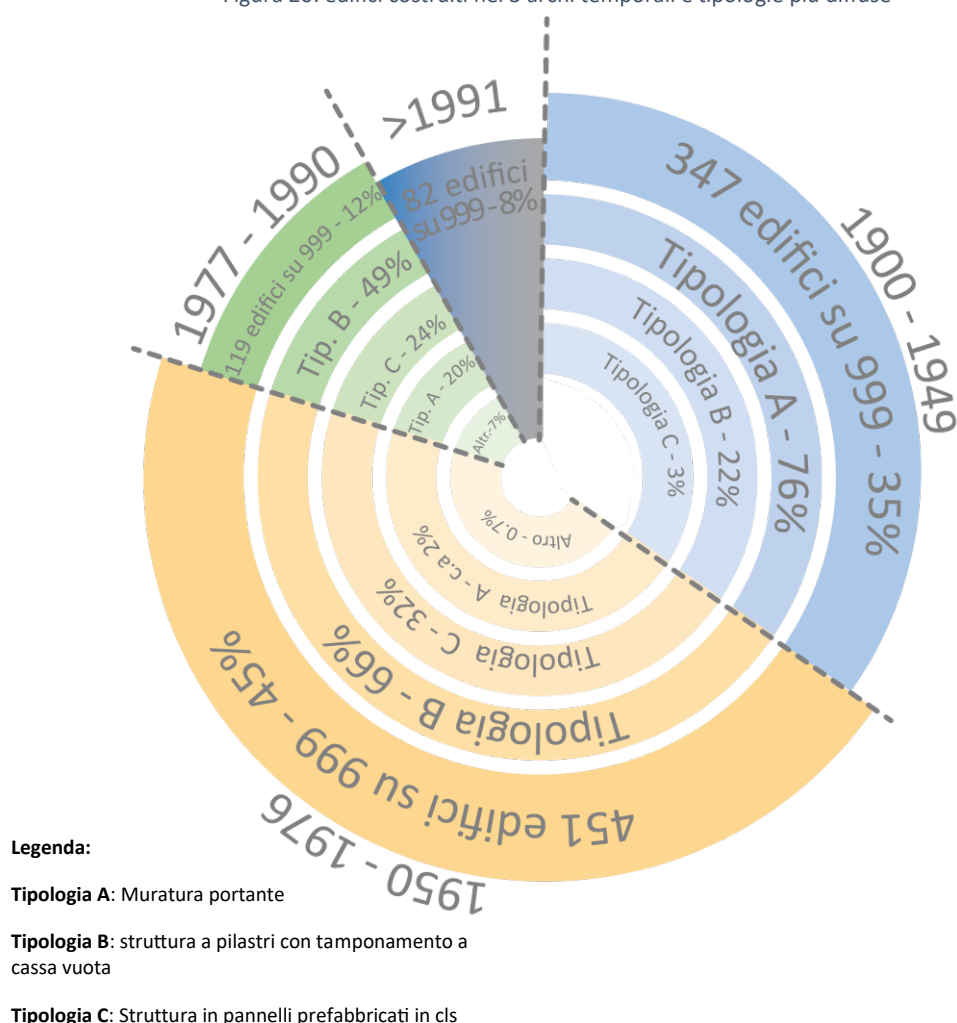
I casi studio scelti per le simulazioni sono quelli il cui sistema costruttivo è presente in una percentuale molto alta di edifici nei vari intervalli temporali. Questo è stato fatto per far sì che questi risultati possano servire ad analizzare la scalabilità e la riproducibilità di questi interventi di retrofit sul patrimonio edilizio dell'ATC. Dopo un'attenta analisi, sono risultate 3 le tecnologie costruttive più diffuse, ovvero:

- ☒ Muratura portante in laterizio
- ☒ Struttura a pilastri con tamponamenti a cassa vuota
- ☒ Struttura in pannelli prefabbricati in calcestruzzo

<sup>8</sup> in quanto esso potrebbe presentare in facciata affreschi, iscrizioni o particolari elementi decorativi esposti appartenenti a epoche storiche diverse e quindi oggetto di tutela

<sup>9</sup> Legge 373 del 1976 costituita da tre parti: la prima riguardava gli impianti di produzione del calore e gli annessi sistemi di termoregolazione, la seconda trattava delle soluzioni per isolare termicamente gli edifici e la terza le sanzioni previste per la mancata osservazione della legge

Figura 20: edifici costruiti nei 3 archi temporali e tipologie più diffuse



La Figura 20 riporta le percentuali degli edifici costruiti nei vari intervalli temporali e illustra anche le percentuali delle tipologie costruttive più usate nelle varie epoche. Come si può notare, gli edifici che hanno più di 70 anni costituiscono il 35% del patrimonio (con 347 edifici costruiti su 999 totali). Di cui il 76% è stato costruito utilizzando il sistema di muratura portante. Perciò è stato preso un caso di residenza che fosse stato costruito in quegli anni e con quella tecnologia (**CASO A**).

Gli edifici costruiti dal 1950 al 1976 rappresentano il 45% dello stock abitativo: il 66% anche qui è stato costruito con struttura in pilastri, mentre il 32% presenta una struttura in pannelli prefabbricati. Per quanto riguarda la restante percentuale, è costituita da tipologie edilizie che non hanno una diffusione di rilevante importanza in quegli anni. Per questo periodo è stato scelto di simulare una costruzione in pannelli prefabbricati (**CASO B**).

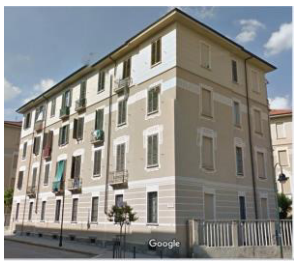
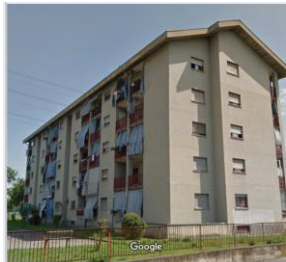
L'ultimo periodo ad essere considerato come detto è quello che va dal 1977 al 1990, le residenze costruite durante questo arco temporale costituiscono il 12% del patrimonio edilizio di ATC. Di cui circa il 50% dei fabbricati sono stati costruiti con struttura a pilastri, perciò per quest'ultimo intervallo temporale considerato, la tipologia selezionata per la simulazione è quella con pilastri e tamponamenti a cassa vuota (**CASO C**). Nella Tabella 4, sono elencati il numero di edifici per

intervallo temporale assimilabili alle tre tipologie scelte. La somma di tutte le costruzioni che hanno caratteristiche costruttive simili agli archetipi individuati è pari a 464 edifici che costituiscono il 50% delle costruzioni edificate dal 1900 al 1990 nel parco edilizio dell'Atc di Torino.

| Tabella 4: percentuale degli edifici con caratteristiche costruttive assimilabili nei 3 intervalli temporali |                                     |                      |                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------|
| Intervallo considerato                                                                                       | 1900-1949                           | 1950-1976            | 1977-1990           |
| Edifici assimilabili per tecnologia costruttiva                                                              | <b>A = 263</b> su 347               | <b>C= 143</b> su 451 | <b>B= 58</b> su 119 |
| totale                                                                                                       | <b>464</b> su 917 edifici del parco |                      |                     |
| Totale %                                                                                                     | <b>50.6%</b>                        |                      |                     |

### 3.1.3 Scenari d'intervento

Nella Tabella 5 sono riportati i 3 casi selezionati nel comune di Torino e gli interventi previsti.

| Tabella 5: casi studi selezionati e interventi previsti |                                                                                                                                           |                                                                                                                                           |                                                                                                                                           |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                         | Caso A                                                                                                                                    | Caso B                                                                                                                                    | Caso C                                                                                                                                    |
|                                                         | Via Arquata 16                                                                                                                            | Via delle Querce 65-67                                                                                                                    | Strada del Cascinotto 41                                                                                                                  |
| Edificio                                                |                                                        |                                                       |                                                      |
| Anno di costruzione                                     | 1921                                                                                                                                      | 1975                                                                                                                                      | 1988                                                                                                                                      |
| Tipologia costruttiva                                   | A:Muratura portante                                                                                                                       | C:Pannelli prefabbricati                                                                                                                  | B:Struttura in pilastri con tamponamenti a cassa vuota                                                                                    |
| Interventi di retrofit previsti                         | Termointonaco interno 2-4-6 cm                                                                                                            | Termointonaco interno 2-4-6 cm                                                                                                            | Termointonaco interno 2-4-6 cm                                                                                                            |
|                                                         | -Termorasante 0.5 cm (stesura su tutte le pareti interne)<br>- Termorasante 0.5 cm (stesura solo sui ponti termici intorno alla finestra) | -Termorasante 0.5 cm (stesura su tutte le pareti interne)<br>- Termorasante 0.5 cm (stesura solo sui ponti termici intorno alla finestra) | -Termorasante 0.5 cm (stesura su tutte le pareti interne)<br>- Termorasante 0.5 cm (stesura solo sui ponti termici intorno alla finestra) |

|         |                 |                                |                                |
|---------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|
|         | -               | Termointonaco esterno 2-4-6 cm | Termointonaco esterno 2-4-6 cm |
| n.piani | 4               | 5                              | 5                              |
| S/V     | 0.49(calcolata) | 0.4(da Database ATC)           | 0.3(da Database ATC)           |

### 3.2 Analisi simulativa

I 3 casi studio sono stati oggetto dapprima di un'analisi in regime dinamico che teneva in considerazione solo l'aspetto legato alle temperature e agli apporti sensibili, poi solo per il Caso A è stata fatta una verifica dei risultati con un'analisi in regime dinamico che ha permesso di determinare il comportamento sia energetico (come nella prima analisi) che igrotermico di questo edificio.

#### 3.2.1 Metodologia: l'analisi termica in regime dinamico:

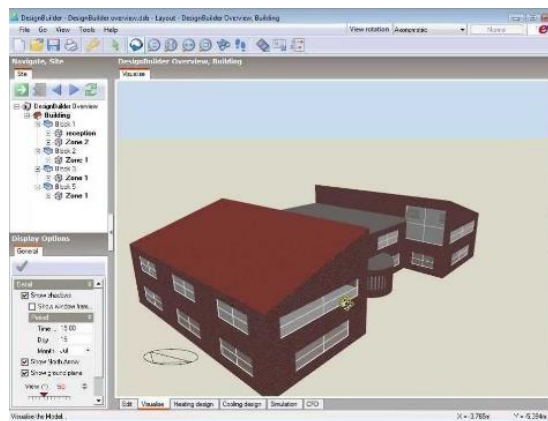
Le analisi in regime dinamico termico sono state effettuate con il software Design Builder®. Questo programma usa come motore di simulazione energetica Energy Plus® e sfrutta un'interfaccia semplificata nella quale si può modellare l'edificio da simulare inserendone la geometria e i materiali che lo compongono.

Figura 21: logo di Design Builder e Energy Plus



Si possono anche settare le varie proprietà (trasmittanza, area, volume) delle componenti opache e vetrate del modello. Gli edifici oggetto di studio sono stati simulati in accordo con i documenti e le tavole fornite da ATC per le chiusure opache, mentre per quanto riguarda le parti trasparenti, ci si è attenuti agli standard diffusi nelle varie epoche in accordo anche con le norme energetiche sopra citate. Il software permette di inserire il file climatico del comune desiderato (Torino 160590 - IWECC), l'orientamento dell'edificio e le condizioni interne.

Figura 22: interfaccia di Design Builder con un edificio modellato



Il set point di riscaldamento è stato impostato su 20°C e quello di raffreddamento su 26°C, entrambi i valori si riferiscono al controllo della temperatura operativa<sup>10</sup> non a quella dell'aria. Il valore degli apporti interni sensibili (espressi in W) è stato calcolato in accordo con la formula

<sup>10</sup> Temperatura uniforme di un ambiente fittizio in cui un soggetto scambierebbe per irraggiamento e convezione la stessa energia che scambia nell'ambiente reale (non uniforme). Essa è data dalla combinazione tra la temperatura dell'aria e la temperatura media radiante. Per un ambiente termico moderato (quale può essere quello all'interno delle case) si può considerare pari alla media aritmetica delle due temperature



presente nella norma UNI-TS 11300-1 del 2014<sup>11</sup> riguardante tutti gli edifici adibiti ad abitazione (E.1(1) ed E.1(2)) aventi superficie utile di pavimento  $A_f$  minore o uguale a  $120\text{m}^2$  per appartamento. La formula è la seguente:

$$\Phi_{\text{int}} = 7.987 \times A_f - 0.0353 \times A_f$$

I casi studio A e C rientravano nei limiti imposti dalla norma per il calcolo, mentre il valore di  $A_f$  per gli alloggi del caso B era superiore a  $120\text{m}^2$  per cui è stato usato il valore di  $450\text{ W}$  a cui la norma UNI-TS 11300-1 fa riferimento nel caso in cui si superi l'area utile di pavimento stabilita dal calcolo. I risultati prima di essere imputati nel programma sono stati divisi per la superficie utile media degli appartamenti di ciascun edificio così da ottenere il valore in  $\text{W/m}^2$  richiesto dal programma.

| Tabella 6: Apporti interni sensibili UNI TS 11300-1 |                |
|-----------------------------------------------------|----------------|
| Caso                                                | $\text{W/m}^2$ |
| A                                                   | 6.24           |
| B                                                   | 3.40           |
| C                                                   | 5.82           |

Per quanto riguarda gli impianti, è stato inserito un rendimento pari a 1 in quanto, non conoscendo nel dettaglio il sistema impiantistico dei casi studio non si voleva che la quota relativa all'impianto andasse a influire sul fabbisogno finale degli edifici. Così facendo i risultati dati dal programma riguardano solo ed esclusivamente la richiesta energetica netta degli edifici oggetto dell'analisi e non l'energia primaria.

Un altro dato di input sono stati i ponti termici valutati tramite abaco CENED e attraverso l'atlante nazionale dei ponti termici[215]. Però nel caso in via Arquata il valore di trasmittanza termica lineica  $\psi$  ( $\text{W/mK}$ ) del ponte termico "parete-serramento" è stato ottenuto attraverso interpolazione lineare dei dati riportati in precedenti lavori di tesi effettuati sulla stessa costruzione [216] (Figura 23-Tabella 7 -Tabella 8).

| Tabella 7: Rasatura di riferimento [216]                     |               |                        |                     |
|--------------------------------------------------------------|---------------|------------------------|---------------------|
| Giunto parete-serramento                                     |               |                        |                     |
| Rasatura 024 configurazione A1(correzione U e ponti termici) |               |                        |                     |
| spessore                                                     | $\lambda$     | R                      | $\Psi_{\text{int}}$ |
| m                                                            | $\text{W/mK}$ | $\text{m}^2\text{K/W}$ | $\text{W/mk}$       |
| 0,003                                                        | 0,051         | 0,059                  | 0,42                |
| 0,006                                                        | 0,051         | 0,118                  | 0,4                 |
| 0,009                                                        | 0,051         | 0,176                  | 0,37                |
| 0,012                                                        | 0,051         | 0,235                  | 0,35                |
| Rasatura 024 configurazione A3(correzione ponti termici)     |               |                        |                     |

<sup>11</sup> Appendice 13: Apporti interni sensibili. Valutazione sul progetto o standard

| spessore | $\lambda$ | R                  | $\Psi_{int}$ |
|----------|-----------|--------------------|--------------|
| m        | W/mK      | m <sup>2</sup> K/W | W/mk         |
| 0,003    | 0,051     | 0,059              | 0,39         |
| 0,006    | 0,051     | 0,118              | 0,34         |
| 0,009    | 0,051     | 0,176              | 0,30         |
| 0,012    | 0,051     | 0,235              | 0,25         |

Figura 23: interpolazione lineare delle resistenze R[m<sup>2</sup>K/W] ottenute da precedenti analisi [216]

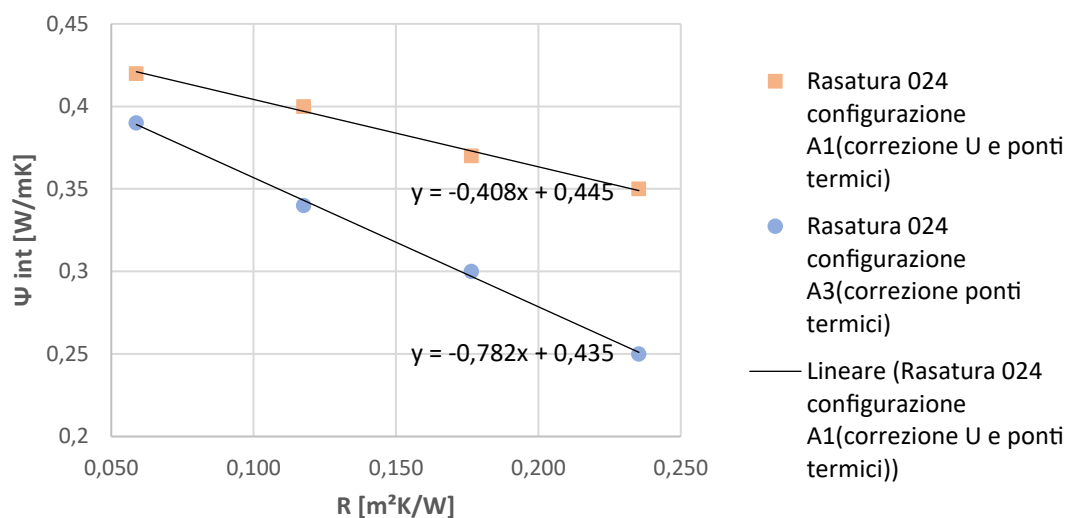


Tabella 8: trasmittanza termica lineica ottenuta da interpolazione

#### Giunto parete-serramento

##### Rasatura TR configurazione W (correzione U e ponti termici)

| spessore | $\lambda$ | R                  | $\Psi_{int}$ |
|----------|-----------|--------------------|--------------|
| m        | W/mK      | m <sup>2</sup> K/W | W/mk         |
| 0,005    | 0,027     | 0,185              | 0,369        |

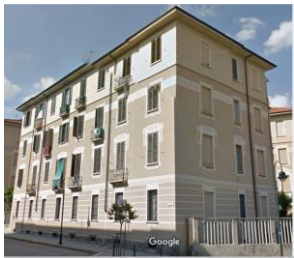
##### Rasatura TR configurazione PT (ponti termici)

| spessore | $\lambda$ | R                  | $\Psi_{int}$ |
|----------|-----------|--------------------|--------------|
| m        | W/mK      | m <sup>2</sup> K/W | W/mk         |
| 0,005    | 0,027     | 0,185              | 0,290        |

Design Builder non gestisce i ponti termici lineari in maniera dettagliata, ma aggiunge degli elementi disperdenti che causano un aumento delle perdite per trasmissione equivalenti al ponte termico inserito. Per far questo calcola in automatico la lunghezza dei ponti termici dei vari nodi (es. parete-finestra, parete-parete) dal modello geometrico e assegna alla lunghezza misurata il valore di  $\psi$  (W/mK) immesso.

Il primo passo dell'analisi dinamica termica è stato quello di modellare e simulare ogni caso nel suo attuale stato di fatto, così da calcolare il fabbisogno energetico reale<sup>12</sup>, individuare la dispersione per trasmissione attraverso i vari componenti edilizi e avere una base di confronto per le future analisi. Nella Tabella 9 sono state inserite le principali caratteristiche dei casi senza alcuno scenario d'intervento:

Tabella 9: casi studi selezionati e le principali caratteristiche dello stato di fatto

|                                                  | Caso A                                                                            | Caso B                                                                            | Caso C                                                                              |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                  | Via Arquata                                                                       | Via delle Querce 65-67                                                            | Strada del Cascinotto 41                                                            |
| Edificio                                         |  |  |  |
| Anno di costruzione                              | 1921                                                                              | 1975                                                                              | 1988                                                                                |
| Tipologia costruttiva                            | A: Muratura portante                                                              | C: Pannelli prefabbricati                                                         | B: Struttura in pilastri con tamponamenti a cassa vuota                             |
| Area condizionata [m <sup>2</sup> ]              | 974.87                                                                            | 1916.87                                                                           | 2675.27                                                                             |
| Area lorda di facciata [m <sup>2</sup> ]         | 1243.61                                                                           | 1986.07                                                                           | 2069.29                                                                             |
| Area netta di facciata [m <sup>2</sup> ]         | 1076.43                                                                           | 1679.99                                                                           | 1749.92                                                                             |
| Area vetrata zona condizionata [m <sup>2</sup> ] | 164                                                                               | 306                                                                               | 314                                                                                 |
| U media di facciata [W/m <sup>2</sup> K]         | 1.8                                                                               | 1.1                                                                               | 1                                                                                   |
| U chiusure verticali [W/m <sup>2</sup> K]        | 1.22                                                                              | 0.62                                                                              | 0.57                                                                                |
| U partizioni scale [W/m <sup>2</sup> K]          | 1.78                                                                              | 2.63                                                                              | 2.63                                                                                |
| U finestre [W/m <sup>2</sup> K]                  | 5.73                                                                              | 4.45                                                                              | 3.74                                                                                |

<sup>12</sup> Il fabbisogno di energia termica esprime la quantità di calore che deve essere fornita o sottratta agli ambienti climatizzati per mantenere le condizioni di temperatura desiderate durante un dato periodo di tempo (periodo di riscaldamento invernale e raffrescamento estivo).

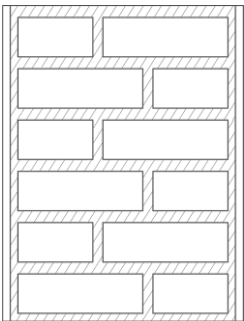
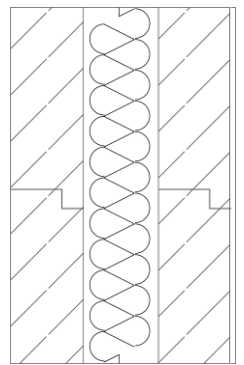
La trasmittanza ( $U=W/m^2K$ ) delle partizioni e delle chiusure verticali contenute nella Tabella 9 è stata calcolata dal programma secondo la UNI EN ISO 6946:2008<sup>13</sup>. La formula è la seguente:

$$U=1/R=\frac{1}{R_{si}+\frac{\sum s_i}{\lambda_i}+R_n+R_{se}} [W/m^2K]$$

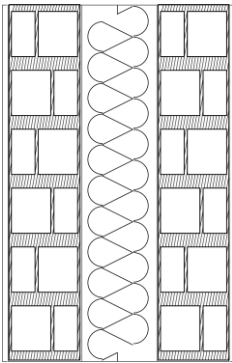
Dove:

- ☒  $R_{si}$  è la resistenza liminare della superficie interna di parete assunta pari a  $0.13 m^2K/W$
- ☒  $\sum s_i/\lambda_i$  è la sommatoria delle resistenze degli strati omogenei [ $m^2K/W$ ]
- ☒  $R_n$  è la resistenza termica degli strati non omogenei (es. intercapedini d'aria) [ $m^2K/W$ ]
- ☒  $R_{se}$  è la resistenza liminare della superficie esterna di parete, assunta pari a  $0.04 m^2K/W$

Nella determinazione della  $U$  delle partizioni interne il programma ha usato lo stesso valore di  $R_s$  sia per l'interno che per l'esterno (pari a  $0.13 m^2K/W$ ). Questo perché si tratta di una parete che non è a diretto contatto con l'esterno come succede per l'involucro. La Tabella 10 mostra le stratigrafie delle pareti esterne e delle partizioni a contatto con le zone non riscaldate dello stato di fatto dei 3 casi studio:

| Tabella 10: stratigrafie chiusure |                             |           |      |          |           |                                                                                       |         |
|-----------------------------------|-----------------------------|-----------|------|----------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Caso                              | parete esterna<br>esistente | $\lambda$ | $s$  | $R$      | $U_{par}$ | Sezione muratura                                                                      |         |
|                                   |                             | $W/mK$    | $m$  | $m^2K/W$ | $W/m^2K$  | Esterno                                                                               | Interno |
| A                                 | intonaco esterno            | 0.82      | 0.02 | 0.02     | 1.22      |  |         |
|                                   | mattone                     | 0.827     | 0.5  | 0.60     |           |                                                                                       |         |
|                                   | intonaco interno            | 0.82      | 0.02 | 0.02     |           |                                                                                       |         |
|                                   |                             |           |      |          |           |                                                                                       |         |
| B                                 | Pannello cls est.           | 1.4       | 0.07 | 0.05     | 0.62      |  |         |
|                                   | EPS                         | 0.046     | 0.06 | 1.3      |           |                                                                                       |         |
|                                   | Pannello cls int.           | 1.4       | 0.12 | 0.09     |           |                                                                                       |         |
|                                   | intonaco interno            | 0.82      | 0.01 | 0.01     |           |                                                                                       |         |
| C                                 | intonaco esterno            | 0.82      | 0.01 | 0.01     | 0.57      |                                                                                       |         |

<sup>13</sup> Componenti ed elementi per l'edilizia- Resistenza e trasmittanza termica - Metodo di calcolo

|      | mattone esterno                    | 0.84              | 0.12   | 0.14                    |                                                                                     |
|------|------------------------------------|-------------------|--------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|      | EPS                                | 0.046             | 0.06   | 1.30                    |                                                                                     |
|      | mattone interno                    | 0.62              | 0.07   | 0.11                    |                                                                                     |
|      | intonaco interno                   | 0.82              | 0.01   | 0.01                    |                                                                                     |
|      |                                    |                   |        |                         |  |
| Caso | Parete interna esistente           | $\lambda$<br>W/mK | s<br>m | R<br>m <sup>2</sup> K/W | U parete<br>W/m <sup>2</sup> K                                                      |
| A    | intonaco interno a Zona riscaldata | 0.82              | 0.015  | 0.02                    | 1.78                                                                                |
|      | mattone                            | 0.827             | 0.22   | 0.27                    |                                                                                     |
|      | intonaco esterno a Zona riscaldata | 0.82              | 0.015  | 0.02                    |                                                                                     |
| B-C  | intonaco interno a Zona riscaldata | 0.82              | 0.01   | 0.01                    | 2.63                                                                                |
|      | mattone                            | 0.84              | 0.08   | 0.1                     |                                                                                     |
|      | intonaco esterno a Zona riscaldata | 0.82              | 0.01   | 0.01                    |                                                                                     |

Da come si evince dalla Tabella 10 i valori di trasmittanza termica inerente alle chiusure verticali dei tre casi sono molto alti rispetto agli standard oggi richiesti dagli edifici di nuova costruzione<sup>14</sup>. Gli interventi indicati nella Tabella 5 che ricadono nella riqualificazione energetica di II livello<sup>15</sup> secondo la quale esistono dei valori limite di U, indicati nella Tabella 11:

Tabella 11: requisiti per gli edifici soggetti a riqualificazione energetica

| APPENDICE B, DM 26-06-2015- requisiti specifici per gli edifici esistenti soggetti a riqualificazione energetica | U<br>(1° Gennaio 2021) |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Zona E                                                                                                           | W/m <sup>2</sup> K     |
| Tabella 1 - U massima delle strutture opache verticali, verso l'esterno soggette a riqualificazione              | 0.28                   |

Questo valore di trasmittanza delle parti opache dell'involucro espresso dal Decreto però si riferisce agli interventi di isolamento termico cosiddetto "a cappotto" cioè attuato sulla parte esterna delle chiusure. Al capitolo 1.4.3 "Ristrutturazioni importanti e riqualificazioni - Deroghe" è riportato al punto 2: "in caso di interventi di riqualificazione dell'involucro opaco che preve-

<sup>14</sup> "Parametri d'involucro", racchiusi nell'appendice A del DM del 26 giugno 2015

<sup>15</sup> ristrutturazione importante di II livello: quando l'intervento previsto interessa l'involucro edilizio con un'incidenza >25% della superficie disperdente lorda complessiva dell'edificio

dano l'isolamento termico dall'interno o l'isolamento termico in intercapedine, indipendentemente dall'entità della superficie coinvolta, i valori delle trasmittanze sulle tabelle da 1 a 4 dell'appendice B, sono incrementati del 30%". Questo significa che negli interventi che prevedono l'applicazione interna del termointonaco e della termorasatura, i valori di U saranno maggiorati del 30% rispetto a quelli sopra elencati. In particolare il limite da tenere in considerazione per il retrofit interno sarà:

Tabella 12: requisiti per gli edifici soggetti a riqualificazione energetica maggiorati del 30%

|                                                                                                                                                               |                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| APPENDICE B, DM 26-06-2015- requisiti specifici per gli edifici esistenti soggetti a riqualificazione energetica incrementati del 30% per il retrofit interno | U>30%<br>(1° Gennaio 2021) |
| Zona E                                                                                                                                                        | W/m²K                      |
| Tabella 1 - U massima delle strutture opache verticali, verso l'esterno soggette a riqualificazione                                                           | 0.364                      |

### 3.2.1.1 Codici degli interventi di retrofit

I codici dei prodotti utilizzati e i vari scenari d'intervento sono riportati nella Tabella 13. L'intonaco isolante interno sarà simulato in tre diversi spessori (2-4-6 cm); questo sarà applicato sull'involucro e sulle partizioni che dividono gli alloggi dalle zone non climatizzate (vani scale). Il rasante interno verrà applicato nello spessore di 0.5 cm in due differenti scenari: il primo solo per la correzione dei ponti termici (in particolare quelli intorno ai serramenti nel nodo parete-finestra), nel secondo scenario verrà applicato su tutta la superficie del muro; in questo caso, la rasatura verrà applicata una volta sola e contemporaneamente sulla superficie interna delle chiusure e delle partizioni interne al confine con le zone non riscaldate. Per quanto concerne l'ultimo intervento di retrofit e cioè quello che riguarda l'applicazione dell'intonaco isolante esterno, esso verrà applicato negli spessori di 2-4-6 cm sull'involucro esterno.

Tabella 13: codici dei prodotti isolanti e scenari previsti

| Prodotto             | Spessore (cm) | Codice | Scenari previsti | Ambiente adiacente a chiusura o partizione | Applicato su                         |
|----------------------|---------------|--------|------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|
| Termorasante interno | 0.5           | TR_PT  | Scenario 1       | -                                          | Ponti termici                        |
|                      |               | TR_W   | Scenario 2       | Esterno - ZNR                              | Intera chiusura<br>Intera partizione |

|                          |   |          |            |               |                                                |
|--------------------------|---|----------|------------|---------------|------------------------------------------------|
| Termointonaco<br>interno | 2 | TI_INT.2 | Scenario 3 | Esterno - ZNR | Intera<br>chiusura –<br>Intera parti-<br>zione |
|                          | 4 | TI_INT.4 |            |               |                                                |
|                          | 6 | TI_INT.6 |            |               |                                                |
| Termointonaco<br>esterno | 2 | TI_EST.2 | Scenario 4 | Esterno       | Intera<br>chiusura                             |
|                          | 4 | TI_EST.4 |            |               |                                                |
|                          | 6 | TI_EST.6 |            |               |                                                |

Di seguito sono stati riportati i risultati della simulazione in regime dinamico termico svolta con il software Design Builder. Prima saranno illustrati e commentati i risultati scaturiti dalla simulazione dello stato di fatto degli edifici. In seguito invece saranno mostrati i risultati dei differenti scenari elencati nella Tabella 13.

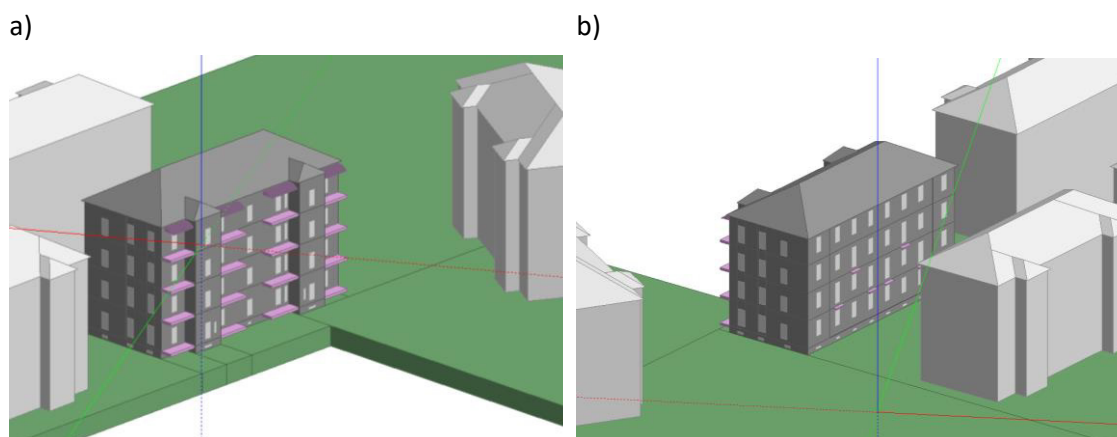
### 3.2.2 I Risultati

#### 3.2.2.1 I risultati dello stato di fatto dei casi studio

##### a) Caso A: via Arquata

Quello di via Arquata è stato il primo edificio simulato, è stato costruito nel 1921 (Tabella 5). Ha una struttura in muratura portante senza alcun tipo di coibentazione come il 76% degli edifici realizzati tra il 1900 e il 1949 (Figura 20). Di seguito due viste del modello di calcolo del fabbricato:

Figura 24: viste del modello a) lato interno, b) lato strada – CASO A



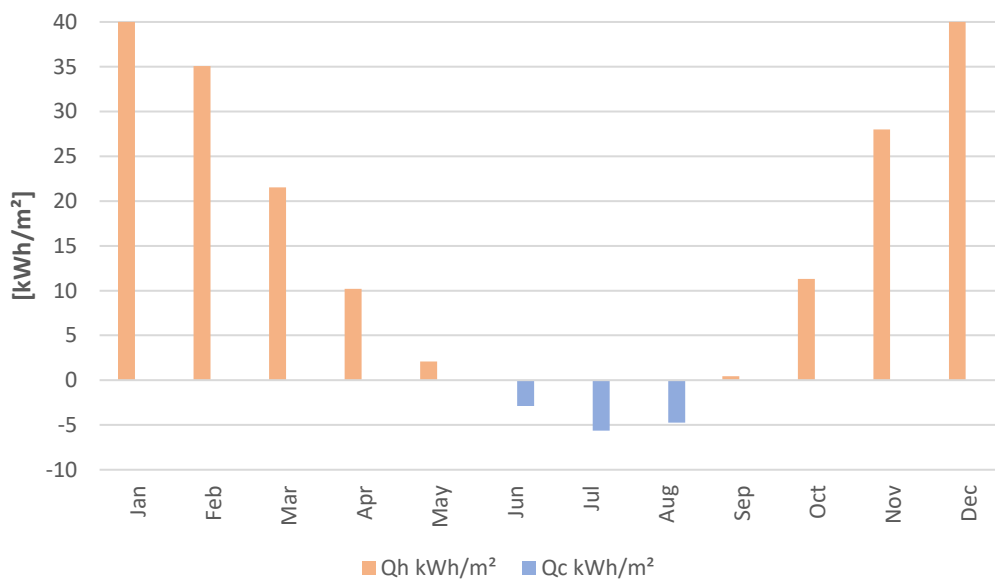
Come si può notare dalla Figura 24, oltre all'edificio oggetto di analisi sono stati anche modellati i fabbricati adiacenti in quanto essi interagiscono con l'edificio in questione rappresentando delle ostruzioni. Nella Tabella 14 si possono osservare i risultati del calcolo con la divisione tra il fabbisogno energetico di riscaldamento e raffrescamento del caso A.

Tabella 14: fabbisogno energetico di riscaldamento e raffrescamento - CASO A

| Heating need          | Cooling need          | Total                 |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] |
| 193.23                | 13.23                 | 206.46                |

Mentre nella Figura 25, l'energia di cui necessita l'edificio è dilazionata nei 12 mesi dell'anno (nei mesi estivi l'energia di raffrescamento è per convenzione negativa in quanto l'impianto in quei periodi deve sottrarre il calore dall'edificio<sup>16</sup>).

Figura 25: Fabbisogno energetico diviso per i mesi dell'anno – CASO A

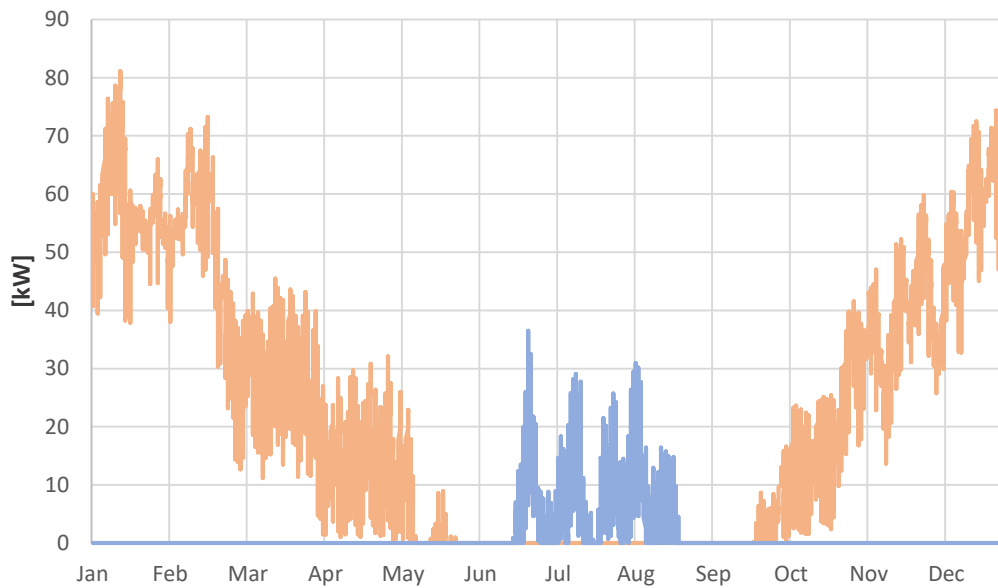


In questo caso il fabbisogno è molto elevato considerando che un edificio moderno perfettamente isolato (e con un sistema impiantistico adeguato) riesce ad avere un fabbisogno energetico annuo minore o uguale a 10 kWh/m<sup>2</sup>, e uno moderatamente isolato riesce ad avere un consumo energetico sotto i 90 kWh/m<sup>2</sup>. L'assenza di una coibentazione si ripercuote non solo sull'energia annua, ma soprattutto sui flussi istantanei, ovvero sulla potenza che l'impianto deve fornire per raggiungere le temperature di confort nelle varie ore del giorno. Dalla Figura 26 si può notare che, soprattutto nei mesi freddi, si raggiungono picchi che si aggirano attorno a 80 kW in quanto le dispersioni sono elevate e quindi c'è una richiesta di potenza maggiore per andare a compensarle.

<sup>16</sup> UNI EN ISO 1379-2008 capitolo 10.3 "Elementi di apporto termico interno-Tutti i metodi": una sorgente fredda, che rimuove il calore dall'edificio (zona), deve essere trattata come sorgente con valore negativo.

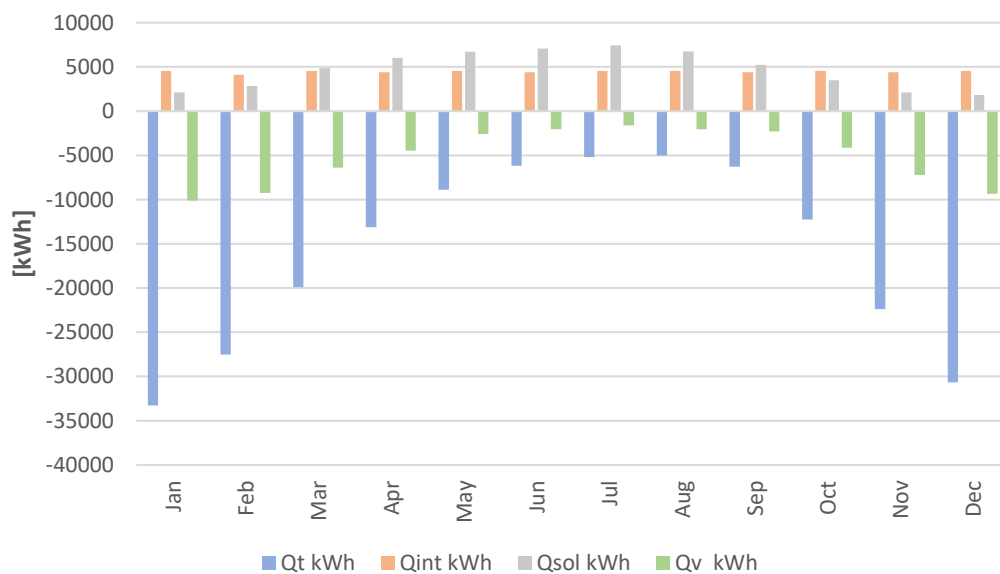


Figura 26: Flussi istantanei dello stato di fatto- CASO A



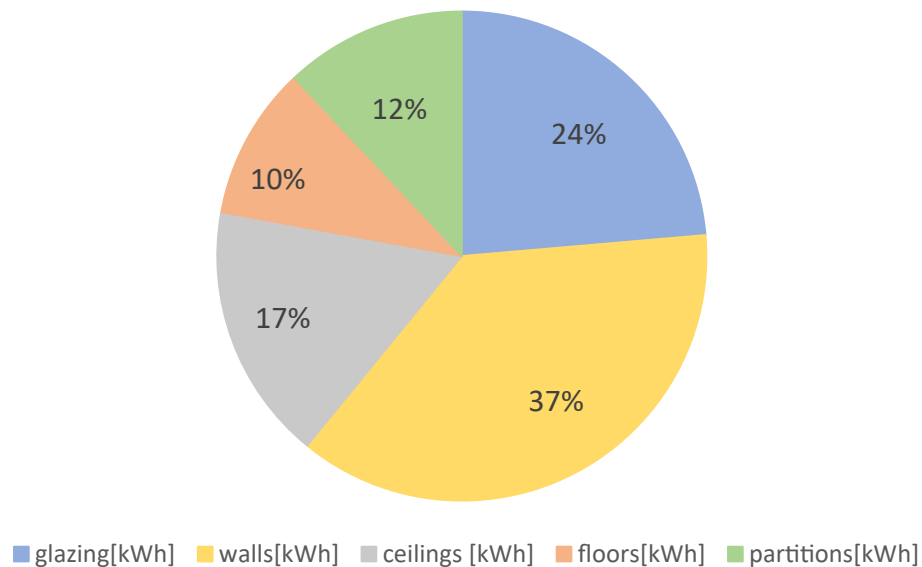
La domanda energetica e i flussi istantanei sono maggiori in inverno che nei mesi estivi. Dalla Figura 27 che mostra il bilancio di energia nei vari mesi, si può osservare che le dispersioni maggiori sono quelle che avvengono per trasmissione ( $Q_t$ ).

Figura 27: bilancio di energia mensile (solo sensibile) – CASO A



Una soluzione per andare a ridimensionare il fabbisogno energetico (e i flussi istantanei) nei mesi freddi è quella di andare a coibentare le pareti che, da come si può notare dalla Figura 28, costituiscono l'elemento opaco più dispersivo.

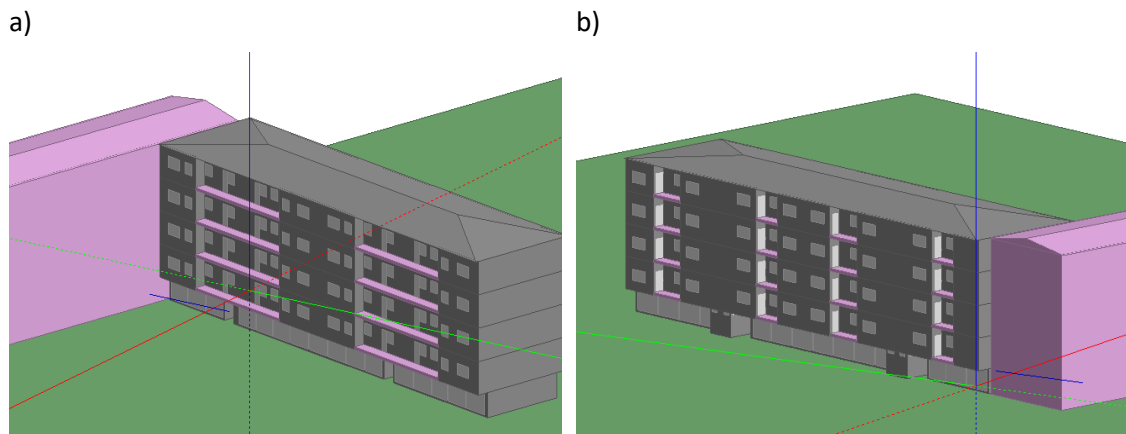
Figura 28: percentuale dei flussi dispersi per trasmissione attraverso gli elementi opachi e trasparenti – CASO A



b) Caso B: via delle Querce

Il caso B è rappresentato dall'edificio situato a Torino in via delle querce costruito nel 1975. Ha una struttura in pannelli di cls prefabbricati come il 32% dei fabbricati costruiti nel secondo intervallo considerato (1950-1976). Dai documenti forniti dall'ente ATC è stato possibile individuare una coibentazione in EPS esistente nell'intercapedine dei pannelli, e da un sopralluogo si è notato che in alcuni alloggi erano ancora presenti i serramenti originali con il doppio vetro, così da applicare anche questo dato di input nel programma insieme all'isolante.

Figura 29: viste del modello a) lato interno, b) lato strada - CASO B

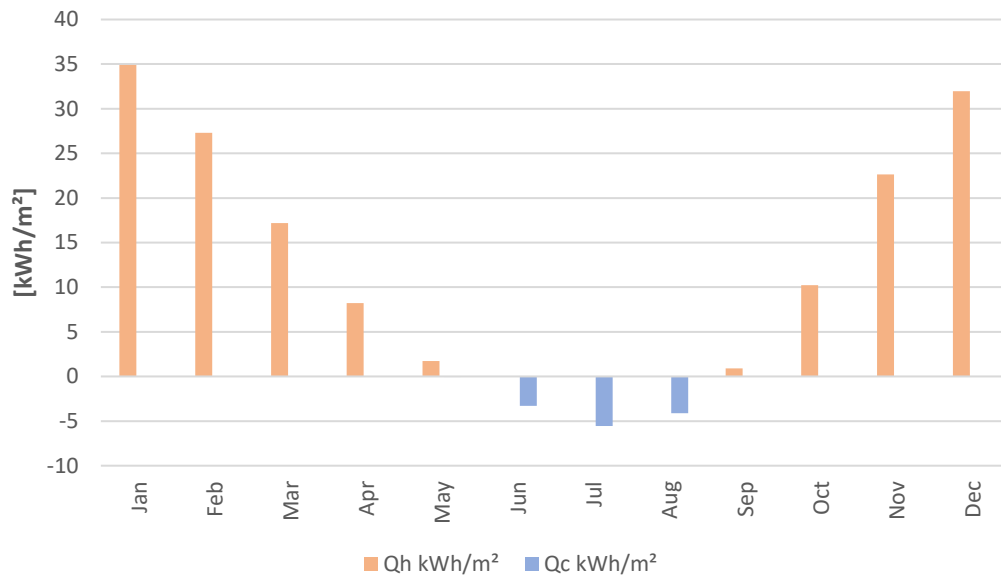


I risultati della domanda energetica del Caso B sono messi in evidenza nella Tabella 15:

Tabella 15: fabbisogno energetico di riscaldamento e raffrescamento - CASO B

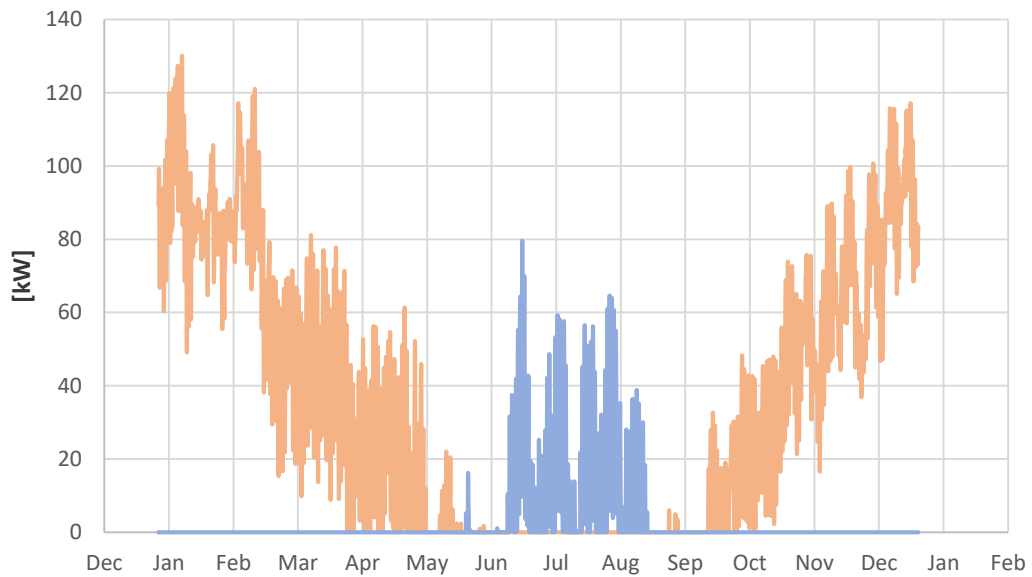
| Heating need          | Cooling need          | Total                 |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] |
| 155.13                | 13.05                 | 168.18                |

Figura 30: Fabbisogno energetico diviso per i mesi dell'anno – CASO B



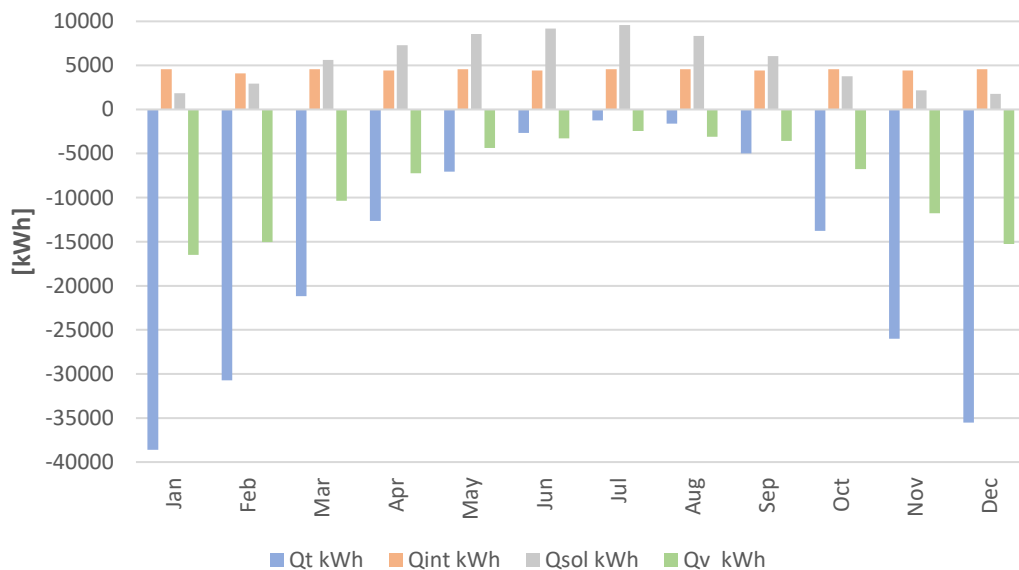
Come si può notare, il fabbisogno di riscaldamento del Caso B è minore a quello del Caso A, molto probabilmente per il fatto che qui ci sia un minimo di isolamento. Nonostante questo, la domanda rimane ancora piuttosto alta. Nella Figura 31 sono invece riportati i flussi istantanei. Come si può vedere le potenze necessarie per mantenere le temperature di confort sono molto elevate in questa costruzione. Le cause possono essere molteplici, tra queste c'è il fatto che qui sono state isolate solo le mura e nello specifico, la coibentazione è in intercapedine, per cui non c'è una continuità in quanto il pannello s'interrompe nei vari solai. Questo porta ad avere ponti termici molto accentuati rispetto ad una casa non coibentata. In questo edificio ci sono più alloggi rispetto al Caso A per cui la domanda istantanea può risultare maggiore anche per questo motivo. Si può notare inoltre come le potenze in estate siano molte volte il doppio rispetto al Caso A, questo può essere legato al minimo isolamento per cui risulta più difficile smaltire il calore interno. Ma anche perché la struttura del caso B è molto più "leggera" della muratura portante del Caso A, questo fa sì che nell'edificio in via delle Querce non ci sia uno sfasamento dei picchi di temperatura come può avvenire per il Caso A. Infatti, le pareti più spesse hanno una maggiore capacità termica, ciò consente di smorzare e sfasare di alcune ore i picchi di temperatura riducendo il carico termico per il raffrescamento estivo.

Figura 31: Flussi istantanei dello stato di fatto - CASO B



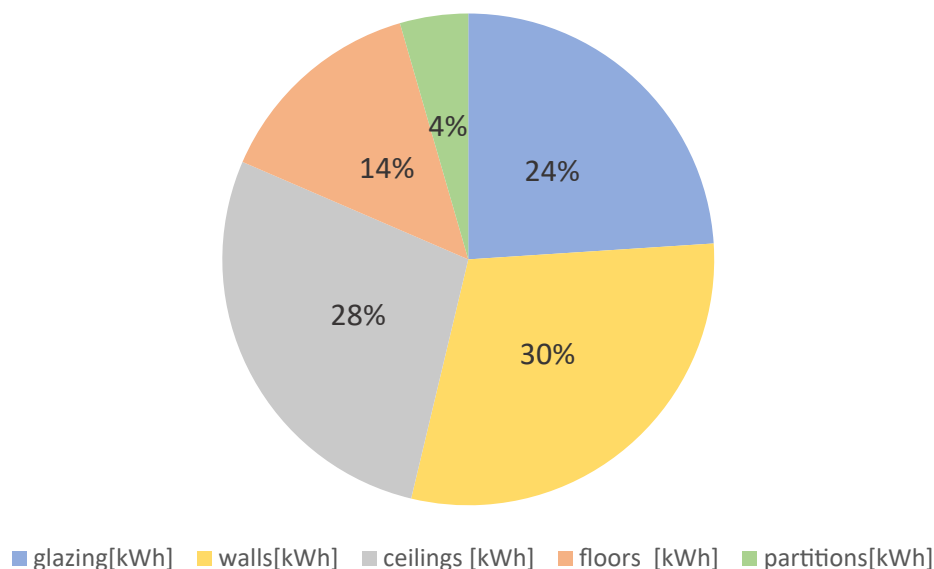
Anche qui come nel Caso di via Arquata, le dispersioni più elevate sono quelle che avvengono per trasmissione  $Q_t$  (Figura 32):

Figura 32: bilancio di energia mensile (solo sensibile) – CASO B



In particolare, anche qui le dispersioni per trasmissione attraverso i muri sono quelle maggiori rispetto alle altre, anche se i soffitti (soprattutto quello confinante con il tetto) e le finestre hanno un'incidenza simile nelle  $Q_t$  (Figura 33). Quindi intervenire coibentando i muri apporterebbe una riduzione della domanda energetica, anche se in questo caso risulterebbe necessario anche un intervento sui solai di copertura.

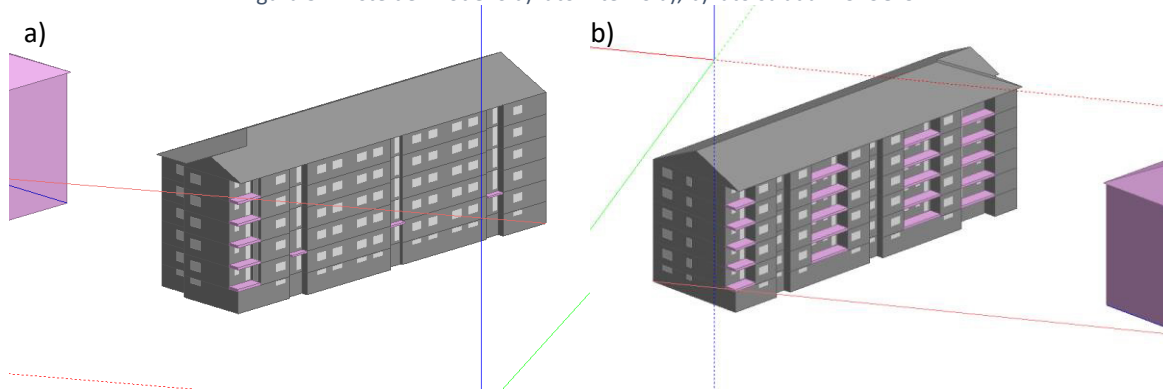
Figura 33: percentuale dei flussi dispersi per trasmissione attraverso gli elementi opachi e trasparenti – CASO B



#### c) Caso C: Strada del Cascinotto

Il terzo e ultimo caso trattato riguarda l'edificio situato nel comune di Torino in Strada del Cascinotto, costruito nel 1988 e quindi fa parte di quella fetta di abitazioni costruite nell'arco temporale che va dal 1977 al 1990. La struttura è in pilastri con tamponamenti a cassa vuota che rappresenta la tipologia costruttiva più diffusa in quest'arco temporale (circa il 50% degli edifici, Figura 20). Essendo stato edificato dopo il 1976 il fabbricato è stato simulato con dell'isolante nell'intercapedine, ipotesi verificata poi nella sede ATC dove sono state visionate le sezioni in cui risultavano esserci pannelli di EPS (6 cm) posti all'interno dei tamponamenti e nel solaio del tetto. Anche qui i serramenti hanno il doppio vetro. Nel modello sono stati creati anche gli ingombri degli edifici vicini come negli altri due casi, l'assenza del terreno sottostante nella Figura 34 è dovuta al fatto che l'edificio in questione non ha locali interrati a diretto contatto con il terreno come accadeva nel caso A e B<sup>17</sup>.

Figura 34: viste del modello a) lato interno a), b) lato strada - CASO C



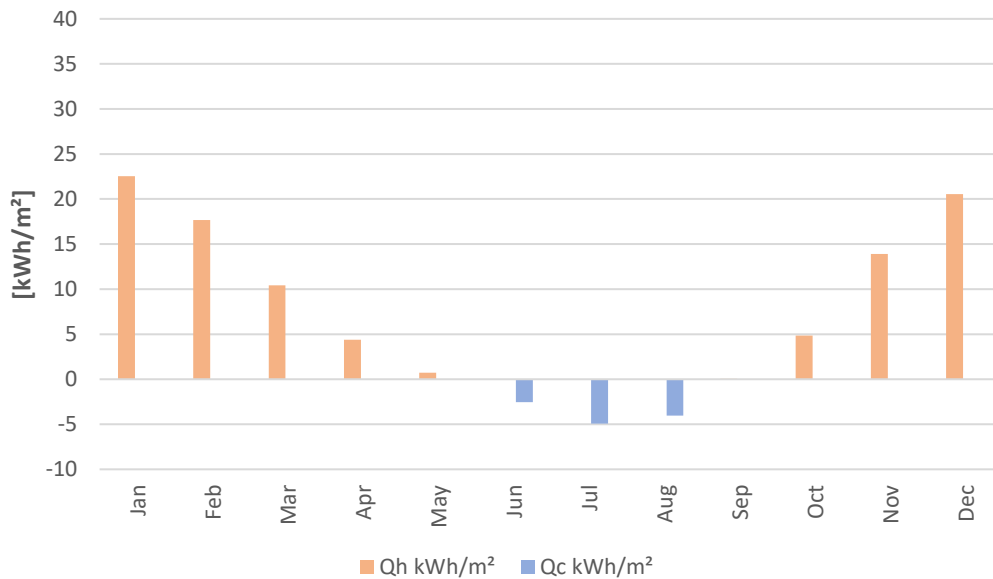
I risultati della domanda energetica del caso C sono mostrati nella Tabella 16

<sup>17</sup> Design builder calcola in automatico il suolo alla base del modello, ma se c'è un locale interrato o semi-interrato questo va specificato modellandogli il terreno attorno

Tabella 16: fabbisogno energetico di riscaldamento e raffrescamento - CASO C

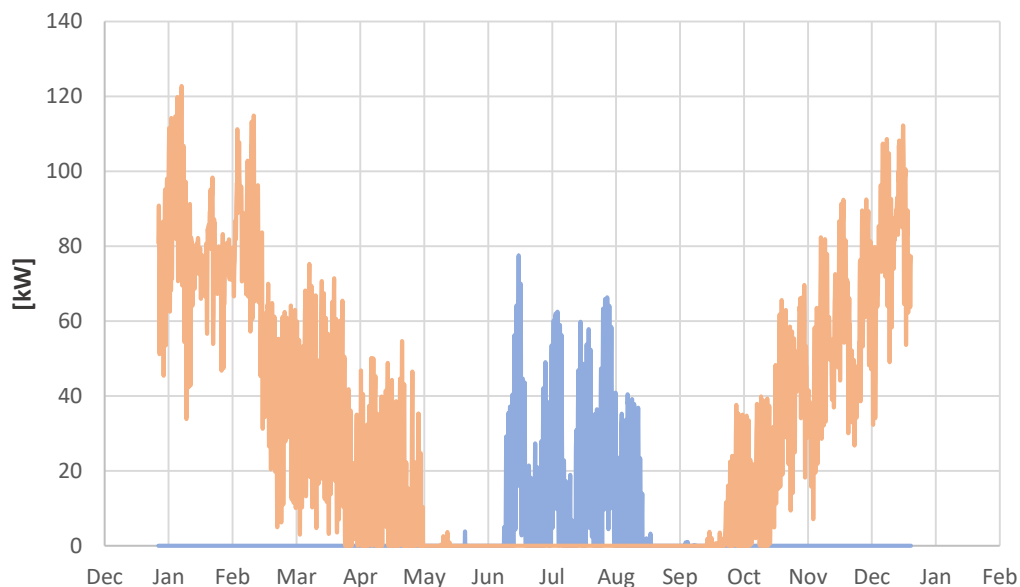
| Heating need          | Cooling need          | Total                 |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] | [kWh/m <sup>2</sup> ] |
| 95.01                 | 11.52                 | 106.53                |

Figura 35: Fabbisogno energetico diviso per i mesi dell'anno – CASO C



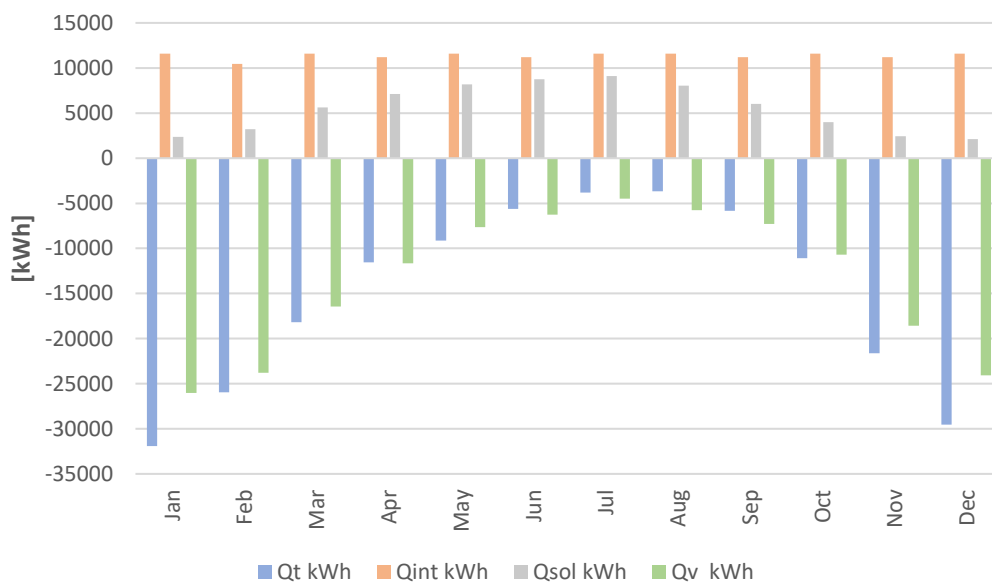
Il caso C è quello che più si avvicina ad un edificio moderatamente ben coibentato, la sua domanda energetica infatti è di poco maggiore a 100 kWh/m<sup>2</sup>annui. Il caso C nonostante abbia un'area climatizzata maggiore del caso B (Tabella 9) presenta rispetto a quest'ultimo dei picchi di potenza che hanno valore (kW) leggermente minore in inverno (Figura 36). Questo è dovuto a molti fattori, tra cui un miglior isolamento, e molto probabilmente al fatto che i pannelli del caso B sono in cls facciavista e hanno una trasmittanza leggermente maggiore rispetto a quelli del caso in questione (Tabella 9).

Figura 36: Flussi istantanei dello stato di fatto - CASO C



La Figura 37 ci mostra il bilancio di energia dei vari mesi, dove per la prima volta notiamo che, nonostante le  $Q_t$  siano maggiori nella maggior parte dei mesi, non vi è una differenza accentuata tra le dispersioni per trasmissioni ( $Q_t$ ) e quelle per ventilazione ( $Q_v$ ). Nei moderni edifici dove si ha un'elevata coibentazione, le dispersioni attraverso le parti opache sono minime, per cui quasi la totalità del calore viene disperso per ventilazione.

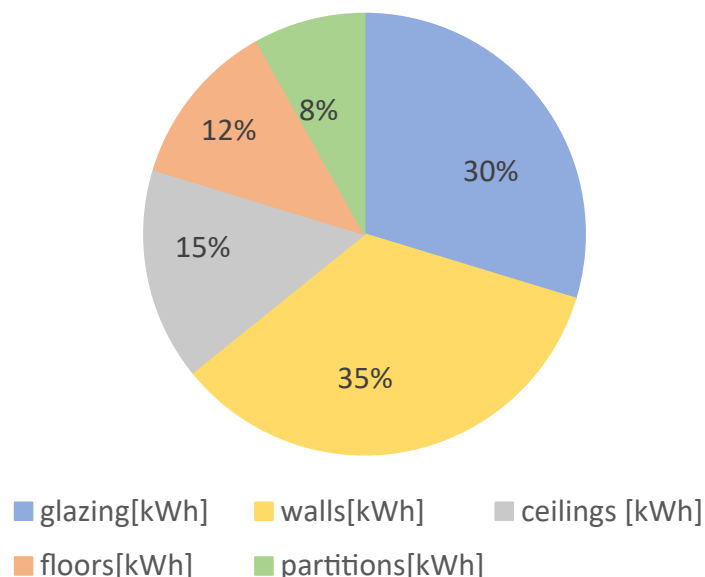
Figura 37: bilancio di energia mensile (solo sensibile) – CASO C



Ecco perché nelle case in classe energetica quasi zero oltre ad introdurre materiali isolanti nelle pareti si studiano serramenti in grado di mantenere il calore nell'ambiente interno. Questa scelta è accompagnata di solito, da altri tipi di tecnologie come ad esempio sistemi che permettano un ricambio d'aria forzato con recuperatori di calore senza l'apertura manuale delle finestre (in quanto sebbene sia importante non disperdere calore, risulta di vitale importanza espellere gli elementi nocivi per la salute attraverso un ricambio d'aria).

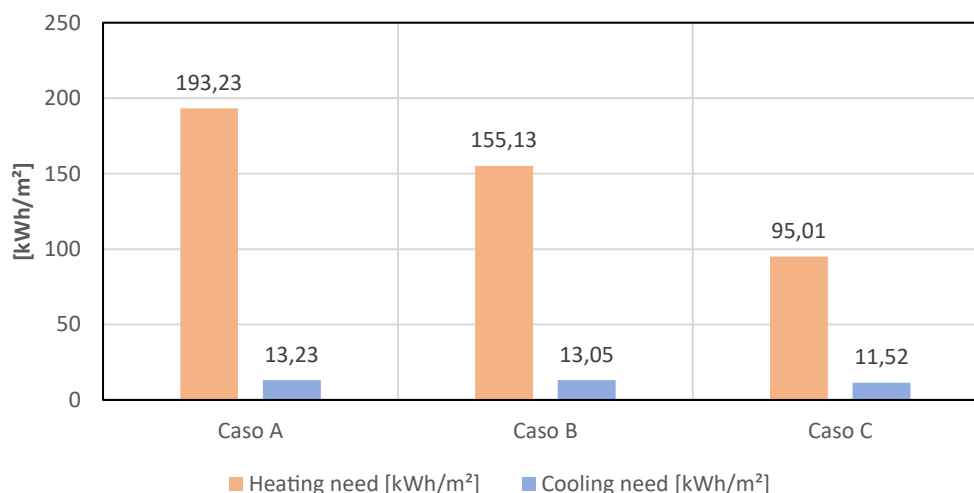
Come riportato nella Figura 38, anche in questo caso le dispersioni per trasmissione maggiori si hanno attraverso i muri, seguiti dai serramenti. Ciò significa che la riduzione delle perdite di energia può essere solo in parte mitigata dall'isolamento dei muri, un intervento sui serramenti può essere considerato ugualmente importante.

Figura 38: percentuale dei flussi dispersi per trasmissione attraverso gli elementi opachi e trasparenti – CASO C



La comparazione tra le domande di riscaldamento e raffrescamento dei tre casi sono riportati nella Figura 39.

Figura 39: fabbisogno energetico dei 3 casi studio



### 3.2.2.2 Riduzione della domanda energetica dopo gli interventi di retrofit

Qui di seguito sono riportati i diversi scenari e la riduzione della domanda energetica. Prima di mostrarli però, nella Tabella 17 sono riportate le conducibilità dei prodotti a base di aerogel applicati nei vari scenari di retrofit. Mentre, nella Tabella 18 sono illustrate la variazione di trasmittanza con l'applicazione dei differenti prodotti alle pareti :



Tabella 17: conducibilità dei materiali a base di aerogel

| materiali isolanti utilizzati negli scenari di retrofit | $\lambda$ | Spessori utilizzati |   |   |
|---------------------------------------------------------|-----------|---------------------|---|---|
|                                                         | W/mK      | cm                  |   |   |
| termorasatura                                           | 0.027     | 0.5                 |   |   |
| termointonaco interno                                   | 0.028     | 2                   | 4 | 6 |
| termointonaco esterno                                   | 0.027     | 2                   | 4 | 6 |

Tabella 18: trasmittanze involucro opaco e partizione dei 3 casi

| Trasmittanza chiusura e partizione verso ZNR |                |         |        | Caso A       | Caso B       | Caso C       |
|----------------------------------------------|----------------|---------|--------|--------------|--------------|--------------|
| U<br>pareti<br>[W/m²K]                       | Stato di fatto |         |        | 1.22         | 0.616        | 0.57         |
|                                              | termorasatura  | interno | 0.5 cm | 0.992        | 0.553        | 0.516        |
|                                              | termointonaco  | Interno | 2 cm   | 0.661        | 0.430        | 0.407        |
|                                              |                |         | 4 cm   | 0.449        | <b>0.329</b> | <b>0.315</b> |
|                                              |                |         | 6 cm   | <b>0.340</b> | <b>0.266</b> | <b>0.257</b> |
|                                              |                | Esterno | 2 cm   | -            | 0.423        | 0.403        |
|                                              |                |         | 4 cm   | -            | 0.322        | 0.310        |
|                                              |                |         | 6 cm   | -            | <b>0.260</b> | <b>0.252</b> |
| U<br>Partizione<br>[W/m²K]                   | Stato di fatto |         |        | 2.12         | 3.45         | 3.45         |
|                                              | termorasatura  | Interno | 0.5 cm | 1.52         | 2.11         | 2.11         |
|                                              | termointonaco  |         | 2 cm   | 0.86         | 1.01         | 1.01         |
|                                              |                |         | 4 cm   | 0.53         | 0.59         | 0.59         |
|                                              |                |         | 6 cm   | 0.39         | 0.41         | 0.41         |

I valori evidenziati ricadono nei limiti imposti dal DM 26/06/15 (Tabella 11-Tabella 12)

#### a) Riduzione del fabbisogno di energia: CASO A

Gli interventi di retrofit sul Caso studio A hanno riguardato l'applicazione del termointonaco interno e della termorasatura nei vari scenari mostrati nella Tabella 19:

Tabella 19: scenari previsti nel CASO A

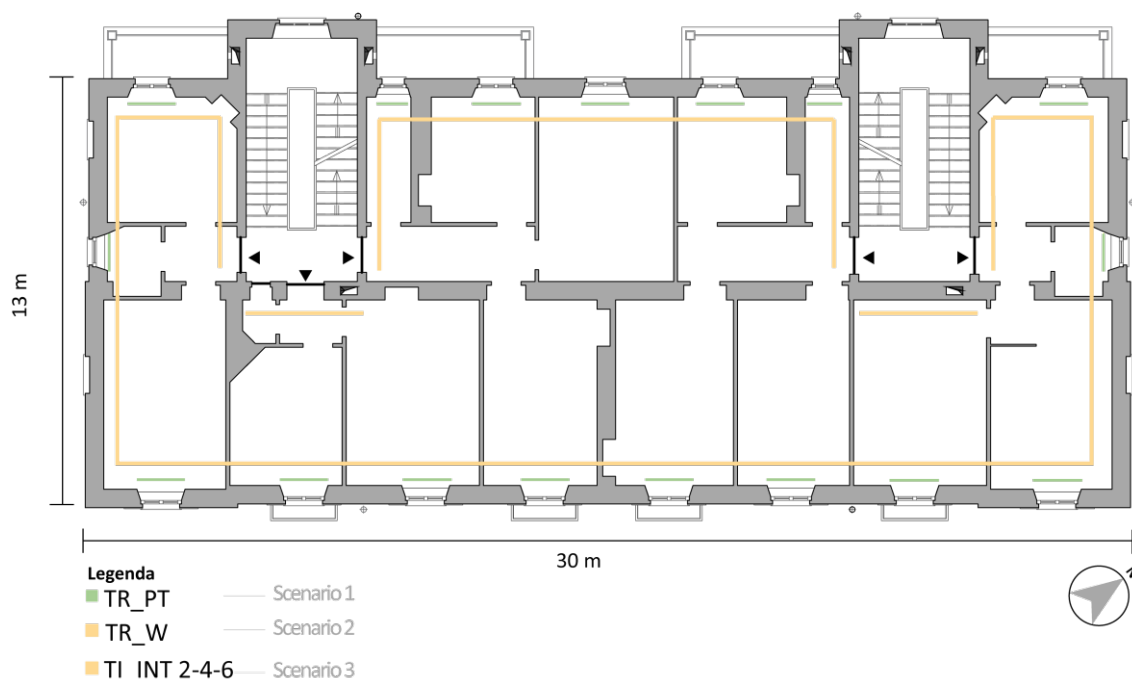
| Prodotto      | Spessore (cm) | Codice | Scenari previsti | Ambiente adiacente a chiusura o partizione | Applicato su  |
|---------------|---------------|--------|------------------|--------------------------------------------|---------------|
| Termorasatura | 0.5           | TR_PT  | Scenario 1       | -                                          | Ponti termici |

|                          |   |          |            |                |                                                |
|--------------------------|---|----------|------------|----------------|------------------------------------------------|
| interno                  |   | TR_W     | Scenario 2 | Esterno<br>ZNR | Intera<br>Chiusura -<br>Intera parti-<br>zione |
| Termointonaco<br>interno | 2 | TI_INT.2 | Scenario 3 | Esterno        | Intera<br>Chiusura-intera<br>partizione        |
|                          | 4 | TI_INT.4 |            |                |                                                |
|                          | 6 | TI_INT.6 |            |                |                                                |

ZNR: zona non riscaldata

Nell'immagine sottostante (Figura 40) sono raffigurati gli interventi sopra riportati in pianta, il TR\_W e i vari TI\_INT (2-4-6), sono stati applicati (nei diversi scenari) sulle superfici interne a contatto con l'esterno e le zone non riscaldate (vani scala). Mentre le partizioni interne tra gli alloggi non sono state oggetto di retrofit in quanto, separando due zone riscaldate alla stessa temperatura, sono state considerate adiabatiche. Il TR\_PT invece è stato applicato intorno ai serramenti per la correzione dei ponti termici che influenzano il giunto parete-finestra (in verde nell'immagine)

Figura 40: pianta tipo - schematizzazione interventi di retrofit CASO A

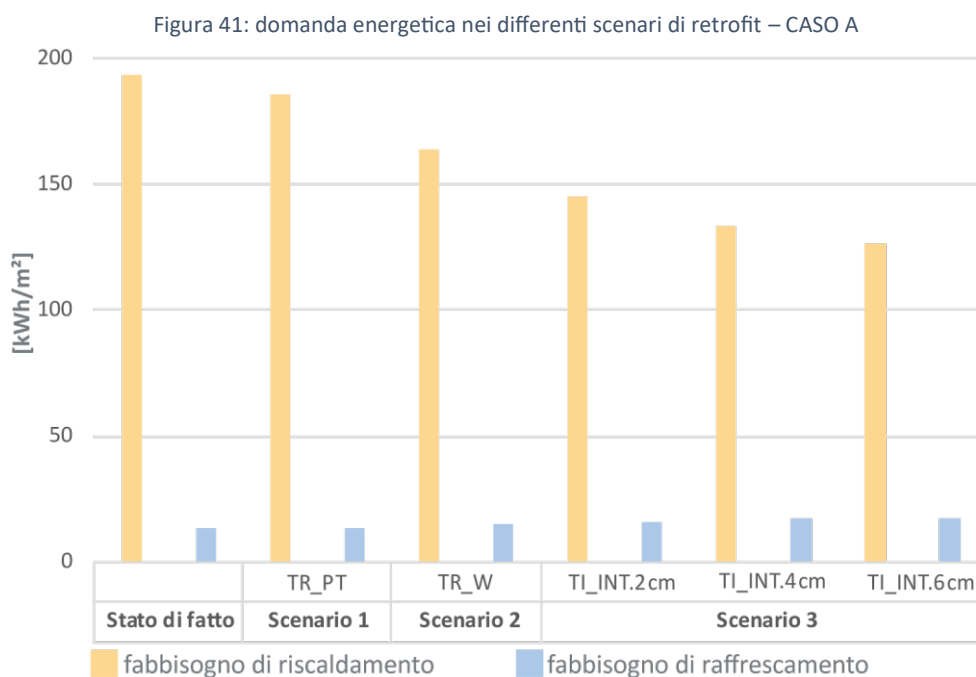


Dai risultati si evince che, ad un più alto isolamento corrisponde la maggiore riduzione del fabbisogno (Tabella 20). Comunque anche con l'applicazione di 5 mm di rasatura si ha un lieve miglioramento rispetto allo stato di fatto.

Tabella 20: fabbisogno totale nei vari scenari – CASO A

Miglioramento max ottenuto nello scenario 3 TI\_INT 6 cm con una diminuzione di 71.03 kWh/m²

| stato di fatto     | Scenario 1         | Scenario 2         | Scenario 3         |                    |                    |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                    | TR_PT              | TR_W               | TI_INT.2cm         | TI_INT.4cm         | TI_INT.6cm         |
| kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> |
| 206,46             | 199,02             | 179,17             |                    |                    |                    |
| -4%                |                    |                    |                    |                    |                    |
|                    | -13%               |                    | 155,54             |                    |                    |
|                    |                    | -25%               |                    | 142,32             |                    |
|                    |                    | -31%               |                    |                    | 135,43             |
|                    |                    |                    | -34%               |                    |                    |



Se però andiamo ad esaminare le domande di riscaldamento e raffrescamento separate, notiamo che l'isolamento apporta dei benefici in inverno con una riduzione consistente nello scenario 3 del fabbisogno di riscaldamento (Figura 41 - Tabella 21). D'altro canto però, vi è un aumento della domanda di raffrescamento in estate (Tabella 22).

Tabella 21: fabbisogno di riscaldamento nei vari scenari - CASO A

Miglioramento max ottenuto nello **scenario 3 TI\_INT 6 cm** con una diminuzione di 76.45 kWh/m<sup>2</sup>

| stato di fatto | Scenario 1 | Scenario 2 | Scenario 3 |
|----------------|------------|------------|------------|
|----------------|------------|------------|------------|

|                    | TR_PT              | TR_W               | TI_INT.2cm         | TI_INT.4cm         | TI_INT.6cm         |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> |
| 193,23             | 185,29             | 164,13             |                    |                    |                    |
| -4%                |                    |                    |                    |                    |                    |
| -15%               |                    |                    | 138,91             |                    |                    |
| -28%               |                    |                    |                    | 124,46             |                    |
| -36%               |                    |                    |                    |                    | 116,78             |
| -40%               |                    |                    |                    |                    |                    |

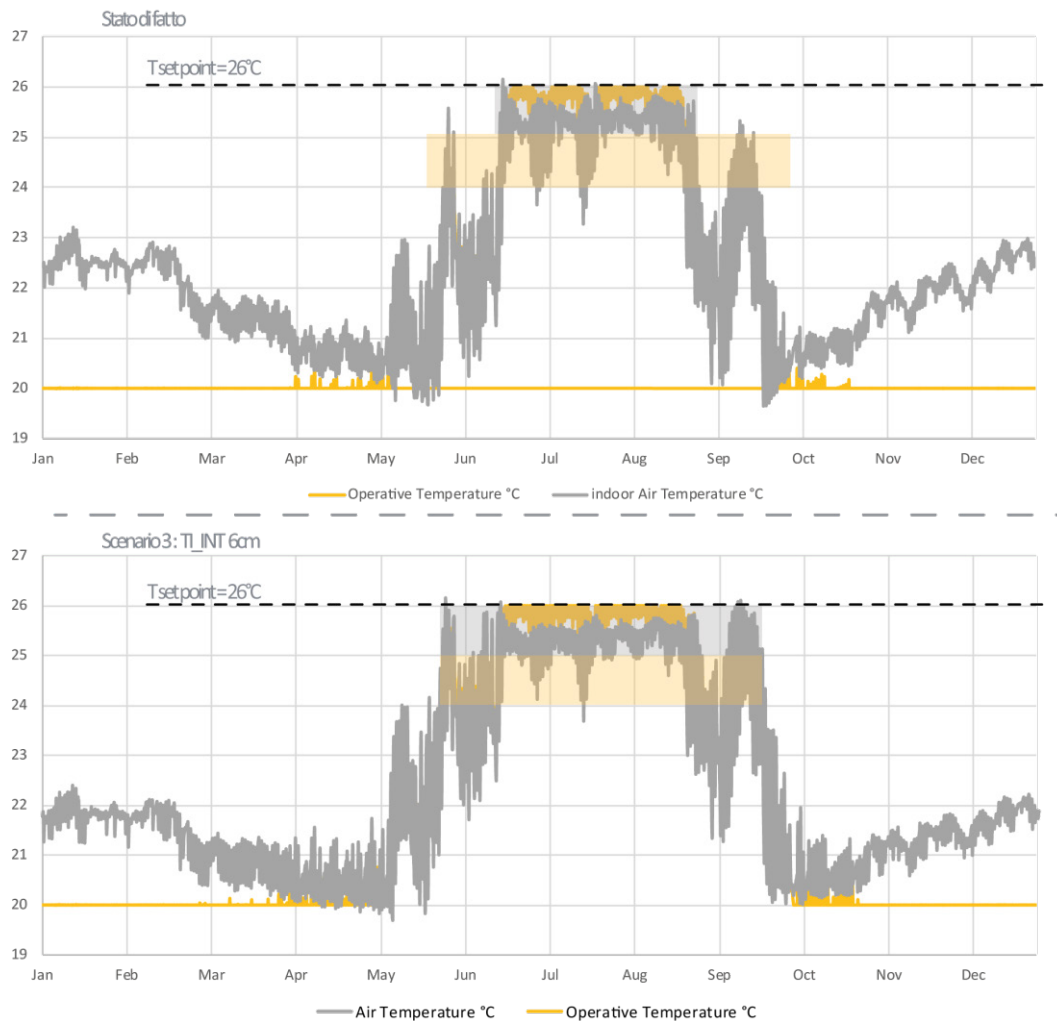
Tabella 22: fabbisogno di raffrescamento nei vari scenari – CASO A

Peggioramento max ottenuto nello **scenario 3 TI\_INT 6 cm** con un aumento di 5.43 kWh/m<sup>2</sup>

| stato di fatto     | Scenario 1         | Scenario 2         | Scenario 3         |                    |                    |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                    | TR_PT              | TR_W               | TI_INT.2cm         | TI_INT.4cm         | TI_INT.6cm         |
| kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> |
| 13,23              | 13,72              | 15,04              |                    |                    |                    |
| +4%                |                    |                    |                    |                    |                    |
| +14%               |                    |                    | 16,63              |                    |                    |
| +26%               |                    |                    |                    | 17,86              |                    |
| +35%               |                    |                    |                    |                    | 18,66              |
| +41%               |                    |                    |                    |                    |                    |

Vedendo i risultati del Caso A dove, in generale, si può affermare che l'applicazione del termoinfonaco apporti notevoli benefici dal punto di vista energetico, si è voluta fare un'ulteriore indagine riguardo alle temperature interne e in seguito anche alle potenze richieste all'impianto dello stato di fatto e confrontarle con quelle dello scenario 3 TI\_INT 6 cm. Questo perché si pensava che l'aumento della richiesta di raffrescamento estivo fosse legato ad una perdita di capacità areica della parete massiva causata dall'applicazione interna dell'isolante. Di seguito i suddetti confronti:

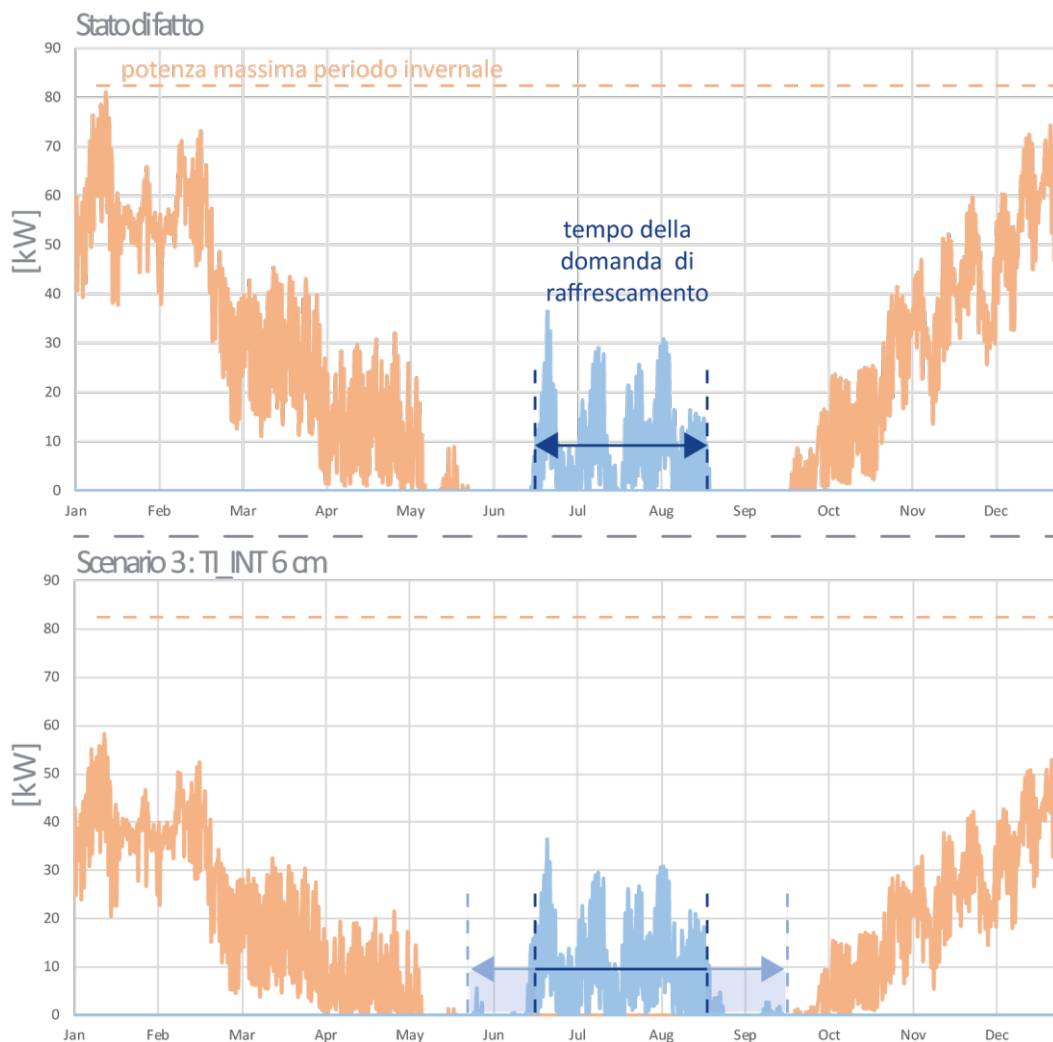
Figura 42: Andamento giornaliero della temperatura nello stato di fatto e nello scenario 3 TI\_INT 6 - CASO A



Esaminando il grafico delle temperature (Figura 42) si può evincere che effettivamente c'è un aumento dei picchi nello scenario 3 rispetto allo stato di fatto. Le temperature con l'applicazione dell'isolante scendono raramente al di sotto dei 24°C durante il periodo che va da metà giugno a fine agosto. Però questo aumento generale di temperatura in estate non è dovuto ad una perdita di inerzia della parete. Infatti, se si guardano i grafici delle potenze (Figura 43), quello che cambia è solo una minima dilatazione della domanda di raffrescamento legata al fatto che l'applicazione del termointonaco diminuisca la dissipazione del calore notturno. Ma questo è un problema inerente la coibentazione in generale indipendentemente dal materiale utilizzato. L'andamento dei flussi istantanei estivo invece rimane pressoché identico e non va mai oltre i circa 35 kW registrati nello stato di fatto. Se ci fossero stati dei surplus di riscaldamento dovuti alla perdita di inerzia, le potenze sarebbero state più alte rispetto ai picchi registrati nello stato di fatto. Un altro aspetto molto più importante che si evince dalla Figura 42 è che la temperatura interna dell'aria si riduce di circa 1°C durante tutta la stagione invernale. Questo significa che l'impianto utilizza meno energia rispetto allo stato di fatto, per mantenere il setpoint della temperatura operativa a 20°C. Questo è dovuto al fatto che l'applicazione interna del termointonaco incrementa la temperatura superficiale di parete per cui la temperatura media radiante

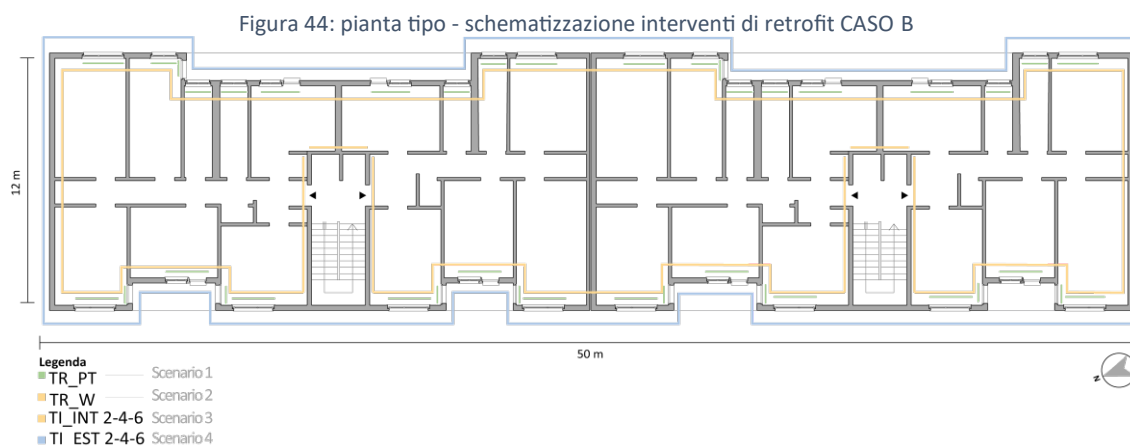
degli ambienti risulta più elevata. Infatti, se si esamina la Figura 43, si nota una drastica riduzione dei picchi di potenza durante l'inverno che vanno ad influire maggiormente sul fabbisogno totale in quanto il periodo di riscaldamento è più lungo di quello estivo.

Figura 43: confronto tra i flussi istantanei (kW) stato di fatto- scenario 3 TI\_INT 6 - CASO A



*b) Riduzione del fabbisogno di energia: CASO B*

Gli scenari previsti sull'edificio in via delle Querce sono tutti quelli racchiusi nella Tabella 13 e illustrati nella planimetria di seguito:



La riduzione del fabbisogno del caso B (Tabella 23) non è accentuata come accade per il caso A, dove già dallo scenario 2 si ha una riduzione di circa il doppio rispetto a quanto accade invece qui. Il motivo principale risiede nel fatto che l'edificio di via delle Querce presenta già una minima coibentazione per cui si dovrebbe intervenire con spessori maggiori per avere delle incidenze considerevoli sulla domanda.

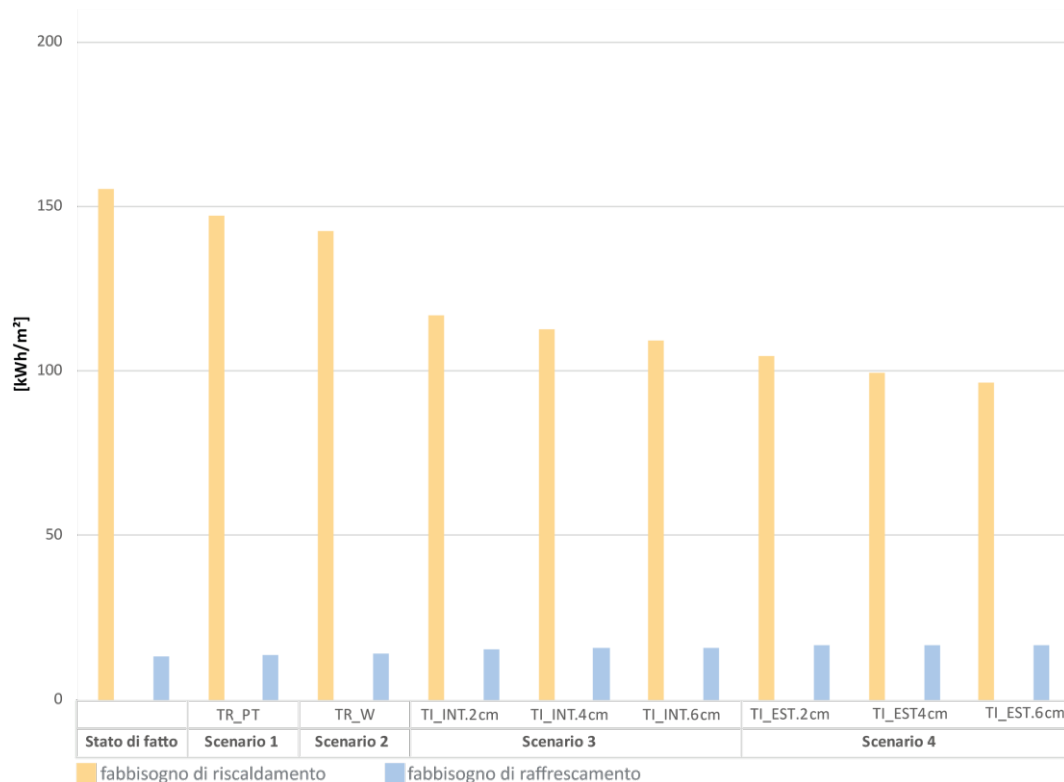
Tabella 23: fabbisogno totale nei vari scenari – CASO B

Miglioramento max ottenuto nello scenario 4 TI\_EST 6 cm con una diminuzione di 55,23 kWh/m<sup>2</sup>

Nello scenario 3 TI\_INT.6 cm c'è stata una diminuzione pari a 43,2 kWh/m<sup>2</sup>

| Stato di fatto     | Scenario 1         | Scenario 2         | Scenario 3         |                    |                    | Scenario 4         |                    |                    |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                    | TR_PT              | TR_W               | TI_INT. 2cm        | TI_INT. 4cm        | TI_INT.6cm         | TI_EST.2 cm        | TI_EST.4 cm        | TI_EST.6 cm        |
| kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> |
| 168,18             | 160,83             | 156,37             | 132,40             | 127,88             | 124,98             | 121,09             | 115,87             | 112,95             |
|                    | -4%                |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|                    | -7%                |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|                    | -21%               |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|                    | -24%               |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|                    | -26%               |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|                    | -28%               |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|                    | -31%               |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|                    | -33%               |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |

Figura 45: domanda energetica nei differenti scenari di retrofit – CASO B



Se si vanno ad esaminare le domande separate (Tabella 24-Tabella 25), si può notare che con l'aumento dello spessore d'isolante il fabbisogno invernale è quello che subisce una riduzione più marcata. Mentre la richiesta energetica durante la stagione estiva rimane pressoché la stessa, con un aumento massimo di soli 3.5 kWh/m²annui nello scenario 4 TI\_EST 6 cm rispetto allo stato di fatto.

Tabella 24: fabbisogno di riscaldamento nei vari scenari - CASO B

Miglioramento max ottenuto nello **scenario 4 TI\_EST 6 cm** con una diminuzione di 58,75 kWh/m²

Nello **scenario 3 TI\_INT.6 cm** c'è stata una diminuzione pari a 45,77 kWh/m²

| Stato di fatto | Scenario 1 | Scenario 2 | Scenario 3 |            |            | Scenario 4 |            |            |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                | TR_PT      | TR_W       | TI_INT.2cm | TI_INT.4cm | TI_INT.6cm | TI_EST.2cm | TI_EST.4cm | TI_EST.6cm |
| kWh/m²         | kWh/m²     | kWh/m²     | kWh/m²     | kWh/m²     | kWh/m²     | kWh/m²     | kWh/m²     | kWh/m²     |
| 155,13         | 147,28     |            |            |            |            |            |            |            |
| -5%            |            | 142,50     | 117,01     | 112,36     | 109,36     | 104,50     | 99,29      | 96,38      |



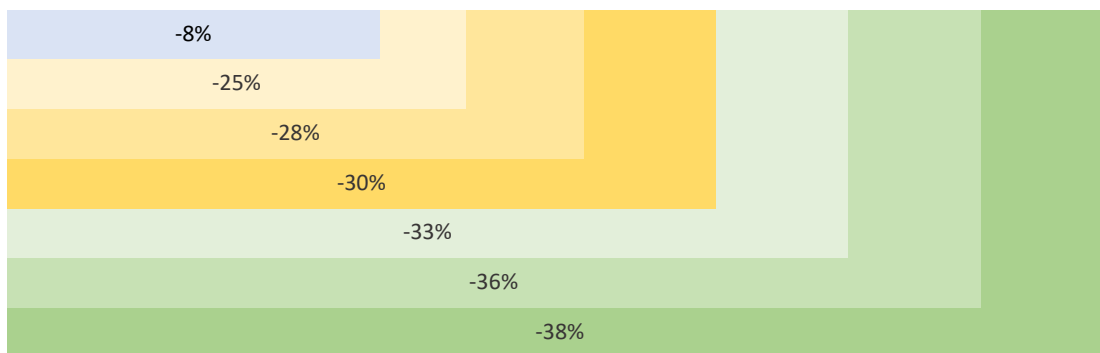


Tabella 25: fabbisogno di raffrescamento nei vari scenari – CASO B

Peggioramento max ottenuto nello **scenario 4 TI\_EST 6 cm** con un aumento di 3,52 kWh/m<sup>2</sup>

Nello **scenario 3 TI\_INT.6 cm** c'è stata un aumento pari a 2,58 kWh/m<sup>2</sup>

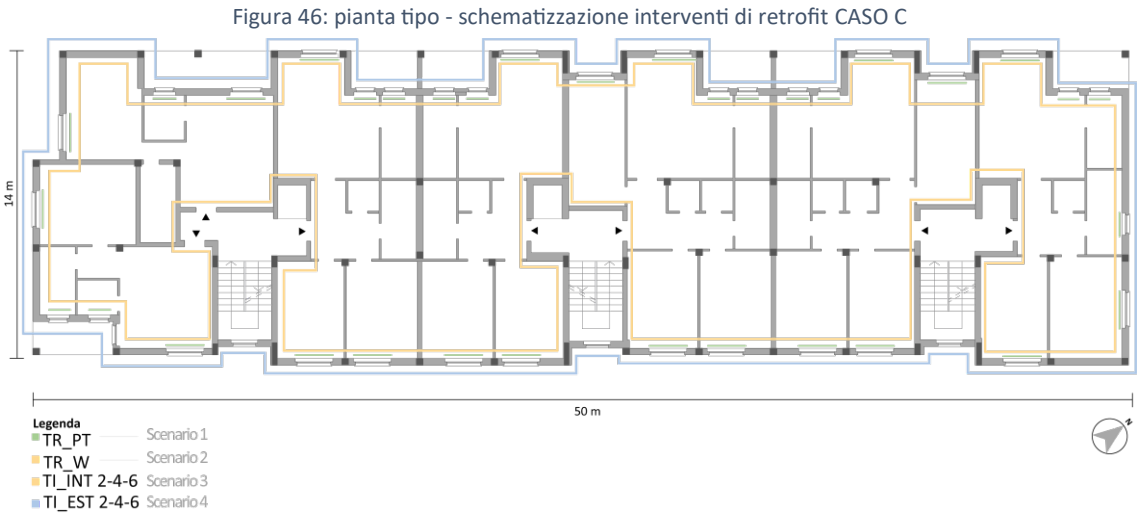
| Stato di fatto     | Scenario 1         | Scenario 2         | Scenario 3         |                    |                    | Scenario 4         |                    |                    |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                    | TR_PT              | TR_W               | TI_IN T.2cm        | TI_INT.4 cm        | TI_INT.6cm         | TI_EST.2 cm        | TI_EST.4 cm        | TI_EST.6 cm        |
| kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> |
| 13,05              | 13,55              | 13,87              |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| +4%                |                    |                    | 15,39              |                    |                    |                    |                    |                    |
| +6%                |                    |                    |                    | 15,52              |                    |                    |                    |                    |
| +18%               |                    |                    |                    |                    | 15,63              |                    |                    |                    |
| +19%               |                    |                    |                    |                    |                    | 16,59              |                    |                    |
| +20%               |                    |                    |                    |                    |                    |                    | 16,58              |                    |
| +27%               |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    | 16,57              |
| +27%               |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| +27%               |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |

Se andiamo a confrontare le domande energetiche tra lo stato di fatto e i vari scenari possiamo notare che nel periodo estivo i fabbisogni rimangono pressoché uguali. La dilatazione della domanda di raffrescamento è minore a quanto accade per il primo caso. Il motivo per cui qui l'andamento estivo della domanda non è influenzato dal materiale e quindi non ci sono rischi di surriscaldamento interno, può risiedere nel fatto che, come abbiamo visto nella Figura 33, le chiusure rappresentano l'elemento opaco attraverso cui avvengono il 30% delle dispersioni per trasmissione. Ma vi è anche una simile percentuale di flussi trasmessi attraverso i solai che negli

scenari di retrofit rimangono senza coibentazione. La superficie disperdente opaca che viene coibentata (quella delle chiusure) è minore rispetto alla superficie dei solai che risultano molto più disperdenti dopo l'isolamento delle pareti. Quindi si allontana il rischio di surriscaldamento, ma viene meno anche l'effetto dell'isolamento in generale. L'applicazione esterna del termointonaco rispetto a quella interna apporta benefici maggiori arrivando a una riduzione della domanda di riscaldamento di circa il 40%. La maggiore efficacia dell'isolamento esterno rispetto a quello interno è dovuto al fatto che, la coibentazione a cappotto va a ridurre anche quelle dispersioni che avvengono attraverso i solai interpiano non oggetto di retrofit interno. Ovviamente però rimane sempre il fatto che le dispersioni che avvengono attraverso la superficie del solaio sottotetto non vengono ridotte.

*c) Riduzione del fabbisogno di energia: CASO C*

Anche per il caso C, gli interventi previsti sono tutti quelli elencati Tabella 13, nella planimetria sottostante vi è la schematizzazione dei vari scenari.



Se si va ad esaminare il fabbisogno totale qui la coibentazione ha influito meno sulla domanda rispetto agli altri due casi. Questo perché il caso C presenta un isolamento preesistente non solo nell'intercapedine delle chiusure verticali, ma anche nel solaio del sottotetto.

Tabella 26: fabbisogno totale nei vari scenari – CASO C

Miglioramento max ottenuto nello **scenario 4 TI\_EST 6 cm** con una diminuzione di 47,5 kWh/m<sup>2</sup>

Nello **scenario 3 TI\_INT.6 cm** c'è stata una diminuzione pari a 36,47 kWh/m<sup>2</sup>

| Stato di fatto     | Scenario 1         | Scenario 2         | Scenario 3         |                    |                    | Scenario 4         |                    |                    |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                    | TR_PT              | TR_W               | TI_INT .2cm        | TI_INT. 4cm        | TI_INT.6 cm        | TI_EST.2 cm        | TI_EST.4 cm        | TI_EST.6 cm        |
| kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> |

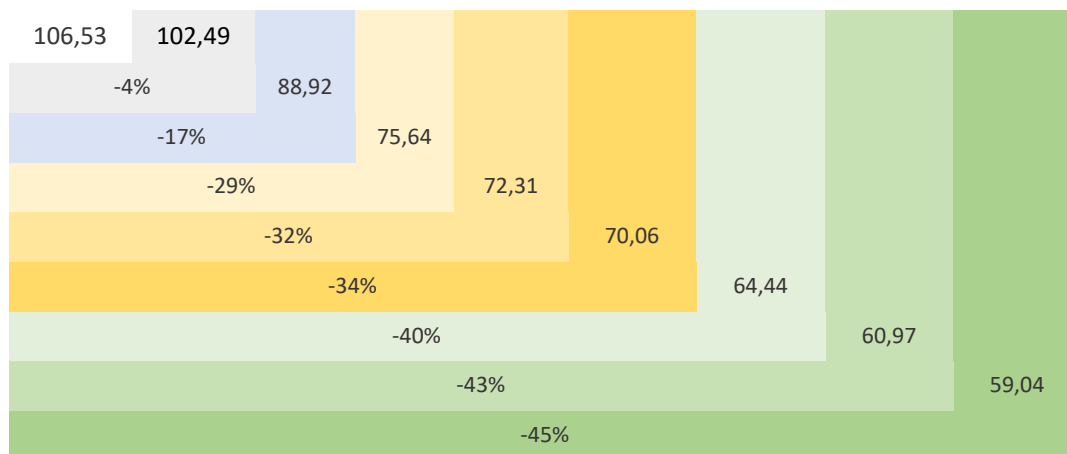


Figura 47: domanda energetica nei differenti scenari di retrofit – CASO C

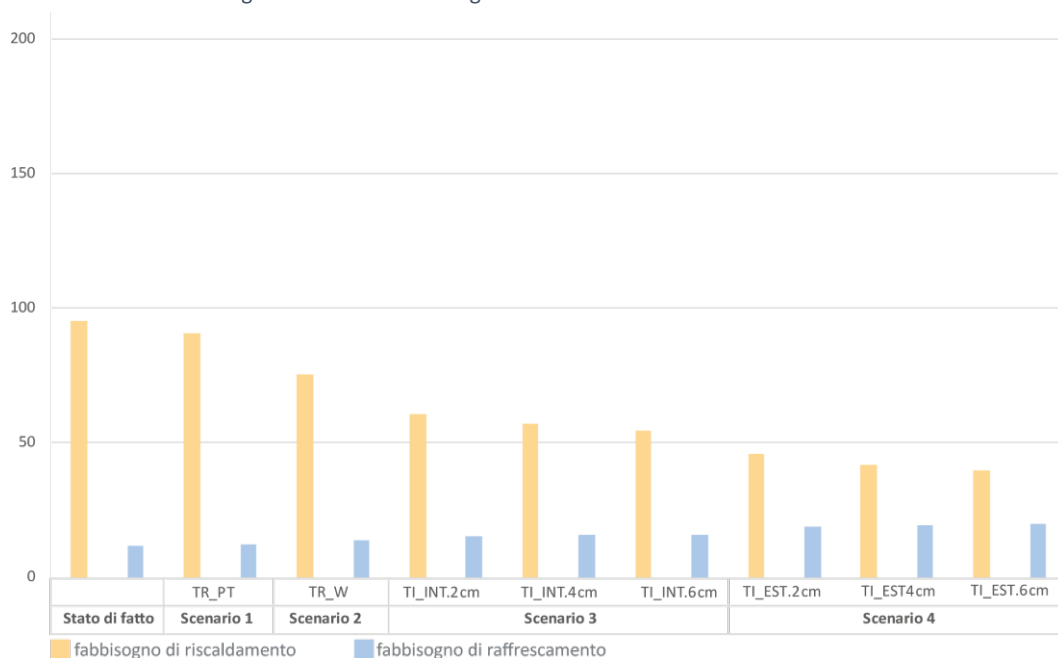
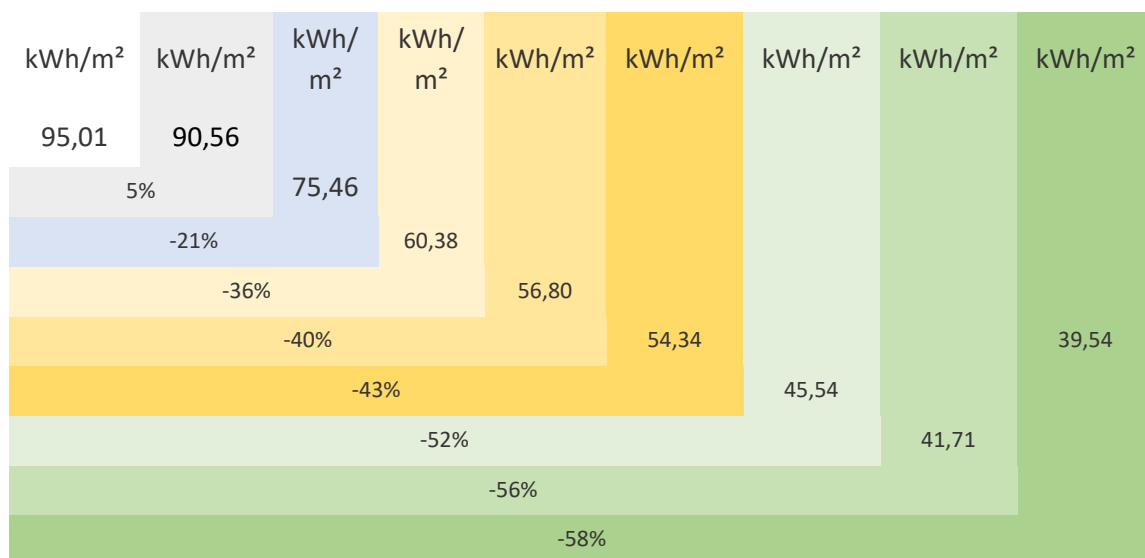


Tabella 27: fabbisogno di riscaldamento nei vari scenari - CASO C

Miglioramento max ottenuto nello **scenario 4 TI\_EST 6 cm** con una diminuzione di 55,5 kWh/m<sup>2</sup>  
 Nello **scenario 3 TI\_INT.6 cm** c'è stata una diminuzione pari a 40,67 kWh/m<sup>2</sup>

| Stato di fatto | Scenario 1 | Scenario 2 | Scenario 3  |             |            | Scenario 4  |             |             |
|----------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|
|                | TR_PT      | TR_W       | TI_INT. 2cm | TI_INT.4 cm | TI_INT.6cm | TI_EST.2 cm | TI_EST.4 cm | TI_EST.6 cm |



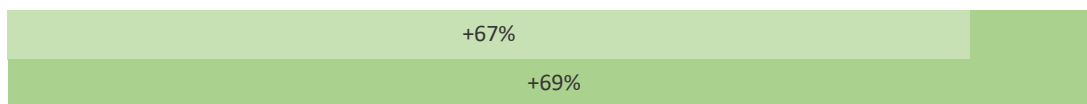
Ed è proprio l'isolamento aggiuntivo dei solai che causa un aumento della domanda per raffreddamento nel caso C. Ciò che distingue il caso B da questo è, oltre alla tipologia diversa, il fatto che qui il solaio sottotetto coibentato rappresenta un ostacolo aggiuntivo a quello delle pareti isolate per la dissipazione del calore notturno.

Tabella 28: fabbisogno di raffreddamento nei vari scenari – CASO C

Peggioramento max ottenuto nello **scenario 4 TI\_EST 6 cm** con un aumento di 8 kWh/m²

Nello **scenario 3 TI\_INT.6 cm** c'è stata un aumento pari a 4,2 kWh/m²

| Stato di fatto | Scenario 1 | Scenario 2 | Scenario 3 |            |            | Scenario 4 |            |            |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                | TR_PT      | TR_W       | TI_INT.2cm | TI_INT.4cm | TI_INT.6cm | TI_EST.2cm | TI_EST.4cm | TI_EST.6cm |
| kWh/m²         | kWh/m²     | kWh/m²     | kWh/m²     | kWh/m²     | kWh/m²     | kWh/m²     | kWh/m²     | kWh/m²     |
| 11,52          | 11,93      | 13,45      |            |            |            |            |            |            |
|                | +4%        |            |            |            |            |            |            |            |
|                |            |            | 15,25      |            |            |            |            |            |
|                | +17%       |            |            | 15,51      |            |            |            |            |
|                |            | +32%       |            |            | 15,72      |            |            |            |
|                |            | +35%       |            |            |            | 18,90      |            |            |
|                |            | +36%       |            |            |            |            | 19,27      | 19,51      |
|                |            |            | +64%       |            |            |            |            |            |



Se si va ad esaminare la temperatura interna dell'aria nello stato di fatto e nell'ultimo scenario (Figura 48), si può notare un aumento nell'ultimo scenario rispetto allo stato di fatto. Se si guardano i picchi di carico (Figura 49) dei due differenti scenari però, si può notare come anche in questo caso, come era successo nell'edificio di via Arquata, questo innalzamento delle temperature si traduce in un aumento della domanda. Dato che l'andamento dei picchi rimane il medesimo non si può affermare che il materiale vada a disturbare e compromettere la prestazione estiva. Però si può di certo notare come durante il corso della stagione invernale la temperatura interna dell'aria si sia ridotta in seguito all'applicazione del termointonaco (in maniera più ridotta rispetto a quanto accadeva per il caso A) e i picchi di potenza richiesti per il riscaldamento siano dimezzati rispetto allo stato di fatto.

Figura 48: Andamento giornaliero della temperatura nello stato di fatto e nello scenario 5-6 TI\_EST 6 cm - CASO C

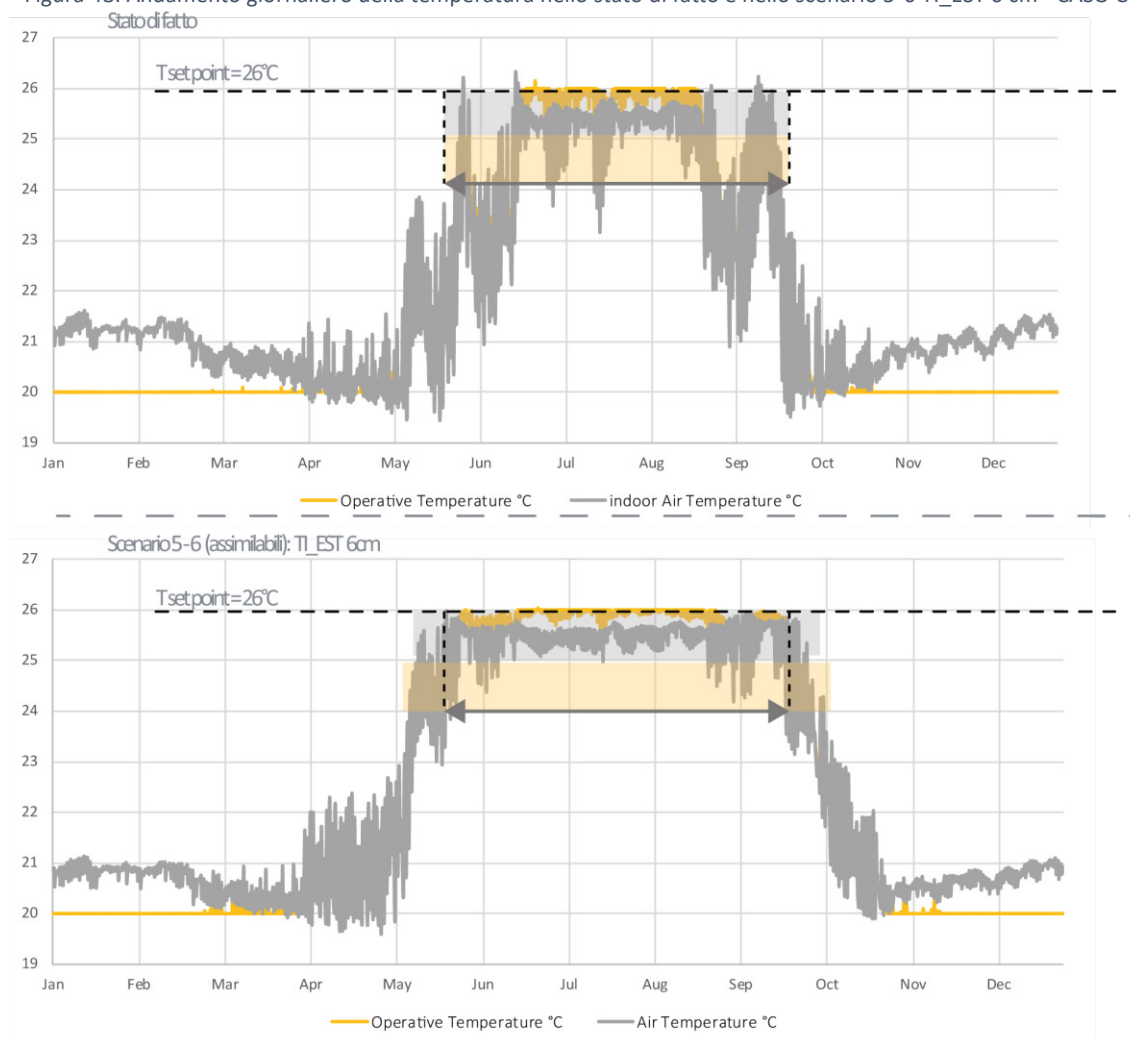
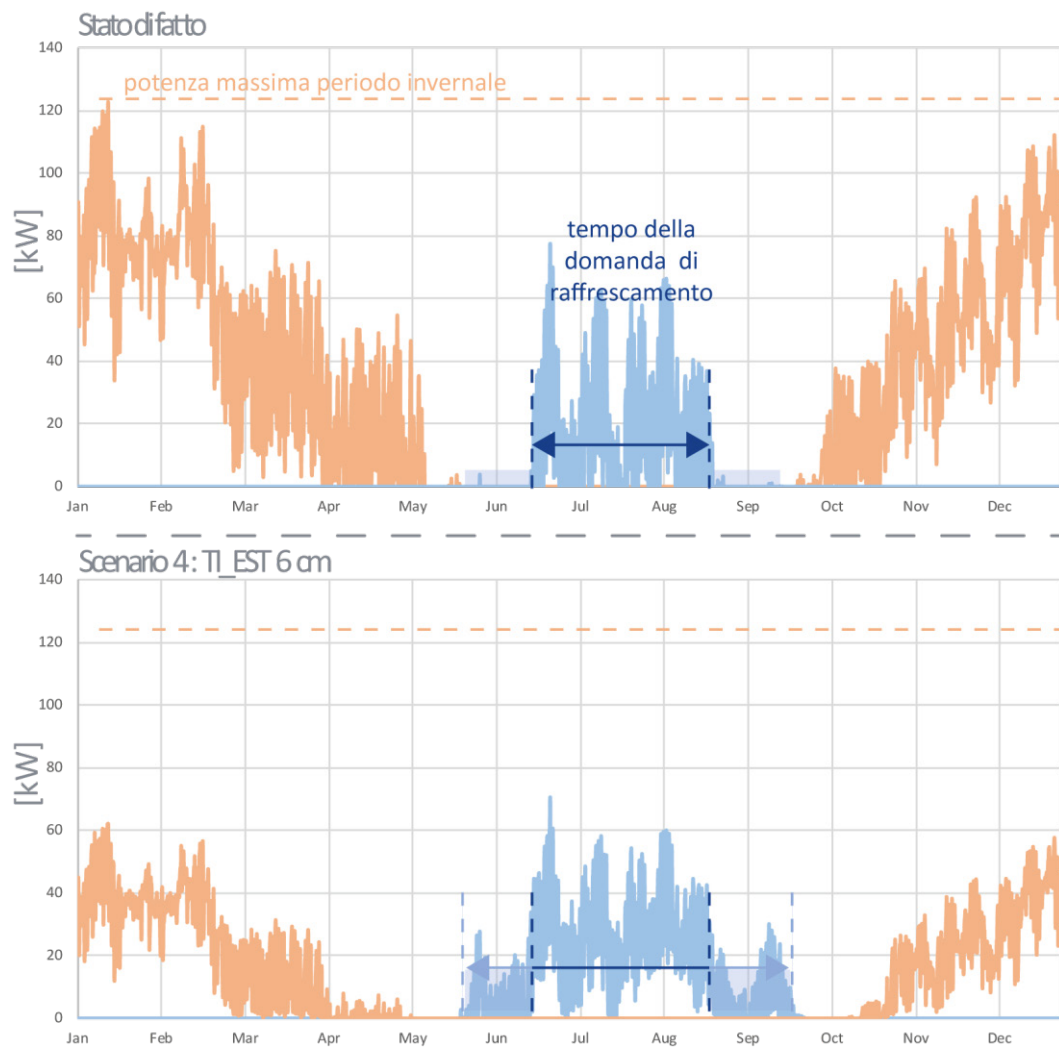


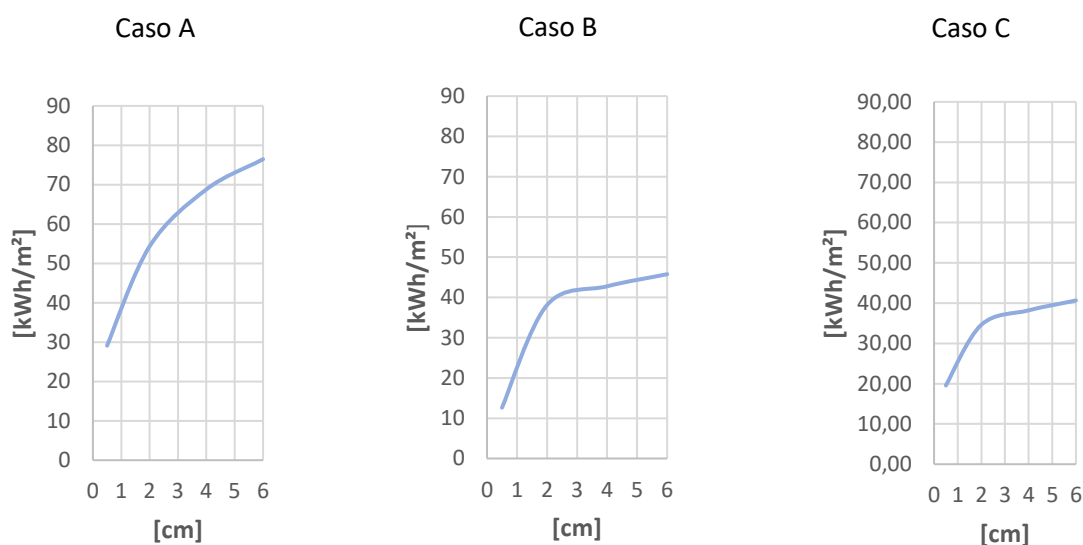
Figura 49: confronto tra i flussi istantanei (kW) nei diversi scenari – CASO C



### 3.3 Commento sull'analisi dinamica termica

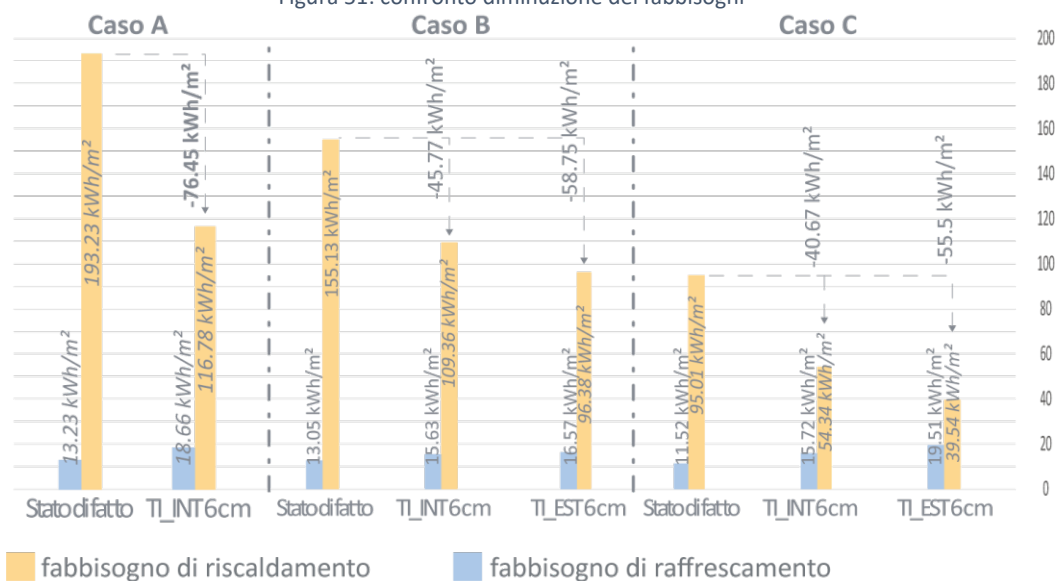
Dai risultati ottenuti ed esposti nelle pagine precedenti si possono fare alcune riflessioni. Sugli edifici che hanno già una coibentazione l'applicazione dei termointonaci e della termorasatura ha un effetto sulla riduzione della domanda energetica minore rispetto a quelli non isolati (Figura 50-Figura 51). Un altro aspetto che si nota è che all'aumentare dello spessore di isolante, l'efficacia di riduzione del fabbisogno diminuisce progressivamente, soprattutto negli edifici che hanno già un isolamento preesistente (Figura 50).

Figura 50: riduzione del fabbisogno di riscaldamento nei vari casi con intonaco dall'interno



Nel caso di edifici ad elevata inerzia termica che non sono isolati come nel caso A, la coibentazione dall'interno con questo tipo di materiale può portare a un leggero incremento del fabbisogno per raffrescamento. Tuttavia, nel clima di Torino si riscontra che, nonostante ci sia un aumento della domanda energetica durante la stagione estiva, il fabbisogno totale dell'edificio si riduce del 34% che equivalgono nel caso A a una diminuzione pari a 71 kWh/m²annui.

Figura 51: confronto diminuzione dei fabbisogni



In quanto, dai risultati ottenuti, il Caso A è stato quello in cui le soluzioni di retrofit oggetto di questa tesi hanno avuto più efficacia in termini di riduzione del fabbisogno annuo di energia si è deciso di fare un'ulteriore analisi su questo edificio ovvero quella dinamica igro-termica che verrà mostrata nel capitolo 4. Questo per comprendere alcuni aspetti trascurati nell'analisi termica dinamica tra cui, l'influenza dell'umidità sulle prestazioni termiche dei componenti edilizi.



### 3.4 Analisi del Pay Back Period (PBP)

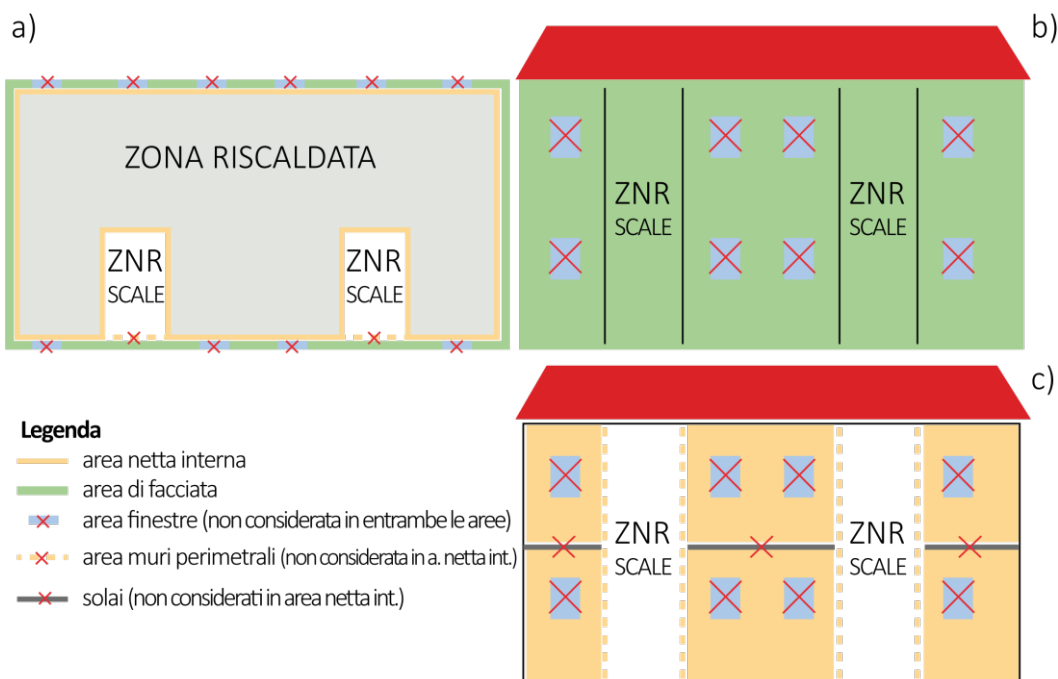
Prima di passare all'analisi numerica sul caso A, verrà effettuato su tutti e 3 gli edifici trattati nell'analisi dinamica termica un calcolo per valutare il tempo di ritorno dell'investimento qualora si dovesse intervenire con le soluzioni di retrofit proposte nelle pagine precedenti. Verrà effettuato un **PBP semplificato** che non considera alcun tipo di maggiorazione del costo legato ad interessi o all'inflazione e neppure di eventuali incentivi, per avere una visione che comprenda queste variabili sarebbe necessaria un'ulteriore analisi, che non è stata oggetto d'indagine in questa tesi. Il PBP verrà basato sul ritorno dell'investimento e del risparmio energetico ottenibile in inverno, per cui il **fabbisogno su cui si baserà sarà solo quello per riscaldamento**. Per il calcolo sono stati tenuti in considerazione alcuni dati indispensabili tra cui:

- ☒ Il **rendimento dell'impianto**<sup>18</sup>, che per questo calcolo è stato ipotizzato essere pari a **0.8**;
- ☒ Il combustibile, per quanto riguarda questo parametro è stato ipotizzato il metano, il cui prezzo aggiornato ad oggi è compreso tra **0.087 e 0.11 €/kWh**[218];
- ☒ il **costo del termointonaco a base d'aerogel** che è di **30€/m<sup>2</sup>cm** ai quali è stato aggiunto anche un costo della manodopera forfettario di circa 30€/m<sup>2</sup> (include sia la preparazione della parete sia la stesura dell'intonaco) [77] e nel caso dell'applicazione esterna del termointonaco anche il prezzo del nolo del ponteggio (incluso il trasporto, il montaggio e smontaggio) pari a 9.3 €/m<sup>2</sup> al mese[219];
- ☒ Le superfici di parete sulla quale verrà steso l'intonaco: qui ci sarà una differenza a seconda del fatto che l'intonaco sia all'esterno o all'interno. Infatti, negli scenari in cui l'intonaco sarà steso all'esterno, l'area considerata sarà quella di **facciata** dalla quale sono **escluse solo le finestre**. Nel caso in cui invece, l'intonaco è applicato sull'interno verrà considerata **l'area netta interna delle pareti** che include la superficie delle partizioni interne che danno sul vano scala (ZNR) e l'area delle pareti perimetrali, non considerando l'area dei solai interpiano, l'area delle finestre e l'area dei muri perimetrali del vano scala. Nella Figura 52 sono raffigurati schemi orientativi sulle superfici considerate, mentre nella Tabella 29 sono indicati i valori a seconda dei casi.

---

<sup>18</sup> Il rendimento indicato con la lettera greca  $\eta$  è il rapporto tra l'energia resa al sistema e quella assorbita dalla caldaia. Ha un valore compreso tra 0 e 1, quindi in percentuali tra 0% e 100%. Essa esprime la percentuale di energia che non è utilizzata per lo scopo del sistema.

Figura 52: schema delle aree considerate: a) pianta - b) e c) prospetti



| Tabella 29: Area di facciata e Area netta interna delle pareti dei casi             |                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| considerando il filo delle chiusure (sul vano scala) - <b>Intonaco dell'esterno</b> | considerando il filo delle partizioni (sul vano scala) - <b>Intonaco dall'interno</b> |
| <b>AREA facciata</b> zona riscaldata senza finestre<br>m <sup>2</sup>               | <b>AREA NETTA di parete</b> zona riscaldata<br>m <sup>2</sup>                         |
| Caso A – via Arquata                                                                |                                                                                       |
| -                                                                                   | 1154,71                                                                               |
| Caso B – Via delle querce                                                           |                                                                                       |
| 1679,99                                                                             | 1938,07                                                                               |
| Caso C – Strada del Cascinotto                                                      |                                                                                       |
| 1749,92                                                                             | 2184,46                                                                               |

☒ Le aree condizionate di pavimento che sono racchiuse nella Tabella 9

Nella Tabella 30 vengono mostrati i passaggi del calcolo con tutte le voci che hanno portato alla determinazione del tempo di ritorno dell'investimento. In particolare:

| Tabella 30: tempo di ritorno dell'investimento basato sui dati dell'analisi dinamica termica |                  |                       |                         |                    |                         |                                 |                                         |                                    |                               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| Intonaco                                                                                     | costo            | costo totale retrofit | riduzione della domanda | domanda di risc.   | riduzione della domanda | riduzione globale della domanda | Energia primaria ridotta ( $\eta=0.8$ ) | risparmio annuale (gas= 0,1 €/kWh) | tempo di ritorno investimento |
| cm                                                                                           | €/m <sup>2</sup> | € totali              | %                       | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup>      | kWh                             | kWh                                     | €                                  | anni                          |
| INTONACO INTERNO                                                                             | CASO A           |                       |                         |                    |                         |                                 |                                         |                                    |                               |
|                                                                                              | -                | -                     | -                       | 193.23             | -                       | -                               | -                                       | -                                  | -                             |
|                                                                                              | 0,5              | 45                    | 51962                   | 0                  | 164                     | 29                              | 28367                                   | 35459                              | 3546                          |
|                                                                                              | 2                | 90                    | 103924                  | 0                  | 139                     | 54                              | 52957                                   | 66196                              | 6620                          |
|                                                                                              | 4                | 150                   | 173207                  | 0                  | 124                     | 69                              | 67046                                   | 83807                              | 8381                          |

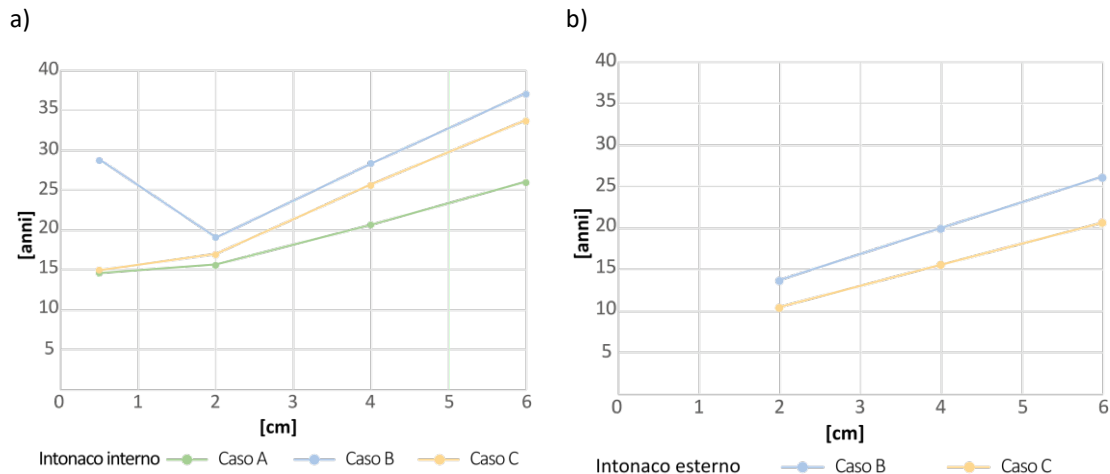
|                  |     |        |          |     |        |       |         |          |          |           |
|------------------|-----|--------|----------|-----|--------|-------|---------|----------|----------|-----------|
|                  | 6   | 210    | 242489   | 0   | 117    | 76    | 74534   | 93168    | 9317     | <b>26</b> |
| CASO B           |     |        |          |     |        |       |         |          |          |           |
| INTONACO INTERNO | -   | -      | -        | -   | 155.13 | -     | -       | -        | -        | -         |
|                  | 0,5 | 45     | 87213    | 8%  | 142.50 | 12.63 | 24210.1 | 30263    | 3026     | <b>29</b> |
|                  | 2   | 90     | 174426   | 25% | 117.01 | 38.12 | 73071.1 | 91339    | 9134     | <b>19</b> |
|                  | 4   | 150    | 290711   | 28% | 112.36 | 42.77 | 81984.5 | 102481   | 10248    | <b>28</b> |
|                  | 6   | 210    | 406995   | 30% | 109.36 | 45.77 | 87735.1 | 109669   | 10967    | <b>37</b> |
| INTONACO ESTERNO | 2   | 99,3   | 166840   | 33% | 104,5  | 50,63 | 97051   | 121314   | 12131    | <b>14</b> |
|                  | 4   | 159,3  | 267639   | 36% | 99,3   | 55,84 | 107038  | 133798   | 13380    | <b>20</b> |
|                  | 6   | 219,3  | 368439   | 38% | 96,4   | 58,75 | 112616  | 140770   | 14077    | <b>26</b> |
| CASO C           |     |        |          |     |        |       |         |          |          |           |
| INTONACO INTERNO | -   | -      | -        | -   | 95.01  | -     | -       | -        | -        | -         |
|                  | 0,5 | 45     | 98301    | 21% | 75,46  | 19,55 | 52302   | 65377    | 6538     | <b>15</b> |
|                  | 2   | 90     | 196601   | 36% | 60,38  | 34,63 | 92645   | 115806   | 11581    | <b>17</b> |
|                  | 4   | 150    | 327669   | 40% | 56,80  | 38,21 | 102222  | 127778   | 12778    | <b>26</b> |
|                  | 6   | 210    | 458737   | 43% | 54,34  | 40,67 | 108803  | 136004   | 13600    | <b>34</b> |
| INTONACO ESTERNO | 2   | 99,31  | 173784,6 | 52% | 46     | 49    | 132346  | 165432   | 16543,2  | <b>11</b> |
|                  | 4   | 159,31 | 278779,8 | 56% | 42     | 53    | 142592  | 178239,9 | 17823,99 | <b>16</b> |
|                  | 6   | 219,31 | 383775   | 58% | 40     | 55    | 148397  | 185496,5 | 18549,65 | <b>21</b> |

- ☒ Il costo per unità di superficie (€/m<sup>2</sup>) dei vari termointonaci è stato ottenuto aggiungendo i 30€/m<sup>2</sup> della manodopera e il costo del ponteggio (nel caso di applicazione esterna) al prodotto tra il costo del termointonaco di 30€/m<sup>2</sup>cm per lo spessore di termointonaco
- ☒ Il costo totale è stato ottenuto moltiplicando il costo per unità di superficie per l'area delle pareti sulle quali verrà steso l'intonaco
- ☒ La domanda di riscaldamento (kWh/m<sup>2</sup>) e la sua riduzione percentuale sono stati prelevati dalle Tabella 21, Tabella 24 e Tabella 27
- ☒ La riduzione della domanda in kWh/m<sup>2</sup> è il risultato della sottrazione tra il fabbisogno energetico dello stato di fatto (in kWh/m<sup>2</sup> a 0 cm) e i vari scenari di retrofit
- ☒ La riduzione globale della domanda in kWh è ottenuta dal prodotto tra la riduzione della domanda di riscaldamento e la superficie netta totale delle zone riscaldate
- ☒ L'energia primaria ridotta è data dal rapporto tra l'energia ridotta e il rendimento della caldaia
- ☒ Il risparmio annuale in € è ottenuto dal prodotto tra l'energia effettiva ridotta e il costo del metano assunto pari a **0.1 €/kWh**

- ☒ Infine, il tempo di ritorno dell'investimento in anni è dato dal rapporto tra il costo totale del retrofit e il risparmio annuale.

Come si può notare dalle figure sottostanti, in generale il tempo di ritorno si allunga con l'aumentare dello spessore di isolante.

Figura 53: tempo di ritorno investimento in funzione dello spessore d'intonaco: a) interno, b) esterno



Nel Caso B di via delle Querce però, si ha che ad uno spessore di intonaco interno di 0.5 cm corrisponde un tempo di ritorno maggiore rispetto a quello che si ha con i 2 cm. Questo è dovuto all'elevata incidenza della manodopera e alla scarsa riduzione dei consumi ottenibile con questo spessore di termointonaco interno. Perciò ci vorrà molto più tempo per recuperare la spesa iniziale fatta facendo risultare sconveniente questo tipo di scenario. Mentre negli altri casi la riduzione che si ha con 0.5 cm di termointonaco interno non supera un tempo di ritorno di 15 anni. E quindi si può dire che nel caso A e C il guadagno in termini di riduzione energetica di questo scenario è più commisurato alla spesa iniziale di quanto non lo sia per il caso B.

Dalla Tabella 30 e dalla Figura 53 si evince un altro dato di fatto e cioè che il tempo di ritorno dell'investimento è minore se si interviene su edifici vetusti e non isolati, anche perché la riduzione di energia in questi casi è maggiore rispetto ad un edificio già isolato. Negli edifici già coibentati per raggiungere lo stesso tempo di ritorno che si ha con l'applicazione del termointonaco interno in edifici di vecchia data è necessario applicare l'intonaco dall'esterno. Non tutti gli edifici di vecchia data hanno vincoli di facciata, per cui l'applicazione esterna del termointonaco su una muratura esente da coibentazione preesistente potrebbe ridurre in maniera ancor più accentuata la domanda di riscaldamento. Questo significa che, a parità di  $m^2$ , il tempo di ritorno rispetto a quanto indicato sopra potrebbe diminuire della metà o anche più in ogni scenario immaginato, facendo risultare ancora più conveniente l'adozione di questo tipo di retrofit. In merito al numero di anni, si può dire che quest'analisi si basa su dati odierni, in cui l'aerogel è un materiale nuovo la cui sintesi resta alquanto costosa. Inoltre, ad oggi questo termointonaco non ha avuto un'affermazione diffusa nel settore delle costruzioni. È quindi possibile che con gli anni, il suo utilizzo si allargherà al mercato edilizio, e maggiori quantità di produzione contribuiranno ad una diminuzione del costo facendo abbassare i tempi di ritorno rispetto a quanto indicato sopra.

### 3.5 Valutazione dell'impatto delle strategie di retrofit sul parco edilizio Atc

Questa ulteriore analisi che si sta per compiere è volta alla valutazione dell'impatto che questi scenari di retrofit avrebbero sui consumi globali del parco edilizio torinese dell'Atc se fossero estesi a tutti i tipi di edifici, nelle 3 diverse epoche, rientranti nei tre archetipi costruttivi individuati. Nella Tabella 31 sono convertite in numeri le percentuali illustrate nella Figura 20 (paragrafo 3.1.2) per ciascuna tipologia costruttiva.

| Tabella 31: numero edifici per tipologia costruttiva presenti nel parco edilizio Atc di Torino |                             |                             |                             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Tipologia costruttiva                                                                          | 1900-1949<br>Totale periodo | 1950-1976<br>Totale periodo | 1977-1990<br>Totale periodo |
| A                                                                                              | 263                         | 8                           | 24                          |
| B                                                                                              | 75                          | 297                         | 58                          |
| C                                                                                              | 9                           | 143                         | 29                          |
| altro                                                                                          | 0                           | 3                           | 8                           |
| totale periodo                                                                                 | 347                         | 451                         | 119                         |
| Totale                                                                                         | 917 edifici                 |                             |                             |

Nella Tabella 32 sono stati messi in evidenza gli edifici assimilabili per tecnologia utilizzata ai 3 modelli usati nelle analisi dinamiche termiche. Insieme vanno a costituire il **50% di tutti gli edifici costruiti nel parco edilizio Atc dal 1900 al 1990**.

| Tabella 32: percentuale degli edifici con caratteristiche costruttive assimilabili nei 3 intervalli temporali |                                     |                      |                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------|
| Intervallo considerato                                                                                        | 1900-1949                           | 1950-1976            | 1977-1990           |
| Edifici assimilabili per tecnologia costruttiva                                                               | <b>A = 263</b> su 347               | <b>C= 143</b> su 451 | B= <b>58</b> su 119 |
| totale                                                                                                        | <b>464</b> su 917 edifici del parco |                      |                     |
| Totale %                                                                                                      | <b>50.6%</b>                        |                      |                     |

Vista la percentuale elevata ricoperta dalla somma delle tre tipologie oggetto della simulazione, nella Tabella 33 verranno estesi a tutti gli edifici dello stesso tipo i risultati degli scenari in cui la riduzione del fabbisogno di riscaldamento è stata più marcata. La riduzione della domanda di riscaldamento data dall'analisi termica per ciascun archetipo verrà moltiplicata per il numero di costruzioni simili individuate in ogni intervallo temporale. Dopodiché, verrà stabilita l'energia primaria risparmiata annualmente se si adottasse la migliore configurazione di retrofit. Per il calcolo dell'Ep (energia primaria) è stato usato un rendimento della caldaia pari all'80%, come in precedenza. Anche questo tipo di calcolo è semplificato, in quanto si basa su dati odierni e non tiene conto dell'inflazione. Per avere questo tipo d'informazioni è necessaria un altro tipo di analisi che in questa tesi non verrà affrontata.

| Tabella 33: valutazione del risparmio annuale sulle tipologie assimilabili dell'intero patrimonio Atc |      |      |                   |                                               |          |                                                         |                                      |                               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|-------------------|-----------------------------------------------|----------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| Intervallo temporale                                                                                  | Tipo | Caso | Scenario migliore | Riduzione domanda di riscaldamento su un tipo |          | Numero tipologie assimilabili nell'intervallo temporale | Riduzione domanda risc. su tipologie | Ep Risparmiata ( $\eta=0.8$ ) |
|                                                                                                       |      |      |                   | [%]                                           | kWh      |                                                         |                                      |                               |
| 1900-1949                                                                                             | A    | A    | TI_INT 6 cm       | 40%                                           | 74534.1  | 263                                                     | 19602468                             | 24503085                      |
| 1950-1976                                                                                             | C    | B    | TI_EST 6cm        | 38%                                           | 112616.1 | 143                                                     | 16104102                             | 20130128                      |
| 1977-1990                                                                                             | B    | C    | TI_EST 6cm        | 58%                                           | 148397.2 | 58                                                      | 8607038                              | 10758797                      |
| Totale                                                                                                |      |      |                   |                                               |          | <b>464</b>                                              | <b>44313608</b>                      | <b>55392010</b>               |

L'analisi svolta sulle tipologie costruttive che rappresentano il 50% del parco edilizio Atc della città di Torino, ha dimostrato che, utilizzando questo intonaco negli scenari più efficienti dal punto di vista della riduzione della domanda per riscaldamento, sarebbe possibile **ridurre globalmente i consumi di energia primaria** per riscaldamento di oltre **55 milioni di kWh/a<sup>19</sup>**.

<sup>19</sup> Corrispondenti a circa 200 milioni di MJ/annui

## 4 Comparazione tra l'analisi simulativa termica e igrotermica dinamica

Nelle successive pagine si andrà a trattare il caso di via Arquata, in cui vi è un isolamento dall'interno. Questo tipo di coibentazione, in condizioni reali di umidità, potrebbe portare a varie problematiche che non sono evidenziate in un'analisi solo termica, in cui sono considerate le caratteristiche a secco dei materiali che compongono l'edificio. Quindi, all'interno delle analisi termiche dinamiche non è stato tenuto in considerazione l'accumulo di umidità a cui incorre la struttura nelle condizioni d'esercizio reali. Per questo motivo, verrà presentata anche una simulazione numerica al fine di verificare se un'analisi che tenga conto, non solo del trasporto di calore, ma anche di vapore, porti a risultati differenti in termini di fabbisogno energetico dell'edificio.

### 4.1 Metodologia

Le analisi in regime dinamico igrotermico verranno effettuate sul caso A. In questo caso studio le soluzioni di retrofit hanno avuto più efficacia in termini di riduzione della domanda energetica. In particolare, le analisi si concentreranno sulla configurazione TI\_INT 6 cm (Tabella 13) in quanto quella in cui si è raggiunto il valore di trasmittanza ( $U=W/m^2K$ ) (Tabella 18) ammesso dal DM 26/06/15. In particolare:

- ☒ Verrà prima svolta un'analisi dello stato di fatto solo termica con il nuovo software, al fine di avere una base di partenza per il calcolo igrotermico che sia uguale a quella utilizzata nell'analisi precedente
- ☒ Una volta calibrato il fabbisogno energetico del caso A rispetto al risultato della simulazione termica dinamica si passerà al secondo step, ovvero quello della determinazione della riduzione della domanda con l'analisi igrotermica. In particolare, queste analisi termoisometriche si concentreranno prima sulla determinazione della riduzione del fabbisogno energetico del caso A con carichi sensibili e latenti costanti. In seguito verranno eseguite le analisi sul modello nel quale verranno immaginati profili di carico giornaliero variabili.

#### 4.1.1 WUFI®Plus 3.2.0.1

L'analisi numerica dell'edificio di via Arquata è stata svolta con il software **WUFI® Plus**, il cui acronimo significa " **W**ärme **U**nd **F**euchte **I**nstationär", che tradotto indica **le simulazioni igrotermiche dinamiche**, ed è stato sviluppato dai ricercatori del Fraunhofer IBP (Institute of Building Physics)[220]. A differenza degli altri prodotti dell'istituto di Holzkirchen, WUFI®Plus collega il calcolo igrotermico con una simulazione dinamica **dell'intero edificio** e valuta **il fabbisogno energetico** necessario a garantire condizioni confortevoli all'interno dell'ambiente costruito [221]. Considera vari fattori tra cui il clima esterno, l'involucro (incluso sia gli elementi opa-

chi che trasparenti), i carichi interni, la ventilazione, le temperature di confort, l'aspetto impiantistico e altre situazioni climatiche interne (tra cui il PVM e PPD<sup>20</sup>) [221]. Nel calcolo della domanda energetica tiene in considerazione il **comportamento termoigrometrico degli elementi costruttivi** [221]. Infatti, Il software permette di analizzare alcuni aspetti trascurati nell'analisi solo termica tra cui [222]:

- ☒ L'influenza dell'irraggiamento sulla migrazione del vapore
- ☒ L'influenza della pioggia battente sulla migrazione del vapore
- ☒ La migrazione per diffusione causata dalla differenza di pressione parziale
- ☒ L'influenza del comportamento dell'utenza
- ☒ Effetto del contenuto d'acqua sulla conducibilità termica

Per questo motivo è in grado di descrivere in maniera più accurata il comportamento della struttura e stabilire una domanda energetica dell'edificio che più si avvicina a quella reale.

Ovviamente anche l'analisi dinamica igrotermica effettuata con il software WUFI trascura alcuni aspetti tra cui [222]:

- ☒ Proprietà materiche dipendenti dal tempo (come ad esempio il ritiro o il rigonfiamento del legno)
- ☒ Presenza di Sali
- ☒ Condizioni al contorno diverse da quelle usuali, come nel caso di un incendio

Infine, nel suo database sono contenuti svariati componenti costruttivi (pacchetti di solai, tetti, pareti) con la descrizione dei "valori dinamici" dei materiali che li compongono [221].

#### 4.1.1.1 Modellazione

La geometria del caso A è stata disegnata in 3D sul software di modellazione SketchUp 2017. In questo programma è stato possibile, attraverso il plug-in di WUFI-Plus, stabilire alcune proprietà dell'involucro tra cui (Figura 54):

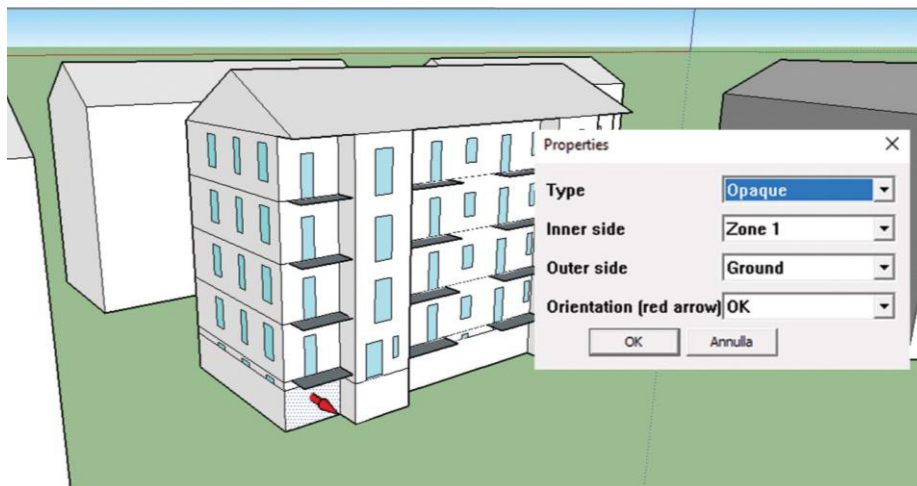
- ☒ La natura degli elementi (opaca, trasparente, o apertura)
- ☒ La zona termica a cui appartiene l'elemento selezionato
- ☒ La zona con cui confina l'elemento selezionato (il terreno, un'altra zona termica, l'esterno). È anche possibile considerarlo adiabatico nel caso ci sia una partizione interna tra due zone climatizzate alla stessa maniera o che sia un elemento interno alla zona stessa
- ☒ L'orientamento del flusso termico (il plug-in, per convenzione, ipotizza una situazione invernale in regime stazionario, per cui, se la punta della freccia del flusso è diretta verso l'esterno ciò significa che l'elemento verrà imputato correttamente nel programma di calcolo)

---

<sup>20</sup> PMV: voto medio previsto adottato dalla norma UNI EN ISO 7730 ("Predicted Mean Vote"), è un indice che valuta lo stato di benessere dell'individuo e tiene conto di variabili soggettive e ambientali. Va da una scala di -3 (indice di sensazione di troppo freddo) a +3 (indice di troppo caldo) e lo zero rappresenta lo stato di benessere termico. PPD: in inglese Percentage of Person Dissatisfied, esprime la percentuale di persone insoddisfatte in un determinato ambiente. Il PPD è funzione del PMV, anche con PMV molto vicini allo zero si avrà una percentuale minima di insoddisfatti.

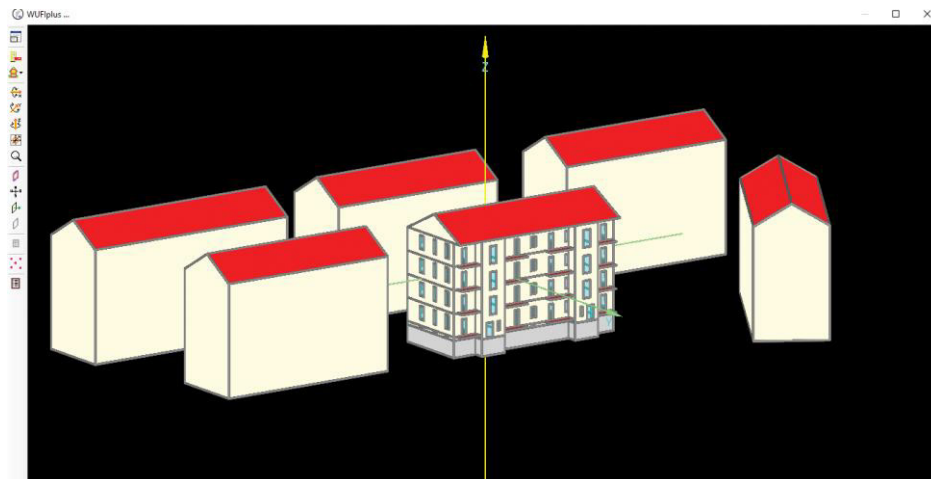


Figura 54: esempio delle proprietà imputabili attraverso il plug-in di WUFI®Plus in SketchUp 2017



Dopo aver impostato le proprietà di ogni elemento d'involucro è stato possibile importare il 3d nel programma per l'analisi numerica WUFI®Plus (Figura 55).

Figura 55: modello 3D del caso A esportato in WUFI®Plus



#### 4.1.1.2 Dati di input

Il programma di calcolo richiede una serie di impostazioni necessarie all'analisi, tra cui:

- La data di inizio e fine del calcolo
- La località e l'orientamento dell'edificio
- La suddivisione dell'edificio nelle varie zone termiche
- Le condizioni di temperatura e umidità interne
- Stratigrafia, spessore e proprietà dei materiali di cui sono composti i vari elementi d'involucro
- I carichi interni di ogni zona

a) *La data di inizio e fine del calcolo*

Il periodo di calcolo immesso nel programma dura 1 anno, e va dal 1 gennaio del 2019 all'1 gennaio 2020.

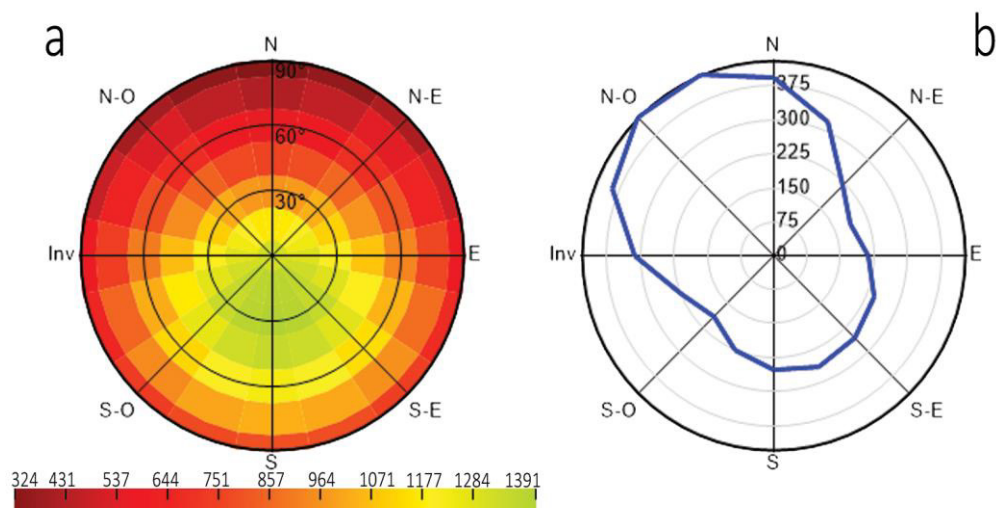
b) *La località e l'orientamento*

All'interno del software è presente un database con i file climatici di svariate località mondiali, tra queste c'è anche quella di Torino che è stata utilizzata per i calcoli dinamici della presente tesi. Il file climatico della città di Torino presente nel programma risale al 2004, l'orientamento rimane quello indicato precedentemente. WUFI®Plus elabora dei grafici di temperatura e umidità della località nel periodo di calcolo scelto evidenziandone i valori massimi, minimi e medi.

| Tabella 34: T.e e U.R di Torino (da database WUFI®Plus 3.2.0.1) |       |         |       |        |
|-----------------------------------------------------------------|-------|---------|-------|--------|
| Grandezza                                                       | Unità | Massima | Media | Minima |
| T est                                                           | °C    | 34.5    | 13.78 | -5.3   |
| U.R                                                             | %     | 100     | 67.13 | 10     |

Inoltre dall'analisi dei dati è in grado di elaborare due grafici in cui: in uno viene illustrato una divisione della radiazione solare in base all'orientamento e all'angolo di inclinazione dei vari elementi (Figura 56.a), con allegato la somma della riflessione atmosferica (2852.8 kWh/m²a) e il calcolo dell'indice di nuvolosità media (0.73). L'altro invece mostra la direzione della pioggia battente (Figura 56.b) con allegato il risultato della somma della pioggia battente (838.3 mm/a) e la velocità media del vento (5.76 m/s).

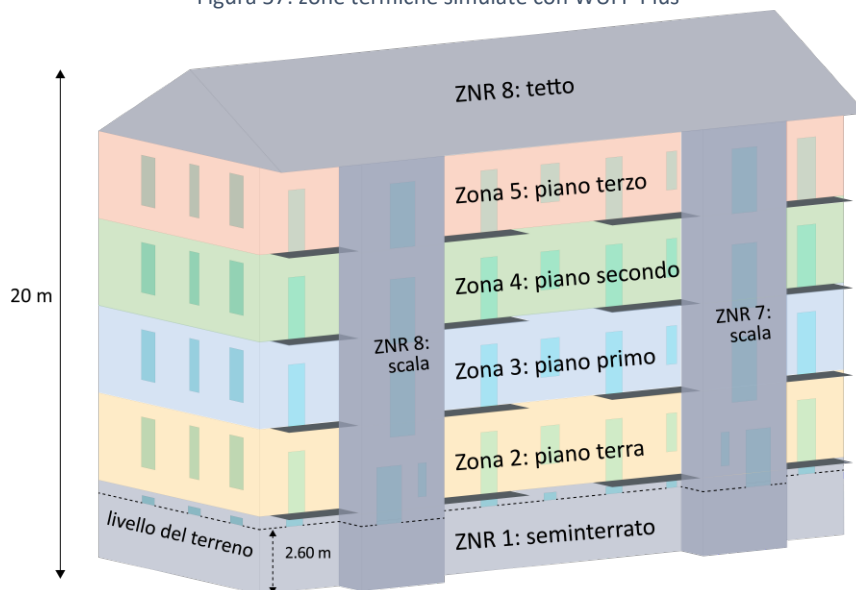
Figura 56: grafico sulla radiazione solare(a) e la pioggia battente(b)



c) *La suddivisione in zone termiche*

L'edificio di via Arquata è stato suddiviso in 8 Zone di cui 4 sono ZNR (zone non riscaldate). La zonizzazione è stata effettuata già durante la modellazione in Sketchup ed è rappresentata nella Figura 57.

Figura 57: zone termiche simulate con WUFI®Plus



L'area considerata per ogni zona è la superficie utile in accordo con quella presa in considerazione nella precedente analisi termica dinamica effettuata con DesignBuilder®.

Tabella 35: Superficie utile delle zone riscaldate - Caso A

| n° zona | descrizione zona | m <sup>2</sup> | Totale Zona riscaldata |
|---------|------------------|----------------|------------------------|
| Z.2     | piano terra      | 243,72         | 974.88                 |
| Z.3     | piano primo      | 243,72         |                        |
| Z.4     | piano secondo    | 243,72         |                        |
| Z.5     | piano terzo      | 243,72         |                        |

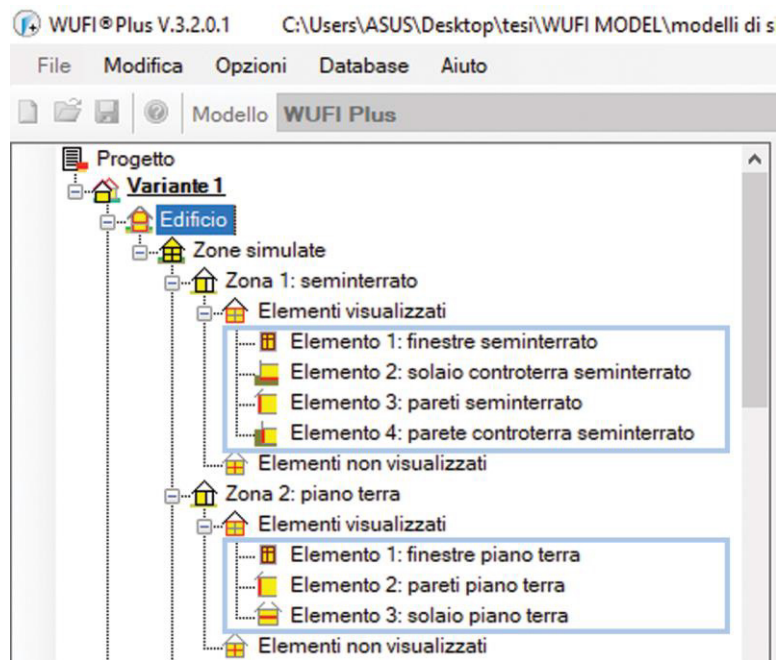
#### d) Condizioni di temperatura e umidità relativa interne

In questo caso, non è stato possibile stabilire il set point sulla temperatura operativa come è stato fatto precedentemente, ma solo su quella dell'aria. Il setpoint di temperatura interna è stato impostato a 20°C in inverno e 26°C in estate. Le prime analisi sono quelle solo termiche e tengono conto soltanto della temperatura, mentre quelle igrotermiche forniscono anche i dati di umidità relativa interna che però non è controllata dall'impianto.

#### e) Stratigrafia, spessore e proprietà dei materiali

Un altro dato di input per le simulazioni sono state le stratigrafie degli elementi d'involucro. Il programma suddivide gli elementi del modello 3D in varie sottosezioni di ogni zona in base alla loro inclinazione e alla loro natura (opaca nel caso di pareti e solai, trasparente per gli elementi finestrati) come mostrato nella Figura 58.

Figura 58: sottosezioni degli elementi di una zona in WUFI®Plus 3.2.0.1



Le stratigrafie degli elementi sono state modellate come nell'analisi dinamica termica. Dato che non si conoscevano alcuni valori dei materiali usati (come la porosità  $\varepsilon$  e il fattore di resistenza al vapore  $\mu$ ), sono stati presi dal database del **Fraunhofer IBP** incorporato nel software WUFI®Plus elementi affini a quelli usati nell'analisi termica. A questi, sono state poi cambiate le caratteristiche termiche di conducibilità ( $\lambda$ =W/mK), trasmittanza ( $U$ =W/m<sup>2</sup>K) e resistenza termica ( $R$ =m<sup>2</sup>K/W) che invece erano note dal calcolo precedente. Un discorso diverso merita invece il termointonaco a base aerogel, di cui si conoscevano sia le caratteristiche termiche, sia quelle dinamiche grazie alle analisi condotte sul materiale presso il laboratorio del dipartimento di Energia (**DENERG**) del Politecnico di Torino (Tabella 36).

| Tabella 36: termointonaco interno a base di aerogel TI_INT |    |                         |              |                  |           |          |      |
|------------------------------------------------------------|----|-------------------------|--------------|------------------|-----------|----------|------|
| Materiale                                                  |    | $\rho_{dry}$<br>[kg/m³] | c<br>[J/kgK] | $\lambda$ [W/mK] | $\mu$ [-] |          |      |
| Aerogel plaster                                            |    | 140                     | 998          | 0.028            | 1.77      |          |      |
| Curve di assorbimento dell’acqua TI_INT                    |    |                         |              |                  |           |          |      |
| U.R [%]                                                    | 0% | 55%                     | 70%          | 80%              | 90%       | 95%      | 100% |
| $u^{21}$<br>[kg/kg]                                        | 0  | 0.037348                | 0.063694     | 0.075565         | 0.111465  | 0.143891 | 0.9  |

<sup>21</sup> Esprime l'assorbimento d'acqua di un materiale alle varie umidità relative ed è uguale a  $u = \frac{m - m_{dry}}{m_{dry}}$  [kg/kg], dove "m<sub>dry</sub>" è la massa a secco del provino ed "m" la massa del provino dopo l'esposizione ad una determinata U.R [%][224]. WUFI®Plus richiede la  $w$  che è uguale al prodotto tra  $u \cdot \rho_{dry}$  [kg/m<sup>3</sup>] [224].

| Conducibilità termica in funzione dell'umidità |       |        |       |
|------------------------------------------------|-------|--------|-------|
| U.R [%]                                        | 0%    | 90%    | 100%  |
| $\lambda$<br>[W/mK]                            | 0.028 | 0.0372 | 0.143 |

Nelle tabelle seguenti vengono illustrate le stratigrafie delle pareti usate per le simulazioni dello stato di fatto e per quelle con il termointonaco interno (TI\_INT 6 cm) a base di aerogel:

| Tabella 37: Stratigrafia della parete esterna dello stato di fatto |                  |                         |                          |              |                     |                |                |              |
|--------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------------|--------------------------|--------------|---------------------|----------------|----------------|--------------|
| Materiale                                                          | Spessore<br>[cm] | $\rho_{dry}$<br>[kg/m³] | $\varepsilon$<br>[m³/m³] | c<br>[J/kgK] | $\lambda$<br>[W/mK] | Rsi<br>[m²K/W] | Rse<br>[m²K/W] | $\mu$<br>[-] |
| Ambiente esterno                                                   |                  |                         |                          |              |                     |                |                |              |
| Intonaco esterno                                                   | 0.02             | 1900                    | 0.24                     | 850          | 0.820               | 0.13           | 0.04           | 25           |
| Mattone pieno                                                      | 0.5              | 1744                    | 0.3                      | 850          | 0.827               |                |                | 15           |
| Intonaco interno                                                   | 0.02             | 850                     | 0.65                     | 850          | 0.820               |                |                | 8.3          |
| Ambiente interno                                                   |                  |                         |                          |              |                     |                |                |              |

| Tabella 38: Stratigrafia della parete interna dello stato di fatto |                  |                         |                          |              |                     |                |                |              |
|--------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------------|--------------------------|--------------|---------------------|----------------|----------------|--------------|
| Materiale                                                          | Spessore<br>[cm] | $\rho_{dry}$<br>[kg/m³] | $\varepsilon$<br>[m³/m³] | c<br>[J/kgK] | $\lambda$<br>[W/mK] | Rsi<br>[m²K/W] | Rse<br>[m²K/W] | $\mu$<br>[-] |
| ZNR                                                                |                  |                         |                          |              |                     |                |                |              |
| Intonaco<br>interno                                                | 0.015            | 850                     | 0.65                     | 850          | 0.820               | 0.13           | 0.13           | 8.3          |
| Mattone                                                            | 0.5              | 1744                    | 0.3                      | 850          | 0.827               |                |                | 15           |
| Intonaco<br>interno                                                | 0.015            | 850                     | 0.65                     | 850          | 0.820               |                |                | 8.3          |
| Ambiente interno                                                   |                  |                         |                          |              |                     |                |                |              |

| Tabella 39: Stratigrafia della parete esterna con TI_INT 6 cm |               |                                   |                                                 |           |                  |                          |                          |           |
|---------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------|-----------|------------------|--------------------------|--------------------------|-----------|
| Materiale                                                     | Spessore [cm] | $\rho_{dry}$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $\varepsilon$ [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] | c [J/kgK] | $\lambda$ [W/mK] | Rsi [m <sup>2</sup> K/W] | Rse [m <sup>2</sup> K/W] | $\mu$ [-] |
| Ambiente esterno                                              |               |                                   |                                                 |           |                  |                          |                          |           |
| Intonaco esterno                                              | 0.02          | 1900                              | 0.24                                            | 850       | 0.820            | 0.13                     | 0.04                     | 25        |
| Mattone pieno                                                 | 0.5           | 1744                              | 0.3                                             | 850       | 0.827            |                          |                          | 15        |
| TI_INT                                                        | 0.06          | 140                               | 0.9                                             | 998       | 0.028            |                          |                          | 1.77      |

| Ambiente interno                                              |                  |                                |                          |              |                     |                |                |              |
|---------------------------------------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------|---------------------|----------------|----------------|--------------|
| Tabella 40: Stratigrafia della parete interna con TI_INT 6 cm |                  |                                |                          |              |                     |                |                |              |
| Materiale                                                     | Spessore<br>[cm] | $\rho_{\text{dry}}$<br>[kg/m³] | $\varepsilon$<br>[m³/m³] | c<br>[J/kgK] | $\lambda$<br>[W/mK] | Rsi<br>[m²K/W] | Rse<br>[m²K/W] | $\mu$<br>[-] |
| ZNR                                                           |                  |                                |                          |              |                     |                |                |              |
| Intonaco<br>interno                                           | 0.015            | 850                            | 0.65                     | 850          | 0.820               | 0.13           | 0.13           | 8.3          |
| Mattone                                                       | 0.5              | 1744                           | 0.3                      | 850          | 0.827               |                |                | 15           |
| TI_INT                                                        | 0.06             | 140                            | 0.9                      | 998          | 0.028               |                |                | 1.77         |
| Ambiente interno                                              |                  |                                |                          |              |                     |                |                |              |

#### f) Carichi interni

La **prima analisi** fatta con WUFI® è un'analisi **solo termica** e ha avuto l'obiettivo di **calibrare i risultati ottenuti con quelli dell'analisi precedente**. Per far questo, oltre a immettere i dati di input elencati finora, è stato necessario inserire gli stessi apporti gratuiti che precedentemente erano stati calcolati attraverso la formula racchiusa nella norma UNI-TS 11300-1 del 2014 (capitolo 3.2.1). Il dato nell'analisi termica corrispondeva a 6.24 W/m<sup>2</sup>. Sul software di simulazione numerica non è possibile immettere il valore in W/m<sup>2</sup> per cui è stato ipotizzato un profilo di occupazione costante di 1520 W sensibili per piano<sup>22</sup> che divisi per i metri quadri danno lo stesso dato di potenza immesso in DesignBuilder®. **Dopo l'analisi termica**, è stata effettuata sul modello con i carichi costanti della UNI-TS 11300, **una simulazione termoigrometrica**, per cui è stato necessario immettere anche **i carichi latenti**. Questi ultimi sono stati imputati nel programma secondo le direttive imposte dallo **standard ASHRAE 160 [225]**. Lo standard fornisce dei valori di produzione del vapore di un appartamento<sup>23</sup> a seconda delle camere da letto presenti che sono: **0.105 g/s** per un appartamento **con 2 camere da letto** e **0.0806 g/s** per un appartamento **con 1 camera da letto**. Le camere da letto presenti in ogni zona sono in totale 8 (rappresentante in Figura 59 dove sono inserite le icone degli occupanti), il valore 0.105 g/s è **stato moltiplicato per 3** (che sono gli appartamenti con 2 camere da letto) e il valore di 0.0806 g/s è stato invece moltiplicato per 2 (che sono i bilocali con 1 camera da letto). La somma dei carichi sensibili e latenti costanti per zona imputati per l'analisi termoigrometrica sono indicati nella Tabella 41:

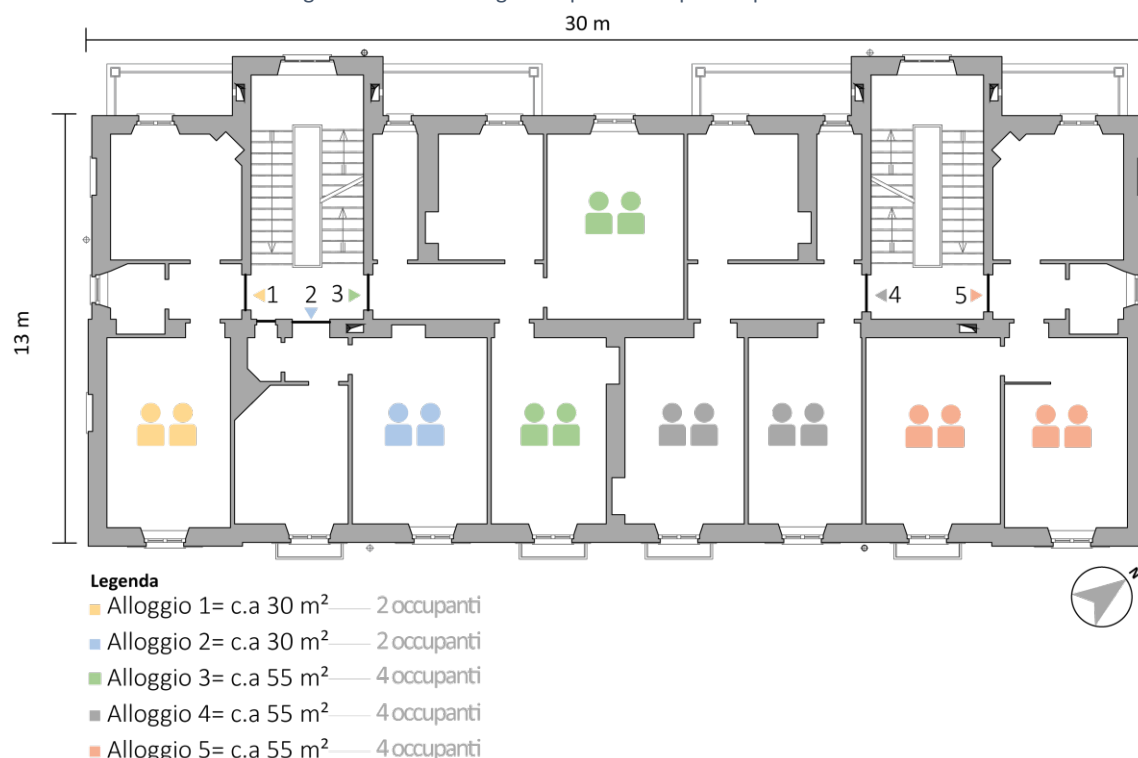
| Tabella 41: carichi sensibili e latenti costanti per zona imputati in WUFI®Plus per l'analisi numerica |                                 |                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| ora                                                                                                    | Potenza sensibile totale<br>[W] | Portata di vapore<br>[g/s] |
| 24/24                                                                                                  | 1520                            | 0.4762                     |

<sup>22</sup> corrispondenti alla quota solo sensibile di potenza emanata da circa 17 persone a "riposo" (90 W) ad una temperatura di 20°C

<sup>23</sup> La norma in questione include come fonti di produzione del vapore non solo gli occupanti, ma anche il vapore prodotto da altre sorgenti casalinghe, come ad esempio quello emesso dalla cottura dei cibi o durante la doccia.

Per le analisi successive invece è stato individuato il numero degli occupanti per piano (Figura 59) a seconda della superficie degli alloggi:

Figura 59: numero degli occupanti di un piano tipo – Caso A



Dopodiché è stato impostato un profilo di carico giornaliero uguale per ogni zona termica scelto tra gli schedule presenti nel database del software. Dato che questo carico d'occupazione in WUFI era riferito a 4 persone<sup>24</sup>, ogni dato orario (sia le potenze sensibili che le portate di vapore) è stato moltiplicato per 4 in modo da raggiungere gli apporti sensibili e latenti emessi dai 16 occupanti per piano:

Tabella 42: schedule potenze termiche sensibili e portate di vapore emesse dal corpo umano (dal database di WUFI®Plus)

| ora         | potenza sensibile convettiva [W] | potenza sensibile radiante [W] | portata di vapore [g/h] | Co <sub>2</sub> [g/h] | met <sup>25</sup> |
|-------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------|
| 05:50       | 1128                             | 564                            | 608                     | 220                   | 1                 |
| 6           | 1312                             | 656                            | 904                     | 220                   | 1                 |
| 06:50       | 4176                             | 2088                           | 4784                    | 552                   | 1,2               |
| 07:00       | 1408                             | 704                            | 784                     | 952                   | 1                 |
| 08:00-12:00 | 472                              | 236                            | 80                      | 0                     | 0                 |

<sup>24</sup> Family Household (4 Persons) – Total – Weekday sul database del Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) presente in Wufi®Plus

<sup>25</sup> Il met e il clo sono due parametri individuali legati all'utenza. Il met si riferisce al metabolismo energetico M (W/m<sup>2</sup>) e dipende dal tipo di attività svolta; 1 met equivale a 58 W/m<sup>2</sup> (valore medio dell'attività metabolica a riposo).

|              |      |      |      |     |     |
|--------------|------|------|------|-----|-----|
| 13:00        | 848  | 424  | 80   | 280 | 1   |
| 14:00        | 3992 | 1996 | 3408 | 712 | 1.2 |
| 14:50        | 1216 | 608  | 608  | 416 | 1   |
| 15:00-16:00  | 848  | 424  | 256  | 136 | 1   |
| 17:00        | 1032 | 516  | 256  | 280 | 1   |
| 18:00        | 5008 | 2504 | 3408 | 712 | 1.2 |
| 18:50        | 2008 | 984  | 3408 | 712 | 1.2 |
| 19:00        | 2608 | 1304 | 784  | 552 | 1   |
| 20:00        | 2808 | 1404 | 608  | 464 | 1   |
| 20:50        | 2752 | 1376 | 608  | 464 | 1   |
| 21:00        | 2392 | 1196 | 5608 | 464 | 1   |
| 22:00        | 2688 | 1344 | 1920 | 464 | 1   |
| 22:50        | 2688 | 1344 | 5720 | 464 | 1   |
| 23:00 - 5:00 | 1032 | 516  | 608  | 200 | 0,8 |

1 met = 58 W/m<sup>2</sup> (sedere tranquilli) | 1.2 met = 70 W/m<sup>2</sup>(attività leggera a casa) | 0.8 met = 46 W/m<sup>2</sup> (dormire)



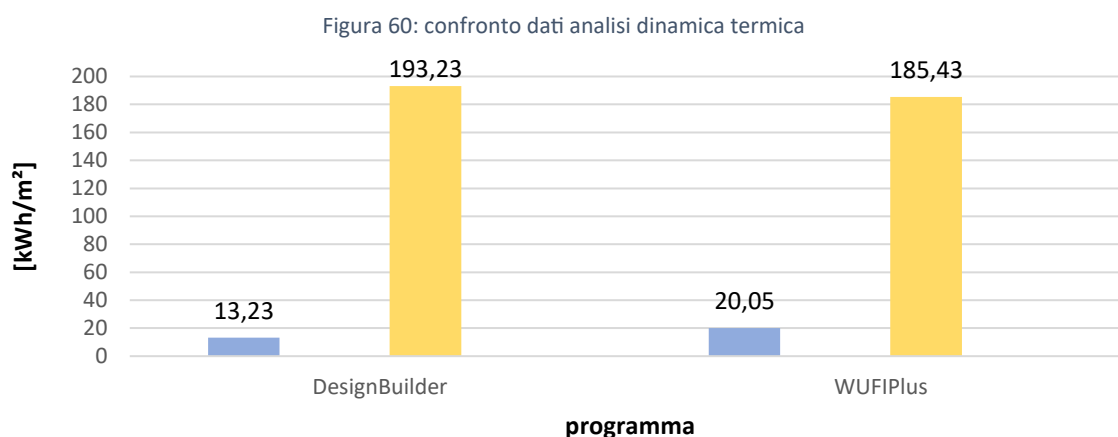
## 4.2 I Risultati

### 4.2.1 Stato di fatto

#### 4.2.1.1 Calibrazione del modello di WUFI®Plus: analisi termica dinamica

In questo paragrafo saranno illustrati i risultati della prima analisi solo termica fatta con WUFI®Plus al fine di calibrare il modello sulla base dei risultati della simulazione svolta con DesignBuilder. In questo caso, come anticipato, sono tenute in considerazione le caratteristiche a secco dei materiali e i carichi immessi sono solo sensibili:

| Tabella 43: Dati analisi termica dinamica DesignBuilder vs WufiPlus |               |                |                |                |          |                |
|---------------------------------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------|----------------|
| programma                                                           | Riscaldamento |                | Raffrescamento |                | Totale   |                |
|                                                                     | [kWh/m²]      | differenza [%] | [kWh/m²]       | differenza [%] | [kWh/m²] | differenza [%] |
| DesignBuilder                                                       | 193.23        | 4%             | 13.23          | 52%            | 206.46   | 0.5%           |
| WUFIPlus                                                            | 185.43        |                | 20.05          |                | 205.49   |                |



Dalla Tabella 43 si può notare il fatto che nel riscaldamento ci sono circa 8 kWh/m² di differenza tra le due analisi che vengono compensati nel calcolo finale da circa 7 kWh/m² di discrepanza che invece ci sono nel raffrescamento. Se fosse stato possibile utilizzare lo stesso set-point sulla temperatura operativa con WUFI®Plus, si sarebbe ottenuti dei consumi maggiori. Tuttavia i risultati sono in linea con quanto stabilito e le differenze accettabili, per cui è possibile partire da questo modello per le analisi termoigrometriche successive.

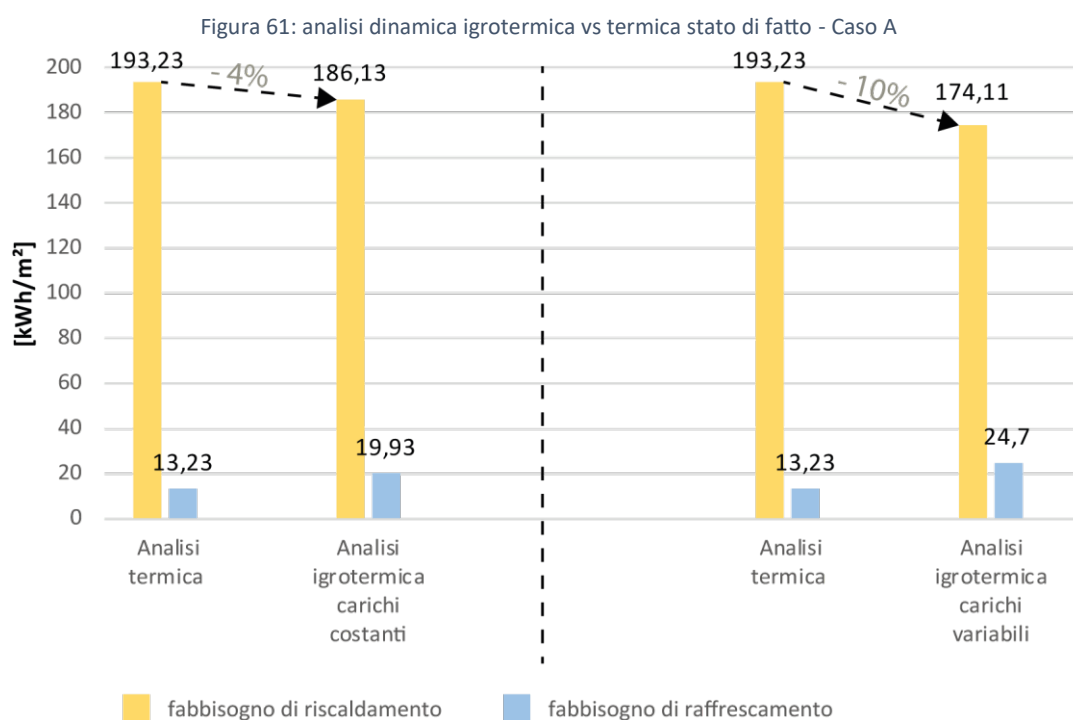
#### 4.2.1.2 Analisi dinamica igrotermica: apporti costanti e variabili

In questo paragrafo verranno esposti invece i risultati dell'analisi termoigrometrica dello stato di fatto e confrontati con i risultati dell'analisi termica. I carichi sono stati prima considerati costanti e poi variabili. Nel primo caso oltre ad imputare all'interno del programma la quota parte sensibile dei carichi interni d'occupazione è stata immessa anche la somma dei carichi latenti<sup>26</sup>. La Tabella 41 mostra la somma degli apporti sensibili e latenti per ogni zona riscaldata

<sup>26</sup>Carichi interni da pag.120

considerati costanti. Dopodiché l'altra analisi igrotermica sullo stato di fatto ha tenuto in considerazione dei carichi variabili secondo lo schedule d'occupazione presente nel database di WUFI®Plus e riportato nella Tabella 42. La Tabella 44 mette a confronto i differenti risultati.

| Tabella 44: Dati analisi termica dinamica DesignBuilder vs igrotermica WufiPlus- stato di fatto |               |                                        |                   |                                         |                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------|-------------------|
| analisi                                                                                         | programma     | Riscaldamento<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] |                   | Raffrescamento<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] |                   |
|                                                                                                 |               |                                        | differenza<br>[%] |                                         | differenza<br>[%] |
| Termica                                                                                         | DesignBuilder | 193.23                                 |                   | 13.23                                   |                   |
| Igrotermica<br>Carichi<br>costanti                                                              | WUFIPlus      | 186.13                                 | 4%                | 19.93                                   | 51%               |
| Termica                                                                                         | DesignBuilder | 193.23                                 |                   | 13.23                                   |                   |
| Igrotermica<br>Carichi<br>variabili                                                             | WUFIPlus      | 174.11                                 | 10%               | 24.7                                    | 87%               |



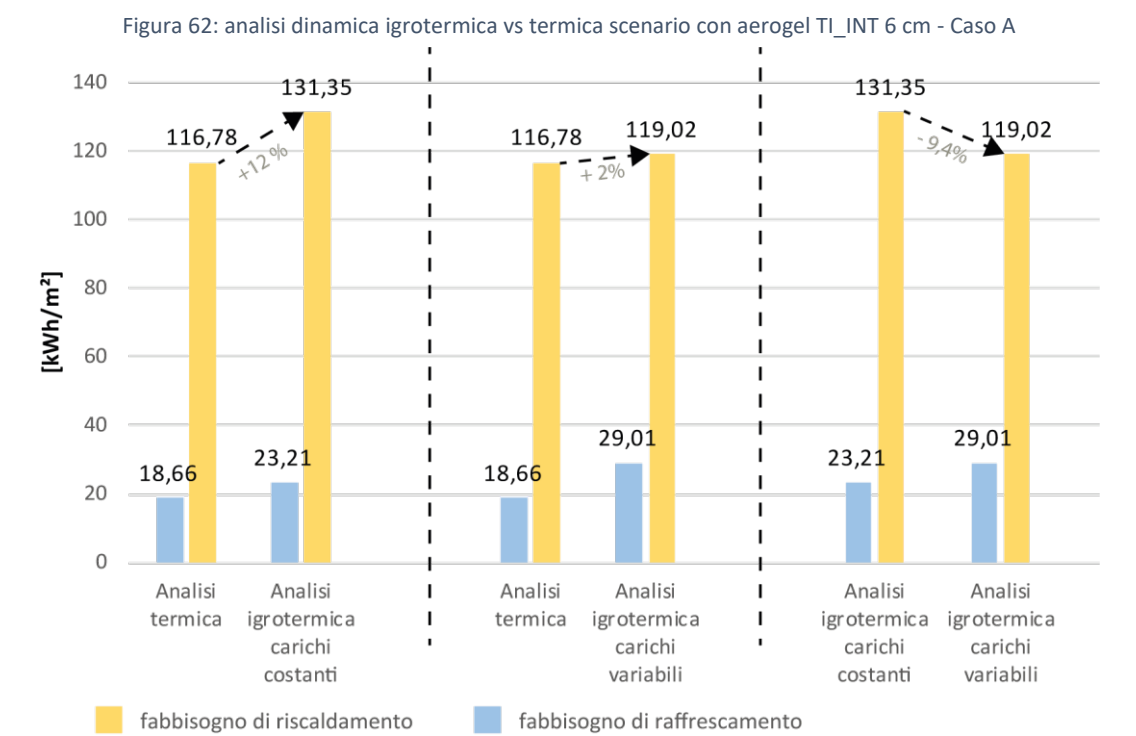
#### 4.2.2 Scenario con TI\_INT 6 cm

##### 4.2.2.1 Analisi dinamica igrotermica: apporti costanti e variabili

Dopo aver calibrato lo stato di fatto modellato in WUFI®Plus rispetto a quello simulato con DesignBuilder è stato successivamente applicato internamente il termointonaco a base aerogel con uno spessore di 6 cm. È stato scelto lo scenario TI\_INT 6 cm in quanto ha avuto il miglior impatto sulla riduzione della domanda energetica rispetto alle altre ipotesi di retrofit analizzate nei capitoli precedenti solo attraverso un'analisi dinamica termica. Le analisi igrotermiche svolte in questo paragrafo hanno come unica differenza gli apporti gratuiti interni, che nel primo caso saranno costanti, nel secondo saranno variabili in ottemperanza allo schedule d'occupazione

immaginato in precedenza. I risultati verranno confrontati con quelli ottenuti dalla simulazione termica dinamica effettuata con DesignBuilder.

| Tabella 45: Dati analisi termica dinamica DesignBuilder vs igrotermica WufiPlus- TI_INT 6 cm |               |               |                |                |                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| analisi                                                                                      | programma     | Riscaldamento |                | Raffrescamento |                |
|                                                                                              |               | [kWh/m²]      | differenza [%] | [kWh/m²]       | differenza [%] |
| Termica                                                                                      | DesignBuilder | 116.78        |                | 18.66          |                |
| Igrotermica<br>Carichi costanti                                                              | WUFIPlus      | 131.35        | 12%            | 23.21          | 24%            |
| Termica                                                                                      | DesignBuilder | 116.78        |                | 18.66          |                |
| Igrotermica<br>Carichi variabili                                                             | WUFIPlus      | 119.02        | 2%             | 29.01          | 55%            |
| Igrotermica<br>Carichi costanti                                                              | WUFIPlus      | 131.35        | 9.4%           | 23.21          | 25%            |
| Igrotermica<br>Carichi variabili                                                             | WUFIPlus      | 119.02        |                | 29.01          |                |

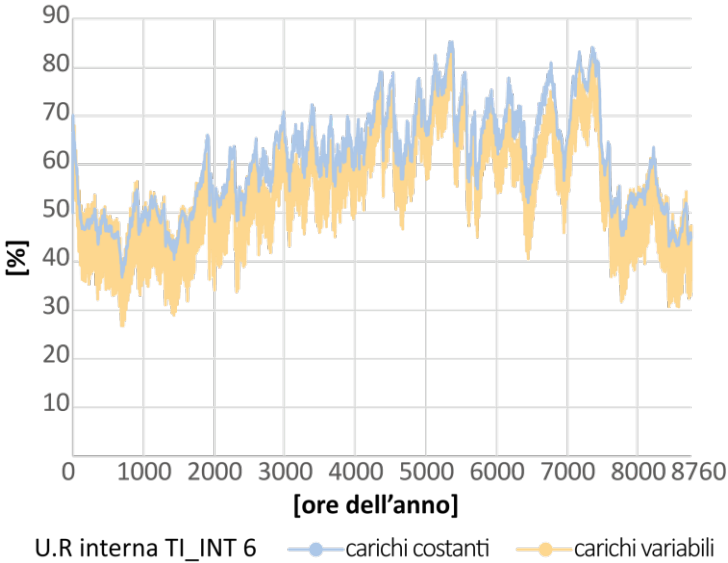


### 4.3 Commento sulle analisi termoigrometriche effettuate

Come succede per l'analisi termica, si evidenzia in tutti gli scenari, una riduzione della domanda per il riscaldamento rispetto allo stato di fatto (Tabella 44-Tabella 45). Ma l'applicazione del materiale isolante come già anticipato in altri studi e nella seguente tesi, porta anche a un leggero incremento del fabbisogno estivo. Ciò è dovuto al fatto che, in generale, l'applicazione di un materiale termicamente resistente impedisca una dissipazione del calore soprattutto nelle ore notturne.

Dalla Tabella 45 e dalla Figura 62 sui risultati dell'analisi termoigrometrica effettuata sullo scenario TI\_INT 6 cm possiamo riscontrare che, rispetto all'analisi termica dinamica, il fabbisogno nelle analisi igrotermiche effettuate in WUFI®Plus è aumentato. È risultato che la domanda invernale ha avuto una maggiorazione in una percentuale pari al 2% e al 12% rispetto all'analisi solo termica, la differenza di percentuale dipende dal fatto che si considerino ambienti più (12%) e meno (2%) umidi. L'umidità degli ambienti gioca un ruolo importante, in quanto è proprio la presenza di questa a cambiare le capacità termiche del materiale coibente andando a ridurle. Oltre a questo, si può notare che tra l'analisi igrotermica effettuata nello scenario TI\_INT 6 cm con carichi costanti e quella con carichi variabili, c'è una differenza del 9.4% nella domanda di riscaldamento. Per capirne la ragione anche in questo caso è necessario investigare sull'umidità interna media degli ambienti simulati.

Figura 63: U.R. medie orarie interne delle due analisi igrotermiche dello scenario con aerogel



| Tabella 46: U.R. interna media annuale analisi igrotermiche dello scenario con aerogel |                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Carichi costanti                                                                       | Carichi variabili (schedule WUFI®Plus) |
| 61%                                                                                    | 53%                                    |

Dalla Figura 63 possiamo notare che nel caso dei carichi variabili, le oscillazioni di umidità relativa interna sono più accentuate rispetto al caso con carichi costanti. Questo è dovuto al fatto che, nel caso con lo schedule occupazionale, ci sono delle ore nell'arco della giornata in cui gli occupanti sono assenti e ciò determina un abbassamento dell'umidità relativa interna (Tabella

46). Col carico costante invece, si va a sovrastimare l'effetto sull'U.R rispetto a ciò che accade col carico variabile. Il risultato di questa sovrastima è un calo della prestazione termica del materiale isolante. Quindi, quello dell'umidità è un fattore molto importante in quanto, in ambienti in condizioni più umide si avranno delle murature che reagiscono in modo peggiore alla trasmissione del calore, quello che ne deriverà sarà un extra consumo di energia nella domanda di riscaldamento. Attraverso i risultati della Tabella 45 è stato possibile valutare quanto un ambiente più umido rispetto a un altro è in grado di far aumentare il fabbisogno di riscaldamento nel caso in cui vi sia un termointonaco a base aerogel. Questo risultato è pari a circa il 10% in più rispetto ad ambienti meno umidi.

#### 4.4 Pay Back Period (PBP) effettuato sui risultati dell'analisi termoigrometrica

Dopo aver visto i risultati delle analisi igrotermiche rispetto alle analisi precedenti verrà effettuato su questi un PBP semplificato. Il PBP tiene conto degli stessi dati di riferimento racchiusi nel paragrafo 1.1, e serve a capire se il tempo di ritorno dell'investimento varia e di quanto rispetto a quello effettuato sulla base dei dati dell'analisi dinamica termica. Il PBP anche in questo caso verrà basato sul ritorno dell'investimento e del risparmio energetico che si ottiene in inverno, per cui il fabbisogno su cui si baserà sarà solo quello per riscaldamento.

| Tabella 47: tempo di ritorno dell'investimento basato sui dati dell'analisi dinamica igrotermica- con carichi costanti |                  |                       |                         |                    |                         |                                 |                                         |                                    |                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| Intonaco                                                                                                               | costo            | costo totale retrofit | riduzione della domanda | domanda di risc.   | riduzione della domanda | riduzione globale della domanda | Energia primaria ridotta ( $\eta=0.8$ ) | risparmio annuale (gas= 0,1 €/kWh) | tempo di ritorno investimento |
| cm                                                                                                                     | €/m <sup>2</sup> | € totali              | %                       | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup>      | kWh                             | kWh                                     | €                                  | anni                          |
| 0                                                                                                                      | 0                | 0                     | 0                       | 186.13             | -                       | -                               | -                                       | -                                  | -                             |
| 6                                                                                                                      | 210              | 242489                | 29%                     | 131.35             | 54.78                   | 53403.4                         | 66754.2                                 | 6675.4                             | <b>36</b>                     |

Nella tabella successiva invece i risultati del PBP basati sull'analisi dinamica igrotermica ma con carichi variabili secondo lo schedule di WUFI:

| Tabella 48: tempo di ritorno dell'investimento basato sui dati dell'analisi dinamica igrotermica- con carichi variabile secondo schedule WUFI®Plus |                  |                       |                         |                    |                         |                                 |                                         |                                    |                               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| Intonaco                                                                                                                                           | costo            | costo totale retrofit | riduzione della domanda | domanda di risc.   | riduzione della domanda | riduzione globale della domanda | Energia primaria ridotta ( $\eta=0.8$ ) | risparmio annuale (gas= 0,1 €/kWh) | tempo di ritorno investimento |
| cm                                                                                                                                                 | €/m <sup>2</sup> | € totali              | %                       | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup>      | kWh                             | kWh                                     | €                                  | anni                          |
| 0                                                                                                                                                  | 0                | 0                     | 0                       | 174.11             | -                       | -                               | -                                       | -                                  | -                             |
| 6                                                                                                                                                  | 210              | 305823                | 32%                     | 119.02             | 55.09                   | 53705.6                         | 67132                                   | 6713.2                             | <b>36</b>                     |

In entrambi i casi il ritorno economico dell'investimento è aumentato di ben 10 anni rispetto a quanto registrato precedentemente con i dati dell'analisi dinamica termica. Questo significa che se si considerano delle condizioni più vicine a quelle reali il tempo di ritorno risulta essere più lungo.

## 5 Conclusioni

L'oggetto di lavoro della presente tesi sono stati 3 tipi di intonaci isolanti a base aerogel creati per il progetto Wall-ACE. In particolare, l'attenzione si è focalizzata sull'applicazione di questo tipo di intonaco isolante sull'intero edificio e si è cercato di chiarire il suo impatto in termini di consumi globali attraverso delle analisi simulate. Queste simulazioni, in un primo momento, sono state effettuate in un regime dinamico termico che teneva in considerazione solo l'aspetto legato alle temperature e agli apporti sensibili. Esse hanno riguardato 3 casi studio, scelti tra i circa 1000 edifici del parco edilizio dell'Atc di Torino, grazie alle loro caratteristiche riscontrabili nella maggior parte degli edifici appartenenti allo stesso intervallo temporale di costruzione. Dai risultati ottenuti è stato possibile appurare che sugli edifici in cui vi è una coibentazione preesistente, l'applicazione dei termointonaci e della termorasatura ha un effetto sulla riduzione della domanda energetica minore rispetto a quelli non isolati. Un altro aspetto che si nota è che all'aumentare dello spessore di isolante, l'efficacia di riduzione del fabbisogno diminuisce progressivamente, soprattutto negli edifici già coibentati. Nel caso di costruzioni ad elevata inerzia termica che non presentano alcun isolamento iniziale, la coibentazione dall'interno con questo tipo di materiale, può portare a un leggero incremento del fabbisogno per raffrescamento. D'altro canto, si nota una più incisiva riduzione della domanda invernale che va ad influire maggiormente sul fabbisogno totale, in quanto il periodo di riscaldamento è più lungo di quello estivo. Ne deriverà che il fabbisogno totale dell'edificio si riduce del 34% che equivalgono nel caso A a una diminuzione pari a 71 kWh/m<sup>2</sup>annui.

Sui risultati della simulazione dinamica termica è stata poi eseguita un'analisi termoeconomica semplificata (PBP) in cui è stato appurato che il tempo di ritorno dell'investimento è minore se si interviene su edifici vetusti e non isolati, anche perché la riduzione di energia in questi casi è maggiore rispetto ad un edificio già isolato. Negli edifici già coibentati, per raggiungere lo stesso tempo di ritorno che si ha con l'applicazione del termointonaco interno in edifici di vecchia data, è necessario applicare l'intonaco dall'esterno. Dopo questo PBP semplificato è stato valutato l'impatto che questi scenari di retrofit avrebbero sui consumi globali del parco edilizio torinese dell'Atc se fossero estesi a tutti i tipi di edifici, nelle 3 diverse epoche, aventi caratteristiche simili ai tre archetipi individuati. L'analisi svolta sulle tipologie costruttive che rappresentano il 50% del parco edilizio Atc della città di Torino, ha dimostrato che, utilizzando questo intonaco negli scenari più efficienti dal punto di vista della riduzione della domanda per riscaldamento, sarebbe possibile ridurre globalmente i consumi di energia primaria per riscaldamento di oltre 55 milioni di kWh/a.

L'ultimo passo della presente tesi si è incentrato sull'analisi termoigrometrica effettuata sul caso in muratura portante, in quanto dalle analisi precedenti, su di esso le soluzioni di retrofit hanno avuto più efficacia in termini di riduzione del fabbisogno energetico e ritorno dell'investimento. In particolare, è stata fatta una simulazione sullo scenario in cui il termointonaco interno aveva uno spessore di 6 cm (in quanto quello grazie al quale si è ottenuta una domanda di riscaldamento più bassa). L'obiettivo dell'analisi in regime dinamico igro-termico è stato quello di verificare se una simulazione che tenesse conto, non solo del trasporto di calore, ma anche di quello di vapore portasse a risultati differenti in termini di fabbisogno energetico dell'edificio. I risultati dell'analisi fatta sullo scenario più efficiente hanno mostrato una leggera maggiorazione rispetto

a quelli precedenti. Da questo si è potuto constatare che quello dell'umidità è un fattore molto importante in quanto, è proprio la percentuale di umidità degli ambienti ad influire sul comportamento termico delle murature peggiorandone la resistenza alla trasmissione del calore. Quello che ne deriverà sarà un extra consumo di energia nella domanda di riscaldamento. È stato possibile valutare quanto il fabbisogno di riscaldamento di un ambiente aumenti nel caso in cui vi sia un termointonaco a base aerogel e si consideri anche il trasporto di vapore. È risultato che la domanda invernale ha avuto una lieve maggiorazione in una percentuale pari al 2% e al 12% rispetto all'analisi solo termica, la differenza di percentuale dipende dal fatto che si considerino ambienti più (12%) e meno (2%) umidi. È stato stimato anche quanto aumenti il fabbisogno di riscaldamento di un ambiente più umido rispetto a un altro, nel caso in cui vi sia un termointonaco a base aerogel. Questo risultato è pari a circa il 10% in più rispetto ad ambienti meno umidi. Dall'analisi termo-economica semplificata basata sui dati dell'analisi numerica il tempo di ritorno è aumentato di ben 10 anni rispetto a quanto registrato precedentemente con i dati dell'analisi dinamica termica. La simulazione numerica ha messo in luce il fatto che, basarsi su un'analisi solo termica va a sovrastimare i benefici derivati da una soluzione di retrofit, quale può essere quella con il termointonaco a base aerogel. Per cui, quando si analizzano gli effetti sui consumi globali di un edificio risulta importante basarsi su un'analisi in cui si considerano delle condizioni al contorno più prossime a quelle reali.

Attraverso un'analisi energetica, si può comprendere meglio il comportamento di una determinata tipologia di edificio in modo da poter confrontare diverse soluzioni d'intervento e definire quale sia la riduzione della domanda energetica nelle diverse configurazioni analizzate. È bene ricordare però che, lo scopo di una simulazione energetica, non è quello di comprendere in maniera esatta i consumi energetici dell'edificio. Questo risulterebbe molto difficile, in quanto, nella realtà, entrano in gioco molteplici fattori tra i quali, i più importanti, sono quelli umani e ambientali che mutano nel tempo e non sono prevedibili.

Le simulazioni svolte finora potranno essere oggetto di future analisi che comprendano una riqualificazione con questo tipo di termointonaco magari sull'intero patrimonio edilizio italiano.





## Ringraziamenti

Giunto al termine di questo lavoro di tesi vorrei dedicare un pensiero alle persone che hanno permesso la stesura di questo lavoro, arricchendomi di nuove conoscenze con le quali sono entrato a contatto solo in maniera marginale durante il percorso didattico e anche a quelle che mi sono state vicine in questo percorso universitario.

Vorrei ringraziare il professore Alfonso Capozzoli per la sua disponibilità e per avermi permesso di conoscere il progetto Wall-Ace e le persone che ne facevano parte, ma soprattutto per avermi fatto appassionare all'ambito della fisica tecnica durante l'ultimo periodo del percorso di laurea magistrale.

Un ringraziamento va alla professoressa Valentina Serra per la cortese disponibilità e attenzione durante l'intero svolgimento del lavoro e per avermi permesso di prendere parte a questo progetto.

Un ringraziamento particolare va all'Architetto Stefano Fantucci e alla Dottoressa Elisa Fenoglio per il continuo aiuto fornitomi durante l'intero percorso di tesi. Grazie a voi, che con pazienza avete sempre dato una risposta ai miei continui dubbi, sono stato in grado di arricchire il mio bagaglio di conoscenze su questioni e argomenti a me sconosciuti prima.

Vorrei ringraziare tutta la mia famiglia perché senza di loro niente di tutto ciò che ho fatto in questi anni di vita sarebbe potuto accadere. Ringrazio mia madre, mio padre e i miei nonni per essere stati sempre le mani tese e pronte ad abbracciarmi e il luogo sicuro in cui abitare.

Vorrei ringraziare la persona che oggi mi sta accanto per essere la mia pillola del buonumore, la rosa profumata nel giardino appassito dei momenti di sconforto che molte volte mi sono trovato ad affrontare.

Infine, vorrei ringraziare tutti i miei amici d'infanzia, la mia seconda famiglia. Il "Branco" con cui sono cresciuto, con loro ho vissuto i momenti di spensieratezza ai quali è riservato un posto speciale nel mio cuore.



## Bibliografia e Sitografia

- [1] "2030 climate & energy framework" [Online]. Disponibile su: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en). [Consultato 11/09/2019]
  
- [2] "U-VALUES FOR BETTER ENERGY PERFORMANCE OF BUILDINGS" [Online]. Disponibile su: <https://www.eurima.org/flipbook/ecofys7-en-leaflet/index.html>. [Consultato 11/09/2019]
  
- [3] A.N.C.E., "Lo stock abitativo in Italia", 2015
  
- [4] "Censimento Popolazione Abitazioni: Edifici residenziali" [Online]. Disponibile su: <http://dati-censimentopopolazione.istat.it/Index.aspx?lang=it#>. [Consultato 11/09/2019]
  
- [5] "RAEE-2018: Rapporto annuale efficienza energetica 2018" [Online]. Disponibile su: [http://www.agenziaefficienzaenergetica.it/allegati/RAEE\\_2018\\_-\\_COMPLETO.pdf](http://www.agenziaefficienzaenergetica.it/allegati/RAEE_2018_-_COMPLETO.pdf). [Consultato 11/09/2019]
  
- [6] A.N.I.T., "Efficienza energetica e acustica degli edifici", Marzo 2019
  
- [7] A.N.I.T., "Rapporto ANIT 2013: il mercato dei materiali isolanti in Italia" TEP srl, febbraio 2014
  
- [8] "THE PROJECT" [Online]. Disponibile su: <https://www.wall-ace.eu/>. [Consultato 11/09/2019]
  
- [9] "5. Intonaci" [Online]. Disponibile su: [https://online.scuola.zanichelli.it/zavanella-progettazione-files/Volume\\_1/Approfondimenti/Zanichelli\\_Zavanella\\_Vol1\\_UnitaC3\\_Par5.pdf](https://online.scuola.zanichelli.it/zavanella-progettazione-files/Volume_1/Approfondimenti/Zanichelli_Zavanella_Vol1_UnitaC3_Par5.pdf). [Consultato 20/09/2019]
  
- [10] BigMat, "Intonaci. Tradizione, innovazione e modalità di posa", Speciale tecnico Up!, Aprile 2017
  
- [11] UNI EN 998-1 2016. Specifiche per malte per opere murarie- Parte 1: Malte per intonaci interni ed esterni

- [12] "La Calce. Calce Idraulica Naturale NHL" [Online]. Disponibile su: <https://www.forumcalce.it/calce-idraulica-naturale-nhl/>. [Consultato 20/09/2019]
- [13] S. Odorizzi, "Malte e Intonaci nell'edilizia bioecologica", pp 34-38
- [14] C. Macchia, F. Ravetta. "Intonaci. Requisiti, Progettazione, Applicazione", Maggioli Editore, 1997
- [15] EN 13055:2016. Lightweight aggregates
- [16] V. Ferrándiz Mas, J.A. Huesca Tortosa, E. García Alcocel, "Durability of Mortars with Expanded Polystyrene", International Conference on Durability of Building Materials and Components, Porto, 2011
- [17] A. Bicer, F. Kar, "Thermal and mechanical properties of gypsum plaster mixed with expanded polystyrene and tragacanth", Elazig, 2017
- [18] C. Carbonaro, S. Tedesco, F. Thiebat, S. Fantucci, V. Serra e M. Dutto, «Development of a vegetal-based thermal plaster with low environmental impact: optimization process through an integrated approach» 6th International Building Physics Conference, 2015.
- [19] S. Thomas, J. Datta, J. Haponiuk, A. Reghunadhan, "Polyurethane Polymers: Composites and Nanocomposites: 1st Edition", ELSEVIER, Agosto 2017
- [20] "ECHA. Registry of restriction intentions until outcome" [Online]. Disponibile su: <https://echa.europa.eu/it/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e1829a30b8>. [Consultato 23/09/2019]
- [21] R. Anni, L. Della Badia, M. Matterazzo, F. Rossi, C. Signori, M. Stimamiglio, A. Temporin, V. Valente, "POLIURETANO", Studioemme Srl, Vicenza 2014
- [22] V. Václavík, T. Dvorský, V. Dirner, J. Daxner, M. Šťastný, "POLYURETHANE FOAM AS AGGREGATE FOR THERMAL INSULATING MORTARS AND LIGHTWEIGHT CONCRETE", Tehnički vjesnik, 2012

- [23]M. Frigione. "Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete", *Waste Management*, Elsevier,2010, 30(6) pp. 1101–1106
- [24]S.Akçaözoglu,K.Akçaözoglu,C.Duran Atis, "Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste PET lightweight aggregate (WPLA)", *Composites:Part B* 45,2013, pp. 721-726
- [25]A.Fadiel, F.Al Rifaie, T.Abu-Lebdeh,E.Fini,"USE OF CRUMB RUBBER TO IMPROVE THERMAL EFFICIENCY OF CEMENT-BASED MATERIALS",*American Journal of Engineering and Applied Science*, 2014
- [26]R. Vijayalakshmi and S. Ramanagopal," Structural Concrete using Expanded Clay Aggregate: A Review",*Indian Journal of Science and Technology*,Volume 11, aprile 2018
- [27]A.M. Rashad,"Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview", *Construction and Building Materials*, Volume 170, 10 May 2018, p.p 757-775,2018
- [28]"La perlite espansa" [Online]. Disponibile su: <https://www.perlite.it/la-perlite-espansa/>. [Consultato 26/09/2019]
- [29]O. Gencel, F. Koksall , M. Sahin , M. Y. Durgun , H. E. Hagglobland, W. Brostow," Modeling of Thermal Conductivity of Concrete with Vermiculite Using by Artificial Neural Networks Approaches", *Taylor & Francis*, May 2013
- [30]M.Davraz, M. Koru,A.E. Akdag, "The Effect of Physical Properties on Thermal Conductivity of Lightweight Aggregate", *Procedia Earth and Planetary Science* 15, 2015, p.p 85-92
- [31]L.M. Silva, R.A. Ribeiro, J.A. Labrincha, V.M. Ferreira,"Role of lightweight fillers on the properties of a mixed-binder mortar",*Cement & Concrete Composites* 32,2010,p.p 19-34
- [32]C. D. L. Calla and H. Suquet, Vermiculite: In *Hydrous Phyllosilicates (Exclusive of Miccas)*, in S. W. Bailey (Ed.), *Reviews in Mineralogy* 19, Mineralogical Society of America, Washington,DC, pp. 455–496, 1988.
- [33]P. B. Malla, Vermiculites–Chemistry, Mineralogy, and Applications, in J. B. Dixon and D. G.Schulze (Eds.), *Soil Mineralogy with Environmental Applications*, SSSA Series No. 7, Soil Science Society of America, pp. 501–529, 2002

- [34]S. A. Suvorov and V. V. Skurikhin, "Vermiculite-A Promising Material for High-Temperature Heat Insulators", *Refract. Ind. Ceram.*, vol. 44, pp. 186–193, 2003
- [35]O.İlter " Use of Pumice in Mortar and Rendering for Lightweight Building Blocks", Eastern Mediterranean University, Master of Science in Civil Engineering, 2010
- [36]A.Mladenovic, J.S Suput, V.Ducman, A.S. Skapin, "Alkali–silica reactivity of some frequently used lightweight aggregates", *Cement and Concrete Research* 34(10):1809-1816, 2004
- [37]N.Degirmenci, A.Yilmaz, "Use of pumice fine aggregate as an alternative to standard sand in production of lightweight cement mortar", *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences* Vol. 18,2011,p.p 61-68
- [38]S.Widodo, F.Ma'arif, B.S.Gan, "Thermal conductivity and compressive strenght of lightweight mortar utilizing Pumice breccia as fine aggregate", *Procedia Engineering* 171, 2017, p.p 768-773
- [39]Y-W Jeong, T-H Koh, K-S Youm, J. Moon, "Experimental Evaluation of Thermal Performance and Durability of Thermally-Enhanced Concretes", *Applied Sciences*,2017
- [40]O.Gencil, J.Jose del Coz Diaz, M.Sutcu, F.Koksal, F.P. Álvarez Rabanal,G.Martínez-Barrera, "A novel lightweight gypsum composite with diatomite and polypropylene fibers",*Construction and Building Materials* 113,2016,p.p 732-740
- [41]V.Corinaldesi, "Study of Lightweight Mortars Made of Wooden Waste",*Advanced Materials Research* Vol. 548, 2012, p.p 34-41
- [42]M.Martins, L. Nunes, F. Branco, "Plastering and Rendering Mortars Incorporating Regranulated of Expanded Cork to Improve Durability", *International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Porto,2011
- [43]I. Amara,A. Mazioud, I.Boulaoued, A.Mhimid, "Experimental study on thermal properties of bio-composite (gypsum plaster reinforced with palm tree fibers) for building insulation", *INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND TECHNOLOGY*,2017

- [44]N. Benmansour, B.Agoudjil, A.Gherabli, A.Kareche, A.Boudenne,"Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building", *Energy and Buildings* vol.81,2014, p.p 98-104
- [45]S.Liuzzi, C.Rubino, P.Stefanizzi, "Use of clay and olive pruning waste for building materials with high hygrothermal performances", 72nd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, 2017
- [46]"Guida ai PCM, i materiali a cambiamento di fase" [Online]. Disponibile su: <https://www.teknoring.com/guide/guide-architettura/guida-ai-pcm-i-materiali-a-cambiamento-di-fase/>. [Consultato 21/10/2019]
- [47]A.Zöller, M.Schmidt, "Interior plaster for temperature control Gypsum-based machine plaster with phase change material", 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Lisboa, 2007
- [48]M.Jaworski, S. Abeid, "Thermal conductivity of gypsum with incorporated phase change material (PCM) for building applications", *Journal of Power Technologies* 91, 2011
- [49]N. Silva, J.B. Aguiar, L.M. Bragança, T. Freire, I. Cardoso, "Properties of Gypsum-PCM Based Mortars for Interior Plastering of Construction Systems", *Materials Science Forum* Vols. 587-588, 2008, p.p 913-917
- [50]Z.Pavlík, M.Pavlíková, P.Volfová, V.Kaulich, A.Trník, J.Ondruška, O.Změškal, R.Černý, "Properties of a New Type of Plaster Containing Phase-Change Material", *IPCSIT* vol. 28, 2012
- [51]T.Santos, L.Nunes, P.Faria, "Production of eco-efficient earth-based plasters: influence of composition on physical performance and bio-susceptibility", *Journal of Cleaner Production* 167, 2017
- [52]A.T Waterman, "Positive ionisation of certain hot salts, together with some observations on the electrical properties of molybdenite at high temperatures", *Philosophical Magazine*, 1917
- [53]A.Harland, C.Mackay, B.Vale, "Phase change materials in architecture", *Proceedings SB10 Wellington—innovation and transformation*, 2010, Wellington, New Zealand



- [54] M. Koebel, A. Rigacci, P. Achard, "Aerogel-based thermal superinsulation: an overview", *J Sol-Gel Sci Technol*, 2012
- [55] "AEROGEL" [Online]. Disponibile su: <https://www.hisour.com/it/aerogel-40784/>. [Consultato 24/10/2019]
- [56] "La scoperta dell'Aerogel" [Online]. Disponibile su: <http://scienzaper-tutti.inf.infn.it/schede-approfondimento/1588-la-scoperta-dellaerogel>. [Consultato 26/10/2019]
- [57] "Aerogel – Un po' di storia" [Online]. Disponibile su: <http://aktarus-edilizia.com/nanotecnologia/aerogel/aerogel-un-po-di-storia/>. [Consultato 26/10/2019]
- [58] "Sistema d'intonaco isolante Aerogel: direttive per l'applicazione", Fixit Gruppe, 2013
- [59] "Materiali superisolanti a base aerogel" [Online]. Disponibile su: <http://www.rinnovabili.it/greenbuilding/materiali-superisolanti-base-aerogel/>. [Consultato 26-10-2019]
- [60] C. Buratti, E. Moretti, E. Belloni, F. Agosti, "Development of Innovative Aerogel Based Plasters: Preliminary Thermal and Acoustic Performance Evaluation", *Sustainability* 6, 2014
- [61] B. P. Jelle, R. Baetens, A. Gustavsen, "Aerogel Insulation for Building Applications", *Energy Build*, 2011
- [62] M. Calisesi, "Aerogel Incorporated Plasters and Mortars: the case study of precast panels", Bologna: Alma Mater Studiorum- Università di Bologna, Master Thesis in Ingegneria Edile-Architettura
- [63] Z. Liu, Y. Ding, F. Wang, Z. Deng, "Thermal insulation material based on SiO<sub>2</sub> aerogel", *Construction and Building Materials* 122, 2016, p.p 548-555
- [64] L. Bostanci, O. Ustundag, O. C. Sola, M. Uysal, "Effect of various curing methods and addition of silica aerogel on mortar properties", *GRADEVINAR* 71, 2019, p.p 651-661

- [65]J.Feng,T.Li, P.Zhu, K.Wang ,J.Qu, K.Lu,"Influence of Cement Types on Properties of Anti-spalling Silica Aerogel Mortar Modified HPC for Tunnel Fire Safety",International Conference on Energy, Power and Environmental Engineering,2017
  
- [66]P.Zhu, Y.Sun, "Experimental Study on the Influence of Particle Size of the SiO<sub>2</sub> Aerogel on Properties of Silica Aerogel Tunnel Fireproof Mortar",International Conference on Materials Science and Engineering Application,2017
  
- [67]M. F.Khamidi,C.Glover,S.A.Farhan,N.H.A.Puad, M.F.Nuruddin,"Effect of silica aerogel on the thermal conductivity of cement paste for the construction of concrete buildings in sustainable cities",WIT Transactions on The Built Environment Vol 137,2014
  
- [68]S.Kim, J.Seo, J.Cha, S.Kim,"Chemical retreating for gel-typed aerogel and insulation performance of cement containing aerogel",Construction and Building Materials 40, 2013
  
- [69]C. Buratti,E. Moretti,E. Belloni,"Aerogel Plasters for Building Energy Efficiency",Nano and Biotech Based Materials for Energy Building Efficiency,2016
  
- [70]Th. Stahl, S. Brunner, M.Zimmermann, K. Ghazi Wakili,"Thermo-hygric properties of a newly developed aerogel based insulation rendering for both exterior and interior applications",Energy and Buildings 44,2012,p.p 114-117
  
- [71]M.R. Veiga, A.L. Velosa, A.C. Magalhaes, "Evaluation of mechanical compatibility of renders to apply on old walls based on a restrained shrinkage test",Materials and Structures, 2007
  
- [72]M.Ibrahim, E.Wurtz, P.Achard, P.H.Biwole,"Aerogel-basedcoatingforenergy-efficientbuilding envelopes",9th International Energy Forum on Advanced Building Skins,2014
  
- [73]E.Di Giuseppe, M.D'Orazio, "Moisture Buffering",MODULO 386,2013,p.p 612-614

- [74] S. Fantucci, E. Fenoglio, G. Grosso, V. Serra, M. Perino, V. Marino, M. Dutto, "Development of an aerogel-based thermal coating for the energy retrofit and the prevention of condensation risk in existing buildings", *Science and Technology for the Built Environment*, 2019
- [75] R. Nosrati, U. Berardi, "Long-term performance of aerogel-enhanced materials", 11th Nordic Symposium on Building Physics, 2017
- [76] P. Westgate, K. Paine, R. J. Ball, "Physical and Mechanical Properties of Plasters Incorporating Aerogel Granules and Polypropylene Monofilament Fibres", *Construction and Building Materials* vol. 158, 2018, p.p 472-480
- [77] S. Fantucci, E. Fenoglio, F. Isaia, V. Serra, M. Perino, M. Dutto, V. Marino, "Development of aerogel based internal thermal plasters for the energy retrofit of existing buildings: First results", 4th International Conference On Building Energy, Environment, 2018
- [78] M. De Fatima Jùlio, A. Soares, L. M. Ilarco, I. Flores-Colen, J. de Brito, "Aerogel-based renders with lightweight aggregates: Correlation between molecular/pore structure and performance", *Construction and Building Materials* vol. 124, 2016, p.p 485-495
- [79] "Cos'è l'aerogel" [Online]. Disponibile su: <https://cappottotermico.net/nanotecnologia-aerogel-in-edilizia/>. [Consultato 2/11/2019]
- [80] A. Soleimani Dorcheh, M. H. Abbasi, "Silica aerogel; synthesis, properties and characterization", *Journal of materials processing technology* 199, 2008, p.p 10-26
- [81] L. Huang, "FEASIBILITY STUDY OF USING SILICA AEROGEL AS INSULATION FOR BUILDINGS", KTH School of Industrial Engineering and Management, Master of Science Thesis, 2012
- [82] J. L. Gurav, I. K. Jung, H. H. Park, E. S. Kang, D. Y. Nadargi, "Silica Aerogel: Synthesis and Applications", *Journal of Nanomaterials*, 2010
- [83] "AEROGEL.ORG. The 1990's: New Techniques and the Final Frontier" [Online]. Disponibile su: <http://www.aerogel.org/?p=826>. [Consultato 4/11/2019]
- [84] A. Stojanovic, M. Koebel, "LOW COST SILICA AEROGEL PRODUCTION", CISBAT, 2015

- [85] E. Muzi, "Il processo sol-gel per la sintesi del vetro: dalle nanoparticelle al bulk", Politecnico di Torino, Master Thesis, 2018
- [86] "Aerogel" [Online]. Disponibile su: <https://www.encyclios.it/aerogel/>. [Consultato il 5/11/2019]
- [87] "Silice cristallina" [Online]. Disponibile su: <https://www.inail.it/cs/internet/attivita/prevenzione-e-sicurezza/conoscere-il-rischio/polveri-e-fibre/silice-cristallina.html>. [Consultato il 5/11/2019]
- [88] "Re-evaluation of silicon dioxide (E 551) as food additive" [Online]. Disponibile su: <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2018.5088>. [Consultato il 5/11/2019]
- [89] P. Guidi, "Effetti genotossici indotti in vitro da polveri di silice amorfa e cristallina su linee cellulari murine ed umane.", Università di Pisa, Doctoral Thesis, 2010
- [90] "THERMALLY INSULATING AEROGEL BASED RENDERING MATERIALS" [Online]. Disponibile su: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2014090790>. [Consultato il 5/11/2019]
- [91] "INSULATING SILICA XEROGEL PLASTER" [Online]. Disponibile su: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2011083174>. [Consultato il 5/11/2019]
- [92] L. Probst, L. Frideres, B. Pedersen, Steven Clarke, PwC Luxembourg, "Advanced Materials. Aerogels, getting their second wind", European Union, 2015
- [93] M. Sachithanadam, S. Chandrakant Joshi, "Silica Aerogel Composites. Novel Fabrication Methods"
- [94] A. Kaya, F. Kar, "Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin", Construction and Building Materials 105, 2016, p.p 572–578.

- [95] B. Demirel, "Optimization of the composite brick composed of expanded polystyrene and pumice blocks", *Construction and Building Materials* 40, 2013, p.p 306–313.
- [96] V. Corinaldesi, A. Nardinocchi, J. Donnini, "Lightweight Aggregate Mortars for Sustainable and Energy-Efficient Building", *Advanced Materials Research* Vol. 980, 2014, pp 142-146
- [97] P. Mounanga, W. Gbongbon, P. Poullain, P. Turcry, "Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes", *Cement and Concrete Composites* 30, 2008; p.p 806–814.
- [98] H. Laoubi, M. Bederina, A. Djoudi, A. Goullieux, R.M. Dheilily, M. Queneudec, "Study of a New Plaster Composite Based on Dune Sand and Expanded Polystyrene as Aggregates", *The Open Civil Engineering Journal* vol.12, 2018
- [99] A. Bicer, F. Kar, "Thermal and Mechanical Properties of Cement-Eps-Marble Powder Composites", *JOTCSB*, 2017
- [100] V. Corinaldesi, A. Mazzoli, G. Moriconi, "Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles", *Materials and Design* 32, 2011, p.p 1646–1650
- [101] A.D.A.A da Silva, "THERMAL INSULATION CHARACTERISTICS OF STRUCTURAL LIGHTWEIGHT AND NORMAL WEIGHT CONCRETES PRODUCED WITH DIFFERENT TYPES OF AGGREGATES", *Técnico Lisboa*, Master thesis, 2015
- [102] D. Barnat-Hunek, P. Smarzewski, "ANALYSIS OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF HYDROPHOBISED LIGHTWEIGHT-AGGREGATE MORTARS", *Polish Society of Composite Materials*, 2016
- [103] Z. Saghrouni, D. Baillis, N. Naouar, N. Blal, A. Jemni, "Thermal Properties of New Insulating Juncus Maritimus Fibrous Mortar Composites/Experimental Results and Analytical Laws", *Applied Sciences*, 2019
- [104] U. Berardi, "Aerogel-enhanced systems for building energy retrofits: Insights from a case study", *Energy and Buildings* vol.159, 2018

- [105] A.Poonyakan, M.Rachakornkij,M.Wecharatana, W.Smittakorn,"Potential Use of PlasticWastes for Low Thermal Conductivity Concrete",Materials 11,2018
- [106] A. Benazzouk, O. Douzane, K. Mezreb, B. Laidoudi, M. Que´neudec,"Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling", Construction and Building Materials 22,2008, p.p 573–579
- [107] K. Al-Rim, A. Ledhem, O. Douzane, R.M. Dheilily, M. Queneudec, "Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay cement- wood composites", Cement and Concrete Composites 21,1999
- [108] A.G. Devecioglu, Y. Bicer,"The effects of tragacanth addition on the thermal and mechanical properties of lightweight concretes mixed with expanded clay", Periodica Polytechnica Civil Engineering vol 60,2016, p.p 45–50.
- [109] G. Bumanis, D. Bajare, A. Korjamins,"Mechanical and Thermal Properties of Lightweight Concrete Made from Expanded Glass", JOURNAL OF SUSTAINABLE ARCHITECTURE AND CIVIL ENGINEERING,2013
- [110] C.Carbonaro, Y. Cascone, S. Fantucci, V. Serra, M.Perino, M.Dutto,"Energy assessment of a PCM–embedded plaster: embodied energy versus operational energy",6th IBPC, 2015
- [111] Pavel,C.C., Blagoeva,D.T.,” Competitive landscape of the EU’s insulation materials industry for energy-efficient buildings”, Publications Office of the European Union, 2018
- [112] S.Barbero, M. Dutto, C. Ferrua, A. Pereno,” Analysis on existent thermal insulating plasters towards innovative applications: Evaluation methodology for a real cost-performance comparison”, Energy and Buildings, 2014
- [113] E.Fenoglio,”Intonaci termoisolanti di nuova generazione”, Politecnico di Torino, Tesi di laurea magistrale in Architettura per il progetto sostenibile, 2017
- [114] "INTOPERL"[Online]. Disponibile su: [https://irp-cdn.multiscreen-site.com/21988380/files/uploaded/Scheda%20tecnica\\_INTOPERL\\_a70XI23nTYy9TZ9HC0DS.pdf](https://irp-cdn.multiscreen-site.com/21988380/files/uploaded/Scheda%20tecnica_INTOPERL_a70XI23nTYy9TZ9HC0DS.pdf). [Consultato il 22/11/2019]
- [115] "INTOTHERM"[Online]. Disponibile su: [https://irp-cdn.multiscreen-site.com/21988380/files/uploaded/Scheda%20tecnica\\_INTOTHERM%20CERT.%20CAM.pdf](https://irp-cdn.multiscreen-site.com/21988380/files/uploaded/Scheda%20tecnica_INTOTHERM%20CERT.%20CAM.pdf). [Consultato il 22/11/2019]

- [116] "Premiscelati Knauf: eccellenza per l'edilizia"[Online]. Disponibile su: [http://www.knauf.it/backoffice/userfiles/files/documentiAllegati/795/\[9680\]Catalogo\\_Premiscelati\\_04\\_2015.pdf](http://www.knauf.it/backoffice/userfiles/files/documentiAllegati/795/[9680]Catalogo_Premiscelati_04_2015.pdf). [Consultato il 22/11/2019]
- [117] "KT 48"[Online]. Disponibile su: <https://img.edilportale.com/catalogs/KT-48-03-19-FASSA-55308-cat8ba9469f.pdf>. [Consultato il 22/11/2019]
- [118] "TERMOR" [Online]. Disponibile su: [http://www.cvr.it/wp-content/uploads/2013/08/termopor\\_agg-08-02-18.pdf](http://www.cvr.it/wp-content/uploads/2013/08/termopor_agg-08-02-18.pdf). [Consultato il 22/11/2019]
- [119] "THERMOINTONACO"[Online]. Disponibile su: [https://www.vimark.com/wp-content/uploads/2016/02/THERMOINTONACO\\_0116\\_ITA.pdf](https://www.vimark.com/wp-content/uploads/2016/02/THERMOINTONACO_0116_ITA.pdf). [Consultato il 22/11/2019]
- [120] "webertherm x-light 042"[Online]. Disponibile su: [https://www.it.weber/files/it/2019-06/webertherm\\_x-light\\_042.pdf](https://www.it.weber/files/it/2019-06/webertherm_x-light_042.pdf). [Consultato il 22/11/2019]
- [121] "ThermoExtra"[Online]. Disponibile su: [https://baumit.it/files/it/pdf\\_files/pdbl\\_thermoextra.pdf](https://baumit.it/files/it/pdf_files/pdbl_thermoextra.pdf) [Consultato il 22/11/2019]
- [122] "Drywall"[Online]. Disponibile su: <http://www.chiraema.it/prodotto/asciugo-drywall-2/?pdf=10959>. [Consultato il 22/11/2019]
- [123] "Wärmedämmputz-System"[Online]. Disponibile su: [https://dracholin.de/wp-content/uploads/WD\\_Putz.pdf](https://dracholin.de/wp-content/uploads/WD_Putz.pdf). [Consultato il 22/11/2019]
- [124] "Leistungserklärung. Produkttyp Wärmedämmputzmörtel T"[Online]. Disponibile su: [https://dracholin.de/wp-content/uploads/LE\\_301\\_W%C3%A4rmed%C3%A4mmputz\\_16052013.pdf](https://dracholin.de/wp-content/uploads/LE_301_W%C3%A4rmed%C3%A4mmputz_16052013.pdf). [Consultato il 22/11/2019]
- [125] "ISOLTECO LIGHT 110"[Online]. Disponibile su: <http://www.edilteco.it/it/downloads/download/1299/scheda-tecnica-isolteco-r-light-110>. [Consultato il 22/11/2019]
- [126] "ISOLTECO 150"[Online]. Disponibile su: <http://www.edilteco.it/it/downloads/download/625/scheda-tecnica-isolteco-r-150>. [Consultato il 22/11/2019]
- [127] "ISOLTECO 230"[Online]. Disponibile su: <http://www.edilteco.it/it/downloads/download/1449/scheda-tecnica-isolteco-r-230>. [Consultato il 22/11/2019]
- [128] "ISOLSAN 230"[Online]. Disponibile su: <http://www.edilteco.it/it/downloads/download/627/scheda-tecnica-isolsan-r-230>. [Consultato il 22/11/2019]
- [129] "GTL 30 ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΟ ΕΛΑΦΡΥ ΚΟΝΙΑΜΑ ΔΑΠΕΔΟΥ"[Online]. Disponibile su: [https://marmoline.s3.amazonaws.com/system/uploads/document/file/1647/TDS\\_-\\_GTL\\_30\\_\\_gr\\_.pdf](https://marmoline.s3.amazonaws.com/system/uploads/document/file/1647/TDS_-_GTL_30__gr_.pdf). [Consultato il 22/11/2019]

- [130] "TL 2 ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΟΣ ΕΛΑΦΡΥΣ ΣΟΒΑΣ ΒΑΣΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ"[Online]. Disponibile su: [https://marmoline.s3.amazonaws.com/system/uploads/document/file/1474/TDS\\_-\\_TL\\_2\\_\\_gr\\_.pdf](https://marmoline.s3.amazonaws.com/system/uploads/document/file/1474/TDS_-_TL_2__gr_.pdf). [Consultato il 22/11/2019]
- [131] "WD Wärmedämmputz"[Online]. Disponibile su: [https://www.quick-mix.de/fileadmin/user\\_upload/quick-mix/\\_Apps\\_/Sortiment/Technische\\_Informationen/de/TI\\_WD.pdf](https://www.quick-mix.de/fileadmin/user_upload/quick-mix/_Apps_/Sortiment/Technische_Informationen/de/TI_WD.pdf). [Consultato il 22/11/2019]
- [132] "WD Wärmedämmputz"[Online]. Disponibile su: <https://www.quick-mix.de/produkte/produkt/quick-mix-putzsysteme-unterputze-waermedaemmende-putze-waermedaemmputz-wd.html>. [Consultato il 22/11/2019]
- [133] "WD Wärmedämmputz"[Online]. Disponibile su: [http://www.schwenk-putztechnik.ch/fileadmin/user\\_upload/quick-mix/\\_Apps\\_/Sortiment-CH/Technische\\_Informationen/TI-WD-CH.pdf](http://www.schwenk-putztechnik.ch/fileadmin/user_upload/quick-mix/_Apps_/Sortiment-CH/Technische_Informationen/TI-WD-CH.pdf). [Consultato il 22/11/2019]
- [134] "Production Associations MICROSPHERES"[Online]. Disponibile su: <https://mfa.gov.ua/mediafiles/sites/rei/files/2017-05-04.pdf>. [Consultato il 22/11/2019]
- [135] "maxit ip 75 therm Wärmedämm-Systemputz"[Online]. Disponibile su: <https://docs.maxit.de:8443/procat/assets/images/TM-DE-G9THERM%2075.pdf>. [Consultato il 22/11/2019]
- [136] "HASIT 850"[Online]. Disponibile su: <https://www.hasit.de/produkte/detail-seite/hasit-850-183729>. [Consultato il 24/11/2019]
- [137] "DP-B- Dämmputz B"[Online]. Disponibile su: [https://www.quick-mix.de/fileadmin/user\\_upload/quick-mix/\\_Apps\\_/Sortiment/Technische\\_Informationen/de/TI-DP-B.pdf](https://www.quick-mix.de/fileadmin/user_upload/quick-mix/_Apps_/Sortiment/Technische_Informationen/de/TI-DP-B.pdf). [Consultato il 25/11/2019]
- [138] "il Nano cappotto AFONTERMO"[Online]. Disponibile su: [http://www.afon-casa.it/images/prodotti/afontermo/000\\_Scheda\\_Tecnica\\_AfonTermo\\_\\_Rasante\\_Termico\\_riflettente\\_Anticondensa\\_21.11.2019.pdf](http://www.afon-casa.it/images/prodotti/afontermo/000_Scheda_Tecnica_AfonTermo__Rasante_Termico_riflettente_Anticondensa_21.11.2019.pdf). [Consultato il 25/11/2019]
- [139] "Scheda tecnica AFONTERMO" [Online]. Disponibile su: [http://www.afon-casa.it/images/prodotti/afontermo/SDS\\_AFONTERMO\\_2017.pdf](http://www.afon-casa.it/images/prodotti/afontermo/SDS_AFONTERMO_2017.pdf). [Consultato il 25/11/2019]
- [140] "RÖFIX 888"[Online]. Disponibile su: <https://www.roefix.it/Prodotti/Intonaci-di-fondo/Intonaci-termoisolanti/ROeFIX-888-Intonaco-termoisolante-minerale>. [Consultato il 22/11/2019]
- [141] "RÖFIX AeroCalce IA 782 THERMO"[Online]. Disponibile su: [https://www.edil-portale.com/prodotti/r%C3%B6fix/intonaco-termoisolante/r%C3%B6fix-aerocalce-ia-782-thermo\\_46821.html](https://www.edil-portale.com/prodotti/r%C3%B6fix/intonaco-termoisolante/r%C3%B6fix-aerocalce-ia-782-thermo_46821.html). [Consultato il 23/11/2019]



- [142] "RÖFIX AeroCalce IA 784 PLUS"[Online]. Disponibile su: [https://www.roefix.it/var/fixitgruppe/storage/ilcatalogue/files/pdf/ITIT/Scheda\\_tecnica\\_R%C3%96FIX\\_AeroCalce%C2%AE\\_IA\\_784\\_PLUS\\_Intonaco\\_di\\_fondo\\_e\\_rivest\\_DC0011925.PDF](https://www.roefix.it/var/fixitgruppe/storage/ilcatalogue/files/pdf/ITIT/Scheda_tecnica_R%C3%96FIX_AeroCalce%C2%AE_IA_784_PLUS_Intonaco_di_fondo_e_rivest_DC0011925.PDF). [Consultato il 23/11/2019]
- [143] "RÖFIX CalceClima® Thermo"[Online]. Disponibile su: [https://m.roefix.it/var/fixitgruppe/storage/ilcatalogue/files/pdf/ITIT/Scheda\\_tecnica\\_R%C3%96FIX\\_CalceClima%C2%AE\\_Thermo\\_Intonaco\\_termoisolante\\_base\\_ca\\_DC0057907.PDF](https://m.roefix.it/var/fixitgruppe/storage/ilcatalogue/files/pdf/ITIT/Scheda_tecnica_R%C3%96FIX_CalceClima%C2%AE_Thermo_Intonaco_termoisolante_base_ca_DC0057907.PDF). [Consultato il 23/11/2019]
- [144] "CALEOSANA"[Online]. Disponibile su: <https://www.azichem.it/prodotti/caleosana/11/>. [Consultato il 23/11/2019]
- [145] "INTOIGNI PHONOACUSTIC"[Online]. Disponibile su: [https://irp-cdn.multiscreensite.com/21988380/files/uploaded/Scheda%20tecnica\\_INTOIGNI%20PHONOACUSTIC\\_a9ONOrESOKPSQRjp22xP.pdf](https://irp-cdn.multiscreensite.com/21988380/files/uploaded/Scheda%20tecnica_INTOIGNI%20PHONOACUSTIC_a9ONOrESOKPSQRjp22xP.pdf). [Consultato il 23/11/2019]
- [146] "Klimasan Perlit intonaci"[Online]. Disponibile su: [https://klimasan-perlit.de/?page\\_id=1379](https://klimasan-perlit.de/?page_id=1379). [Consultato il 23/11/2019]
- [147] "TERMOINTONACO LATERLITE | Intonaco a base di calce idraulica e idrata"[Online]. Disponibile su: [https://www.edilportale.com/prodotti/laterlite/intonaco-a-base-di-calce-idraulica-e-idrata/termointonaco-laterlite-intonaco-a-base-di-calce-idraulica-e-idrata\\_1697.html](https://www.edilportale.com/prodotti/laterlite/intonaco-a-base-di-calce-idraulica-e-idrata/termointonaco-laterlite-intonaco-a-base-di-calce-idraulica-e-idrata_1697.html). [Consultato il 23/11/2019]
- [148] "TERMOINTONACO LATERLITE | Intonaco cementizio"[Online]. Disponibile su: [https://www.edilportale.com/prodotti/laterlite/intonaco-cementizio/termointonaco-laterlite-intonaco-cementizio\\_154659.html#](https://www.edilportale.com/prodotti/laterlite/intonaco-cementizio/termointonaco-laterlite-intonaco-cementizio_154659.html#). [Consultato il 23/11/2019]
- [149] "INTONACO TERMICO. Intonaco diffusivo termoisolante"[Online]. Disponibile su: <https://www.tradimalt.com/wp-content/uploads/2018/03/scheda-tecnica-magistra-intonaco-termico.pdf>. [Consultato il 23/11/2019]
- [150] "maxit Ip 74 M therm"[Online]. Disponibile su: <https://docs.maxit.de:8443/procat/assets/images/TM-DE-G9THERM%2074M.pdf>. [Consultato il 23/11/2019]
- [151] "maxit Ip 76 therm Wärmedämmender Unterputz"[Online]. Disponibile su: <https://docs.maxit.de:8443/procat/assets/images/TM-DE-G9THERM%2076.pdf>. [Consultato il 23/11/2019]
- [152] "maxit Ip 78 therm"[Online]. Disponibile su: <https://docs.maxit.de:8443/procat/assets/images/TM-DE-G9THERM%2078.pdf>. [Consultato il 23/11/2019]
- [153] "MK8 Intonaco termoisolante"[Online]. Disponibile su: [https://www.marracchinilucca.com/contenuti/marr\\_prodotti\\_allegati/pdf/allegato84\\_1592d865484955.pdf?v=1496156874](https://www.marracchinilucca.com/contenuti/marr_prodotti_allegati/pdf/allegato84_1592d865484955.pdf?v=1496156874). [Consultato il 23/11/2019]

- [154] "Natural Calce thermocalce"[Online]. Disponibile su: [https://www.marraccini-lucca.com/contenuti/marr\\_prodotti\\_allegati/pdf/allegato115\\_1592d86569d8ff.pdf?v=1496156874](https://www.marraccini-lucca.com/contenuti/marr_prodotti_allegati/pdf/allegato115_1592d86569d8ff.pdf?v=1496156874). [Consultato il 23/11/2019]
- [155] "Termo k"[Online]. Disponibile su: [https://rallk.com/files/it/ST/TermoK\\_ST\\_IT.pdf](https://rallk.com/files/it/ST/TermoK_ST_IT.pdf). [Consultato il 23/11/2019]
- [156] "TERMOTASS"[Online]. Disponibile su: [https://www.tassullo.it/documenti/Prodotti/TERMOTASSZ\\_ST\\_IT.pdf](https://www.tassullo.it/documenti/Prodotti/TERMOTASSZ_ST_IT.pdf). [Consultato il 23/11/2019]
- [157] "thermofond, thermo rinzafo"[Online]. Disponibile su: [http://www.chiraema.it/?s=&categoria=intonaci&sette=isolamento-termico&post\\_type=prodotti&submit=](http://www.chiraema.it/?s=&categoria=intonaci&sette=isolamento-termico&post_type=prodotti&submit=). [Consultato il 23/11/2019]
- [158] "BioTHERMOVENT"[Online]. Disponibile su: <https://www.indexspa.it/indexspa-com/TECNOPLAN/pdf/BioTHERMOVENT-IT.pdf>. [Consultato il 23/11/2019]
- [159] "THERMOCAP"[Online]. Disponibile su: <https://www.indexspa.it/indexspa-com/TECNOPLAN/pdf/THERMOCAP-IT.pdf>. [Consultato il 23/11/2019]
- [160] "Baumit ThermoPutz"[Online]. Disponibile su: <https://baumit.it/product/3170/baumit-thermoputz>. [Consultato il 23/11/2019]
- [161] "TDM"[Online]. Disponibile su: [https://www.quick-mix.de/fileadmin/user\\_upload/quick-mix/\\_Apps\\_/Sortiment/Technische\\_Informationen/de/TI-TMD.pdf](https://www.quick-mix.de/fileadmin/user_upload/quick-mix/_Apps_/Sortiment/Technische_Informationen/de/TI-TMD.pdf). [Consultato il 24/11/2019]
- [162] "HASIT 840"[Online]. Disponibile su: <https://www.hasit.de/produkte/detail-seite/hasit-840-414607>. [Consultato il 24/11/2019]
- [163] "VOLCALITE"[Online]. Disponibile su: [https://www.hdsystem.it/it/prodotti/isolamento-termico-acustico/volcalite\\_405683\\_idp/](https://www.hdsystem.it/it/prodotti/isolamento-termico-acustico/volcalite_405683_idp/). [Consultato il 24/11/2019]
- [164] "DACOTERM evolution e DACOTERM"[Online]. Disponibile su: [http://www.maxfor.com/download/Prod\\_Daco.html](http://www.maxfor.com/download/Prod_Daco.html). [Consultato il 24/11/2019]
- [165] "Perlite Based Products| Exterior"[Online]. Disponibile su: <http://www.sivaper.com/en/exterior.html>. [Consultato il 24/11/2019]
- [166] "SIVAPER THERMAL INSULATING PERLITE PLASTER"[Online]. Disponibile su: [http://www.sivaper.com/en/S%C4%B1vaper\\_Catalogue\\_2013.pdf](http://www.sivaper.com/en/S%C4%B1vaper_Catalogue_2013.pdf). [Consultato il 24/11/2019]
- [167] "CLIMATHERM"[Online]. Disponibile su: <http://www.tcscalce.it/it/prodotto/climatherm>. [Consultato il 24/11/2019]
- [168] "CLIMATHERM M"[Online]. Disponibile su: <http://www.tcscalce.it/it/prodotto/climatherm-m>. [Consultato il 24/11/2019]

- [169] "Tectoria TERMOFIX"[Online]. Disponibile su: [https://www.kimia.it/it/prodotti/categorie-merceologiche/63#jquery\\_ajax\\_load\\_target](https://www.kimia.it/it/prodotti/categorie-merceologiche/63#jquery_ajax_load_target). [Consultato il 25/11/2019]
- [170] "GYPROC IGNIVER"[Online]. Disponibile su: <https://www.gyproc.it/products/protezione-dal-fuoco/gyproc-igniver>. [Consultato il 25/11/2019]
- [171] "GYPROC SIGMATIC IGNIFUGO M 120"[Online]. Disponibile su: <https://www.gyproc.it/products/protezione-dal-fuoco/gyproc-sigmatic-ignifugo-m120>. [Consultato il 25/11/2019]
- [172] "FIXIT 223 Rasante speciale Rasante nel sistema termoisolante RÖFIX Aero-gel"[Online]. Disponibile su: <https://www.roefix.it/Prodotti/Sistemi-di-isolamento-termico/Sistemi-di-intonaci-isolanti/FIXIT-223-Rasante-speciale-Rasante-nel-sistema-termoisolante-ROeFIX-Aerogel>. [Consultato il 25/11/2019]
- [173] "TRI-O-THERM M"[Online]. Disponibile su: [https://www.tri-o-therm.de/fileadmin/user\\_upload/www.tri-o-therm.de/TI\\_TRI-O-THERM-M.pdf](https://www.tri-o-therm.de/fileadmin/user_upload/www.tri-o-therm.de/TI_TRI-O-THERM-M.pdf). [Consultato il 25/11/2019]
- [174] "TERMOFINITURA"[Online]. Disponibile su: [https://www.tassullo.it/it/rasanti-e-finiture/termofinitura\\_405732\\_idp/](https://www.tassullo.it/it/rasanti-e-finiture/termofinitura_405732_idp/). [Consultato il 25/11/2019]
- [175] "ThermoRasa"[Online]. Disponibile su: <http://www.chiraema.it/prodotto/thermo-rasa/>. [Consultato il 25/11/2019]
- [176] "TR 1200"[Online]. Disponibile su: <http://www.chiraema.it/prodotto/thermo-rasa-2/>. [Consultato il 25/11/2019]
- [177] "weber.therm 505 HDP" [Online]. Disponibile su: [https://www.de.weber/files/de/2017-09/TM\\_weber.therm\\_505\\_HDP.pdf](https://www.de.weber/files/de/2017-09/TM_weber.therm_505_HDP.pdf). [Consultato il 24/11/2019]
- [178] "weber.therm 507" [Online]. Disponibile su: <https://www.de.weber/waerme-daemmung-wdvs/daemmputz/webertherm-507>. [Consultato il 24/11/2019]
- [179] "weber.therm 509" [Online]. Disponibile su: <https://www.de.weber/waerme-daemmung-wdvs/daemmputz/webertherm-509>. [Consultato il 24/11/2019]
- [180] "ORBITH Daemmputz 055" [Online]. Disponibile su: [https://dracholin.de/wp-content/uploads/TM\\_300\\_DRACHOLIN\\_D%C3%A4mmputz-055\\_002.pdf](https://dracholin.de/wp-content/uploads/TM_300_DRACHOLIN_D%C3%A4mmputz-055_002.pdf). [Consultato il 24/11/2019]

- [181] "THERMOCOAT Catalogo"[Online]. Disponibile su: <http://www.thermocoat.com.tr/catalog>. [Consultato il 24/11/2019]
- [182] "SACE CorkShield"[Online]. Disponibile su: <https://www.sacecomponents.com/insulation/prodotti/intonaci-e-malte-pronte-per-restauro-e-bioedilizia/corkshield/>. [Consultato il 24/11/2019]
- [183] "DACOTERM EVOLUTION"[Online]. Disponibile su: <http://www.draco-edilizia.it/prodotto.php?idcat=8&idsubcat=59&idaltcat=177&idprod=257>. [Consultato il 24/11/2019]
- [184] "INTOSUGHERO|INTOBIO SUGHERO"[Online]. Disponibile su: <https://www.malvinsrl.com/isolamento-termico>. [Consultato il 24/11/2019]
- [185] "ISOCANNA"[Online]. Disponibile su: [http://www.tcsalce.it/fpdf17/template\\_scheda\\_tecnica.php?idprodotti=93&L=1](http://www.tcsalce.it/fpdf17/template_scheda_tecnica.php?idprodotti=93&L=1). [Consultato il 24/11/2019]
- [186] "Documentazione scaricabile equilibrio bioedilizia"[Online]. Disponibile su: <http://www.equilibrium-bioedilizia.it/it/area-tecnica/brochure-pubblicazioni>. [Consultato il 24/11/2019]
- [187] "SECILTEK ECOCORK INSULATING RENDER"[Online]. Disponibile su: <https://www.mikewye.co.uk/product/secil-ecocork/>. [Consultato il 24/11/2019]
- [188] "Tectoria TERMOASCIUGA"[Online]. Disponibile su: [https://www.kimia.it/it/prodotti/categorie-merceologiche/63#jquery\\_ajax\\_load\\_target](https://www.kimia.it/it/prodotti/categorie-merceologiche/63#jquery_ajax_load_target). [Consultato il 24/11/2019]
- [189] "CALCECANAPA FINITURA"[Online]. Disponibile su: <https://www.bancadella-calce.it/bdc/prodotti-bdc/finitura/>. [Consultato il 24/11/2019]
- [190] "CALCECANAPA TERMOINTONACO"[Online]. Disponibile su: <https://www.bancadellacalce.it/bdc/prodotti-bdc/termointonaco/>. [Consultato il 24/11/2019]
- [191] "Tradical Hemcrete for renders & plasters"[Online]. Disponibile su: <http://www.tradical.com/hemp-lime.html>. [Consultato il 24/11/2019]
- [192] "Biocalce Termointonaco"[Online]. Disponibile su: <http://www.isomer.it/prodotto.aspx?id=22>. [Consultato il 24/11/2019]
- [193] "DACOTERM evolution" [Online]. Disponibile su: [http://www.maxfor.com/lin\\_daco/daco\\_1.html](http://www.maxfor.com/lin_daco/daco_1.html). [Consultato il 24/11/2019]
- [194] "Diathonite Evolution"[Online]. Disponibile su: <https://www.dia-sen.com/sp/it/p/diathonite-evolution.3sp>. [Consultato il 24/11/2019]
- [195] "Diathonite Cork Render"[Online]. Disponibile su: <https://www.dia-sen.com/sp/it/p/diathonite-cork-render.3sp>. [Consultato il 24/11/2019]

- [196] "Diathonite Deumix+"[Online]. Disponibile su: <https://www.dia-sen.com/sp/it/p/diathonite-deumix-plus.3sp>. [Consultato il 24/11/2019]
- [197] "Diathonite Thermactive.037"[Online]. Disponibile su: <https://www.dia-sen.com/sp/it/p/diathonite-thermactive-037.3sp>. [Consultato il 25/11/2019]
- [198] "SANAWARME|azichem"[Online]. Disponibile su: <https://www.azichem.it/prodotti/sanawarme/169/>. [Consultato il 25/11/2019]
- [199] "TERMOARENINO"[Online]. Disponibile su: [https://www.hdsystem.it/it/prodotti/isolamento-termico-acustico/termoarenino\\_405686\\_idp/](https://www.hdsystem.it/it/prodotti/isolamento-termico-acustico/termoarenino_405686_idp/). [Consultato il 25/11/2019]
- [200] "TF 2000"[Online]. Disponibile su: <http://www.chiraema.it/prodotto/tf-2000/>. [Consultato il 25/11/2019]
- [201] "INTONACO TERMOISOLANTE THERMOCALCE"[Online]. Disponibile su: <https://www.vimark.com/it/prodotti/intonaco-termoisolante-thermocalce/>. [Consultato il 25/11/2019]
- [202] "Asciugo TD"[Online]. Disponibile su: <http://www.chiraema.it/prodotto/asciugo-drywall/>. [Consultato il 25/11/2019]
- [203] "INTOIGNI FER"[Online]. Disponibile su: [https://irp-cdn.multiscreen-site.com/21988380/files/uploaded/Scheda%20tecnica\\_INTOIGNI%20FER\\_UjtBZSuCZzNnXenSovQj.pdf](https://irp-cdn.multiscreen-site.com/21988380/files/uploaded/Scheda%20tecnica_INTOIGNI%20FER_UjtBZSuCZzNnXenSovQj.pdf). [Consultato il 25/11/2019]
- [204] "INTOIGNI FER C"[Online]. Disponibile su: [https://irp-cdn.multiscreen-site.com/21988380/files/uploaded/Scheda%20tecnica\\_INTOIGNI%20FER%20C\\_PzTPOHQTTCkBExW54kdb.pdf](https://irp-cdn.multiscreen-site.com/21988380/files/uploaded/Scheda%20tecnica_INTOIGNI%20FER%20C_PzTPOHQTTCkBExW54kdb.pdf). [Consultato il 25/11/2019]
- [205] "FIXIT 222 Aerogel Intonaco altamente isolante"[Online]. Disponibile su: <https://www.roefix.it/Prodotti/Sistemi-di-isolamento-termico/Sistemi-di-intonaci-isolanti/FIXIT-222-Aerogel-Intonaco-altamente-isolante>. [Consultato il 25/11/2019]
- [206] "Intonaco isolante ORBITH 028| ORBITH 036"[Online]. Disponibile su: <https://www.dracholin.de/produkte/daemmputze/orbith-daemmputze/>. [Consultato il 25/11/2019]
- [207] "iQ top"[Online]. Disponibile su: <https://www.remmers.com/de/e-liste/iq-top/p/000000000000022820>. [Consultato il 25/11/2019]
- [208] "Schimmel-Sanierputz"[Online]. Disponibile su: <https://www.remmers.it/it/ediliziapavimentazioni/schimmel-sanierputz/p/000000000000105020>. [Consultato il 25/11/2019]

- [209] "DRACHOLIN, Lieferprogramm" [Online]. Disponibile su: [http://www.dracholin.com/wp-content/uploads/DRACHOLIN\\_Lieferprogramm\\_2019.pdf](http://www.dracholin.com/wp-content/uploads/DRACHOLIN_Lieferprogramm_2019.pdf). [Consultato il 25/11/2019]
- [210] R.Romano, "Smart Skin Envelope. Integrazione architettonica di tecnologie dinamiche e innovative per il risparmio energetico", Firenze University Press, 2011, p.p 150-151.
- [211] J.Kosny, "PCM-Enhanced Building Components. An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures", Springer, 2015, p.p 239-240
- [212] M.Casini, "Smart Buildings. Advanced Materials and Nanotechnology to improve Energy-Efficiency and Environmental Performance", Woodhead Publishing 69, 2016, p.p 201.
- [213] F.D'Alessandro, S. Schiavoni, F. Bianchi, F. Asdrubali, "Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016
- [214] R.Basili, "UTEE. Unità tecnica efficienza energetica. Il quadro normativo nazionale per l'efficienza energetica degli edifici", Autitorio regionale ERF, Giugno 2011, Ancona
- [215] A.Capozzoli, V.Corrado, A.Gorrino, Paola Soma, "Atlante nazionale dei ponti termici. Conforme alle norme UNI EN ISO 14683 e UNI EN ISO 10211", Edizioni EDI-CLIMA, 2011
- [216] G.Grosso, "Analisi numerico sperimentale di rasature isolanti a base aerogel", Politecnico di Torino, Master thesis in Architecture, 2018
- [217] V.Cristino, "L'isola di calore urbano della Città metropolitana di Torino: strategie per una progettazione urbana sostenibile", Politecnico di Torino, Master thesis in Architecture, 2017
- [218] "Calcolo del prezzo di un kWh termico domestico" [Online] Disponibile su: <http://www.consulente-energia.com/sm-quanto-costa-kwh-termico-prodotto-con-gas-metano-prezzo-kwh-termico-con-gasolio-pellet-pompa-di-calore-kwh-industriali-domestici.html>. [Consultato il 14/01/2020]
- [219] "Prezzario regione Piemonte 2019.Opere edili – sezione 1" [Online] Disponibile su: <http://www.sistemapiemonte.it/eXoRisorse/dwd/servizi/OperePubbliche/prezzario/2019/pdf/sez01.pdf>. [Consultato il 14/01/2020]
- [220] "WUFI® - Home" [Online]. Disponibile su: <https://wufi.de/en/>. [Consultato il 14/01/2020]

- [221] "WUFIplus/passive"[Online].Disponibile su: <http://www.wufi.it/content/aktuell/>. [Consultato il 14/01/2020]
- [222] V.Cascione, "Valutazione igrotermica di soluzioni tecniche d'isolamento dell'involucro edilizio per il recupero energetico in Italia per mezzo di simulazioni dinamiche", Politecnico di Bari, Tesi di Laurea Magistrale a ciclo unico in Ingegneria edile-Architettura, 2016
- [223] UNI TS 11300 parte 1:2014," Prestazione energetica degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale", p.p 19-20
- [224] ISO 12570:2000," Hygrothermal performance of building materials and product – Determination of moisture content by drying at elevated temperature"
- [225] ASHRAE 160-2016. Criteria for Moisture Control design Analysis in Buildings

Appendice 1: Tabella dei termointonaci a base di LWA presenti nella letteratura scientifica del settore

| Tabella 49:malte e calcestruzzi trovati nella letteratura scientifica del settore |      |      |    |                                    |              |                            |                  |                      |                             |          |                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------|------|----|------------------------------------|--------------|----------------------------|------------------|----------------------|-----------------------------|----------|----------------------|
| Nota                                                                              | Int. | All. | Cl | Legante                            | Aggregato    | Altre aggiunte             | $\lambda$        | $\rho$               | R <sub>compres-</sub> sione | Porosità | Assorbimento d'acqua |
|                                                                                   |      |      |    |                                    |              |                            | [WmK]            | [kg/m <sup>3</sup> ] | [MPa]                       | [%]      | [%]                  |
| LWA artificiali                                                                   |      |      |    |                                    |              |                            |                  |                      |                             |          |                      |
| [17]                                                                              | x    |      |    | Gesso                              | EPS (80%)    | -                          | 0.055            | 527                  | 0.82                        | 70.8     | 30.19                |
|                                                                                   | x    |      |    | Gesso                              | EPS (60%)    | -                          | 0.115            | 741                  | 1.50                        | 49.63    | 35.44                |
|                                                                                   | x    |      |    | Gesso                              | EPS (40%)    | -                          | 0.190            | 948                  | 2.10                        | 33.18    | 42.86                |
|                                                                                   | x    |      |    | Gesso                              | EPS (20%)    | -                          | 0.260            | 1088                 | 3.29                        | 20.02    | 44.32                |
|                                                                                   | x    |      |    | Gesso                              | EPS (80%)    | Resina di Tragacanth(0.5%) | 0.053            | 501                  | 0.60                        | 70.80    | 31.79                |
|                                                                                   | x    |      |    | Gesso                              | EPS (60%)    | Resina di Tragacanth(0.5%) | 0.106            | 675                  | 0.84                        | 53.85    | 39.06                |
|                                                                                   | x    |      |    | Gesso                              | EPS (40%)    | Resina di Tragacanth(0.5%) | 0.170            | 884                  | 1.48                        | 38.80    | 44.14                |
|                                                                                   | x    |      |    | Gesso                              | EPS (20%)    | Resina di Tragacanth(0.5%) | 0.230            | 1028                 | 2.68                        | 26.77    | 45.61                |
|                                                                                   | x    |      |    | Gesso                              | EPS (80%)    | Resina di Tragacanth(1%)   | 0.049            | 485                  | 0.49                        | 74.35    | 34.56                |
|                                                                                   | x    |      |    | Gesso                              | EPS (60%)    | Resina di Tragacanth(1%)   | 0.098            | 638                  | 0.66                        | 55.84    | 41.75                |
|                                                                                   | x    |      |    | Gesso                              | EPS (40%)    | Resina di Tragacanth(1%)   | 0.160            | 821                  | 1.07                        | 41.46    | 46.37                |
|                                                                                   | x    |      |    | Gesso                              | EPS (20%)    | Resina di Tragacanth(1%)   | 0.201            | 945                  | 2.05                        | 29.96    | 47.97                |
|                                                                                   | x    |      |    | Gesso                              | EPS (80%)    | Resina di Tragacanth(1.5%) | 0.047            | 451                  | 0.35                        | 76.38    | 36.74                |
|                                                                                   | x    |      |    | Gesso                              | EPS (60%)    | Resina di Tragacanth(1.5%) | 0.088            | 603                  | 0.51                        | 59.40    | 45.89                |
|                                                                                   | x    |      |    | Gesso                              | EPS (40%)    | Resina di Tragacanth(1.5%) | 0.146            | 768                  | 0.78                        | 46.19    | 49.41                |
|                                                                                   | x    |      |    | Gesso                              | EPS (20%)    | Resina di Tragacanth(1.5%) | 0.190            | 903                  | 1.2                         | 35.64    | 50                   |
| [18]                                                                              | x    |      |    | Cemento – calce idraulica naturale | EPS          | additivi                   | 0.087<br>(a 25°) | 278                  | -                           | -        | -                    |
| [94]                                                                              |      |      | x  | Cemento                            | Eps (80%)    | -                          | 0.061            | 648                  | 1.82                        | -        | -                    |
|                                                                                   |      |      | x  | Cemento                            | Eps (20%)    | -                          | 0.390            | 1567                 | 16.87                       | -        | -                    |
|                                                                                   |      |      | x  | Cemento                            | Eps (80%)    | Resina di Tragacanth(1%)   | 0.050            | 536                  | 0.89                        | -        | -                    |
|                                                                                   |      |      | x  | Cemento                            | Eps (20%)    | Resina di Tragacanth(1%)   | 0.320            | 1232                 | 10.85                       | -        | -                    |
| [98]                                                                              |      | x    |    | Gesso+calce aerea                  | Eps 3mm(20%) | -                          | 0.48             | 1030                 | 4.98                        | -        | -                    |
|                                                                                   |      | x    |    | Gesso+calce aerea                  | Eps 3mm(30%) | -                          | 0.45             | 959                  | 4.50                        | -        | -                    |



|      |  |   |   |                   |                                             |   |       |      |      |   |      |
|------|--|---|---|-------------------|---------------------------------------------|---|-------|------|------|---|------|
|      |  | x |   | Gesso+calce aerea | Eps 3mm(40%)                                | - | 0.4   | 797  | 4.00 | - | -    |
|      |  | x |   | Gesso+calce aerea | Eps 3mm(50%)                                | - | 0.28  | 671  | 3.60 | - | -    |
|      |  | x |   | Gesso+calce aerea | Eps 4mm(20%)                                | - | 0.44  | 1017 | 4.00 | - | -    |
|      |  | x |   | Gesso+calce aerea | Eps 4mm(30%)                                | - | 0.41  | 924  | 3.98 | - | -    |
|      |  | x |   | Gesso+calce aerea | Eps 4mm(40%)                                | - | 0.36  | 763  | 3.20 | - | -    |
|      |  | x |   | Gesso+calce aerea | Eps 4mm(50%)                                | - | 0.21  | 679  | 2.98 | - | -    |
|      |  | x |   | Gesso+calce aerea | Eps 7mm(20%)                                | - | 0.38  | 932  | 3.80 | - | -    |
|      |  | x |   | Gesso+calce aerea | Eps 7mm(30%)                                | - | 0.36  | 832  | 3.20 | - | -    |
|      |  | x |   | Gesso+calce aerea | Eps 7mm(40%)                                | - | 0.3   | 741  | 2.20 | - | -    |
|      |  | x |   | Gesso+calce aerea | Eps 7mm(50%)                                | - | 0.198 | 613  | 1.98 | - | -    |
| [99] |  |   | x | Cemento           | Eps riciclato (20%)                         | - | 0.390 | -    | 22.5 | - | 24   |
|      |  |   | x | Cemento           | Eps riciclato (40%)                         | - | 0.250 | -    | 21   | - | 23   |
|      |  |   | x | Cemento           | Eps riciclato (60%)                         | - | 0.135 | -    | 18   | - | 21   |
|      |  |   | x | Cemento           | Eps riciclato (80%)                         | - | 0.071 | -    | 17   | - | 18   |
|      |  |   | x | Cemento           | Eps riciclato (20%)+polvere di marmo (0.5%) | - | 0.424 | -    | 15   | - | 23   |
|      |  |   | x | Cemento           | Eps riciclato (40%)+polvere di marmo (0.5%) | - | 0.290 | -    | 14.9 | - | 20   |
|      |  |   | x | Cemento           | Eps riciclato (60%)+polvere di marmo (0.5%) | - | 0.184 | -    | 12.5 | - | 18   |
|      |  |   | x | Cemento           | Eps riciclato (80%)+polvere di marmo (0.5%) | - | 0.083 | -    | 11   | - | 16   |
|      |  |   | x | Cemento           | Eps riciclato (20%)+polvere di marmo (1%)   | - | 0.441 | -    | 8    | - | 19   |
|      |  |   | x | Cemento           | Eps riciclato (40%)+polvere di marmo (1%)   | - | 0.333 | -    | 6.5  | - | 17   |
|      |  |   | x | Cemento           | Eps riciclato (60%)+polvere di marmo (1%)   | - | 0.213 | -    | 5    | - | 16   |
|      |  |   | x | Cemento           | Eps riciclato (80%)+polvere di marmo (1%)   | - | 0.094 | -    | 4.8  | - | 14.8 |
|      |  |   | x | Cemento           | Eps riciclato (20%)+polvere di marmo (1.5%) | - | 0.462 | -    | 4.6  | - | 16.8 |

|      |   |   |   |            |                                                   |                                                                 |                              |      |                                                                       |       |      |
|------|---|---|---|------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------|-------|------|
|      |   |   | x | Cemento    | Eps riciclato (40%)+polvere di marmo (1.5%)       | -                                                               | 0.360                        | -    | 2                                                                     | -     | 16   |
|      |   |   | x | Cemento    | Eps riciclato (60%)+polvere di marmo (1.5%)       | -                                                               | 0.232                        | -    | -                                                                     | -     | 14.7 |
|      |   |   | x | Cemento    | Eps riciclato (80%)+polvere di marmo (1.5%)       | -                                                               | 0.09                         | -    | -                                                                     | -     | 13   |
| [22] | x |   |   | Inorganico | PUR riciclato                                     | Fibre -frammenti di PE rimasti sul PUR nella triturazione       | 0.06                         | 350  | 1                                                                     | 65-70 |      |
|      |   |   | x | Inorganico | PUR riciclato                                     | Fibre -frammenti di PE rimasti sul PUR nella triturazione       | 0.1                          | 400  | 0.6<br>(R <sub>Cmin</sub> )                                           | -     | -    |
|      |   |   | x | Inorganico | PUR riciclato                                     | Fibre -frammenti di PE rimasti sul PUR nella triturazione       | 0.12                         | 600  | 0.9<br>(R <sub>Cmin</sub> )                                           | -     | -    |
|      |   |   | x | Inorganico | PUR riciclato                                     | Fibre -frammenti di PE rimasti sul PUR nella triturazione       | 0.15 -0.18                   | 800  | 1.5-1.9<br>(R <sub>Cmin</sub> )                                       | -     | -    |
|      |   |   | x | Inorganico | PUR riciclato                                     | Fibre -frammenti di PE rimasti sul PUR nella triturazione       | 0.18-0.2                     | 1000 | 3.5-5.1<br>(R <sub>Cmin</sub> )                                       | -     | -    |
| [96] |   | x |   | Cemento    | Pur riciclato                                     | Additivi superfluidificanti e aeranti - polvere di calce idrata | 0.268                        | 1133 | 5.5                                                                   | -     | -    |
|      |   | x |   | Cemento    | Pur riciclato-Vetroresina(20% della calce idrata) | Additivi superfluidificanti e aeranti – polvere di calce idrata | 0.217                        | 1103 | 7                                                                     | -     | -    |
| [24] |   |   | x | Cemento    | PET riciclato 30%                                 | Additivo superfluidificante 2%                                  | 0.612                        | 1930 | 25.3<br>(R <sub>C28giorni</sub> )                                     | -     | -    |
|      |   |   | x | Cemento    | PET riciclato 40%                                 | Additivo superfluidificante 5%                                  | 0.572                        | 1770 | 19.7<br>(R <sub>C28giorni</sub> )                                     | -     | -    |
|      |   |   | x | Cemento    | PET riciclato 50%                                 | Additivo superfluidificante 6%                                  | 0.534                        | 1710 | 16.6<br>(R <sub>C28giorni</sub> )                                     | -     | -    |
|      |   |   | x | Cemento    | PET riciclato 60%                                 | Additivo superfluidificante 7.5%                                | 0.392                        | 1530 | 9.5<br>(R <sub>C28giorni</sub> )                                      | -     | -    |
| [97] |   |   | x | Cemento    | PUR riciclato 17.3%                               | -                                                               | 0.58<br>(Condizioni a secco) | 1583 | 10.4<br>(in condizioni<br>sature di acqua<br>R <sub>C28giorni</sub> ) | -     | -    |
|      |   |   | x | Cemento    | PUR riciclato 28.2%                               | -                                                               | 0.31                         | 1261 | 3.2                                                                   | -     | -    |

|       |   |   |         |                                               |                                                      | (Condizioni a secco)         |      | (in condizioni<br>sature di acqua<br>R <sub>c28giorni</sub> )        |    |      |
|-------|---|---|---------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------|------|----------------------------------------------------------------------|----|------|
|       |   | x | Cemento | PUR riciclato 13.1%                           | Filler di calce                                      | 0.67<br>(Condizioni a secco) | 1679 | 3.4<br>(in condizioni<br>sature di acqua<br>R <sub>c28giorni</sub> ) | -  | -    |
|       |   | x | Cemento | PUR riciclato 33.7%                           | Filler di calce                                      | 0.22<br>(Condizioni a secco) | 1100 | 1.4<br>(in condizioni<br>sature di acqua<br>R <sub>c28giorni</sub> ) | -  | -    |
| [100] | x |   | Cemento | PU riciclato da suole 10%                     | -                                                    | 0.648                        | 1895 | 27<br>(R <sub>c28giorni</sub> )                                      | -  | -    |
|       | x |   | Cemento | PU riciclato da suole 30%                     | -                                                    | 0.598                        | 1621 | 17<br>(R <sub>c28giorni</sub> )                                      | -  | -    |
|       | x |   | Cemento | PU riciclato da suole 10%                     | Filler di calce 20% - additivo superfluidificante 1% | 0.717                        | 2090 | 22<br>(R <sub>c28giorni</sub> )                                      | -  | -    |
| [25]  | x |   | Cemento | Gomma fine 10% riciclata da pneumatici        | -                                                    | 0.593                        | 1669 | -                                                                    | -  | 7.6  |
|       | x |   | Cemento | Gomma fine 20% riciclata da pneumatici        | -                                                    | 0.578                        | 1440 | -                                                                    | -  | 9.6  |
|       | x |   | Cemento | Gomma fine 30% riciclata da pneumatici        | -                                                    | 0.566                        | 1305 | -                                                                    | -  | 11.5 |
|       | x |   | Cemento | Gomma fine 40% riciclata da pneumatici        | -                                                    | 0.538                        | 1106 | -                                                                    | -  | 16.7 |
|       | x |   | Cemento | Gomma grossolana 10% riciclata da pneumatici  | -                                                    | 0.558                        | 1756 | -                                                                    | -  | 6.75 |
|       | x |   | Cemento | Gomma grossolana 20% riciclata da pneumatici  | -                                                    | 0.514                        | 1562 | -                                                                    | -  | 7.5  |
|       | x |   | Cemento | Gomma grossolana 30% riciclata da pneumatici  | -                                                    | 0.505                        | 1430 | -                                                                    | -  | 9.4  |
|       | x |   | Cemento | Gomma grossolana 40% riciclata da pneumatici  | -                                                    | 0.492                        | 1269 | -                                                                    | -  | 11   |
|       | x |   | Cemento | Gomma gross.+fin. 10% riciclata da pneumatici | -                                                    | 0.563                        | 1716 | -                                                                    | -  | 7.7  |
|       | x |   | Cemento | Gomma gross.+fine 20% riciclata da pneumatici | -                                                    | 0.544                        | 1497 | -                                                                    | -  | 9.1  |
|       | x |   | Cemento | Gomma gross.+fin. 30% riciclata da pneumatici | -                                                    | 0.523                        | 1381 | -                                                                    | -  | 9.5  |
|       | x |   | Cemento | Gomma grossolana 40% riciclata da pneumatici  | -                                                    | 0.514                        | 1238 | -                                                                    | -  | 11.8 |
| [105] |   | x | Cemento | HDPE 10%                                      | -                                                    | 0.85                         | -    | -                                                                    | 24 | -    |
|       |   | x | Cemento | LDPE 10%                                      | -                                                    | 0.81                         | -    | -                                                                    | 22 | -    |
|       |   | x | Cemento | PP 10%                                        | -                                                    | 0.82                         | -    | -                                                                    | 21 | -    |
|       |   | x | Cemento | HDPE 20%                                      | -                                                    | 0.79                         | -    | -                                                                    | 25 | -    |
|       |   | x | Cemento | LDPE 20%                                      | -                                                    | 0.81                         | -    | -                                                                    | 24 | -    |
|       |   | x | Cemento | PP 20%                                        | -                                                    | 0.85                         | -    | -                                                                    | 23 | -    |

|              |                                                     |      |     |                                    |                         |                                    |                                                         |                      |                                 |          |                              |
|--------------|-----------------------------------------------------|------|-----|------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------|----------|------------------------------|
|              |                                                     |      | x   | Cemento                            | HDPE 30%                | -                                  | 0.78                                                    | -                    | -                               | 29       | -                            |
|              |                                                     |      | x   | Cemento                            | LDPE 30%                | -                                  | 0.78                                                    | -                    | -                               | 22       | -                            |
|              |                                                     |      | x   | Cemento                            | PP 30%                  | -                                  | 0.81                                                    | -                    | -                               | 22       | -                            |
| [106]        | Materiale composito cemento + gomma riciclata (30%) |      |     |                                    |                         |                                    | 0.625                                                   | 1473                 | 23.3                            | -        | -                            |
|              | Materiale composito cemento + gomma riciclata (40%) |      |     |                                    |                         |                                    | 0.516                                                   | 1300                 | 16                              | -        | -                            |
|              | Materiale composito cemento + gomma riciclata (50%) |      |     |                                    |                         |                                    | 0.470                                                   | 1150                 | 10.5                            | -        | -                            |
| LWA minerali |                                                     |      |     |                                    |                         |                                    |                                                         |                      |                                 |          |                              |
| Nota         | Int.                                                | All. | Cls | Legante                            | Aggregato               | Altre aggiunte                     | $\lambda$                                               | $\rho$               | R <sub>compres-<br/>sione</sub> | Porosità | Assorbimento d’acqua         |
|              |                                                     |      |     |                                    |                         |                                    | [WmK]                                                   | [kg/m <sup>3</sup> ] | [MPa]                           | [%]      | [%]                          |
| [102]        |                                                     | x    |     | Cemento- Calce                     | Argilla espansa         | -                                  | 0.231 <sub>(dry)</sub><br>0.321 <sub>(umidità12%)</sub> | 2380                 | 2.9                             | 57.98    | 25.77 <sub>(14 giorni)</sub> |
|              |                                                     | x    |     | Cemento- Calce                     | Argilla espansa         | idrorepellente                     | 0.223 <sub>(dry)</sub><br>0.303 <sub>(umidità12%)</sub> | 2360                 | 4                               | 57.63    | 26.52 <sub>(14 giorni)</sub> |
| [27]         | x                                                   |      |     | Cemento                            | Argilla espansa         | -                                  | 0.27                                                    | -                    | -                               | -        | -                            |
| [108]        |                                                     |      | x   | Cemento                            | Argilla espansa 5%      | -                                  | 0.418                                                   | 1472                 | 9.88                            | -        | -                            |
|              |                                                     |      | x   | Cemento                            | Argilla espansa 10%     | -                                  | 0.368                                                   | 1217                 | 7.72                            | -        | -                            |
|              |                                                     |      | x   | Cemento                            | Argilla espansa 20%     | -                                  | 0.332                                                   | 1139                 | 6.16                            | -        | -                            |
|              |                                                     |      | x   | Cemento                            | Argilla espansa 5%      | Resina di Tragacanth(1%)           | 0.302                                                   | 1183                 | 5.46                            | -        | -                            |
|              |                                                     |      | x   | Cemento                            | Argilla espansa 10%     | Resina di Tragacanth(1%)           | 0.263                                                   | 1056                 | 3.97                            | -        | -                            |
|              |                                                     |      | x   | Cemento                            | Argilla espansa 20%     | Resina di Tragacanth(1%)           | 0.215                                                   | 867                  | 1.48                            | -        | -                            |
| [27]         | x                                                   |      |     | Cemento                            | Perlite                 | -                                  | 0.22                                                    | -                    | -                               | -        | -                            |
|              | x                                                   |      |     | Gesso                              | Perlite                 | -                                  | 0.16                                                    | -                    | -                               | -        | -                            |
| [18]         | x                                                   |      |     | Cemento - calce idraulica naturale | Perlite espansa         | additivi                           | 0.147<br>(a 25°)                                        | 361                  | -                               | -        | -                            |
| [27]         | x                                                   |      |     | Cemento                            | Vermiculite             | -                                  | 0.25                                                    | -                    | -                               | -        | -                            |
| [38]         |                                                     | x    |     | Cemento                            | Pietra Pomice (mix MP1) | -                                  | 0.37                                                    | -                    | 3.99                            | -        | -                            |
|              |                                                     | x    |     | Cemento                            | Pietra Pomice (mix MP2) | -                                  | 0.35                                                    | -                    | 2.55                            | -        | -                            |
|              |                                                     | x    |     | Cemento                            | Pietra Pomice (mix MP3) | -                                  | 0.29                                                    | -                    | 0.46                            | -        | -                            |
| [40]         | x                                                   |      |     | Gesso                              | Diatomite (10%)         | -                                  | 0.464                                                   | 967.7                | 1.4                             | 43.1     | 43.8                         |
|              | x                                                   |      |     | Gesso                              | Diatomite (10%)         | Fibre di polipropilene (0.5%)      | 0.450                                                   | 958.9                | 1.6                             | 44.6     | 44.8                         |
|              | x                                                   |      |     | Gesso                              | Diatomite (10%)         | Fibre di polipropilene (1%)        | 0.455                                                   | 947.9                | 1.8                             | 45.8     | 45.2                         |
|              | x                                                   |      |     | Gesso                              | Diatomite (20%)         | -                                  | 0.390                                                   | 920.4                | 1.6                             | 47.4     | 50.4                         |
|              | x                                                   |      |     | Gesso                              | Diatomite (20%)         | Fibre di polipropilene (0.5%)      | 0.387                                                   | 901.4                | 1.9                             | 46.9     | 51.3                         |
|              | x                                                   |      |     | Gesso                              | Diatomite (20%)         | Fibre di polipropilene (1%)        | 0.384                                                   | 881.5                | 2.3                             | 47.8     | 52.1                         |
| [109]        |                                                     |      | x   | Cemento                            | Vetro espanso riciclato | Polvere di calce –additivi chimici | 0.163                                                   | 685                  | 5.8                             | -        | 30                           |

|              |      |      |     | (mix GG300 senza sabbia)         | (mix GG300 senza sabbia)                               |                                    |           |                      |                             |          |                      |
|--------------|------|------|-----|----------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------|----------------------|-----------------------------|----------|----------------------|
|              |      |      | x   | Cemento (mix GG500 senza sabbia) | Vetro espanso riciclato (mix GG500 senza sabbia)       | Polvere di calce –additivi chimici | 0.140     | 558                  | 4                           | -        | 33                   |
|              |      |      | x   | Cemento (mix S100 con sabbia)    | Vetro espanso riciclato (mix S100 con sabbia)          | Polvere di calce –additivi chimici | 0.138     | 523                  | 3.2                         | -        | 44                   |
|              |      |      | x   | Cemento (mix S300 con sabbia)    | Vetro espanso riciclato (mix S300 con sabbia)          | Polvere di calce –additivi chimici | 0.177     | 699                  | 4.5                         | -        | 30                   |
| LWA vegetali |      |      |     |                                  |                                                        |                                    |           |                      |                             |          |                      |
| Nota         | Int. | All. | Cl. | Legante                          | Aggregato                                              | Altre aggiunte                     | $\lambda$ | $\rho$               | R <sub>compres-</sub> sione | Porosità | Assorbimento d'acqua |
|              |      |      |     |                                  |                                                        |                                    | [WmK]     | [kg/m <sup>3</sup> ] | [MPa]                       | [%]      | [%]                  |
| [41]         |      | x    |     | Cemento                          | Segatura (5%)                                          | Ceneri volanti e calce             | 0.625     | -                    | 11                          | -        | -                    |
| [42]         | x    |      |     | Cemento – calce idraulica        | Granuli di Sughero R1 (40%)                            | -                                  | 0.44      | 1238                 | -                           | -        | -                    |
|              | x    |      |     | Cemento – calce idraulica        | Granuli di Sughero R2 (40%)                            | -                                  | 0.357     | 1199                 | -                           | -        | -                    |
|              | x    |      |     | Cemento – calce idraulica        | Granuli di Sughero R1 (40%)+polvere di sughero R3(40%) | -                                  | 0.221     | 919                  | -                           | -        | -                    |
|              | x    |      |     | Cemento – calce idraulica        | Granuli di Sughero R2 (40%)+polvere di sughero R3(40%) | -                                  | 0.198     | 846                  | -                           | -        | -                    |
|              | x    |      |     | Cemento – calce idraulica        | Granuli di Sughero R1 (30%)+polvere di sughero R3(70%) | -                                  | 0.108     | 581                  | -                           | -        | -                    |
| [43]         | x    |      |     | Gesso                            | Fibre di palma 2%                                      | -                                  | 0.304     | 976                  | -                           | -        | -                    |
|              | x    |      |     | Gesso                            | Fibre di palma 5%                                      | -                                  | 0.252     | 895                  | -                           | -        | -                    |
|              | x    |      |     | Gesso                            | Fibre di palma 8%                                      | -                                  | 0.237     | 857                  | -                           | -        | -                    |
|              | x    |      |     | Gesso                            | Fibre di palma 10%                                     | -                                  | 0.232     | 825                  | -                           | -        | -                    |
| [44]         |      | x    |     | Cemento                          | Fibre di palma 3mm (5%)                                | -                                  | 0.39      | 1476                 | 2.75                        | -        | 5                    |
|              |      | x    |     | Cemento                          | Fibre di palma 3mm(15%)                                | -                                  | 0.14      | 984                  | 1.44                        | -        | 15                   |
|              |      | x    |     | Cemento                          | Fibre di palma 3mm (30%)                               | -                                  | 0.1       | 722                  | 0                           | -        | 63                   |
|              |      | x    |     | Cemento                          | Fibre di palma 6mm (5%)                                | -                                  | 0.63      | 1427                 | 2.82                        | -        | 9                    |
|              |      | x    |     | Cemento                          | Fibre di palma 6mm(15%)                                | -                                  | 0.22      | 1254                 | 2.67                        | -        | 21                   |
|              |      | x    |     | Cemento                          | Fibre di palma 6mm (30%)                               | -                                  | 0.07      | 790                  | 0                           | -        | 48                   |
|              |      | x    |     | Cemento                          | Fibre di palma 3+6mm (5%)                              | -                                  | 0.39      | 1471                 | 5.36                        | -        | 5                    |
|              |      | x    |     | Cemento                          | Fibre di palma 3+6mm(15%)                              | -                                  | 0.14      | 1293                 | 2.64                        | -        | 12                   |
|              |      | x    |     | Cemento                          | Fibre di palma 3+6mm (30%)                             | -                                  | 0.08      | 786                  | 0                           | -        | 58                   |
|              |      |      |     |                                  |                                                        |                                    |           |                      |                             |          |                      |
| [45]         | x    |      |     | Gesso                            | Fibre da potatura di olive (4%)                        | Argilla (38%)                      | 0.593     | 2721                 | -                           | 38       | -                    |
|              | x    |      |     | Gesso                            | Fibre da potatura di olive(6%)                         | Argilla (38%)                      | 0.532     | 2683                 | -                           | 39       | -                    |
|              | x    |      |     | Gesso                            | Fibre da potatura di olive(8%)                         | Argilla (37%)                      | 0.458     | 2724                 | -                           | 42       | -                    |
|              | x    |      |     | Gesso                            | Fibre da potatura di olive(12%)                        | Argilla (35%)                      | 0.428     | 2601                 | -                           | 44       | -                    |
| [103]        |      | x    |     | Cemento                          | Giunco Marittimo                                       | -                                  | 0.445     | 1540                 | -                           | 39       | -                    |

|          |      |      |     |                                                |                                         |                                                                                   |                                      |                      |                                 |          |                      |
|----------|------|------|-----|------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|---------------------------------|----------|----------------------|
|          |      | x    |     | Cemento                                        | (2%)<br>Giunco Marittimo (5%)           | -                                                                                 | 0.236                                | 1302                 | -                               | 43       | -                    |
|          |      | x    |     | Cemento                                        | Giunco Marittimo (7%)                   | -                                                                                 | 0.197                                | 1236                 | -                               | 47.77    | -                    |
|          |      | x    |     | Cemento                                        | Giunco Marittimo (10%)                  | -                                                                                 | 0.171                                | 1082                 | -                               | 52.22    | -                    |
| [17]     | x    |      |     | Gesso                                          | Paglia                                  | -                                                                                 | 0.086                                | 456                  | 0.071                           | -        | -                    |
| [96]     |      | x    |     | Cemento                                        | Legno riciclato                         | Polvere di calce – additivi superfluidificanti e aeranti                          | 0.227                                | 1055                 | 6<br>(28 giorni)                | -        | -                    |
|          |      | x    |     | Cemento                                        | Legno riciclato                         | Polvere di calce – additivi superfluidificanti e aeranti –resina poliestere (20%) | 0.174                                | 1025                 | 6.3<br>(28 giorni)              | -        | -                    |
| PCM      |      |      |     |                                                |                                         |                                                                                   |                                      |                      |                                 |          |                      |
| Nota     | Int. | All. | ClS | Legante                                        | Aggregato                               | Altre aggiunte                                                                    | $\lambda$                            | $\rho$               | R <sub>compres-<br/>sione</sub> | Porosità | Assorbimento d’acqua |
|          |      |      |     |                                                |                                         |                                                                                   | [WmK]                                | [kg/m <sup>3</sup> ] | [MPa]                           | [%]      | [%]                  |
| [48]     | x    |      |     | Gesso                                          | PCM:Micronal DS 5008 X (10%)            | -                                                                                 | 0.34<br>(20°C)                       | -                    | -                               | -        | -                    |
|          | x    |      |     | Gesso                                          | PCM:Micronal DS 5008 X (20%)            | -                                                                                 | 0.27<br>(20°C)                       | -                    | -                               | -        | -                    |
|          | x    |      |     | Gesso                                          | PCM:Micronal DS 5008 X (30%)            | -                                                                                 | 0.23<br>(20°C)                       | -                    | -                               | -        | -                    |
| [50]     | x    |      |     | Calce idrata                                   | PCM:Micronal DS 5008 X                  | pozzolana                                                                         | 0.55                                 | 2430                 | -                               | 34.4     | -                    |
| [51]     | x    |      |     | Terra argillosa                                | PCM:Micronal DS 5040 X                  | Fibre di avena                                                                    | 0.5                                  | 1430<br>(Wet)        | 0.42                            | 40       | -                    |
|          | x    |      |     | Terra argillosa                                | PCM:Micronal DS 5040 X                  | Fibre di avena – polvere di calce idrata                                          | 0.38                                 | 1610<br>(Wet)        | 0.2                             | 36.2     | -                    |
| [110]    | x    |      |     | Gesso                                          | PCM con T <sub>fusione</sub> 26°C (14%) | Calce idraulica naturale – carbonato di calcio - additivi                         | 0.112<br>(21°C)                      | 940                  | -                               | -        | -                    |
|          | x    |      |     | Gesso                                          | PCM con T <sub>fusione</sub> 23°C (14%) | Calce idraulica naturale – carbonato di calcio - additivi                         | 0.181<br>(21°C)                      | 1302                 | -                               | -        | -                    |
| Aerogel  |      |      |     |                                                |                                         |                                                                                   |                                      |                      |                                 |          |                      |
| Nota     | Int. | All. | ClS | Legante                                        | Aggregato                               | Altre aggiunte                                                                    | $\lambda$                            | $\rho$               | R <sub>compres-<br/>sione</sub> | Porosità | Assorbimento d’acqua |
|          |      |      |     |                                                |                                         |                                                                                   | [WmK]                                | [kg/m <sup>3</sup> ] | [MPa]                           | [%]      | [%]                  |
| [70][90] | x    |      |     | Cemento                                        | Aerogel idrofobo mix A                  | -                                                                                 | 0.027                                | 200                  | -                               | -        | -                    |
|          | x    |      |     | Minerale                                       | Aerogel idrofobo mix B                  | -                                                                                 | 0.03                                 | 200                  | -                               | -        | -                    |
|          | x    |      |     | Minerale                                       | Aerogel idrofobo mix C                  | Additivi con porosità aperta (pomice) – fibre di polietilene                      | 0.025                                | 200                  | -                               | -        | -                    |
| [58]     | x    |      |     | Calce idraulica natu-<br>rale – Cemento bianco | Fixit_222                               | LWA minerali-idrossido di calcio                                                  | 0.028<br>(Dichiarata dal produttore) | 220                  | -                               | -        | -                    |



|       |   |   |   |                                           |                            |                                                                                                |                                            |         |                      |    |   |
|-------|---|---|---|-------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------|----------------------|----|---|
| [104] | x |   |   | Calce idraulica naturale – Cemento bianco | Fixit_222                  | LWA minerali-idrossido di calcio                                                               | 0.0323<br>(testata dai ricercatori a 24°C) | 241.3   | -                    | -  | - |
|       | x |   |   | Calce idraulica naturale – Cemento bianco | Fixit_222 + 15% di aerogel | LWA minerali-idrossido di calcio                                                               | 0.0276                                     | 203.8   | -                    | -  | - |
|       | x |   |   | Calce idraulica naturale – Cemento bianco | Fixit_222+25% di aerogel   | LWA minerali-idrossido di calcio                                                               | 0.0275                                     | 199.3   | -                    | -  | - |
|       | x |   |   | Calce idraulica naturale<br>"CHIRAEMA"    | aerogel 25%                | -                                                                                              | 0.115                                      | 735.6   | -                    | -  | - |
|       | x |   |   | Calce idraulica naturale<br>"CHIRAEMA"    | aerogel 50%                | -                                                                                              | 0.069                                      | 501     | -                    | -  | - |
|       | x |   |   | Calce idraulica naturale<br>"CHIRAEMA"    | aerogel 70%                | -                                                                                              | 0.031                                      | 260.7   | -                    | -  | - |
|       | x |   |   | Calce idraulica naturale "Saint Astier"   | aerogel 25%                | -                                                                                              | 0.123                                      | 735.56  | -                    | -  | - |
|       | x |   |   | Calce idraulica naturale "Saint Astier"   | aerogel 50%                | -                                                                                              | 0.069                                      | 515.3   | -                    | -  | - |
|       | x |   |   | Calce idraulica naturale "Saint Astier"   | aerogel 70%                | -                                                                                              | 0.0306                                     | 236.78  | -                    | -  | - |
| [91]  | x |   |   | Gesso                                     | Xerogel 17%                | Ritardante di presa                                                                            | 0.08                                       | -       | 0.52                 | -  | - |
|       | x |   |   | Gesso                                     | Xerogel 27%                | Ritardante di presa –additivo aerante                                                          | 0.072                                      | -       | 0.63                 | -  | - |
|       | x |   |   | Gesso                                     | Xerogel 27%                | Ritardante di presa –additivo aerante –fibre di poliammide                                     | 0.052                                      | -       | 0.67                 | -  | - |
|       | x |   |   | Gesso                                     | Xerogel 54%%               | Ritardante di presa                                                                            | 0.034                                      | -       | 0.08                 | -  | - |
| [60]  | x |   |   | Calce idraulica naturale                  | T1:Aerogel 80-90%          | -                                                                                              | 0.05-0.045                                 | 300-275 | -                    | -  | - |
|       | x |   |   | Calce idraulica naturale                  | T2:Aerogel 91-95%          | -                                                                                              | 0.021-0.019                                | 136-126 | -                    | -  | - |
|       | x |   |   | Calce idraulica naturale                  | T3:Aerogel 96-99%          | -                                                                                              | 0.016-0.014                                | 125-115 | -                    | -  | - |
| [63]  |   | x |   | Cemento                                   | Aerogel 10%                | Fumo di silice                                                                                 | 0.51                                       | 1999    | 41                   | -  | - |
|       |   | x |   | Cemento                                   | Aerogel 20%                | Fumo di silice                                                                                 | 0.46                                       | 1810    | 31                   | -  | - |
|       |   | x |   | Cemento                                   | Aerogel 30%                | Fumo di silice                                                                                 | 0.37                                       | 1690    | 24                   | -  | - |
|       |   | x |   | Cemento                                   | Aerogel 40%                | Fumo di silice                                                                                 | 0.29                                       | 1580    | 15                   | -  | - |
|       |   | x |   | Cemento                                   | Aerogel 50%                | Fumo di silice                                                                                 | 0.23                                       | 1398    | 9                    | -  | - |
|       |   | x |   | Cemento                                   | Aerogel 60%                | Fumo di silice                                                                                 | 0.152                                      | 1231    | 2.15                 | -  | - |
|       |   | x |   | Cemento                                   | Aerogel 60%                | Fumo di silice-fibre di polipropilene (0.2%)-additivo aerante (0.05%)- polvere di lattice (1%) | 0.086                                      | -       | 2.5                  | 39 | - |
| [67]  |   |   | x | Cemento                                   | Aerogel polvere 5ml        | -                                                                                              | 0.170                                      | -       | 42.89<br>(28 giorni) | 16 | - |
|       |   |   | x | Cemento                                   | Aerogel polvere 10ml       | -                                                                                              | 0.142                                      | -       | 54.33<br>(28 giorni) | 22 | - |

|           |                                                     |      |     |                                              |                                                                                      |                                                    |                                           |                      |                                 |          |                      |
|-----------|-----------------------------------------------------|------|-----|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------|---------------------------------|----------|----------------------|
|           |                                                     |      | x   | Cemento                                      | Aerogel polvere 15ml                                                                 | -                                                  | 0.086                                     | -                    | 47.03<br>(28 giorni)            | 21.6     | -                    |
|           |                                                     |      | x   | Cemento                                      | Aerogel polvere 20ml                                                                 | -                                                  | 0.076                                     | -                    | 34.77<br>(28 giorni)            | 25.6     | -                    |
| [68]      |                                                     |      | x   | Cemento                                      | Aerogel 0.5%                                                                         | -                                                  | 0.394                                     | -                    | 13.1                            | -        | 28                   |
|           |                                                     |      | x   | Cemento                                      | Aerogel 1%                                                                           | -                                                  | 0.282                                     | -                    | 8                               | -        | 31                   |
|           |                                                     |      | x   | Cemento                                      | Aerogel 2%                                                                           | -                                                  | 0.133                                     | -                    | 5.9                             | -        | 38.5                 |
|           |                                                     |      | x   | Cemento                                      | Aerogel 0.5%                                                                         | pozzolana (20%)                                    | 0.48                                      | -                    | 9                               | -        | 27.7                 |
|           |                                                     |      | x   | Cemento                                      | Aerogel 1%                                                                           | pozzolana (20%)                                    | 0.38                                      | -                    | 5.2                             | -        | 29.8                 |
|           |                                                     |      | x   | Cemento                                      | Aerogel 2%                                                                           | pozzolana (20%)                                    | 0.15                                      | -                    | 3                               | -        | 36                   |
| [78]      | x                                                   |      |     | Cemento (50%) + Ce-<br>neri volanti<br>(50%) | Aerogel (100%)                                                                       | Tensioattivi (1.2%)– cellulosa(0.075%)- resine(2%) | 0.113<br>(28 giorni) –<br>0.085 (a secco) | 718<br>(bulk)        | 1.03                            | 58.9     |                      |
| LWA misti |                                                     |      |     |                                              |                                                                                      |                                                    |                                           |                      |                                 |          |                      |
| Nota      | Int.                                                | All. | Cls | Legante                                      | Aggregato                                                                            | Altre aggiunte                                     | $\lambda$                                 | $\rho$               | R <sub>compres-<br/>sione</sub> | Porosità | Assorbimento d’acqua |
|           |                                                     |      |     |                                              |                                                                                      |                                                    | [WmK]                                     | [kg/m <sup>3</sup> ] | [MPa]                           | [%]      | [%]                  |
| [107]     | Materiale composito Cemento + argilla+ pellet (10%) |      |     |                                              |                                                                                      |                                                    | 0.22                                      | 1010                 | 2.67                            | -        | -                    |
|           | Materiale composito Cemento + argilla+ pellet (20%) |      |     |                                              |                                                                                      |                                                    | 0.16                                      | 870                  | 2.35                            | -        | -                    |
|           | Materiale composito Cemento + argilla+ pellet (30%) |      |     |                                              |                                                                                      |                                                    | 0.14                                      | 700                  | 1.35                            | -        | -                    |
| [74]      | x                                                   |      |     | Minerale                                     | Aerogel + Minerali (R1)                                                              | -                                                  | 0.120<br>(10°C)                           | 577                  | -                               | -        | -                    |
|           | x                                                   |      |     | Minerale                                     | Aerogel + Minerali (R2)                                                              | -                                                  | 0.102<br>(10°C)                           | 495                  | -                               | -        | -                    |
|           | x                                                   |      |     | Minerale+organico                            | Aerogel + Minerali (R3)                                                              | -                                                  | 0.057<br>(10°C)                           | 369                  | -                               | -        | -                    |
|           | x                                                   |      |     | Minerale+organico                            | Aerogel + Minerali (R4)                                                              | -                                                  | 0.051<br>(10°C)                           | 326                  | -                               | -        | -                    |
| [76]      | x                                                   |      |     | Grassello di Calce                           | Aerogel (50) +fibre di polipropilene<br>(0.5%)                                       | -                                                  | 0.1                                       | -                    | -                               | -        | -                    |
| [78]      | x                                                   |      |     | Cemento                                      | Aerogel (60%)- granuli di sughero<br>(20%) – argilla espansa (15%) – Perlite<br>(5%) | Tensioattivi (1.2%)– cellulosa(0.075%)- resine(2%) | 0.136<br>(28 giorni) –<br>0.097 (a secco) | 758<br>(bulk)        | 1.63                            | 56.8     | -                    |
|           | x                                                   |      |     | Cemento (50%) + Ce-<br>neri volanti (50%)    | Aerogel (60%)- granuli di sughero<br>(20%) – argilla espansa (15%) – Perlite<br>(5%) | Tensioattivi (1.2%)– cellulosa(0.075%)- resine(2%) | 0.094<br>(28 giorni) –<br>0.084 (a secco) | 652<br>(bulk)        | 0.92                            | 60.2     | -                    |
| [18]      | x                                                   |      |     | Calce idraulica natu-<br>rale                | Pannocchia di mais – perlite espansa -<br>zeolite                                    | additivi                                           | 0.103<br>(a 25°C)                         | 508                  | -                               | -        | -                    |
|           | x                                                   |      |     | Calce idraulica natu-<br>rale                | Paglia-sughero riciclato-fiocchi di cellu-<br>losa                                   | -                                                  | 0.114<br>(a 25°C)                         | 459                  | -                               | -        | -                    |
|           | x                                                   |      |     | Calce idraulica natu-<br>rale                | Zeolite-vermiculite espansa-perlite<br>espansa-pannocchia di mais                    | -                                                  | 0.100<br>(a 25°C)                         | 496                  | -                               | -        | -                    |



|                                                                                         |   |   |  |                                                              |                                               |            |                   |         |      |   |   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---|---|--|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------|-------------------|---------|------|---|---|
|                                                                                         | x |   |  | Calce idraulica naturale – Cemento – cemento solfoalluminoso | Perlite espansa – pannocchia di mais - paglia | -          | 0.086<br>(a 25°C) | 400     | -    | - | - |
| [95]                                                                                    |   | x |  | Cemento                                                      | EPS-Pietra pomice                             | Resina(1%) | 0.13              | 578-600 | 1.77 | - | - |
| Int.: malta da intonaco      All.: malta di allettamento      Cls: calcestruzzo leggero |   |   |  |                                                              |                                               |            |                   |         |      |   |   |

Appendice 2: Tabella dei termointonaci e delle termorasature presenti sul mercato (indagine on-line)

| Tabella 50: termointonaci e termorasature sul mercato (dato aggiornato rispetto al riferimento [113]) |      |      |                                 |               |       |                                   |                                                                             |           |             |            |                |               |                |               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|---------------------------------|---------------|-------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------|------------|----------------|---------------|----------------|---------------|
| Nota                                                                                                  | Int. | Ras. | Nome pro-<br>dotto              | Produttore    | Paese | Legante                           | Aggregato                                                                   | $\lambda$ | $\rho$      | $\mu$      | R <sub>c</sub> | $\varepsilon$ | R <sub>f</sub> | FP            |
|                                                                                                       |      |      |                                 |               |       |                                   |                                                                             | WmK       | kg/m³       | [-]        | MPa            |               |                |               |
| Artificiali                                                                                           |      |      |                                 |               |       |                                   |                                                                             |           |             |            |                |               |                |               |
| [114]                                                                                                 | x    |      | INTOPERL                        | MALVIN        | IT    | Leganti idraulici                 | Perle di polistirene-inerti minerali-fibre di polipropilene                 | 0.09      | 500         | $\geq 6$   | 2              | -             | -              | A 0.3         |
| [115]                                                                                                 | x    |      | INTOTHERM                       | MALVIN        | IT    | Leganti idraulici                 | Perle di polistirene-inerti minerali-fibre di polipropilene-inerti calcarei | 0.07      | 260         | 9          | 2              | -             | $\geq 0.4$     | $\geq 0.3$    |
| [116]                                                                                                 | x    |      | Isolmalto                       | Knauf         | D     | Leganti idraulici                 | Miscele di inerti con aggiunta di perle di polistirolo                      | 0.043     | 250         | $\leq 9.2$ | 1              | 4600          | $\geq 1$       | 0.25          |
| [117]                                                                                                 | x    |      | KT 48                           | FASSA BORTOLO | IT    | Cemento                           | Polistirolo espanso                                                         | 0.09      | 400         | $\leq 9$   | 1.5            | -             | -              | -             |
| [118]                                                                                                 | x    |      | TERMOPOR                        | CVR           | IT    | Leganti idraulici                 | Perle vergini di EPS                                                        | 0.062     | 350         | 5/<br>20   | 1              | -             | 0.4            | -             |
| [119]                                                                                                 | x    |      | THERMOIN-<br>TONACO             | Vimark        | IT    | Leganti idraulici                 | Perle vergini di EPS                                                        | 0.062     | 300         | 9          | 1              | -             | $\geq 0.5$     | B $\geq 0.13$ |
| [120]                                                                                                 | x    |      | Weber-<br>therm x-<br>light 042 | Weber         | F     | Calce -<br>Cemento                | Microsfere di EPS                                                           | 0.042     | 150/<br>200 | $\leq 5$   | $\geq 0.35$    | -             | -              | -             |
| [121]                                                                                                 | x    |      | ThermoEx-<br>tra                | Baumit        | A     | Cemento Portland-<br>Calce idrata | EPS                                                                         | 0.09      | 280         | 8          | $\geq 0.5$     | -             | $\geq 0.3$     | -             |
| [122]                                                                                                 | x    |      | Drywall                         | Chiraema      | IT    | Cemento grigio                    | EPS                                                                         | 0.053     | 370         | 9          | 0.4/<br>2.5    | -             | -              | -             |
| [123][124<br>]                                                                                        | x    |      | Wärme-<br>dämmputz<br>EPS       | DRACHOLIN     | D     | Leganti minerali                  | Perle di EPS                                                                | 0.062     | 220         | $\leq 15$  | 0.41           | -             | -              | B $\geq 0.08$ |
| [125]                                                                                                 | x    |      | ISOLTECO<br>LIGHT 110           | Edilteco      | IT    | Leganti minerali                  | Perle di EPS                                                                | 0.043     | 130         | 4.6        | 0.528          | -             | 0.120          | 0.1           |
| [126]                                                                                                 | x    |      | ISOLTECO<br>150                 | Edilteco      | IT    | Leganti minerali                  | Perle di EPS                                                                | 0.058     | 165         | 9          | 1.16           | -             | 0.42           | 0.1           |
| [127]                                                                                                 | x    |      | ISOLTECO<br>230                 | Edilteco      | IT    | Leganti minerali                  | Perle di EPS                                                                | 0.063     | 245         | 9          | 1.28           | -             | 0.38           | 0.1           |

|                 |      |      |                                      |                     |       |                                                         |                                                   |                                                                     |              |            |                |       |                |        |
|-----------------|------|------|--------------------------------------|---------------------|-------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------|------------|----------------|-------|----------------|--------|
| [128]           | x    |      | ISOLSAN 230                          | Edilteco            | IT    | Leganti idraulici macro-porosi (additivati con Drymur®) | Perle di EPS                                      | 0.063                                                               | 245          | 9          | 1.28           | -     | 0.38           | 0.1    |
| [129]           | x    |      | GTL 30                               | Marmoline           | GR    | Cemento Portland                                        | Granuli di EPS                                    | -                                                                   | 1250         | -          | 5              | -     | 1.5            | -      |
| [130]           | x    |      | TL 2                                 | Marmoline           | GR    | Cemento Portland                                        | Granuli di EPS                                    | 0.47                                                                | 1450         | 5/20       | 5              | -     | 1              | ≥ 0.7  |
| [131][132][133] | x    |      | WD                                   | Schwenk Putztechnik | D     | Cemento grigio                                          | Granuli Eps                                       | 0.07                                                                | 250          | ≤ 15       | 0.4            | -     | 1              | -      |
| [134]           | x    |      | TermoRon                             | Microspheres        | UA    | Cemento                                                 | Miscrosfere “Penosfera®”                          | 0.065                                                               | -            | -          | -              | -     | -              | -      |
| [135]           | x    |      | Maxit Ip 75 therm                    | maxit               | D     | Cemento- calce- gesso                                   | Perle di EPS                                      | 0.066                                                               | -            | < 15       |                | -     | ≥ 0.08         |        |
| [136]           | x    |      | HASIT 850                            | HASIT               | D     | Legante non specificato                                 | EPS                                               | 0.066                                                               | ≥240         | ≤ 10       | ≥ 0.5          | -     | -              | -      |
| [137]           | x    |      | DP-B Dämmputz B                      | Quick-mix           | D     | Leganti minerali                                        | EPS                                               | 0.07                                                                | -            | 8          | ≥ 0.4          | -     | -              | -      |
| Minerali        |      |      |                                      |                     |       |                                                         |                                                   |                                                                     |              |            |                |       |                |        |
| Nota            | Int. | Ras. | Nome prodotto                        | Produttore          | Paese | Legante                                                 | Aggregato                                         | λ                                                                   | ρ            | μ          | R <sub>c</sub> | ε     | R <sub>f</sub> | FP     |
| [138][139]      |      | x    | AFON-TERMO®                          | AFON CASA           | IT    | -                                                       | Aggregati minerali e resine                       | WmK<br>λ <sub>int</sub><br>0.000918 /<br>λ <sub>est</sub><br>0.0029 | kg/m³<br>490 | [-]<br>9.1 |                |       | MPa<br>1.08    | 0.257  |
| [140]           | x    |      | RÖFIX 888®                           | RÖFIX               | A     | Cemento- calce aerea                                    | Perlite e altri Inerti minerali non specificati   | ≤ 0.0628                                                            | -            | -          | ≥ 1            | 400   | ≤0.5           | ≥ 0.08 |
| [141]           | x    |      | RÖFIX Aero-calce IA 782® THERMO      | RÖFIX               | A     | Calce idraulica naturale – Cemento bianco               | Inerte leggero a base silicato non specificato    | 0.09                                                                |              | 15         | -              | 3500  | -              | -      |
| [142]           |      | x    | RÖFIX Aero-calce IA 784® Plus THERMO | RÖFIX               | A     | Calce idraulica naturale – Cemento bianco               | Inerte minerali non specificati                   | 0.47                                                                | 1600         | 15         | 3              | 3500  | -              | -      |
| [143]           | x    |      | RÖFIX CalceClima® Thermo             | RÖFIX               | A     | Calce idraulica naturale – Calce aerea                  | Inerte leggero a base di silicato non specificato | 0.067                                                               | -            | -          | ≥ 0.4          | 1500  | ≥ 0.4          | -      |
| [144]           | x    |      | CALEOSANA                            | azichem             | IT    | Calce idraulica naturale                                | Caolino-argilla espansa, perlite                  | <0.3                                                                | 1075         | < 10       | -              | <5000 | -              | 0.4    |

|       |   |  |                                      |                  |    |                                                                 |                                                           |        |           |          |             |      |        |           |
|-------|---|--|--------------------------------------|------------------|----|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------|-----------|----------|-------------|------|--------|-----------|
| [145] | x |  | INTOIGNI<br>PHONOA-<br>CUSTIC        | MALVIN           | IT | Calce naturale-gesso                                            | Perlite-vermiculite-inerti calcarei                       | 0.086  | 385       | 14       | ≥ 2         | -    | 1      | -         |
| [146] | x |  | Klimasan F                           | Klimasan Perlite | D  | Legante non specificato                                         | perlite                                                   | 0.077  | -         | 6        | 1.6/<br>3   | 2000 | 0.8    | -         |
|       | x |  | Klimasan I/W                         | Klimasan Perlite | D  | Legante non specificato                                         | perlite                                                   | 0.077  | -         | 6        | 1.6/<br>3   | 2000 | 0.8    | -         |
|       | x |  | Klimasan S                           | Klimasan Perlite | D  | Legante non specificato                                         | perlite                                                   | 0.077  | -         | 6        | 1.6/<br>3   | 2000 | 0.8    | -         |
| [147] | x |  | Termointo-<br>naco Later-<br>lite    | Leca             | IT | Calce idraulica naturale                                        | Vetro espanso                                             | 0.086  | 410       | 5.6      | 1.3         | -    | 0.4    | B<br>0.14 |
| [148] | x |  | Termointo-<br>naco Later-<br>lite    | Leca             | IT | Cemento                                                         | Vetro espanso                                             | 0.086  | 410       | 10       | 1.3         | -    | 0.4    | B<br>0.14 |
| [149] | x |  | MAGISTRA<br>– Intonaco<br>termico    | Tradimalt        | IT | Calce idraulica naturale                                        | Pietra pomice                                             | 0.137  | -         | -        | ≥ 0.4       | -    | -      | 0.4       |
| [150] | x |  | Maxit Ip 74<br>M therm               | maxit            | D  | Calce –<br>Cemento                                              | Aggregati e fibre minerali non specificati                | 0.065  | 700       | <<br>20  | 2.1         | -    | ≥ 0.08 | -         |
| [151] | x |  | Maxit Ip 76<br>therm                 | maxit            | D  | Cemento                                                         | Aggregati minerali leggeri non specificati                | 0.08   | 400       | 6        | 2           | -    | ≥ 0.08 | -         |
| [152] | x |  | Maxit Ip 78<br>therm                 | maxit            | D  | Calce –<br>Cemento                                              | Aggregati minerali leggeri non specificati                | 0.39   | <<br>1300 | 20       | 2.5         | -    | ≥ 0.08 | -         |
| [153] | x |  | MK8                                  | Marraccini       | IT | Cemento – altri leganti<br>idraulici                            | Perlite                                                   | 0.088  | 500       | <<br>5.4 | 2           | -    | -      | ≥ 0.1     |
| [154] | x |  | Natural<br>Calce<br>Thermo-<br>calce | Marraccini       | IT | Calce idraulica naturale<br>– Cariche pozzolaniche              | Perlite                                                   | 0.048  | 380       | <<br>5.5 | 2           | -    | -      | ><br>0.15 |
| [155] | x |  | Termo K                              | Rall K           | IT | Calce idraulica naturale<br>– filler ad azione pozzo-<br>lanica | Perlite e silice espansa                                  | 0.0757 | 390       | 5        | 0.4/<br>2.5 | -    | -      | ≥ 0.1     |
| [156] | x |  | TERMOTASS                            | TASSULLO         | IT | Leganti idraulici non<br>specificati                            | Aggregati minerali non specificati                        | 0.067  | 270       | 6        | -           | -    | -      | -         |
| [157] | x |  | Thermo-<br>fond                      | Chiraema         | IT | Leganti idraulici non<br>specificati                            | Vetro espanso                                             | 0.086  | 650       | 10       | 3.2         | -    | 0.4    | > 0.3     |
|       | x |  | Thermo<br>rinzafo                    | Chiraema         | IT | Leganti idraulici non<br>specificati                            | Vetro espanso                                             | 0.19   | 700       | <<br>15  | 1.5/5       | -    | -      | > 0.5     |
| [158] | x |  | Bio Thermo-<br>vent                  | index            | IT | Calce idraulica naturale                                        | Aggregati a base di silicato purissimo non<br>specificati | 0.08   | -         | 7        | 1.3         | -    | 0.7    | ≥ 0.39    |

|                |   |   |                        |                             |    |                                                 |                                                        |         |      |          |             |            |       |            |
|----------------|---|---|------------------------|-----------------------------|----|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------|------|----------|-------------|------------|-------|------------|
| [159]          | x |   | Thermocap              | index                       | IT | Leganti idraulici                               | Aggregati a base di silicato purissimo non specificati | 0.09    | -    | 8        | 1.5         | -          | 0.7   | > 0.2      |
| [160]          | x |   | ThermoPutz             | Baumit                      | A  | Cemento – Calce idrata                          | Perlite                                                | 0.11    | 470  | 8        | 1.5/5       | -          | >0.6  | -          |
| [161]          | x |   | TDM                    | tubag                       | D  | Calce non specificata                           | Aggregati minerali non specificati                     | 0.1     | -    | 8/<br>10 | ≥ 0.1       | -          | -     | -          |
| [162]          | x |   | HASIT 840              | HASIT                       | D  | Calce idraulica naturale                        | Aggregati minerali non specificati                     | 0.074   | 370  | 7/<br>10 | ≥ 0.4       | 1500       | ≥ 0.4 | -          |
| [163]          | x |   | VOLCALITE              | HD SYSTEM                   | IT | Calce idraulica naturale                        | Perlite e silice espansa                               | 0.066   | 350  | 4        | 0.4/<br>2.5 | -          | -     | -          |
| [164]          | x |   | DACOTERM               | MAXFOR                      | IT | Legante non specificato                         | Aggregati minerali non specificati, fibro-rinforzato   | 0.04    | -    | 3.8      | 0.87        | -          | -     | -          |
| [165]<br>[166] | x |   | SIVAPER S01            | SIVAPER                     | TR | Cemento                                         | perlite                                                | 0.1     | -    | ≤ 15     | 0.4/<br>2.5 | -          | -     | ≥ 0.05     |
|                | x |   | SIVAPER S02            | SIVAPER                     | TR | Cemento                                         | perlite                                                | 0.1/0.2 | -    | ≤ 15     | 0.4/<br>2.5 | -          | -     | ≥ 0.1      |
|                | x |   | SIVAPER S04            | SIVAPER                     | TR | Cemento                                         | perlite                                                | 0.1     | -    | ≤ 15     | 0.4/<br>2.5 | -          | -     | ≥ 0.05     |
|                | x |   | SIVAPER S10            | SIVAPER                     | TR | Cemento                                         | perlite                                                | 0.1     | -    | -        | -           | -          | -     | -          |
|                | x |   | MANTOPER               | SIVAPER                     | TR | Cemento                                         | perlite                                                | 0.2     | -    | -        | -           | -          | -     | -          |
| [167]          | x |   | CLIMA-THERM            | TCS                         | IT | Calce idraulica naturale                        | Sabbie minerali espanse                                | 0.057   | 400  | <6       | 0.4/<br>2.5 | -          | 0.58  | 0.35       |
| [168]          | x |   | CLIMA-THERM M          | TCS                         | IT | Calce idraulica naturale                        | Sabbie minerali espanse                                | 0.057   | 400  | <6       | 0.4/<br>2.5 | -          | 0.58  | 0.35       |
| [169]          | x |   | Tectoria TERMOFIX      | Kimia                       | IT | Calce idraulica naturale                        | Aggregati silicei espansi non specificati              | 0.18    | 660  | ≤ 15     | 0.4/<br>2.5 | -          | -     | -          |
| [170]          | x |   | IGNIVER                | Gyproc (SAINT-GOBAIN Group) | F  | Gesso                                           | Vermiculite                                            | 0.045   | 400  | 3.5/4    | -           | -          | -     | ><br>0.022 |
| [171]          | x |   | SIGMATIC IGNIFUGO M120 | Gyproc (SAINT-GOBAIN Group) | F  | Gesso                                           | Vermiculite - Perlite                                  | 0.14    | 900  | 6        | -           | -          | -     | -          |
| [172]          |   | x | Fixit 223              | RÖFIX                       | A  | Calce aerea – Cemento bianco – leganti organici | Sabbia calcarea pregiata – Aggregati minerali leggeri  | 0.47    | 1250 | 15/20    | ≥ 1.5       | 3000<br>VI | ≥ 1   | ≥ 0.08     |

|          |      |      |                        |                     |       |                                  |                                            |       |       |      |                |     |                |        |
|----------|------|------|------------------------|---------------------|-------|----------------------------------|--------------------------------------------|-------|-------|------|----------------|-----|----------------|--------|
| [173]    | x    |      | TRI-O-THERM M          | Schwenk Putztechnik | D     | Legante ibrido non specificato   | Aggregati puramente minerali               | 0.055 | 240   | 5    | 0.4/2.5        | 300 | -              | > 0.08 |
| [174]    |      | x    | TERMOFINITURA          | TASSULLO            | IT    | Calce idraulica naturale         | Aggregati leggeri minerali non specificati | 0.15  | 540   | 13   | -              | -   | -              | > 0.2  |
| [175]    |      | x    | Thermo-Rasa            | Chiraema            | IT    | Leganti idraulici                | Vetro espanso e fibre non specificate      | 0.27  | 960   | 12   | 3.5/7.5        | -   | -              | 1.4    |
| [176]    |      | x    | TR 1200                | Chiraema            | IT    | Calce idraulica naturale         | Vetro espanso                              | 0.28  | 970   | 12   | 1.5/5          | -   | -              | 1.2    |
| [177]    | x    |      | weber.therm 505        | Weber               | F     | Cemento con supplementi organici | Aggregati minerali non specificati         | 0.05  | 150   | 5/20 | ≥ 4            | -   | -              | -      |
| [178]    | x    |      | weber.therm 507        | Weber               | F     | Cemento con supplementi organici | Aggregati minerali non specificati         | 0.07  | 250   | ≤ 15 | ≥ 4            | -   | -              | -      |
| [179]    | x    |      | weber.therm 509        | Weber               | F     | Cemento con supplementi organici | Aggregati minerali non specificati         | 0.08  | 400   | 6    | 2              | -   | -              | -      |
| [180]    | x    |      | ORBITH 055             | DRACHOLIN           | D     | Cemento – Calce idrata           | Perlite e altri aggregati minerali         | 0.055 | 250   | ≤ 15 | 0.4/2.5        | -   | -              | -      |
| Vegetali |      |      |                        |                     |       |                                  |                                            |       |       |      |                |     |                |        |
| Nota     | Int. | Ras. | Nome prodotto          | Produttore          | Paese | Legante                          | Aggregato                                  | λ     | ρ     | μ    | R <sub>c</sub> | ε   | R <sub>f</sub> | FP     |
|          |      |      |                        |                     |       |                                  |                                            | WmK   | kg/m³ | [-]  | MPa            |     |                |        |
| [181]    | x    | x    | THERMOCOAT MANTO 400 F | THERMOCOAT          | TR    | Legante inorganico               | Aggregato naturali non specificati         | 0.055 | -     | -    | -              | -   | -              | -      |
|          | x    |      | THERMOCOAT MANTO 410   | THERMOCOAT          | TR    | Legante inorganico               | Aggregato naturali non specificati         | 0.055 | -     | 3    | 0.4/2.5        | -   | -              | 0.6    |
|          | x    |      | THERMOCOAT ROOF 510    | THERMOCOAT          | TR    | Legante inorganico               | Aggregato naturali non specificati         | 0.1   | -     | 3    | 1.5/5.0        | -   | -              | 0.6    |



|       |   |   |                                      |                             |    |                                                                           |                                                    |       |      |         |             |   |     |      |
|-------|---|---|--------------------------------------|-----------------------------|----|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------|------|---------|-------------|---|-----|------|
|       |   | x | THERMO-<br>COAT INTE-<br>RIOR 480    | THERMOCOAT                  | TR | Legante inorganico                                                        | Aggregato naturali non specificati                 | 0.1   | -    | 3       | 1.5/5.0     | - | -   | 0.6  |
| [182] | x |   | CorkShield                           | SACE                        | IT | Calce idraulica naturale                                                  | Sughero                                            | 0.063 | 330  | <6      | 1.07        | - | -   | >0.3 |
| [183] | x |   | DACOTERM<br>EVOLUTION                | DRACO                       | IT | Leganti idraulici                                                         | Aggregati di origine naturale non specifi-<br>cati | 0.052 | 400  | <6      | 1.5/5.0     | - | -   | 0.3  |
| [184] | x |   | INTOSUG-<br>HERO                     | MALVIN                      | IT | Calce idraulica naturale                                                  | Sughero                                            | 0.064 | 365  | ≤ 5     | 2           | - | -   | 0.2  |
|       | x |   | INTOBIO<br>SUGHERO                   | MALVIN                      | IT | Calce idraulica naturale<br>– bio pozzolana                               | Sughero e fibre naturali                           | 0.045 | 365  | ≤ 5     | 2.5         | - | -   | 0.2  |
| [185] | x |   | ISOCANNA                             | TCS                         | IT | Calce idraulica naturale                                                  | Canapa                                             | 0.07  | 150  | <<br>10 | -           | - | -   | -    |
| [186] | x |   | Natural Be-<br>ton® 200<br>Plus      | equilibrium                 | IT | Calce idrata dolomitica                                                   | Canapa                                             | 0.053 | 175  | 4.5     | -           | - | -   | -    |
|       | x |   | Natural Be-<br>ton® 300              | equilibrium                 | IT | Calce idrata                                                              | Canapa                                             | 0.07  | 300  | 4.5     | -           | - | -   | -    |
|       | x |   | Natural Be-<br>ton® 500              | equilibrium                 | IT | Calce idrata                                                              | Canapa                                             | 0.12  | 500  | 10/13   | -           | - | -   | -    |
| [187] | x |   | SecilTeK<br>ecoCork<br>Lime          | MIKE WYE & ASSO-<br>CIATES  | UK | Calce idraulica naturale                                                  | sughero                                            | 0.2   | <800 | <<br>15 | 0.4/<br>2.5 | - | 0.4 | 0.1  |
| [188] | x |   | Tectoria<br>TERMOA-<br>SCIUGA        | Kimia                       | IT | Calce idraulica naturale                                                  | Aggregati di origine naturale non specifi-<br>cati | 0.12  | 630  | <<br>15 | >2.9        | - | -   | 0.2  |
| [189] |   | x | CALCECA-<br>NAPA® Fini-<br>tura      | La banca della calce        | IT | Calce idrata – Calce<br>idraulica naturale                                | Canapa                                             | 0.195 | 1100 | 7.5     | -           | - | -   | -    |
| [190] | x |   | CALCECA-<br>NAPA® Ter-<br>mointonaco | La banca della calce        | IT | Calce aerea magnesiacca<br>– Calce idraulica natu-<br>rale – Roman cement | Canapa                                             | 0.085 | 400  | 5.3     | 0.8         | - | -   | 0.1  |
| [191] | x | x | Tradical®<br>HF+Tradical<br>HB       | Tradical<br>Lhoist UK Group | UK | Calce                                                                     | Canapa                                             | 0.12  | 700  | -       | -           | - | -   | -    |

| Vegetali + Minerali    |      |      |                            |            |       |                          |                                                                                                              |           |                   |       |                |               |                |        |
|------------------------|------|------|----------------------------|------------|-------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------------|-------|----------------|---------------|----------------|--------|
| Nota                   | Int. | Ras. | Nome prodotto              | Produttore | Paese | Legante                  | Aggregato                                                                                                    | $\lambda$ | $\rho$            | $\mu$ | R <sub>c</sub> | $\varepsilon$ | R <sub>f</sub> | FP     |
|                        |      |      |                            |            |       |                          |                                                                                                              | WmK       | kg/m <sup>3</sup> | [-]   | MPa            |               |                |        |
| [192]                  | x    |      | Biocalce® Termointonaco    | Kerakoll   | IT    | Calce idraulica naturale | Pomice bianca – sughero – calcare dolomitico                                                                 | 0.075     | 370               | ≤ 6   | 0.4/2.5        | -             | -              | > 0.2  |
| [193]                  | x    |      | DACOTERM evolution         | MAXFOR     | IT    | Legante non specificato  | Aggregati naturali non specificati e schiume laviche                                                         | 0.052     | 400               | ≤ 6   | 1.5/5          | -             | -              | 0.3    |
| [194]                  | x    |      | Diathonite Evolution       | Diasen     | IT    | Calce idraulica naturale | Sughero- argilla - polveri diatomeiche                                                                       | 0.045     | 360               | 4     | 2.7            | 742           | 1.5            | 0.1    |
| [195]                  |      | x    | Diathonite Cork Render     | Diasen     | IT    | -                        | Sughero – polveri diatomieche                                                                                | 0.086     | 920               | 15    | -              | -             | -              | 0.98   |
| [196]                  | x    |      | Diathonite Deumix+         | Diasen     | IT    | Calce idraulica naturale | Sughero- argilla                                                                                             | 0.080     | 450               | 4     | 3.11           | -             | -              | 0.258  |
| [197]                  | x    |      | Diathonite Thermactive.037 | Diasen     | IT    | Calce idraulica naturale | Sughero – silice amorfa espansa – perlite - pomice                                                           | 0.037     | 250               | 3     | 2.8            | -             | 1              | -      |
| [198]                  | x    |      | SANA-WARME                 | azichem    | IT    | Calce idraulica          | Botticino – caolino – caseina calcica – sale di Vichy – perlite espansa – farina di sughero – fibre naturali | 0.056     | 700               | 9     | 2.2            | <3000         |                | 0.18   |
| [199]                  | x    |      | TERMOARE-NINO              | HD SYSTEM  | IT    | Calce idraulica naturale | Aggregati minerali e naturali non specificati                                                                | 0.14      | 500               | 10    |                |               |                | > 0.2  |
| [200]                  | x    |      | TF 2000                    | Chiraema   | IT    | Calce idraulica naturale | Vetro espanso – sughero                                                                                      | 0.086     | 470               | 6     | 0.4/2.5        | -             | -              | > 0.2  |
| [201]                  | x    |      | THERMO CALCE               | Vimark     | IT    | Calce idraulica naturale | Aggregati espansi minerali e fibre naturali non specificati                                                  | 0.059     | 250               | ≤ 15  | ≥ 0.5          | -             | ≥ 0.5          | ≥ 0.15 |
| Artificiali + Minerali |      |      |                            |            |       |                          |                                                                                                              |           |                   |       |                |               |                |        |
| Nota                   | Int. | Ras. | Nome prodotto              | Produttore | Paese | Legante                  | Aggregato                                                                                                    | $\lambda$ | $\rho$            | $\mu$ | R <sub>c</sub> | $\varepsilon$ | R <sub>f</sub> | FP     |
|                        |      |      |                            |            |       |                          |                                                                                                              | WmK       | kg/m <sup>3</sup> | [-]   | MPa            |               |                |        |
| [202]                  | x    |      | Asciugo TD                 | Chiraema   | IT    | Leganti idraulici        | Fibre di vetro –perle di EPS                                                                                 | 0.053     | 290               |       | 0.4/2.5        | -             | -              | > 0.1  |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |      |      |                         |            |       |                                                                                       |                                                   |           |        |       |                |               |                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|-------------------------|------------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------|--------|-------|----------------|---------------|----------------|----|
| [203]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | x    |      | INTOIGNI<br>FER         | MALVIN     | IT    | Leganti idraulici                                                                     | Perlite - vermiculite - fibre di PP               | 0.086     | 385    | 14    | ≥ 2            | -             | -              | -  |
| [204]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | x    |      | INTOIGNI<br>FER C       | MALVIN     | IT    | Leganti idraulici                                                                     | Perlite - vermiculite - fibre di PP               | 0.086     | 385    | ≤ 14  | >1.5           | -             | -              | -  |
| Misto Aerogel                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |      |      |                         |            |       |                                                                                       |                                                   |           |        |       |                |               |                |    |
| Nota                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Int. | Ras. | Nome pro-<br>dotto      | Produttore | Paese | Legante                                                                               | Aggregato                                         | $\lambda$ | $\rho$ | $\mu$ | R <sub>c</sub> | $\varepsilon$ | R <sub>f</sub> | FP |
| [205]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |      |      |                         |            |       |                                                                                       |                                                   | WmK       | kg/m³  | [-]   | MPa            |               |                |    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | x    |      | Fixit 222               | RÖFIX      | A     | Calce idraulica naturale<br>– Calce aerea – Ce-<br>mento bianco – leganti<br>organici | Aerogel – aggregati minerali                      | 0.028     | 220    | 4/5   | -              | -             | -              | -  |
| [206]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | x    |      | ORBITH 028              | DRACHOLIN  | D     | Cemento – Calce idrata                                                                | Aerogel – Perlite e altri aggregati mine-<br>rali | 0.028     | 200    | 6     | 0.4/<br>2.5    | -             | -              | -  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | x    |      | ORBITH 036              | DRACHOLIN  | D     | Cemento – Calce idrata                                                                | Aerogel – Perlite e altri aggregati mine-<br>rali | 0.036     | 200    | 11/13 | 0.4/<br>2.5    | -             | -              | -  |
| Natura dell’intonaco non specificata                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |      |      |                         |            |       |                                                                                       |                                                   |           |        |       |                |               |                |    |
| Nota                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Int. | Ras. | Nome pro-<br>dotto      | Produttore | Paese | Legante                                                                               | Aggregato                                         | $\lambda$ | $\rho$ | $\mu$ | R <sub>c</sub> | $\varepsilon$ | R <sub>f</sub> | FP |
| [207]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |      |      |                         |            |       |                                                                                       |                                                   | WmK       | kg/m³  | [-]   | MPa            |               |                |    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | x    |      | iQ Top                  | remmers    | D     | -                                                                                     | -                                                 | 0.11      | -      | 12    | 1.5/5          | -             | -              | -  |
| [208]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | x    |      | Schimmel-<br>Sanierputz | remmers    | D     | -                                                                                     | -                                                 | 0.15      | -      | -     | 1.5            | -             | -              | -  |
| Int.: malta da intonaco   Ras.: rasante   Rc: res. a compressione   Rf: res. a trazione   FP: adesione al supporto<br>Nazioni produttori: A: Austria   D: Germania   F: Francia   GR: Grecia   IT: Italia   TR: Turchia   UA: Ucraina   UK: Regno Unito  <br>I Prodotti evidenziati sono frutto dell’indagine personale e si aggiungono a quelli del riferimento [113] |      |      |                         |            |       |                                                                                       |                                                   |           |        |       |                |               |                |    |

Il settore delle costruzioni rappresenta ad oggi la più grande fonte di emissione di gas serra, ed è necessario operare su di esso per ottenere una drastica riduzione del consumo di energia e quindi, diminuire l'impatto ambientale. Negli ultimi anni si stanno sperimentando possibili soluzioni di retrofit alternative a quelle tradizionali che includono l'utilizzo di prodotti cosiddetti "super-isolanti" in grado di dare una risposta più incisiva alle sempre maggiori richieste di riduzione dei consumi energetici. Una di queste soluzioni è l'uso di termointonaci a base di aerogel.

Il presente lavoro di tesi, ha avuto lo scopo di valutare, attraverso delle simulazioni, la riduzione della domanda energetica conseguente all'applicazione di termointonaci a base di aerogel su una serie di edifici esistenti selezionati all'interno della città di Torino. Le analisi presentate in questa tesi risultano in parte essere il tassello finale di un progetto chiamato Wall-Ace (Novel Wall Insulation System) finanziato dall'Unione Europea nell'ambito dell'Horizon 2020