



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



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

“Simulazione delle prestazioni dei moduli stand-alone per interventi di Deep Renovation del patrimonio immobiliare nel settore abitativo”

S. Agostinelli, F. Cumo, F. Giustini, E. Pennacchia, G. Piras

CENTRO DI RICERCA
INTERDISCIPLINARE TERRITORIO
EDILIZIA RESTAURO AMBIENTE CITERA



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

SIMULAZIONE DELLE PRESTAZIONI DEI MODULI STAND-ALONE PER INTERVENTI DI DEEP RENOVATION DEL PATRIMONIO IMMOBILIARE NEL SETTORE ABITATIVO

S. Agostinelli, F. Cumo, F. Giustini, E. Pennacchia, G. Piras
(CITERA, La Sapienza)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: N. 1 - Tecnologie

Progetto: 1.6 - Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali

Work package: 2 - Miglioramento dell'efficienza energetica di processi di produzione e di gestione dell'ambiente costruito

Linea di attività: 2.6 - Catalogo di soluzioni standardizzate per interventi di Deep Renovation del patrimonio immobiliare nel settore abitativo

Responsabile del Progetto: Miriam Benedetti, ENEA

Responsabile del Work package 2: Maria-Anna Segreto, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Sviluppo di un abaco di moduli di involucro standardizzati come base di un processo di produzione industriale per interventi di Deep Renovation"*

Responsabile scientifico ENEA: Arch. Carlo Romeo

Responsabile scientifico CITERA Centro Interdipartimentale Territorio Edilizia Restauro Architettura, Università di Roma La Sapienza: Prof. Fabrizio Cumo.

Si ringrazia l'arch. Carlo Romeo, responsabile scientifico ENEA, per il suo prezioso supporto.

Indice

SOMMARIO.....	5
INDICE DELLE FIGURE.....	6
INDICE DELLE TABELLE.....	7
INTRODUZIONE.....	12
1 METODOLOGIA DELLA RICERCA.....	17
2 SELEZIONE E RILIEVO DELL'EDIFICIO-DIMOSTRATORE.....	22
3 VERIFICA IPOTESI DI RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA	27
3.1 SISTEMA A CAPPOTTO – SC.01	29
3.2 PARETE VENTILATA – PV.02.....	32
4 MODELLAZIONE ENERGETICA DELL'EDIFICIO-DIMOSTRATORE.....	34
4.1 UBICAZIONE DEL MODELLO.....	35
4.2 CARATTERISTICHE ENERGETICHE DELL'INVOLUCRO OPACO E TRASPARENTE ANTE-OPERAM.....	35
4.2.1 <i>Chiusura verticale - parete perimetrale</i>	38
4.2.2 <i>Chiusura orizzontale inferiore – solaio a terra</i>	39
4.2.3 <i>Chiusura superiore - copertura</i>	40
4.2.4 <i>Partizione interna orizzontale - solaio</i>	41
4.2.5 <i>Partizione interna verticale – parete interna verticale</i>	42
4.2.6 <i>Chiusura verticale - infissi</i>	43
4.3 VOLUMI DELLE ZONE RISCALDATE E NON	44
4.4 CALCOLO DELLE PRESTAZIONI GLOBALI DELL'EDIFICIO ESTESO ALL'INTERO ANNO – ANTE OPERAM	45
4.4.1 <i>Simulazioni in zona climatica C</i>	46
4.4.2 <i>Simulazioni in zona climatica D</i>	54
4.4.3 <i>Simulazioni in zona climatica E</i>	61
4.5 CARATTERISTICHE ENERGETICHE DELL'INVOLUCRO OPACO E TRASPARENTE POST OPERAM	69
4.5.1 <i>Soluzione di isolamento a cappotto SC.01</i>	72
4.5.2 <i>Sistema di isolamento parete ventilata PV.02</i>	73
4.5.3 <i>Chiusura verticale – infissi post operam</i>	74
4.6 CALCOLO DELLE PRESTAZIONI GLOBALI DELL'EDIFICIO ESTESO ALL'INTERO ANNO – POST OPERAM	75
4.6.1 <i>Simulazioni in zona climatica C – soluzione SC.01</i>	75
4.6.2 <i>Simulazioni in zona climatica C – soluzione PV.02</i>	82
4.6.3 <i>Simulazioni in zona climatica D – soluzione SC.01</i>	89
4.6.4 <i>Simulazioni in zona climatica D – soluzione PV.02</i>	96
4.6.5 <i>Simulazioni in zona climatica E – soluzione SC.01</i>	103
4.6.6 <i>Simulazioni in zona climatica E – soluzione PV.02</i>	109
4.7 SIMULAZIONI IN ZONA CLIMATICA C NEL PERIODO DI MONITORAGGIO	117
4.7.1 <i>Periodo di monitoraggio ante operam</i>	117
4.7.2 <i>Periodo di monitoraggio post operam</i>	121
5 MONITORAGGIO DELLE PRESTAZIONI SULL'EDIFICIO-DIMOSTRATORE	125
5.1 STRUMENTAZIONI UTILIZZATE	127
5.2 MISURAZIONE DELLE CARATTERISTICHE TERMO-IGROMETRICHE E MONITORAGGIO PARAMETRI INDOOR ANTE OPERAM	129
5.2.1 <i>Misurazioni sulla parete esposta a nord</i>	129
5.3 ANALISI TERMOFLUSSIMETRICA ANTE OPERAM	131
6 INSTALLAZIONE DEL COMPONENTE EDILIZIO DI ISOLAMENTO	136
6.1 PROCEDURE DI ASSEMBLAGGIO DEL SISTEMA A CAPPOTTO	136

6.2	MISURAZIONE DELLE CARATTERISTICHE TERMO-IGROMETRICHE E MONITORAGGIO PARAMETRI INDOOR POST OPERAM	142
6.2.1	<i>Misurazioni sulla parete esposta a nord con sistema a cappotto</i>	142
6.3	ANALISI TERMOFLUSSIMETRICA POST OPERAM	142
7	CONCLUSIONI.....	148
8	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	153
9	CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO CITERA	155

Sommario

L'attività di ricerca all'interno del WP2 "Miglioramento dell'efficienza energetica di processi di produzione e di gestione dell'ambiente costruito", portata avanti dal C.I.T.E.R.A. – Centro Interdipartimentale Territorio Edilizia Restauro Ambiente dell'Università di Roma Sapienza, per l'intero PTR 2019-2021 è finalizzata allo sviluppo di un abaco di moduli di involucro standardizzati come base di un processo di produzione industriale per interventi di Deep Renovation del patrimonio edilizio residenziale nazionale.

Durante la presente attività che conclude il Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 è stata applicata una soluzione innovativa per l'isolamento dell'involucro edilizio individuata nel corso della seconda annualità ad un prototipo, al fine di verificarne le prestazioni energetiche e la messa in campo di metodologie progettuali e costruttive basate sui criteri di modularità, prefabbricazione e assemblaggio a secco.

Sono state effettuate simulazioni delle prestazioni energetiche di due moduli prefabbricati di isolamento termico selezionati tra quelli individuati durante la seconda annualità (SC.01 e PV.02 con materiale coibente in lana di roccia), attraverso l'impiego di software certificati.

È stato realizzato un Building Energy Modeling (BEM) dell'edificio-dimostratore esistente oggetto d'intervento, rappresentativo di una delle metodologie costruttive più diffuse sul territorio nazionale, utilizzando un software certificato con il quale sono state verificate le prestazioni energetiche ante e post efficientamento.

In parallelo al processo di modellizzazione del prototipo si è svolto un monitoraggio strumentale dell'edificio test in modo da poter valutarne le prestazioni in campo ante e post intervento e sostanziare di conseguenza quanto precedentemente valutato sulla base di caratteristiche tecniche, parametri/indicatori derivanti da calcolo.

Questo processo ha fornito gli strumenti per una valutazione complessiva delle prestazioni ottenibili dall'applicazione della soluzione di isolamento realizzato secondo i criteri dell'edilizia off-site, fino ad una verifica quantitativa e qualitativa dei vantaggi in termini di semplificazione realizzativa concretizzandosi come valido supporto finalizzato a promuovere l'ottimizzazione di tutta la filiera industriale del settore dell'efficientamento energetico.

I risultati emersi dal monitoraggio serviranno a sostanziare quanto precedentemente valutato sulla base delle specifiche caratteristiche tecniche.

Indice delle Figure

Figura 1 Schema metodologico dei tre anni di ricerca	19
Figura 2 Schema Fasi Processo Metodologico.....	21
Figura 3 Inquadramento territoriale	22
Figura 4 Edificio oggetto di monitoraggio (ante operam) – prospetto Est.....	23
Figura 5 Edificio oggetto di monitoraggio – prospetto Ovest	23
Figura 6 Edificio oggetto di monitoraggio – prospetto Sud.....	24
Figura 7 Edificio oggetto di monitoraggio – prospetto Nord	24
Figura 8 Piante dell’edificio oggetto d’intervento.....	25
Figura 9 Rilievo architettonico dell’ambiente monitorato tramite tecnologia LiDAR.....	26
Figura 10 Parametri di confronto per la selezione degli isolanti.....	27
Figura 11 Confronto tra impianto ambientale e performance dei materiali isolanti	28
Figura 12 - Diagramma di flusso della metodologia per identificare soluzioni di isolamento standardizzate.....	29
Figura 13 - Simulazione SC.01 con isolante in lana di roccia di spessore 12 cm	30
Figura 14 Sistema di isolamento a cappotto con sottostruttura metallica	31
Figura 15 Modulo standardizzato per il sistema di isolamento a cappotto	31
Figura 16 Modulo standardizzato per il sistema di isolamento a parete ventilata.....	33
Figura 17 Simulazione PV.02 con isolante in lana di roccia di spessore 12 cm	33
Figura 18 Modello BEM dell’edificio oggetto di monitoraggio.....	34
Figura 19 Dati climatici della località.....	35
Figura 20 Stratigrafia chiusura verticale – parete perimetrale verticale in tufo da 55 cm	38
Figura 21 Stratigrafia chiusura orizzontale inferiore.....	39
Figura 22 Stratigrafia chiusura orizzontale superiore	40
Figura 23 Stratigrafia della partizione interna orizzontale	41
Figura 24 Stratigrafia della partizione interna verticale.....	42
Figura 25 Stratigrafia degli infissi	43
Figura 26 Definizione dei locali riscaldati	44
Figura 27. Edifici residenziali nei comuni classificati per zona climatica (%)......	45
Figura 28 Stratigrafia chiusura verticale – parete perimetrale isolata con sistema SC.01.....	72
Figura 29 Stratigrafia chiusura verticale opache isolata con sistema PV.02	73
Figura 30 Locale Soggiorno, oggetto del monitoraggio.....	117
Figura 31 Grafico della Temperatura esterna e dell’Irradianza solare diretta sul piano orizzontale - Zona C - 11-13 dicembre (ante operam)	117
Figura 32 Grafico della Temperatura esterna e dell’Irradianza solare diretta sul piano orizzontale - Zona C – 18-20 dicembre (post-operam)	121
Figura 33 Individuazione degli interventi di isolamento ipotizzati: in azzurro la parete ventilata e in rosso l’isolamento a cappotto.....	125
Figura 34 Schema dei componenti del termoflussimetro	126
Figura 35 Immagine illustrativa della strumentazione applicata nell’unità ambientale dell’edificio coibentata	127
Figura 36 Termoflussimetro modello ALMEMO 2590 - 4S.....	128
Figura 37 Centralina microclimatica BABUC.....	128
Figura 38 Parete esposta a nord oggetto di misurazione.....	129
Figura 39 Installazione della piastra termoflussimetrica e del sensore di temperatura sul lato interno della parete esposta a nord	130
Figura 40 Diagramma T interna in funzione del tempo ante intervento	134
Figura 41 Diagramma T esterna in funzione del tempo ante intervento	135
Figura 42 Diagramma U in funzione del tempo ante intervento	135
Figura 43 Diagramma del flusso termico Q in funzione del tempo ante intervento.....	135
Figura 44 Taglio della sottostruttura metallica	136

Figura 45 Applicazione della sottostruttura metallica in acciaio zincato alla chiusura verticale	137
Figura 46 Inserimento materiale isolante	137
Figura 47 Pannellatura realizzata con lastre in calcio-silicato	138
Figura 48 Accostamento dei componenti di isolamento.....	138
Figura 49 Applicazione delle lastre in calcio silicato.....	139
Figura 50 Stratigrafia del componente di isolamento.....	139
Figura 51 Componenti di isolamento rasati e tinteggiati	140
Figura 52 Componente di isolamento prefabbricato	141
Figura 53 Diagramma T interna in funzione del tempo post-intervento	146
Figura 54 Diagramma T esterna in funzione del tempo post-intervento.....	146
Figura 55 Diagramma U in funzione del tempo post-intervento	146
Figura 56 Diagramma del flusso termico Q in funzione del tempo post-intervento	147

Indice delle Tabelle

Tabella 1 Dati geometrici dell'edificio-dimostratore.....	22
Tabella 2 Caratteristiche dei materiali isolanti selezionati.....	27
Tabella 3 Isolanti associati a ciascun sistema di isolamento	28
Tabella 4 Umidità relativa mensile – zona climatica C.....	35
Tabella 5 Temperature esterne medie mensili – zona climatica C.....	35
Tabella 6 Irradiazione solare media mensile – zona climatica C.....	35
Tabella 7 Elenco chiusure verticali e partizione interna ante operam.....	36
Tabella 8 Elenco chiusure orizzontali inferiori ante operam.....	36
Tabella 9 Elenco chiusure verticali - infissi ante operam	37
Tabella 10 Caratteristiche termiche e igrometriche della chiusura verticale opaca in tufo – 55 cm (M100). 38	38
Tabella 11 Caratteristiche termiche e igrometriche della chiusura orizzontale inferiore	39
Tabella 12 Caratteristiche termiche e igrometriche della chiusura orizzontale superiore.....	40
Tabella 13 Caratteristiche termiche e igrometriche della partizione orizzontale.....	41
Tabella 14 Caratteristiche termiche e igrometriche della partizione interna verticale	42
Tabella 15 Caratteristiche termiche e igrometriche degli infissi.....	43
Tabella 16 Locali climatizzati	44
Tabella 17. Numero di edifici residenziali nel 2011 per zona climatica	45
Tabella 18 Risultati della verifica della condensa superficiale ante operam – zona climatica C.....	46
Tabella 19 Risultati della verifica della condensa interstiziale ante operam – zona climatica C	46
Tabella 20 Distribuzione della temperatura nella parete perimetrale in tufo da 55 cm [°C] ante operam – zona climatica C.....	47
Tabella 21 Distribuzione della pressione parziale del vapore nella parete perimetrale in tufo da 55 cm [Pa] ante operam – zona climatica C	47
Tabella 22 Distribuzione della pressione di saturazione nella parete perimetrale in tufo da 55 cm [Pa] ante operam – zona climatica C	47
Tabella 23 Grafici mensili delle pressioni parziali e di saturazione del vapore ante operam – zona climatica C	48
Tabella 24 Grafici mensili delle temperature [°C] ante operam – zona climatica C.....	50
Tabella 25 Sintesi delle dispersioni ante operam – zona climatica C.....	52
Tabella 26 Dispersioni per componente M100 - Parete esterna in tufo - 55 cm ante operam – zona climatica C.....	52
Tabella 27 Dispersioni ordinate per componente - stagione invernale - strutture opache - ante operam – zona climatica C.....	52

Tabella 28 Temperature esterne medie mensili – zona climatica D	54
Tabella 29 Irradiazione solare media mensile – zona climatica D.....	54
Tabella 30 Risultati della verifica della condensa superficiale nella parete perimetrale in tufo da 55 cm ante operam - zona climatica D	54
Tabella 31 Risultati della verifica della condensa interstiziale nella parete perimetrale in tufo da 55 cm ante operam - zona climatica D.....	54
Tabella 32 Distribuzione della temperatura nella parete perimetrale in tufo da 55 cm [°C] ante operam - zona climatica D	55
Tabella 33 Distribuzione della pressione parziale del vapore nella parete perimetrale in tufo da 55 cm [Pa] ante operam - zona climatica D.....	55
Tabella 34 Distribuzione della pressione di saturazione nella parete perimetrale in tufo da 55 cm [Pa] ante operam - zona climatica D.....	55
Tabella 35 Grafici mensili delle pressioni parziali e di saturazione del vapore [Pa] ante operam - zona climatica D.....	56
Tabella 36 Grafici mensili delle temperature [°C] ante operam - zona climatica D.....	58
Tabella 37 Sintesi delle dispersioni ante operam – zona climatica D.....	60
Tabella 38 Dispersioni per componente M100 - Parete esterna in tufo - 55 cm ante operam - zona climatica D.....	60
Tabella 39 Dispersioni ordinate per componente - stagione invernale strutture opache - ante operam – zona climatica D	60
Tabella 40 Temperature esterne medie mensili – zona climatica E.....	61
Tabella 41 Irradiazione solare media mensile – zona climatica E	61
Tabella 42 Risultati della verifica della condensa superficiale nella parete perimetrale in tufo da 55 cm ante operam - zona climatica E	61
Tabella 43 Risultati della verifica della condensa interstiziale nella parete perimetrale in tufo da 55 cm ante operam - zona climatica E	61
Tabella 44 Distribuzione della temperatura nella parete perimetrale in tufo da 55 cm [°C] ante operam - zona climatica E.....	62
Tabella 45 Distribuzione della pressione parziale del vapore nella parete perimetrale in tufo da 55 cm [Pa] ante operam - zona climatica E	62
Tabella 46 Distribuzione della pressione di saturazione nella parete perimetrale in tufo da 55 cm [Pa] ante operam - zona climatica E	62
Tabella 47 Grafici mensili delle pressioni parziali e di saturazione del vapore [Pa] ante operam - zona climatica E	63
Tabella 48 Grafici mensili delle temperature [°C] ante operam - zona climatica E.....	65
Tabella 49 Sintesi delle dispersioni ante operam – zona climatica E	67
Tabella 50 Dispersioni per componente M100 - Parete esterna in tufo - 55 cm ante operam in zona climatica E.....	67
Tabella 51 Dispersioni ordinate per componente - stagione invernale strutture opache - ante operam – zona climatica E.....	67
Tabella 52. Valori di trasmittanza stazionaria previsti dal Decreto Requisiti Ecobonus GU 05/10/2020 – Allegato E (calcolo secondo UNI EN ISO 6946).....	69
Tabella 53 Elenco chiusure e partizioni verticali post operam – SC.01.....	69
Tabella 54 Elenco chiusure e partizioni verticali post operam – PV.02.....	69
Tabella 55 Elenco chiusure e partizioni orizzontali post operam.....	70
Tabella 56 Caratteristiche termiche e igrometriche della chiusura verticale - parete perimetrale in tufo isolata con SC.01 – 68,7 cm (M100).....	72
Tabella 57 Caratteristiche termiche e igrometriche della chiusura verticale opaca in tufo isolata con PV.02 – 73 cm (M100)	73
Tabella 58 Caratteristiche termiche e igrometriche degli infissi.....	74

Tabella 59 Risultati verifica della condensa superficiale parete perimetrale in tufo + SC.01 - zona climatica C	75
Tabella 60 Risultati verifica della condensa interstiziale parete esterna in tufo + SC.01 - zona climatica C... ..	75
Tabella 61 Distribuzione della temperatura parete esterna in tufo + SC.01 [°C] - zona climatica C.....	76
Tabella 62 Distribuzione della pressione parziale del vapore parete esterna in tufo + SC.01 [Pa] - zona climatica C.....	76
Tabella 63 Distribuzione della pressione di saturazione del vapore parete esterna in tufo + SC.01 [Pa] - zona climatica C.....	76
Tabella 64 Grafici mensili delle pressioni parziali e di saturazione del vapore [Pa] parete esterna in tufo + SC.01 - zona climatica C.....	77
Tabella 65 Grafici mensili delle temperature [°C] parete esterna in tufo + SC.01 - zona climatica C.....	79
Tabella 66 Sintesi delle potenze disperse per trasmissione per l'intero periodo di riscaldamento – SC.01 zona climatica C.....	81
Tabella 67 Potenza dispersa per trasmissione per componente M100 - Parete esterna in tufo - 55 cm + SC.01 – T – zona climatica C	81
Tabella 68 Dispersioni ordinate per componente - stagione invernale strutture opache - post operam + SC.01 – zona climatica C.....	81
Tabella 69 Risultati verifica della condensa superficiale parete esterna in tufo + PV.02 – zona climatica C..	82
Tabella 70 Risultati verifica della condensa interstiziale parete esterna in tufo + PV.02 – zona climatica C .	82
Tabella 71 Distribuzione della temperatura nella struttura post-intervento di efficientamento PV.02 [°C] – zona climatica C.....	83
Tabella 72 Distribuzione della pressione parziale del vapore nella struttura post-intervento di efficientamento PV.02 [Pa] – zona climatica C	83
Tabella 73 Distribuzione della pressione di saturazione nella struttura post-intervento di efficientamento PV.02 [Pa] – zona climatica C	83
Tabella 74 Grafici mensili delle pressioni parziali e di saturazione del vapore post-intervento di efficientamento PV.02 – zona climatica C.....	84
Tabella 75 Grafici mensili delle temperature post-intervento di efficientamento PV.02 [°C] – zona climatica C	86
Tabella 76 Sintesi delle potenze disperse per trasmissione per l'intero periodo di riscaldamento - post operam – zona climatica C.....	88
Tabella 77 Potenza dispersa per trasmissione per componente M100 - Parete esterna in tufo - 55 cm + PV.02 – T – zona climatica C	88
Tabella 78 Dispersioni ordinate per componente - stagione invernale strutture opache - post operam + PV.02 – zona climatica C.....	88
Tabella 79 Risultati verifica della condensa superficiale parete perimetrale in tufo + SC.01 - zona climatica D	89
Tabella 80 Risultati verifica della condensa interstiziale parete esterna in tufo + SC.01 - zona climatica D ..	89
Tabella 81 Distribuzione della temperatura parete esterna in tufo + SC.01 [°C] - zona climatica D.....	90
Tabella 82 Distribuzione della pressione parziale del vapore parete esterna in tufo + SC.01 [Pa] - zona climatica D.....	90
Tabella 83 Distribuzione della pressione di saturazione del vapore parete esterna in tufo + SC.01 [Pa] - zona climatica D	90
Tabella 84 Grafici mensili delle pressioni parziali e di saturazione del vapore [Pa] parete esterna in tufo + SC.01 - zona climatica D.....	91
Tabella 85 Grafici mensili delle temperature [°C] parete esterna in tufo + SC.01 - zona climatica D.....	93
Tabella 86 Sintesi delle potenze disperse per trasmissione per l'intero periodo di riscaldamento – SC.01 zona climatica D	95
Tabella 87 Potenza dispersa per trasmissione per componente M100 - Parete esterna in tufo - 55 cm + SC.01 – T - zona climatica D.....	95

Tabella 88 Dispersioni ordinate per componente - stagione invernale strutture opache - post operam + SC.01 – zona climatica D.....	95
Tabella 89 Risultati verifica della condensa superficiale parete perimetrale in tufo + PV.02 - zona climatica D	96
Tabella 90 Risultati verifica della condensa interstiziale parete esterna in tufo + PV.02 - zona climatica D..	96
Tabella 91 Distribuzione della temperatura parete esterna in tufo + PV.02 [°C] - zona climatica D.....	97
Tabella 92 Distribuzione della pressione parziale del vapore parete esterna in tufo + PV.02 [Pa] - zona climatica D	97
Tabella 93 Distribuzione della pressione di saturazione del vapore parete esterna in tufo + PV.02 [Pa] - zona climatica D	97
Tabella 94 Grafici mensili delle pressioni parziali e di saturazione del vapore [Pa] parete esterna in tufo + PV.02 - zona climatica D	98
Tabella 95 Grafici mensili delle temperature [°C] parete esterna in tufo + PV.02 - zona climatica D	100
Tabella 96 Sintesi delle potenze disperse per trasmissione per l'intero periodo di riscaldamento – PV.02 - zona climatica D	102
Tabella 97 Potenza dispersa per trasmissione per componente M100 - Parete esterna in tufo - 55 cm + PV.02 – T - in zona climatica D	102
Tabella 98 Dispersioni ordinate per componente - stagione invernale strutture opache - post operam + PV.02 – zona climatica D.....	102
Tabella 99 Risultati verifica della condensa superficiale parete perimetrale in tufo + SC.01 - zona climatica E	103
Tabella 100 Risultati verifica della condensa interstiziale parete esterna in tufo + SC.01 - zona climatica E	103
Tabella 101 Distribuzione della temperatura parete esterna in tufo + SC.01 [°C] - zona climatica E.....	104
Tabella 102 Distribuzione della pressione parziale del vapore parete esterna in tufo + SC.01 [Pa] - zona climatica E.....	104
Tabella 103 Distribuzione della pressione di saturazione del vapore parete esterna in tufo + SC.01 [Pa] - zona climatica E.....	104
Tabella 104 Grafici mensili delle pressioni parziali e di saturazione del vapore [Pa] parete esterna in tufo + SC.01 - zona climatica E	105
Tabella 105 Grafici mensili delle temperature [°C] parete esterna in tufo + SC.01 - zona climatica E	107
Tabella 106 Sintesi delle potenze disperse per trasmissione per l'intero periodo di riscaldamento – SC.01 - zona climatica E	108
Tabella 107 Potenza dispersa per trasmissione per componente M100 - Parete esterna in tufo - 55 cm + SC.01 – T - zona climatica E	108
Tabella 108 Dispersioni ordinate per componente - stagione invernale strutture opache - post operam + SC.01 – zona climatica E	108
Tabella 109 Risultati verifica della condensa superficiale parete esterna in tufo + PV.02 – zona climatica E	109
Tabella 110 Risultati verifica della condensa interstiziale parete esterna in tufo + PV.02 – zona climatica E	109
Tabella 111 Distribuzione della temperatura nella struttura post-intervento di efficientamento PV.02 [°C] – zona climatica E	110
Tabella 112 Distribuzione della pressione parziale del vapore nella struttura post-intervento di efficientamento PV.02 [Pa] – zona climatica E.....	110
Tabella 113 Distribuzione della pressione di saturazione nella struttura post-intervento di efficientamento PV.02 [Pa] – zona climatica E.....	110
Tabella 114 Grafici mensili delle pressioni parziali e di saturazione del vapore [Pa] parete esterna in tufo + PV.02 - zona climatica E.....	111
Tabella 115 Grafici mensili delle temperature [°C] parete esterna in tufo + PV.02 - zona climatica E.....	113
Tabella 116 Sintesi delle potenze disperse per trasmissione per l'intero periodo di riscaldamento – PV.02 - zona climatica E	115

Tabella 117 Potenza dispersa per trasmissione per componente M100 - Parete esterna in tufo - 55 cm + PV.02 – T - zona climatica E	115
Tabella 118 Dispersioni ordinate per componente - stagione invernale strutture opache- post operam + PV.02 – zona climatica E	115
Tabella 119 Confronto risultati simulazioni dell'energia dispersa per trasmissione (kWh).....	116
Tabella 120 Dati climatici del periodo di monitoraggio ante operam simulato	118
Tabella 121 Dispersioni simulate del locale soggiorno – periodo monitoraggio ante operam - zona climatica C	119
Tabella 122 Dispersioni attraverso strutture opache ordinate per componente – periodo monitoraggio ante operam – zona climatica C	120
Tabella 123 Dati climatici del periodo di monitoraggio post operam simulato	121
Tabella 124 Dispersioni simulate del locale soggiorno – periodo monitoraggio post operam - zona climatica C	123
Tabella 125 Dispersioni attraverso strutture opache ordinate per componente – periodo monitoraggio post operam – zona climatica C	123
Tabella 126 Analisi Termoflussimetrica - ante operam dal 11/12/2021 al 13/12/2021	131
Tabella 127 Analisi Termoflussimetrica - Post Intervento dal 18/12/2021 al 20/12/2021	142

Introduzione

L'attività di ricerca svolta dal C.I.T.E.R.A. – Centro Interdipartimentale Territorio Edilizia Restauro Ambiente dell'Università di Roma Sapienza è inserita all'interno del Progetto 1.6 "Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali" e afferisce al WP2: "Miglioramento dell'efficienza energetica di processi di produzione e di gestione dell'ambiente costruito".

Esaminando il contesto nel quale si opera non si può fare a meno di evidenziare come anche il settore delle costruzioni incida su uno dei fenomeni globali più importanti attualmente, ovvero il cambiamento climatico. La mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici si configurano come le sfide chiave del XXI secolo. Nel caso dell'edilizia sostenibile è importante evidenziare come i benefici per l'ambiente coincidono con quelli personali: l'abbattimento delle emissioni significa anche spese minori in bolletta e comfort abitativo maggiore.

Negli ultimi decenni è accresciuta sempre di più l'attenzione verso l'ambiente, in particolare al riscaldamento globale, causato da enormi quantità di emissioni di gas serra rilasciate nell'atmosfera, derivanti da attività antropiche che mettono in discussione gli equilibri naturali. L'UNFCCC (Convenzione Quadro sul Cambiamento Climatico delle Nazioni Unite) definisce il cambiamento climatico come "qualsiasi cambiamento di clima attribuito direttamente o indirettamente ad attività umane, il quale altera la composizione dell'atmosfera mondiale e si aggiunge alla variabilità naturale del clima osservata in periodi di tempo comparabili". [1]

La questione ambientale è strettamente legata alla questione energetica, al modo in cui l'energia viene prodotta, distribuita e consumata. Secondo l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), il settore dell'approvvigionamento energetico è il maggior contribuente alle emissioni di gas a effetto serra [2], che costituisce una delle questioni da affrontare e risolvere a breve termine per limitare i danni causati sia all'ecosistema sia alla salute umana. Le politiche energetiche/climatiche e ambientali risultano pertanto indissolubilmente legate.

La domanda globale di energia residenziale è aumentata costantemente negli ultimi decenni [3].

Il Global Status Report for Buildings and Construction 2019 evidenzia l'importanza di decarbonizzare il settore dell'edilizia e delle costruzioni per raggiungere l'impegno dell'Accordo di Parigi e i *Sustainable Development Goals* (SDGs) delle Nazioni Unite, poiché esso è responsabile di quasi il 40% del consumo energetico e delle relative emissioni, di oltre il 50% del consumo di risorse e del 38% dei rifiuti prodotti nell'Unione Europea [4]. Questi dati evidenziano la necessità di identificare nuove strategie per rendere il settore delle costruzioni più sostenibile. Due terzi (circa il 65%) del patrimonio edilizio europeo è stato costruito prima del 1980; circa il 97% degli edifici dell'UE deve essere rinnovato per raggiungere l'obiettivo di decarbonizzazione del 2050, ma solo lo 0,4-1,2% viene ristrutturato ogni anno [5]

All'interno del *Green Deal*, l'Europa definisce il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici come la strategia fondamentale per raggiungere l'ambizioso obiettivo di eliminare le emissioni di carbonio entro il 2050. [6]. Le direttive europee che attuano il pacchetto energia e clima promuovono quindi una politica energetica volta a decarbonizzare l'economia per raggiungere l'obiettivo della neutralità climatica entro il 2050.

L'efficienza energetica costituisce uno strumento efficace per attuare questa politica e affrontare le recenti sfide del cambiamento climatico dovute alle emissioni di gas climalteranti, alla scarsità delle risorse e alla dipendenza dalle importazioni di energia, principalmente da fonti non rinnovabili.

Il termine efficienza energetica si riferisce genericamente alla capacità di un sistema fisico di ottenere un certo risultato utilizzando la minor quantità di energia rispetto ad altri sistemi meno efficienti, aumentandone il rendimento e ottenendo di conseguenza risparmi energetici, costi di gestione inferiori e significativi benefici ambientali.

La riqualificazione energetica degli edifici e l'uso razionale dell'energia in tutte le fasi del processo di costruzione sono interventi chiave da perseguire, definiti nei più recenti documenti politici internazionali che mirano alla decarbonizzazione del patrimonio immobiliare entro il 2050, con tappe intermedie nel 2030 e 2040.

La direttiva europea 2018/844, che sostituisce la precedente direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica degli edifici e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, obbliga ad esempio gli Stati

membri a sviluppare strategie nazionali a lungo termine per promuovere la ristrutturazione energetica degli edifici residenziali, non residenziali, privati e pubblici. L'obiettivo è quello di ridurre le emissioni nell'UE dell'80-85% rispetto ai livelli del 1990, promuovendo la trasformazione degli edifici esistenti in edifici a energia quasi zero (NZEB) [7]. Le prestazioni termiche degli edifici determinano la quantità di energia utilizzata per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici, il che influenza profondamente l'efficienza energetica. L'adozione di principi di progettazione sostenibile e l'uso efficace dei materiali da costruzione possono giocare un ruolo cruciale nel migliorare le prestazioni termiche degli edifici sia nuovi sia esistenti. [8]

Secondo i dati del 2018 riportati in [9], il settore residenziale è responsabile del 26,1% del consumo finale di energia, o del 16,6% del consumo interno lordo di energia nell'Unione europea. In particolare, il principale consumo di energia nelle famiglie dell'UE è legato al riscaldamento delle abitazioni (63,6%) e al raffrescamento degli ambienti (0,4%).

Il patrimonio edilizio europeo è unico ed eterogeneo nella sua espressione della diversità culturale e della storia del continente, ma è anche particolarmente datato; infatti, più di 220 milioni di unità immobiliari, che rappresentano l'85% del patrimonio edilizio dell'UE, sono state costruite prima del 2001.

Le prime normative sul tema dell'isolamento termico degli edifici sono state promulgate negli anni '70. Questo significa che gran parte del patrimonio edilizio attuale dell'UE è stato costruito senza alcun requisito di prestazione energetica: un terzo (35%) del patrimonio edilizio dell'UE ha più di 50 anni, più del 40% del patrimonio edilizio è stato costruito prima del 1960. Quasi il 75% di esso è energeticamente inefficiente secondo gli attuali standard edilizi. [10]

Il rendimento energetico dell'intero edificio dipende principalmente dall'efficienza dell'involucro, che stabilisce il confine tra gli ambienti interni ed esterni [11]. In particolare, il 50% del consumo totale di energia di un edificio per uso generale è dissipato attraverso il suo involucro [12].

La Commissione europea ha proposto nel Piano di obiettivi climatici 2030 la riduzione delle emissioni nette di gas ad effetto serra nell'UE di almeno il 55% entro il 2030 rispetto al 1990. [13]

Per raggiungere tale obiettivo l'UE dovrebbe ridurre le emissioni di gas serra degli edifici del 60%, il loro consumo finale di energia del 14% e il consumo di energia per il riscaldamento e il raffreddamento del 18%. Risulta pertanto fondamentale rendere gli edifici più efficienti dal punto di vista energetico, con meno emissioni di carbonio durante il loro intero ciclo di vita e più sostenibili. [14]

In risposta a tale situazione la Commissione europea attraverso la strategia *Renovation Wave* ["A Renovation Wave for Europe – Greening our buildings, creating jobs, improving lives" (COM(2020)662)] ha prefissato l'obiettivo di raddoppiare i tassi di ristrutturazione¹ nei prossimi dieci anni per ridurre il consumo di energia e risorse negli edifici. Ciò permette di raggiungere un buon risultato in termini di sostenibilità ambientale, promuovendo al tempo stesso il rilancio economico ed occupazionale dell'intero settore delle costruzioni.

L'applicazione dei principi di circolarità alla ristrutturazione degli edifici ridurrà ulteriormente le emissioni di gas serra legate ai materiali impiegati.

Minimizzare l'impronta ecologica degli edifici richiede efficienza delle risorse e circolarità combinate con la trasformazione del settore delle costruzioni, per esempio attraverso la promozione dell'impiego di materiali ecocompatibili, dei criteri di assemblaggio a secco, prefabbricazione e modularità.

In questo ambito viene affrontata l'analisi dei processi (progettuali e produttivi) incentrati su sistemi e componenti del settore delle costruzioni (sistema edificio-impianti) puntando al paradigma dell'industria "smart" automatizzata e interconnessa che traguardi l'efficienza dei processi in serie nella specificità del prodotto edilizio. Lo sviluppo di questa tematica viene affrontata in tre Linee di attività sequenziali articolate in altrettante annualità di ricerca (PTR 2019-2021).

L'obiettivo della presente ricerca triennale consiste nell'individuazione e promozione di soluzioni di efficientamento volte a indirizzare la domanda del mercato edilizio verso interventi di Deep Renovation degli immobili residenziali esistenti.

¹ Dovranno essere riqualificati nell'Unione Europea 35 milioni di edifici

La prima Linea di Attività ha riguardato principalmente un'analisi dello stato dell'arte delle principali tipologie di involucro edilizio opaco esistenti che ha portato all'elaborazione di un abaco delle chiusure verticali e orizzontali che contraddistinguono il patrimonio immobiliare residenziale nazionale.

La redazione dell'abaco delle tipologie di pacchetti di involucro edilizio opaco e di schede rappresentative delle diverse combinazioni delle chiusure dell'involucro ha permesso di elaborare una matrice che sintetizza i risultati emersi, per agevolare l'individuazione, nella seconda linea di attività, di soluzioni ottimizzate di riqualificazione che rispecchiano criteri di standardizzazione/modularità/prefabbricazione nell'ottica di interventi che si avvicinino al concetto di edilizia *off-site*.

Durante la seconda annualità della ricerca sono stati individuati, analizzati e proposti sistemi di riqualificazione energetica delle chiusure verticali perimetrali esterne, organizzati in un abaco di soluzioni ottimizzate finalizzato ad avviare un processo di produzione standardizzato, replicabile ed estendibile su larga scala.

La definizione di tali componenti edilizi prefabbricati di isolamento termico delle chiusure verticali opache è finalizzata a un maggior controllo della qualità prestazionale, a ridurre tempi di cantierizzazione e i relativi disagi per gli occupanti, i costi di realizzazione tramite impulsi alla realizzazione di nuove filiere industriali che nel settore edilizio nazionale risultano ancora poco diffuse e sviluppate.[15]

Per poter avviare una nuova filiera industriale occorrerà affrontare alcuni ostacoli costituiti principalmente da una scarsa applicazione di metodologie e soluzioni tecnologiche evolute.

Il modello olandese di *Energiesprong* costituisce un esempio per riqualificare il patrimonio immobiliare basato su un processo innovativo tramite soluzioni tecniche ad elevata prefabbricazione, che si è sviluppato con ottimi risultati in diversi paesi europei, come Germania, Francia, regno Unito oltre che negli Stati Uniti; ciò avvalorava la possibile trasformazione dell'intera filiera del settore delle costruzioni anche grazie alla digitalizzazione dell'ambiente costruito.[16]

È di fondamentale importanza rivoluzionare l'attuale approccio alla progettazione degli edifici e l'intero processo costruttivo delle aziende di settore per poter rendere più sostenibile l'intero settore edilizio.

L'importanza di efficientare gli edifici e il processo produttivo dei componenti edilizi è avvalorata dai dati dell'ISTAT secondo i quali in Italia il 15% degli edifici è stato realizzato prima del 1918 e circa il 65% è stato costruito precedentemente alla prima legge sul risparmio energetico (Legge n. 373/1976) [17].

L'inefficienza di tale porzione del patrimonio edilizio comporta elevati consumi di energia; nel 2018, il consumo energetico del settore residenziale è stato di 32,1 Mtep [18].

Edilizia *off-site* e *Modern Methods of Construction* costituiscono nuove modalità per l'efficientamento degli edifici, basate sulla progettazione, pianificazione, fabbricazione e pre-assemblaggio di elementi o componenti edilizi in stabilimento, prima dell'installazione in cantiere. I metodi moderni di costruzione (MMC) costituiscono una strategia per minimizzare gli impatti negativi del settore delle costruzioni sull'ambiente e può inoltre contribuire all'aumento dell'efficienza degli edifici, garantendo i requisiti derivanti dall'Agenda 20-20-20 nel consumo di energia. [19]

Il concetto di *Modern Methods of Construction* (MMC) ha già preso piede da tempo in ambito internazionale anche se a livello nazionale non si nota ancora una sufficiente diffusione.

A livello internazionale la diffusione dei MMC può essere attribuita a tre elementi chiave che riflettono i tre principi che guidano l'attuale settore delle costruzioni: Digitalizzazione, Produzione e Performance.

L'utilizzo di tecnologie di pre-produzione permette di condurre la costruzione nell'era moderna trasferendo la produzione in fabbrica. Con un maggiore controllo della qualità e un uso più efficiente di materiali, manodopera e tecniche di produzione, è possibile realizzare interventi più veloci, con meno rischi per i lavoratori e con un costo congruo. La digitalizzazione può essere impiegata sia nel processo di progettazione, per creare un modello informativo digitale dinamico, sia nel processo di produzione per ottenere un assemblaggio di precisione.

Attraverso la digitalizzazione, Big Data, AI, Internet of Things è possibile monitorare maggiormente la performance per tutto il ciclo di vita dell'edificio.

Raggruppando le principali categorie di MMC si passa da sistemi tri-dimensionali completamente prodotti ed assemblati in fabbrica indicati per nuove costruzioni o in caso di demolizione e ricostruzione, a sistemi bi-dimensionali prodotti in condizioni di fabbrica e assemblati in cantiere (pannelli, pareti, solai, ecc.), a sistemi

progettati per una cantierizzazione semplificata che riduce i tempi di posa in opera fino a singoli prodotti che necessitano di una lavorazione tradizionale, ma comunque progettati per una posa in opera ingegnerizzata (per esempio attraverso l'utilizzo di attrezzature robotizzate).

I Paesi che hanno già adottato su ampia scala questi criteri e che hanno promosso la diffusione dell'edilizia *off-site* principalmente per il settore residenziale, non sono ancora così numerosi (esempi virtuosi si possono trovare in Giappone, Scandinavia, Regno Unito, Paesi Bassi, Nuova Zelanda, Canada).

Le imprese italiane risultano ancora al margine del processo di innovazione centrato su di una produzione ibrida tra la fabbrica e il cantiere.

La ricerca sviluppata all'interno del Progetto: 1.6 "Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali" e nello specifico del Work package 2 "Miglioramento dell'efficienza energetica di processi di produzione e di gestione dell'ambiente costruito" si muove proprio in questo ambito, con l'obiettivo di guidare l'innovazione di prodotto e di processo in modo da realizzare modelli di riqualificazione sostenibili e ripetibili per il patrimonio edilizio residenziale nazionale esistente.

L'edilizia *off-site*, la prefabbricazione e altri metodi moderni di costruzione è stata interpretata al fine di ridurre l'intensità delle lavorazioni in cantiere per localizzarla principalmente in fabbrica. Questo approccio potrebbe consentire una riorganizzazione di tecnologie e processi finalizzate ad una maggiore efficienza e qualità. Progetti "sostenibili" devono prevedere le fasi di produzione, assemblaggio e gestione degli immobili e puntare sulla standardizzazione, analisi dei costi e delle performance nell'intero ciclo di vita dell'edificio.

La presente attività a conclusione dell'intero studio svolto nell'ambito del PTR 2019-2021 è incentrata sulla verifica e il monitoraggio dei requisiti delle prestazioni energetiche dei moduli prefabbricati selezionati tra quelli individuati durante la seconda annualità di ricerca, una volta accoppiati/messi in opera attraverso l'impiego sia di software certificati e sia di test sperimentali effettuati su un dimostratore per la prova in campo. L'edificio dimostratore è inteso come modulo-prototipo di edilizia residenziale rappresentativo di una delle metodologie costruttive italiane più diffusa e consente di testare interventi di efficientamento con differenti livelli di complessità realizzativa: da quelli più leggeri o di superficie (*light renovation*) a quelli che prevedono utilizzo di elementi prefabbricati ad elevate prestazioni termo-acustiche nel caso di interventi su manufatti esistenti fortemente compromessi (*medium e deep renovation*).

L'obiettivo del dimostratore è quello di testare alcune soluzioni principalmente in termini di prestazioni energetiche reali considerando diverse condizioni al contorno (valutazioni focalizzate in questo caso sulle prestazioni dei moduli prefabbricati).

Tali verifiche sono finalizzate a far fronte all'elevato livello di inadeguatezza del parco edilizio esistente in tema di sicurezza, efficienza energetica e sostenibilità.

I risultati raggiunti possono offrire un valido supporto finalizzato a promuovere lo sviluppo di tutta la filiera industriale del settore dell'efficientamento energetico basato sui principali criteri dell'edilizia *off-site*. Nello svolgimento dell'attività si sono riscontrate impreviste difficoltà nel reperimento dei materiali e di attrezzature dovute alla scarsa disponibilità di materie prime imputabili in larga parte all'emergenza COVID-19 ed in parte alla forte accelerazione del ricorso al Superbonus edilizio. Questo ha condotto ad un continuo e perdurante rincaro dei prezzi delle materie prime, alla carenza di molti materiali (un esempio sono ponteggi in acciaio, gli isolanti) e alla mancanza di manodopera specializzata per i cantieri. Tali difficoltà sono ricadute anche sulle imprese nel reperimento di risorse per realizzare i loro prodotti, mettendo in crisi l'intera filiera che non riesce a far fronte alla crescente domanda nel campo delle ristrutturazioni edilizie.

I ritardi nelle consegne dei materiali e la carenza di attrezzature hanno determinato un forte slittamento nella programmazione delle attività di realizzazione delle opere di adeguamento del dimostratore e di installazione dei moduli individuati nella precedente annualità.

Per problemi dovuti alla reperibilità dei materiali e componenti non è stato possibile estendere la messa in campo di sistemi diversificati da sottoporre a monitoraggio, ma ci si è limitati ad una tipologia di sistema di isolamento.

1 Metodologia della ricerca

L'intera attività di ricerca all'interno del PTR 2019-2021 è volta al miglioramento dell'efficienza energetica dei processi di produzione e di gestione dell'ambiente costruito attraverso la redazione di un catalogo di configurazioni costruttive standard per sistemi di riqualificazione da applicare sulle chiusure opache verticali esterne degli edifici residenziali esistenti.

L'approccio metodologico che ha guidato il primo anno di attività si è basato sulla ricerca di informazioni base necessarie per individuare una serie di caratteristiche fondamentali per identificare delle casistiche rappresentative del variegato patrimonio edilizio residenziale nazionale.

La ricerca ha portato alla definizione di una casistica di edifici classificati in funzione di parametri ritenuti significativi per permettere una successiva individuazione di interventi standardizzati di riqualificazione sostenibile profonda del sistema involucro, quali: la zona climatica, la zona sismica, la classe di epoca di costruzione, la tipologia edilizia, la tipologia costruttiva, le stratigrafie e caratteristiche dell'involucro edilizio. Un'indagine bibliografica nell'ambito della tecnologia dell'architettura ha fatto emergere una moltitudine molto vasta ed eterogenea di stratigrafie utilizzate negli edifici residenziali sul territorio italiano.

Questa attività è stata propedeutica alla popolazione di un abaco delle configurazioni dell'involucro opaco costituito da singole schede (125) articolate in funzione delle caratteristiche edilizie precedentemente selezionate.

Le stratigrafie e i relativi valori di trasmittanza delle chiusure verticali, orizzontali superiori e inferiori sono state associate a specifiche tipologie edilizie, strutturali e a classi di epoca di costruzione.

Tali dati sono stati raccolti all'interno di una "matrice" degli edifici, a prevalente uso residenziale, che sintetizza i risultati emersi dal preliminare studio dello stato dell'arte (346 configurazioni).

La conoscenza della composizione delle chiusure verticali ricorrenti è stata imprescindibile per individuare in maniera mirata e dettagliata, durante la seconda annualità, le tipologie di interventi standardizzati di isolamento.

Nel corso della linea di attività del secondo anno il processo di indagine è partito dall'identificazione di parametri di confronto dei materiali isolanti disponibili sul mercato, anche sulla base dei criteri previsti dai Criteri Ambientali Minimi (CAM), quali indicatori di performance (conducibilità, calore specifico, densità), di impatto ambientale (origine della materia prima, PEI, riciclabilità), indicazioni d'impiego (ambiti di applicazione e formati) e di costo.

Questa valutazione ha permesso di selezionare i seguenti materiali isolanti per le soluzioni di efficientamento delle chiusure verticali opache: lana di roccia, fibra di legno, aerogel, poliuretano espanso rigido e polistirene estruso.

I materiali coibenti scelti sono stati successivamente associati alle soluzioni di riqualificazione delle chiusure verticali opache (CVO) applicabili all'esterno dell'edificio attraverso un sistema a cappotto e parete ventilata, e all'interno delle strutture perimetrali (nel caso di edifici vincolati).

Nell'ottica di promuovere la sostenibilità ambientale nel settore delle costruzioni e quindi minimizzare gli impatti in fase di cantiere riducendone i tempi di realizzazione degli interventi di riqualificazione, sono state valutate le modalità di posa di ciascuna soluzione, prediligendo sistemi costruttivi industrializzati e pre-assemblati che permettono di ridurre notevolmente i tempi di esecuzione e gli impatti ambientali correlati.

Per ogni soluzione di isolamento proposta sono stati valutati i seguenti parametri:

- trasmittanza termica stazionaria (W/m^2K);
- percentuale di applicabilità sul patrimonio edilizio nazionale residenziale in base ai requisiti minimi di trasmittanza termica stazionaria previsti da normativa vigente per ogni zona climatica;
- percentuale di disassemblabilità del componente;
- percentuale di materia recuperata o riciclata nei materiali impiegati;
- modalità di posa;
- costo unitario di riferimento ($€/m^2$).

Sulla base dell'Abaco delle Chiusure Verticali Opache del patrimonio edilizio residenziale sviluppato durante la prima annualità sono state effettuate simulazioni per poter identificare lo spessore del materiale isolante

di ciascuna soluzione tecnologica proposta con la maggiore applicabilità sul territorio nazionale, per indirizzare la catena di produzione verso soluzioni standardizzate più efficienti e sostenibili.

Lo studio ha permesso l'elaborazione successiva di schede prestazionali delle soluzioni selezionate applicate su ciascuna CVO.

La matrice del patrimonio edilizio residenziale nazionale sviluppata progettata durante il primo anno di ricerca è stata integrata con le soluzioni di isolamento termico più performanti individuate durante la seconda annualità.

L'approccio metodologico che ha guidato la presente e conclusiva linea di attività si è sviluppato su un duplice binario. È stato individuato un edificio-dimostratore esistente che è stato oggetto di ristrutturazione al fine di renderlo idoneo alla sperimentazione che si è concretizzata nell'applicazione di una soluzione di isolamento tra quelle riportate nell'abaco dei moduli di involucro sviluppato durante la seconda annualità.

Si è costruito un "modello" energetico del dimostratore con software certificato in modo da poter simularne le prestazioni energetiche sia ex ante che a seguito della posa in opera del sistema di isolamento individuato. Parallelamente l'edificio è stato sottoposto a monitoraggio in situ dei parametri termo-igrometrici e delle prestazioni energetiche sia ante operam che post operam ossia a valle del sistema di isolamento una volta accoppiato alla struttura esistente.

Questa procedura ha consentito di verificare la sperimentazione e messa in campo di metodologie progettuali e costruttive innovative.

La metodologia messa a punto ha reso possibile un confronto tra i risultati "misurati" in campo e quelli calcolati attraverso una simulazione energetica.

Attraverso la modellizzazione/digitalizzazione dell'edificio è stato effettuato il calcolo sia della prestazione del sistema di isolamento che di quella complessiva del dimostratore ante e post intervento e di verificarne anche il comportamento al variare delle condizioni al contorno (in zone climatiche differenti).

Lo studio è partito dalla selezione di due soluzioni di isolamento tra quelle riportate nell'abaco dei moduli di involucro sviluppato durante la seconda annualità, quali il sistema a cappotto SC.01 e la parete ventilata PV.02.

La ricerca sperimentale è stata condotta attraverso una campagna di monitoraggio su una casa cantoniera, oggetto di un accordo di collaborazione tra il Centro di Ricerca CITERA e la Regione Lazio in materia di sostenibilità ed efficienza energetica degli edifici. La fase seguente consiste nel mapping

È stato effettuato il rilievo architettonico dell'edificio-dimostratore è stato realizzato sia attraverso il metodo diretto sia indiretto. Quest'ultimo è stato realizzato (tramite tecnologia laser-scanning LiDAR - Light Detection and Ranging). Grazie a questa tecnica di rilievo è stata generata una nuvola di punti che contiene al suo interno informazioni geografiche su tutti gli elementi riflettenti presenti e che può essere ulteriormente post-processata per creare un Building Information Model (BIM) che descrive le caratteristiche relazionali e gli attributi degli elementi dell'edificio. Sulla base del modello BIM, è stato realizzato un modello energetico del sistema edificio/impianto (Building Energy Model - BEM) con software certificato per svolgere simulazioni e verificare le prestazioni energetiche ante e post efficientamento.

Come già evidenziato a causa di impreviste difficoltà dell'intero comparto delle costruzioni stretto tra rincaro dei prezzi delle materie prime, difficoltà di reperimento di materiali, attrezzature e manodopera dovute all'emergenza COVID-19 e alla forte richiesta di interventi legati al Superbonus edilizio non è stata possibile la sperimentazione contemporanea di più componenti innovativi costituenti l'involucro, scelti anche in base al diverso orientamento delle facciate.

In fase di simulazione invece due sistemi di isolamento sono stati presi in considerazione ed applicati in configurazioni diverse a tutte le superfici esterne verticali dell'edificio in modo da poter valutare e confrontare tra loro le prestazioni globali anche in condizioni climatiche differenti (zone climatiche C, D,E).

Le prestazioni energetiche sono state verificate attraverso misurazioni in situ dei flussi termici, della temperatura dell'aria interna ed esterna e delle temperature superficiali prima e dopo l'applicazione dell'unica soluzione di isolamento SC.01 applicata sulla superficie esterna maggiormente critica per la stagione invernale, mentre non è stato possibile realizzare e monitorare il componente PV.02.

L'installazione della soluzione di isolamento selezionata è stata costantemente monitorata per valutare i vantaggi non solo in termini di efficientamento energetico, ma anche di semplificazione e velocità realizzativa.

Si riporta in Figura 1 uno schema metodologico di sintesi dell'intera attività di ricerca all'interno del WP2 PTR 2019-2021.

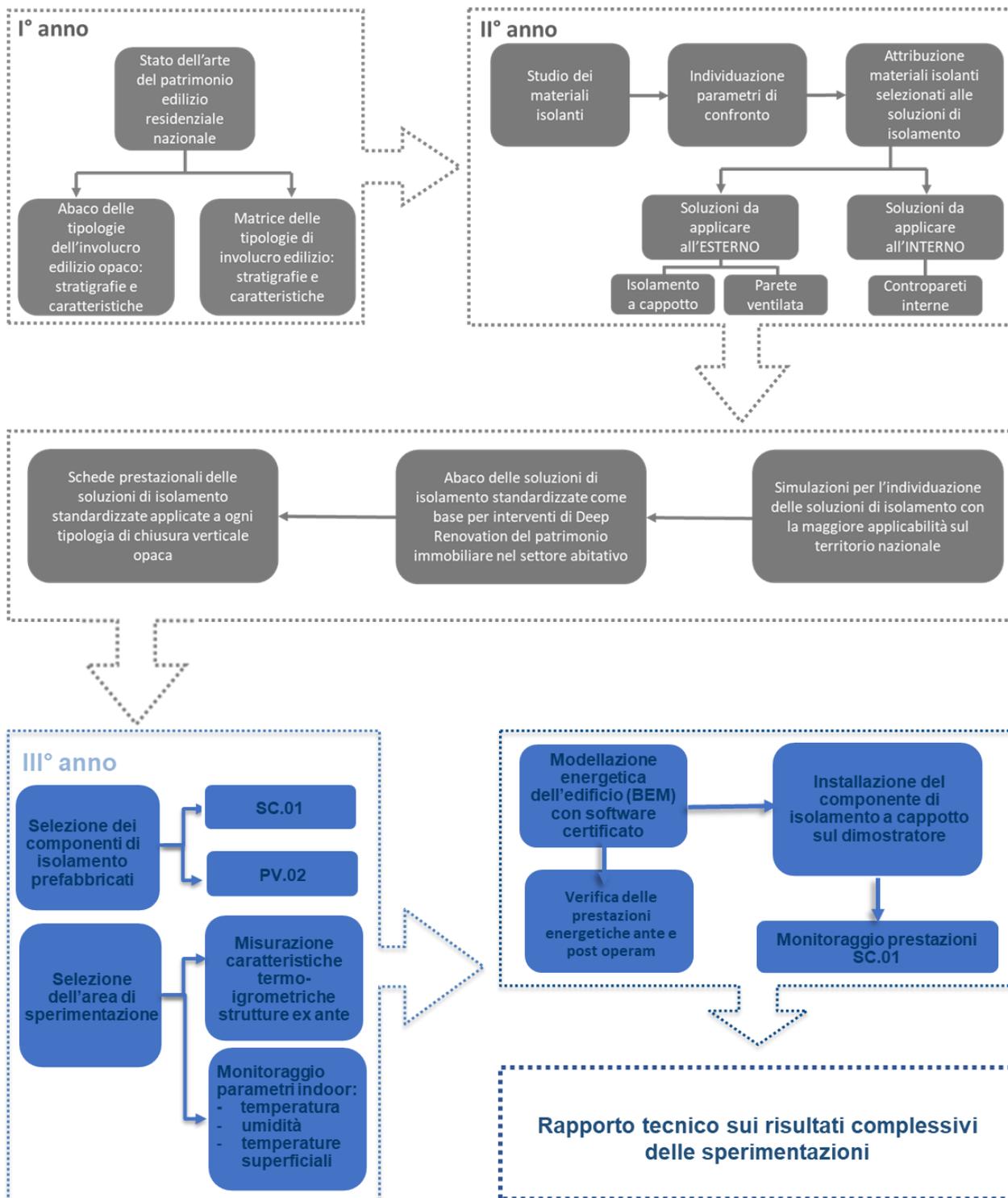


Figura 1 Schema metodologico dei tre anni di ricerca

Si ripercorrono in sintesi le differenti fasi del processo metodologico seguito in questa annualità di ricerca articolando in dettaglio le diverse attività.

1. Fase 1: Selezione e rilievo dell'edificio-dimostratore

- Individuazione dell'edificio-dimostratore in funzione della destinazione d'uso residenziale, della tipologia edilizia, del periodo di costruzione delle caratteristiche costruttive maggiormente ricorrenti sul territorio nazionale; realizzazione opere di adeguamento del dimostratore;
- Rilievo dell'edificio: tecnologia laser-scanning e rilievo diretto;
- Verifica ipotesi di riqualificazione energetica in seguito a selezione tramite matrice ed abaco dei sistemi modulari di isolamento individuati nella precedente annualità di ricerca (sistema a cappotto SC.01; parete ventilata PV.02): verifica del rispetto dei requisiti di efficienza energetica secondo la legislazione corrente

2. Fase 2: Modellizzazione dell'edificio

- Creazione di un Building Information Model (BIM)
- Creazione di un modello energetico del sistema edificio (Building Energy Model - BEM)
- Modello edificio situazione *ante operam* situato in 3 diverse zone climatiche (C, D, E) calcolo delle prestazioni globali dell'edificio esteso all'intero anno
- Modello edificio *post operam* con applicazione di ipotesi di riqualificazione di tutte le superfici verticali esterne disperdenti alternativamente con sistemi SC.01 e PV.02 situato in 3 diverse zone climatiche (C, D, E) calcolo delle prestazioni globali dell'edificio esteso all'intero anno
- Calcolo e valutazione delle prestazioni *ante operam* e nella condizione *post operam* a valle dell'applicazione della soluzione di isolamento SC.01 sulla parete Nord simulate in zona climatica C per il periodo corrispondente al monitoraggio in situ
- Confronto tra le trasmittanze termiche *ante* e *post operam*, (verifica del rispetto dei requisiti minimi di legge) e tra i flussi termici specifici globali riferiti all'intero edificio e all'intero anno ante intervento e nella condizione *post operam* a valle dell'applicazione di ognuna delle 2 soluzioni di isolamento simulate nelle zone climatiche C, D, E.

Questa fase ha consentito anche il confronto tra gli esiti dell'applicazione dei due sistemi di isolamento

3. Fase 3: Monitoraggio e confronto

Situazione di fatto "ante operam"

- Monitoraggio dei parametri termo-igrometrici indoor (Temperatura dell'aria interna, temperatura superficiale interna della parete esterna con esposizione a Nord) ed outdoor (Temperatura dell'aria esterna, temperatura superficiale esterna della parete esterna con esposizione a Nord)
- Misurazione (tramite termoflussimetria) della trasmittanza termica della parete esterna con esposizione Nord
- Monitoraggio del flusso termico attraverso la parete;

Situazione "post operam"

- Installazione del sistema SC.01: verifica criteri e tempi di posa in opera finalizzati agli standard dell'edilizia *off-site*;
- Monitoraggio dei parametri termo-igrometrici indoor (temperatura dell'aria interna, temperatura superficiale interna della parete esterna riqualificata con esposizione a Nord) ed outdoor (temperatura dell'aria esterna, temperatura superficiale esterna della parete esterna riqualificata con esposizione a Nord)
- Misurazione (tramite termoflussimetria) della trasmittanza termica della parete esterna con esposizione Nord
- Monitoraggio del flusso termico attraverso la parete riqualificata;
- Misurazione delle prestazioni della parete Nord dell'edificio *ante operam* e nella condizione *post operam* a valle dell'applicazione della soluzione di isolamento SC.01
- Confronto dei dati misurati e simulati tra le trasmittanze termiche *ante* e *post operam*, (verifica del rispetto dei requisiti minimi di legge) e tra i flussi termici specifici ante intervento attraverso

la parete esterna con orientamento Nord e nella condizione ex post a valle dell'applicazione della soluzione di isolamento SC.01

- A questo punto è stato possibile effettuare il confronto tra la trasmittanza ed il flusso termico attraverso la parete esposta a nord nella situazione *ante* e *post operam* (mettendo anche in relazione gli esiti delle valutazioni della fase di simulazione e di monitoraggio) per verificare il miglioramento della prestazione energetica.



Figura 2 Schema Fasi Processo Metodologico

2 Selezione e rilievo dell'edificio-dimostratore

La ricerca sperimentale è stata condotta attraverso una campagna di monitoraggio su una casa cantoniera di proprietà della Regione Lazio, situata lungo la via Nettunense km 26 + 600, in località Campo di Carne (Figura 3), distinta al catasto fabbricati al Foglio 133, particella 16.



Figura 3 Inquadramento territoriale

L'edificio oggetto d'intervento costituisce un esempio rappresentativo del patrimonio immobiliare nazionale in quanto:

- ha una destinazione d'uso residenziale che secondo i dati ISTAT costituisce l'84% del patrimonio edilizio nazionale ammontando complessivamente a 12.187.698 unità su 14.515.795;
- tipologia costruttiva in muratura portante, che risulta la più diffusa a livello nazionale con una media del 57%, contro il 29% del calcestruzzo armato e il 13% composto da materiali diversi, secondo quanto rilevato dal 15° censimento della popolazione e delle abitazioni del 2011.

L'immobile si trova in zona climatica C, dove si colloca il 22,1% degli edifici residenziali nazionali.

La possibilità di usufruire di uno spazio abitativo da adibire a dimostratore/laboratorio nasce nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra la Regione Lazio e il Centro Interdipartimentale Territorio Edilizia Restauro Ambiente – CITERA, autorizzato con D.G.R. n. 7 del 21/01/2020, finalizzato alle attività di sperimentazione di elementi modulari per efficientamento dell'involucro edilizio (D.G.R. n. 314 del 29/05/2020, Oggetto: "Accordo di collaborazione Regione Lazio/Centro Interdipartimentale Territorio Edilizia Restauro Ambiente – CITERA dell'Università La Sapienza di Roma di cui alla D.G.R. n.7 del 21/01/2020. Adesione al progetto di ricerca promosso dal CITERA in materia di sostenibilità ed efficienza energetica degli edifici").

I risultati si configurano come un progetto pilota replicabile per la riqualificazione energetica di immobili di proprietà della Regione, poiché forniranno soluzioni utili ai responsabili delle politiche edilizie cui spetta il compito di promuovere interventi più efficaci e ambientalmente sostenibili per rendere gli edifici meno energivori, in linea con gli obiettivi programmatici europei e nazionali.

L'edificio dismesso si sviluppa su due piani per una superficie lorda di circa 180 mq.

Si riportano nella seguente tabella i dati geometrici dell'intero edificio:

Tabella 1 Dati geometrici dell'edificio-dimostratore

Superficie in pianta netta	92,07	m²
Superficie esterna lorda	505,99	m ²
Volume netto	262,60	m ³
Volume lordo	468,02	m ³
Rapporto S/V	1,08	m ⁻¹

L'immobile è caratterizzato da una muratura portante realizzata con la seguente stratigrafia:

- 2 cm intonaco interno

- 51 cm tufo
- 2 cm intonaco esterno



Figura 4 Edificio oggetto di monitoraggio (ante operam) – prospetto Est



Figura 5 Edificio oggetto di monitoraggio – prospetto Ovest



Figura 6 Edificio oggetto di monitoraggio – prospetto Sud



Figura 7 Edificio oggetto di monitoraggio – prospetto Nord

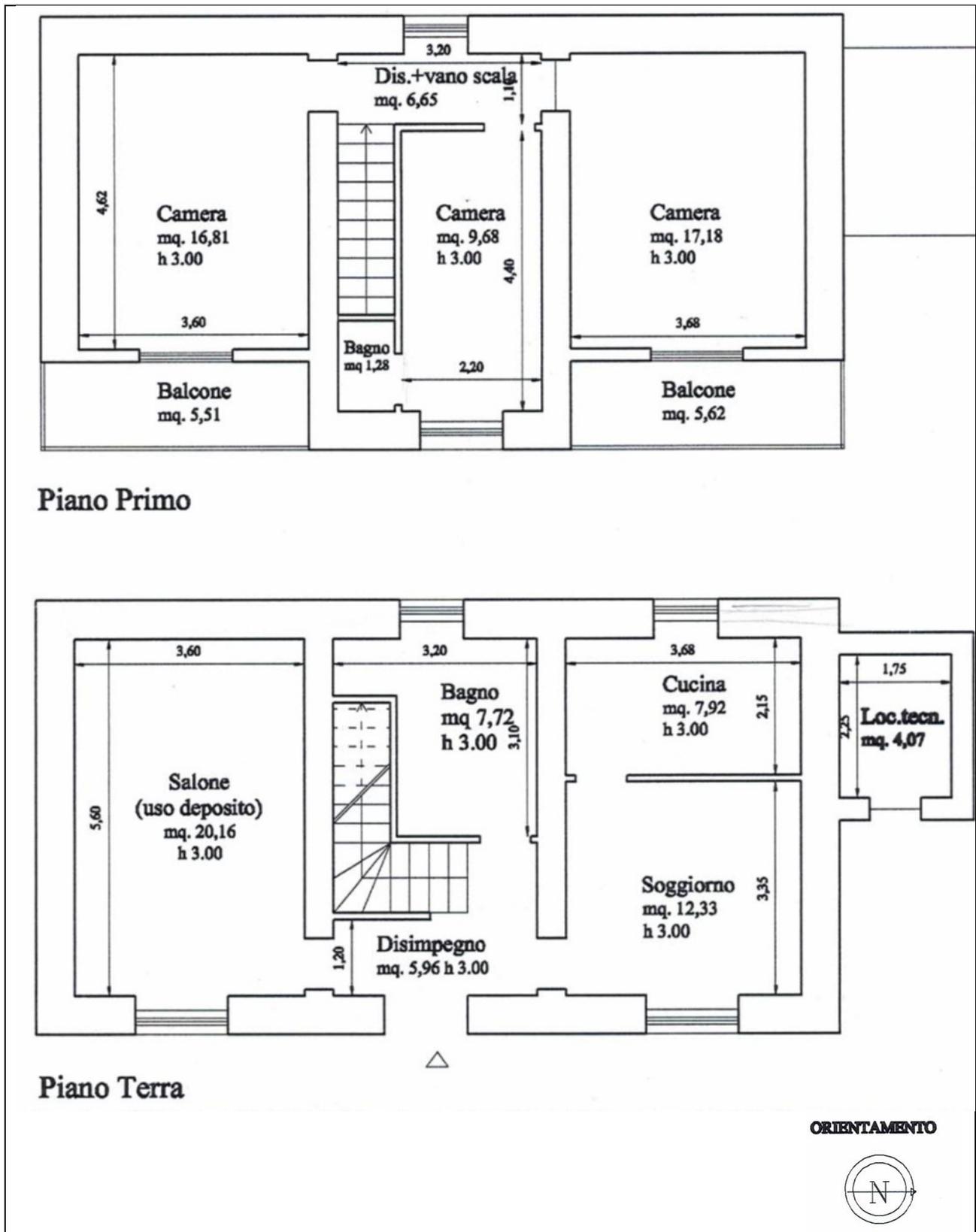


Figura 8 Piantre dell'edificio oggetto d'intervento

Il rilievo architettonico dell'edificio oggetto d'intervento è stato effettuato attraverso sia il metodo diretto sia indiretto. Quest'ultimo è stato realizzato tramite tecniche basate su sensori attivi (metodi *range-based*), in particolare attraverso tecnologia laser-scanning *LiDAR - Light Detection and Ranging*. Con il rilievo

effettuato tramite LiDAR è stato possibile ottenere una nuvola di punti che contiene al suo interno informazioni geografiche su tutti gli elementi riflettenti presenti (Figura 9). La nuvola di punti generata può essere ulteriormente post-processata per creare un Building Information Model (BIM) [20], che descrive le caratteristiche relazionali e gli attributi degli elementi dell'edificio.

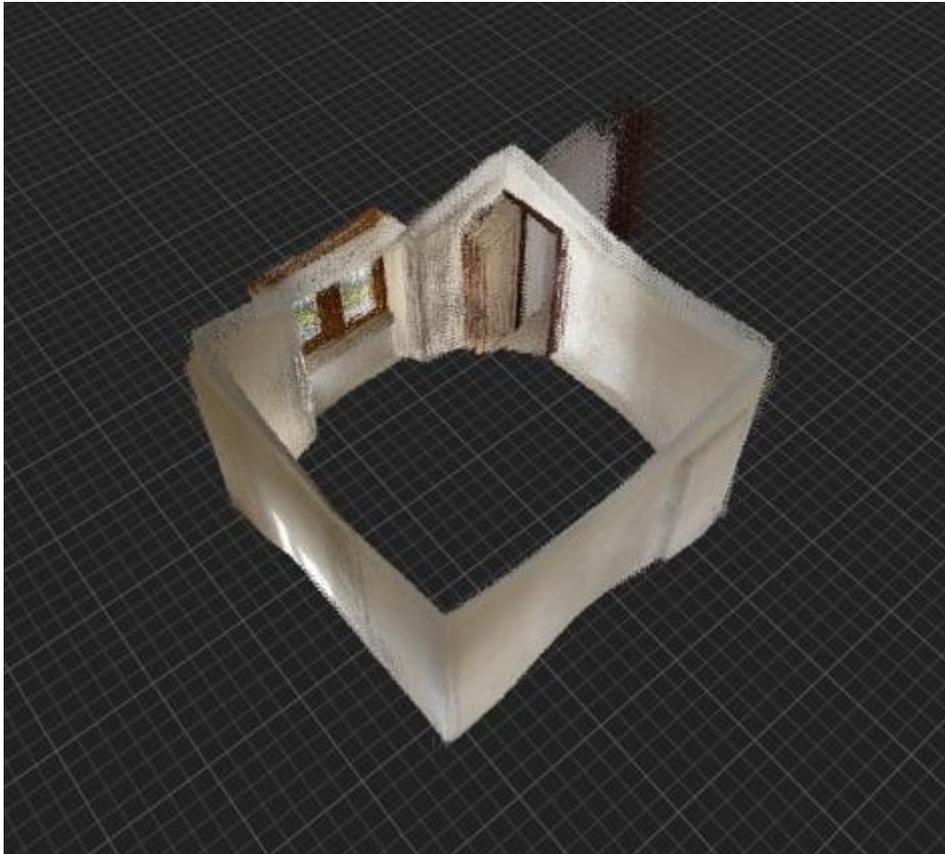


Figura 9 Rilievo architettonico dell'ambiente monitorato tramite tecnologia LiDAR

L'edificio risulta privo di impianti di climatizzazione, pertanto, per effettuare il monitoraggio è stata installata una stufa elettrica in modo da poter raggiungere in tempi congrui la temperatura interna di setpoint invernale. L'immobile è stato oggetto di interventi di ristrutturazione per renderlo idoneo al monitoraggio del flusso termico sia ante sia post efficientamento della chiusura opaca verticale.

Gli interventi consistono nella sostituzione di vecchi serramenti con vetro singolo e telaio in legno con infissi dotati di vetrocamera nel rispetto dei valori di trasmittanza previsti per la zona climatica C ($1,75 \text{ W/m}^2\text{K}$), dall'allegato E "Requisiti degli interventi di isolamento termico" del DECRETO 6 agosto 2020 "Requisiti delle asseverazioni per l'accesso alle detrazioni fiscali per la riqualificazione energetica degli edifici - cd. Ecobonus". Sono state inoltre installate porte interne per delimitare l'ambiente monitorato.

3 Verifica ipotesi di riqualificazione energetica

Durante il secondo anno di ricerca per poter effettuare una scelta consapevole e critica, all'interno di un'ampia gamma di disponibilità di isolanti offerti dal mercato, che differiscono tra loro per prestazioni, per tipologia e origine, per modalità d'impiego e di produzione, è stata svolta una comparazione fra le peculiarità di ogni materiale. I parametri che sono stati utilizzati per consentire tale confronto hanno riguardato non soltanto la capacità di isolamento in regime invernale ed estivo, ma anche l'impatto ambientale, la tipologia d'impiego e il costo (Figura 10).

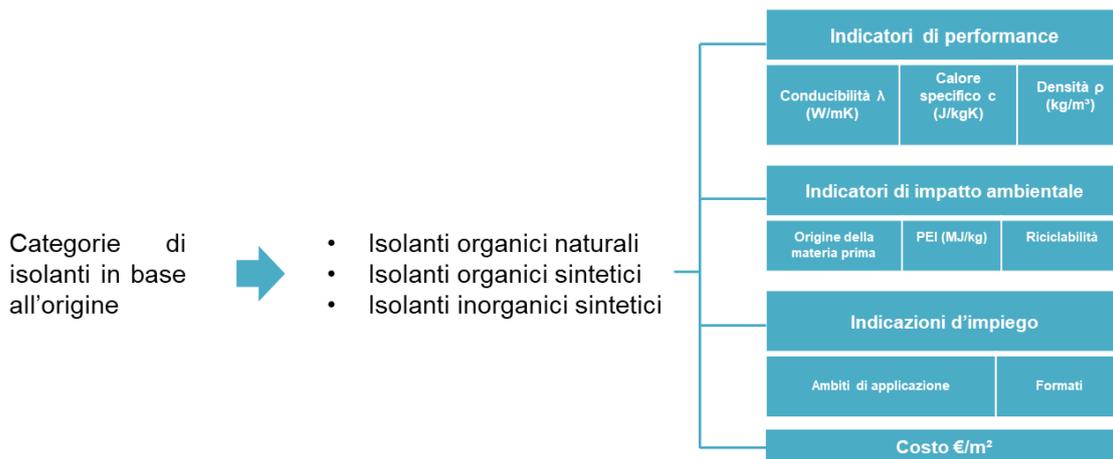


Figura 10 Parametri di confronto per la selezione degli isolanti

Tra i 18 materiali coibenti studiati sono stati selezionati, sulla base dei parametri sopra descritti, la fibra di legno, il poliuretano espanso rigido, l'aerogel e la lana di roccia. Si riportano in Tabella 2 le caratteristiche dei quattro isolanti scelti per i componenti edilizi di efficientamento dell'involucro.

Tabella 2 Caratteristiche dei materiali isolanti selezionati

Materiale isolante	Fattore di resistenza al vapore μ	Indicatori di performance			Indicatori di impatto ambientale			Indicazioni d'impiego		Fascia di prezzo al m ²
		Conducibilità λ (W/mK)	Calore specifico c (J/kgK)	Densità ρ (kg/m ³)	Origine della materia prima	PEI (MJ/kg)	Riciclabilità	Ambiti di applicazione	Formati	
Fibra di legno	5-10	0,038 – 0,040	2100	50 - 280	Rinnovabile: legno, solfato di ammonio, paraffina	17	si	Cappotto esterno/interno, parete ventilata	Pannelli materassini	Medio
Poliuretano espanso rigido	30-150	0,022	1400	38	Non rinnovabile: petrolio, poliali e poliisocianati, agenti espandenti ed ignifughi	80-90	Si, in pochi casi	Cappotto esterno/interno, parete ventilata	pannelli	Basso
Aerogel	5	0,015	1000	150 - 350	98% di aria e 2% di silice amorfa	35,5	si	Isolamento interno	pannelli	Alto
Lana di roccia	1-2	0,032	1030	25 - 200	Riciclaggio mattoni, diabase, dolomite, resina sintetica, agenti idrorepellenti	22,12	Si, ma in pochi casi	Cappotto esterno/interno, parete ventilata	Pannelli	Basso

diversi tipi di materiali coibenti individuati sono stati associati in base alle loro proprietà, alle principali soluzioni di riqualificazione quali isolamento dall'esterno e dall'interno, come riportato in Tabella 3.

Tabella 3 Isolanti associati a ciascun sistema di isolamento

ISOLAMENTO DALL'ESTERNO	Sistema a cappotto	Lana di roccia Fibra di legno
	Parete ventilata	Poliuretano espanso rigido Lana di roccia
ISOLAMENTO DALL'INTERNO	Isolamento interno	Aerogel Polistirene estruso (XPS)

Tra i sistemi di isolamento quelli applicabili dall'esterno dell'involucro edilizio consentono di eliminare completamente i ponti termici che si verificano per le discontinuità di natura geometrica o materica.

Dal grafico a quadranti (Figura 11) che consente di confrontare l'impatto ambientale attraverso il PEI (sull'asse dell'ordinata) e la performance espressa attraverso il valore della conducibilità termica (sull'asse dell'ascissa), si evince chiaramente che tra i cinque materiali coibenti selezionati, escludendo l'aerogel impiegato per l'isolamento dall'interno, la lana di roccia risulta il materiale con il miglior rapporto performance/impatto ambientale.

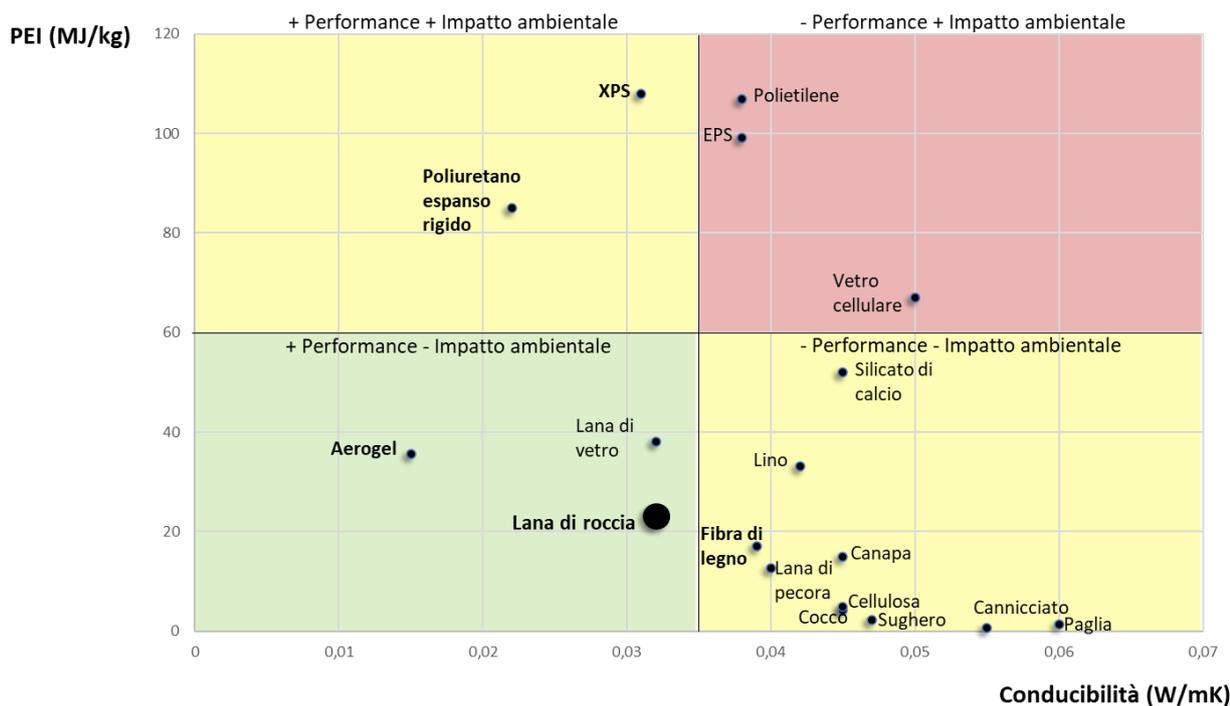


Figura 11 Confronto tra impatto ambientale e performance dei materiali isolanti

La lana di roccia grazie alla sua struttura particolare è idrorepellente e pertanto mantiene inalterate le sue proprietà nel tempo e non favorisce la formazione di muffe, funghi o batteri; è ignifuga e un ottimo materiale fonoassorbente.

Sono stati selezionati due sistemi di isolamento quale cappotto e parete ventilata che possono far parte di un unico processo di produzione modulare, in quanto è possibile integrare la soluzione a cappotto con profili diversi/distanziatori che consentono di creare un'intercapedine di aria ventilata.

Ciò permette di ottimizzare la filiera produttiva dei sistemi di efficientamento dell'involucro edilizio opaco secondo i criteri dell'edilizia *off-site*.

3.1 Sistema a cappotto – SC.01

Nel corso del secondo anno, sono state svolte delle simulazioni mediante fogli di calcolo, applicando ad ognuna delle tipologie di pareti presenti nell'Abaco delle Chiusure Verticali Opache del patrimonio edilizio residenziale, le diverse soluzioni di riqualificazione selezionate, con diversi spessori di isolante, per poter identificare lo spessore che soddisferebbe i requisiti richiesti a seconda delle diverse zone climatiche, nella maggiore percentuale di edifici residenziali presenti sul territorio nazionale.

Lo scopo di questa analisi è stato quello di poter identificare uno spessore di materiale isolante per ciascuna delle soluzioni tecnologiche scelte, per sviluppare una metodologia in cui le prestazioni degli scenari di isolamento vengono precalcolate per indirizzare la catena di produzione verso soluzioni standardizzate più efficienti e sostenibili. In questo modo la filiera industriale si concentrerebbe su una produzione standardizzata, a seconda delle diverse tipologie di sistemi, con uno specifico spessore di isolante. Lo spessore di isolante proposto è quello che, a seguito di una valutazione mirata, è stato individuato come quello che ha la maggiore applicabilità sul territorio nazionale. Tale valutazione è stata effettuata moltiplicando la percentuale di applicabilità sulle diverse tipologie di chiusura verticale opaca (calcolata in base ai requisiti minimi di trasmittanza stazionaria previsti da normativa vigente) per la percentuale di edifici residenziali nazionali presenti in ogni zona climatica desunta dai dati ISTAT.

Sono state infine sommate le percentuali di edifici residenziali che rispettano i valori limite in regime invernale previsti da normativa vigente a seguito dell'intervento di efficientamento in ogni zona climatica (Decreto 6 agosto 2020), per ottenere la percentuale totale di edifici residenziali nazionali nei quali la

soluzione è applicabile. È stata svolta anche una verifica del valore limite della trasmittanza periodica previsto da normativa per le soluzioni standardizzate proposte. La scelta delle soluzioni è stata effettuata inoltre valutando il maggior soddisfacimento dei limiti prestazionali previsti da normativa vigente, in particolare per la zona climatica E, che risulta caratterizzata secondo dati ISTAT, dalla maggior consistenza percentuale di edifici residenziali.

Attraverso questo studio è stato possibile valutare la percentuale di applicabilità delle soluzioni isolanti sul patrimonio edilizio nazionale in base alle zone climatiche.

La metodologia adottata all'interno del foglio di calcolo delle simulazioni per l'individuazione dello spessore dei materiali isolanti selezionati precedentemente ed utilizzati per i sistemi di coibentazione delle chiusure verticali opache proposti, è schematizzata nella seguente figura:

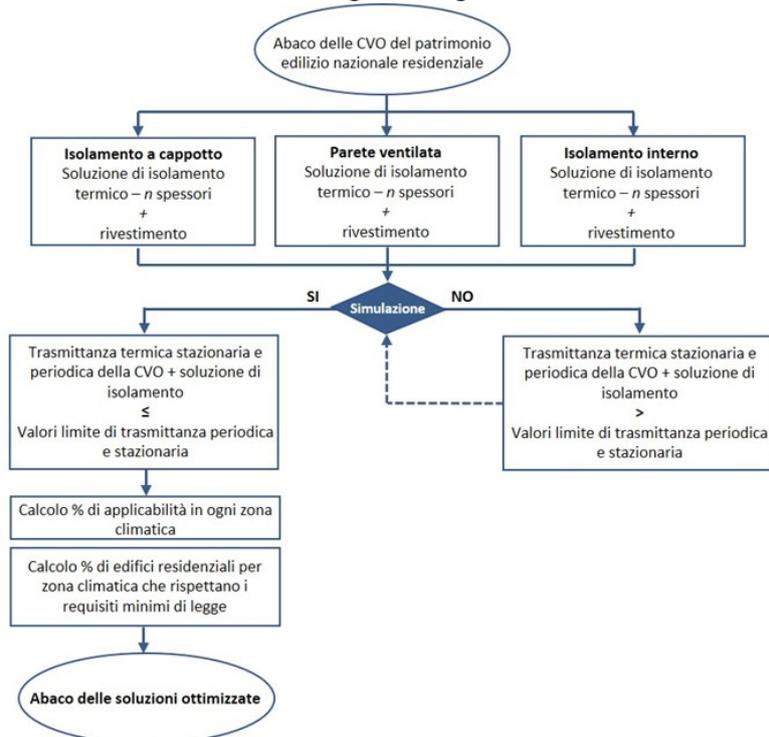


Figura 12 - Diagramma di flusso della metodologia per identificare soluzioni di isolamento standardizzate.

In particolare, nel caso del sistema a cappotto con materiale isolante in lana di roccia, le simulazioni sono state effettuate con gli spessori da 6 cm, 8 cm, 10 cm e 12 cm ed è emerso che per poter garantire la maggior applicabilità sul patrimonio edilizio residenziale nazionale, risulta necessario applicare un pannello isolante in lana di roccia da 12 cm di spessore. Nella figura seguente si riportano i dati emersi.

SINTESI			
SISTEMA A CAPPOTTO - SOLUZIONE SC.1			
ISOLANTE			RISULTATI DELLA VALUTAZIONE % di edifici residenziali per zona climatica che rispettano i valori limite in regime invernale a seguito dell'efficientamento A-B 100% C 100% D 100% E 83% F 73% % totale di edifici residenziali nazionali sui quali la soluzione è applicabile per rispettare i valori limite previsti da normativa vigente in seguito all'efficientamento 91% in regime invernale 100% in regime estivo
Spessore	[m]	0,12	
Conducibilità	[W/mK]	0,032	
Calore specifico	[J/kgK]	1030	
Densità	[kg/m ³]	30	
PANNELO CALCIO SILICATO			
Spessore	[m]	0,012	
Conducibilità	[W/mK]	0,39	
Calore specifico	[J/kgK]	900	
Densità	[kg/m ³]	1200	
FINITURA - RASATURA			
Spessore	[m]	0,005	
Conducibilità	[W/mK]	0,9	
Calore specifico	[J/kgK]	1000	
Densità	[kg/m ³]	1800	
SPESSORE TOT		0,137	

Figura 13 - Simulazione SC.01 con isolante in lana di roccia di spessore 12 cm

Il sistema a cappotto individuato sulla base degli studi svolti durante la seconda annualità di ricerca è contraddistinto dall'impiego della lana di roccia, materiale isolante di tipo inorganico sintetico utilizzato in forma di pannelli isolanti semirigidi, fissati alla muratura esistente mediante un sistema di aggancio composto da profili di acciaio zincato applicati con un passo di 60 cm e staffe tassellate. La finitura è composta da lastre in calcio silicato da 12 mm di spessore che vanno successivamente trattate con uno strato di rasatura con rete interposta per sigillare al meglio le fughe ed evitare infiltrazioni di acqua meteorica che potrebbero danneggiare l'isolante (Figura 14).

Le fasi d'installazione consistono in:

1. applicazione di staffe metalliche di ancoraggio: le staffe metalliche hanno il compito di sostenere gli strati di finitura esterni e di trasferire i carichi alla parete esistente retrostante. In seguito ad una prima fase di tracciamento, tali staffe vengono fissate al paramento murario mediante l'utilizzo di tasselli adeguatamente dimensionati;
2. posa e fissaggio del pannello isolante: la posa dei pannelli isolanti in lana di roccia avviene tramite fissaggio meccanico. I pannelli devono essere posizionati realizzando l'accostamento tra gli stessi, al fine di garantire la continuità dello strato isolante; questo contribuirà così al miglioramento delle prestazioni termiche, acustiche;
3. struttura portante - profili montanti verticali e/o trasversi: la struttura portante, realizzata tramite profili montanti verticali e/o trasversi, opportunamente assemblati, dotati di idonee forometrie necessarie ai fissaggi ed all'assemblaggio, viene fissata alle staffe metalliche di ancoraggio con lo scopo di supportare i carichi gravanti sulla struttura del sistema di facciata;
4. posa pannello in calcio silicato: posa del pannello in calcio silicato tramite avvitamento all'orditura metallica con apposite viti zincate, auto-fresanti ed auto-foranti;
5. rasatura e finitura: le fughe esterne tra le lastre in calcio silicato andranno riempite con idoneo prodotto rigido bicomponente con interposta rete in fibra di vetro.

In base alle simulazioni svolte lo spessore del materiale coibente che consente la maggior applicazione sul patrimonio edilizio residenziale nazionale, è di 12 cm.

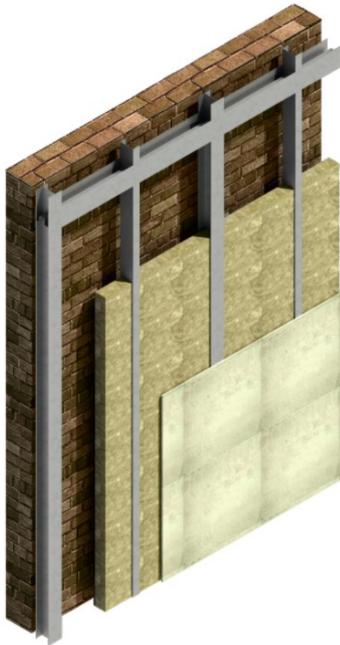
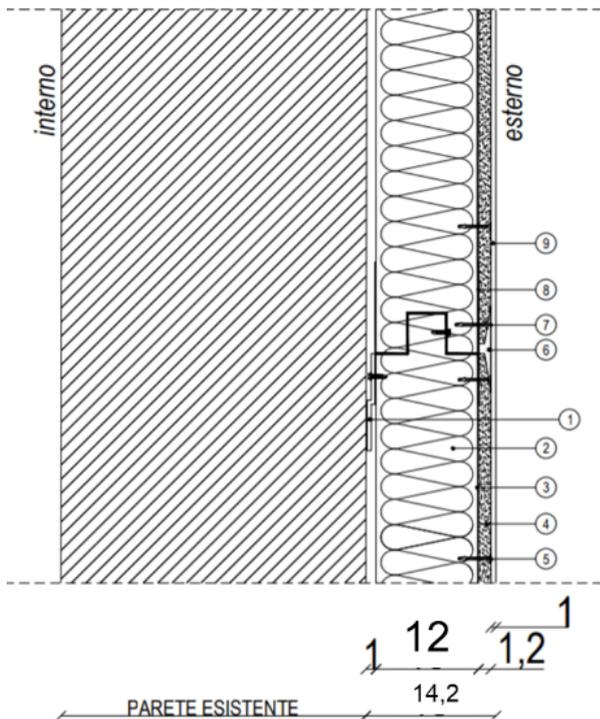


Figura 14 Sistema di isolamento a cappotto con sottostruttura metallica



DETTAGLI TECNICI

- 1 Struttura di aggancio con profili d'acciaio zincato 0,012 m, sezione 0,05 – 0,1 – 0,05, passo 0,6 m, staffe tassellate 0,03/0,01 m
- 2 Pannello isolante semirigido in lana minerale 0,12 m
- 3 Montante
- 4 Lastra in calcio silicato 0,012 m ad elevata densità 1.200 kg/m³
- 5 Vite 4.2*32 per lastra UR
- 6 Stucco biocomponente rigido peer il trattamento delle fughe delle lastre UR
- 7 Rete da 0,05 m per le fughe delle lastre UR, 165 gr/m²
- 8 Guida inferiore di sezione ad «U» da 0,1 m
- 9 Rasatura



INDICATORI DI PERFORMANCE

ISOLANTE				PANNELLO IN CALCIO SILICATO				RASATURA/FINITURA			
Spessore	Conducibilità	Calore specifico	Densità	Spessore	Conducibilità	Calore specifico	Densità	Spessore	Conducibilità	Calore specifico	Densità
(s)	(λ)	(c)	(ρ)	(s)	(λ)	(c)	(ρ)	(s)	(λ)	(c)	(ρ)
[m]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m ³]	[m]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m ³]	[m]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m ³]
0,12	0,032	1300	30	0,012	0,39	900	1200	0,005	0,7	1000	1400

Figura 15 Modulo standardizzato per il sistema di isolamento a cappotto

3.2 Parete ventilata – PV.02

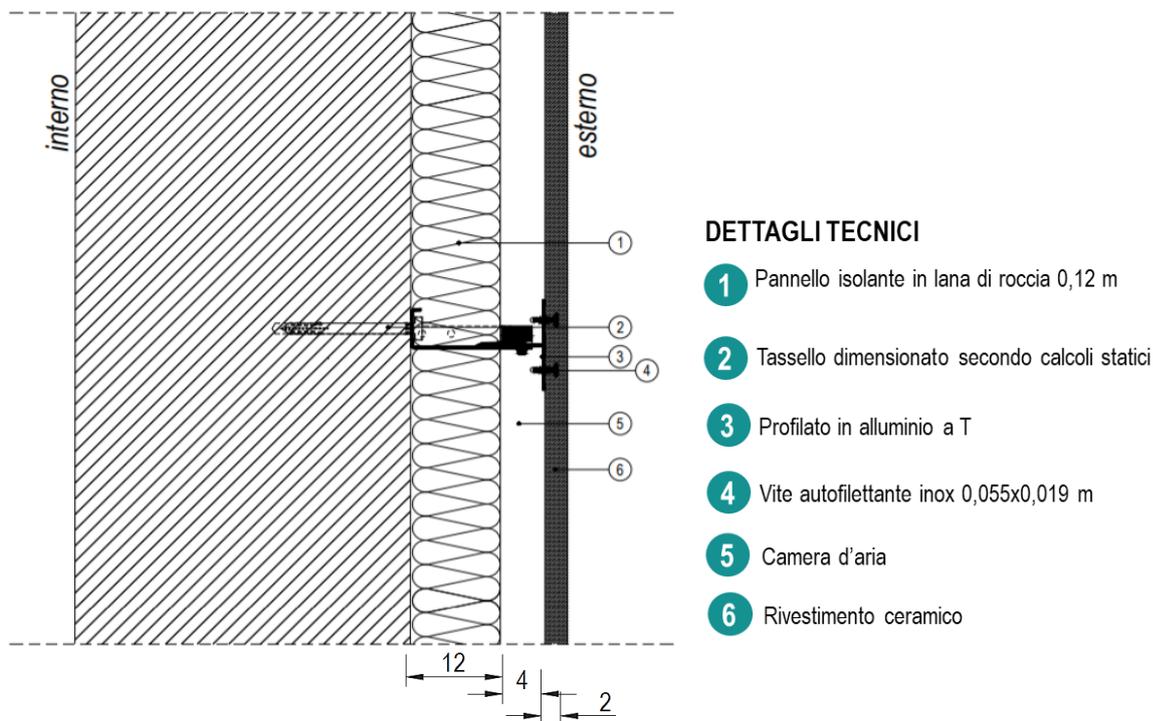
Il sistema della parete ventilata individuato sulla base degli studi svolti durante la seconda annualità di ricerca è contraddistinto dall'impiego della lana di roccia utilizzato anche in questo caso in forma di pannelli isolanti semirigidi da 12 cm. Questi vengono posizionati a contatto con la muratura esistente, previo fissaggio di staffe, alle quali verrà successivamente fissata la struttura portante composta da profili ai quali a loro volta vengono fissate le lastre di finitura.

La posa è quindi molto veloce per la sua completa realizzazione a secco nel caso di finitura in materiale ceramico/lapideo/ligneo/plastico.

Le fasi d'installazione prevedono:

1. applicazione staffe metalliche di ancoraggio: le staffe metalliche hanno il compito di sostenere gli strati di finitura esterni e di trasferire i carichi alla parete esistente retrostante. In seguito ad una prima fase di tracciamento, tali staffe vengono fissate al paramento murario mediante l'utilizzo di tasselli adeguatamente dimensionati;
2. posa e fissaggio del pannello isolante: la posa dei pannelli isolanti in lana di roccia avviene tramite fissaggio meccanico. I pannelli devono essere posizionati realizzando l'accostamento tra gli stessi, al fine di garantire la continuità dello strato isolante; questo contribuirà così al miglioramento delle prestazioni termiche, acustiche;
3. struttura portante - profili montanti verticali e/o trasversi: la struttura portante, realizzata tramite profili montanti verticali e/o trasversi, opportunamente assemblati, dotati di idonee forometrie necessarie ai fissaggi ed all'assemblaggio, viene fissata alle staffe metalliche di ancoraggio con lo scopo di supportare i carichi gravanti sulla struttura del sistema di facciata;
4. posa del rivestimento: posa delle lastre di rivestimento attraverso ancoraggio meccanico.

In base alle simulazioni svolte lo spessore del materiale coibente che consente la maggior applicazione sul patrimonio edilizio residenziale nazionale, è di 12 cm.





INDICATORI DI PERFORMANCE

ISOLANTE				CAMERA D'ARIA				RIVESTIMENTO			
Spessore	Conducibilità	Calore specifico	Densità	Spessore	Conducibilità	Calore specifico	Densità	Spessore	Conducibilità	Calore specifico	Densità
(s)	(λ)	(c)	(ρ)	(s)	(λ)	(c)	(ρ)	(s)	(λ)	(c)	(ρ)
[m]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m ³]	[m]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m ³]	[m]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m ³]
0,12	0,032	1030	30	0,04	0,25	1000	1300	0,02	1,3	840	2000

Figura 16 Modulo standardizzato per il sistema di isolamento a parete ventilata

Anche nel caso della parete ventilata con materiale isolante in lana di roccia, le simulazioni sono state effettuate con gli spessori da 6 cm, 8 cm, 10 cm e 12 cm ed è emerso che per poter garantire la maggior applicabilità sul patrimonio edilizio residenziale nazionale, risulta necessario applicare un pannello isolante in lana di roccia da 12 cm di spessore. Nella figura seguente si riportano i dati emersi.

SINTESI			PARETE VENTILATA - SOLUZIONE PV.2	
ISOLANTE			RISULTATI DELLA VALUTAZIONE	
Spessore	[m]	0,12	% di edifici residenziali per zona climatica che rispettano i valori limite in regime invernale a seguito dell'efficientamento	
Conducibilità	[W/mK]	0,032	A-B	100%
Calore specifico	[J/kgK]	1030	C	100%
Densità	[kg/m ³]	30	D	100%
ARIA VENTILATA			E	87%
Spessore	[m]	0,04	F	80%
Conducibilità	[W/mK]	0,25	% totale di edifici residenziali nazionali sui quali la soluzione è applicabile per rispettare i valori limite previsti da normativa vigente in seguito all'efficientamento	
Calore specifico	[J/kgK]	1000	93%	in regime invernale
Densità	[kg/m ³]	1300	100%	in regime estivo
FINITURA GRES				
Spessore	[m]	0,02		
Conducibilità	[W/mK]	1,3		
Calore specifico	[J/kgK]	840		
Densità	[kg/m ³]	2000		
SPESSORE TOT		0,18		

Figura 17 Simulazione PV.02 con isolante in lana di roccia di spessore 12 cm

4 Modellazione energetica dell'edificio-dimostratore

È stato realizzato un Building Energy Modeling (BEM) dell'edificio oggetto d'intervento utilizzando un software certificato², per la verifica delle prestazioni energetiche che contiene le seguenti informazioni:

1. Ubicazione del modello;
2. Caratteristiche tecniche dell'involucro verticale esterno, partizioni, chiusure orizzontali;
3. Volumi delle zone riscaldate e non;
4. Impianti.



Figura 18 Modello BEM dell'edificio oggetto di monitoraggio

Le simulazioni sono state effettuate sia per l'intero anno di riscaldamento previsto da normativa vigente in base alle diverse zone climatiche, sia per il periodo di monitoraggio: nel primo caso il calcolo delle prestazioni globali estese all'intero anno è stato realizzato per l'*ante operam* in tre diverse zone climatiche (C, D ed E) e *post operam* con applicazione di ipotesi di riqualificazione di tutte le superfici verticali esterne disperdenti alternativamente con sistemi SC.01 e PV.02.

Nel secondo caso è stato effettuato il calcolo delle prestazioni *ante operam* e nella condizione *post operam* a valle dell'applicazione della soluzione SC.01 di isolamento sulla parete Nord, simulate in zona climatica C per il periodo corrispondente al monitoraggio in situ ovvero dall'11/12/2021 al 13/12/2021 e dal 18/12/2021 al 20/12/2021.

² Software certificato dal Comitato Termotecnico Italiano per la conformità di calcolo alle norme UNI/TS 11300- 1:2014, UNI/TS11300-2:2014, UNI/TS 11300-3:2010, UNI/TS 11300-4:2016, 11300-5:2016, 11300-6:2016 e UNI EN 15193:2008.

4.1 Ubicazione del modello

L'edificio-dimostratore è situato in località Campo di Carne, che fa parte del comune di Aprilia, in zona climatica C, in una zona rurale particolarmente esposta ai venti. Si riportano nella figura e nelle tabelle seguenti i dati climatici della località.

COMUNE

Comune CAP

Provincia Sigla

Regione

Dati geografici

DATI INVERNALI DI PROGETTO **DATI ESTIVI DI PROGETTO**

Zona Climatica C

Temperatura esterna [°C] Temperatura esterna [°C]

Umidità relativa esterna [%] Umidità relativa esterna [%]

Gradi Giorno Escursione termica giornaliera [°C]

Velocità Vento [m/s] Riduzione irrad. TOT per foschia [%]

Figura 19 Dati climatici della località

Tabella 4 Umidità relativa mensile – zona climatica C

Descrizione	u.m.	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Umidità relativa mensile	%	81,1	70,9	67,6	73,8	63,5	68,0	58,1	57,9	68,5	72,3	77,2	84,2

Tabella 5 Temperature esterne medie mensili – zona climatica C

Descrizione	u.m.	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Temperatura	°C	9,1	8,9	11,2	14,5	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5	18,5	13,0	9,5

Tabella 6 Irradiazione solare media mensile – zona climatica C

Esposizione	u.m.	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Nord	MJ/m ²	2,0	3,0	4,2	6,1	9,3	10,2	10,3	7,1	5,0	3,6	2,3	1,8
Nord-Est	MJ/m ²	2,3	4,0	6,2	9,2	13,1	13,6	14,2	10,7	7,8	5,1	2,7	1,9
Est	MJ/m ²	4,6	7,9	10,0	12,5	16,2	16,0	17,1	14,1	11,6	9,0	5,5	4,1
Sud-Est	MJ/m ²	7,5	11,5	12,2	12,9	14,7	13,6	14,8	13,7	13,1	12,2	8,7	7,2
Sud	MJ/m ²	9,5	13,7	12,6	11,3	11,5	10,1	11,2	11,2	12,5	13,7	10,7	9,2
Sud-Ovest	MJ/m ²	7,5	11,5	12,2	12,9	14,7	13,6	14,8	13,7	13,1	12,2	8,7	7,2
Ovest	MJ/m ²	4,6	7,9	10,0	12,5	16,2	16,0	17,1	14,1	11,6	9,0	5,5	4,1
Nord-Ovest	MJ/m ²	2,3	4,0	6,2	9,2	13,1	13,6	14,2	10,7	7,8	5,1	2,7	1,9
Orizz. Diffusa	MJ/m ²	2,9	4,0	5,6	7,5	9,2	8,9	9,1	7,7	6,5	4,8	3,2	2,5
Orizz. Diretta	MJ/m ²	3,0	6,4	8,5	11,1	15,8	16,3	17,6	13,6	10,3	7,5	3,9	2,7

Irradianza sul piano orizzontale nel mese di massima insolazione:	309 W/m ²
---	-----------------------------

4.2 Caratteristiche energetiche dell'involucro opaco e trasparente ante-operam

L'edificio è caratterizzato da una muratura portante in blocchi di tufo, legata da malta a base di calce e sabbia locale, con una finitura ad intonaco.

Le chiusure orizzontali sono contraddistinte da un solaio in latero-cemento.

Gli infissi installati sono dotati di un telaio in legno e vetro-camera con intercapedine d'aria.

Tramite software sono state calcolate le caratteristiche termofisiche delle strutture opache verticali ed orizzontali dell'involucro edilizio (calcolo trasmittanza termica, calcolo resistenza termica, ecc.).

Nelle simulazioni sono stati considerati i ponti termici con il metodo del calcolo percentuale (5%) e le resistenze liminari secondo l'appendice A della UNI EN ISO 6946. Le opzioni di calcolo sono state impostate secondo il regime normativo UNI/TS 11300-4 e 5:2016, il rendimento globale medio stagionale in base alle FAQ ministeriali (agosto 2016) e le verifiche di condensa interstiziale secondo la UNI EN ISO 13788.

Si riportano di seguito le stratigrafie e i relativi valori di trasmittanza e le verifiche di condensa delle chiusure verticali e orizzontali opache e trasparenti dello stato di fatto (Tabelle 7 -9).

Tabella 7 Elenco chiusure verticali e partizione interna ante operam

Codice	Descrizione	Sp [mm]	Ms [kg/m ²]	C _T [kJ/m ² K]	ε [-]	α [-]	θ [°C]	Ue [W/m ² K]
M100	Parete esterna in tufo 55 cm - T	550,0	816	58,743	0,90	0,90	1,6	0,893
M101	Parete esterna in tufo 55 cm - E	550,0	816	58,743	0,90	0,90	1,6	0,893
M102	Parete esterna in tufo 35 cm - E	350,0	496	60,947	0,90	0,90	1,6	1,293
M103	Parete esterna in tufo 40 cm - T	400,0	576	59,577	0,90	0,90	1,6	1,162
M104	Parete esterna in tufo 20 cm - T	200,0	256	67,316	0,90	0,90	1,6	1,946
M105	Parete esterna in tufo 55 cm - U	550,0	816	58,803	0,90	0,60	0,0	0,848
M200	Parete interna 10 cm - D	100,0	112	55,591	0,90	0,60	-	2,247
M201	Parete interna 10 cm - U	100,0	112	55,591	0,90	0,60	0,0	2,360
M202	Parete interna in tufo 40 cm - D	400,0	608	59,833	0,90	0,60	-	1,025
M203	Parete interna in tufo 40 cm - U	400,0	608	59,833	0,90	0,60	0,0	1,076

Tabella 8 Elenco chiusure orizzontali inferiori ante operam

Codice	Descrizione	Sp [mm]	Ms [kg/m ²]	C _T [kJ/m ² K]	ε [-]	α [-]	θ [°C]	Ue [W/m ² K]
P1	Pavimento su terreno - G	530,0	1019	57,228	0,90	0,60	1,6	0,588
P2	Soletta interpiano - N	315,0	443	61,744	0,90	0,60	20,0	1,423
P3	Soletta interpiano - U	315,0	443	61,744	0,90	0,60	12,0	1,423
S1	Soletta interpiano	315,0	443	69,136	0,90	0,60	20,0	1,756
S2	Soletta interpiano - U	315,0	443	69,136	0,90	0,60	12,0	1,756
S3	Soletta interpiano - T	315,0	443	70,386	0,90	0,90	1,6	1,856

Legenda simboli

- Sp Spessore struttura
- Ms Massa superficiale della struttura senza intonaci
- C_T Capacità termica areica
- ε Emissività
- α Fattore di assorbimento
- θ Temperatura esterna o temperatura locale adiacente
- Ue Trasmittanza di energia della struttura
- T Da locale climatizzato verso l'esterno
- G Da locale climatizzato verso terreno
- E Locale non climatizzato verso l'esterno
- U Da locale climatizzato verso locali non climatizzati
- D Divisorio interno alla zona climatizzata

Tabella 9 Elenco chiusure verticali - infissi ante operam

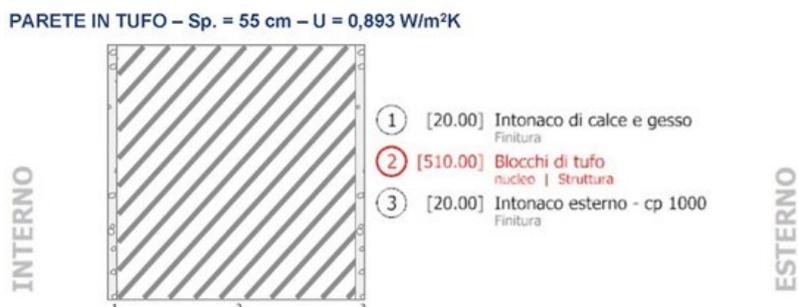
Codice	Descrizione	vetro	ϵ	ggl,n	fc inv	fc est	H [cm]	L [cm]	Ug [W/m ² K]	Uw [W/m ² K]	θ [°C]	Agf [m ²]	Lgf [m]
W100	AO1 Finestra sala - T	S	0,837	0,85	1	1	150,0	144,0	5,003	4,511	1,6	1,806	8,18
W101	AO2 Finestra cucina e bagno - T	S	0,837	0,85	1	1	150,0	98,0	5,003	4,517	1,6	1,232	4,56
W200	AO3 Porta Finestra camera - T	S	0,837	0,85	1	1	210,0	142,0	5,003	4,494	1,6	2,477	12,88
W201	AO4 Finestra camera - T	S	0,837	0,85	1	1	146,0	142,0	5,003	4,502	1,6	1,727	7,98
W202	AO5 Finestra scale - E	S	0,837	0,85	1	1	150,0	100,0	5,003	4,522	1,6	1,260	4,60

Legenda simboli

ϵ	Emissività
ggl,n	Fattore di trasmittanza solare
fc inv	Fattore tendaggi (energia invernale)
fc est	Fattore tendaggi (energia estiva)
H	Altezza
L	Larghezza
Ug	Trasmittanza vetro
Uw	Trasmittanza serramento
θ	Temperatura esterna o temperatura locale adiacente
Agf	Area del vetro
Lgf	Perimetro del vetro

4.2.1 Chiusura verticale - parete perimetrale

La chiusura verticale opaca (da qui definita anche M100 nel modello energetico) oggetto di simulazione e monitoraggio ante e post-intervento di efficientamento è in blocchi di tufo intonacati (Figura 20).



N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di calce e gesso	20,00	0,7000	0,029	1400	1,00	10
2	Blocco in tufo	510,00	0,5500	0,927	1600	1,00	100
3	Malta di calce o di calce e cemento	20,00	0,9000	0,022	1800	1,00	22
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,068	-	-	-

Legenda simboli

s	Spessore	mm
Cond.	Conduttività termica, comprensiva di eventuali coefficienti correttivi	W/mK
R	Resistenza termica	m ² K/W
M.V.	Massa volumica	kg/m ³
C.T.	Capacità termica specifica	kJ/kgK
R.V.	Fattore di resistenza alla diffusione del vapore in capo asciutto	-

Figura 20 Stratigrafia chiusura verticale – parete perimetrale verticale in tufo da 55 cm

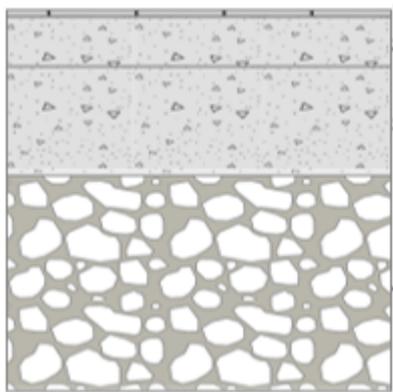
Si riportano in Tabella 10 le caratteristiche termiche e igrometriche della chiusura verticale opaca in tufo.

Tabella 10 Caratteristiche termiche e igrometriche della chiusura verticale opaca in tufo – 55 cm (M100)

Trasmittanza con maggiorazione ponte termico	0,893	W/m ² K
Maggiorazione ponte termico	5,00	%
Spessore	550	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	1,6	°C
Permeanza	3,873	10 ⁻¹² kg/sm ² Pa
Massa superficiale (con intonaci)	880	kg/m ²
Massa superficiale (senza intonaci)	816	kg/m ²
Trasmittanza periodica	0,023	W/m ² K
Fattore attenuazione	0,027	-
Sfasamento onda termica	-21,0	h

4.2.2 Chiusura orizzontale inferiore – solaio a terra

La chiusura orizzontale inferiore dell'edificio dimostratore è un solaio contro terra in calcestruzzo (Figura 21 - Tabella 11).



Area del pavimento	83,00 m ²
Perimetro disperdente del pavimento	38,20 m
Spessore pareti perimetrali esterne	550 mm
Conduttività termica del terreno	2,00 W/mK

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,170	-	-	-
1	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	10,00	1,3000	0,008	2300	0,84	9999999
2	Sottofondo di cemento magro	70,00	0,9000	0,078	1800	0,88	30
3	C.I.s. di sabbia e ghiaia	150,00	2,1500	0,070	2400	1,00	96
4	Ghiaia grossa senza argilla (um. 5%)	300,00	1,2000	0,250	1700	1,00	5
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,040	-	-	-

Figura 21 Stratigrafia chiusura orizzontale inferiore

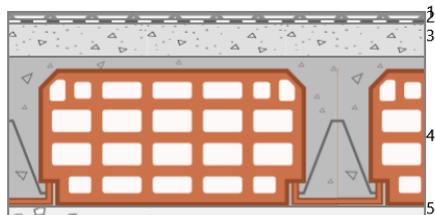
Tabella 11 Caratteristiche termiche e igrometriche della chiusura orizzontale inferiore

Trasmittanza con maggiorazione ponte termico	0,588	W/m ² K
Maggiorazione ponte termico	5,00	%
Spessore	530	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	1,6	°C
Permeanza	0,002	10-12kg/sm ² Pa
Massa (con intonaci) superficiale	1019	kg/m ²
Massa (senza intonaci) superficiale	1019	kg/m ²
Trasmittanza periodica	0,133	W/m ² K
Fattore attenuazione	0,237	-
Sfasamento onda termica	-14,2	h

Il componente non risulta soggetta a fenomeni di condensa superficiale né interstiziale.

4.2.3 Chiusura superiore - copertura

La copertura è in latero cemento con uno spessore di 24 cm ed un manto di copertura in coppi. Il sottotetto non è coibentato ed è costituito da un solaio in latero cemento. (Figura 22–Tabella 12).



N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,068	-	-	-
1	Copertura in tegole di argilla	10,00	0,9900	0,010	2000	0,84	1
2	Impermeabilizzazione con bitume	4,00	0,1700	0,024	1200	1,00	188000
3	C.I.s. di sabbia e ghiaia (pareti esterne)	40,00	2,1500	0,019	2400	1,00	96
4	Soletta in laterizio spess. 18-20 - Inter. 50	180,00	0,6600	0,273	1100	0,84	7
5	Intonaco di gesso e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,100	-	-	-

Figura 22 Stratigrafia chiusura orizzontale superiore

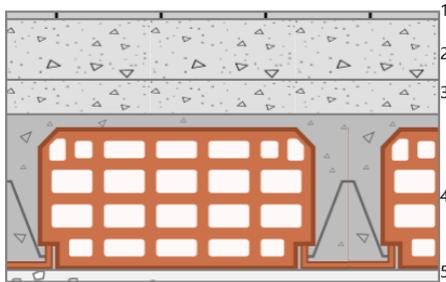
Tabella 12 Caratteristiche termiche e igrometriche della chiusura orizzontale superiore

Trasmittanza con maggiorazione ponte termico	1,955	W/m ² K
Maggiorazione ponte termico	0,00	%
Spessore	249	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	1,6	°C
Permeanza	0,264	10 ⁻¹² kg/sm ² Pa
Massa superficiale (con intonaci)	343	kg/m ²
Massa superficiale (senza intonaci)	319	kg/m ²
Trasmittanza periodica	1,011	W/m ² K
Fattore attenuazione	0,517	-
Sfasamento onda termica	-6,7	h

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale, è invece soggetta a fenomeni di condensa interstiziale, ma la quantità è rievaporabile durante la stagione estiva

4.2.4 Partizione interna orizzontale - solaio

La partizione interna orizzontale è realizzata in latero-cemento (Figura 23 -Tabella 13).



N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,068	-	-	-
1	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	10,00	1,3000	0,008	2300	0,84	9999999
2	Sottofondo di cemento magro	70,00	0,9000	0,078	1800	0,88	30
3	C.I.s. di sabbia e ghiaia (pareti interne)	40,00	1,9100	0,021	2400	1,00	96
4	Soletta in laterizio spess. 18-20 - Inter. 50	180,00	0,6600	0,273	1100	0,84	7
5	Intonaco di gesso e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,100	-	-	-

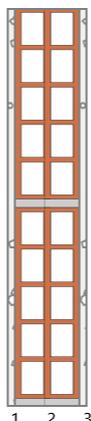
Figura 23 Stratigrafia della partizione interna orizzontale

Tabella 13 Caratteristiche termiche e igrometriche della partizione orizzontale

Trasmittanza termica	1,767	W/m ² K
Trasmittanza con maggiorazione ponte termico	1,856	W/m ² K
Maggiorazione ponte termico	5,00	%
Spessore	315	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	1,6	°C
Permeanza	0,002	10 ⁻¹² kg/sm ² Pa
Massa superficiale (con intonaci)	467	kg/m ²
Massa superficiale (senza intonaci)	443	kg/m ²
Trasmittanza periodica	0,626	W/m ² K
Fattore attenuazione	0,354	-
Sfasamento onda termica	-8,6	h

4.2.5 Partizione interna verticale – parete interna verticale

Le partizioni interne sono realizzate con tamponamenti in laterizio forato (Figura 24 – Tabella 14).



N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di gesso e sabbia	10,00	0,8000	0,013	1600	1,00	10
2	Muratura in laterizio pareti interne (um. 0.5%)	80,00	0,5000	0,160	1400	1,00	7
3	Intonaco di gesso e sabbia	10,00	0,8000	0,013	1600	1,00	10
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,130	-	-	-

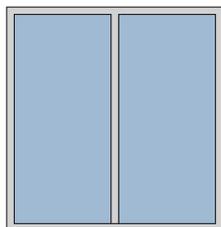
Figura 24 Stratigrafia della partizione interna verticale

Tabella 14 Caratteristiche termiche e igrometriche della partizione interna verticale

Trasmittanza termica		2,247	W/m ² K
Spessore		100	mm
Temperatura (calcolo potenza invernale)	esterna	0,0	°C
Permeanza		263,158	10 ⁻¹² kg/sm ² Pa
Massa (con intonaci)	superficiale	144	kg/m ²
Massa (senza intonaci)	superficiale	112	kg/m ²
Trasmittanza periodica		1,715	W/m ² K
Fattore attenuazione		0,763	-
Sfasamento onda termica		-3,6	h

4.2.6 Chiusura verticale - infissi

Le chiusure verticali trasparenti esistenti dell'edificio-dimostratore sono finestre tradizionali dotati di un telaio in legno a vetrata singola, pertanto, caratterizzate da un elevato valore di trasmittanza. Si riportano di seguito le caratteristiche termiche (Figura 25 - Tabella 15).



Descrizione strato	s	λ	R
Resistenza superficiale interna	-	-	0,130
Primo vetro	2,0	1,00	0,002
Resistenza superficiale esterna	-	-	0,068

Legenda simboli

s	Spessore mm	
λ	Conduttività termica	W/mK
R	Resistenza termica	m ² K/W

Figura 25 Stratigrafia degli infissi

Tabella 15 Caratteristiche termiche e igrometriche degli infissi

Trasmittanza termica	U_w	4,511	W/m ² K
Trasmittanza solo vetro	U_g	5,003	W/m ² K
Trasmittanza termica del telaio	U_f	2,00	W/m ² K
K distanziale	K_d	0,00	W/mK
Area totale	A_w	2,160	m ²
Area vetro	A_g	1,806	m ²
Area telaio	A_f	0,354	m ²
Fattore di forma	F_f	0,84	-
Perimetro vetro	L_g	8,180	m
Perimetro telaio	L_f	5,880	m

4.3 Volumi delle zone riscaldate e non

Per effettuare delle valutazioni comparative tra le prestazioni globali dell'edificio nell'arco dell'intero anno, tra diverse zone climatiche e tra ante e post operam, nel modello energetico sono state svolte verifiche prestazionali considerando tutti gli ambienti dell'edificio parte della stessa zona e tutti riscaldati, ad eccezione del corpo scala. Si è considerato un impianto di riscaldamento fittizio per fare in modo di avere una temperatura interna di 20°C. Il volume riscaldato è di 262,6 m³. Si riportano in Tabella 16 gli otto locali climatizzati dell'edificio e in Figura 26 la definizione dei locali in pianta.

Tabella 16 Locali climatizzati

Nr.	Descrizione locale	V _{netto} [m ³]	Sup[m ²]
1	Soggiorno	35,11	12,34
2	Camera1	47,56	16,63
3	Cucina	22,73	7,99
4	Bagno	21,73	7,64
5	Camera2	48,56	16,98
6	Salone1	57,35	20,16
7	Camera3	27,43	9,59
8	Bagno2	2,12	0,74

26,3

Legenda simboli

- Sup. Superficie del locale
- V_{netto} Volume netto del locale

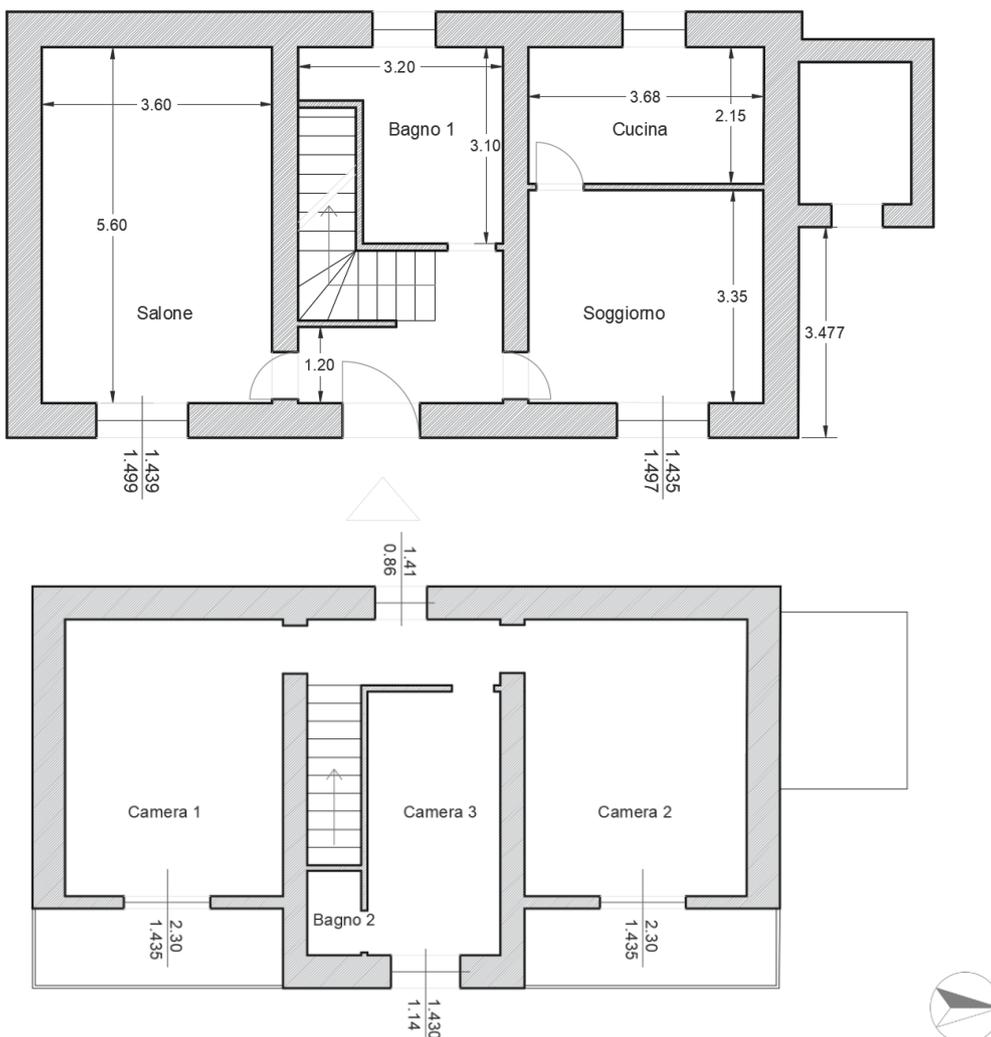


Figura 26 Definizione dei locali riscaldati

4.4 Calcolo delle prestazioni globali dell'edificio esteso all'intero anno – ante operam

Il calcolo delle prestazioni globali dell'edificio-dimostrato è stato effettuato per le zone climatiche C, D ed E. Si riportano i risultati valutati per l'intero anno.

Le simulazioni sono state estese anche alle zone climatiche D ed E per la verifica della riduzione del flusso termico ovvero delle dispersioni di calore e la validazione dei risultati emersi durante il secondo anno di ricerca.

La scelta delle zone climatiche è stata effettuata sulla base degli studi svolti nell'ambito della prima annualità, da cui emerge chiaramente che il patrimonio edilizio nazionale residenziale più consistente è presente proprio nelle zone climatiche C D ed E, come si riporta nel seguente grafico in Figura 27 e nella Tabella 17.

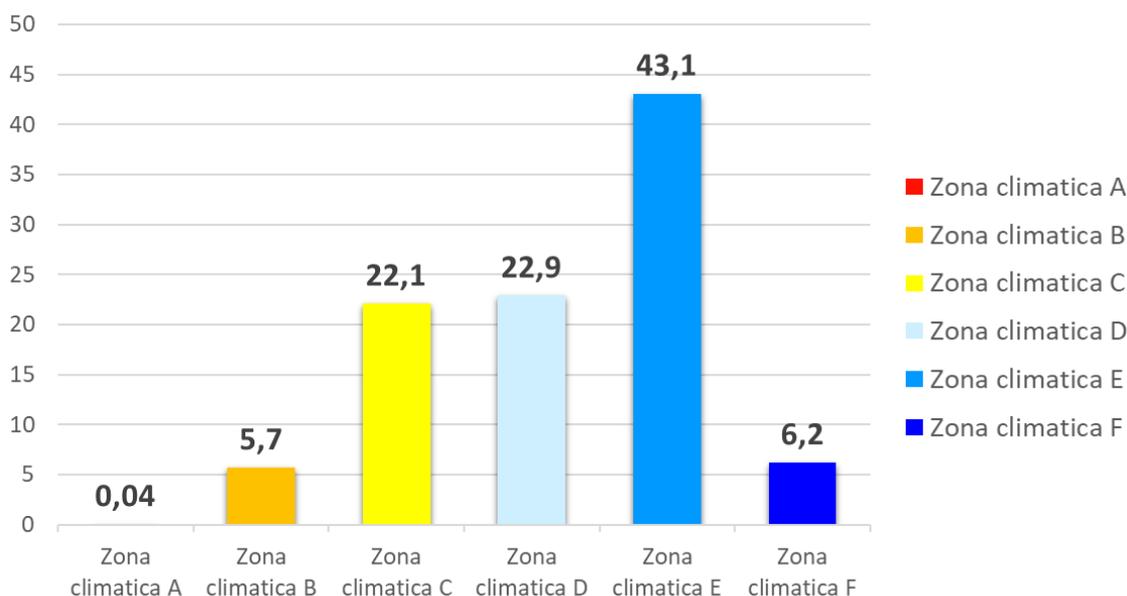


Figura 27. Edifici residenziali nei comuni classificati per zona climatica (%)

Tabella 17. Numero di edifici residenziali nel 2011 per zona climatica

Zone climatiche	N° edifici
Zona climatica A	4.875
Zona climatica B	699.573
Zona climatica C	2.710.544
Zona climatica D	2.858.016
Zona climatica E	5.191.960
Zona climatica F	722.730

Le simulazioni sono state effettuate sia per l'intero periodo di riscaldamento nelle zone climatiche C, D ed E ovvero rispettivamente dal 15 novembre al 31 marzo, dal 1° novembre al 15 aprile e dal 15 ottobre al 15 aprile, sia per il periodo specifico in cui sono stati svolti i monitoraggi, in zona climatica C, attraverso il termoflussimetro sull'edificio-dimostratore (dall'11 al 13 dicembre 2021 per l'ante operam e dal 18 al 20 dicembre per il post operam).

4.4.1 Simulazioni in zona climatica C

L'edificio-dimostratore è situato in località Campo di Carne, che fa parte del comune di Aprilia, in zona climatica C.

Dalle simulazioni effettuate la parete in tufo da 55 cm oggetto di studio non risulta soggetta a fenomeni di condensa superficiale né interstiziale come si evince dalle tabelle e dai grafici seguenti.

Tabella 18 Risultati della verifica della condensa superficiale ante operam – zona climatica C

Mese	θ_{int} [°C]	θ_{est} [°C]	P_{int} [Pa]	P_{est} [Pa]	θ_{acc} [°C]	P_{acc} [Pa]	f_{RSI} [-]
ottobre	18,5	18,5	1692	1539	18,4	2116	0,000
novembre	20,0	13,0	1505	1156	16,5	1881	0,506
dicembre	20,0	9,5	1473	1001	16,2	1842	0,639
gennaio	20,0	9,1	1424	937	15,7	1780	0,603
febbraio	20,0	8,9	1303	809	14,3	1628	0,486
marzo	20,0	11,2	1312	900	14,4	1640	0,364
aprile	18,0	14,5	1513	1218	16,6	1892	0,609

Legenda simboli

θ_{int}	Temperatura dell'ambiente interno
θ_{est}	Temperatura dell'ambiente esterno
P_{int}	Pressione dell'ambiente interno
P_{est}	Pressione dell'ambiente esterno
θ_{acc}	Temperatura minima accettabile sulla superficie interna
P_{acc}	Pressione minima accettabile sulla superficie interna
f_{RSI}	Fattore di temperatura superficiale

Tabella 19 Risultati della verifica della condensa interstiziale ante operam – zona climatica C

Mese	θ_{int} [°C]	θ_{est} [°C]	ϕ_{int} [%]	ϕ_{est} [%]	g_c [g/m ²]	M_a [g/m ²]	Periodi	Stato
ottobre	18,5	18,5	80	72	0,0	0	1	Asciutto
novembre	20,0	13,0	64	77	0,0	0	1	Asciutto
dicembre	20,0	9,5	63	84	0,0	0	1	Asciutto
gennaio	20,0	9,1	61	81	0,0	0	1	Asciutto
febbraio	20,0	8,9	56	71	0,0	0	1	Asciutto
marzo	20,0	11,2	56	68	0,0	0	1	Asciutto
aprile	18,0	14,5	73	74	0,0	0	1	Asciutto
maggio	18,6	18,6	71	64	0,0	0	1	Asciutto
giugno	22,4	22,4	72	68	0,0	0	1	Asciutto
luglio	25,0	25,0	61	58	0,0	0	1	Asciutto
agosto	24,9	24,9	61	58	0,0	0	1	Asciutto
settembre	21,5	21,5	72	69	0,0	0	1	Asciutto

Legenda simboli

ϕ_{int}	Umidità relativa dell'ambiente interno
ϕ_{est}	Umidità relativa dell'ambiente esterno
g_c	Flusso di vapore condensato
M_a	Quantità di condensa accumulata
Periodi	Periodi del mese

Tabella 20 Distribuzione della temperatura nella parete perimetrale in tufo da 55 cm [°C] ante operam – zona climatica C

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Amb.	18,5	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	18,0	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5
Int.	18,5	18,6	17,9	17,9	17,8	18,3	17,3	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5
1	18,5	18,5	17,7	17,6	17,6	18,1	17,2	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5
2	18,5	13,3	10,0	9,6	9,4	11,6	14,7	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5
3	18,5	13,2	9,8	9,4	9,3	11,5	14,6	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5
Est.	18,5	13,0	9,5	9,1	8,9	11,2	14,5	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5

Valori sul lato esterno dello strato; Amb.= ambiente interno; Int.=a valle dello strato liminare interno; Est.=ambiente esterno

Tabella 21 Distribuzione della pressione parziale del vapore nella parete perimetrale in tufo da 55 cm [Pa] ante operam – zona climatica C

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Amb.	1692	1505	1473	1424	1303	1312	1513	1510	1943	1940	1924	1857
Int.	1692	1505	1473	1424	1303	1312	1513	1510	1943	1940	1924	1857
1	1692	1503	1472	1422	1301	1310	1512	1510	1943	1940	1924	1857
2	1541	1159	1005	941	813	903	1221	1362	1844	1841	1825	1758
3	1539	1156	1001	937	809	900	1218	1361	1843	1840	1824	1757
Est.	1539	1156	1001	937	809	900	1218	1361	1843	1840	1824	1757

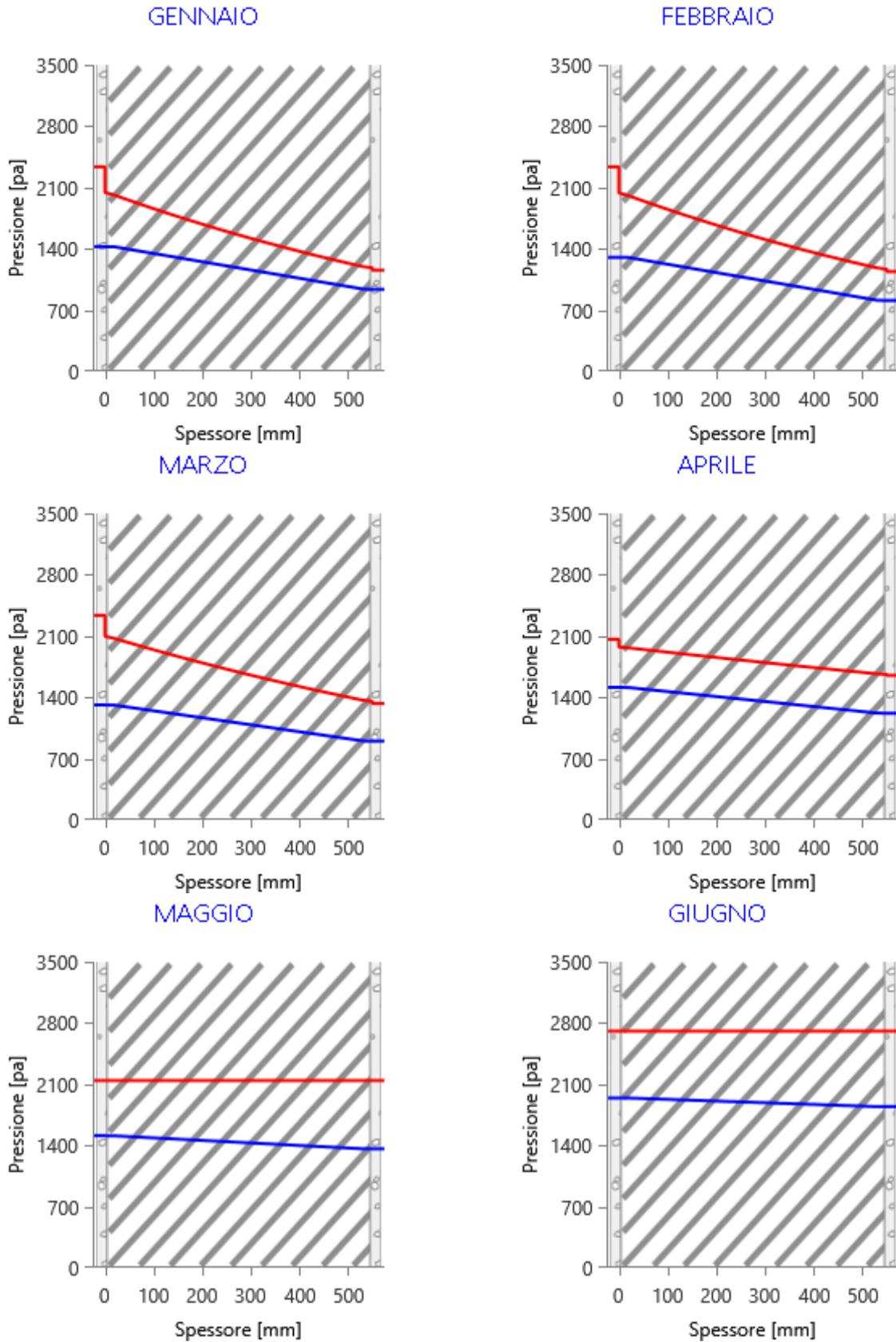
Valori sul lato esterno dello strato; Amb.= ambiente interno; Int.=a valle dello strato liminare interno; Est.=ambiente esterno

Tabella 22 Distribuzione della pressione di saturazione nella parete perimetrale in tufo da 55 cm [Pa] ante operam – zona climatica C

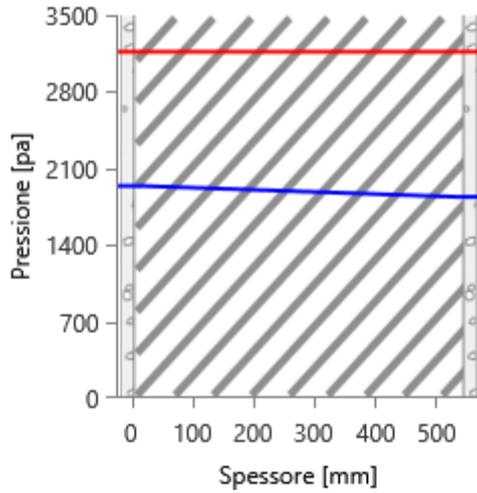
Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Amb.	2129	2337	2337	2337	2337	2337	2063	2142	2708	3166	3147	2563
Int.	2129	2145	2054	2044	2039	2097	1975	2142	2708	3166	3147	2563
1	2129	2124	2023	2012	2007	2072	1965	2142	2708	3166	3147	2563
2	2129	1531	1229	1198	1182	1368	1669	2142	2708	3166	3147	2563
3	2129	1519	1214	1182	1167	1354	1662	2142	2708	3166	3147	2563
Est.	2129	1497	1187	1155	1140	1330	1650	2142	2708	3166	3147	2563

Valori sul lato esterno dello strato; Amb.= ambiente interno; Int.=a valle dello strato liminare interno; Est.=ambiente esterno

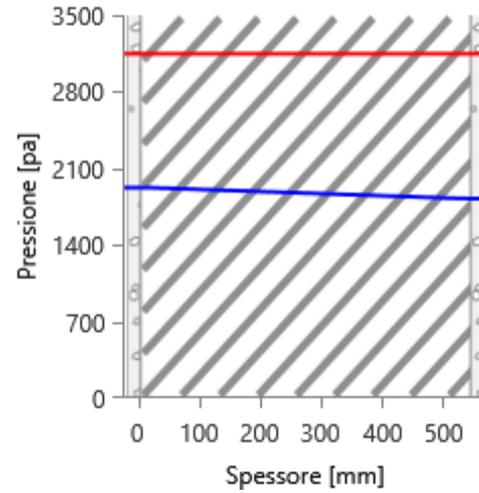
Tabella 23 Grafici mensili delle pressioni parziali e di saturazione del vapore ante operam – zona climatica C



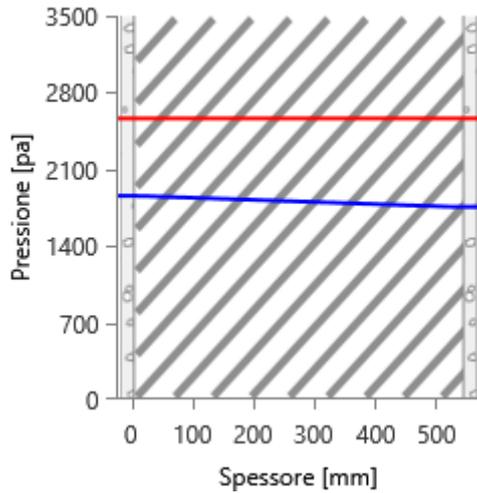
LUGLIO



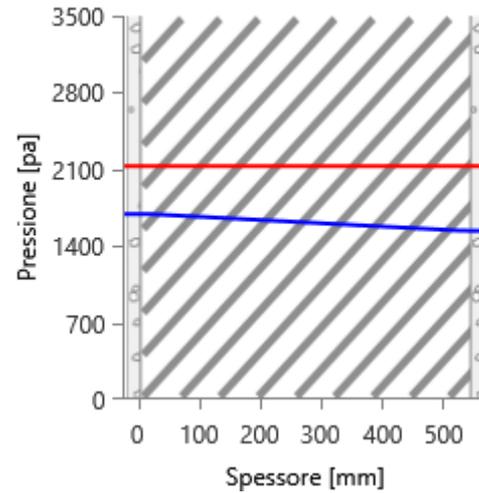
AGOSTO



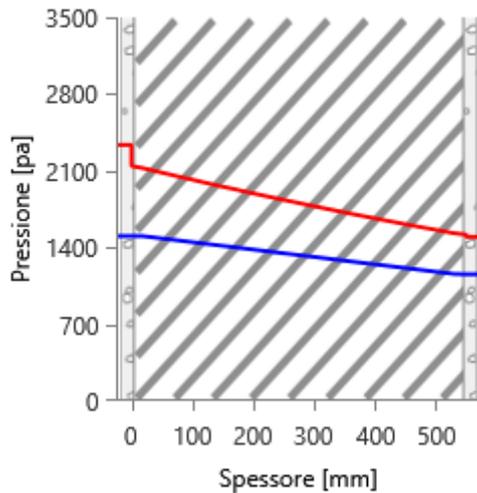
SETTEMBRE



OTTOBRE



NOVEMBRE



DICEMBRE

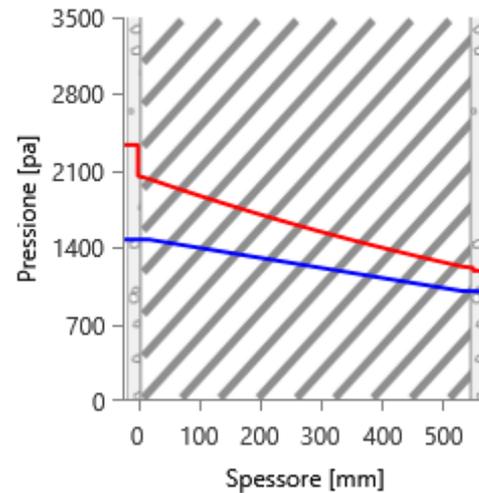
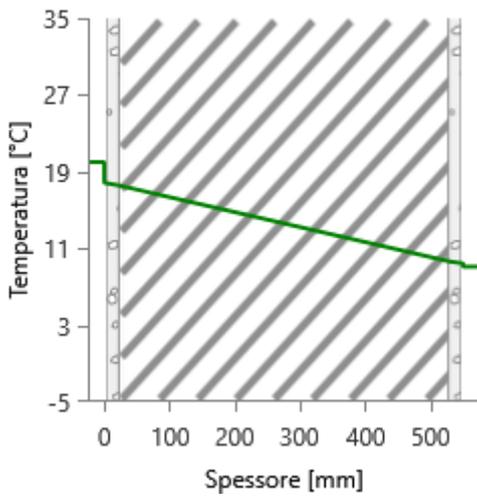
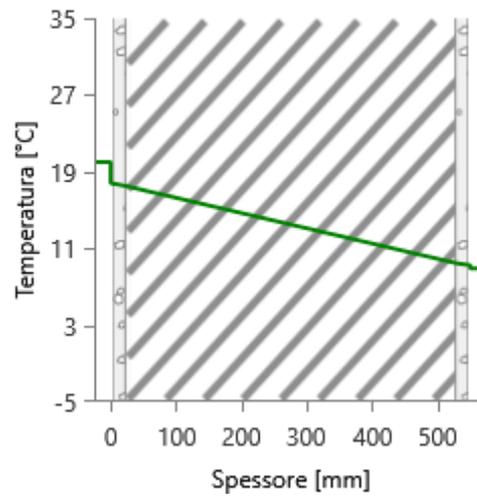


Tabella 24 Grafici mensili delle temperature [°C] ante operam – zona climatica C

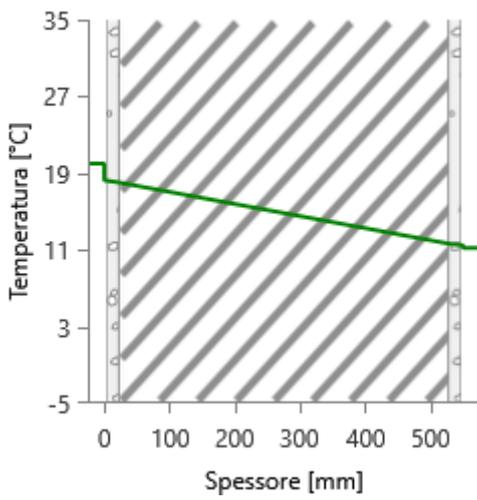
GENNAIO



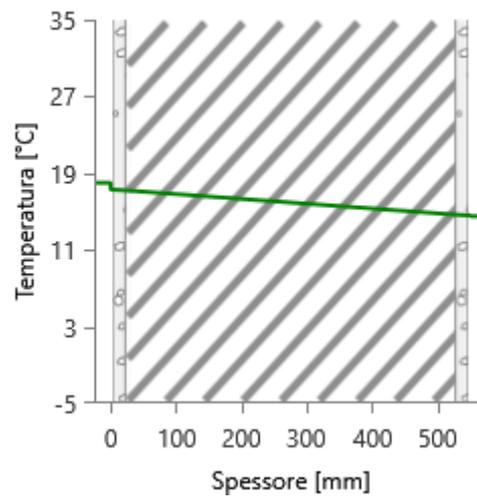
FEBBRAIO



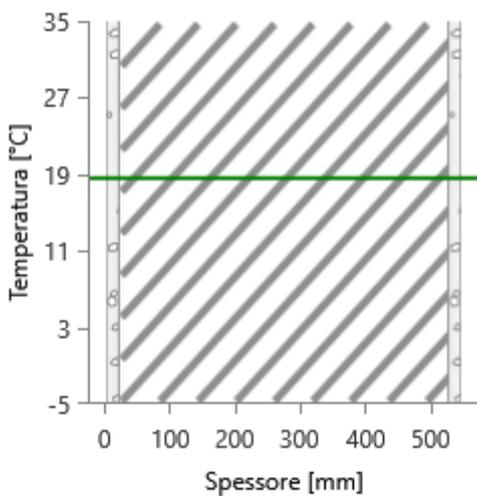
MARZO



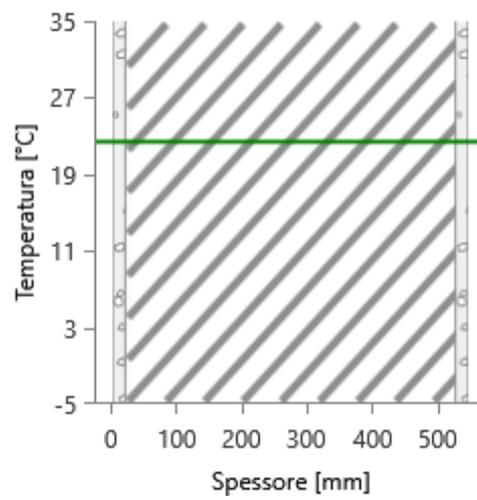
APRILE



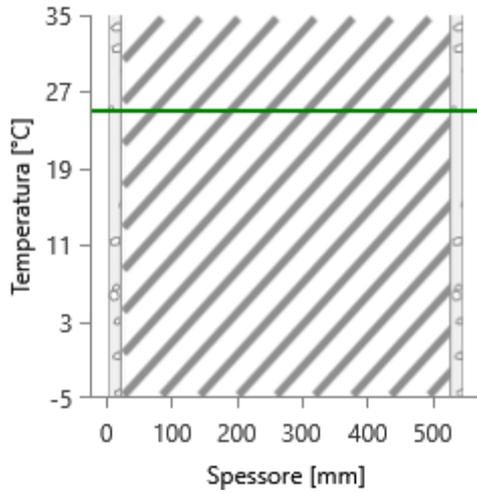
MAGGIO



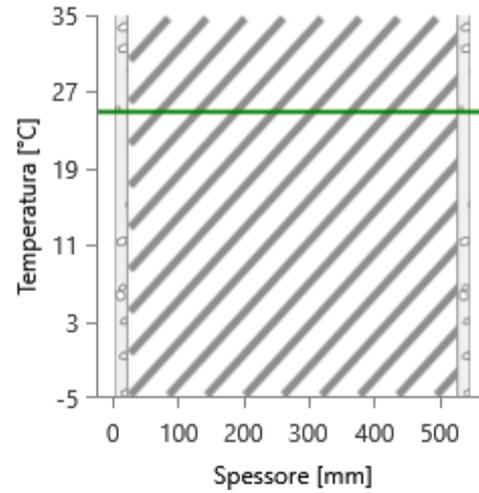
GIUGNO



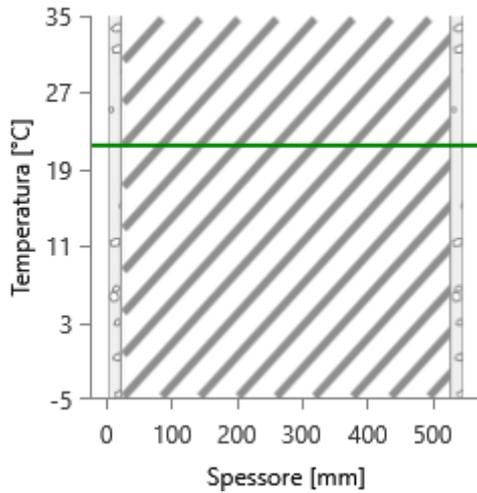
LUGLIO



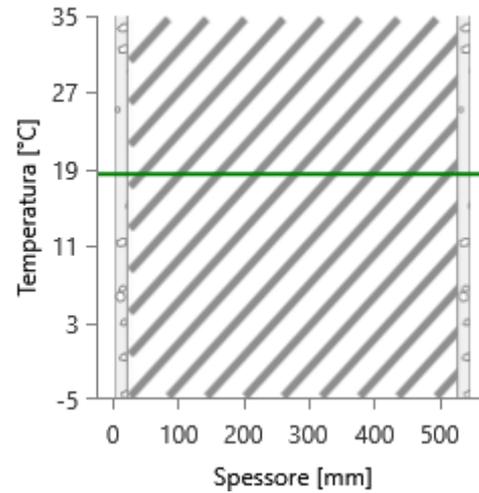
AGOSTO



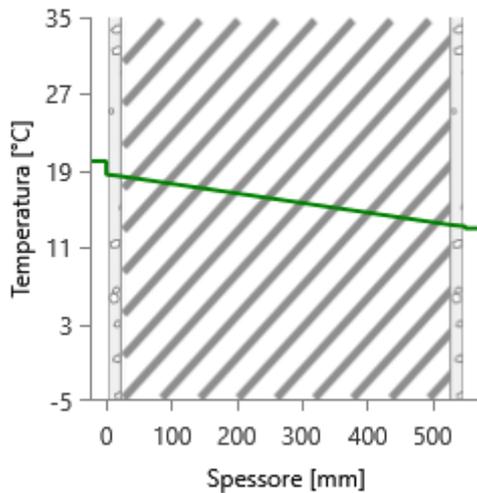
SETTEMBRE



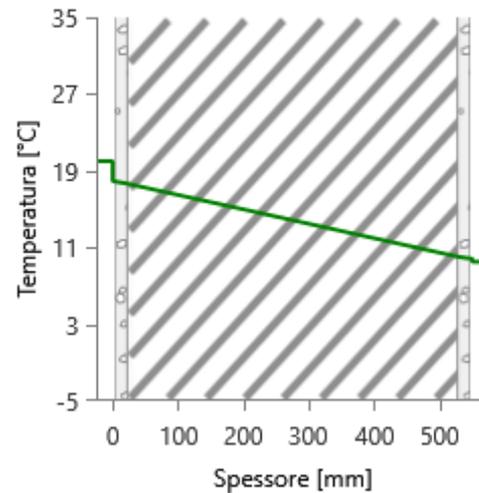
OTTOBRE



NOVEMBRE



DICEMBRE



È stata valutata la potenza dispersa per trasmissione Φ_{tr} sia dell'intero edificio sia del locale soggiorno collocato al piano terra esposto a nord-est, dove è stato svolto il monitoraggio in ambiente reale, sia della parete perimetrale in tufo da 55 cm per ciascun orientamento (Tabella 25; Tabella 26). Dalle simulazioni

effettuate sull'edificio-dimostratore in zona climatica C si riscontra che la potenza totale dispersa per trasmissione attraverso la parete perimetrale in tufo da 55 cm è di 3.455 W come riportato in Tabella 26.

Tabella 25 Sintesi delle dispersioni ante operam – zona climatica C

Dispersioni Ante Operam		
Intero edificio	Φ_{tr} [W]	12.118

Tabella 26 Dispersioni per componente M100 - Parete esterna in tufo - 55 cm ante operam – zona climatica C

	Sup. Tot	ΦT		Φ
	[m ²]	[W]	%	[W/m ²]
N	30,44	615	5,1	20,20
E	41,39	801	6,6	19,35
S	41,81	704	5,8	16,84
O	72,14	1335	11	18,51
TOT	185,78	3455	28,5	18,60

Sono state valutate le dispersioni per trasmissione relative all'energia invernale, dei componenti opachi e, in particolare, si sottolinea quello oggetto dei successivi monitoraggi in loco (Tabella 27).

Nell'ultima colonna della Tabella 27 sono stati riportati i dati relativi all'energia dispersa, ottenuti dalla somma tra le dispersioni per trasmissione e per extraflusso, meno gli apporti solari attraverso il componente.

Tabella 27 Dispersioni ordinate per componente - stagione invernale - strutture opache - ante operam – zona climatica C

Cod	Descrizione elemento	U [W/m ² K]	Sup. [m ²]	$Q_{H,tr}$ [kW/h]	% $Q_{H,tr}$ [%]	$Q_{H,r}$ [kW/h]	% $Q_{H,r}$ [%]	$Q_{sol,k}$ [kW/h]	% $Q_{sol,k}$ [%]	$Q_{H,tr} + Q_{H,r} - Q_{sol,k}$ [kW/h]
M100	Parete esterna in tufo - 55 cm - T	0,893	185,78	5466	27,5	977	49,5	2660	41,1	3783
M103	Parete esterna in tufo - 40 cm - T	1,162	9,98	382	1,9	68	3,5	190	2,9	260
M104	Parete esterna in tufo - 20 cm - T	1,946	23,27	1492	7,5	267	13,5	681	10,5	1078
M105	Parete esterna in tufo - 55 cm - U	0,848	11,33	344	1,7	-	-	-	-	-
M201	Parete interna - 10 cm - U	2,36	44,57	3767	19	-	-	-	-	-
M203	Parete interna in tufo - 40 cm - U	1,076	52,64	2029	10,2	-	-	-	-	-
P1	Pavimento su terreno - G	0,588	71,58	1386	7	-	-	-	-	-
P3	Soletta interpiano - U	1,423	9,49	193	1	-	-	-	-	-
S2	Soletta interpiano - U	1,756	68,99	1736	8,7	-	-	-	-	-
S3	Soletta interpiano - T	1,856	13,07	799	4	286	14,5	488	7,5	-
Totali				17594	88,5	1598	81	4019	62	5121

Legenda simboli

$Q_{H,tr}$ Energia dispersa per trasmissione



$\%Q_{H,tr}$	Rapporto percentuale tra il $Q_{H,tr}$ dell'elemento e il totale dei $Q_{H,tr}$
$Q_{H,r}$	Energia dispersa per extraflusso
$\%Q_{H,r}$	Rapporto percentuale tra il $Q_{H,r}$ dell'elemento e il totale dei $Q_{H,r}$
$Q_{sol,k}$	Apporto solare attraverso gli elementi opachi e finestrati
$\%Q_{sol,k}$	Rapporto percentuale tra il $Q_{sol,k}$ dell'elemento e il totale dei $Q_{sol,k}$

4.4.2 Simulazioni in zona climatica D

Per effettuare le simulazioni in zona climatica D l'edificio-dimostratore è stato collocato a Roma. Si riportano nelle tabelle seguenti i dati climatici della città scelta.

Tabella 28 Temperature esterne medie mensili – zona climatica D

Descrizione	u.m.	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Temperatura	°C	8,1	9,1	11,5	15,9	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7	17,8	12,7	8,7

Tabella 29 Irradiazione solare media mensile – zona climatica D

Esposizione	u.m.	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Nord	MJ/m ²	2,0	2,7	3,9	6,0	8,3	10,5	10,4	7,4	5,1	3,6	2,3	2,0
Nord-Est	MJ/m ²	2,3	3,5	5,9	9,2	11,4	13,8	14,7	11,5	7,9	4,9	2,7	2,2
Est	MJ/m ²	5,0	6,8	9,5	12,6	13,9	16,2	17,8	15,2	11,8	8,6	5,5	4,9
Sud-Est	MJ/m ²	8,5	9,9	11,6	13,0	12,7	13,8	15,4	14,8	13,4	11,6	8,7	8,8
Sud	MJ/m ²	10,8	11,8	12,0	11,5	10,1	10,4	11,4	12,1	12,8	13,0	10,8	11,4
Sud-Ovest	MJ/m ²	8,5	9,9	11,6	13,0	12,7	13,8	15,4	14,8	13,4	11,6	8,7	8,8
Ovest	MJ/m ²	5,0	6,8	9,5	12,6	13,9	16,2	17,8	15,2	11,8	8,6	5,5	4,9
Nord-Ovest	MJ/m ²	2,3	3,5	5,9	9,2	11,4	13,8	14,7	11,5	7,9	4,9	2,7	2,2
Orizz. Diffusa	MJ/m ²	2,8	3,6	5,2	7,3	8,8	9,4	8,6	7,8	6,7	4,9	3,2	2,7
Orizz. Diretta	MJ/m ²	3,5	5,4	8,1	11,4	12,7	16,1	19,1	15,1	10,4	6,9	3,9	3,4

Irradianza sul piano orizzontale nel mese di massima insolazione:

321 W/m²

Dalle simulazioni effettuate la parete in tufo da 55 cm oggetto di studio non risulta soggetta a fenomeni di condensa superficiale né interstiziale come si evince dalle tabelle e dai grafici seguenti.

Tabella 30 Risultati della verifica della condensa superficiale nella parete perimetrale in tufo da 55 cm ante operam - zona climatica D

Mese	θ_{int} [°C]	θ_{est} [°C]	P_{int} [Pa]	P_{est} [Pa]	θ_{acc} [°C]	P_{acc} [Pa]	f_{RSI} [-]
ottobre	18,0	17,8	1532	1354	16,8	1915	-4,886
novembre	20,0	12,7	1398	1039	15,4	1747	0,368
dicembre	20,0	8,7	1435	934	15,8	1794	0,628
gennaio	20,0	8,1	1476	953	16,2	1845	0,684
febbraio	20,0	9,1	1287	800	14,1	1609	0,460
marzo	20,0	11,5	1405	1003	15,5	1756	0,467
aprile	20,0	15,9	1408	1162	15,5	1760	-0,099

Tabella 31 Risultati della verifica della condensa interstiziale nella parete perimetrale in tufo da 55 cm ante operam - zona climatica D

Mese	θ_{int} [°C]	θ_{est} [°C]	ϕ_{int} [%]	ϕ_{est} [%]	g_c [g/m ²]	Ma [g/m ²]	Periodi	Stato
ottobre	18,0	17,8	74	66	0,0	0	1	Asciutto
novembre	20,0	12,7	60	71	0,0	0	1	Asciutto
dicembre	20,0	8,7	61	83	0,0	0	1	Asciutto
gennaio	20,0	8,1	63	88	0,0	0	1	Asciutto
febbraio	20,0	9,1	55	69	0,0	0	1	Asciutto
marzo	20,0	11,5	60	74	0,0	0	1	Asciutto
aprile	20,0	15,9	60	64	0,0	0	1	Asciutto

maggio	19,2	19,2	62	56	0,0	0	1	Asciutto
giugno	22,6	22,6	62	58	0,0	0	1	Asciutto
luglio	26,4	26,4	50	47	0,0	0	1	Asciutto
agosto	26,6	26,6	60	57	0,0	0	1	Asciutto
settembre	21,7	21,7	64	60	0,0	0	1	Asciutto

Tabella 32 Distribuzione della temperatura nella parete perimetrale in tufo da 55 cm [°C] ante operam - zona climatica D

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Amb.	18,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7
Int.	18,0	18,6	17,8	17,7	17,9	18,3	19,2	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7
1	18,0	18,4	17,5	17,4	17,6	18,1	19,1	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7
2	17,8	13,1	9,3	8,7	9,6	11,9	16,1	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7
3	17,8	12,9	9,1	8,5	9,4	11,8	16,0	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7
Est.	17,8	12,7	8,7	8,1	9,1	11,5	15,9	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7

Valori sul lato esterno dello strato; Amb.=ambiente interno; Int.=a valle dello strato liminare interno; Est.=ambiente esterno

Tabella 33 Distribuzione della pressione parziale del vapore nella parete perimetrale in tufo da 55 cm [Pa] ante operam - zona climatica D

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Amb.	1532	1398	1435	1476	1287	1405	1408	1370	1702	1730	2079	1666
Int.	1532	1398	1435	1476	1287	1405	1408	1370	1702	1730	2079	1666
1	1531	1396	1433	1474	1285	1404	1407	1369	1702	1729	2078	1665
2	1355	1042	938	958	805	1007	1164	1242	1603	1631	1979	1567
3	1354	1039	934	953	800	1003	1162	1241	1602	1630	1979	1566
Est.	1354	1039	934	953	800	1003	1162	1241	1602	1630	1979	1566

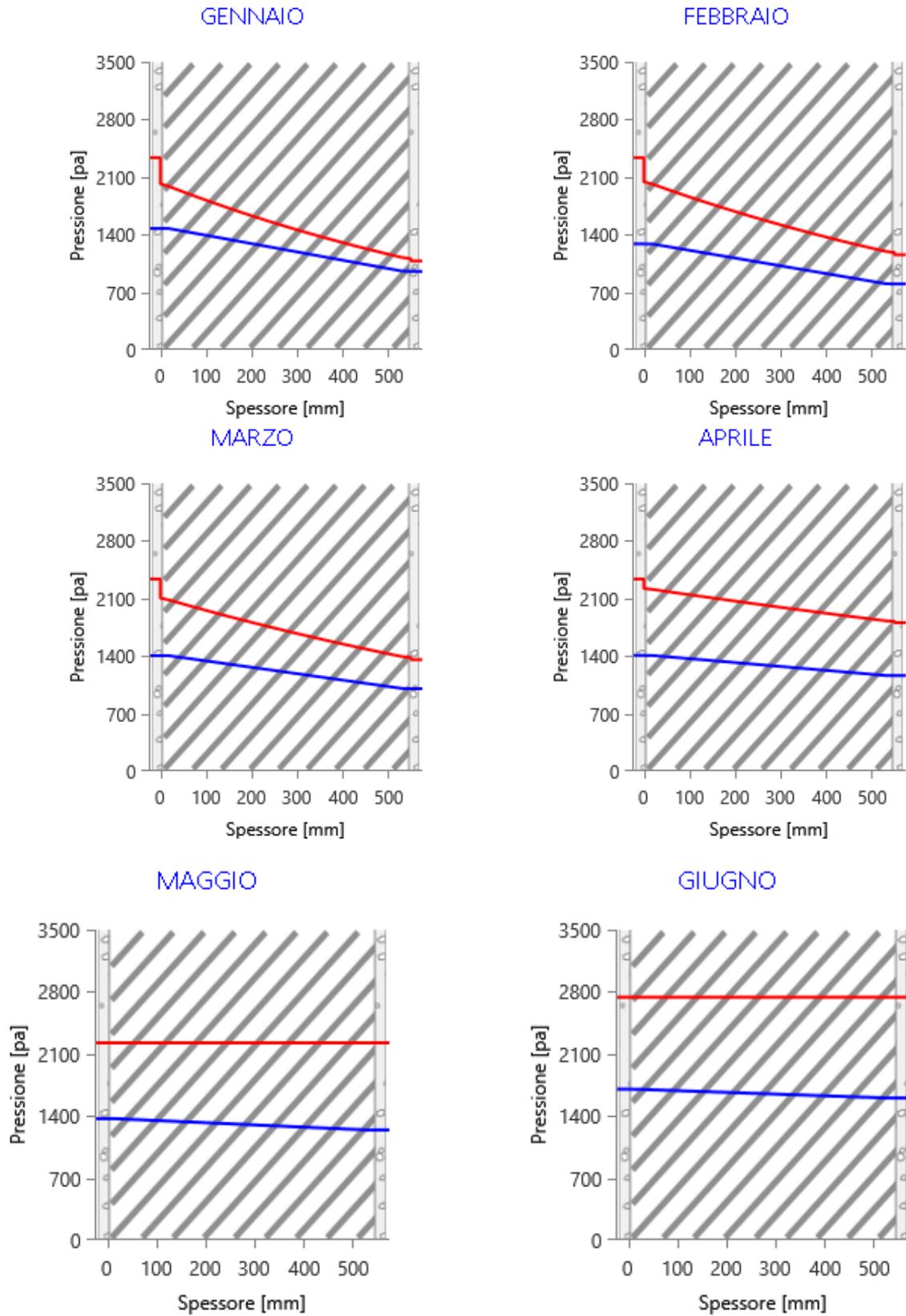
Valori sul lato esterno dello strato; Amb.=ambiente interno; Int.=a valle dello strato liminare interno; Est.=ambiente esterno

Tabella 34 Distribuzione della pressione di saturazione nella parete perimetrale in tufo da 55 cm [Pa] ante operam - zona climatica D

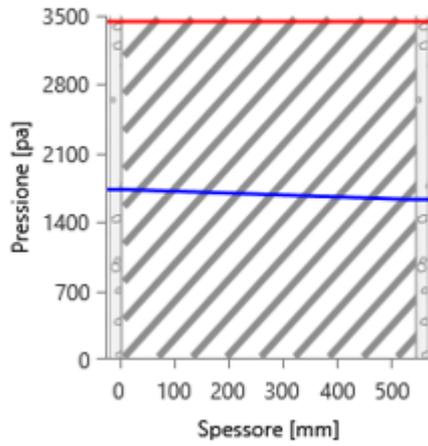
Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Amb.	2063	2337	2337	2337	2337	2337	2337	2224	2741	3440	3480	2594
Int.	2058	2137	2033	2018	2044	2105	2223	2224	2741	3440	3480	2594
1	2057	2115	2001	1985	2012	2080	2210	2224	2741	3440	3480	2594
2	2038	1503	1167	1123	1198	1394	1829	2224	2741	3440	3480	2594
3	2038	1490	1152	1107	1182	1381	1821	2224	2741	3440	3480	2594
Est.	2037	1468	1124	1080	1155	1356	1806	2224	2741	3440	3480	2594

Valori sul lato esterno dello strato; Amb.=ambiente interno; Int.=a valle dello strato liminare interno; Est.=ambiente esterno

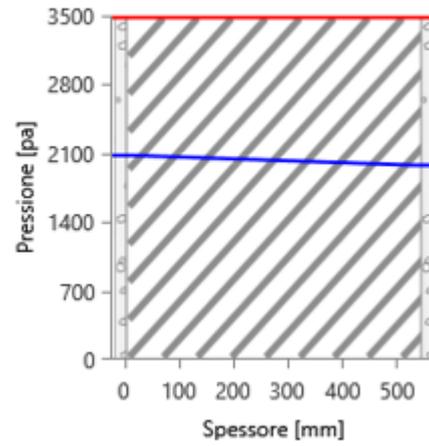
Tabella 35 Grafici mensili delle pressioni parziali e di saturazione del vapore [Pa] ante operam - zona climatica D



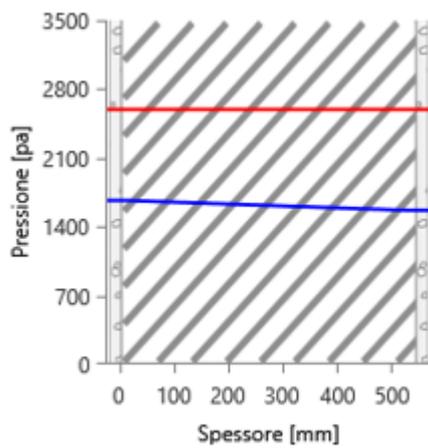
LUGLIO



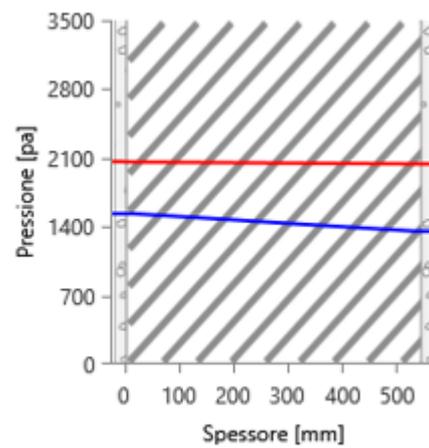
AGOSTO



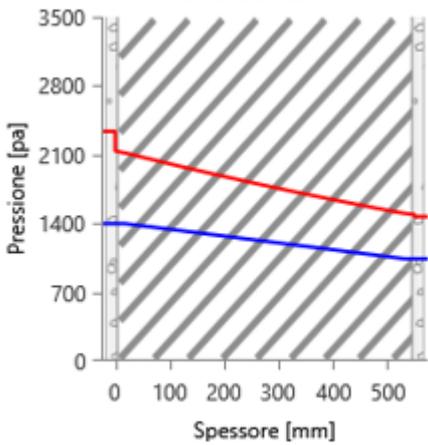
SETTEMBRE



OTTOBRE



NOVEMBRE



DICEMBRE

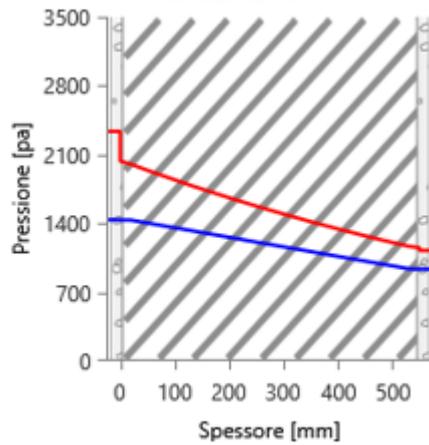
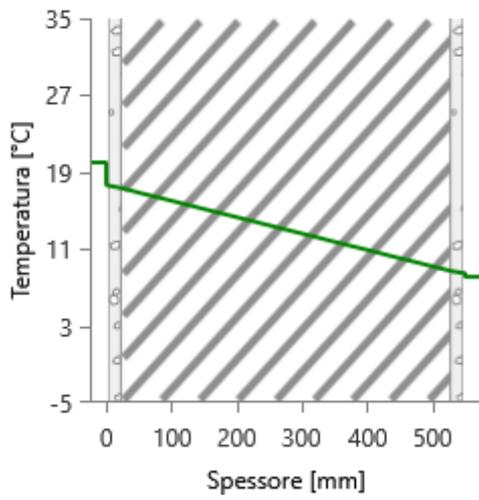
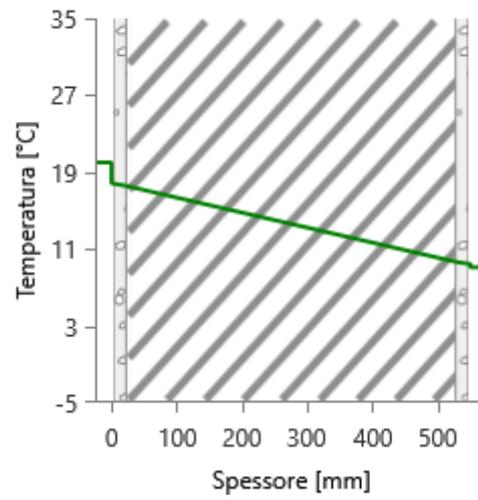


Tabella 36 Grafici mensili delle temperature [°C] ante operam - zona climatica D

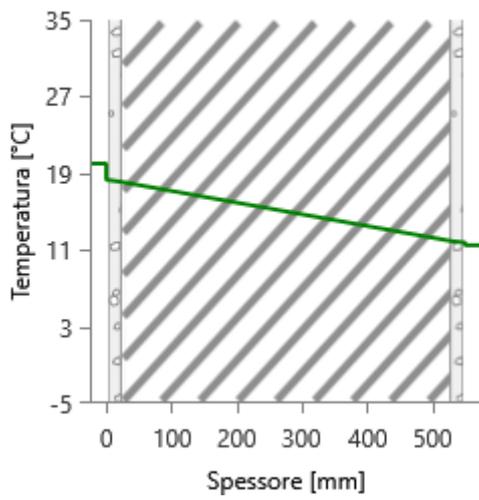
GENNAIO



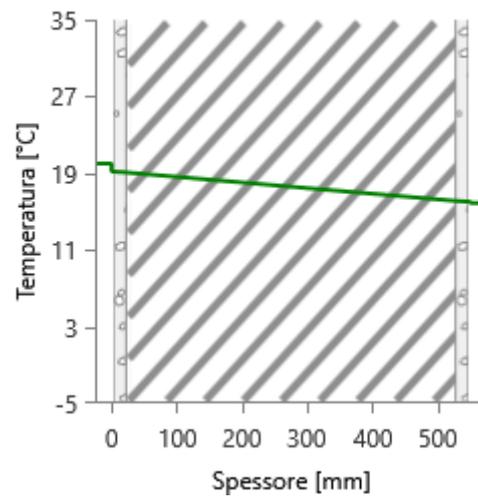
FEBBRAIO



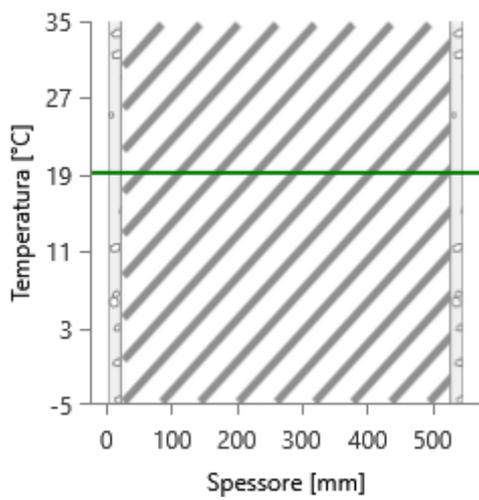
MARZO



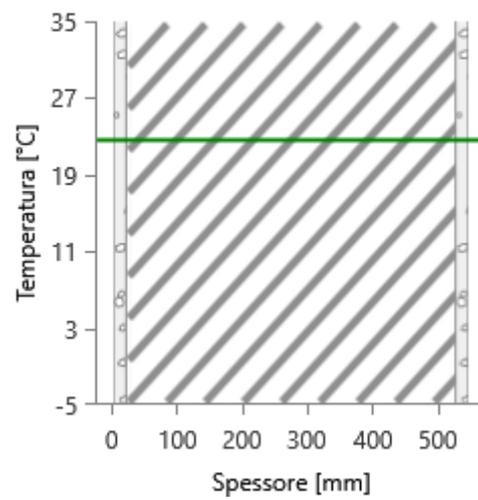
APRILE



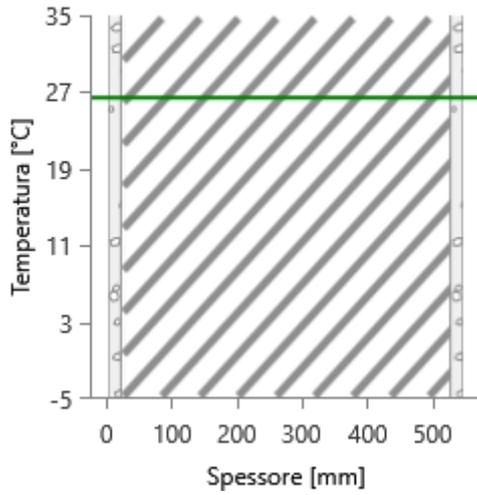
MAGGIO



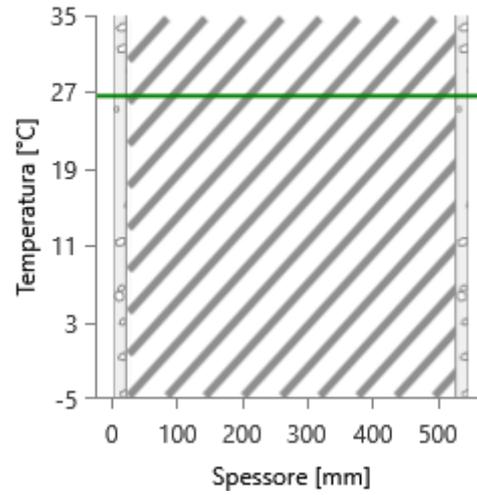
GIUGNO



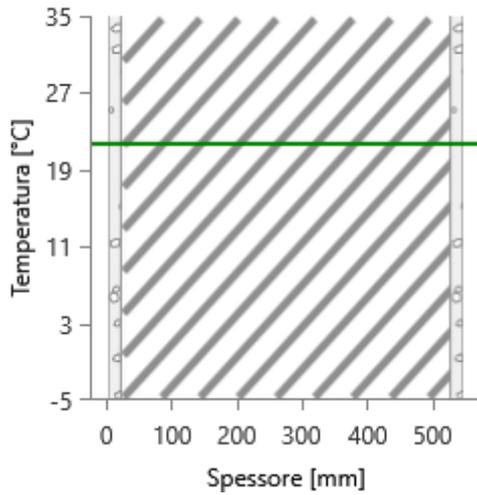
LUGLIO



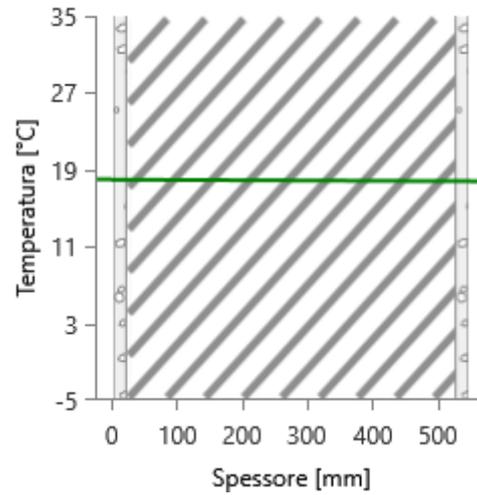
AGOSTO



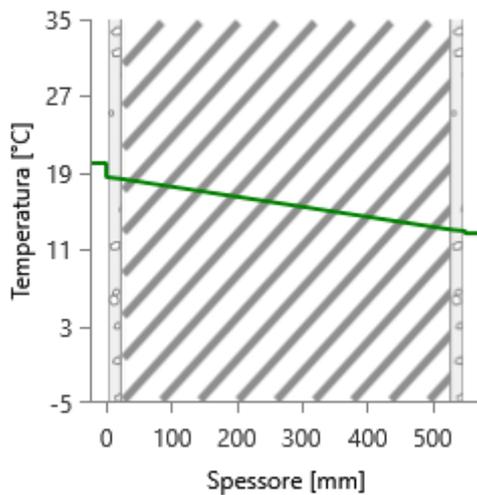
SETTEMBRE



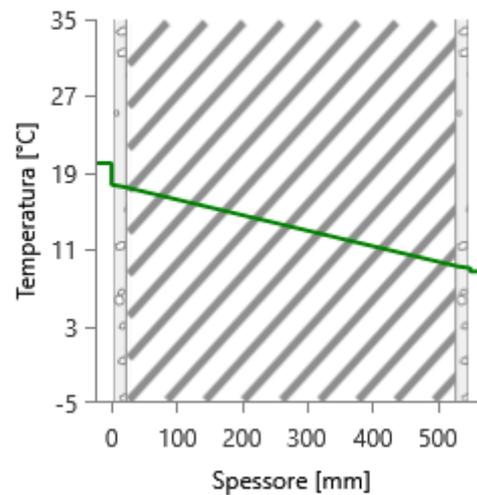
OTTOBRE



NOVEMBRE



DICEMBRE



È stata valutata la potenza dispersa per trasmissione Φ_{tr} sia dell'intero edificio sia del locale soggiorno collocato al piano terra esposto a nord-est, dove è stato svolto il monitoraggio in ambiente reale, sia della parete perimetrale in tufo da 55 cm per ciascun orientamento (Tabella 37).

Dalle simulazioni effettuate sull'edificio-dimostratore in zona climatica D si riscontra che la potenza totale dispersa per trasmissione attraverso la parete perimetrale in tufo da 55 cm è di 3.755 W come riportato in Tabella 38; si registra un aumento della potenza totale dispersa per trasmissione rispetto alla zona climatica C dell'8,7%.

Tabella 37 Sintesi delle dispersioni ante operam – zona climatica D

Dispersioni Ante Operam		
Intero edificio	Φ_{tr} [W]	12.118

Tabella 38 Dispersioni per componente M100 - Parete esterna in tufo - 55 cm ante operam - zona climatica D

	Sup. Tot	ΦT		Φ
ZONA D	[m ²]	[W]	%	[W/m ²]
N	30,44	668	5,2	21,94
E	41,39	871	6,8	21,04
S	41,81	765	6	18,30
O	72,14	1452	11,4	20,13
TOT	185,78	3755	29,4	20,21

Sono state valutate le dispersioni per trasmissione relative all'energia invernale, dei componenti opachi e, in particolare, si sottolinea quello oggetto dei successivi monitoraggi in loco (Tabella 39).

Nell'ultima colonna della Tabella 39 sono stati riportati i dati relativi all'energia dispersa, ottenuti dalla somma tra le dispersioni per trasmissione e per extraflusso, meno gli apporti solari attraverso il componente.

Tabella 39 Dispersioni ordinate per componente - stagione invernale strutture opache - ante operam – zona climatica D

Cod	Descrizione elemento	U [W/m ² K]	Sup. [m ²]	Q _{H,rr} [kWh]	%Q _{H,rr} [%]	Q _{H,r} [kWh]	%Q _{H,r} [%]	Q _{sol,k} [kWh]	%Q _{sol,k} [%]	Q _{H,rr} + Q _{H,r} - Q _{sol,k} [kWh]
M100	Parete esterna in tufo - 55 cm - T	0,896	185,78	6322	28,4	1133	49,3	3223	40	4232
M103	Parete esterna in tufo - 40 cm - T	1,167	9,98	443	2	79	3,5	227	2,8	295
M104	Parete esterna in tufo - 20 cm - T	1,959	23,27	1732	7,8	310	13,5	840	10,4	1202
M105	Parete esterna in tufo - 55 cm - U	0,848	11,33	365	1,6	-	-	-	-	-
M201	Parete interna - 10 cm - U	2,36	44,57	3996	18	-	-	-	-	-
M203	Parete interna in tufo - 40 cm - U	1,076	52,64	2152	9,7	-	-	-	-	-
P1	Pavimento su terreno - G	0,588	71,58	1599	7,2	-	-	-	-	-
P3	Soletta interpiano - U	1,423	9,49	205	0,9	-	-	-	-	-
S2	Soletta interpiano - U	1,756	68,99	1842	8,3	-	-	-	-	-
S3	Soletta interpiano - T	1,867	13,07	927	4,2	332	14,5	606	7,5	653
Totali				19583	88,1	1854	80,8	4896	60,7	6382

4.4.3 Simulazioni in zona climatica E

Per effettuare le simulazioni in zona climatica E l'edificio-dimostratore è stato collocato a Milano. Si riportano nelle tabelle seguenti i dati climatici della città scelta.

Tabella 40 Temperature esterne medie mensili – zona climatica E

Descrizione	u.m.	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Temperatura	°C	4,0	7,1	10,6	13,4	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8	14,1	7,5	3,5

Tabella 41 Irradiazione solare media mensile – zona climatica E

Esposizione	u.m.	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Nord	MJ/m ²	1,6	2,3	3,7	5,3	7,6	10,0	9,4	6,7	4,5	2,6	1,5	1,3
Nord-Est	MJ/m ²	1,8	3,0	5,3	8,0	10,2	12,7	12,6	9,8	7,1	3,4	1,7	1,4
Est	MJ/m ²	4,1	5,8	8,6	11,0	12,5	14,7	15,2	12,9	10,9	6,0	3,4	3,0
Sud-Est	MJ/m ²	7,4	8,7	10,8	11,7	11,7	13,0	13,6	12,8	12,7	8,3	5,7	5,4
Sud	MJ/m ²	9,6	10,4	11,4	10,5	9,7	10,4	10,8	11,0	12,4	9,4	7,1	6,9
Sud-Ovest	MJ/m ²	7,4	8,7	10,8	11,7	11,7	13,0	13,6	12,8	12,7	8,3	5,7	5,4
Ovest	MJ/m ²	4,1	5,8	8,6	11,0	12,5	14,7	15,2	12,9	10,9	6,0	3,4	3,0
Nord-Ovest	MJ/m ²	1,8	3,0	5,3	8,0	10,2	12,7	12,6	9,8	7,1	3,4	1,7	1,4
Orizz. Diffusa	MJ/m ²	2,2	3,2	5,0	6,5	8,3	9,8	8,8	7,5	5,8	3,6	2,1	1,9
Orizz. Diretta	MJ/m ²	2,7	4,2	6,8	9,5	10,7	13,1	14,5	11,6	9,4	4,4	2,2	1,7

Irradianza sul piano orizzontale nel mese di massima insolazione:

270 W/m²

Dalle simulazioni effettuate la parete in tufo da 55 cm oggetto di studio non risulta soggetta a fenomeni di condensa superficiale né interstiziale come si evince dalle tabelle e dai grafici seguenti.

Tabella 42 Risultati della verifica della condensa superficiale nella parete perimetrale in tufo da 55 cm ante operam - zona climatica E

Mese	θ_{int} [°C]	θ_{est} [°C]	P_{int} [Pa]	P_{est} [Pa]	θ_{acc} [°C]	P_{acc} [Pa]	f_{RSI} [-]
ottobre	20,0	14,1	1632	1323	17,8	2041	0,632
novembre	20,0	7,5	1366	822	15,0	1707	0,602
dicembre	20,0	3,5	1319	633	14,5	1648	0,666
gennaio	20,0	4,0	1350	682	14,8	1688	0,678
febbraio	20,0	7,1	1324	766	14,5	1655	0,577
marzo	20,0	10,6	1244	810	13,6	1555	0,317
aprile	20,0	13,4	1382	1048	15,2	1728	0,275

Tabella 43 Risultati della verifica della condensa interstiziale nella parete perimetrale in tufo da 55 cm ante operam - zona climatica E

Mese	θ_{int} [°C]	θ_{est} [°C]	ϕ_{int} [%]	ϕ_{est} [%]	g_c [g/m ²]	Ma [g/m ²]	Periodi	Stato
ottobre	20,0	14,1	70	82	0,0	0	1	Asciutto
novembre	20,0	7,5	58	79	0,0	0	1	Asciutto
dicembre	20,0	3,5	56	81	0,0	0	1	Asciutto
gennaio	20,0	4,0	58	84	0,0	0	1	Asciutto
febbraio	20,0	7,1	57	76	0,0	0	1	Asciutto
marzo	20,0	10,6	53	63	0,0	0	1	Asciutto
aprile	20,0	13,4	59	68	0,0	0	1	Asciutto

maggio	19,4	19,4	73	68	0,0	0	1	Asciutto
giugno	22,8	22,8	59	56	0,0	0	1	Asciutto
luglio	24,5	24,5	61	58	0,0	0	1	Asciutto
agosto	24,3	24,3	65	61	0,0	0	1	Asciutto
settembre	19,8	19,8	59	55	0,0	0	1	Asciutto

Tabella 44 Distribuzione della temperatura nella parete perimetrale in tufo da 55 cm [°C] ante operam - zona climatica E

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
<i>Amb.</i>	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8
<i>Int.</i>	18,8	17,5	16,7	16,8	17,5	18,1	18,7	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8
1	18,7	17,3	16,4	16,5	17,2	17,9	18,6	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8
2	14,4	8,1	4,3	4,8	7,7	11,1	13,7	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8
3	14,3	7,9	4,0	4,5	7,5	10,9	13,6	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8
<i>Est.</i>	14,1	7,5	3,5	4,0	7,1	10,6	13,4	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8

Valori sul lato esterno dello strato; Amb.=ambiente interno; Int.=a valle dello strato liminare interno; Est.=ambiente esterno

Tabella 45 Distribuzione della pressione parziale del vapore nella parete perimetrale in tufo da 55 cm [Pa] ante operam - zona climatica E

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
<i>Amb.</i>	1632	1366	1319	1350	1324	1244	1382	1644	1648	1875	1964	1372
<i>Int.</i>	1632	1366	1319	1350	1324	1244	1382	1644	1648	1875	1964	1372
1	1631	1364	1316	1347	1322	1242	1381	1644	1648	1875	1964	1372
2	1326	827	639	688	771	814	1051	1524	1549	1776	1865	1266
3	1323	822	633	682	766	810	1048	1523	1548	1775	1864	1265
<i>Est.</i>	1323	822	633	682	766	810	1048	1523	1548	1775	1864	1265

Valori sul lato esterno dello strato; Amb.=ambiente interno; Int.=a valle dello strato liminare interno; Est.=ambiente esterno

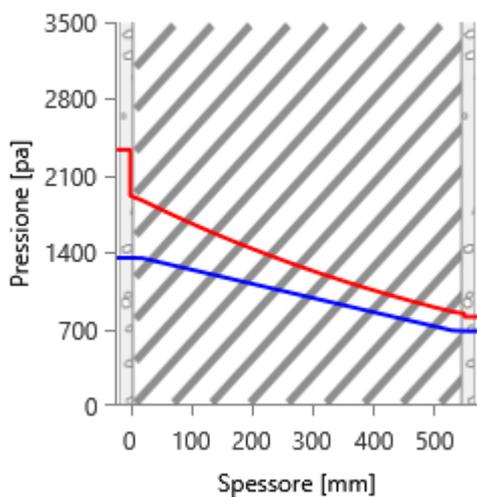
Tabella 46 Distribuzione della pressione di saturazione nella parete perimetrale in tufo da 55 cm [Pa] ante operam - zona climatica E

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
<i>Amb.</i>	2337	2337	2337	2337	2337	2337	2337	2252	2774	3073	3036	2308
<i>Int.</i>	2174	2003	1906	1918	1993	2082	2155	2252	2774	3073	3036	2308
1	2156	1968	1861	1874	1957	2054	2135	2252	2774	3073	3036	2308
2	1639	1081	831	859	1053	1317	1569	2252	2774	3073	3036	2308
3	1628	1065	814	842	1037	1303	1558	2252	2774	3073	3036	2308
<i>Est.</i>	1608	1036	785	813	1008	1278	1537	2252	2774	3073	3036	2308

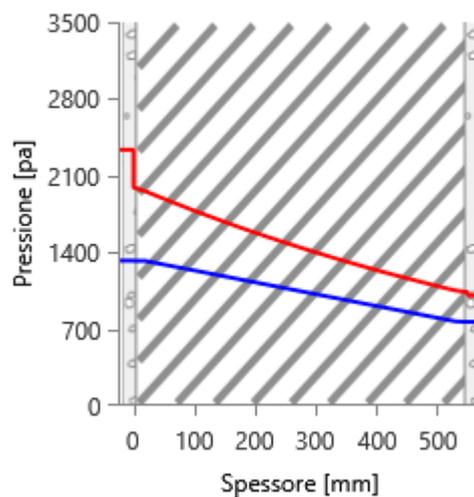
Valori sul lato esterno dello strato; Amb.=ambiente interno; Int.=a valle dello strato liminare interno; Est.=ambiente esterno

Tabella 47 Grafici mensili delle pressioni parziali e di saturazione del vapore [Pa] ante operam - zona climatica E

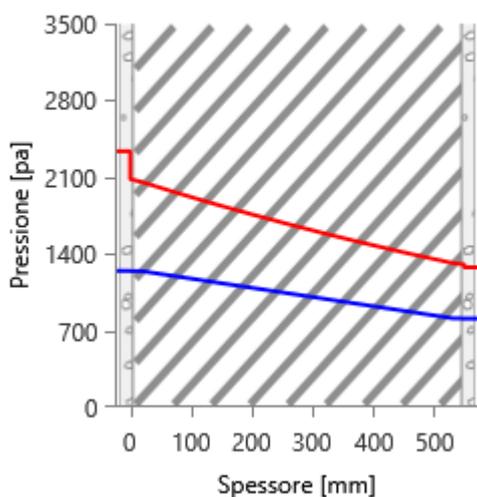
GENNAIO



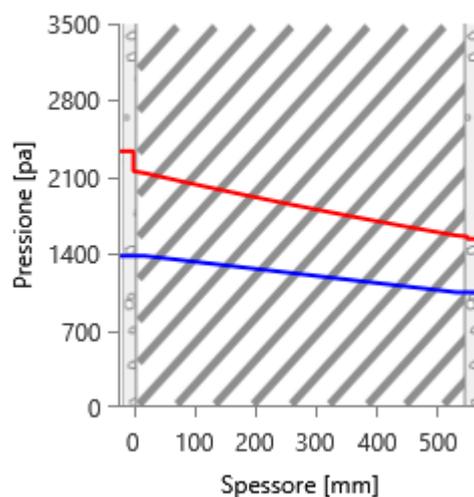
FEBBRAIO



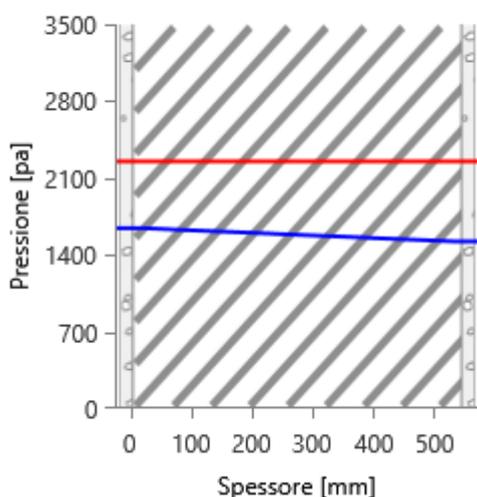
MARZO



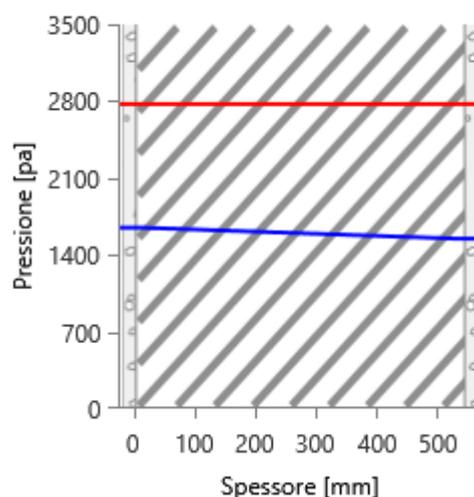
APRILE



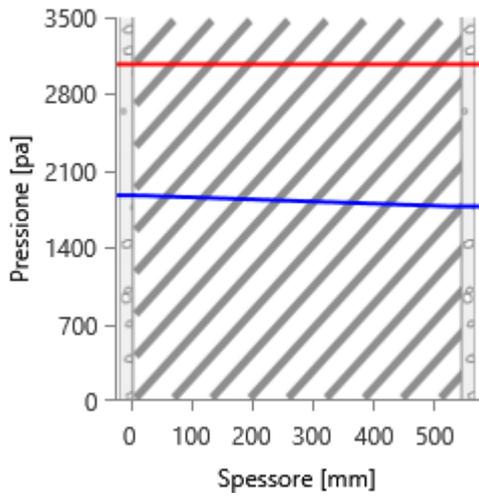
MAGGIO



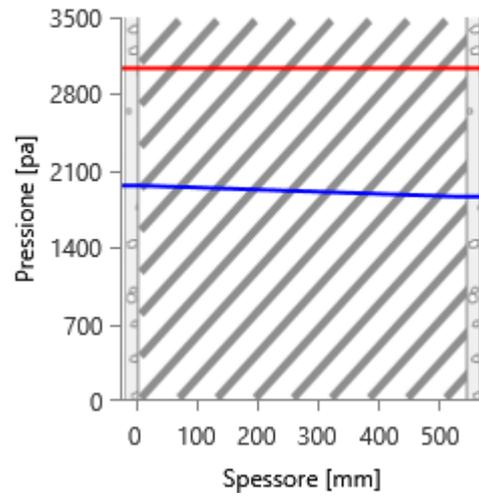
GIUGNO



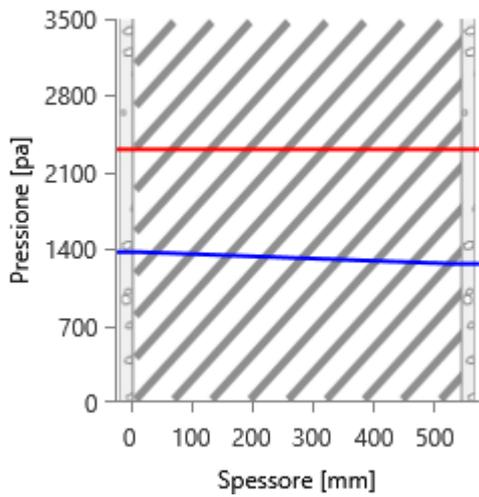
LUGLIO



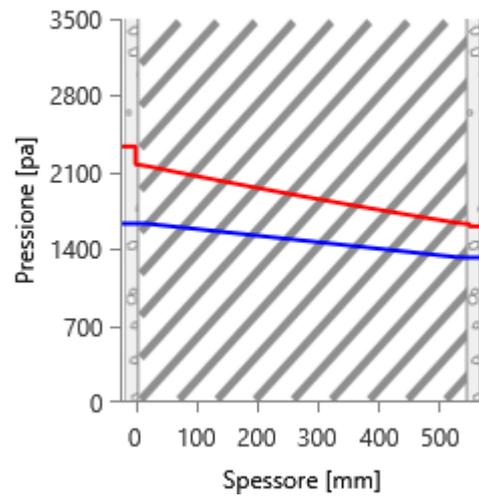
AGOSTO



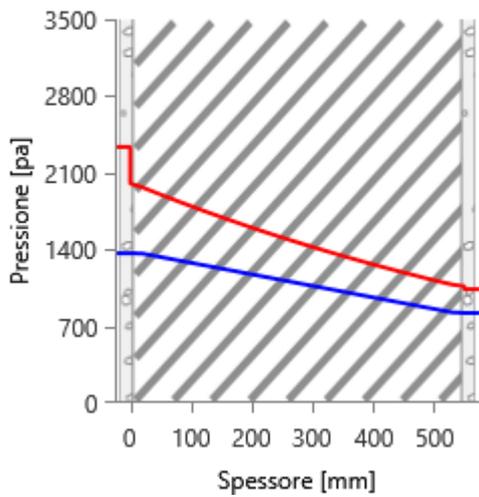
SETTEMBRE



OTTOBRE



NOVEMBRE



DICEMBRE

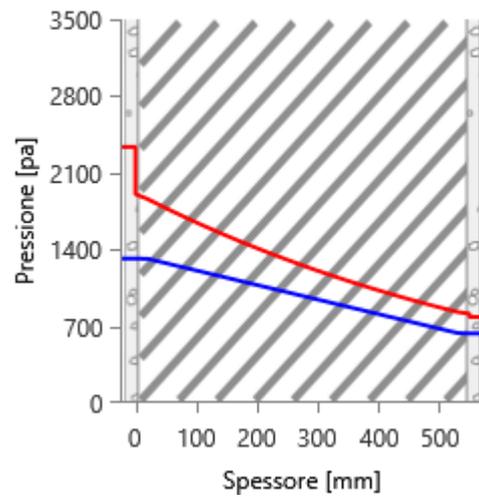
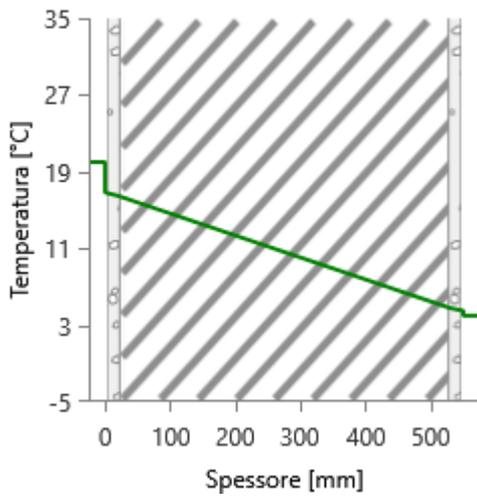
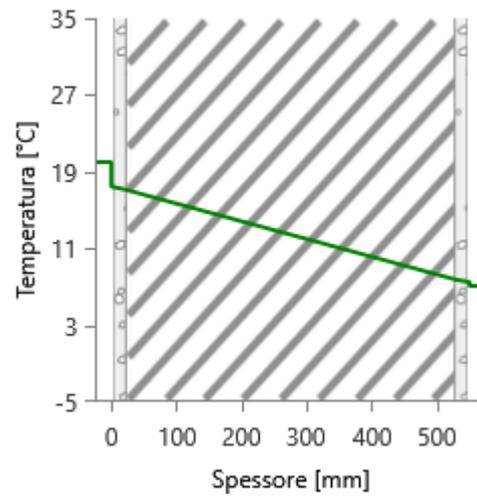


Tabella 48 Grafici mensili delle temperature [°C] ante operam - zona climatica E

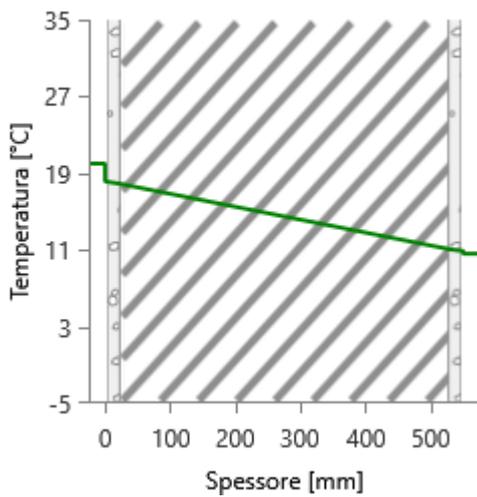
GENNAIO



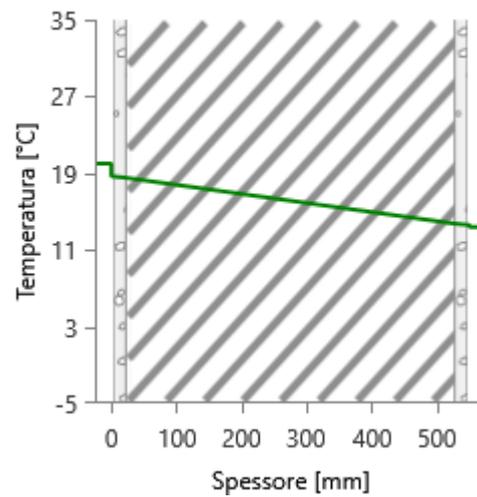
FEBBRAIO



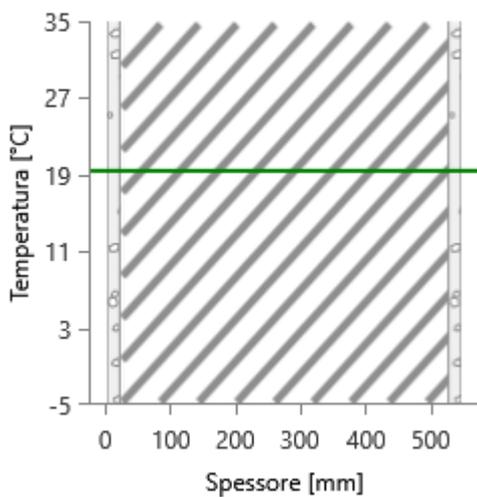
MARZO



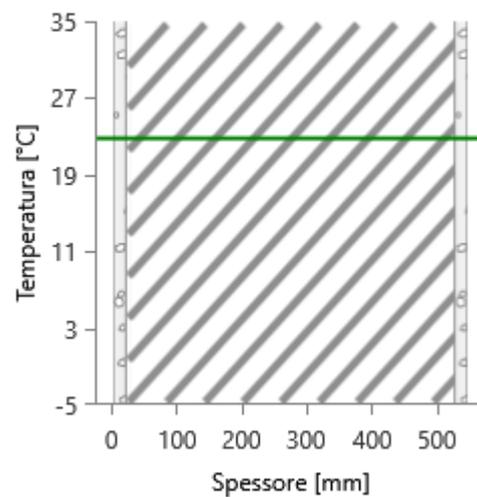
APRILE



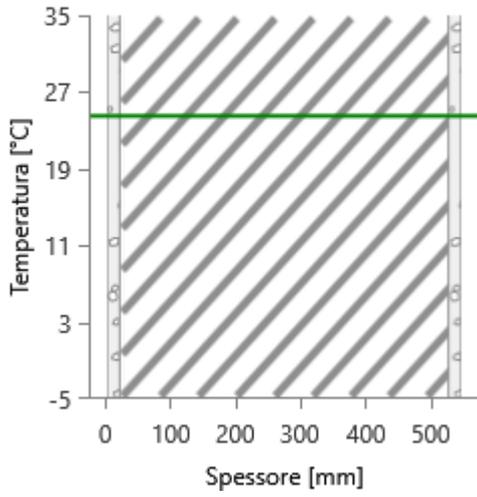
MAGGIO



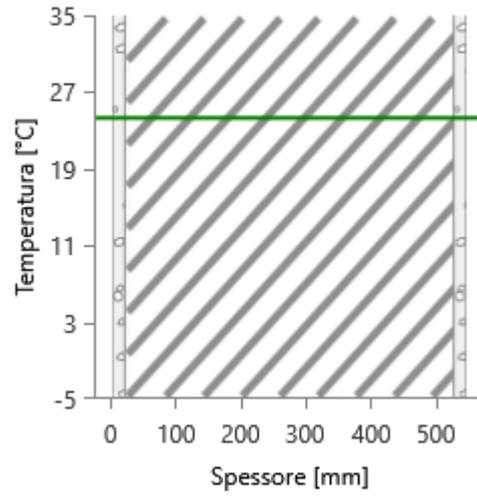
GIUGNO



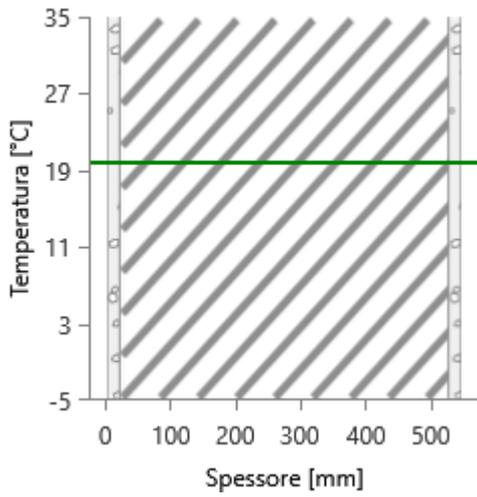
LUGLIO



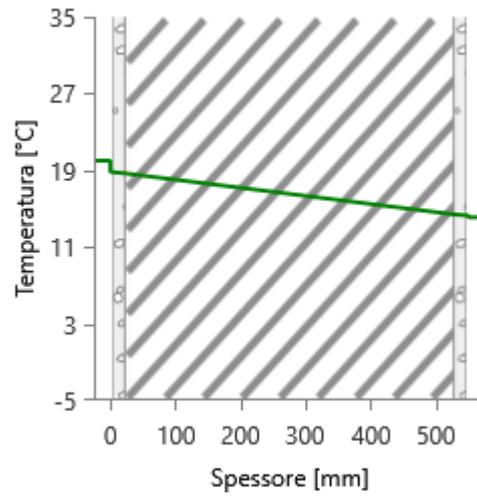
AGOSTO



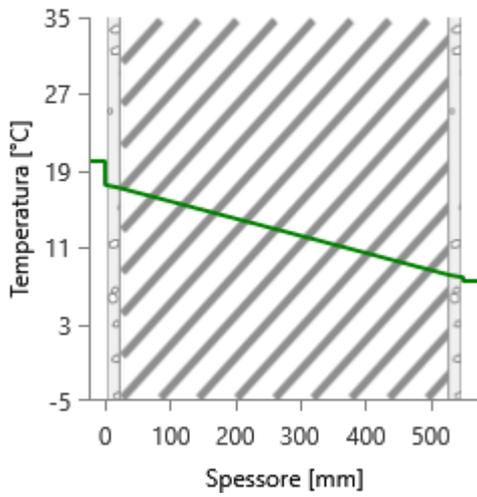
SETTEMBRE



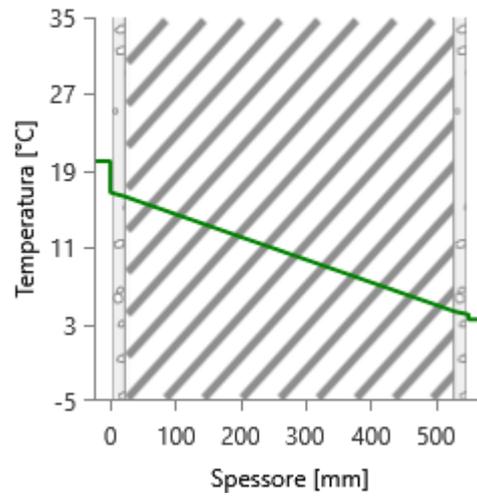
OTTOBRE



NOVEMBRE



DICEMBRE



È stata valutata la potenza dispersa per trasmissione Φ_{tr} sia dell'intero edificio sia del locale soggiorno collocato al piano terra esposto a nord-est, dove è stato svolto il monitoraggio in ambiente reale, sia della parete perimetrale in tufo da 55 cm per ciascun orientamento (Tabella 49; Tabella 50).

Dalle simulazioni effettuate sull'edificio-dimostratore in zona climatica E si riscontra che la potenza totale dispersa per trasmissione (Φ_{tr}) attraverso l'intero edificio (strutture opache e trasparenti) è di 14.848 W come riportato in Tabella 49; si registra un aumento della potenza totale dispersa per trasmissione rispetto alla zona climatica C del 22,53% e rispetto alla zona climatica D del 16,18%.

La potenza totale dispersa per trasmissione (Φ_{tr}) attraverso i componenti che definiscono il locale soggiorno, oggetto di monitoraggio nell'ambiente reale, aumenta del 29,59% rispetto alla zona climatica C e del 20,94% rispetto alla zona climatica D.

La potenza totale dispersa per trasmissione attraverso la parete perimetrale in tufo da 55 cm è di 4.694 W come riportato in Tabella 50; si registra un aumento della potenza totale dispersa per trasmissione rispetto alla zona climatica C del 35,86% e rispetto alla zona climatica D del 25,00%.

La potenza totale dispersa per trasmissione attraverso la parete perimetrale in tufo da 55 cm esposta a nord (oggetto di monitoraggio in ambiente reale) è di 835 W come riportato in Tabella 50; si registra un aumento della potenza totale dispersa per trasmissione rispetto alla zona climatica C del 35,79% e rispetto alla zona climatica D del 25,00%.

Tabella 49 Sintesi delle dispersioni ante operam – zona climatica E

Dispersioni Ante Operam		
Intero edificio	Φ_{tr} [W]	14.848

Tabella 50 Dispersioni per componente M100 - Parete esterna in tufo - 55 cm ante operam in zona climatica E

	Sup. Tot	ΦT		Φ
ZONA E	[m ²]	[W]	%	[W/m ²]
N	30,44	835	5,6	27,43
E	41,39	1088	7,3	26,29
S	41,81	956	6,4	22,87
O	72,14	1814	12,2	25,15
TOT	185,78	4694	31,6	25,27

Sono state valutate le dispersioni per trasmissione relative all'energia invernale, dei componenti opachi e, in particolare, si sottolinea quello oggetto dei successivi monitoraggi in loco (Tabella 51).

Nell'ultima colonna della Tabella 51 sono stati riportati i dati relativi all'energia dispersa, ottenuti dalla somma tra le dispersioni per trasmissione e per extraflusso, meno gli apporti solari attraverso il componente.

Tabella 51 Dispersioni ordinate per componente - stagione invernale strutture opache - ante operam – zona climatica E

Cod	Descrizione elemento	U [W/m ² K]	Sup. [m ²]	$Q_{H,tr}$ [kWh]	% $Q_{H,tr}$ [%]	$Q_{H,r}$ [kWh]	% $Q_{H,r}$ [%]	$Q_{sol,k}$ [kWh]	% $Q_{sol,k}$ [%]	$Q_{H,tr} + Q_{H,r} - Q_{sol,k}$ [kWh]
M100	Parete esterna in tufo - 55 cm - T	0,895	185,78	9070	30,8	1268	49,3	2908	40,2	7430
M103	Parete esterna in tufo - 40 cm - T	1,166	9,98	635	2,2	89	3,5	205	2,8	519
M104	Parete esterna in tufo - 20 cm - T	1,956	23,27	2483	8,4	347	13,5	756	10,5	2074

M105	Parete esterna in tufo - 55 cm - U	0,848	11,33	419	1,4	-	-	-	-	-
M201	Parete interna - 10 cm - U	2,36	44,57	4589	15,6	-	-	-	-	-
M203	Parete interna in tufo - 40 cm - U	1,076	52,64	2472	8,4	-	-	-	-	-
P1	Pavimento su terreno - G	0,588	71,58	2295	7,8	-	-	-	-	-
P3	Soletta interpiano - U	1,423	9,49	236	0,8	-	-	-	-	-
S2	Soletta interpiano - U	1,756	68,99	2115	7,2	-	-	-	-	-
S3	Soletta interpiano - T	1,865	13,07	1330	4,5	372	14,5	532	7,4	1170
Totali				25644	87,1	2076	80,8	4401	60,9	11193

Dal confronto tra le simulazioni svolte nelle diverse zone climatiche (z.c.) è evidente un aumento dell'energia dispersa per trasmissione e per extraflusso, legate dalle diverse condizioni ambientali.

In particolare, è stata valutata l'energia dispersa per trasmissione $Q_{H,tr}$ attraverso il componente M100 nelle tre diverse zone: tra la z.c. C e la z.c. D, l'energia dispersa per trasmissione aumenta del 15,66%, tra la z.c. D e la z.c. E l'energia dispersa per trasmissione aumenta del 43,47%, tra la z.c. C e la z.c. E, l'energia dispersa per trasmissione aumenta del 66%.

4.5 Caratteristiche energetiche dell'involucro opaco e trasparente post operam

Tramite software sono state calcolate le caratteristiche termofisiche della chiusura verticale – parete perimetrale in tufo da 55 cm e gli infissi (calcolo trasmittanza termica, calcolo resistenza termica, ecc.) dello stato di progetto per verificare il rispetto dei requisiti minimi di trasmittanza stazionaria previsti da normativa vigente per ciascuna zona climatica (Tabella 52). Dai calcoli riportati successivamente si evince che entrambe le soluzioni di isolamento SC.01 e PV.02, individuate durante il secondo anno di ricerca, permettono di raggiungere un valore di trasmittanza inferiore rispetto anche a quello previsto per la zona climatica F.

Tabella 52. Valori di trasmittanza stazionaria previsti dal Decreto Requisiti Ecobonus GU 05/10/2020 – Allegato E (calcolo secondo UNI EN ISO 6946).

Tipologia di intervento	UNI EN ISO 6946	U (W/m ² K)
	Strutture opache verticali: isolamento pareti perimetrali	Zona climatica A e B
Zona climatica C		≤0.30
Zona climatica D		≤0.26
Zona climatica E		≤0.23
Zona climatica F		≤0.22

Tabella 53 Elenco chiusure e partizioni verticali post operam – SC.01

Cod	Descrizione	Sp [mm]	Ms [kg/m ²]	C _T [kJ/m ² K]	ε [-]	α [-]	θ [°C]	Ue [W/m ² K]
M100	Parete esterna in tufo - 55 cm + SC.01 - T	687,0	841	59,029	0,90	0,60	1,6	0,212
M101	Parete esterna in tufo - 55 cm + SC.01 - E	687,0	841	59,029	0,90	0,60	1,6	0,201
M102	Parete esterna in tufo - 35 cm - E	350,0	496	60,947	0,90	0,60	1,6	1,293
M103	Parete esterna in tufo - 40 cm + SC.01 - T	537,0	601	59,029	0,90	0,60	1,6	0,213
M104	Parete esterna in tufo - 20 cm + SC.01 - T	337,0	281	58,920	0,90	0,60	1,6	0,231
M105	Parete esterna in tufo - 55 cm - U	550,0	816	58,803	0,90	0,60	0,0	0,848
M200	Parete interna - 10 cm - D	100,0	112	55,591	0,90	0,60	-	2,247
M201	Parete interna - 10 cm - U	100,0	112	55,591	0,90	0,60	0,0	2,360
M202	Parete interna in tufo - 40 cm - D	400,0	608	59,833	0,90	0,60	-	1,025
M203	Parete interna in tufo - 40 cm - U	400,0	608	59,833	0,90	0,60	0,0	1,076

Tabella 54 Elenco chiusure e partizioni verticali post operam – PV.02

Cod	Descrizione	Sp [mm]	Ms [kg/m ²]	C _T [kJ/m ² K]	ε [-]	α [-]	θ [°C]	Ue [W/m ² K]
M100	Parete esterna in tufo - 55 cm + PV.02 - T	730,0	860	59,029	0,90	0,60	1,6	0,195
M101	Parete esterna in tufo - 55 cm + PV.02 - E	730,0	860	59,029	0,90	0,60	1,6	0,195
M102	Parete esterna in tufo - 35 cm - E	350,0	496	60,947	0,90	0,60	1,6	1,293
M103	Parete esterna in tufo - 40 cm + PV.02 - T	580,0	620	59,029	0,90	0,60	1,6	0,206
M104	Parete esterna in tufo - 20 cm + PV.02 - T	380,0	300	58,920	0,90	0,60	1,6	0,223
M105	Parete esterna in tufo - 55 cm - U	550,0	816	58,803	0,90	0,60	0,0	0,848

M200	Parete interna - 10 cm - D	100,0	112	55,591	0,90	0,60	-	2,247
M201	Parete interna - 10 cm - U	100,0	112	55,591	0,90	0,60	0,0	2,360
M202	Parete interna in tufo - 40 cm - D	400,0	608	59,833	0,90	0,60	-	1,025
M203	Parete interna in tufo - 40 cm - U	400,0	608	59,833	0,90	0,60	0,0	1,076

Tabella 55 Elenco chiusure e partizioni orizzontali post operam

Cod	Descrizione	Sp [mm]	Ms [kg/m ²]	C _T [kJ/m ² K]	ε [-]	α [-]	θ [°C]	Ue [W/m ² K]
P1	Pavimento su terreno - G	530,0	1019	57,228	0,90	0,60	1,6	0,565
P2	Soletta interpiano - N	315,0	443	61,744	0,90	0,60	20,0	1,423
P3	Soletta interpiano - U	315,0	443	61,744	0,90	0,60	12,0	1,423
S1	Soletta interpiano	315,0	443	69,136	0,90	0,60	20,0	1,756
S2	Soletta interpiano - U	315,0	443	69,136	0,90	0,60	12,0	1,756
S3	Soletta interpiano - T	315,0	443	70,386	0,90	0,90	1,6	1,856

Legenda simboli

- Sp Spessore struttura
- Ms Massa superficiale della struttura senza intonaci
- Y_{IE} Trasmissione termica periodica della struttura
- Sfasamento Sfasamento dell'onda termica
- C_T Capacità termica areica
- ε Emissività
- α Fattore di assorbimento
- θ Temperatura esterna o temperatura locale adiacente
- Ue Trasmissione di energia della struttura

Cod	Descrizione	vetro	ε	ggl,n	fc inv	fc est	H [cm]	L [cm]	U _g [W/m ² K]	U _w [W/m ² K]	θ [°C]	Agf [m ²]	Lgf [m]
W100	PO1 - Finestra sala - T	Doppio	0,837	0,670	1,00	1,00	150,0	144,0	0,000	1,750	1,6	1,806	8,180
W101	PO2 - Finestra cucina e bagno - T	Doppio	0,837	0,670	1,00	1,00	150,0	98,0	0,000	1,750	1,6	1,232	4,560
W200	PO3 - Porta Finestra camere - T	Doppio	0,837	0,670	1,00	1,00	210,0	142,0	0,000	1,750	1,6	2,477	12,880
W201	PO4 - Finestra camera - T	Doppio	0,837	0,670	1,00	1,00	146,0	142,0	0,000	1,750	1,6	1,727	7,980
W202	PO5 - Finestra scale - E	Doppio	0,837	0,670	1,00	1,00	150,0	100,0	0,000	1,750	1,6	1,260	4,600

Legenda simboli

- ε Emissività

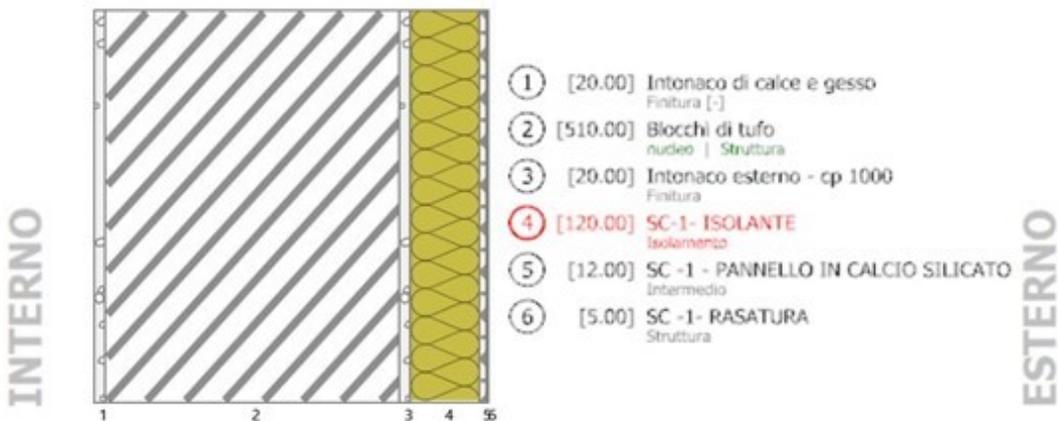


ggl,n	Fattore di trasmittanza solare
fc inv	Fattore tendaggi (energia invernale)
fc est	Fattore tendaggi (energia estiva)
H	Altezza
L	Larghezza
Ug	Trasmittanza vetro
Uw	Trasmittanza serramento
θ	Temperatura esterna o temperatura locale adiacente
Agf	Area del vetro
Lgf	Perimetro del vetro

4.5.1 Soluzione di isolamento a cappotto SC.01

Attraverso l'applicazione della soluzione di isolamento a cappotto contraddistinta da uno strato di 12 cm di spessore di lana di roccia, un pannello in calcio-silicato di 1,2 cm e rasatura finale è possibile raggiungere un valore di trasmittanza di 0,201 W/m²K, con una riduzione del 76,49% rispetto all'ante operam, inferiore ai requisiti previsti dall'Allegato E "Requisiti degli interventi di isolamento termico" del DECRETO 6 agosto 2020 "Requisiti delle asseverazioni per l'accesso alle detrazioni fiscali per la riqualificazione energetica degli edifici - cd. Ecobonus".

PARETE IN TUFO + SC1 – Sp. = 68,7 cm – U = 0,201 W/m²K



N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di calce e gesso	20,00	0,7000	0,029	1400	1,00	10
2	Blocco in tufo	510,00	0,5500	0,927	1600	1,00	100
3	Malta di calce o di calce e cemento	20,00	0,9000	0,022	1800	1,00	22
4	Isolante Lana di roccia - SC.01	120,00	0,0320	3,750	30	1030,00	1
5	Pannello in calcio silicato - SC.01	12,00	0,3900	0,031	1200	900,00	1
6	Rasatura per sistema a cappotto - SC.01	5,00	0,7000	0,007	1400	1000,00	1
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,068	-	-	-

Figura 28 Stratigrafia chiusura verticale – parete perimetrale isolata con sistema SC.01

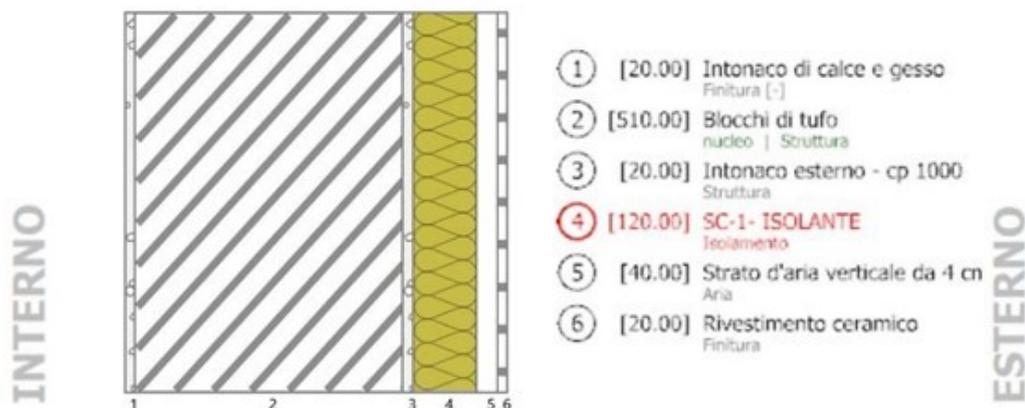
Tabella 56 Caratteristiche termiche e igrometriche della chiusura verticale - parete perimetrale in tufo isolata con SC.01 – 68,7 cm (M100)

Trasmittanza con maggiorazione ponte termico	0,212	W/m ² K
Maggiorazione ponte termico	5,00	%
Spessore	687	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	1,6	°C
Permeanza	3,863	10 ⁻¹² kg/sm ² Pa
Massa superficiale (con intonaci)	905	kg/m ²
Massa superficiale (senza intonaci)	841	kg/m ²
Trasmittanza periodica	0,000	W/m ² K

4.5.2 Sistema di isolamento parete ventilata PV.02

Attraverso l'applicazione del sistema di parete ventilata contraddistinta da uno strato di 12 cm di spessore di lana di roccia, una camera di ventilazione di 4 cm e una finitura realizzata con rivestimento ceramico di 2 cm è possibile raggiungere un valore di trasmittanza di 0,195 W/m²K con una riduzione del 78,16% rispetto all'ante operam, inferiore ai requisiti previsti dall'Allegato E "Requisiti degli interventi di isolamento termico" del DECRETO 6 agosto 2020 "Requisiti delle asseverazioni per l'accesso alle detrazioni fiscali per la riqualificazione energetica degli edifici - cd. Ecobonus".

PARETE IN TUFO + PV2 – Sp. = 73 cm – U = 0,195 W/m²K



N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di calce e gesso	20,00	0,7000	0,029	1400	1,00	10
2	Blocco in tufo	510,00	0,5500	0,927	1600	1,00	100
3	Malta di calce o di calce e cemento	20,00	0,9000	0,022	1800	1,00	22
4	Isolante Lana di roccia - PV.02	120,00	0,0320	3,750	30	1030,00	1
5	Intercapedine non ventilata Av<500 mm ² /m	40,00	0,2222	0,180	-	-	-
6	Rivestimento ceramico - PV.02	20,00	1,3000	0,015	2000	840,00	205
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,068	-	-	-

Figura 29 Stratigrafia chiusura verticale opache isolata con sistema PV.02

Tabella 57 Caratteristiche termiche e igrometriche della chiusura verticale opaca in tufo isolata con PV.02 – 73 cm (M100)

Trasmittanza con maggiorazione ponte termico	0,195 W/m ² K
Maggiorazione ponte termico	0,00 %
Spessore	730 mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	1,6 °C
Permeanza	3,579 10 ⁻¹² kg/sm ² Pa
Massa superficiale (con intonaci)	924 kg/m ²
Massa superficiale (senza intonaci)	860 kg/m ²

4.5.3 Chiusura verticale – infissi post operam

Le chiusure verticali trasparenti esistenti dell'edificio-dimostratore sono state sostituite con infissi dotati di un telaio in legno e vetrocamera nel rispetto dei valori di trasmittanza previsti per la zona climatica C (1,75 W/m²K), dall'allegato E "Requisiti degli interventi di isolamento termico" del DECRETO 6 agosto 2020 "Requisiti delle asseverazioni per l'accesso alle detrazioni fiscali per la riqualificazione energetica degli edifici - cd. Ecobonus" (Tabella 58).

Tabella 58 Caratteristiche termiche e igrometriche degli infissi

Trasmittanza termica	U_w	1,750	W/m²K
Emissività	ε	0,837	-
Fattore tendaggi (invernale)	f _{c inv}	1,00	-
Fattore tendaggi (estivo)	f _{c est}	1,00	-
Fattore di trasmittanza solare	g _{gl,n}	0,670	-
Fattore trasmissione solare totale	g _{gl+sh}	0,658	-

4.6 Calcolo delle prestazioni globali dell'edificio esteso all'intero anno – post operam

Il calcolo delle prestazioni globali dell'edificio-dimostratore è stato effettuato per le zone climatiche C, D ed E, sia con l'applicazione del sistema di isolamento SC.01 sia con quello PV.02.

Si riportano i risultati valutati per l'intero anno.

4.6.1 Simulazioni in zona climatica C – soluzione SC.01

Dalle simulazioni effettuate in zona climatica C la parete non risulta soggetta a fenomeni di condensa superficiale né interstiziale come si evince dai seguenti tabelle e grafici in cui valori delle pressioni risultano vicini ma non si intersecano tra loro, nonostante l'applicazione di 12 cm di isolante, grazie alla struttura fibrosa della lana di roccia.

Tabella 59 Risultati verifica della condensa superficiale parete perimetrale in tufo + SC.01 - zona climatica C

Mese	θ_{int} [°C]	θ_{est} [°C]	P_{int} [Pa]	P_{est} [Pa]	θ_{acc} [°C]	P_{acc} [Pa]	f_{RSI} [-]
ottobre	18,5	18,5	1692	1539	18,4	2116	0,000
novembre	20,0	13,0	1505	1156	16,5	1881	0,506
dicembre	20,0	9,5	1473	1001	16,2	1842	0,639
gennaio	20,0	9,1	1424	937	15,7	1780	0,603
febbraio	20,0	8,9	1303	809	14,3	1628	0,486
marzo	20,0	11,2	1312	900	14,4	1640	0,364
aprile	18,0	14,5	1513	1218	16,6	1892	0,609

Legenda simboli

f_{RSI} Fattore di temperatura superficiale

Tabella 60 Risultati verifica della condensa interstiziale parete esterna in tufo + SC.01 - zona climatica C

Mese	θ_{int} [°C]	θ_{est} [°C]	ϕ_{int} [%]	ϕ_{est} [%]	g_c [g/m ²]	Ma [g/m ²]	Periodi	Stato
ottobre	18,5	18,5	80	72	0,0	0	1	Asciutto
novembre	20,0	13,0	64	77	0,0	0	1	Asciutto
dicembre	20,0	9,5	63	84	0,0	0	1	Asciutto
gennaio	20,0	9,1	61	81	0,0	0	1	Asciutto
febbraio	20,0	8,9	56	71	0,0	0	1	Asciutto
marzo	20,0	11,2	56	68	0,0	0	1	Asciutto
aprile	18,0	14,5	73	74	0,0	0	1	Asciutto
maggio	18,6	18,6	71	64	0,0	0	1	Asciutto
giugno	22,4	22,4	72	68	0,0	0	1	Asciutto
luglio	25,0	25,0	61	58	0,0	0	1	Asciutto
agosto	24,9	24,9	61	58	0,0	0	1	Asciutto
settembre	21,5	21,5	72	69	0,0	0	1	Asciutto

Tabella 61 Distribuzione della temperatura parete esterna in tufo + SC.01 [°C] - zona climatica C

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Amb.	18,5	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	18,0	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5
Int.	18,5	19,7	19,5	19,5	19,5	19,6	17,8	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5
1	18,5	19,6	19,4	19,4	19,4	19,5	17,8	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5
2	18,5	18,3	17,5	17,4	17,4	17,9	17,2	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5
3	18,5	18,3	17,4	17,4	17,3	17,9	17,1	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5
4	18,5	13,1	9,7	9,3	9,1	11,3	14,6	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5
5	18,5	13,1	9,6	9,2	9,0	11,3	14,5	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5
6	18,5	13,1	9,6	9,2	9,0	11,3	14,5	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5
Est.	18,5	13,0	9,5	9,1	8,9	11,2	14,5	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5

Valori sul lato esterno dello strato; Amb.=ambiente interno; Int.=a valle dello strato liminare interno; Est.=ambiente esterno

Tabella 62 Distribuzione della pressione parziale del vapore parete esterna in tufo + SC.01 [Pa] - zona climatica C

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Amb.	1692	1505	1473	1424	1303	1312	1513	1510	1943	1940	1924	1857
Int.	1692	1505	1473	1424	1303	1312	1513	1510	1943	1940	1924	1857
1	1692	1503	1472	1422	1301	1310	1512	1510	1943	1940	1924	1857
2	1541	1160	1006	943	814	904	1221	1362	1844	1841	1826	1758
3	1540	1157	1002	938	810	901	1219	1361	1843	1840	1825	1757
4	1539	1156	1001	937	809	900	1218	1361	1843	1840	1824	1757
5	1539	1156	1001	937	809	900	1218	1361	1843	1840	1824	1757
6	1539	1156	1001	937	809	900	1218	1361	1843	1840	1824	1757
Est.	1539	1156	1001	937	809	900	1218	1361	1843	1840	1824	1757

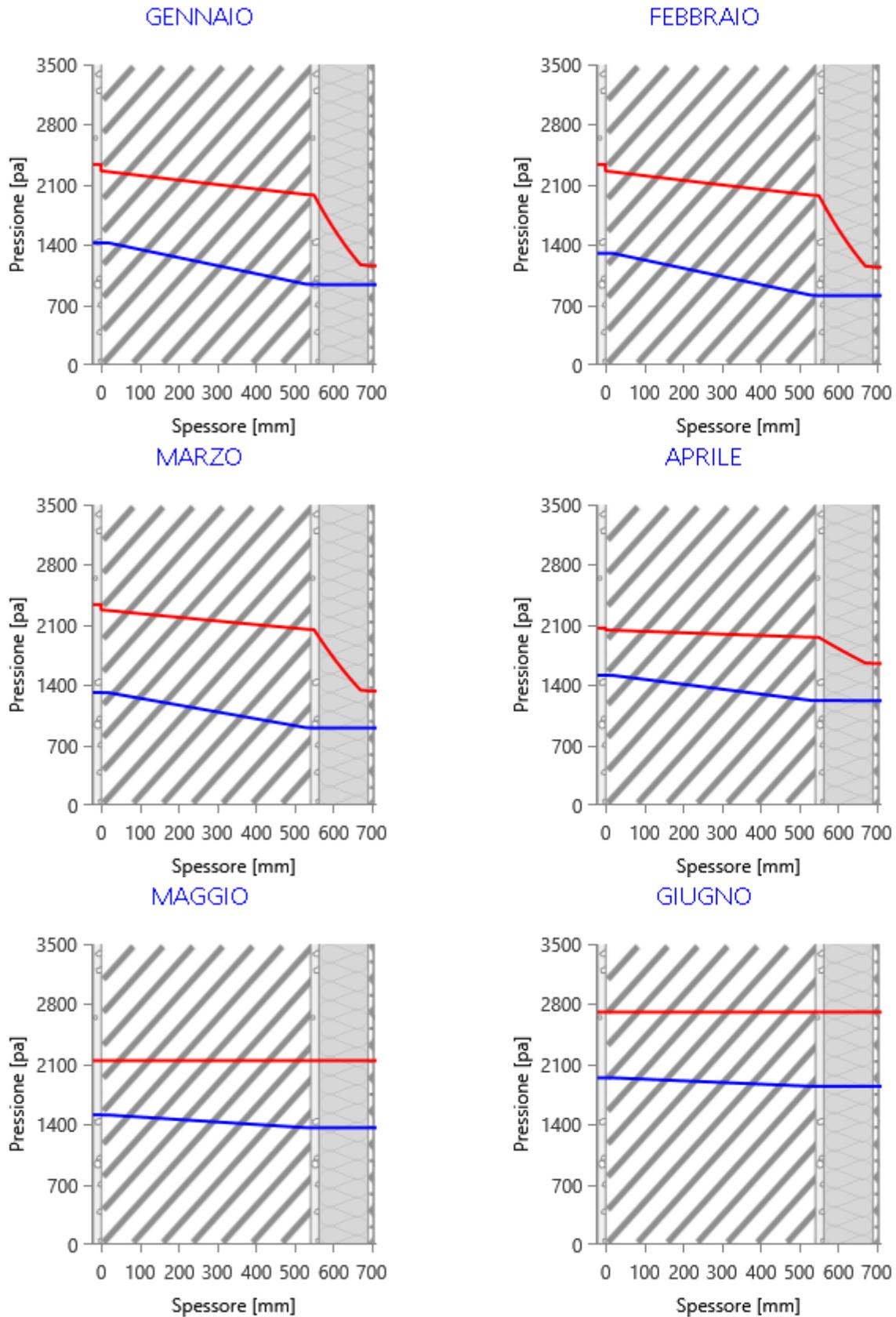
Valori sul lato esterno dello strato; Amb.=ambiente interno; Int.=a valle dello strato liminare interno; Est.=ambiente esterno

Tabella 63 Distribuzione della pressione di saturazione del vapore parete esterna in tufo + SC.01 [Pa] - zona climatica C

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Amb.	2129	2337	2337	2337	2337	2337	2063	2142	2708	3166	3147	2563
Int.	2129	2287	2263	2260	2259	2275	2040	2142	2708	3166	3147	2563
1	2129	2282	2255	2251	2250	2268	2038	2142	2708	3166	3147	2563
2	2129	2106	1998	1986	1980	2050	1957	2142	2708	3166	3147	2563
3	2129	2102	1993	1980	1974	2045	1955	2142	2708	3166	3147	2563
4	2129	1508	1200	1168	1153	1342	1656	2142	2708	3166	3147	2563
5	2129	1503	1195	1163	1148	1337	1654	2142	2708	3166	3147	2563
6	2129	1502	1193	1162	1147	1336	1653	2142	2708	3166	3147	2563
Est.	2129	1497	1187	1155	1140	1330	1650	2142	2708	3166	3147	2563

Valori sul lato esterno dello strato; Amb.=ambiente interno; Int.=a valle dello strato liminare interno; Est.=ambiente esterno

Tabella 64 Grafici mensili delle pressioni parziali e di saturazione del vapore [Pa] parete esterna in tufo + SC.01 - zona climatica C



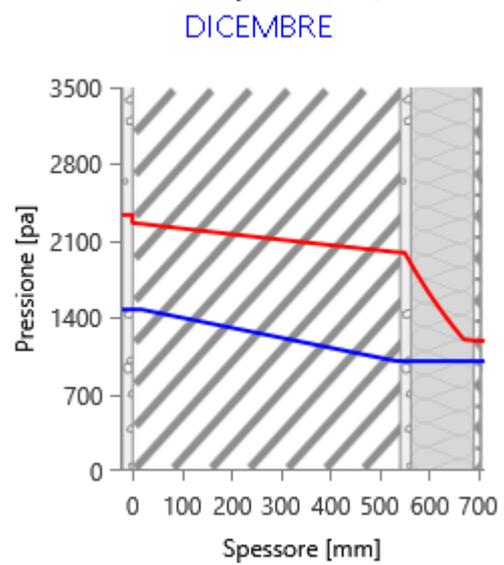
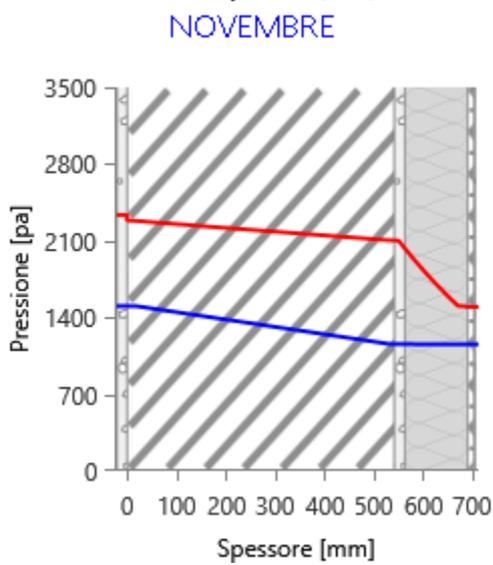
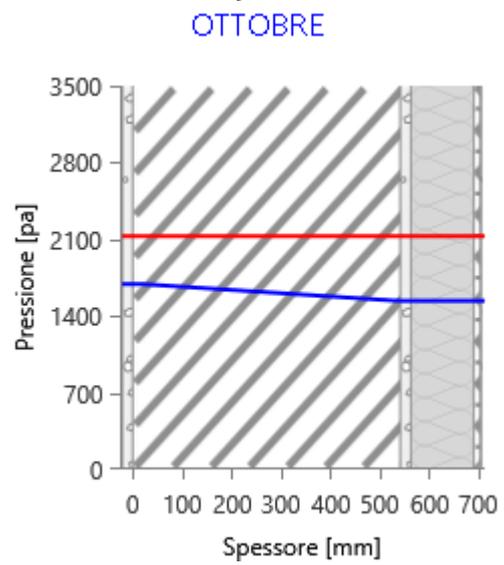
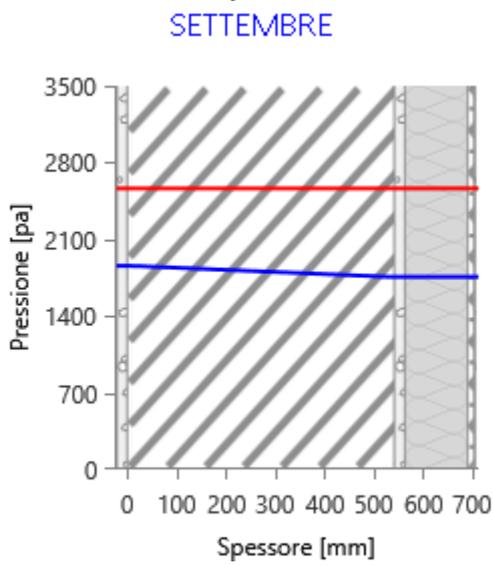
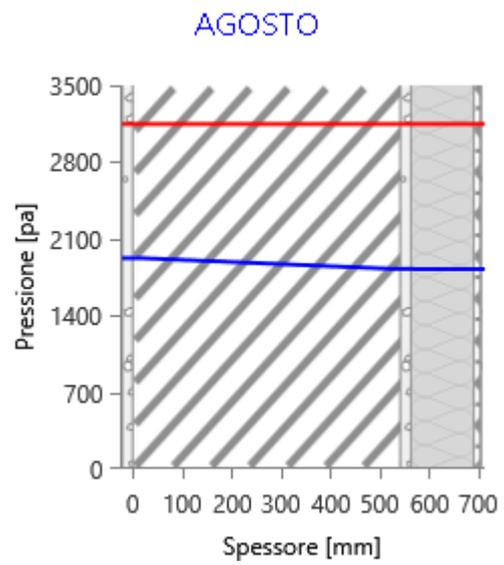
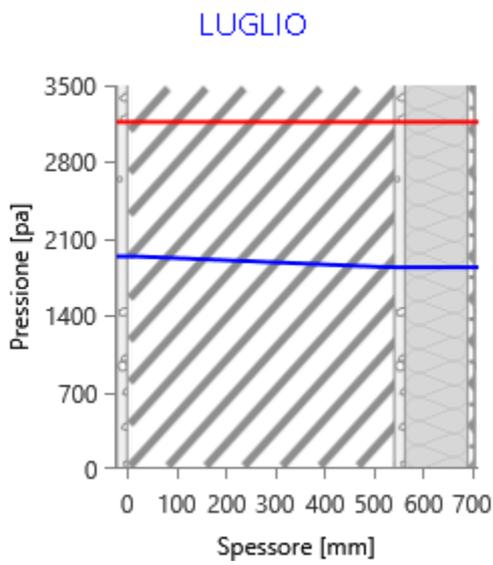
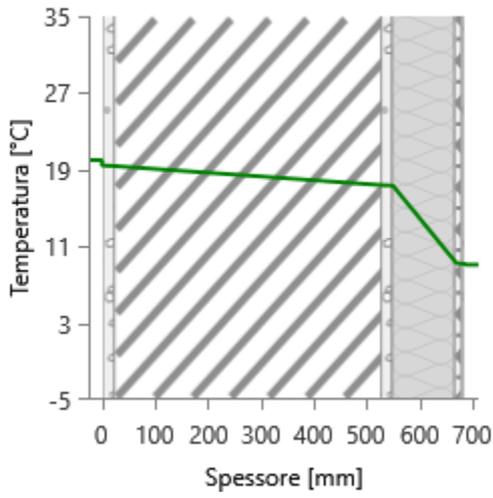
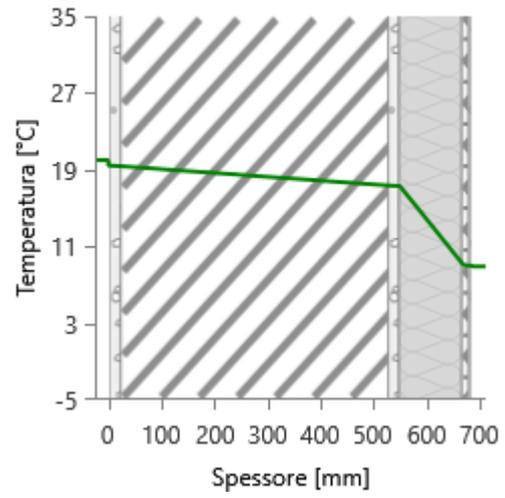


Tabella 65 Grafici mensili delle temperature [°C] parete esterna in tufo + SC.01 - zona climatica C

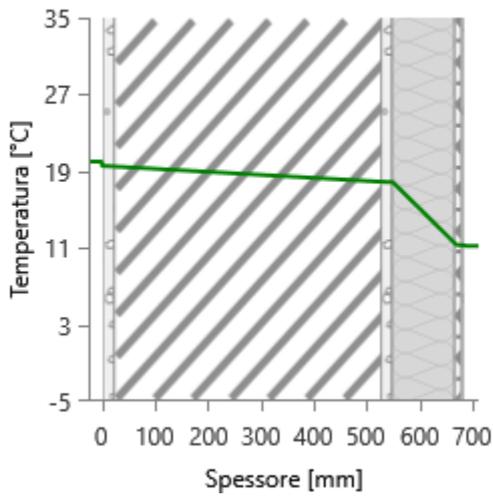
GENNAIO



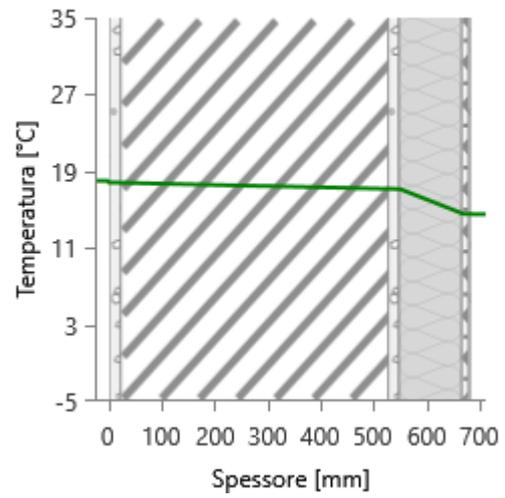
FEBBRAIO



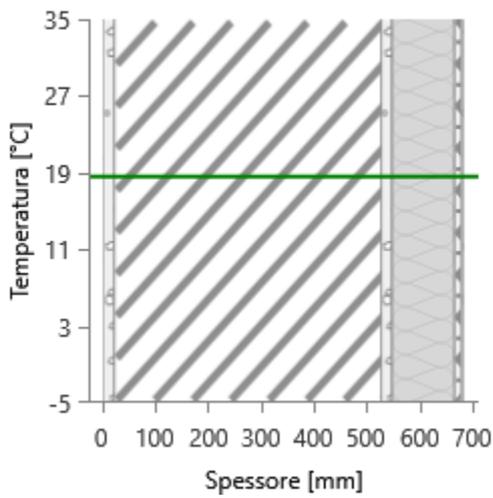
MARZO



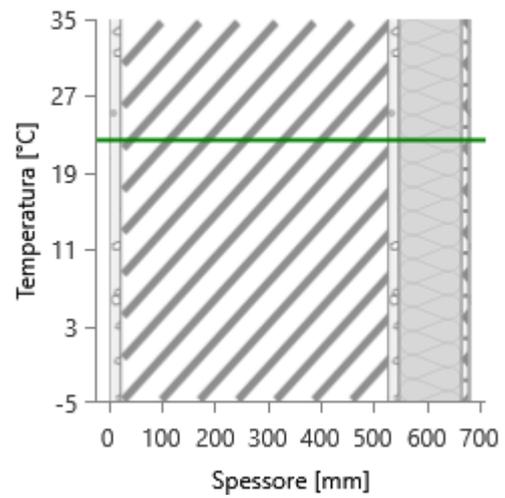
APRILE



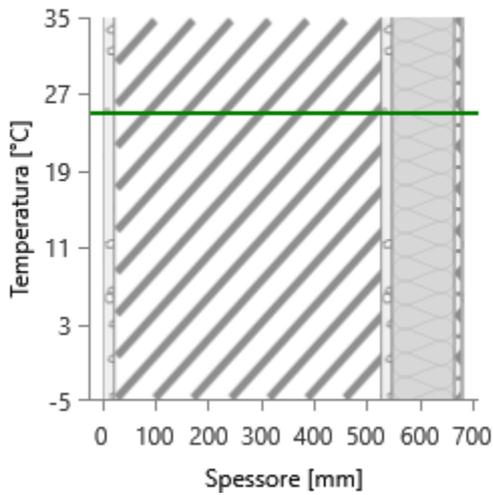
MAGGIO



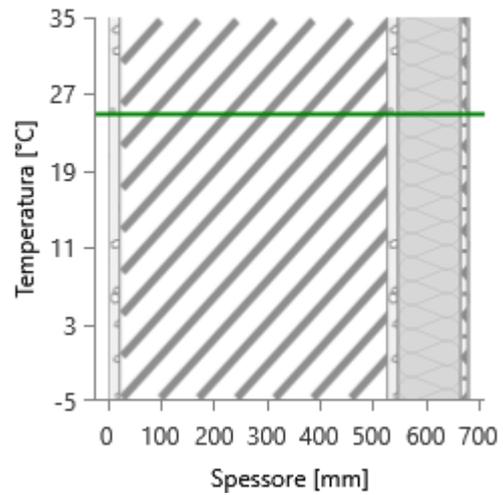
GIUGNO



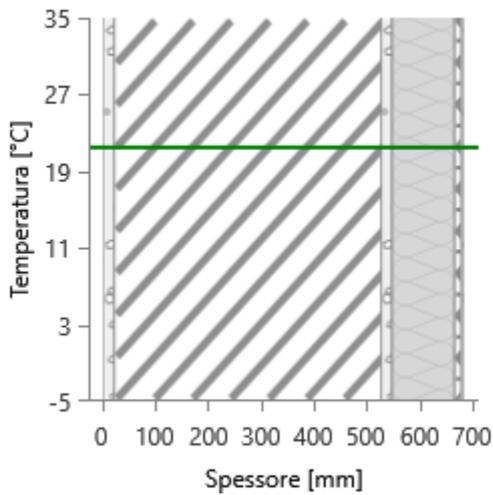
LUGLIO



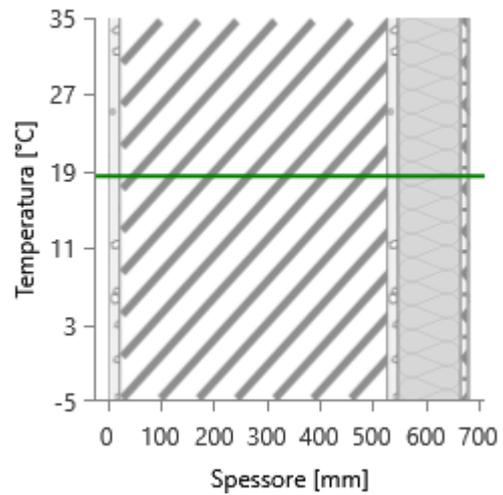
AGOSTO



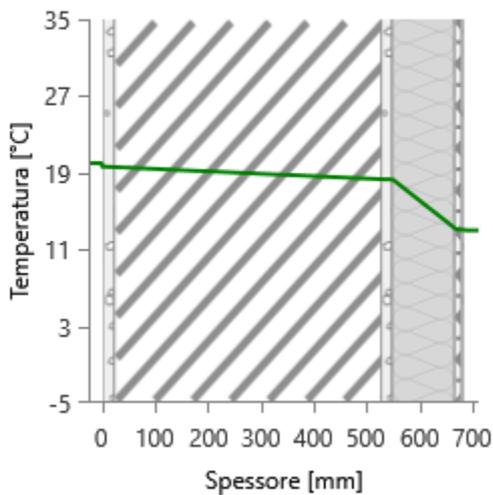
SETTEMBRE



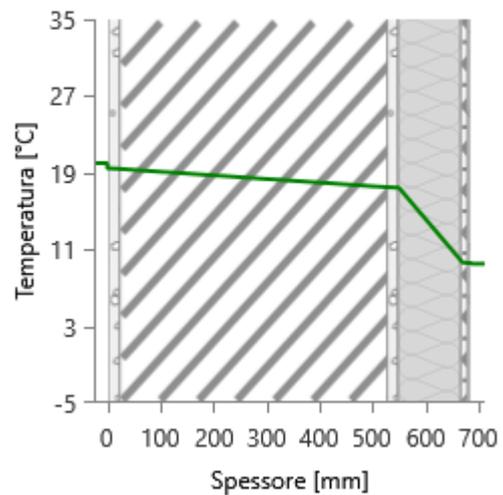
OTTOBRE



NOVEMBRE



DICEMBRE



Sono state analizzate le dispersioni termiche dei componenti d'involucro tramite software certificato per valutare la riduzione ottenibile tramite l'applicazione sia del sistema di isolamento a cappotto SC.01.

È stata valutata la potenza dispersa per trasmissione Φ_{tr} post-intervento di isolamento SC.01, sia dell'intero edificio sia del locale soggiorno collocato al piano terra esposto a nord-est, dove è stato svolto il monitoraggio in ambiente reale, sia della parete perimetrale in tufo isolata per ciascun orientamento (Tabella 66; Tabella 67). Dai calcoli effettuati si evince una riduzione del 40,24% delle dispersioni dell'intero edificio attraverso l'applicazione del sistema di isolamento a cappotto SC.01.

Dalle simulazioni effettuate sull'edificio-dimostratore si riscontra una riduzione della potenza totale dispersa per trasmissione attraverso la parete perimetrale in tufo isolata del 76,73% passando da 3.455 W a 804 W.

Tabella 66 Sintesi delle potenze disperse per trasmissione per l'intero periodo di riscaldamento – SC.01 zona climatica C

Dispersioni con sistema di isolamento SC.01		
Intero edificio	Φ_{tr} [W]	7.242

Tabella 67 Potenza dispersa per trasmissione per componente M100 - Parete esterna in tufo - 55 cm + SC.01 – T – zona climatica C

	Sup. [m ²]	ΦT [W]	%	ϕ [W/m ²]
N	30,44	143	2	4,70
E	41,39	186	2,6	4,49
S	41,81	164	2,3	3,92
O	72,14	311	4,3	4,31
TOT	185,78	804	11,1	4,33

Sono state valutate le dispersioni per trasmissione relative all'energia invernale dei componenti opachi e, in particolare, si sottolinea quello oggetto di intervento di isolamento termico (Tabella 68).

Nell'ultima colonna della Tabella 68 Tabella 51 sono stati riportati i dati relativi all'energia dispersa, ottenuti dalla somma tra le dispersioni per trasmissione e per extraflusso, meno gli apporti solari attraverso il componente.

Tabella 68 Dispersioni ordinate per componente - stagione invernale strutture opache - post operam + SC.01 – zona climatica C

Cod	Descrizione elemento	U [W/m ² K]	Sup. [m ²]	$Q_{H,tr}$ [kWh]	% $Q_{H,tr}$ [%]	$Q_{H,r}$ [kWh]	% $Q_{H,r}$ [%]	$Q_{sol,k}$ [kWh]	% $Q_{sol,k}$ [%]	$QH_{tr} + OH_{r} - Q_{sol,k}$ [kWh]
M100	Parete esterna in tufo - 55 cm + SC.01 - T	0,212	185,78	1295	10,3	231	32,7	420	14,8	1106
M103	Parete esterna in tufo - 40 cm + SC.01 - T	0,213	9,98	70	0,6	13	1,8	23	0,8	60
M104	Parete esterna in tufo - 20 cm + SC.01 - T	0,231	23,27	177	1,4	32	4,5	54	1,9	155
M105	Parete esterna in tufo - 55 cm - U	0,848	11,33	344	2,7	-	-	-	-	-
M201	Parete interna - 10 cm - U	2,36	44,57	3767	29,8	-	-	-	-	-
M203	Parete interna in tufo	1,076	52,64	2029	16,1	-	-	-	-	-

	- 40 cm - U									
P1	Pavimento su terreno - G	0,565	71,58	1333	10,6	-	-	-	-	-
P3	Soletta interpiano - U	1,423	9,49	193	1,5	-	-	-	-	-
S2	Soletta interpiano - U	1,756	68,99	1736	13,7	-	-	-	-	-
S3	Soletta interpiano - T	1,856	13,07	799	6,3	286	40,4	488	17,2	597
Totali			11743	93	562	79,4	985	34,7	1918	

4.6.2 Simulazioni in zona climatica C – soluzione PV.02

Dalle simulazioni effettuate in zona climatica C la parete non risulta soggetta a fenomeni di condensa superficiale né interstiziale come si evince dai seguenti tabelle e grafici, in cui valori delle pressioni risultano più distanziate tra loro rispetto al precedente sistema di isolamento termico, grazie alla presenza dell'intercapedine d'aria che ne impedisce la formazione. L'assenza di resistenze alla diffusione del vapore esterne all'isolante mette questo al riparo da decadimenti delle sue prestazioni dovuti a condensazioni nel suo interno e quindi nelle migliori condizioni di esercizio.

Tabella 69 Risultati verifica della condensa superficiale parete esterna in tufo + PV.02 – zona climatica C

Mese	θ_{int} [°C]	θ_{est} [°C]	P_{int} [Pa]	P_{est} [Pa]	θ_{acc} [°C]	P_{acc} [Pa]	f_{RSI} [-]
ottobre	18,5	18,5	1692	1539	18,4	2116	0,000
novembre	20,0	13,0	1505	1156	16,5	1881	0,506
dicembre	20,0	9,5	1473	1001	16,2	1842	0,639
gennaio	20,0	9,1	1424	937	15,7	1780	0,603
febbraio	20,0	8,9	1303	809	14,3	1628	0,486
marzo	20,0	11,2	1312	900	14,4	1640	0,364
aprile	18,0	14,5	1513	1218	16,6	1892	0,609

Tabella 70 Risultati verifica della condensa interstiziale parete esterna in tufo + PV.02 – zona climatica C

Mese	θ_{int} [°C]	θ_{est} [°C]	ϕ_{int} [%]	ϕ_{est} [%]	g_c [g/m ²]	Ma [g/m ²]	Periodi	Stato
ottobre	18,5	18,5	80	72	0,0	0	1	Asciutto
novembre	20,0	13,0	64	77	0,0	0	1	Asciutto
dicembre	20,0	9,5	63	84	0,0	0	1	Asciutto
gennaio	20,0	9,1	61	81	0,0	0	1	Asciutto
febbraio	20,0	8,9	56	71	0,0	0	1	Asciutto
marzo	20,0	11,2	56	68	0,0	0	1	Asciutto
aprile	18,0	14,5	73	74	0,0	0	1	Asciutto
maggio	18,6	18,6	71	64	0,0	0	1	Asciutto
giugno	22,4	22,4	72	68	0,0	0	1	Asciutto
luglio	25,0	25,0	61	58	0,0	0	1	Asciutto
agosto	24,9	24,9	61	58	0,0	0	1	Asciutto
settembre	21,5	21,5	72	69	0,0	0	1	Asciutto

Tabella 71 Distribuzione della temperatura nella struttura post-intervento di efficientamento PV.02 [°C] – zona climatica C

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
<i>Amb.</i>	18,5	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	18,0	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5
<i>Int.</i>	18,5	19,7	19,5	19,5	19,5	19,6	17,8	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5
1	18,5	19,6	19,4	19,4	19,4	19,5	17,8	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5
2	18,5	18,4	17,6	17,5	17,4	18,0	17,2	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5
3	18,5	18,4	17,5	17,4	17,4	17,9	17,2	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5
4	18,5	13,3	10,0	9,6	9,4	11,6	14,7	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5
5	18,5	13,1	9,6	9,2	9,0	11,3	14,5	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5
6	18,5	13,1	9,6	9,2	9,0	11,3	14,5	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5
<i>Est.</i>	18,5	13,0	9,5	9,1	8,9	11,2	14,5	18,6	22,4	25,0	24,9	21,5

Valori sul lato esterno dello strato; Amb.=ambiente interno; Int.=a valle dello strato liminare interno; Est.=ambiente esterno

Tabella 72 Distribuzione della pressione parziale del vapore nella struttura post-intervento di efficientamento PV.02 [Pa] – zona climatica C

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
<i>Amb.</i>	1692	1505	1473	1424	1303	1312	1513	1510	1943	1940	1924	1857
<i>Int.</i>	1692	1505	1473	1424	1303	1312	1513	1510	1943	1940	1924	1857
1	1692	1504	1472	1422	1301	1311	1512	1510	1943	1940	1924	1857
2	1552	1186	1040	978	850	934	1243	1373	1852	1849	1833	1765
3	1551	1183	1037	974	846	931	1241	1372	1851	1848	1832	1765
4	1551	1182	1036	973	845	930	1240	1372	1851	1848	1832	1764
5	1550	1182	1035	973	845	930	1240	1372	1850	1847	1832	1764
6	1539	1156	1001	937	809	900	1218	1361	1843	1840	1824	1757
<i>Est.</i>	1539	1156	1001	937	809	900	1218	1361	1843	1840	1824	1757

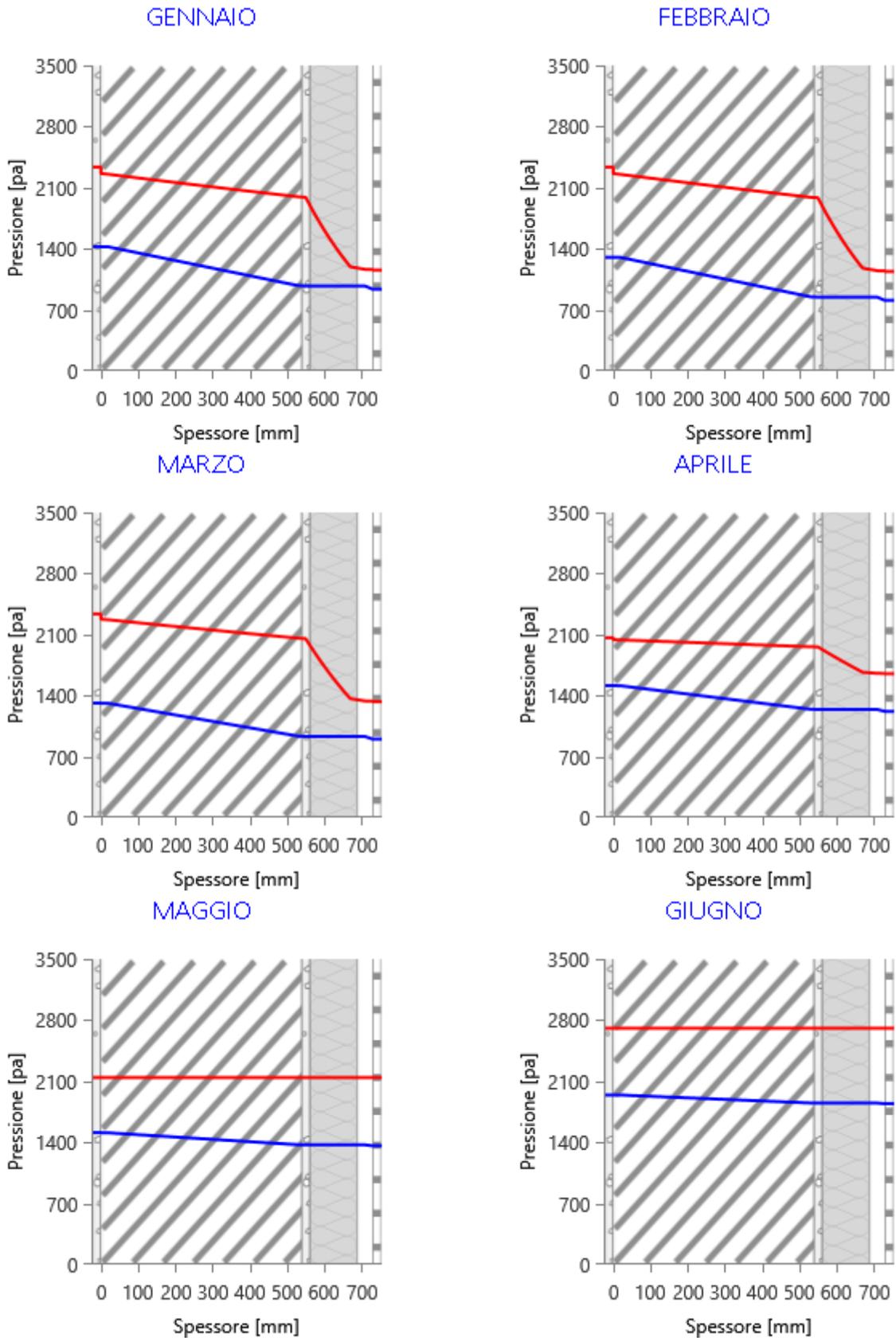
Valori sul lato esterno dello strato; Amb.=ambiente interno; Int.=a valle dello strato liminare interno; Est.=ambiente esterno

Tabella 73 Distribuzione della pressione di saturazione nella struttura post-intervento di efficientamento PV.02 [Pa] – zona climatica C

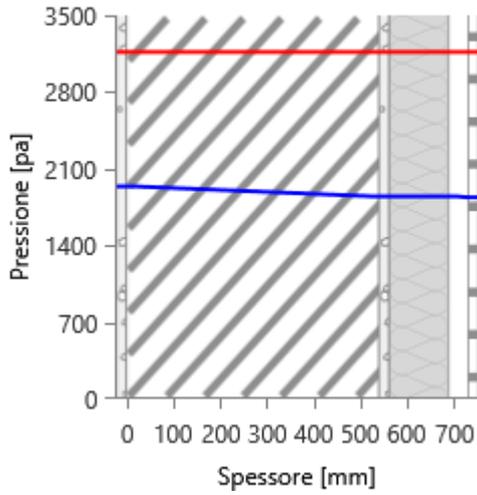
Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
<i>Amb.</i>	2129	2337	2337	2337	2337	2337	2063	2142	2708	3166	3147	2563
<i>Int.</i>	2129	2289	2265	2262	2261	2277	2041	2142	2708	3166	3147	2563
1	2129	2283	2257	2254	2253	2270	2039	2142	2708	3166	3147	2563
2	2129	2113	2008	1996	1990	2058	1960	2142	2708	3166	3147	2563
3	2129	2109	2002	1990	1984	2053	1958	2142	2708	3166	3147	2563
4	2129	1528	1225	1194	1179	1365	1667	2142	2708	3166	3147	2563
5	2129	1504	1196	1164	1149	1338	1654	2142	2708	3166	3147	2563
6	2129	1502	1193	1162	1146	1336	1653	2142	2708	3166	3147	2563
<i>Est.</i>	2129	1497	1187	1155	1140	1330	1650	2142	2708	3166	3147	2563

Valori sul lato esterno dello strato; Amb.=ambiente interno; Int.=a valle dello strato liminare interno; Est.=ambiente esterno

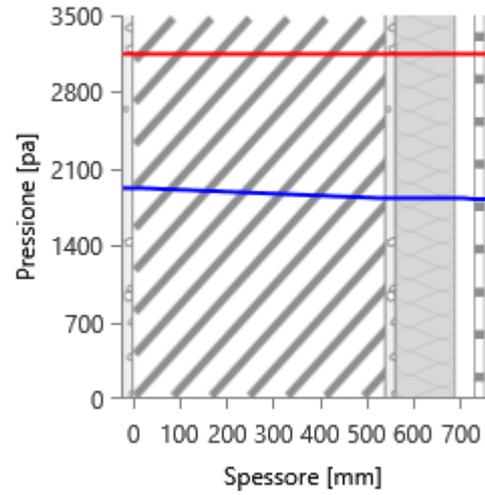
Tabella 74 Grafici mensili delle pressioni parziali e di saturazione del vapore post-intervento di efficientamento PV.02 – zona climatica C



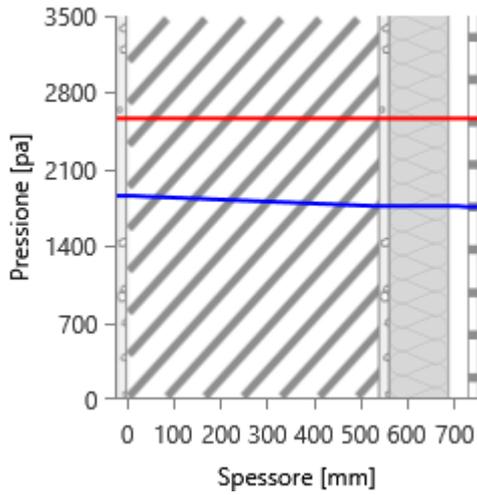
LUGLIO



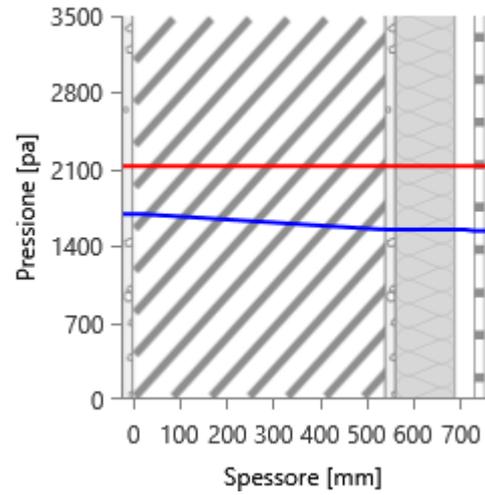
AGOSTO



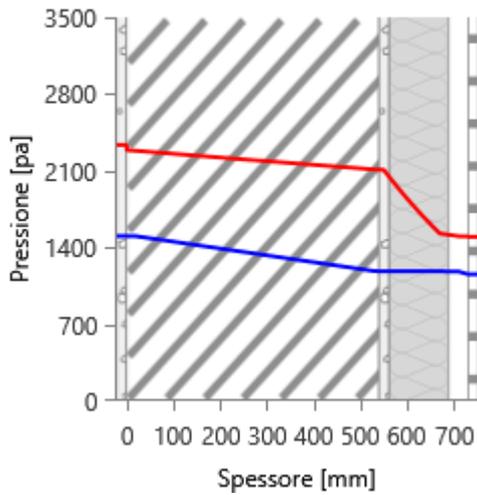
SETTEMBRE



OTTOBRE



NOVEMBRE



DICEMBRE

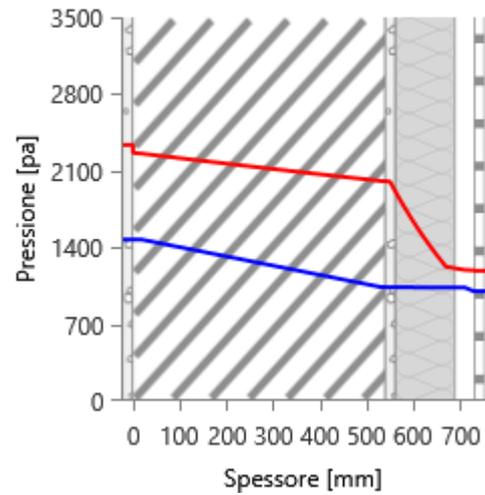
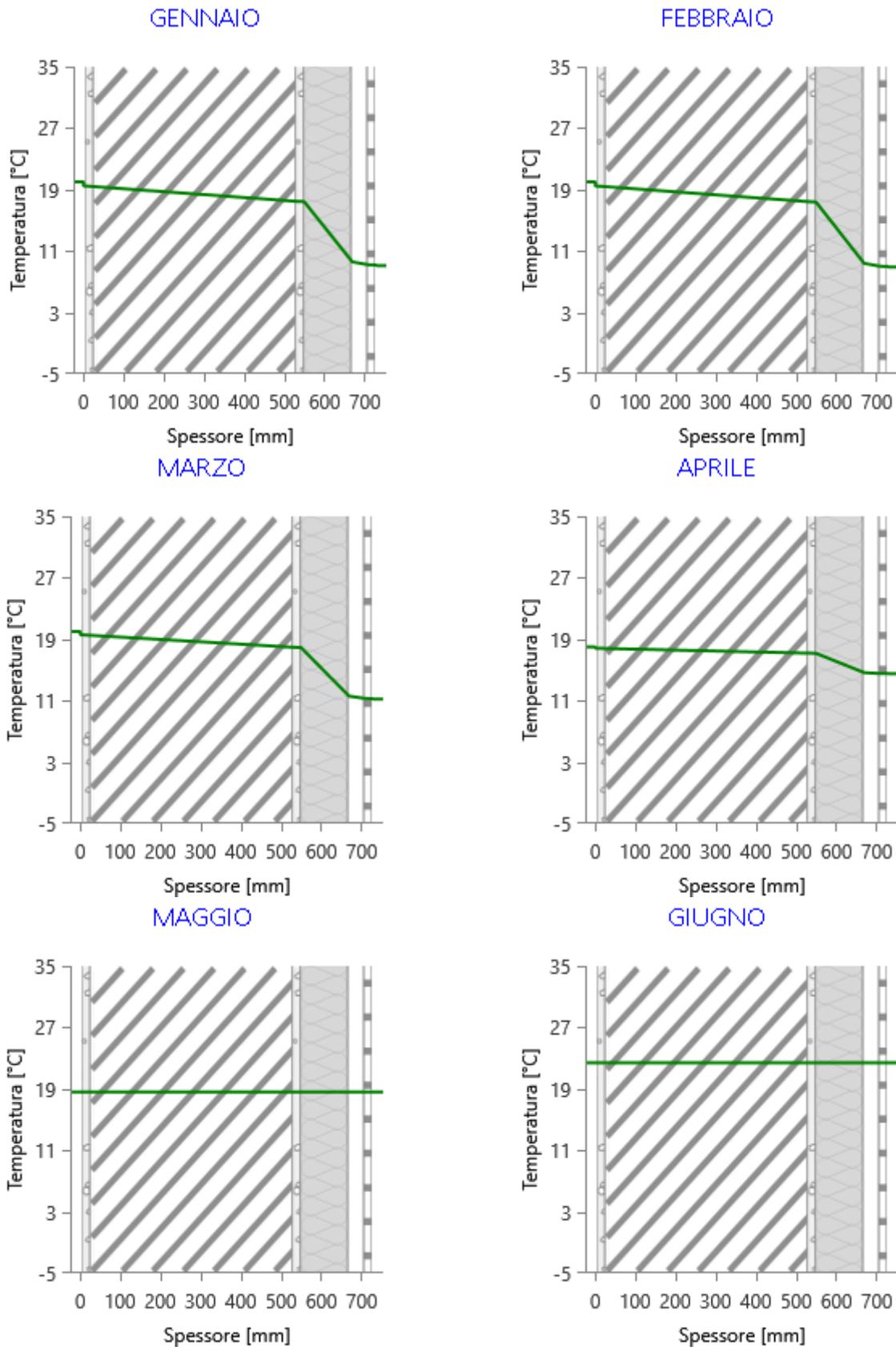
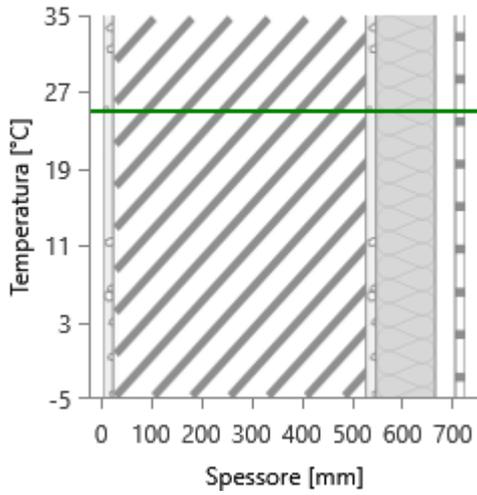


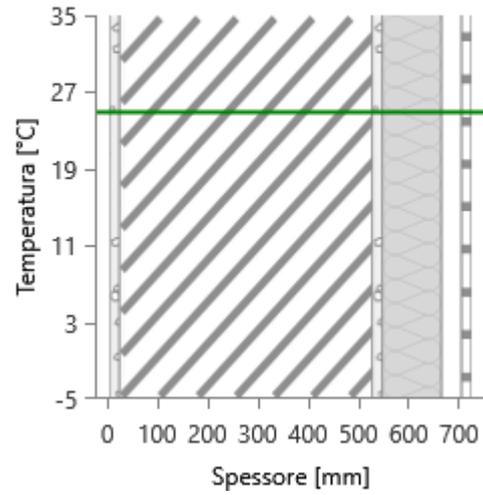
Tabella 75 Grafici mensili delle temperature post-intervento di efficientamento PV.02 [°C] – zona climatica C



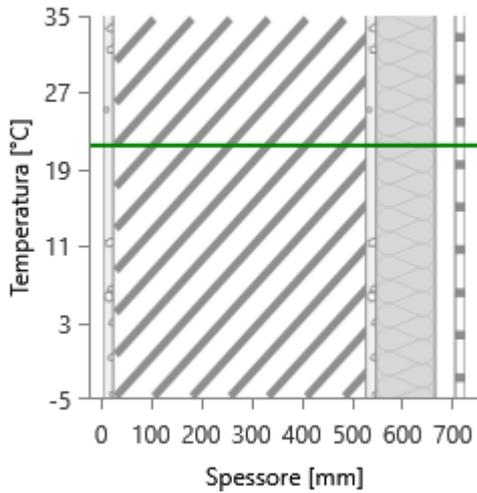
LUGLIO



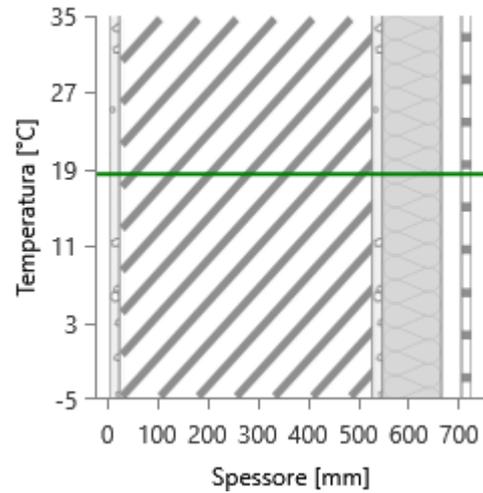
AGOSTO



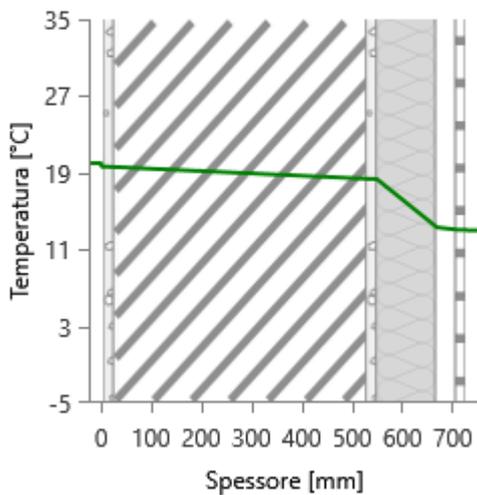
SETTEMBRE



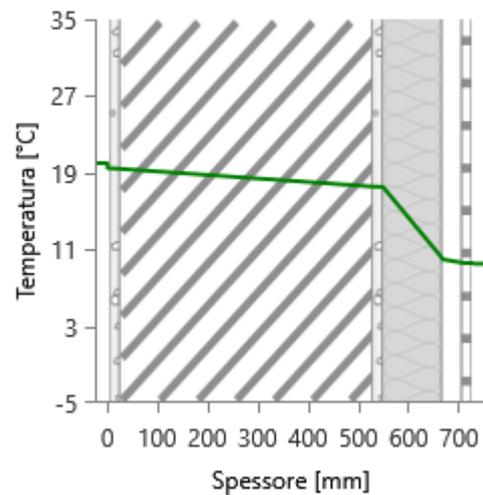
OTTOBRE



NOVEMBRE



DICEMBRE



Sono state analizzate le dispersioni termiche dei componenti d’involucro tramite software certificato per valutare la riduzione ottenibile tramite l’applicazione sia del sistema di isolamento parete ventilata PV.02. È stata valutata la potenza dispersa per trasmissione Φ_{tr} post-intervento di isolamento PV.02, sia dell’intero edificio sia del locale soggiorno collocato al piano terra esposto a nord-est, dove è stato svolto il monitoraggio in ambiente reale, sia della parete perimetrale in tufo isolata per ciascun orientamento (Tabella 71; Tabella 72). Dai calcoli effettuati si evince una riduzione del 40,80% delle dispersioni dell’intero edificio attraverso l’applicazione del sistema di isolamento parete ventilata PV.02. Dalle simulazioni effettuate sull’edificio-dimostratore si riscontra una riduzione della potenza totale dispersa per trasmissione attraverso la parete perimetrale in tufo isolata del 78,52% passando da 3.455 W a 742 W.

Tabella 76 Sintesi delle potenze disperse per trasmissione per l’intero periodo di riscaldamento - post operam – zona climatica C

Dispersioni con sistema di isolamento PV.02		
Intero edificio	Φ_{tr} [W]	7.174

Tabella 77 Potenza dispersa per trasmissione per componente M100 - Parete esterna in tufo - 55 cm + PV.02 – T – zona climatica C

	Sup. Tot	ΦT		ϕ
	[m ²]	[W]	%	[W/m ²]
N	30,44	132	1,8	4,34
E	41,39	172	2,4	4,16
S	41,81	151	2,1	3,61
O	72,14	287	4	3,98
TOT	185,78	742	10,3	3,99

Sono state valutate le dispersioni per trasmissione relative all’energia invernale dei componenti opachi e, in particolare, si sottolinea quello oggetto di intervento di isolamento termico (Tabella 78). Nell’ultima colonna della Tabella 78 Tabella 51 sono stati riportati i dati relativi all’energia dispersa, ottenuti dalla somma tra le dispersioni per trasmissione e per extraflusso, meno gli apporti solari attraverso il componente.

Tabella 78 Dispersioni ordinate per componente - stagione invernale strutture opache - post operam + PV.02 – zona climatica C

Cod	Descrizione elemento	U [W/m ² K]	Sup. [m ²]	$Q_{H,tr}$ [kWh]	% $Q_{H,tr}$ [%]	$Q_{H,r}$ [kWh]	% $Q_{H,r}$ [%]	$Q_{sol,k}$ [kWh]	% $Q_{sol,k}$ [%]	$Q_{H,tr} + Q_{H,r} - Q_{sol,k}$ [kWh]
M100	Parete esterna in tufo - 55 cm + PV.02 - T	0,195	185,78	1195	9,6	214	31	388	13,8	1021
M103	Parete esterna in tufo - 40 cm + PV.02 - T	0,206	9,98	68	0,5	12	1,8	23	0,8	57
M104	Parete esterna in tufo - 20 cm + PV.02 - T	0,223	23,27	171	1,4	31	4,4	52	1,9	150
M105	Parete esterna in tufo - 55 cm - U	0,848	11,33	344	2,7	-	-	-	-	-
M201	Parete interna - 10 cm - U	2,36	44,57	3767	30,1	-	-	-	-	-

M203	Parete interna in tufo - 40 cm - U	1,076	52,64	2029	16,2	-	-	-	-	-
P1	Pavimento su terreno - G	0,565	71,58	1333	10,6	-	-	-	-	-
P3	Soletta interpiano - U	1,423	9,49	193	1,5	-	-	-	-	-
S2	Soletta interpiano - U	1,756	68,99	1736	13,9	-	-	-	-	-
S3	Soletta interpiano - T	1,856	13,07	799	6,4	286	41,5	488	17,4	597
Totali				11635	92,9	543	78,7	951	33,9	1825

4.6.3 Simulazioni in zona climatica D – soluzione SC.01

Dalle simulazioni effettuate in zona climatica D la parete non risulta soggetta a fenomeni di condensa superficiale né interstiziale come si evince dai seguenti tabelle e grafici in cui valori delle pressioni risultano vicini ma non si intersecano tra loro.

Tabella 79 Risultati verifica della condensa superficiale parete perimetrale in tufo + SC.01 - zona climatica D

Mese	θ_{int} [°C]	θ_{est} [°C]	P_{int} [Pa]	P_{est} [Pa]	θ_{acc} [°C]	P_{acc} [Pa]	f_{RSI} [-]
ottobre	18,0	17,8	1532	1354	16,8	1915	-4,886
novembre	20,0	12,7	1398	1039	15,4	1747	0,368
dicembre	20,0	8,7	1435	934	15,8	1794	0,628
gennaio	20,0	8,1	1476	953	16,2	1845	0,684
febbraio	20,0	9,1	1287	800	14,1	1609	0,460
marzo	20,0	11,5	1405	1003	15,5	1756	0,467
aprile	20,0	15,9	1408	1162	15,5	1760	-0,099

Tabella 80 Risultati verifica della condensa interstiziale parete esterna in tufo + SC.01 - zona climatica D

Mese	θ_{int} [°C]	θ_{est} [°C]	ϕ_{int} [%]	ϕ_{est} [%]	g_c [g/m ²]	Ma [g/m ²]	Periodi	Stato
ottobre	18,0	17,8	74	66	0,0	0	1	Asciutto
novembre	20,0	12,7	60	71	0,0	0	1	Asciutto
dicembre	20,0	8,7	61	83	0,0	0	1	Asciutto
gennaio	20,0	8,1	63	88	0,0	0	1	Asciutto
febbraio	20,0	9,1	55	69	0,0	0	1	Asciutto
marzo	20,0	11,5	60	74	0,0	0	1	Asciutto
aprile	20,0	15,9	60	64	0,0	0	1	Asciutto
maggio	19,2	19,2	62	56	0,0	0	1	Asciutto
giugno	22,6	22,6	62	58	0,0	0	1	Asciutto
luglio	26,4	26,4	50	47	0,0	0	1	Asciutto
agosto	26,6	26,6	60	57	0,0	0	1	Asciutto
settembre	21,7	21,7	64	60	0,0	0	1	Asciutto

Tabella 81 Distribuzione della temperatura parete esterna in tufo + SC.01 [°C] - zona climatica D

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Amb.	18,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7
Int.	18,0	19,6	19,4	19,4	19,5	19,6	19,8	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7
1	18,0	19,6	19,4	19,3	19,4	19,5	19,8	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7
2	18,0	18,3	17,3	17,2	17,4	18,0	19,0	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7
3	18,0	18,2	17,3	17,1	17,4	17,9	19,0	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7
4	17,8	12,8	8,9	8,3	9,3	11,6	16,0	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7
5	17,8	12,8	8,8	8,2	9,2	11,6	15,9	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7
6	17,8	12,8	8,8	8,2	9,2	11,6	15,9	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7
Est.	17,8	12,7	8,7	8,1	9,1	11,5	15,9	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7

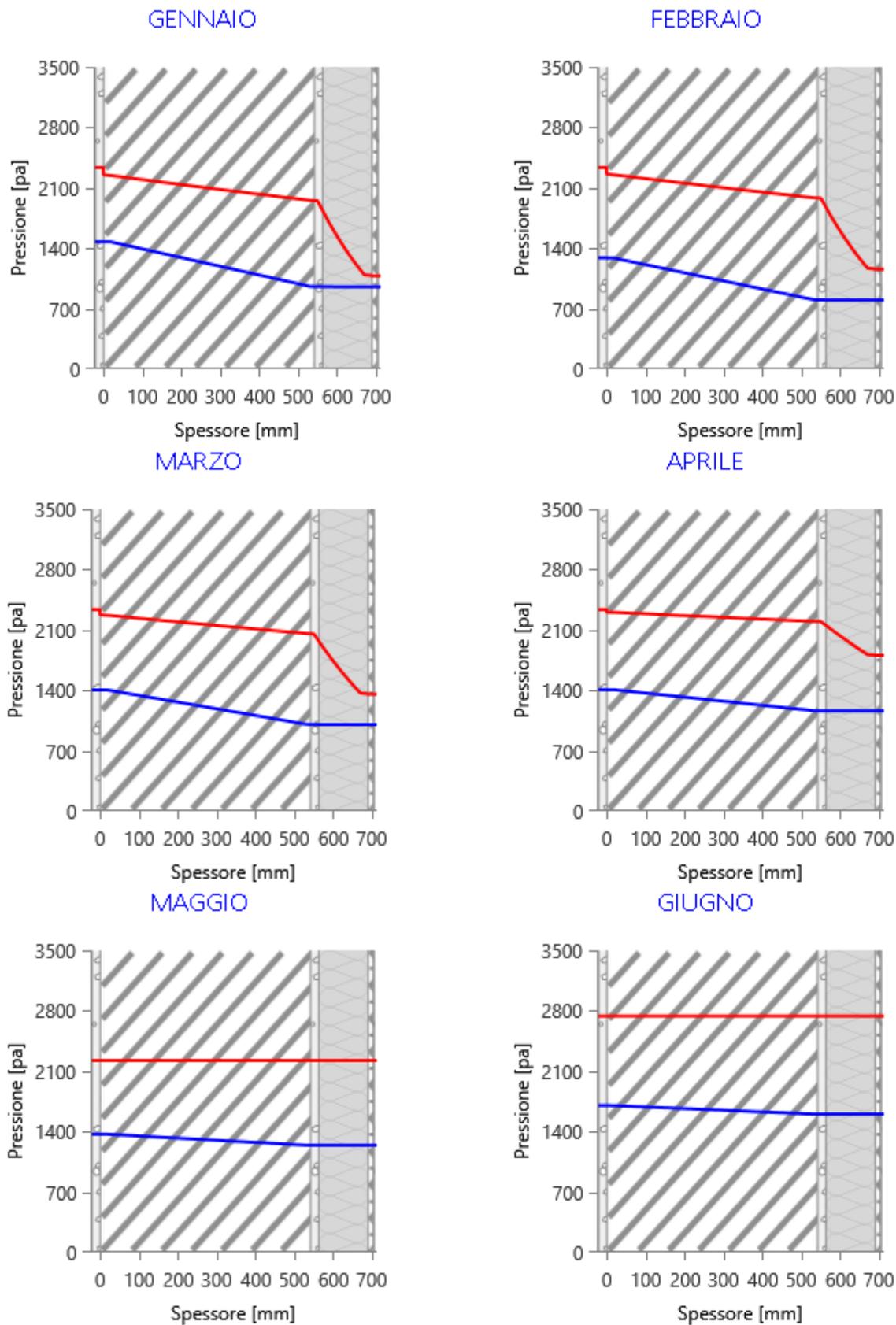
Tabella 82 Distribuzione della pressione parziale del vapore parete esterna in tufo + SC.01 [Pa] - zona climatica D

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Amb.	1532	1398	1435	1476	1287	1405	1408	1370	1702	1730	2079	1666
Int.	1532	1398	1435	1476	1287	1405	1408	1370	1702	1730	2079	1666
1	1531	1396	1433	1474	1285	1404	1407	1369	1702	1729	2078	1665
2	1356	1043	940	959	806	1008	1165	1243	1603	1631	1980	1567
3	1354	1039	936	955	802	1004	1163	1242	1602	1630	1979	1566
4	1354	1039	934	953	801	1004	1162	1241	1602	1630	1979	1566
5	1354	1039	934	953	800	1003	1162	1241	1602	1630	1979	1566
6	1354	1039	934	953	800	1003	1162	1241	1602	1630	1979	1566
Est.	1354	1039	934	953	800	1003	1162	1241	1602	1630	1979	1566

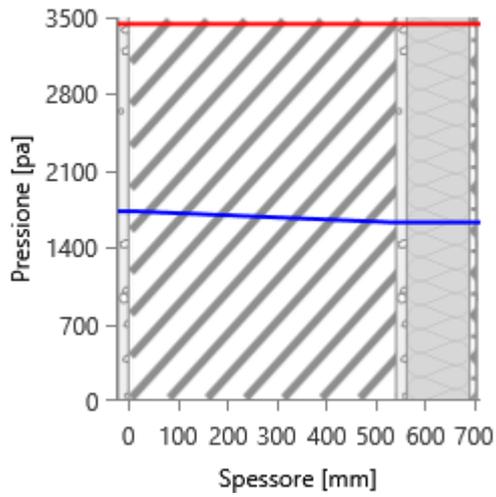
Tabella 83 Distribuzione della pressione di saturazione del vapore parete esterna in tufo + SC.01 [Pa] - zona climatica D

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Amb.	2063	2337	2337	2337	2337	2337	2337	2224	2741	3440	3480	2594
Int.	2062	2285	2257	2253	2260	2277	2308	2224	2741	3440	3480	2594
1	2061	2279	2248	2244	2251	2270	2304	2224	2741	3440	3480	2594
2	2057	2097	1974	1957	1986	2059	2199	2224	2741	3440	3480	2594
3	2057	2092	1968	1950	1980	2054	2197	2224	2741	3440	3480	2594
4	2037	1479	1138	1093	1168	1368	1813	2224	2741	3440	3480	2594
5	2037	1474	1132	1088	1163	1363	1810	2224	2741	3440	3480	2594
6	2037	1473	1131	1086	1162	1362	1809	2224	2741	3440	3480	2594
Est.	2037	1468	1124	1080	1155	1356	1806	2224	2741	3440	3480	2594

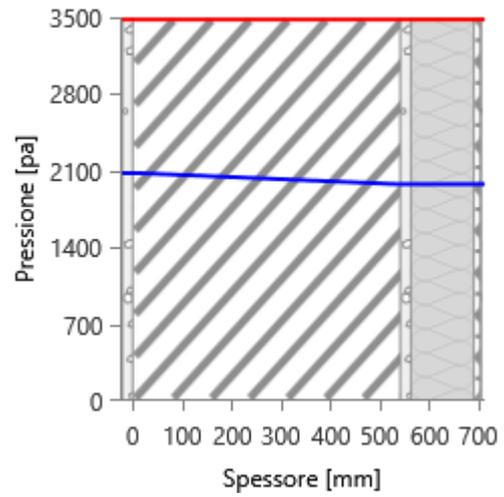
Tabella 84 Grafici mensili delle pressioni parziali e di saturazione del vapore [Pa] parete esterna in tufo + SC.01 - zona climatica D



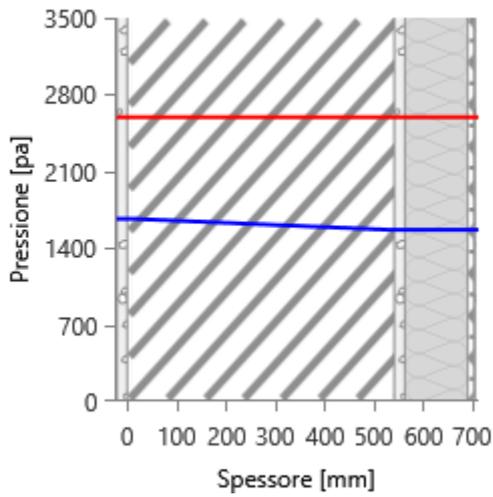
LUGLIO



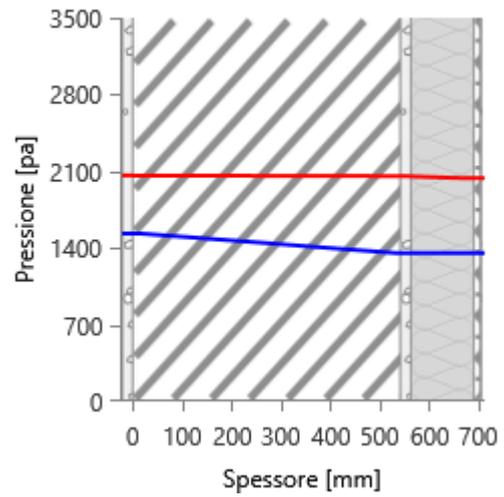
AGOSTO



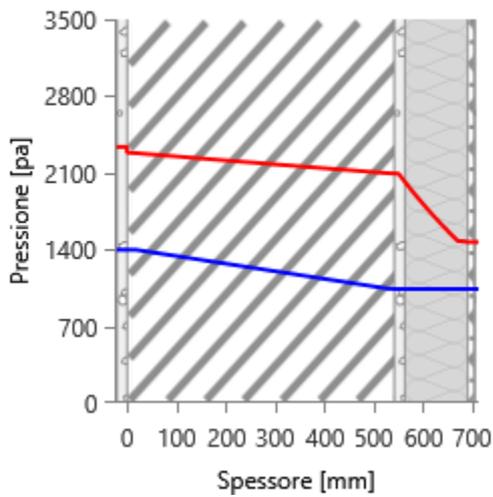
SETTEMBRE



OTTOBRE



NOVEMBRE



DICEMBRE

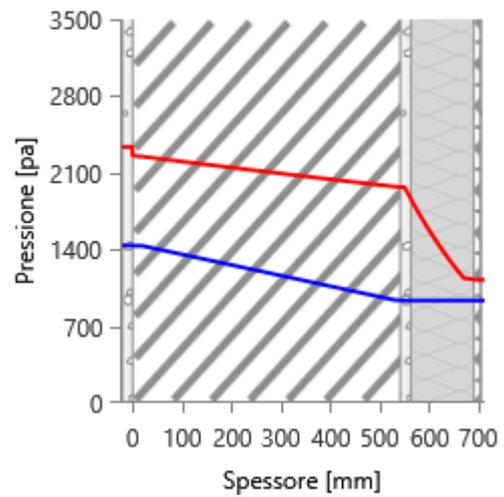
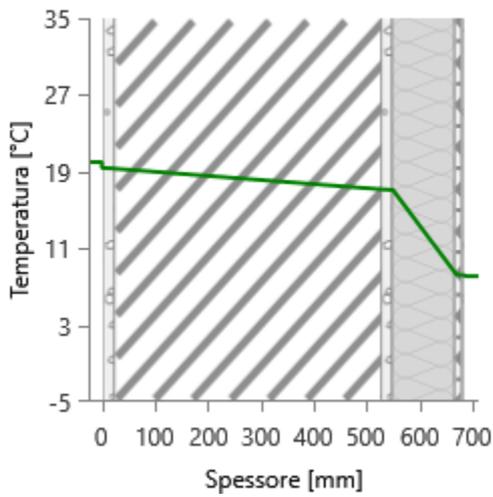
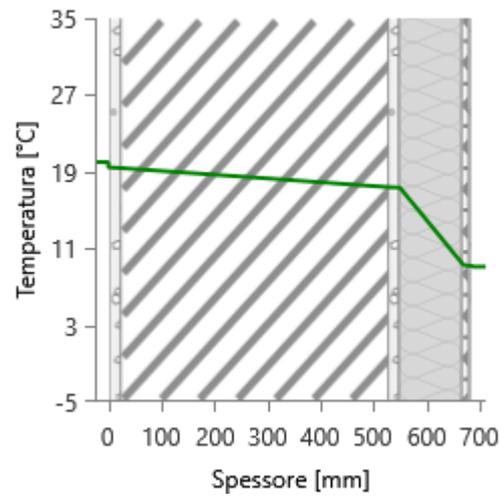


Tabella 85 Grafici mensili delle temperature [°C] parete esterna in tufo + SC.01 - zona climatica D

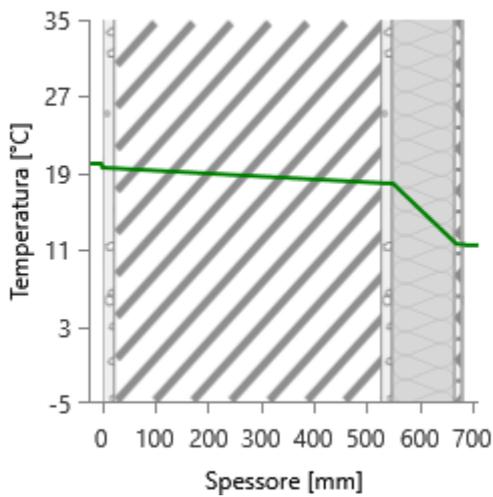
GENNAIO



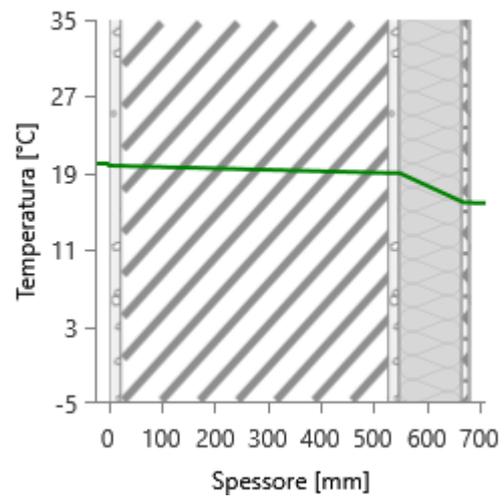
FEBBRAIO



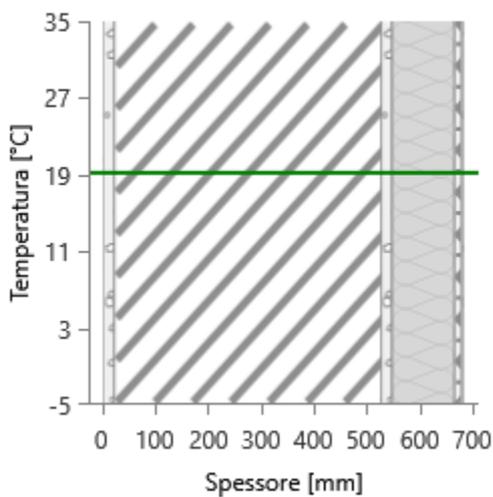
MARZO



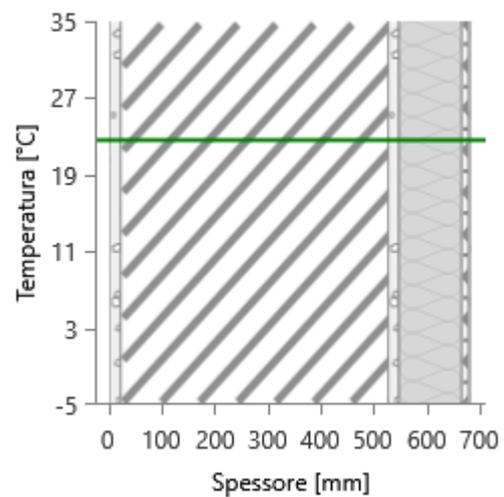
APRILE



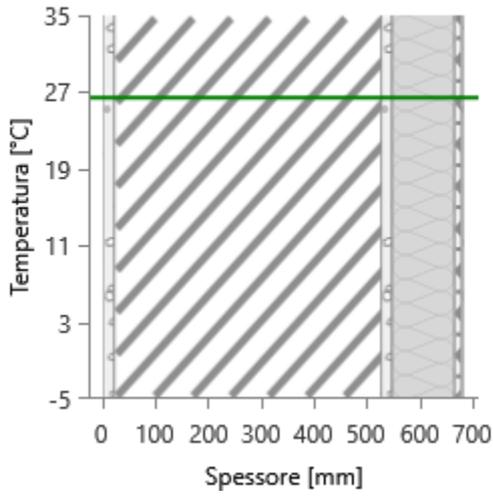
MAGGIO



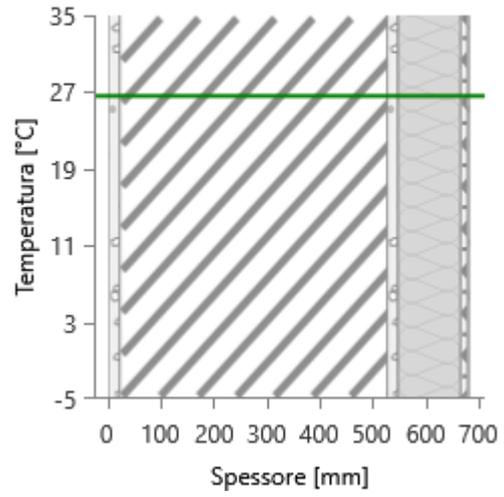
GIUGNO



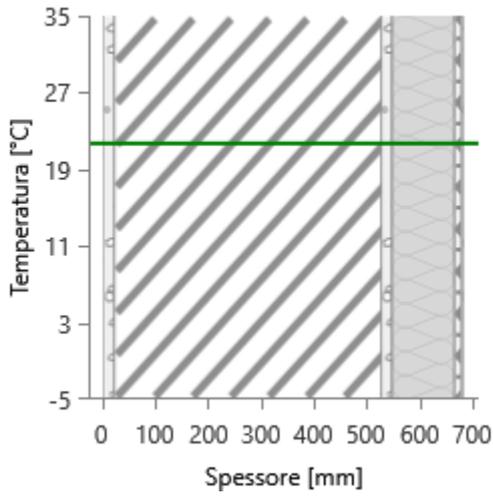
LUGLIO



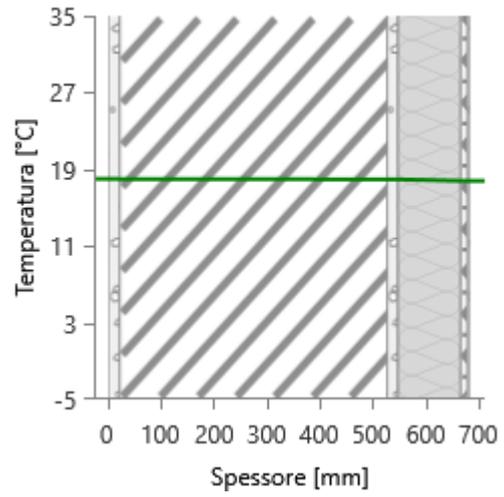
AGOSTO



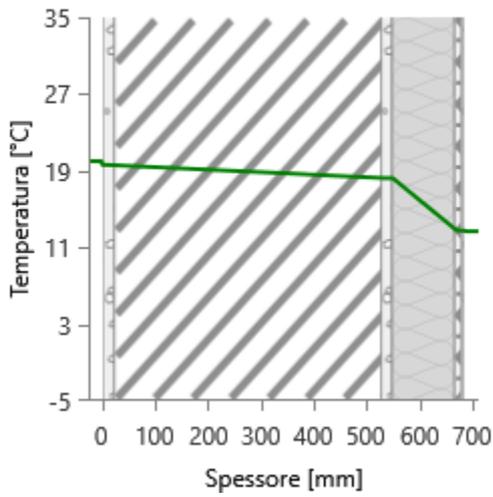
SETTEMBRE



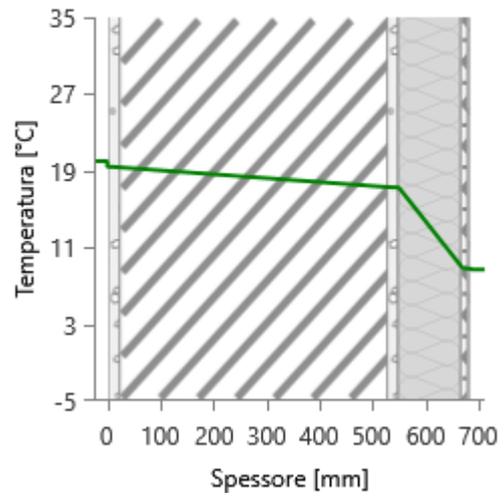
OTTOBRE



NOVEMBRE



DICEMBRE



Sono state analizzate le dispersioni termiche dei componenti d'involucro tramite software certificato per valutare la riduzione ottenibile tramite l'applicazione sia del sistema di isolamento a cappotto SC.01 sull'edificio-dimostratore in zona climatica D.

È stata valutata la potenza dispersa per trasmissione Φ_{tr} post-intervento di isolamento SC.01, sia dell'intero edificio sia del locale soggiorno collocato al piano terra esposto a nord-est, dove è stato svolto il monitoraggio in ambiente reale, sia della parete perimetrale in tufo isolata per ciascun orientamento (Tabella 86; Tabella 87). Dai calcoli effettuati si evince una riduzione del 41,47% delle dispersioni dell'intero edificio attraverso l'applicazione del sistema di isolamento a cappotto SC.01.

Dalle simulazioni effettuate sull'edificio-dimostratore si riscontra una riduzione della potenza totale dispersa per trasmissione attraverso la parete perimetrale in tufo isolata del 76,75% passando da 3.755 W a 873 W.

Tabella 86 Sintesi delle potenze disperse per trasmissione per l'intero periodo di riscaldamento – SC.01 zona climatica D

Dispersioni con sistema di isolamento SC.01		
Intero edificio	Φ_{tr} [W]	7.480

Tabella 87 Potenza dispersa per trasmissione per componente M100 - Parete esterna in tufo - 55 cm + SC.01 – T - zona climatica D

	Sup.	ΦT		
ZONA D	[m ²]	[W]	%	[W/m ²]
N	30,44	155	2,1	5,09
E	41,39	203	2,7	4,90
S	41,81	178	2,4	4,26
O	72,14	338	4,5	4,69
TOT	185,78	873	11,7	4,70

Sono state valutate le dispersioni per trasmissione relative all'energia invernale dei componenti opachi e, in particolare, si sottolinea quello oggetto di intervento di isolamento termico (Tabella 88).

Nell'ultima colonna della Tabella 88 Tabella 51 sono stati riportati i dati relativi all'energia dispersa, ottenuti dalla somma tra le dispersioni per trasmissione e per extraflusso, meno gli apporti solari attraverso il componente.

Tabella 88 Dispersioni ordinate per componente - stagione invernale strutture opache - post operam + SC.01 – zona climatica D

Cod	Descrizione elemento	U [W/m ² K]	Sup. [m ²]	$Q_{H,tr}$ [kWh]	% $Q_{H,tr}$ [%]	$Q_{H,r}$ [kWh]	% $Q_{H,r}$ [%]	$Q_{sol,k}$ [kWh]	% $Q_{sol,k}$ [%]	$Q_{H,tr} + Q_{H,r} - Q_{sol,k}$ [kWh]
M100	Parete esterna in tufo - 55 cm + SC.01 - T	0,212	185,78	1494	10,8	268	32,6	508	14	1254
M103	Parete esterna in tufo - 40 cm + SC.01 - T	0,213	9,98	81	0,6	14	1,8	28	0,8	67
M104	Parete esterna in tufo - 20 cm + SC.01 - T	0,231	23,27	204	1,5	37	4,5	66	1,8	175
M105	Parete esterna in tufo - 55 cm - U	0,848	11,33	365	2,6	-	-	-	-	-
M201	Parete interna - 10	2,36	44,57	3996	28,9	-	-	-	-	-

	cm - U									
M203	Parete interna in tufo - 40 cm - U	1,076	52,64	2152	15,6	-	-	-	-	-
P1	Pavimento su terreno - G	0,565	71,58	1537	11,1	-	-	-	-	-
P3	Soletta interpiano - U	1,423	9,49	205	1,5	-	-	-	-	-
S2	Soletta interpiano - U	1,756	68,99	1842	13,3	-	-	-	-	-
S3	Soletta interpiano - T	1,867	13,07	927	6,7	332	40,5	606	16,8	653
Totali			12803	92,6	651	79,4	1208	33,4	2149	

4.6.4 Simulazioni in zona climatica D – soluzione PV.02

Dalle simulazioni effettuate in zona climatica D la parete non risulta soggetta a fenomeni di condensa superficiale né interstiziale come si evince dai seguenti tabelle e grafici, in cui valori delle pressioni risultano più distanziate tra loro rispetto al sistema di isolamento termico SC.01, grazie alla presenza dell'intercapedine d'aria che ne impedisce la formazione, garantendo le migliori condizioni di esercizio per il materiale coibente.

Tabella 89 Risultati verifica della condensa superficiale parete perimetrale in tufo + PV.02 - zona climatica D

Mese	θ_{int} [°C]	θ_{est} [°C]	P_{int} [Pa]	P_{est} [Pa]	θ_{acc} [°C]	P_{acc} [Pa]	f_{RS3} [-]
ottobre	18,0	17,8	1532	1354	16,8	1915	-4,886
novembre	20,0	12,7	1398	1039	15,4	1747	0,368
dicembre	20,0	8,7	1435	934	15,8	1794	0,628
gennaio	20,0	8,1	1476	953	16,2	1845	0,684
febbraio	20,0	9,1	1287	800	14,1	1609	0,460
marzo	20,0	11,5	1405	1003	15,5	1756	0,467
aprile	20,0	15,9	1408	1162	15,5	1760	-0,099

Tabella 90 Risultati verifica della condensa interstiziale parete esterna in tufo + PV.02 - zona climatica D

Mese	θ_{int} [°C]	θ_{est} [°C]	ϕ_{int} [%]	ϕ_{est} [%]	g_c [g/m ²]	Ma [g/m ²]	Periodi	Stato
ottobre	18,0	17,8	74	66	0,0	0	1	Asciutto
novembre	20,0	12,7	60	71	0,0	0	1	Asciutto
dicembre	20,0	8,7	61	83	0,0	0	1	Asciutto
gennaio	20,0	8,1	63	88	0,0	0	1	Asciutto
febbraio	20,0	9,1	55	69	0,0	0	1	Asciutto
marzo	20,0	11,5	60	74	0,0	0	1	Asciutto
aprile	20,0	15,9	60	64	0,0	0	1	Asciutto
maggio	19,2	19,2	62	56	0,0	0	1	Asciutto
giugno	22,6	22,6	62	58	0,0	0	1	Asciutto
luglio	26,4	26,4	50	47	0,0	0	1	Asciutto
agosto	26,6	26,6	60	57	0,0	0	1	Asciutto
settembre	21,7	21,7	64	60	0,0	0	1	Asciutto

Tabella 91 Distribuzione della temperatura parete esterna in tufo + PV.02 [°C] - zona climatica D

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Amb.	18,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7
Int.	18,0	19,6	19,5	19,4	19,5	19,6	19,8	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7
1	18,0	19,6	19,4	19,4	19,4	19,5	19,8	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7
2	18,0	18,3	17,4	17,2	17,5	18,0	19,1	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7
3	18,0	18,3	17,3	17,2	17,4	18,0	19,0	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7
4	17,8	13,0	9,2	8,6	9,6	11,9	16,1	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7
5	17,8	12,8	8,8	8,2	9,2	11,6	15,9	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7
6	17,8	12,8	8,8	8,2	9,2	11,6	15,9	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7
Est.	17,8	12,7	8,7	8,1	9,1	11,5	15,9	19,2	22,6	26,4	26,6	21,7

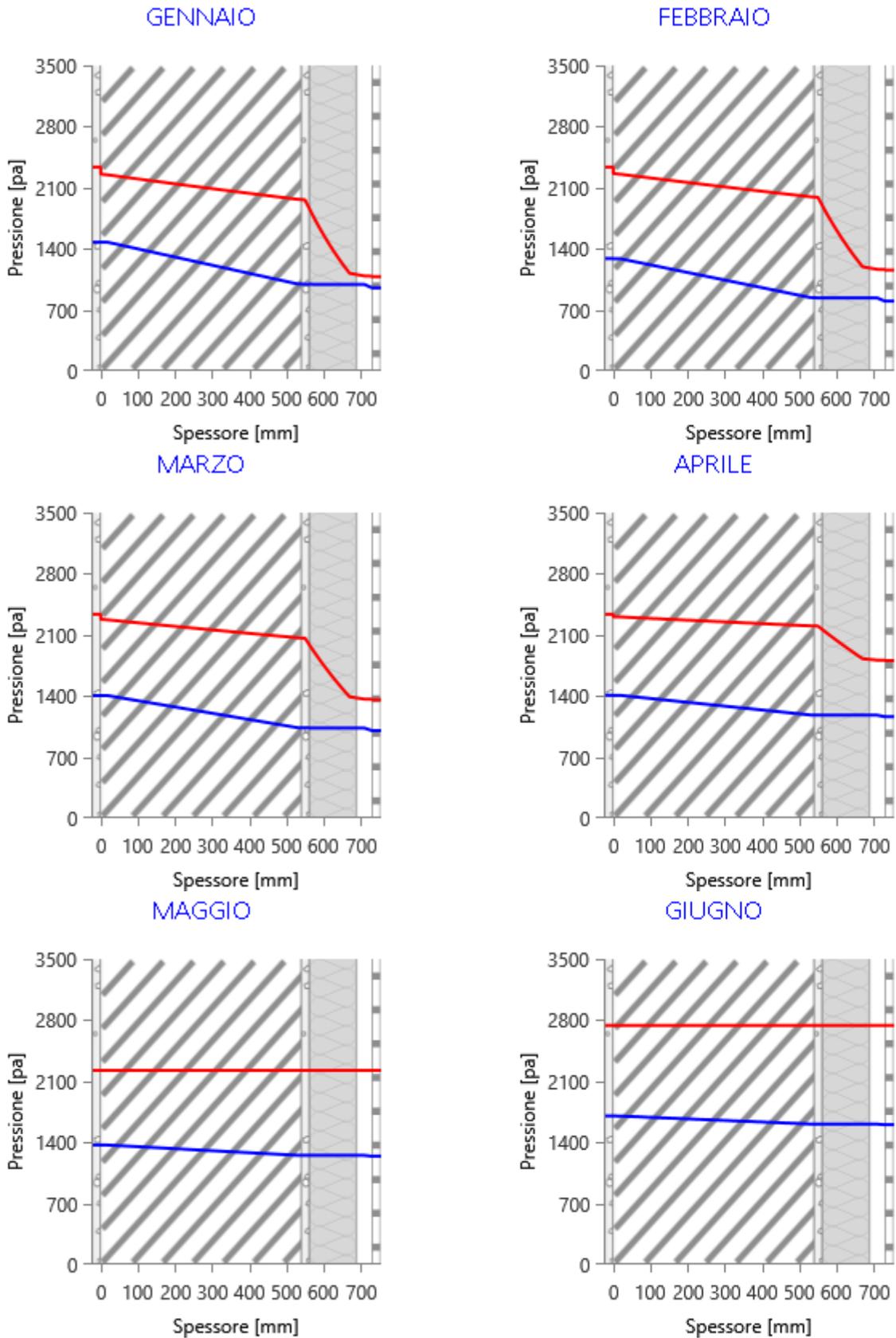
Tabella 92 Distribuzione della pressione parziale del vapore parete esterna in tufo + PV.02 [Pa] - zona climatica D

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Amb.	1532	1398	1435	1476	1287	1405	1408	1370	1702	1730	2079	1666
Int.	1532	1398	1435	1476	1287	1405	1408	1370	1702	1730	2079	1666
1	1531	1396	1434	1474	1286	1404	1407	1369	1702	1729	2078	1665
2	1369	1069	976	997	841	1037	1183	1252	1610	1638	1987	1574
3	1367	1066	972	993	838	1034	1181	1251	1610	1637	1986	1573
4	1367	1065	971	992	837	1033	1180	1251	1609	1637	1986	1573
5	1367	1065	971	992	836	1033	1180	1251	1609	1637	1986	1573
6	1354	1039	934	953	800	1003	1162	1241	1602	1630	1979	1566
Est.	1354	1039	934	953	800	1003	1162	1241	1602	1630	1979	1566

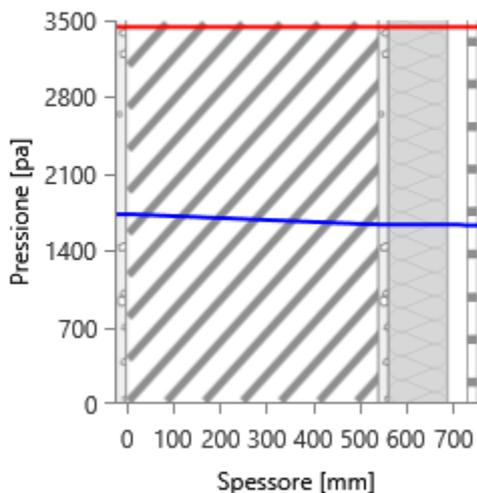
Tabella 93 Distribuzione della pressione di saturazione del vapore parete esterna in tufo + PV.02 [Pa] - zona climatica D

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Amb.	2063	2337	2337	2337	2337	2337	2337	2224	2741	3440	3480	2594
Int.	2062	2287	2260	2256	2262	2279	2309	2224	2741	3440	3480	2594
1	2061	2281	2251	2247	2254	2272	2305	2224	2741	3440	3480	2594
2	2057	2104	1985	1967	1996	2067	2203	2224	2741	3440	3480	2594
3	2057	2099	1979	1961	1990	2063	2201	2224	2741	3440	3480	2594
4	2038	1500	1164	1120	1194	1391	1827	2224	2741	3440	3480	2594
5	2037	1475	1134	1089	1164	1364	1811	2224	2741	3440	3480	2594
6	2037	1473	1131	1086	1162	1362	1809	2224	2741	3440	3480	2594
Est.	2037	1468	1124	1080	1155	1356	1806	2224	2741	3440	3480	2594

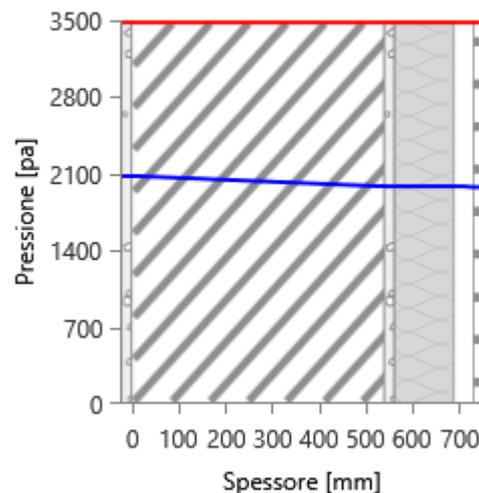
Tabella 94 Grafici mensili delle pressioni parziali e di saturazione del vapore [Pa] parete esterna in tufo + PV.02 - zona climatica D



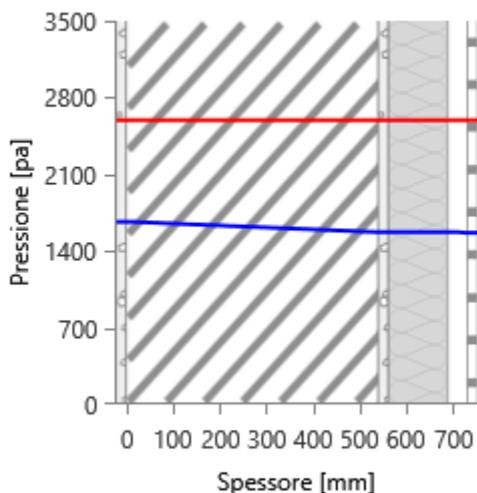
LUGLIO



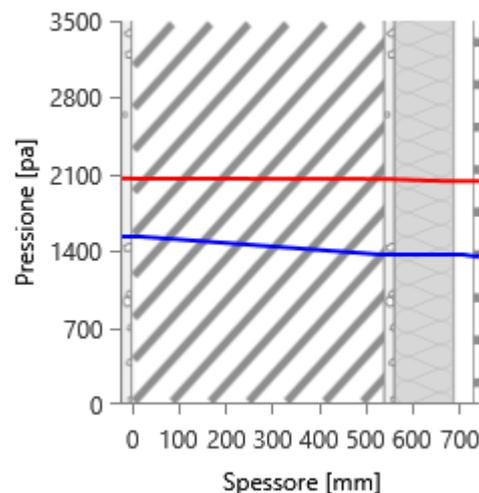
AGOSTO



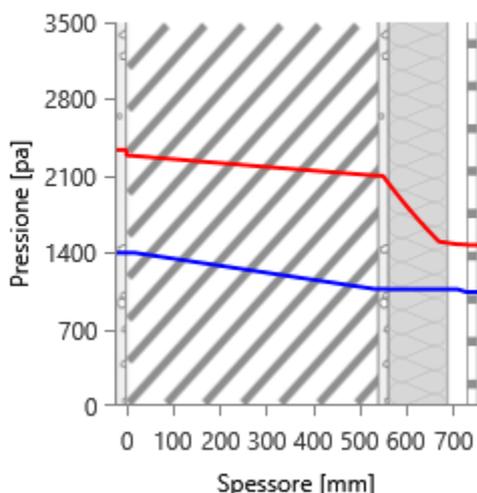
SETTEMBRE



OTTOBRE



NOVEMBRE



DICEMBRE

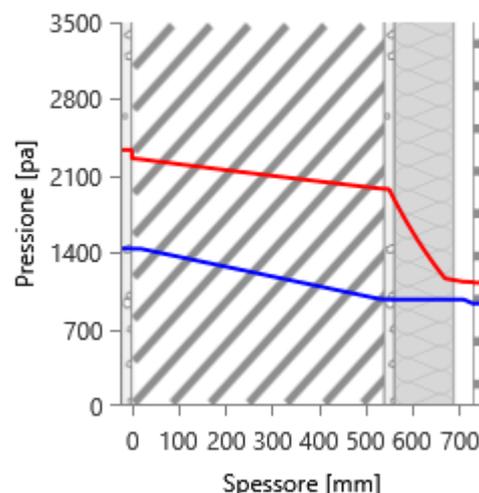
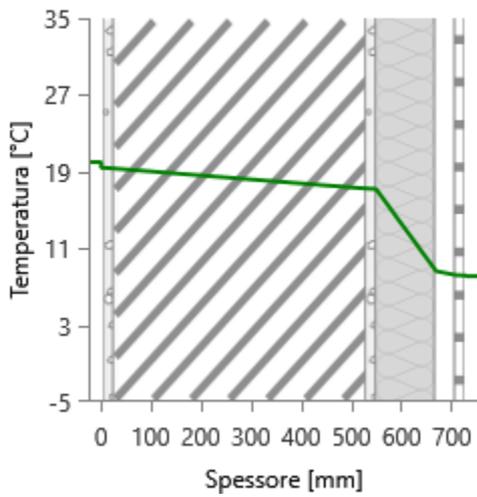
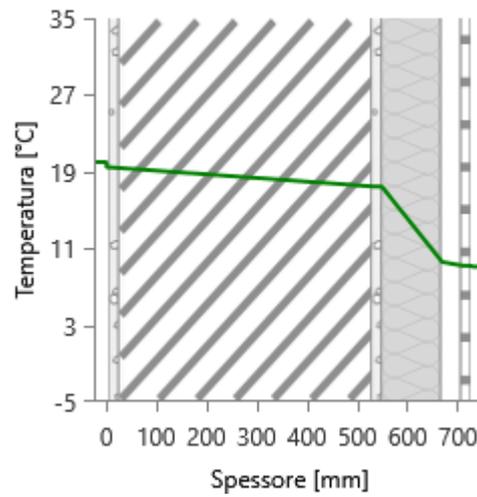


Tabella 95 Grafici mensili delle temperature [°C] parete esterna in tufo + PV.02 - zona climatica D

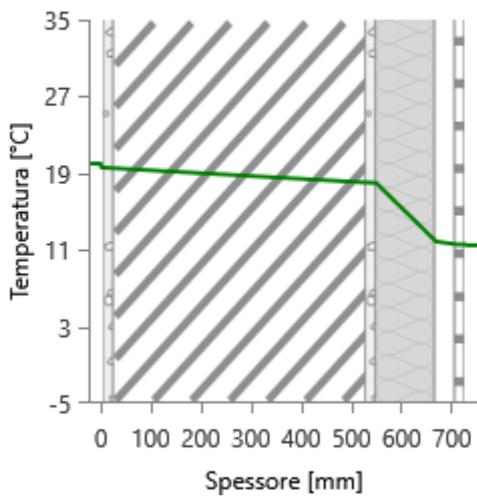
GENNAIO



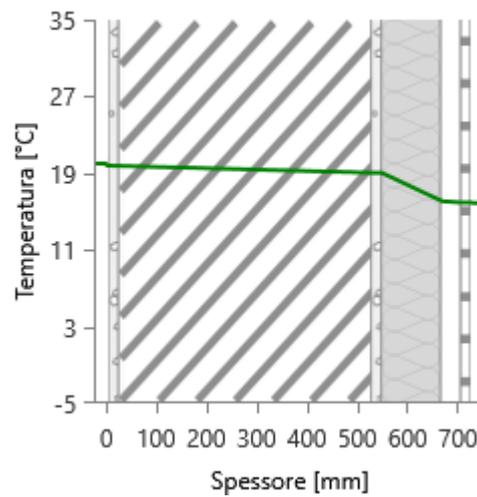
FEBBRAIO



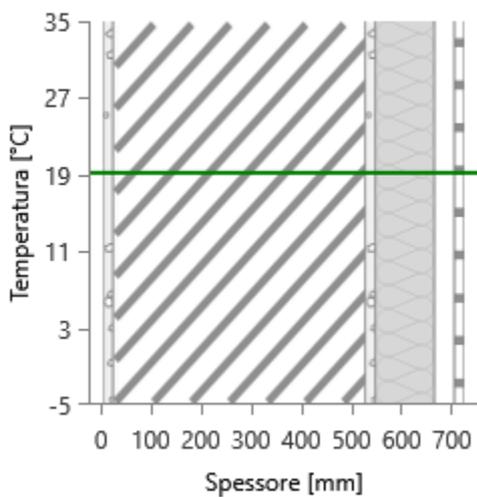
MARZO



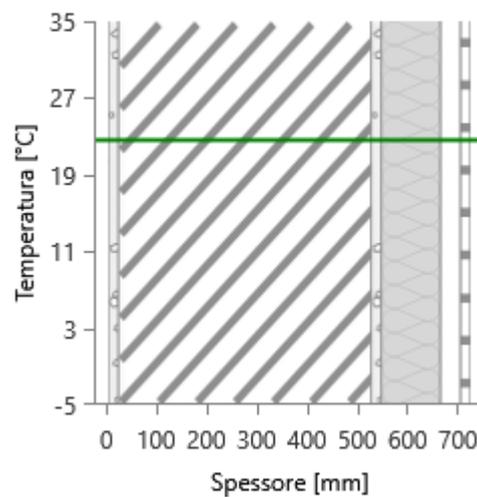
APRILE



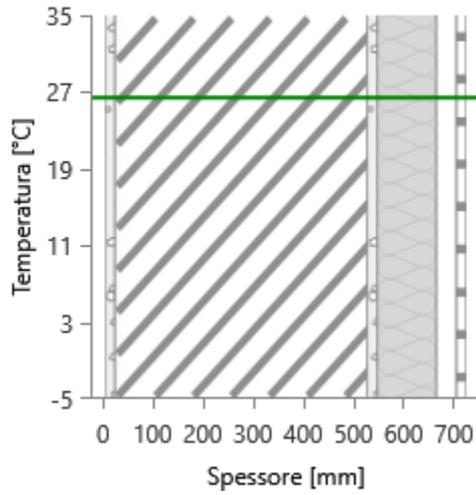
MAGGIO



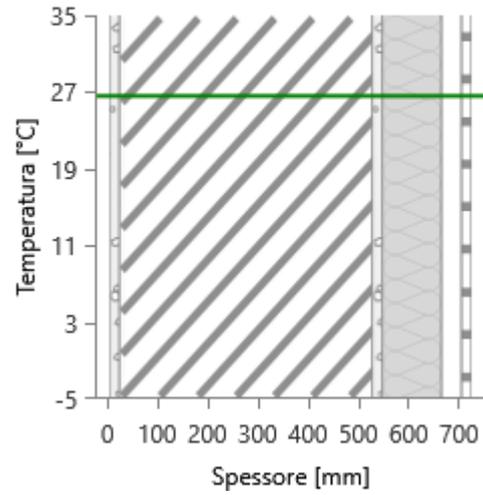
GIUGNO



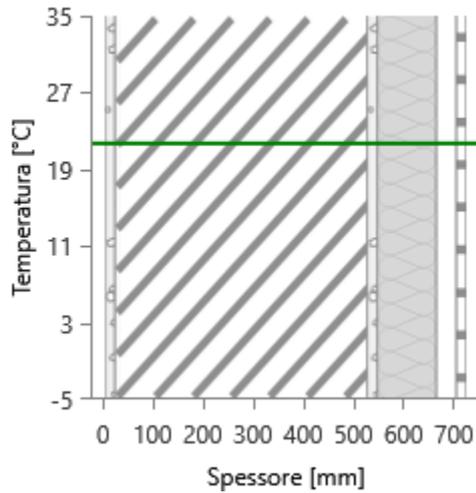
LUGLIO



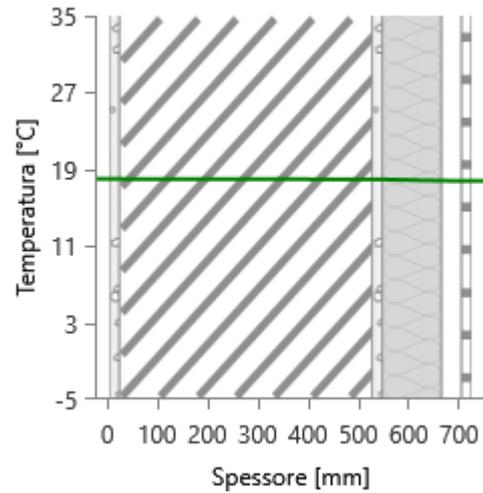
AGOSTO



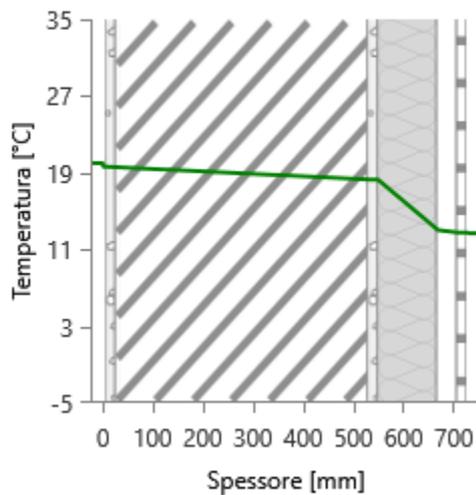
SETTEMBRE



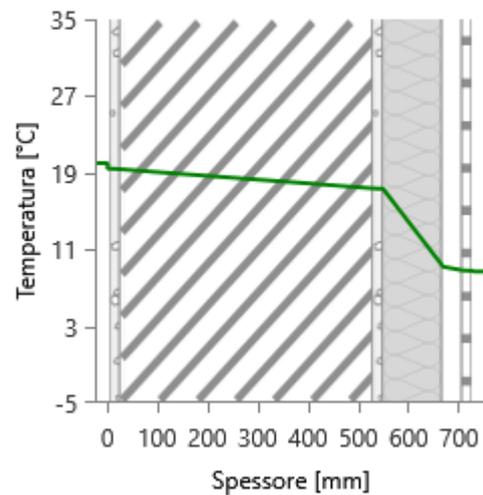
OTTOBRE



NOVEMBRE



DICEMBRE



Sono state analizzate le dispersioni termiche dei componenti d'involucro tramite software certificato per valutare la riduzione ottenibile tramite l'applicazione sia del sistema di isolamento a cappotto SC.01 sull'edificio-dimostratore in zona climatica D.

È stata valutata la potenza dispersa per trasmissione Φ_{tr} post-intervento di isolamento PV.02, sia dell'intero edificio sia del locale soggiorno collocato al piano terra esposto a nord-est, dove è stato svolto il monitoraggio in ambiente reale, sia della parete perimetrale in tufo isolata per ciascun orientamento (Tabella 96; Tabella 97). Dai calcoli effettuati si evince una riduzione del 42,05% delle dispersioni dell'intero edificio attraverso l'applicazione del sistema di isolamento a cappotto PV.02.

Dalle simulazioni effettuate sull'edificio-dimostratore si riscontra una riduzione della potenza totale dispersa per trasmissione attraverso la parete perimetrale in tufo isolata del 78,54% passando da 3.755 W a 806 W.

Tabella 96 Sintesi delle potenze disperse per trasmissione per l'intero periodo di riscaldamento – PV.02 - zona climatica D

Dispersioni con sistema di isolamento SC.01		
Intero edificio	Φ_{tr} [W]	7.406

Tabella 97 Potenza dispersa per trasmissione per componente M100 - Parete esterna in tufo - 55 cm + PV.02 – T - in zona climatica D

ZONA D	Sup. Tot [m ²]	ΦT [W]	%	[W/m ²]
N	30,44	143	1,9	4,70
E	41,39	187	2,5	4,52
S	41,81	164	2,2	3,92
O	72,14	312	4,2	4,32
TOT	185,78	806	10,9	4,34

Sono state valutate le dispersioni per trasmissione relative all'energia invernale dei componenti opachi e, in particolare, si sottolinea quello oggetto di intervento di isolamento termico (Tabella 98).

Nell'ultima colonna della Tabella 98 Tabella 51 sono stati riportati i dati relativi all'energia dispersa, ottenuti dalla somma tra le dispersioni per trasmissione e per extraflusso, meno gli apporti solari attraverso il componente.

Tabella 98 Dispersioni ordinate per componente - stagione invernale strutture opache - post operam + PV.02 – zona climatica D

Cod	Descrizione elemento	U [W/m ² K]	Sup. [m ²]	$Q_{H,tr}$ [kWh]	% $Q_{H,tr}$ [%]	$Q_{H,r}$ [kWh]	% $Q_{H,r}$ [%]	$Q_{sol,k}$ [kWh]	% $Q_{sol,k}$ [%]	$QH_{tr} + OH_{r} - Q_{sol,k}$ [kWh]
M100	Parete esterna in tufo - 55 cm + PV.02 - T	0,195	185,78	1379	10,1	247	31	469	13,1	1157
M103	Parete esterna in tufo - 40 cm + PV.02 - T	0,206	9,98	78	0,6	14	1,8	27	0,7	65
M104	Parete esterna in tufo - 20 cm + PV.02 - T	0,223	23,27	197	1,4	35	4,4	64	1,8	168
M105	Parete esterna in tufo - 55 cm - U	0,848	11,33	365	2,7	-	-	-	-	-
M201	Parete interna - 10	2,36	44,57	3996	29,2	-	-	-	-	-

	cm - U									
M203	Parete interna in tufo - 40 cm - U	1,076	52,64	2152	15,7	-	-	-	-	-
P1	Pavimento su terreno - G	0,565	71,58	1537	11,2	-	-	-	-	-
P3	Soletta interpiano - U	1,423	9,49	205	1,5	-	-	-	-	-
S2	Soletta interpiano - U	1,756	68,99	1842	13,4	-	-	-	-	-
S3	Soletta interpiano - T	1,867	13,07	927	6,8	332	41,6	606	17	653
Totali			12678	92,6	628	78,8	1166	32,6	2043	

4.6.5 Simulazioni in zona climatica E – soluzione SC.01

Dalle simulazioni effettuate in zona climatica E la parete non risulta soggetta a fenomeni di condensa superficiale né interstiziale come si evince dai seguenti tabelle e grafici in cui valori delle pressioni risultano vicini ma non si intersecano tra loro.

Tabella 99 Risultati verifica della condensa superficiale parete perimetrale in tufo + SC.01 - zona climatica E

Mese	θ_{int} [°C]	θ_{est} [°C]	P_{int} [Pa]	P_{est} [Pa]	θ_{acc} [°C]	P_{acc} [Pa]	f_{RSI} [-]
ottobre	20,0	14,1	1632	1323	17,8	2041	0,632
novembre	20,0	7,5	1366	822	15,0	1707	0,602
dicembre	20,0	3,5	1319	633	14,5	1648	0,666
gennaio	20,0	4,0	1350	682	14,8	1688	0,678
febbraio	20,0	7,1	1324	766	14,5	1655	0,577
marzo	20,0	10,6	1244	810	13,6	1555	0,317
aprile	20,0	13,4	1382	1048	15,2	1728	0,275

Tabella 100 Risultati verifica della condensa interstiziale parete esterna in tufo + SC.01 - zona climatica E

Mese	θ_{int} [°C]	θ_{est} [°C]	ϕ_{int} [%]	ϕ_{est} [%]	g_c [g/m ²]	Ma [g/m ²]	Periodi	Stato
ottobre	20,0	14,1	70	82	0,0	0	1	Asciutto
novembre	20,0	7,5	58	79	0,0	0	1	Asciutto
dicembre	20,0	3,5	56	81	0,0	0	1	Asciutto
gennaio	20,0	4,0	58	84	0,0	0	1	Asciutto
febbraio	20,0	7,1	57	76	0,0	0	1	Asciutto
marzo	20,0	10,6	53	63	0,0	0	1	Asciutto
aprile	20,0	13,4	59	68	0,0	0	1	Asciutto
maggio	19,4	19,4	73	68	0,0	0	1	Asciutto
giugno	22,8	22,8	59	56	0,0	0	1	Asciutto
luglio	24,5	24,5	61	58	0,0	0	1	Asciutto
agosto	24,3	24,3	65	61	0,0	0	1	Asciutto
settembre	19,8	19,8	59	55	0,0	0	1	Asciutto

Tabella 101 Distribuzione della temperatura parete esterna in tufo + SC.01 [°C] - zona climatica E

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Amb.	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8
Int.	19,7	19,4	19,2	19,2	19,4	19,5	19,7	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8
1	19,7	19,3	19,1	19,1	19,3	19,5	19,6	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8
2	18,6	17,0	16,1	16,2	16,9	17,8	18,4	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8
3	18,6	17,0	16,0	16,1	16,9	17,7	18,4	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8
4	14,2	7,7	3,8	4,2	7,3	10,7	13,5	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8
5	14,2	7,6	3,7	4,1	7,2	10,7	13,5	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8
6	14,1	7,6	3,6	4,1	7,2	10,7	13,5	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8
Est.	14,1	7,5	3,5	4,0	7,1	10,6	13,4	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8

Valori sul lato esterno dello strato; Amb.=ambiente interno; Int.=a valle dello strato liminare interno; Est.=ambiente esterno

Tabella 102 Distribuzione della pressione parziale del vapore parete esterna in tufo + SC.01 [Pa] - zona climatica E

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Amb.	1632	1366	1319	1350	1324	1244	1382	1644	1648	1875	1964	1372
Int.	1632	1366	1319	1350	1324	1244	1382	1644	1648	1875	1964	1372
1	1631	1364	1316	1347	1322	1242	1381	1644	1648	1875	1964	1372
2	1326	828	641	689	772	815	1052	1524	1549	1776	1865	1266
3	1324	823	635	684	767	811	1049	1523	1548	1775	1864	1265
4	1323	822	633	682	766	810	1048	1523	1548	1775	1864	1265
5	1323	822	633	682	766	810	1048	1523	1548	1775	1864	1265
6	1323	822	633	682	766	810	1048	1523	1548	1775	1864	1265
Est.	1323	822	633	682	766	810	1048	1523	1548	1775	1864	1265

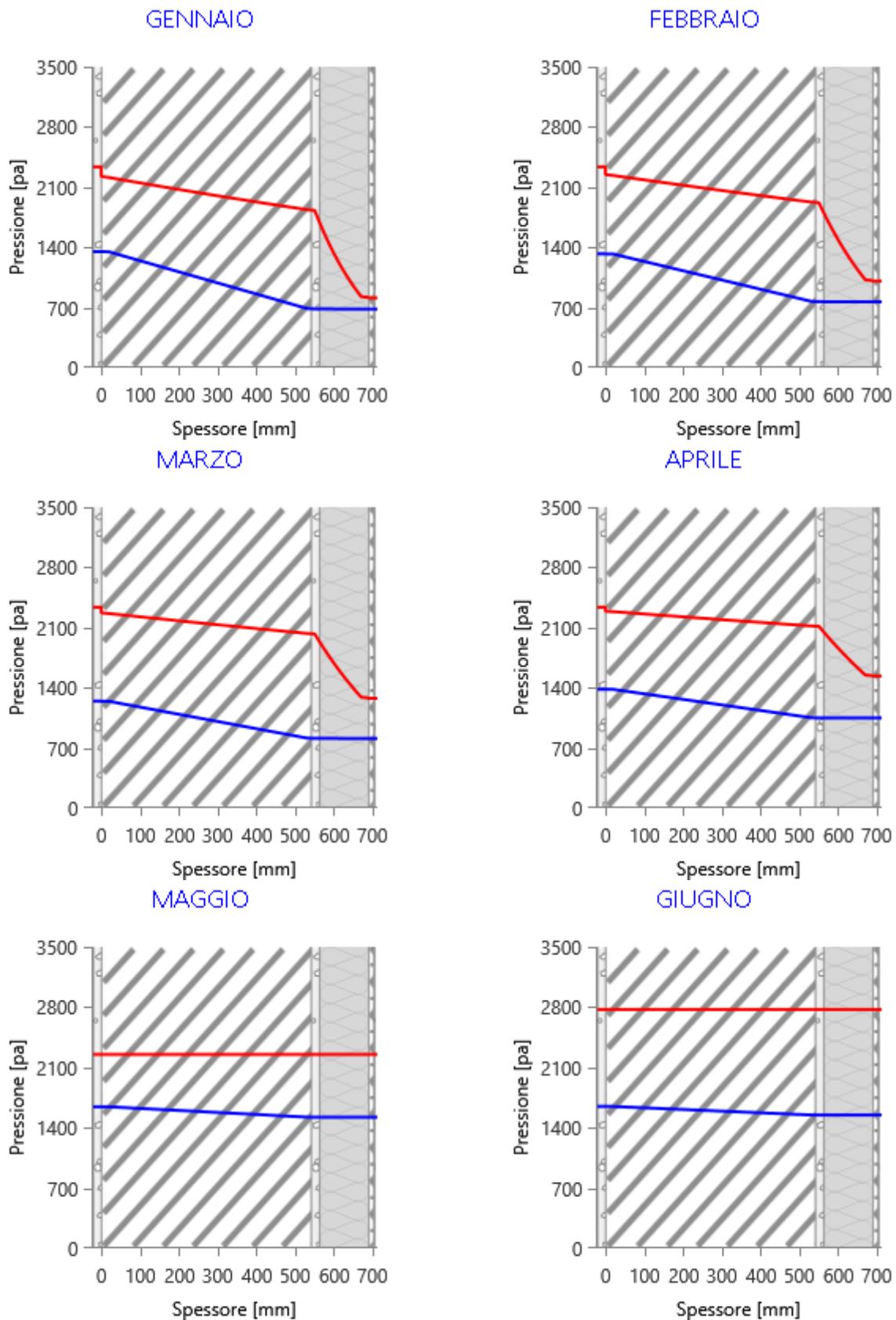
Valori sul lato esterno dello strato; Amb.=ambiente interno; Int.=a valle dello strato liminare interno; Est.=ambiente esterno

Tabella 103 Distribuzione della pressione di saturazione del vapore parete esterna in tufo + SC.01 [Pa] - zona climatica E

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Amb.	2337	2337	2337	2337	2337	2337	2337	2252	2774	3073	3036	2308
Int.	2295	2249	2222	2225	2246	2271	2290	2252	2774	3073	3036	2308
1	2290	2239	2209	2212	2236	2263	2285	2252	2774	3073	3036	2308
2	2141	1939	1825	1839	1927	2032	2119	2252	2774	3073	3036	2308
3	2138	1932	1816	1831	1920	2026	2115	2252	2774	3073	3036	2308
4	1618	1050	799	827	1022	1290	1547	2252	2774	3073	3036	2308
5	1614	1045	793	821	1017	1285	1543	2252	2774	3073	3036	2308
6	1613	1043	792	820	1015	1284	1542	2252	2774	3073	3036	2308
Est.	1608	1036	785	813	1008	1278	1537	2252	2774	3073	3036	2308

Valori sul lato esterno dello strato; Amb.=ambiente interno; Int.=a valle dello strato liminare interno; Est.=ambiente esterno

Tabella 104 Grafici mensili delle pressioni parziali e di saturazione del vapore [Pa] parete esterna in tufo + SC.01 - zona climatica E



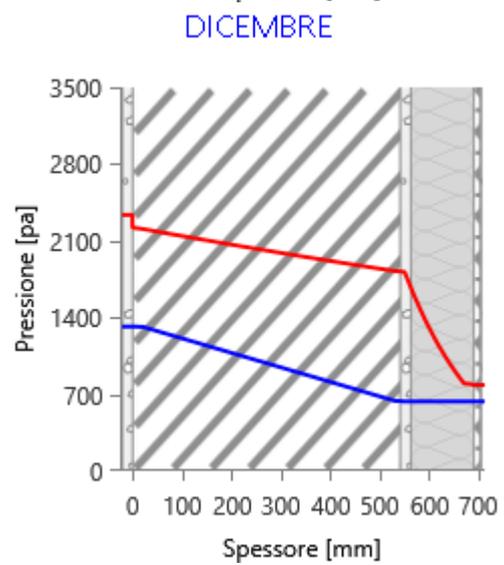
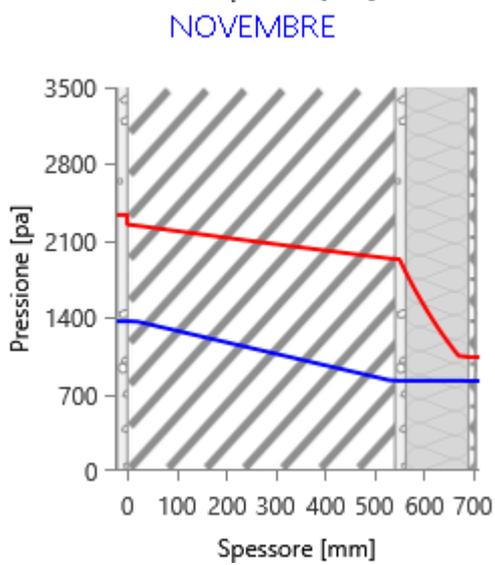
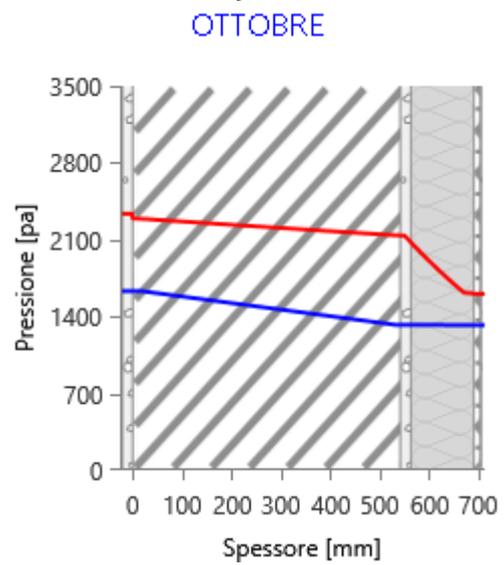
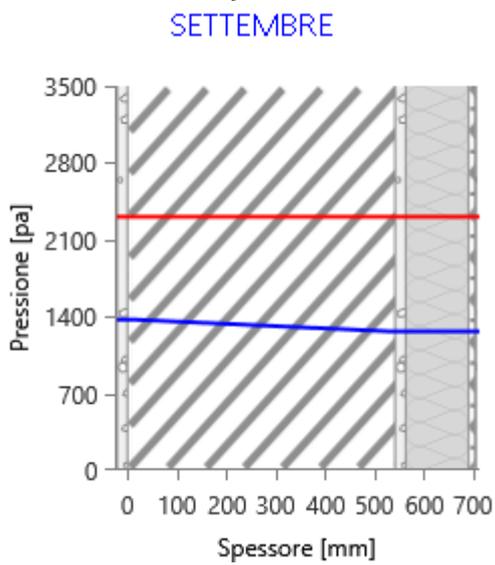
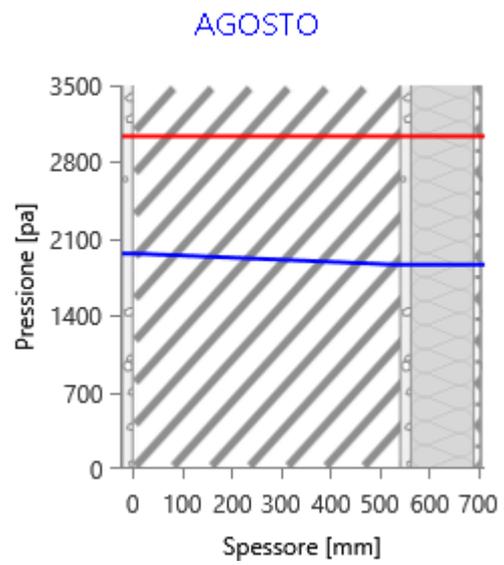
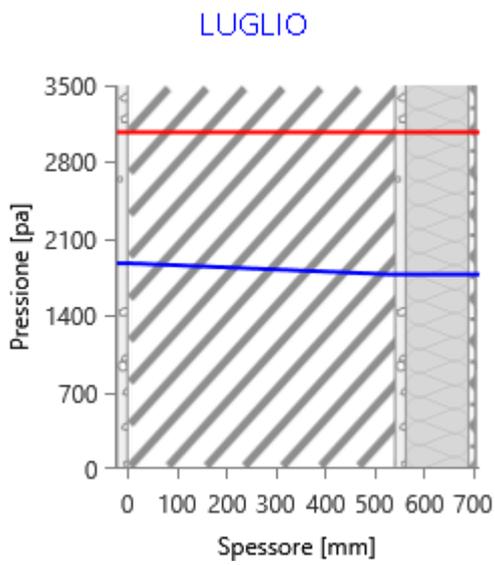
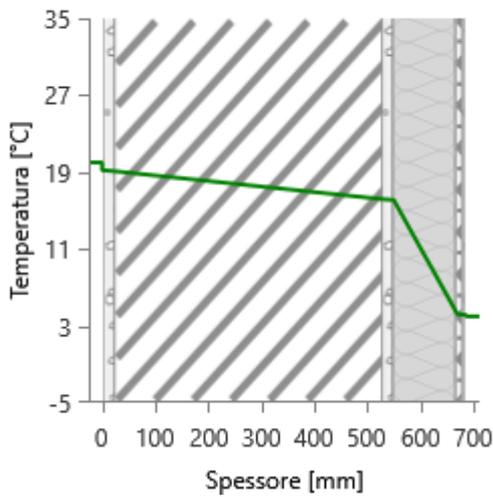
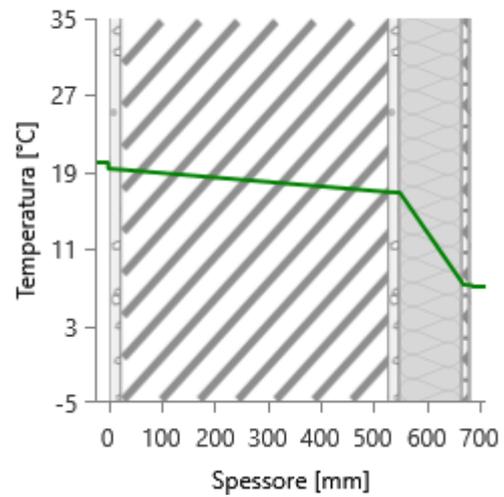


Tabella 105 Grafici mensili delle temperature [°C] parete esterna in tufo + SC.01 - zona climatica E

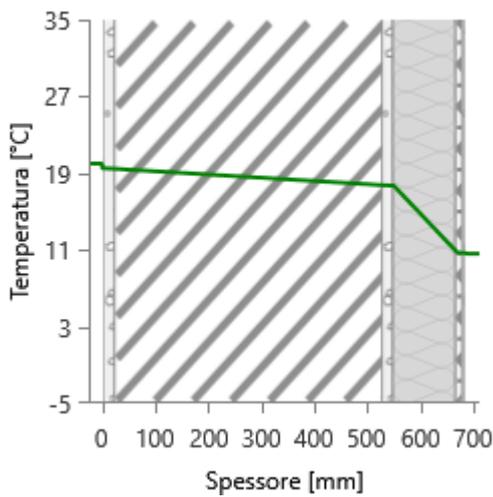
GENNAIO



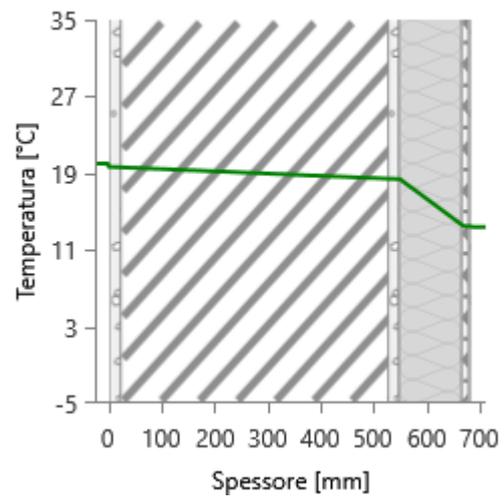
FEBBRAIO



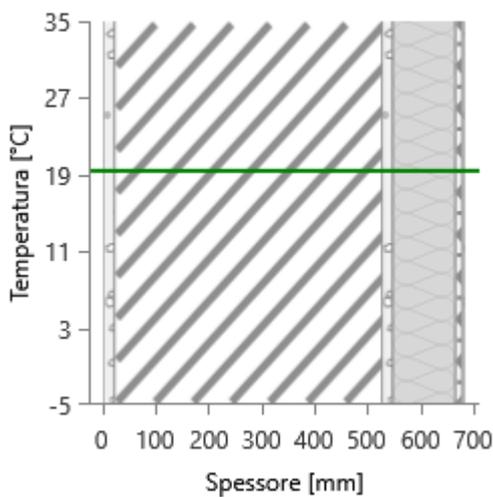
MARZO



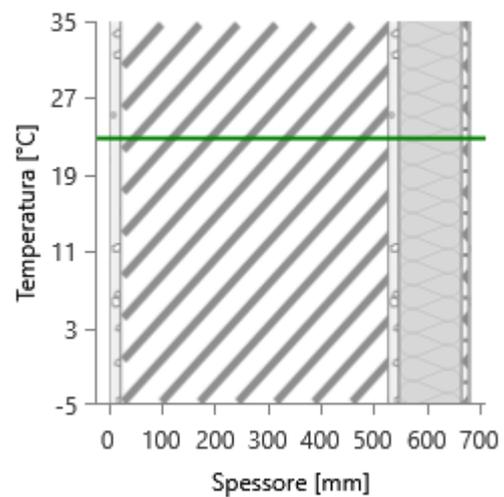
APRILE



MAGGIO



GIUGNO



Sono state analizzate le dispersioni termiche dei componenti d'involucro tramite software certificato per valutare la riduzione ottenibile tramite l'applicazione sia del sistema di isolamento a cappotto SC.01 sull'edificio-dimostratore in zona climatica E.

È stata valutata la potenza dispersa per trasmissione Φ_{tr} post-intervento di isolamento SC.01, sia dell'intero edificio sia del locale soggiorno collocato al piano terra esposto a nord-est, dove è stato svolto il monitoraggio in ambiente reale, sia della parete perimetrale in tufo isolata per ciascun orientamento (Tabella 106; Tabella 107). Dai calcoli effettuati si evince una riduzione del 44,62% delle dispersioni dell'intero edificio attraverso l'applicazione del sistema di isolamento a cappotto SC.01.

Dalle simulazioni effettuate sull'edificio-dimostratore si riscontra una riduzione della potenza totale dispersa per trasmissione attraverso la parete perimetrale in tufo isolata del 76,74% passando da 4.694 W a 1.092 W.

Tabella 106 Sintesi delle potenze disperse per trasmissione per l'intero periodo di riscaldamento – SC.01 - zona climatica E

Dispersioni con sistema di isolamento SC.01		
Intero edificio	Φ_{tr} [W]	8.223

Tabella 107 Potenza dispersa per trasmissione per componente M100 - Parete esterna in tufo - 55 cm + SC.01 – T - zona climatica E

ZONA E	Sup. [m ²]	ΦT [W]	%	Φ [W/m ²]
N	30,44	194	2,4	6,37
E	41,39	253	3,1	6,11
S	41,81	222	2,7	5,31
O	72,14	422	5,1	5,85
TOT	185,78	1092	13,3	5,88

Sono state valutate le dispersioni per trasmissione relative all'energia invernale dei componenti opachi e, in particolare, si sottolinea quello oggetto di intervento di isolamento termico (Tabella 108).

Nell'ultima colonna della Tabella 108 sono stati riportati i dati relativi all'energia dispersa, ottenuti dalla somma tra le dispersioni per trasmissione e per extraflusso, meno gli apporti solari attraverso il componente.

Tabella 108 Dispersioni ordinate per componente - stagione invernale strutture opache - post operam + SC.01 – zona climatica E

Cod	Descrizione elemento	U [W/m ² K]	Sup. [m ²]	$Q_{H,tr}$ [kWh]	% $Q_{H,tr}$ [%]	$Q_{H,r}$ [kWh]	% $Q_{H,r}$ [%]	$Q_{sol,k}$ [kWh]	% $Q_{sol,k}$ [%]	$Q_{H,tr} + Q_{H,r} - Q_{sol,k}$ [kWh]
M100	Parete esterna in tufo - 55 cm + SC.01 - T	0,212	185,78	2145	12,3	300	32,6	458	14,2	1987
M103	Parete esterna in tufo - 40 cm + SC.01 - T	0,213	9,98	116	0,7	16	1,8	25	0,8	107
M104	Parete esterna in tufo - 20 cm + SC.01 - T	0,231	23,27	294	1,7	41	4,5	60	1,8	275
M105	Parete esterna in tufo - 55 cm - U	0,848	11,33	419	2,4	-	-	-	-	-
M201	Parete interna - 10	2,36	44,57	4589	26,4	-	-	-	-	-

	cm - U									
M203	Parete interna in tufo - 40 cm - U	1,076	52,64	2472	14,2	-	-	-	-	-
P1	Pavimento su terreno - G	0,565	71,58	2206	12,7	-	-	-	-	-
P3	Soletta interpiano - U	1,423	9,49	236	1,4	-	-	-	-	-
S2	Soletta interpiano - U	1,756	68,99	2115	12,2	-	-	-	-	-
S3	Soletta interpiano - T	1,865	13,07	1330	7,7	372	40,5	532	16,5	1170
Totali			15922	91,7	729	79,4	1075	33,3	3539	

4.6.6 Simulazioni in zona climatica E – soluzione PV.02

Nelle simulazioni effettuate in zona climatica E la parete non risulta soggetta a fenomeni di condensa superficiale né interstiziale come si evince dai seguenti tabelle e grafici, in cui valori delle pressioni risultano più distanziate tra loro rispetto anche al sistema di isolamento SC.01 grazie alla presenza dell'intercapedine d'aria che ne impedisce la formazione.

Tabella 109 Risultati verifica della condensa superficiale parete esterna in tufo + PV.02 – zona climatica E

Mese	θ_{int} [°C]	θ_{est} [°C]	P_{int} [Pa]	P_{est} [Pa]	θ_{acc} [°C]	P_{acc} [Pa]	f_{RSI} [-]
ottobre	20,0	14,1	1632	1323	17,8	2041	0,632
novembre	20,0	7,5	1366	822	15,0	1707	0,602
dicembre	20,0	3,5	1319	633	14,5	1648	0,666
gennaio	20,0	4,0	1350	682	14,8	1688	0,678
febbraio	20,0	7,1	1324	766	14,5	1655	0,577
marzo	20,0	10,6	1244	810	13,6	1555	0,317
aprile	20,0	13,4	1382	1048	15,2	1728	0,275

Tabella 110 Risultati verifica della condensa interstiziale parete esterna in tufo + PV.02 – zona climatica E

Mese	θ_{int} [°C]	θ_{est} [°C]	ϕ_{int} [%]	ϕ_{est} [%]	g_c [g/m ²]	Ma [g/m ²]	Periodi	Stato
ottobre	20,0	14,1	70	82	0,0	0	1	Asciutto
novembre	20,0	7,5	58	79	0,0	0	1	Asciutto
dicembre	20,0	3,5	56	81	0,0	0	1	Asciutto
gennaio	20,0	4,0	58	84	0,0	0	1	Asciutto
febbraio	20,0	7,1	57	76	0,0	0	1	Asciutto
marzo	20,0	10,6	53	63	0,0	0	1	Asciutto
aprile	20,0	13,4	59	68	0,0	0	1	Asciutto
maggio	19,4	19,4	73	68	0,0	0	1	Asciutto
giugno	22,8	22,8	59	56	0,0	0	1	Asciutto
luglio	24,5	24,5	61	58	0,0	0	1	Asciutto
agosto	24,3	24,3	65	61	0,0	0	1	Asciutto
settembre	19,8	19,8	59	55	0,0	0	1	Asciutto

Tabella 111 Distribuzione della temperatura nella struttura post-intervento di efficientamento PV.02 [°C] – zona climatica E

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Amb.	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8
Int.	19,7	19,4	19,2	19,2	19,4	19,5	19,7	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8
1	19,7	19,3	19,1	19,1	19,3	19,5	19,6	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8
2	18,6	17,1	16,2	16,3	17,0	17,8	18,5	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8
3	18,6	17,1	16,1	16,2	17,0	17,8	18,4	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8
4	14,4	8,1	4,2	4,7	7,7	11,0	13,7	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8
5	14,2	7,6	3,7	4,2	7,2	10,7	13,5	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8
6	14,1	7,6	3,6	4,1	7,2	10,7	13,5	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8
Est.	14,1	7,5	3,5	4,0	7,1	10,6	13,4	19,4	22,8	24,5	24,3	19,8

Valori sul lato esterno dello strato; Amb.=ambiente interno; Int.=a valle dello strato liminare interno; Est.=ambiente esterno

Tabella 112 Distribuzione della pressione parziale del vapore nella struttura post-intervento di efficientamento PV.02 [Pa] – zona climatica E

Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Amb.	1632	1366	1319	1350	1324	1244	1382	1644	1648	1875	1964	1372
Int.	1632	1366	1319	1350	1324	1244	1382	1644	1648	1875	1964	1372
1	1631	1364	1316	1348	1322	1242	1381	1644	1648	1875	1964	1372
2	1349	868	691	738	813	847	1076	1533	1556	1783	1872	1274
3	1347	863	685	733	809	843	1074	1532	1556	1783	1872	1273
4	1346	862	684	732	807	842	1073	1532	1555	1782	1871	1273
5	1346	862	683	731	807	842	1073	1532	1555	1782	1871	1273
6	1323	822	633	682	766	810	1048	1523	1548	1775	1864	1265
Est.	1323	822	633	682	766	810	1048	1523	1548	1775	1864	1265

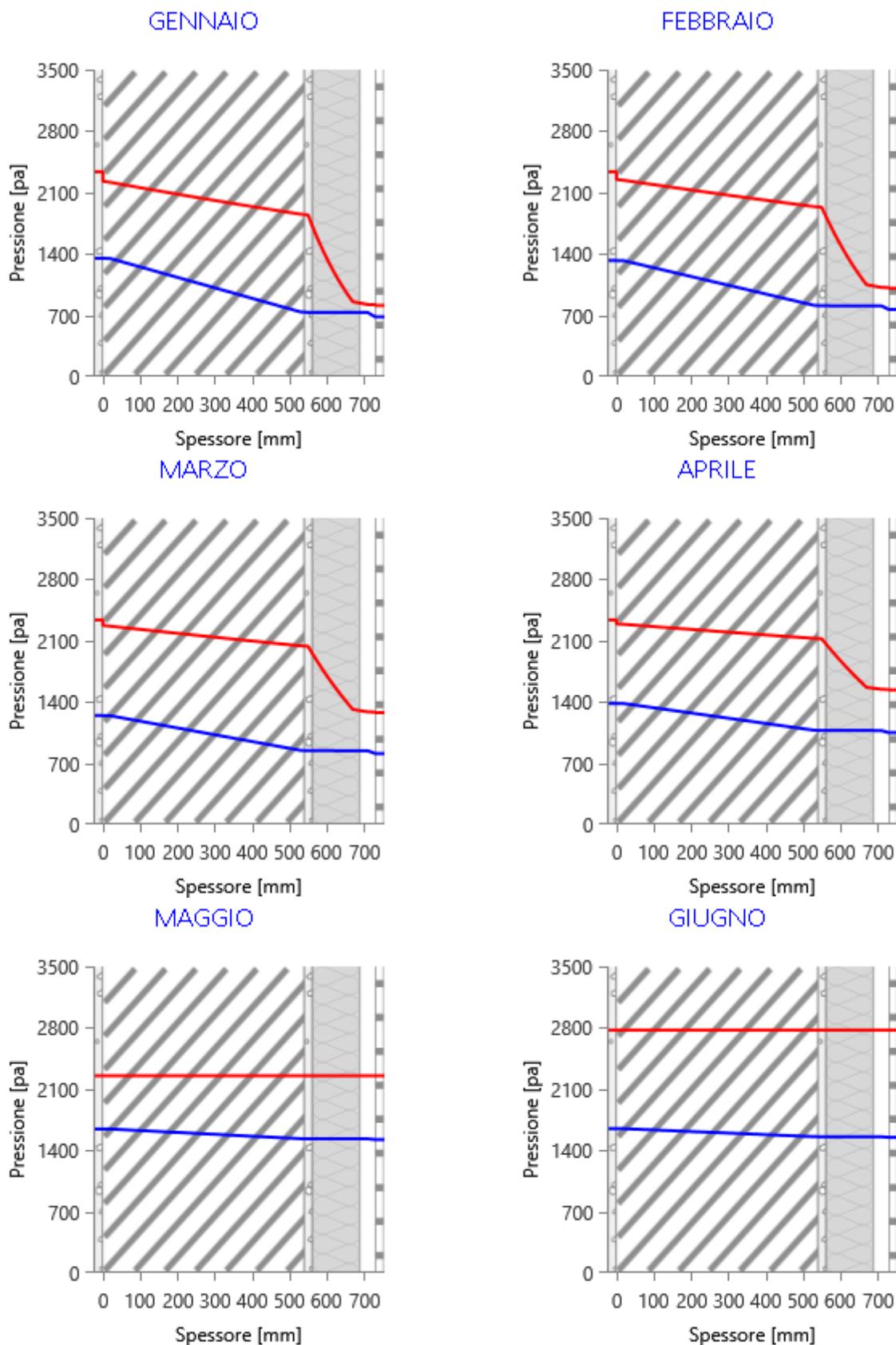
Valori sul lato esterno dello strato; Amb.=ambiente interno; Int.=a valle dello strato liminare interno; Est.=ambiente esterno

Tabella 113 Distribuzione della pressione di saturazione nella struttura post-intervento di efficientamento PV.02 [Pa] – zona climatica E

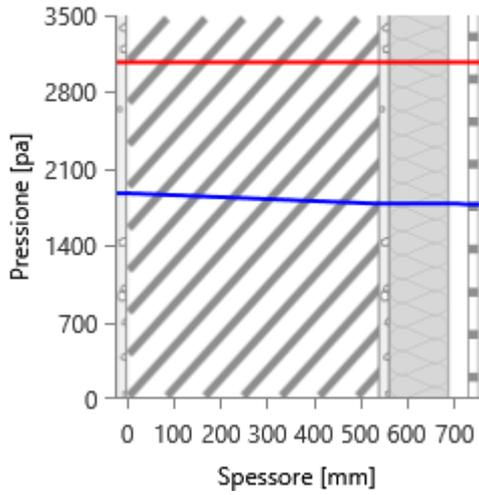
Strato	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set
Amb.	2337	2337	2337	2337	2337	2337	2337	2252	2774	3073	3036	2308
Int.	2296	2252	2225	2228	2249	2273	2292	2252	2774	3073	3036	2308
1	2292	2242	2212	2216	2239	2265	2286	2252	2774	3073	3036	2308
2	2147	1950	1839	1852	1939	2040	2125	2252	2774	3073	3036	2308
3	2143	1943	1830	1844	1932	2035	2121	2252	2774	3073	3036	2308
4	1636	1077	827	855	1049	1314	1567	2252	2774	3073	3036	2308
5	1615	1046	794	823	1018	1286	1544	2252	2774	3073	3036	2308
6	1613	1043	792	820	1015	1284	1542	2252	2774	3073	3036	2308
Est.	1608	1036	785	813	1008	1278	1537	2252	2774	3073	3036	2308

Valori sul lato esterno dello strato; Amb.=ambiente interno; Int.=a valle dello strato liminare interno; Est.=ambiente esterno

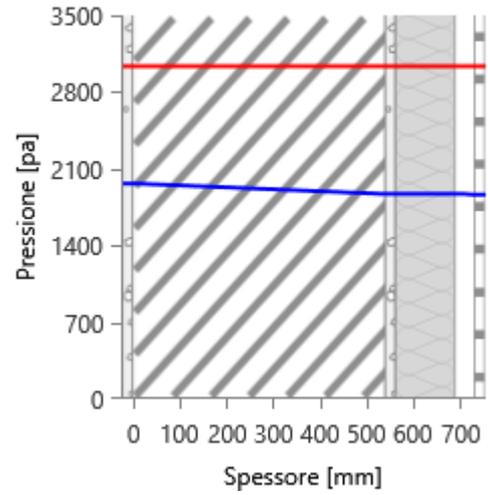
Tabella 114 Grafici mensili delle pressioni parziali e di saturazione del vapore [Pa] parete esterna in tufo + PV.02 - zona climatica E



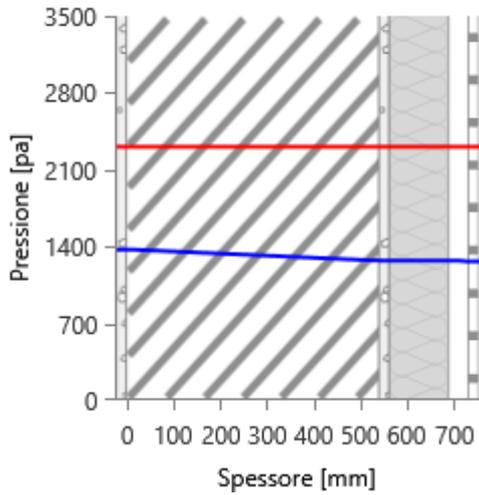
LUGLIO



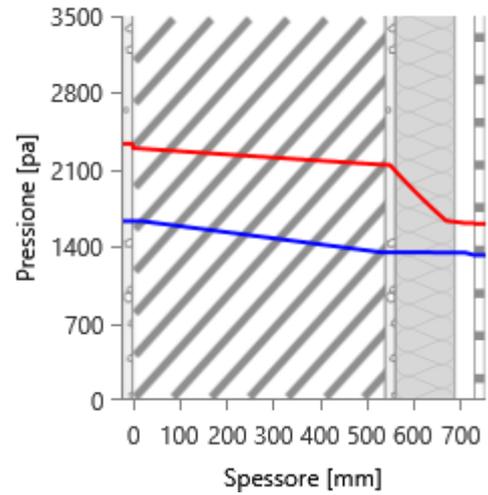
AGOSTO



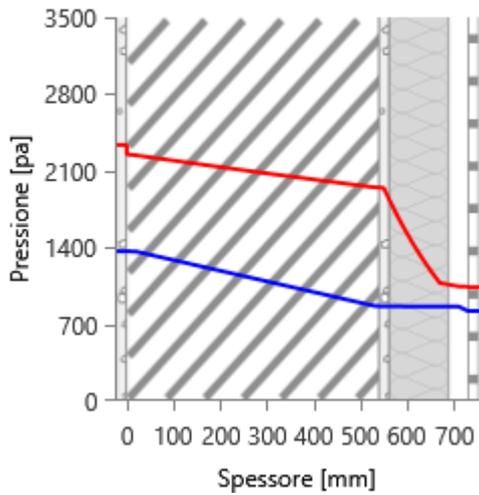
SETTEMBRE



OTTOBRE



NOVEMBRE



DICEMBRE

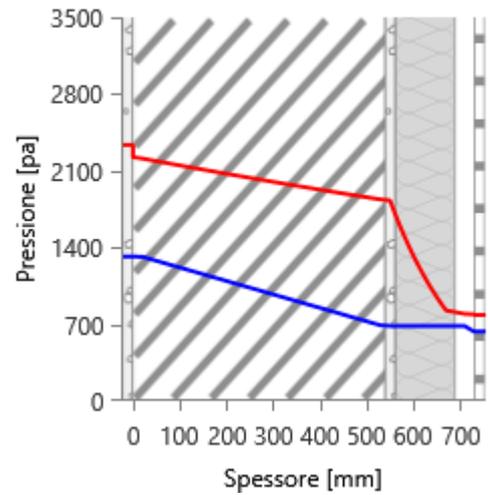
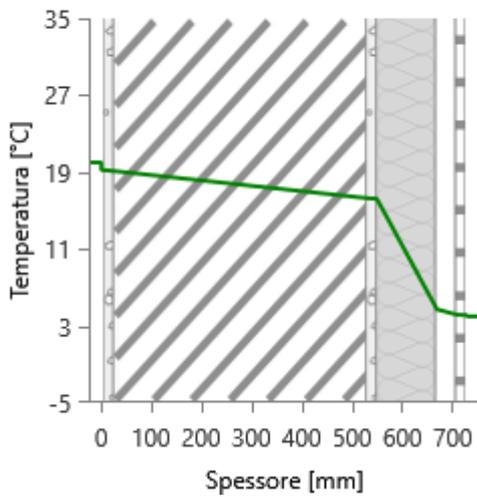
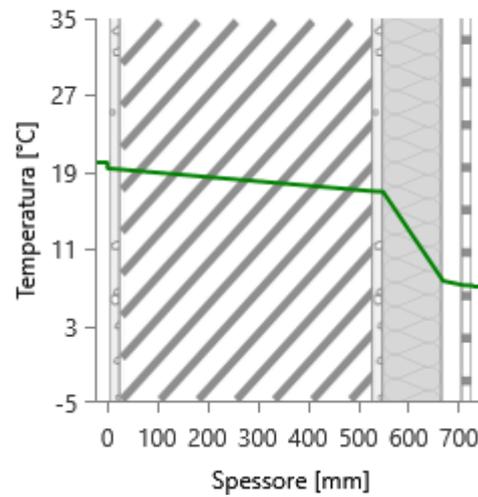


Tabella 115 Grafici mensili delle temperature [°C] parete esterna in tufo + PV.02 - zona climatica E

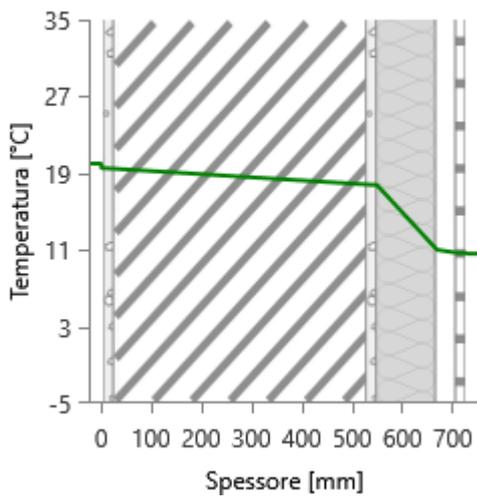
GENNAIO



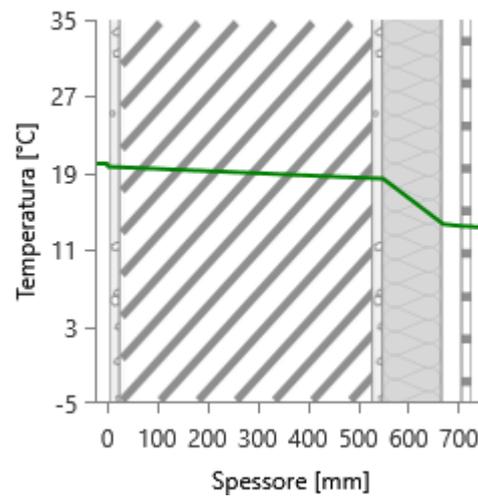
FEBBRAIO



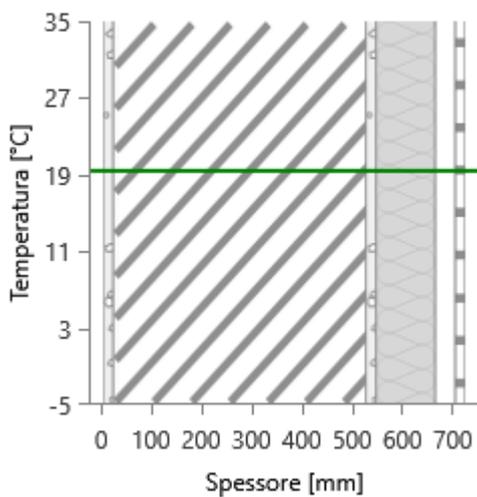
MARZO



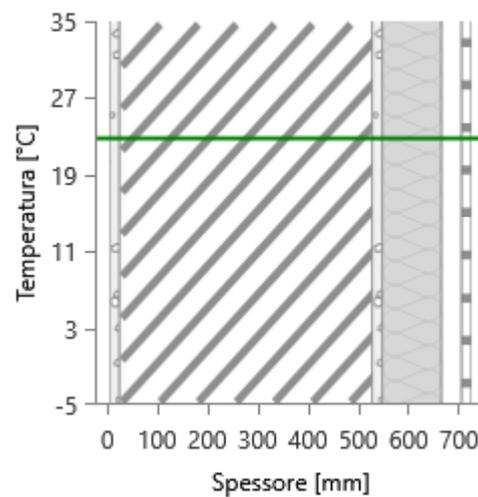
APRILE



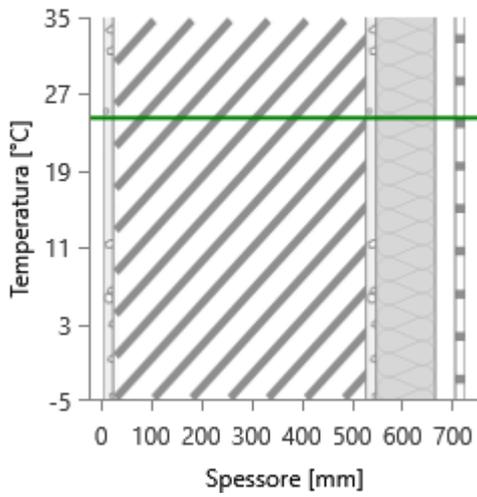
MAGGIO



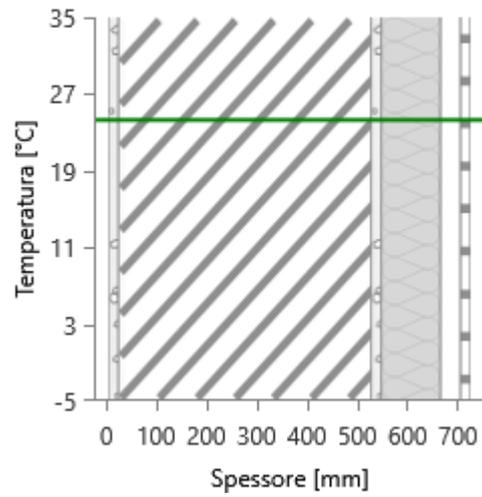
GIUGNO



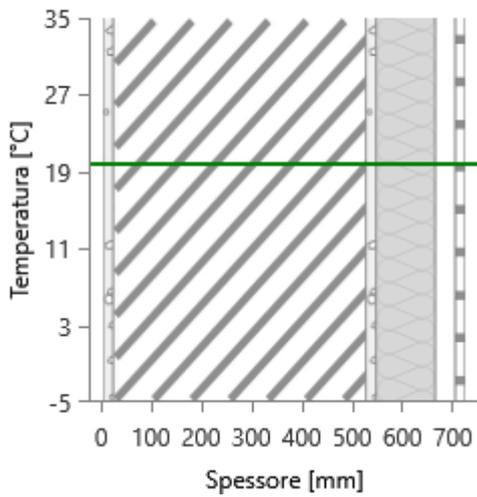
LUGLIO



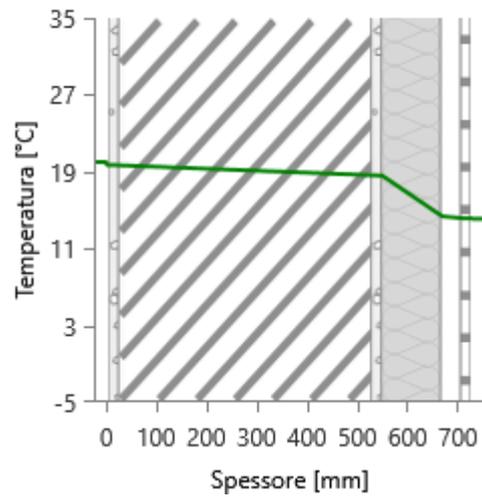
AGOSTO



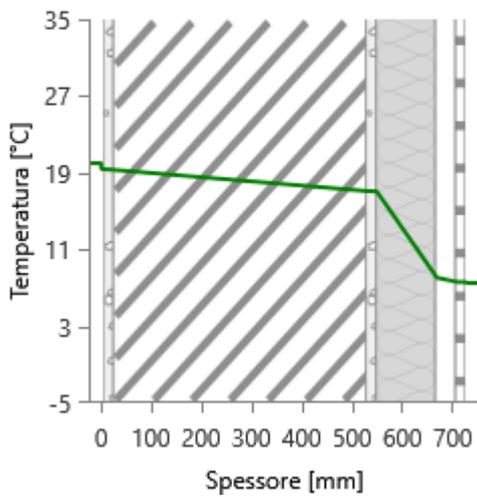
SETTEMBRE



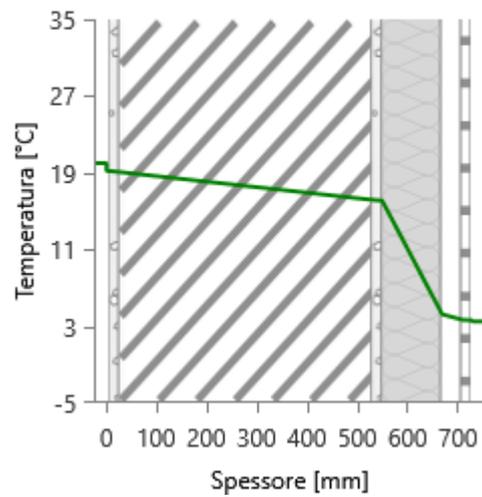
OTTOBRE



NOVEMBRE



DICEMBRE



Sono state analizzate le dispersioni termiche dei componenti d'involucro tramite software certificato per valutare la riduzione ottenibile tramite l'applicazione sia del sistema di isolamento parete ventilata PV.02 sull'edificio-dimostratore in zona climatica E.

È stata valutata la potenza dispersa per trasmissione Φ_{tr} post-intervento di isolamento PV.02, sia dell'intero edificio sia del locale soggiorno collocato al piano terra esposto a nord-est, dove è stato svolto il monitoraggio in ambiente reale, sia della parete perimetrale in tufo isolata per ciascun orientamento (Tabella 116; Tabella 117). Dai calcoli effettuati si evince una riduzione del 45,23% delle dispersioni dell'intero edificio attraverso l'applicazione del sistema di isolamento parete ventilata PV.02.

Dalle simulazioni effettuate sull'edificio-dimostratore si riscontra una riduzione della potenza totale dispersa per trasmissione attraverso la parete perimetrale in tufo isolata del 78,53% passando da 4.694 W a 1.008W.

Tabella 116 Sintesi delle potenze disperse per trasmissione per l'intero periodo di riscaldamento – PV.02 - zona climatica E

Dispersioni con sistema di isolamento SC.01		
Intero edificio	Φ_{tr} [W]	8.132

Tabella 117 Potenza dispersa per trasmissione per componente M100 - Parete esterna in tufo - 55 cm + PV.02 - T - zona climatica E

ZONA E	Sup. Tot [m ²]	ΦT [W]	%	Φ [W/m ²]
N	30,44	179	2,2	5,88
E	41,39	234	2,9	5,65
S	41,81	205	2,5	4,90
O	72,14	389	4,8	5,39
TOT	185,78	1008	12,4	5,43

Sono state valutate le dispersioni per trasmissione relative all'energia invernale dei componenti opachi e, in particolare, si sottolinea quello oggetto di intervento di isolamento termico (Tabella 118).

Nell'ultima colonna della Tabella 118 Tabella 51 sono stati riportati i dati relativi all'energia dispersa, ottenuti dalla somma tra le dispersioni per trasmissione e per extraflusso, meno gli apporti solari attraverso il componente.

Tabella 118 Dispersioni ordinate per componente - stagione invernale strutture opache- post operam + PV.02 – zona climatica E

Cod	Descrizione elemento	U [W/m ² K]	Sup. [m ²]	$Q_{H,tr}$ [kWh]	% $Q_{H,tr}$ [%]	$Q_{H,r}$ [kWh]	% $Q_{H,r}$ [%]	$Q_{sol,k}$ [kWh]	% $Q_{sol,k}$ [%]	$Q_{H,tr} + Q_{H,r} - Q_{sol,k}$ [kWh]
M100	Parete esterna in tufo - 55 cm + PV.02 - T	0,195	185,78	1980	11,5	277	31	423	13,3	1834
M103	Parete esterna in tufo - 40 cm + PV.02 - T	0,206	9,98	112	0,7	16	1,8	24	0,8	104
M104	Parete esterna in tufo - 20 cm + PV.02 - T	0,223	23,27	283	1,6	40	4,4	57	1,8	266
M105	Parete esterna in tufo - 55 cm - U	0,848	11,33	419	2,4	-	-	-	-	-
M201	Parete interna - 10	2,36	44,57	4589	26,7	-	-	-	-	-

	cm - U										
M203	Parete interna in tufo - 40 cm - U	1,076	52,64	2472	14,4	-	-	-	-	-	-
P1	Pavimento su terreno - G	0,565	71,58	2206	12,8	-	-	-	-	-	-
P3	Soletta interpiano - U	1,423	9,49	236	1,4	-	-	-	-	-	-
S2	Soletta interpiano - U	1,756	68,99	2115	12,3	-	-	-	-	-	-
S3	Soletta interpiano - T	1,865	13,07	1330	7,7	372	41,6	532	16,7	1170	
Totali			15742	91,5	705	78,8	1036	32,6	3374		

Dalle simulazioni svolte sull’edificio-dimostratore inserito nelle zone climatiche C, D ed E a cui appartiene il patrimonio edilizio nazionale residenziale più consistente, emerge un’elevata diminuzione delle dispersioni specifiche attraverso la chiusura verticale – parete perimetrale in tufo da 55 cm, grazie all’applicazione dei sistemi di isolamento standardizzati modulari definiti durante il secondo anno di attività, validandone l’efficacia.

La riduzione della potenza dispersa per trasmissione Φ_{tr} dell’intero edificio oggetto di successivo monitoraggio, contraddistinto da un volume lordo di 468,02 m³ e 185,78 m² di pareti perimetrali in tufo da 55 cm, nelle zone climatiche analizzate attraverso l’applicazione del sistema di isolamento a cappotto SC.01, oscilla intorno al 40-45%; la riduzione della potenza totale dispersa per trasmissione attraverso la parete perimetrale in tufo isolata con il sistema SC.01 si attesta intorno al 76%.

La diminuzione della potenza dispersa per trasmissione Φ_{tr} dell’intero edificio nelle medesime zone climatiche attraverso il sistema di isolamento parete ventilata PV.02 oscilla anch’essa intorno al 40-46%; la riduzione della potenza totale dispersa per trasmissione attraverso la parete perimetrale in tufo isolata con il sistema SC.01 si attesta intorno al 79%.

È stato svolto uno studio per valutare l’energia dispersa per trasmissione $Q_{H,tr}$ attraverso le pareti perimetrali in tufo da 55 cm nelle zone climatiche C, D ed E per l’intero periodo di riscaldamento, sia ante sia post intervento di isolamento termico con entrambe le soluzioni SC.01 e PV.02. Si riporta in Tabella 119 una sintesi dei dati ottenuti dalle simulazioni.

Dalla tabella si evince chiaramente un’elevata riduzione dell’energia dispersa attraverso le pareti perimetrali in tufo da 55 cm per trasmissione $Q_{H,tr}$ e per extraflusso $Q_{H,r}$ grazie all’applicazione dei sistemi di isolamento SC.01 e PV.02, rispettivamente di circa il 76% e del 78% in tutte le zone climatiche.

Tabella 119 Confronto risultati simulazioni dell’energia dispersa per trasmissione (kWh)

	ANTE OPERAM				POST OPERAM							
	M100 Parete in tufo 55 cm				M100 + SC.01				M100 + PV.02			
	$Q_{H,tr}$ [kWh]	$Q_{H,r}$ [kWh]	$Q_{sol,k}$ [kWh]	$Q_{H,tr} + Q_{H,r} - Q_{sol,k}$ [kWh]	$Q_{H,tr}$ [kWh]	$Q_{H,r}$ [kWh]	$Q_{sol,k}$ [kWh]	$Q_{H,tr} + Q_{H,r} - Q_{sol,k}$ [kWh]	$Q_{H,tr}$ [kWh]	$Q_{H,r}$ [kWh]	$Q_{sol,k}$ [kWh]	$Q_{H,tr} + Q_{H,r} - Q_{sol,k}$ [kWh]
Zona climatica C	5466	977	2660	3783	1295	231	420	1106	1195	214	388	1021
Zona climatica D	6322	1133	3223	4232	1494	268	508	1254	1379	247	469	1157
Zona climatica E	9070	1268	2908	7430	2145	300	458	1987	1980	277	423	1834

4.7 Simulazioni in zona climatica C nel periodo di monitoraggio

Le simulazioni sono state effettuate sull'edificio-dimostratore in zona climatica C durante il periodo in cui sono stati svolti i monitoraggi in ambiente reale ante e post operam, rispettivamente dall'11 al 13 dicembre e dal 18 al 20 dicembre 2021.

Per effettuare delle valutazioni comparative tra le prestazioni dell'involucro prima e dopo l'installazione del componente edilizio di isolamento SC.01, nel modello energetico sono state svolte verifiche prestazionali considerando il solo ambiente oggetto del monitoraggio e riproducendo nelle simulazioni ante e post operam le condizioni più possibile simili a quelle del periodo effettivo dei monitoraggi in loco. È stato quindi considerata un'unica zona climatizzata, corrispondente al locale soggiorno, con il solo muro orientato a Nord, isolato con il componente SC.01 e gli altri come confinanti con ambienti non riscaldati. Si è considerato un impianto di riscaldamento fittizio per fare in modo di avere una temperatura interna di 20°C nel locale Soggiorno, come evidenziato in Figura 30.

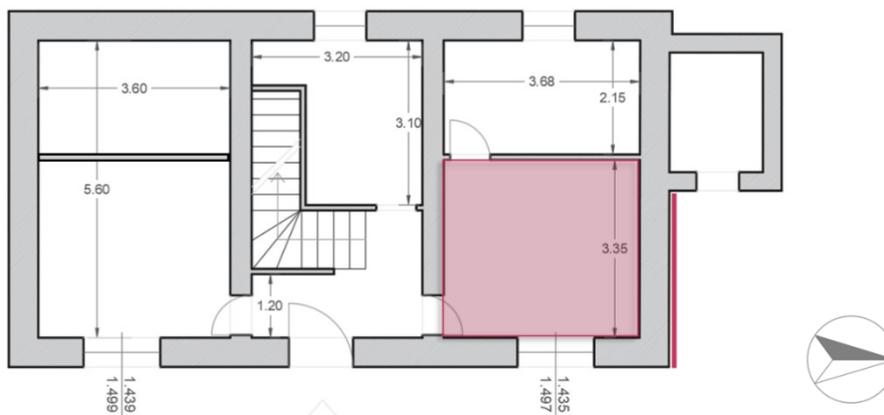


Figura 30 Locale Soggiorno, oggetto del monitoraggio

4.7.1 Periodo di monitoraggio ante operam

La temperatura esterna media per le simulazioni svolte durante il periodo di monitoraggio dell'ante operam in zona climatica C è di 8,1°C e l'irradianza solare diretta sul piano orizzontale è di 35,2 W/m². Si riportano di seguito i dettagli dei dati climatici relativi allo specifico periodo di monitoraggio (Figura 31; Tabella 120), come da Norma UNI 10349-1: 2016.

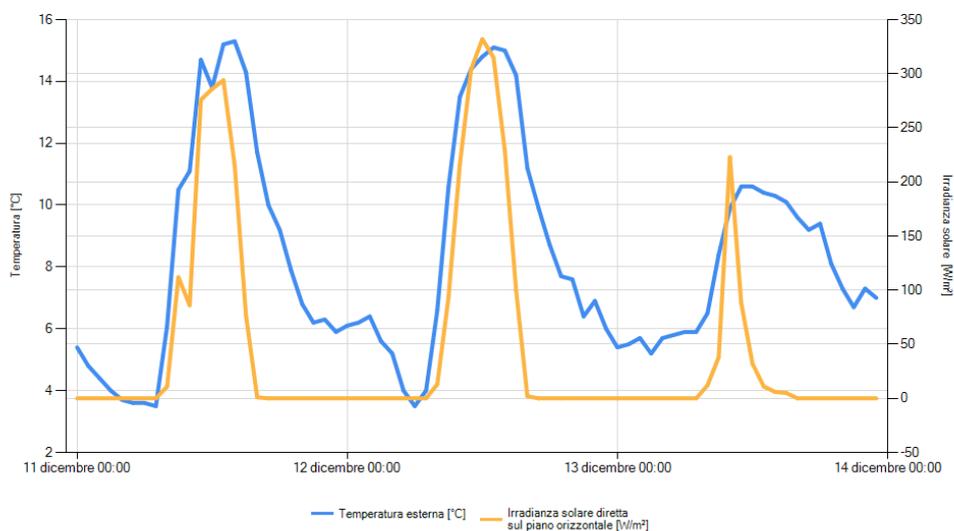


Figura 31 Grafico della Temperatura esterna e dell'Irradianza solare diretta sul piano orizzontale - Zona C - 11-13 dicembre (ante operam)

Tabella 120 Dati climatici del periodo di monitoraggio ante operam simulato

MM	GG	HH	TEMP	RDIR	RDIF	UREL	PVAP	VELV
12	11	0	5,4	0	0	70	628,5	0,7
12	11	1	4,8	0	0	72	620	0,6
12	11	2	4,4	0	0	76	636,4	0,6
12	11	3	4	0	0	79	643,1	0,7
12	11	4	3,7	0	0	79	629,8	0,6
12	11	5	3,6	0	0	80	633,3	0,8
12	11	6	3,6	0	0	81	641,1	0,6
12	11	7	3,5	0	3,6	87	683,8	0,8
12	11	8	6,1	11	61,6	76	716,4	0,6
12	11	9	10,5	111,8	105,9	60	762,4	0,6
12	11	10	11,1	86,3	166,7	62	819,9	0,8
12	11	11	14,7	275,7	115,6	52	870,6	1,2
12	11	12	13,8	285,7	114,7	54	852,8	1,1
12	11	13	15,2	293,6	87,4	51	881,8	1,2
12	11	14	15,3	214,7	75,3	50	870	1,2
12	11	15	14,3	77,4	68,5	52	848,3	0,9
12	11	16	11,7	1,4	11	59	812	0,7
12	11	17	10	0	0	67	823,5	0,6
12	11	18	9,2	0	0	71	826,9	0,6
12	11	19	7,9	0	0	78	831,9	0,6
12	11	20	6,8	0	0	83	821	1
12	11	21	6,2	0	0	81	768,8	0,9
12	11	22	6,3	0	0	75	716,7	0,9
12	11	23	5,9	0	0	73	678,6	0,8
12	12	0	6,1	0	0	68	640,9	0,7
12	12	1	6,2	0	0	66	626,4	0,7
12	12	2	6,4	0	0	67	644,7	0,7
12	12	3	5,6	0	0	70	637,3	0,6
12	12	4	5,2	0	0	70	619,9	1
12	12	5	4	0	0	76	618,7	0,6
12	12	6	3,5	0	0	81	636,6	0,6
12	12	7	4	0	3	70	569,9	0,8
12	12	8	6,6	12,9	62,4	59	575,6	0,8
12	12	9	10,6	93,7	112,9	49	626,8	0,8
12	12	10	13,5	216,3	112,3	43	666	0,6
12	12	11	14,4	304	101,5	41	673,2	1
12	12	12	14,8	332,2	92,2	41	690,8	1
12	12	13	15,1	314,7	77,2	39	669,9	1,5
12	12	14	15	228,9	68,1	43	733,9	1,2
12	12	15	14,2	99,7	57,6	45	729,4	1,3
12	12	16	11,2	2,3	11,6	55	732,2	1
12	12	17	9,9	0	0	63	769,1	0,6
12	12	18	8,7	0	0	71	799,5	0,6
12	12	19	7,7	0	0	75	789	0,8

12	12	20	7,6	0	0	72	752,2	1
12	12	21	6,4	0	0	77	740,9	0,6
12	12	22	6,9	0	0	71	707,1	1,2
12	12	23	6	0	0	98	917,3	1,9
12	13	0	5,4	0	0	99	888,9	1,8
12	13	1	5,5	0	0	97	877	1,5
12	13	2	5,7	0	0	95	870,9	1,1
12	13	3	5,2	0	0	98	867,8	1,2
12	13	4	5,7	0	0	87	797,6	1,7
12	13	5	5,8	0	0	75	692,4	1,9
12	13	6	5,9	0	0	67	622,8	1,8
12	13	7	5,9	0	2,4	64	594,9	1,4
12	13	8	6,5	12,1	61,6	62	600,8	1,6
12	13	9	8,4	37,5	124,9	56	617,8	1,6
12	13	10	9,9	223,4	108,4	51	622,6	2,2
12	13	11	10,6	88,2	192	48	614	2,6
12	13	12	10,6	32,2	186,5	48	614	2,5
12	13	13	10,4	11,4	140,3	50	631,2	2
12	13	14	10,3	6,3	100,3	51	639,5	2,2
12	13	15	10,1	5,3	65,2	51	631	2,5
12	13	16	9,6	0,3	7,1	52	622,2	2,1
12	13	17	9,2	0	0	52	605,6	2,5
12	13	18	9,4	0	0	53	625,7	2,6
12	13	19	8,1	0	0	67	724,3	2,3
12	13	20	7,3	0	0	87	890,6	2,9
12	13	21	6,7	0	0	94	923,4	2,9
12	13	22	7,3	0	0	84	859,8	3,9
12	13	23	7	0	0	93	932,6	3,3

La parete in tufo da 55 cm oggetto di studio non risulta soggetta a fenomeni di condensa superficiale né interstiziale come già verificato nelle simulazioni effettuate per l'intero periodo di riscaldamento (vedere Paragrafo 4.4.1)

È stata valutata la potenza dispersa per trasmissione Φ_{tr} del locale soggiorno collocato al piano terra esposto a nord-est, dove è stato svolto il monitoraggio in ambiente reale, per l'analisi della parete perimetrale in tufo da 55 cm (M100), prima e dopo la posa del sistema isolante SC.01, con orientamento Nord (Tabella 121; Tabella 122).

Tabella 121 Dispersioni simulate del locale soggiorno – periodo monitoraggio ante operam - zona climatica C

Dispersioni Ante Operam		
Locale Soggiorno	Φ_{tr} [W]	1453

Sono state valutate le dispersioni per trasmissione relative all'energia invernale, dei componenti opachi e, in particolare, si sottolinea quello oggetto dei successivi monitoraggi in loco (Tabella 122).

Nell'ultima colonna della Tabella 122 sono stati riportati i dati relativi all'energia dispersa, ottenuti dalla somma tra le dispersioni per trasmissione e per extraflusso, meno gli apporti solari attraverso il componente.

Tabella 122 Dispersioni attraverso strutture opache ordinate per componente – periodo monitoraggio ante operam – zona climatica C

Cod	Descrizione elemento	U [W/m ² K]	Sup. [m ²]	Q _{H,tr} [kWh]	%Q _{H,tr} [%]	Q _{H,r} [kWh]	%Q _{H,r} [%]	Q _{sol,k} [kWh]	%Q _{sol,k} [%]	Q _{H,tr} + Q _{H,r} - Q _{sol,k} [kWh]
M2	Copia di Parete esterna in tufo - 55 cm - U	0,848	18,81	13	16,8	-	-	-	-	-
M100	Parete esterna in tufo - 55 cm - T	0,893	12,54	8	10,9	1	100	1	100	8
M201	Parete interna - 10 cm - U	2,36	16,44	31	40,9	-	-	-	-	-
M203	Parete interna in tufo - 40 cm - U	1,076	14,34	12	16,3	-	-	-	-	-
P1	Pavimento su terreno - G	0,588	18,53	8	10,6	-	-	-	-	-
S2	Soletta interpiano - U	1,756	6,22	3	4,6	-	-	-	-	-
Totali				75	100,1	1	100	1	100	8

4.7.2 Periodo di monitoraggio *post operam*

La temperatura esterna media per le simulazioni svolte durante il periodo di monitoraggio del *post operam* in zona climatica C è di 4,6°C e l'irradianza solare diretta sul piano orizzontale è di 39,3 W/m² (Figura 32; Tabella 123).

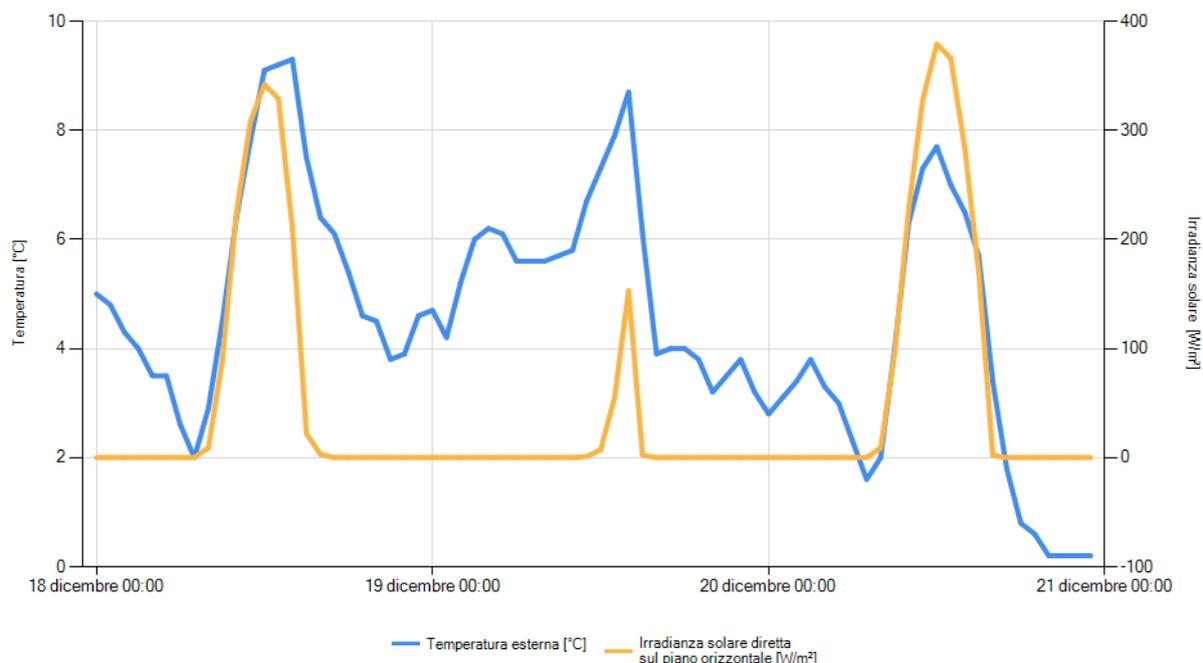


Figura 32 Grafico della Temperatura esterna e dell'Irradianza solare diretta sul piano orizzontale - Zona C – 18-20 dicembre (post-operam)

Tabella 123 Dati climatici del periodo di monitoraggio post operam simulato

MM	GG	HH	TEMP	RDIR	RDIF	UREL	PVAP	VELV
12	18	0	5	0	0	99	864,5	0,9
12	18	1	4,8	0	0	99	852,5	1,3
12	18	2	4,3	0	0	99	823,2	1,4
12	18	3	4	0	0	99	806	1,5
12	18	4	3,5	0	0	99	778,1	1,4
12	18	5	3,5	0	0	98	770,2	1,2
12	18	6	2,6	0	0	99	730	1,6
12	18	7	2	0	1,5	98	692,5	1,2
12	18	8	2,9	8,8	58,1	82	617,7	1,6
12	18	9	4,5	88,9	112,8	71	598,7	1,8
12	18	10	6,4	224,3	106,3	59	567,7	2,8
12	18	11	7,8	308,1	97,4	52	550,8	2,2
12	18	12	9,1	342,4	85,4	46	532,1	1,9
12	18	13	9,2	329,4	68,6	35	407,6	2,5
12	18	14	9,3	209,8	75	33	387	2,3
12	18	15	7,5	21,9	80,9	37	384	1,3
12	18	16	6,4	3,4	10,7	38	365,6	1
12	18	17	6,1	0	0	40	377	0,7

12	18	18	5,4	0	0	44	395	0,9
12	18	19	4,6	0	0	49	416,1	1,8
12	18	20	4,5	0	0	52	438,4	1,9
12	18	21	3,8	0	0	67	537,8	1,9
12	18	22	3,9	0	0	77	622,5	1,5
12	18	23	4,6	0	0	78	662,3	2
12	19	0	4,7	0	0	83	709,7	2,8
12	19	1	4,2	0	0	99	817,5	2,5
12	19	2	5,2	0	0	99	876,6	3,1
12	19	3	6	0	0	99	926,6	0,7
12	19	4	6,2	0	0	99	939,5	1,7
12	19	5	6,1	0	0	99	933,1	0,8
12	19	6	5,6	0	0	99	901,3	0,7
12	19	7	5,6	0	0	99	901,3	0,5
12	19	8	5,6	0	4,8	98	892,2	0,7
12	19	9	5,7	0,1	14,8	78	715	0,9
12	19	10	5,8	0,3	25,6	74	683,1	0,6
12	19	11	6,7	1,2	63,7	60	589,4	1,1
12	19	12	7,3	6,9	131,1	50	511,8	2,3
12	19	13	7,9	54,7	177	46	490,6	2,7
12	19	14	8,7	152,8	102,2	47	529,2	2,6
12	19	15	6,1	1,7	46,1	59	556,1	4
12	19	16	3,9	0,1	3,3	76	614,4	2,1
12	19	17	4	0	0	77	626,9	1,2
12	19	18	4	0	0	74	602,5	0,6
12	19	19	3,8	0	0	75	602	1
12	19	20	3,2	0	0	83	638,6	0,6
12	19	21	3,5	0	0	80	628,8	0,8
12	19	22	3,8	0	0	70	562	0,9
12	19	23	3,2	0	0	71	546,3	1,5
12	20	0	2,8	0	0	73	546,1	1
12	20	1	3,1	0	0	68	519,5	0,7
12	20	2	3,4	0	0	63	491,7	1,4
12	20	3	3,8	0	0	59	473,6	1,4
12	20	4	3,3	0	0	64	495,9	0,6
12	20	5	3	0	0	67	508,3	0,9
12	20	6	2,3	0	0	74	534,1	1,2
12	20	7	1,6	0	0,8	75	515	0,9
12	20	8	2	9,1	58,2	72	508,7	1,2
12	20	9	4	94,9	110,3	58	472,3	1,7
12	20	10	6,3	228,4	104,1	49	468,2	2
12	20	11	7,3	327,7	88,1	41	419,7	2,3
12	20	12	7,7	379,1	69,2	34	357,7	3,2
12	20	13	7	366,5	53,1	38	381	3

12	20	14	6,5	283,9	42,1	38	368,1	3,1
12	20	15	5,7	169,6	23,8	35	320,9	2,9
12	20	16	3,4	2	10,1	40	312,1	2,2
12	20	17	1,8	0	0	45	313,4	1,9
12	20	18	0,8	0	0	48	311,2	1,4
12	20	19	0,6	0	0	47	300,3	2,2
12	20	20	0,2	0	0	50	310,3	2,4
12	20	21	0,2	0	0	53	329,3	1
12	20	22	0,2	0	0	56	348,3	0,7
12	20	23	0,2	0	0	56	348,7	1,1

È stata valutata la potenza dispersa per trasmissione Φ_{tr} del locale soggiorno collocato al piano terra esposto a nord-est, dove è stato svolto il monitoraggio in ambiente reale, per l'analisi della parete perimetrale in tufo da 55 cm, sulla quale è stato posato il componente isolante a cappotto SC.01, con orientamento Nord (Tabella 124; Tabella 125).

Tabella 124 Dispersioni simulate del locale soggiorno – periodo monitoraggio post operam - zona climatica C

Dispersioni Ante Operam		
Locale Soggiorno	Φ_{tr} [W]	

Sono state valutate le dispersioni per trasmissione relative all'energia invernale, dei componenti opachi e, in particolare, si sottolinea quello oggetto dei successivi monitoraggi in loco, ossia la parete esterna in tufo da 55 cm, con l'applicazione del sistema di isolamento a cappotto SC.01 (Tabella 125).

Nell'ultima colonna della Tabella 125 sono stati riportati i dati relativi all'energia dispersa, ottenuti dalla somma tra le dispersioni per trasmissione e per extraflusso, meno gli apporti solari attraverso il componente.

Tabella 125 Dispersioni attraverso strutture opache ordinate per componente – periodo monitoraggio post operam – zona climatica C

Cod	Descrizione elemento	U [W/m ² K]	Sup. [m ²]	Q _{H,tr} [kWh]	% Q _{H,tr} [%]	Q _{H,r} [kWh]	% Q _{H,r} [%]	Q _{Sol,k} [kWh]	% Q _{Sol,k} [%]	Q _{H,tr} + Q _{H,r} - Q _{Sol,k} [kWh]
M1	Copia di Parete esterna in tufo - 55 cm - U	0,848	17,56	12	14,8	-	-	-	-	-
M100	Parete esterna in tufo - 55 cm + SC.01 - T	0,212	12,72	2	2,5	0	100	0	100	2
M105	Parete esterna in tufo - 55 cm - U	0,848	2,51	2	2,1	-	-	-	-	-
M201	Parete interna - 10 cm - U	2,36	17,18	33	40,4	-	-	-	-	-
M203	Parete interna in tufo - 40 cm - U	1,076	15,25	14	16,3	-	-	-	-	-
P1	Pavimento su terreno - G	0,565	19,64	8	10,2	-	-	-	-	-
Totali				71	86,3	0	100	0	100	2

Dalle simulazioni svolte è emersa una riduzione dell'energia dispersa per trasmissione Q_{H,tr} del 75%, passando da 8 kWh a 2 kWh attraverso l'applicazione del sistema di isolamento a cappotto SC.01.

5 Monitoraggio delle prestazioni sull'edificio-dimostratore

All'inizio dell'attuale annualità della Ricerca, si era scelto di installare sull'edificio dimostratore entrambe le soluzioni di isolamento selezionate nel corso della precedente annualità, ossia il sistema a cappotto (SC.01) e la parete ventilata (PV.02), ambedue con materiale isolante in lana di roccia.

Per farlo sarebbero state installate sulle pareti dell'edificio al piano terra esposte a sud-est (facciata ventilata) e a nord-est (isolamento a cappotto) (Figura 33).

Le difficoltà emerse nel corso della Ricerca per il reperimento dei materiali e delle attrezzature, causate dallo scarseggiare delle materie prime per l'emergenza COVID-19 e per la forte accelerazione del ricorso al Superbonus edilizio, hanno obbligato a cambiare scelte.

La campagna di monitoraggio delle prestazioni in situ ha riguardato quindi la posa in opera e il monitoraggio di una sola tipologia di sistema di isolamento, ossia il sistema a cappotto (SC.01) con materiale isolante in lana di roccia, applicato su una tipologia di parete in muratura portante in tufo del dimostratore con esposizione maggiormente critica in riferimento al periodo di riscaldamento.

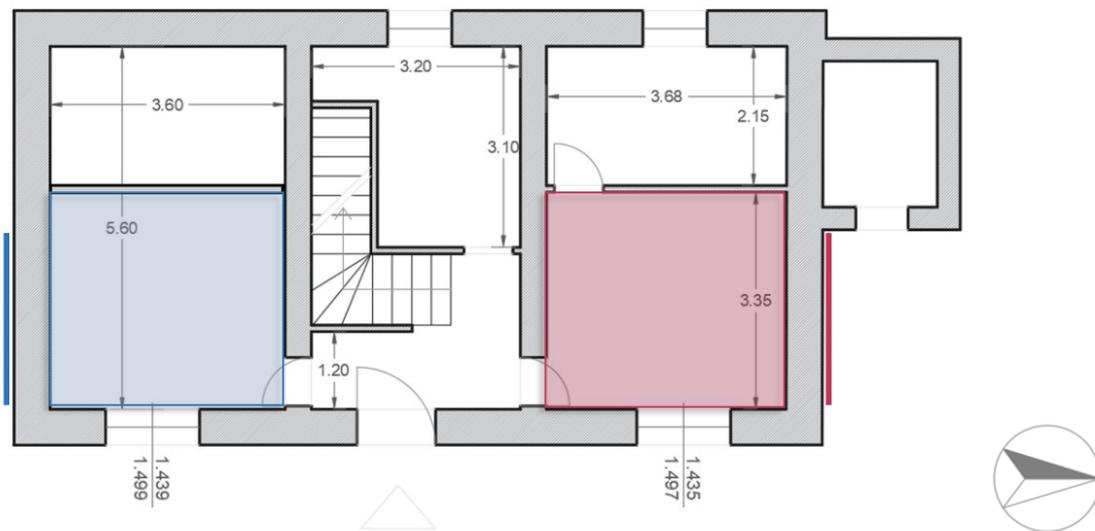


Figura 33 Individuazione degli interventi di isolamento ipotizzati: in azzurro la parete ventilata e in rosso l'isolamento a cappotto

Per verificare le prestazioni energetiche della chiusura verticale ante e post-intervento di efficientamento sono state svolte misurazioni in loco nel rispetto della norma UNI ISO 9869-1:2015 "Elementi per l'edilizia – Misurazione in situ della resistenza termica e della trasmittanza termica – Parte 1: Metodo del termoflussimetro".

La norma descrive il metodo del termoflussimetro per la misurazione delle proprietà di trasmissione termica delle componenti piane degli edifici costituite principalmente da strati opachi perpendicolari al flusso di calore e non sottoposti a flussi di calore laterali.

Le proprietà che possono essere misurate sono:

- a) la resistenza termica R e la conduttanza termica λ tra superfici;
- b) la resistenza termica totale R_T e trasmittanza termica U tra ambienti, se sono definite le relative temperature.

È stata utilizzata la termoflussimetria come unica analisi di tipo non distruttivo che ha consentito di misurare in opera il valore di trasmittanza termica in maniera quantitativa, ovvero il grado di isolamento termico del componente opaco del dimostratore oggetto di indagine.

Dal momento che il rilevamento attraverso il termoflussimetro si può effettuare solo quando vi è un certo gradiente di temperatura (ΔT) tra i due lati della parete o della struttura in genere (circa ed almeno $8^\circ\text{C} \approx 10^\circ\text{C}$), il monitoraggio è stato effettuato durante la stagione invernale garantendo all'esterno temperature

sufficientemente basse ed all'interno decisamente più alte ($T_{setpoint}=20^{\circ}\text{C}$) per la presenza del riscaldamento in funzione: il flusso di calore si dirige verso l'esterno. Per minimizzare gli effetti di disturbo sono state evitate le misurazioni su pareti direttamente esposte all'irraggiamento solare poiché ciò avrebbe perturbato l'acquisizione di dati creando difficoltà interpretative delle curve di registrazione che avrebbero subito picchi anomali nelle fasce orarie in cui la radiazione solare incide maggiormente sull'involucro esterno. [21]

Per poter definire correttamente il flusso termico che attraversa l'involucro edilizio il termoflussimetro è stato posizionato su una porzione di parete equidistante da altri elementi costruttivi (come finestre, porte, pilastri, travi, nodi d'angolo, aggetti, etc.) e dunque più rappresentativa dell'intera parete che si desidera caratterizzare.

La rilevazione è stata eseguita evitando influenza di ponti termici e le loro zone di influenza (definibili tramite una perizia termografica ad infrarossi preliminare al rilievo termoflussimetrico).

Come stabilito dalla norma ISO la misurazione è stata effettuata per 3 giorni (72 ore) consecutivi.

La procedura per la misurazione ha previsto:

- L'applicazione della piastra termoflussimetrica e dei sensori di temperatura superficiale sul lato interno all'ambiente riscaldato (nodo di misura 1);
- L'applicazione dei sensori di temperatura superficiale sul lato esterno all'ambiente riscaldato per misurare il flusso termico uscente (nodo di misura 2);
- Collegamento dei nodi al data logger per la registrazione dei dati

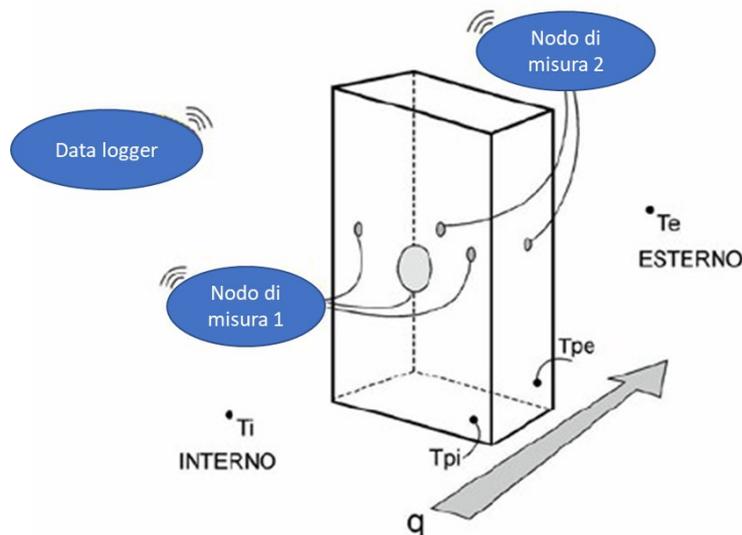


Figura 34 Schema dei componenti del termoflussimetro

Il metodo del termoflussimetro è anche adatto per componenti costituite da strati quasi omogenei perpendicolari al flusso di calore, a condizione che le dimensioni di qualsiasi disomogeneità in prossimità del termoflussimetro (HFM) sia molto più piccola rispetto alle relative dimensioni laterali e non ci siano ponti termici individuabili attraverso l'utilizzo di termografia a raggi infrarossi.

La norma descrive l'apparecchiatura da utilizzare, la relativa procedura di calibrazione, l'installazione e le procedure di misurazione, l'analisi dei dati, includendo la correzione degli errori sistematici e il formato di presentazione.

I dati sono stati trattati secondo il metodo delle medie progressive applicando la seguente relazione:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{air-int} - T_{air-ext})_j}$$

In cui qj è il flusso termico specifico, mentre $T_{air-int}$ e $T_{air-ext}$ sono rispettivamente la temperatura dell'aria interna ed esterna all'edificio analizzato.

La prova è stata condotta sulla parete esposta a nord prima e dopo l'applicazione del sistema di isolamento. Per quanto attiene alla composizione e spessore degli strati della parete nonché della struttura termoisolante a controparete esterna, si rimanda a quanto dettagliatamente descritto nei paragrafi 2 e 4.

5.1 Strumentazioni utilizzate

Al fine di quantificare i comportamenti termici dell'unità ambientale dell'abitazione, sono state misurate le temperature superficiali della parete esposta a Nord, le temperature dell'aria interna ed esterna e i flussi termici scambiati attraverso la parete stessa, sia prima che dopo l'intervento di isolamento termico dell'edificio.

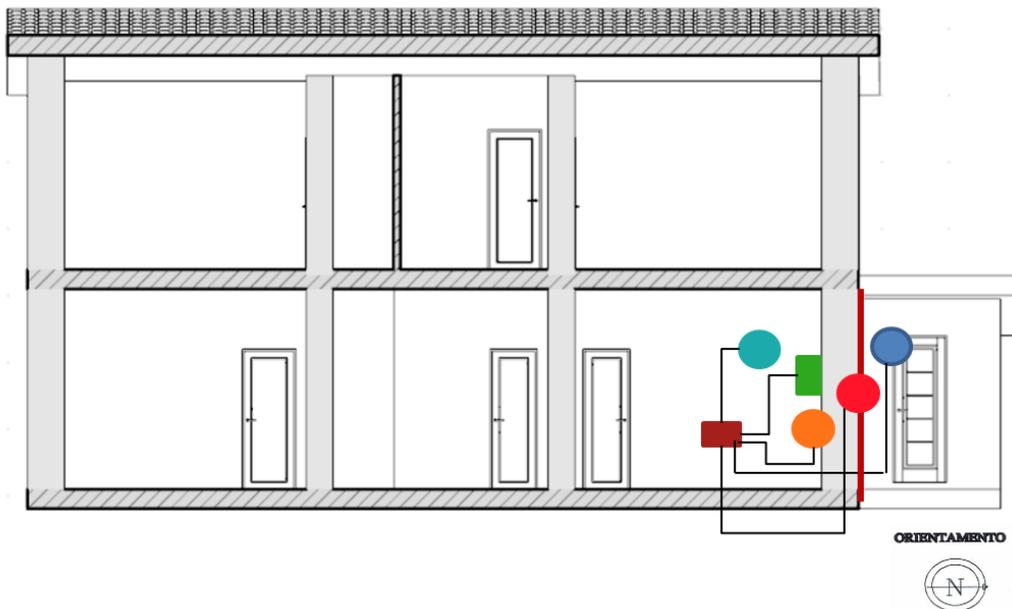
All'interno dell'unità ambientale scelta, sul lato interno della parete sono stati installati una piastra di misura per il flusso termico e un sensore di temperatura superficiale; sul lato esterno della parete è stato invece installato un sensore di temperatura superficiale. Inoltre, sono state misurate le temperature dell'aria interna ed esterna alle strutture.

Tutti i sensori sono stati connessi a un data-logger per la registrazione dati.

La rappresentazione schematica dell'installazione dei sensori è riportata di seguito (Figura 35).

Per la misura in situ è stato impiegato un termoflussimetro a piastra con sonda di temperatura interna aria, sonda di temperatura di superficie integrata nella piastra calda e sonda di temperatura esterna aria, di marca AHLBORN modello ALMEMO 2590 -4S (Figura 36).

Per il monitoraggio delle condizioni ambientali interne è stata utilizzata una centralina microclimatica BABUC dotata di sonde specifiche quali globotermometro per la misurazione della temperatura media radiante, psicrometro e sonda per la misurazione della velocità dell'aria (Figura 37).



- Temperatura dell'aria esterna
- Temperatura dell'aria interna
- Temperatura superficiale esterna
- Temperatura superficiale interna
- Sensore di flusso termico
- Data-logger

Figura 35 Immagine illustrativa della strumentazione applicata nell'unità ambientale dell'edificio coibentata



Figura 36 Termoflussimetro modello ALMEMO 2590 - 4S



Figura 37 Centralina microclimatica BABUC

5.2 Misurazione delle caratteristiche termo-igrometriche e monitoraggio parametri indoor ante operam

La misurazione della trasmittanza della parete è stata effettuata sia prima dell'applicazione dell'isolamento esterno, sia dopo la sua applicazione. La strumentazione di cui sopra è stata installata in una stanza al piano terra della casa cantoniera esposta a nord-est, sgombra da persone e mantenuta a temperatura pressoché costante senza perturbazioni di sorta (accensioni di luci, apertura e chiusura di infissi e porte, accessi di persone ecc.). Per garantire la temperatura interna prevista da normativa vigente (setpoint 20°C) è stata impiegata una stufa elettrica.

La piastra termoflussimetrica e la sonda di temperatura superficiale interna sono state installate sulla parete esposta a nord lontano da ponti termici con l'ausilio di nastro. La sonda di temperatura esterna è stata posizionata in corrispondenza della piastra termoflussimetrica collocata all'interno.

Il data-logger ha provveduto a registrare in automatico le misure istantanee di trasmittanza ogni dieci minuti per tutta la durata della prova sia prima che dopo l'applicazione del sistema di isolamento a cappotto. La durata della prova è stata estesa ad oltre 72 ore. I dati raccolti sono stati successivamente processati al PC per scartare le misure affette da errori dovuti ad esempio di improvvisi sbalzi di temperature e per ottenere il valore di trasmittanza termica.

5.2.1 Misurazioni sulla parete esposta a nord

L'analisi è stata effettuata dal giorno 11/12/2021 al giorno 13/12/2021, a partire dalle ore 00.00, al piano terra piano della struttura oggetto d'intervento nella stanza, sulla parete esposta a Nord (Figura 38). Relativamente alle condizioni ambientali si sottolinea che la temperatura esterna media giornaliera era di circa 7,5°C, oscillando tra i 2 e i 13°C, l'umidità relativa media era pari al 65% e il cielo si presentava sereno con un vento medio di 25 km/h. La misurazione è stata portata avanti per 72 ore come da disposizioni da normativa ISO 9869 con acquisizione ogni 10 minuti e i dati raccolti sono stati elaborati col metodo delle medie progressive.

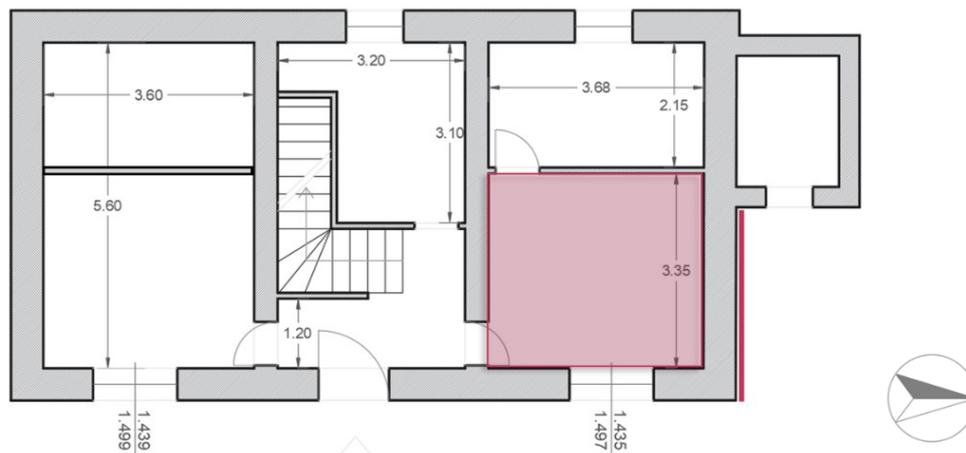


Figura 38 Parete esposta a nord oggetto di misurazione



Figura 39 Installazione della piastra termoflussimetrica e del sensore di temperatura sul lato interno della parete esposta a nord

5.3 Analisi termoflussimetrica ante operam

Scartando i valori del transitorio iniziale (assestamento del flusso) ed i picchi in corrispondenza degli sbalzi di temperatura esterna, si selezionano i seguenti 141 valori di U, T_e e T_i registrati, sulla scorta dei quali si ottiene il valore medio di trasmittanza ante operam U 0,91 W/m²K. Tale valore differisce da quello individuato tramite software certificato del 4,6%.

PARETE ANTE INTERVENTO DI EFFICIENTAMENTO	
Trasmittanza metodo analitico	U 0,87 W/m ² K
Trasmittanza da termoflussimetro	U 0,91 W/m ² K

Si riporta in forma tabellare la misurazione effettuata con il termoflussimetro e i relativi valori della trasmittanza al variare della temperatura superficiale interna ed esterna della chiusura verticale opaca.

Tabella 126 Analisi Termoflussimetrica - ante operam dal 11/12/2021 al 13/12/2021

Data	Ora	T _{int}	T _{est}	U (W/m ² K)
11/12/2021	0,00	20,3	4	0,935
	0,30	20,5	3,2	0,927
	1,00	19,5	2,2	0,883
	1,30	20,6	2	0,906
	2,00	20,2	2	0,901
	2,30	20,6	2,2	0,873
	3,00	20,2	2,2	0,874
	3,30	20,4	2	0,901
	4,00	20,6	2,7	0,886
	4,30	19,5	4	0,888
	5,00	19,3	5,2	0,912
	5,30	19,3	5,5	0,911
	6,00	20,3	6	0,905
	6,30	20,4	6,2	0,887
	7,30	20,2	7,1	0,939
	8,00	19,6	7,7	0,918
	8,30	19,8	7,6	0,888
	9,00	19,4	8	0,873
	9,30	20	8,3	0,871
	10,00	19,4	8,9	0,947
	10,30	18,4	9,8	0,906
	11,00	19	10,6	0,896
	11,30	19,2	10,9	0,932
	12,00	19,5	10,7	0,878
	12,30	19,7	11	0,914
	13,00	19,8	11,2	0,918
	13,30	20,6	11,3	0,874
	14,00	19,3	11,5	0,884
14,30	20,7	11,2	0,899	
15,00	20,2	11,6	0,899	
15,30	20,3	11,7	0,926	

	16,00	19,5	11,9	0,924
	16,30	20,4	12,2	0,881
	17,00	20,3	12	0,939
	17,30	20,2	11,7	0,87
	18,00	20,4	11	0,882
	18,30	20,6	9,6	0,932
	19,00	19,8	9,2	0,902
	19,30	19,8	8,7	0,938
	20,00	19,9	8,2	0,932
	20,30	20,2	7,8	0,944
	21,00	19,5	7,4	0,884
	21,30	20,4	7	0,903
	22,00	20	5,9	0,875
	22,30	19,7	5	0,947
	23,00	20,7	4,6	0,947
	23,30	19,7	4,1	0,931
12/12/2021	0,00	20,5	3,7	0,924
	0,30	19,8	3,2	0,945
	1,00	19,8	2,7	0,87
	1,30	20,6	2,6	0,925
	2,00	19,5	2,4	0,903
	2,30	20,7	2,4	0,897
	3,00	19,5	2,2	0,943
	3,30	19,6	2	0,93
	4,00	19,4	2,7	0,921
	4,30	19,3	3,8	0,88
	5,00	19,4	4,9	0,873
	5,30	19,8	5,5	0,942
	6,00	20,1	5,9	0,911
	6,30	20,1	6,2	0,916
	7,30	20,5	7,1	0,95
	8,00	20,6	7,2	0,9
	8,30	20,3	7,6	0,882
	9,00	20,7	7,9	0,916
	9,30	20	8,3	0,941
	10,00	20,2	8,5	0,892
	10,30	20,6	8,9	0,902
	11,00	19,6	10,2	0,931
	11,30	20,7	10,6	0,918
	12,00	20,2	11,1	0,94
	12,30	20,4	11,6	0,881
	13,00	20,1	11,4	0,911
	13,30	20,3	12	0,936
	14,00	19,5	11,8	0,948
14,30	20,3	12,5	0,906	
15,00	20,4	12,7	0,932	

	15,30	19,5	13	0,911
	16,00	19,3	11,9	0,915
	16,30	19,8	11,6	0,949
	17,00	19,9	11	0,919
	17,30	20,5	11	0,9
	18,00	20,3	10,4	0,906
	18,30	19,5	9,2	0,87
	19,00	19,8	7,9	0,946
	19,30	19,6	7,8	0,925
	20,00	19,4	7	0,873
	20,30	20	7	0,912
	21,00	20,2	6,6	0,939
	21,30	20,2	6,2	0,918
	22,00	20,2	5,9	0,872
	22,30	19,7	5	0,882
	23,00	19,8	4,3	0,888
	23,30	19,4	4	0,905
13/12/2021	0,00	19,6	3,9	0,919
	0,30	20,6	3,3	0,889
	1,00	20,5	3,1	0,923
	1,30	20	2,9	0,926
	2,00	19,9	2,9	0,927
	2,30	20,1	2,9	0,885
	3,00	20,2	3,1	0,883
	3,30	20,6	3,3	0,923
	4,00	19,3	3,9	0,934
	4,30	20,6	4,2	0,886
	5,00	20,7	4,9	0,923
	5,30	20,6	5,5	0,891
	6,00	19,8	5,7	0,878
	6,30	20,6	6,2	0,938
	7,30	19,6	7,1	0,886
	8,00	19,6	7,6	0,908
	8,30	19,8	8,5	0,914
	9,00	19,9	8,9	0,94
	9,30	19,9	9,3	0,913
	10,00	20,6	9,5	0,871
	10,30	19,6	9,9	0,876
	11,00	20,2	11	0,934
	11,30	20,7	11,7	0,893
	12,00	19,8	12,2	0,898
	12,30	19,5	12,8	0,926
	13,00	20	12,7	0,889
	13,30	19,8	12,4	0,882
	14,00	20	12	0,893
14,30	20,7	12,8	0,876	

	15,00	20,3	13,2	0,91
	15,30	20,2	13	0,884
	16,00	19,3	13,1	0,9
	16,30	20	12,6	0,875
	17,00	19,8	12	0,876
	17,30	19,9	12,1	0,901
	18,00	19,3	11,6	0,883
	18,30	19,5	9,8	0,891
	19,00	19,7	8,9	0,908
	19,30	20,3	8,7	0,874
	20,00	19,4	8,2	0,893
	20,30	19,7	7	0,918
	21,00	19,4	6,9	0,89
	21,30	19,9	6,2	0,94
	22,00	19,7	5,9	0,908
	22,30	20,6	5,2	0,895
	23,00	19,8	4,6	0,888
	23,30	19,3	4,1	0,873

Di seguito i grafici con i flussi termici, le temperature dell'aria interna ed esterna e le temperature superficiali della chiusura verticale opaca dell'edificio oggetto di studio ante operam.

Le rilevazioni nei grafici sono riportate per un intervallo di tempo di 30 minuti (Figura 40 -41 -42 -43).

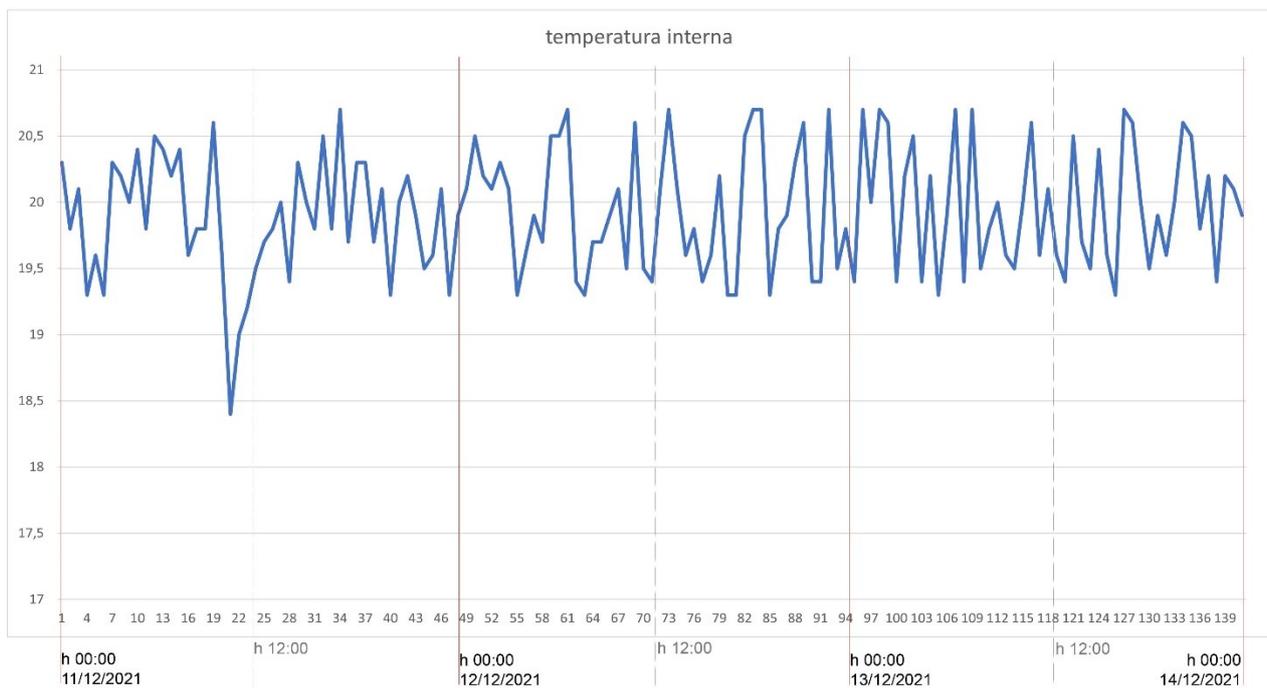


Figura 40 Diagramma T interna in funzione del tempo ante intervento

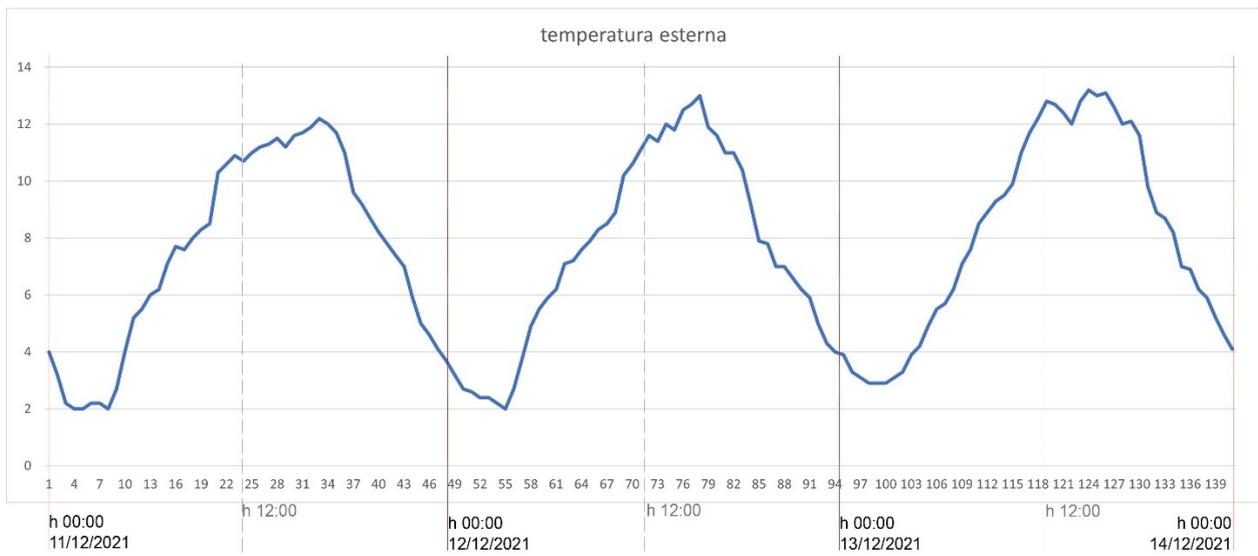


Figura 41 Diagramma T esterna in funzione del tempo ante intervento

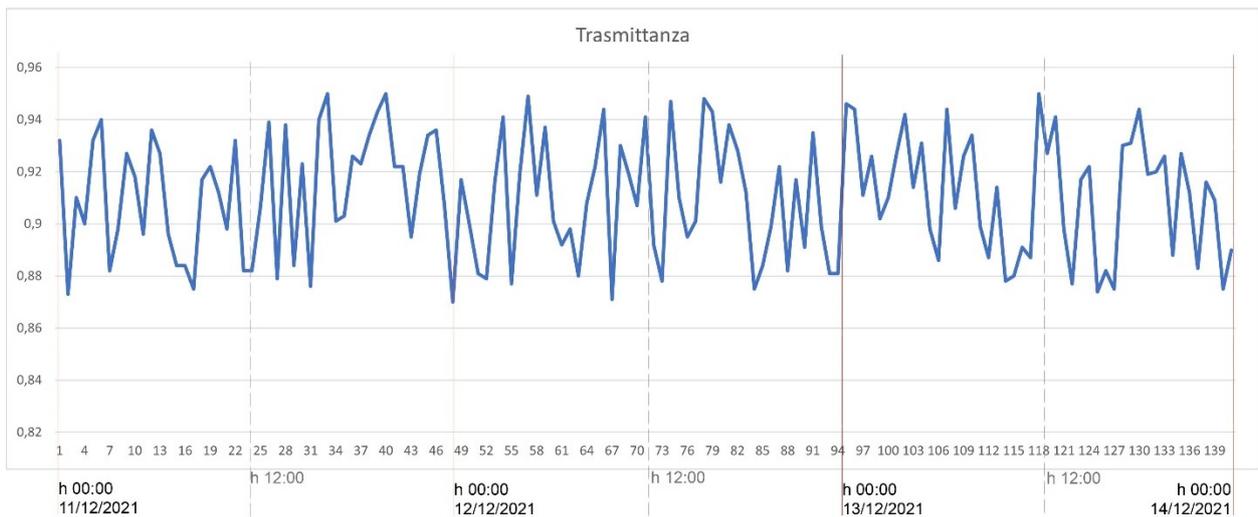


Figura 42 Diagramma U in funzione del tempo ante intervento

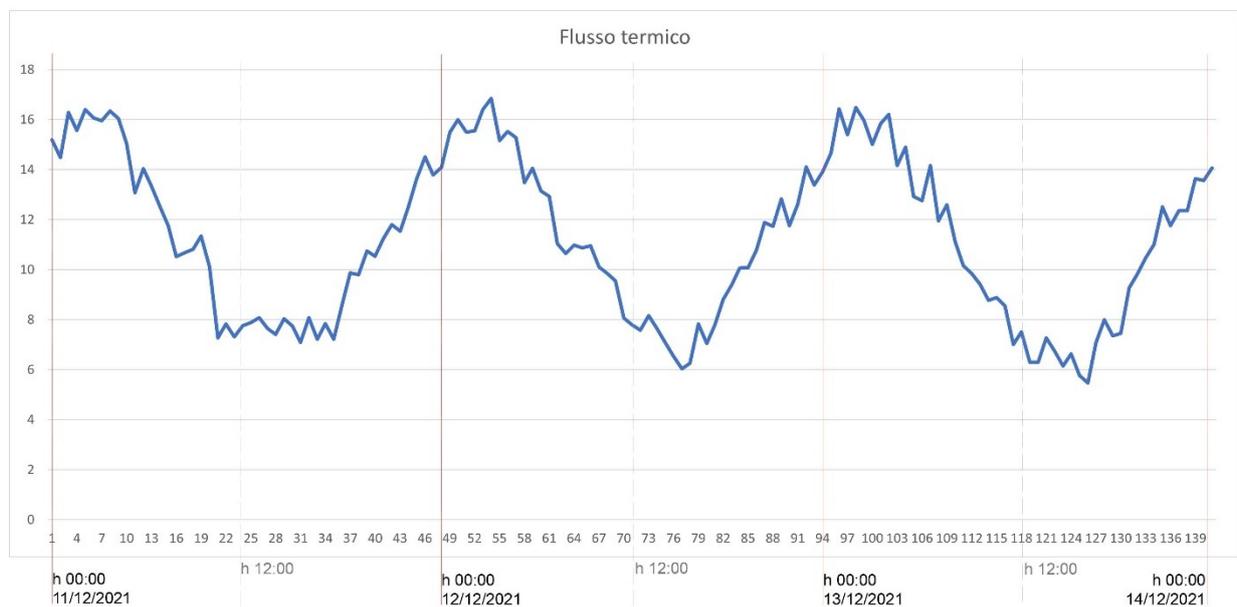


Figura 43 Diagramma del flusso termico Q in funzione del tempo ante intervento

6 Installazione del componente edilizio di isolamento

Lo schema seguente definisce il processo di installazione della soluzione di isolamento a cappotto.

Il processo è diviso in 4 fasi principali: installazione degli ancoraggi, installazione dei pannelli, installazione dei giunti e lavori di finitura.

Le soluzioni proposte possono essere “preassemblate” in stabilimento, progettate e realizzate a misura per rispondere a specifiche esigenze e permettere l’applicazione sulle strutture esistenti in ottica di edilizia off-site.

6.1 Procedure di assemblaggio del sistema a cappotto

Per la realizzazione del sistema a cappotto è stata impiegata una sottostruttura metallica in acciaio zincato dotata di apposite forometrie all’interno della quale è stato alloggiato il materiale coibente in lana di roccia da 12 cm. Sono stati realizzati due componenti edilizi per l’isolamento a cappotto: uno realizzato in opera (1,2 m di larghezza x 2 m di altezza) e uno prefabbricato (1,2 m di larghezza x 1 m di altezza) per verificare e confrontare i tempi di realizzazione e di posa.

La realizzazione del componente in opera ha previsto varie fasi:

- taglio dei montanti e traversi in alluminio (Figura 44);
- collegamento di montanti e traversi tramite giunzioni metalliche;
- fissaggio della struttura metallica alla chiusura verticale opaca tramite giunzioni metalliche (Figura 45);
- inserimento del pannello isolante in lana di roccia (Figura 46);
- applicazione del pannello in calcio silicato tramite giunzioni metalliche con interasse di circa 20 cm tra le viti (Figura 47 - Figura 49);
- rasatura dei giunti e tinteggiatura (Figura 51)

I tempi di posa del sistema a cappotto realizzato completamente in opera di 4,8 m² sono di circa 60 minuti.



Figura 44 Taglio della sottostruttura metallica



Figura 45 Applicazione della sottostruttura metallica in acciaio zincato alla chiusura verticale



Figura 46 Inserimento materiale isolante



Figura 47 Pannellatura realizzata con lastre in calcio-silicato



Figura 48 Accostamento dei componenti di isolamento



Figura 49 Applicazione delle lastre in calcio silicato



Figura 50 Stratigrafia del componente di isolamento



Figura 51 Componenti di isolamento rasati e tinteggiati

Il sistema di isolamento a cappotto è stato realizzato anche nel formato di dimensioni 1,2 m di larghezza x 1 m di altezza (Figura 52), in fabbrica riducendo le lavorazioni all'installazione sulla chiusura verticale opaca e all'applicazione del pannello in calcio silicato successivamente rasato e tinteggiato in opera.

Le dimensioni sono state studiate per rendere il componente facilmente manovrabile da 2 operai.

I tempi di posa in questo caso sono di circa 10-15 minuti. Per poter isolare 100 mq di chiusura verticale opaca attraverso l'impiego del componente prefabbricato proposto da 1,2 mq occorrono circa due giorni lavorativi.

Nel caso di impiego di mezzi meccanici di sollevamento è possibile prevedere il componente già dotato di pannello in calcio silicato così da ridurre ulteriormente le fasi di posa e le tempistiche in cantiere.

Il componente edilizio realizzato ha come strato di finitura un pannello in calcio silicato che è stato rasato e tinteggiato in opera per garantire una maggiore integrazione e rispetto delle tecniche costruttive tradizionali che contraddistinguono la maggior parte del patrimonio edilizio residenziale nazionale.

Per ridurre ulteriormente i tempi di posa e rendere il sistema proposto completamente prefabbricato, è possibile sostituire il pannello in calcio silicato con un sistema di pannellatura realizzato con materiali diversi come lignei, lapidei, plastici o metallici, da scegliere in base al contesto in cui si realizzerà l'intervento di efficientamento dell'involucro opaco.



Figura 52 Componente di isolamento prefabbricato

La soluzione di efficientamento proposta è contraddistinta da elevate prestazioni che consentono un'applicazione sulla maggior parte del patrimonio edilizio residenziale nazionale, ottimizzando non solo il processo di scelta del progettista, ma anche il processo produttivo dei sistemi di isolamento e le fasi di cantiere, garantendo una riduzione sia dei costi di produzione sia di quelli legati alla fase realizzativa (come ad esempio l'affitto del ponteggio, la manodopera o l'occupazione del suolo pubblico), senza tralasciare gli importanti vantaggi in termini di riduzione degli impatti ambientali e dei disturbi degli utenti correlati alla fase di riqualificazione.

Le soluzioni proposte basate sui principi dell'edilizia off-site consentono infatti di risolvere uno dei principali motivi che molto spesso ostacola un intervento di efficientamento energetico dell'involucro opaco di un immobile, ovvero la riluttanza dei proprietari a lasciare l'edificio durante i lavori.

I principali vantaggi dell'avvio di una produzione *off-site* sono una maggiore efficienza e affidabilità del prodotto, una migliore qualità, maggiori benefici sociali e ambientali legati a una riduzione degli impatti correlati ai tempi di cantiere, della produzione dei rifiuti grazie a una maggiore possibilità di riciclaggio ottenuta con un assemblaggio realizzato quasi completamente a secco tramite giunzioni metalliche.

Questa tecnologia permette di realizzare componenti edilizi in un ambiente chiuso e controllato, su cui non influisce il clima esterno, nonché di ridurre i rischi connessi alle lavorazioni in cantiere con ricadute positive per la sicurezza sul lavoro.

Il controllo in maniera centralizzata e digitale di vari parametri, attraverso le tecnologie dell'industria 4.0, consentirà di ottenere un'ottimizzazione della filiera produttiva attraverso una riduzione dei tempi di realizzazione con un significativo abbattimento dei costi.

L'efficienza rappresenta pertanto l'elemento cardine dell'edilizia off-site garantendo l'ottimizzazione dell'intero processo edilizio del settore della riqualificazione energetica, in linea con gli attuali ambiziosi obiettivi di sostenibilità ambientale, con una particolare attenzione alla standardizzazione, alla modularità, all'analisi dei costi e delle prestazioni durante l'intero ciclo di vita dell'edificio.

In termini economici secondo vari studi l'edilizia off-site permette una riduzione dei costi fino al 25% rispetto all'edilizia tradizionale, grazie anche alla riduzione di imprevisti e dei relativi extra-costi.

6.2 Misurazione delle caratteristiche termo-igrometriche e monitoraggio parametri indoor post operam

6.2.1 Misurazioni sulla parete esposta a nord con sistema a cappotto

L'analisi *post operam* è stata effettuata dal giorno 18/12/2021 al giorno 20/12/2021, a partire dalle ore 00:00 sempre al piano terra dell'edificio oggetto d'intervento nella medesima stanza e posizione, sulla parete esposta a Nord.

Relativamente alle condizioni ambientali si sottolinea che la temperatura esterna media giornaliera era di circa 10°C, oscillando tra i 5 e i 14°C, l'umidità relativa media era pari al 75% e il cielo si presentava sereno con un vento medio di 13 km/h. La misurazione è stata portata avanti per 72 ore come da disposizioni da normativa ISO 9869 con acquisizione ogni 10 minuti e i dati raccolti sono stati elaborati col metodo delle medie progressive.

6.3 Analisi termoflussimetrica post operam

Scartando i valori del transitorio iniziale (assestamento del flusso) ed i picchi in corrispondenza degli sbalzi di temperatura esterna, si selezionano i seguenti 141 valori di U, Te e Ti registrati, sulla scorta dei quali si ottiene il valore medio di trasmittanza post operam U 0,2144 W/m²K. Tale valore differisce da quello individuato tramite software certificato del 5,8%.

PARETE POST INTERVENTO DI EFFICIENTAMENTO	
Trasmittanza metodo analitico	U 0,2026 W/m ² K
Trasmittanza da termoflussimetro	U 0,2144 W/m ² K

Si riporta in forma tabellare la misurazione effettuata con il termoflussimetro e i relativi valori della trasmittanza al variare della temperatura superficiale interna ed esterna della chiusura verticale opaca.

Tabella 127 Analisi Termoflussimetrica - Post Intervento dal 18/12/2021 al 20/12/2021

Data	Ora	T int	T est	U (W/m ² K)
18/12/2021	0,00	19,9	5	0,226
	0,30	20,5	5	0,217
	1,00	20,5	5,2	0,206
	1,30	19,6	5,3	0,222
	2,00	19,9	5,5	0,226
	2,30	19,8	5,5	0,212
	3,00	19,6	5,3	0,22
	3,30	19,8	6	0,219
	4,00	20,7	7,3	0,219
	4,30	20,4	8,5	0,226
	5,00	20,4	8,8	0,204
	5,30	20	9,3	0,214
	6,00	20,4	9,5	0,205
	6,30	20,7	10,4	0,21
	7,30	20,2	11	0,219
	8,00	19,8	10,9	0,216
	8,30	19,5	11,3	0,205
9,00	20,2	11,6	0,2	



	9,30	18,6	12	0,221
	10,00	19	12,1	0,226
	10,30	18,8	12,4	0,22
	11,00	19,2	12,7	0,209
	11,30	19,3	13	0,219
	12,00	19,5	12,8	0,212
	12,30	20,1	13,1	0,23
	13,00	19,8	13,3	0,215
	13,30	20,1	13,4	0,216
	14,00	20,1	13,6	0,228
	14,30	20,6	13,3	0,221
	15,00	20,4	13,7	0,216
	15,30	19,6	13,8	0,204
	16,00	20,7	14	0,215
	16,30	20,4	14,3	0,2
	17,00	19,3	14,1	0,226
	17,30	20,1	13,8	0,222
	18,00	19,8	13,1	0,201
	18,30	20	11,7	0,201
	19,00	20,3	11,3	0,211
	19,30	19,7	10,8	0,218
	20,00	20,4	10,3	0,225
	20,30	19,5	9,9	0,202
	21,00	19,4	9,5	0,227
	21,30	20,6	9,1	0,222
	22,00	19,6	8	0,219
	22,30	20,4	7,1	0,229
	23,00	20	6,7	0,201
	23,30	19,6	6,2	0,203
19/12/2021	0,00	19,4	5,8	0,204
	0,30	19,8	5,3	0,23
	1,00	19,8	4,8	0,216
	1,30	20,3	4,7	0,217
	2,00	20,3	4,5	0,223
	2,30	19,4	4,5	0,221
	3,00	20,7	4,5	0,223
	3,30	19,5	4,6	0,209
	4,00	19,5	4,8	0,213
	4,30	19,7	5,9	0,211
	5,00	20,1	6,5	0,229
	5,30	19,7	7,1	0,205
	6,00	19,8	7,5	0,226
	6,30	20,2	7,8	0,215
	7,30	19,3	8,7	0,226
	8,00	19,6	8,8	0,202
8,30	19,3	9,2	0,213	

	9,00	19,6	9,5	0,201
	9,30	19,8	9,9	0,216
	10,00	20,5	10,1	0,208
	10,30	20,5	10,5	0,219
	11,00	20,7	11,8	0,202
	11,30	19,3	12,2	0,221
	12,00	19,4	12,7	0,223
	12,30	20	13,2	0,222
	13,00	20	13	0,219
	13,30	20	13,6	0,205
	14,00	20,6	13,4	0,219
	14,30	20,3	14,1	0,216
	15,00	19,6	14,3	0,208
	15,30	20,2	14,3	0,224
	16,00	20,2	13,5	0,213
	16,30	20,7	13,2	0,2
	17,00	19,5	12,6	0,224
	17,30	19,9	12,6	0,217
	18,00	19,6	12	0,225
	18,30	20,2	10,8	0,217
	19,00	19,3	9,5	0,217
	19,30	19,6	9,4	0,216
	20,00	20,7	8,6	0,227
	20,30	19,4	8,6	0,218
	21,00	20,3	8,2	0,222
	21,30	19,9	7,8	0,225
	22,00	20,2	7,5	0,228
	22,30	20,1	6,6	0,207
	23,00	20,6	5,9	0,219
	23,30	19,6	5,6	0,207
20/12/2021	0,00	19,3	5,2	0,219
	0,30	20,7	4,6	0,211
	1,00	19,8	4,4	0,208
	1,30	20	4,2	0,228
	2,00	20,6	4,2	0,22
	2,30	19,4	4,2	0,219
	3,00	20,2	4,4	0,222
	3,30	20	4,6	0,21
	4,00	20,1	5,2	0,206
	4,30	19,5	5,5	0,226
	5,00	20,2	6,2	0,2
	5,30	19,6	6,8	0,204
	6,00	20,3	7	0,213
	6,30	19,8	7,5	0,223
	7,30	19,3	8,4	0,214
	8,00	19,7	8,9	0,219

	8,30	20,1	9,8	0,207
	9,00	19,6	10,2	0,209
	9,30	19,5	10,6	0,206
	10,00	19,8	10,8	0,205
	10,30	20	11,2	0,212
	11,00	19,3	12,3	0,203
	11,30	19,5	13	0,203
	12,00	19,6	13,5	0,222
	12,30	19,4	14,1	0,21
	13,00	19,8	14	0,23
	13,30	20,2	13,7	0,207
	14,00	20,5	13,3	0,211
	14,30	20,2	14,1	0,207
	15,00	19,8	14,2	0,204
	15,30	19,8	14,3	0,228
	16,00	20,2	14	0,209
	16,30	20,4	13,9	0,213
	17,00	19,9	13,3	0,208
	17,30	20,7	13,4	0,221
	18,00	19,8	12,9	0,201
	18,30	19,9	11,1	0,209
	19,00	19,4	10,2	0,224
	19,30	20,2	10	0,202
	20,00	19,5	9,5	0,23
	20,30	20,4	8,3	0,204
	21,00	20,2	8,2	0,225
	21,30	19,9	7,5	0,202
	22,00	19,9	7,2	0,216
	22,30	20,7	6,5	0,211
	23,00	19,8	5,9	0,208
	23,30	19,6	5,4	0,22

Di seguito i grafici con i flussi termici, le temperature dell'aria interna ed esterna e le temperature superficiali della chiusura verticale opaca dell'edificio oggetto di studio post operam.

Le rilevazioni nei grafici sono riportate per un intervallo di tempo di 30 minuti (Figure 53-54-55-56)

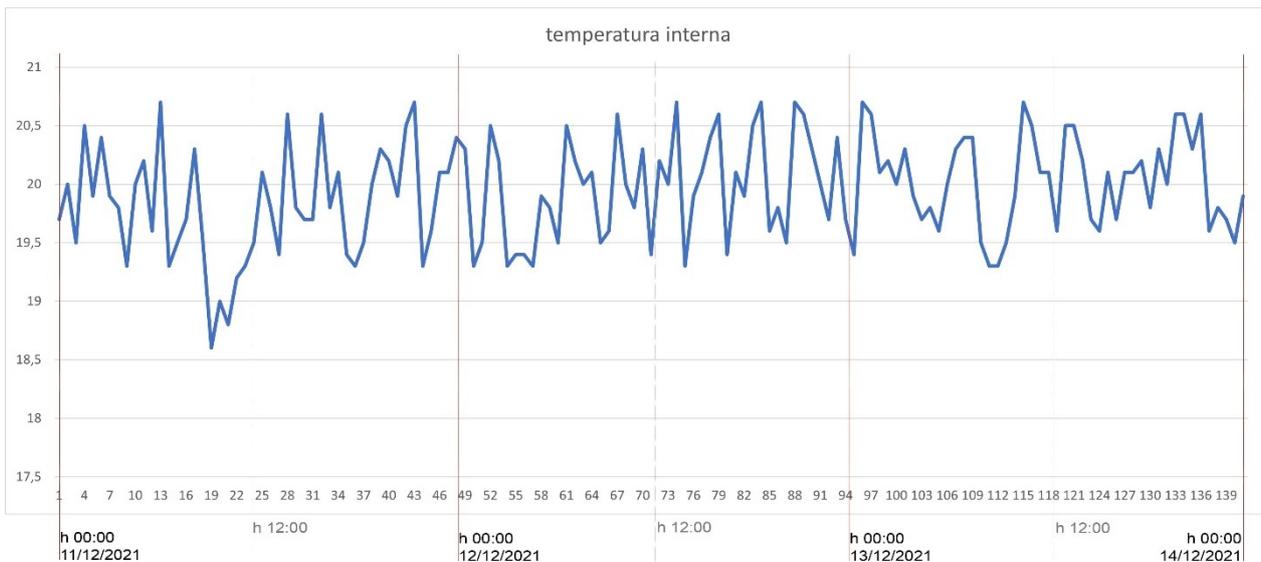


Figura 53 Diagramma T interna in funzione del tempo post-intervento

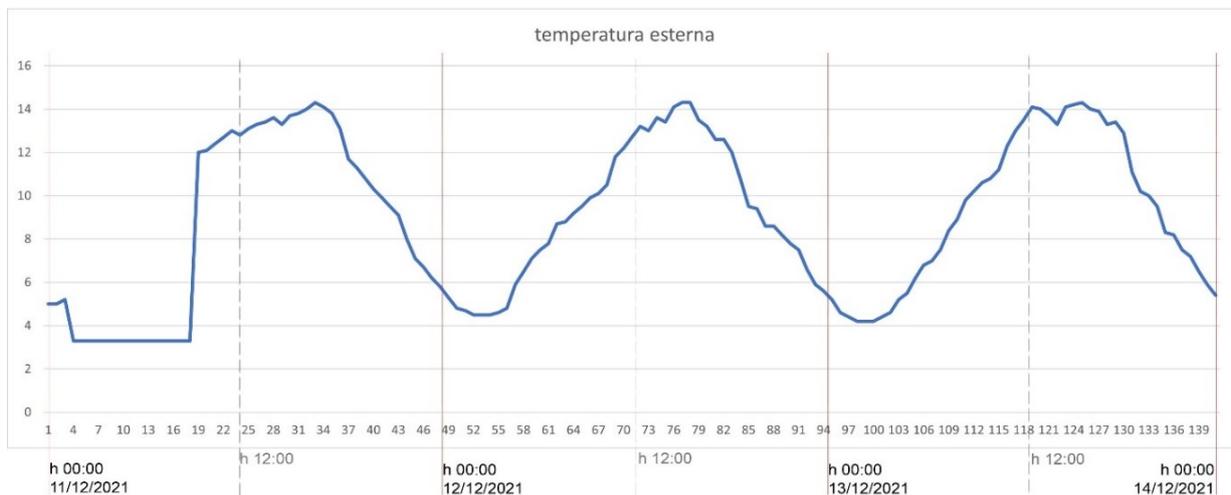


Figura 54 Diagramma T esterna in funzione del tempo post-intervento

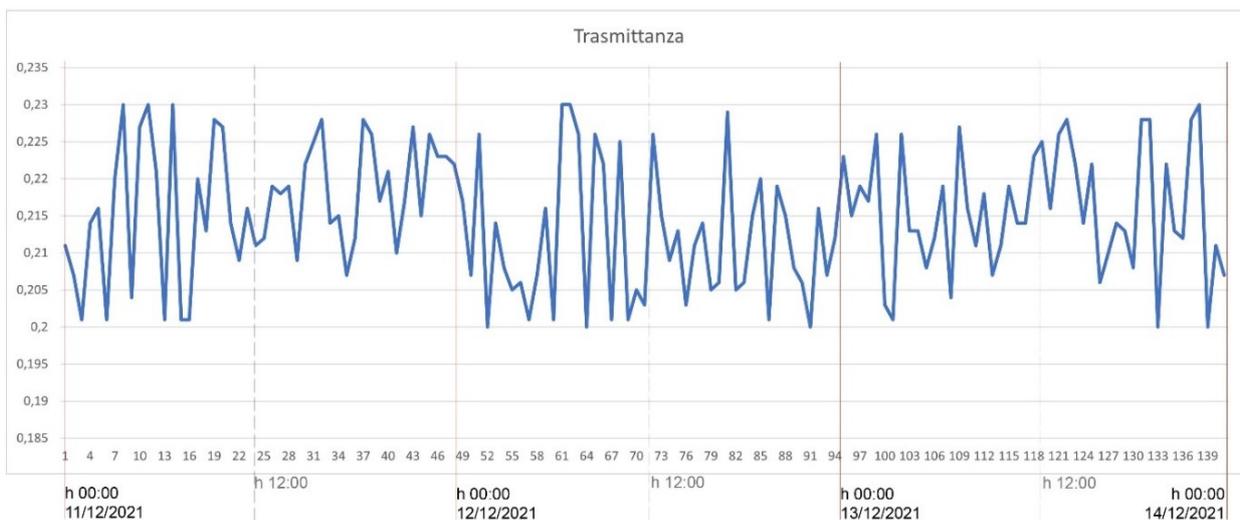


Figura 55 Diagramma U in funzione del tempo post-intervento

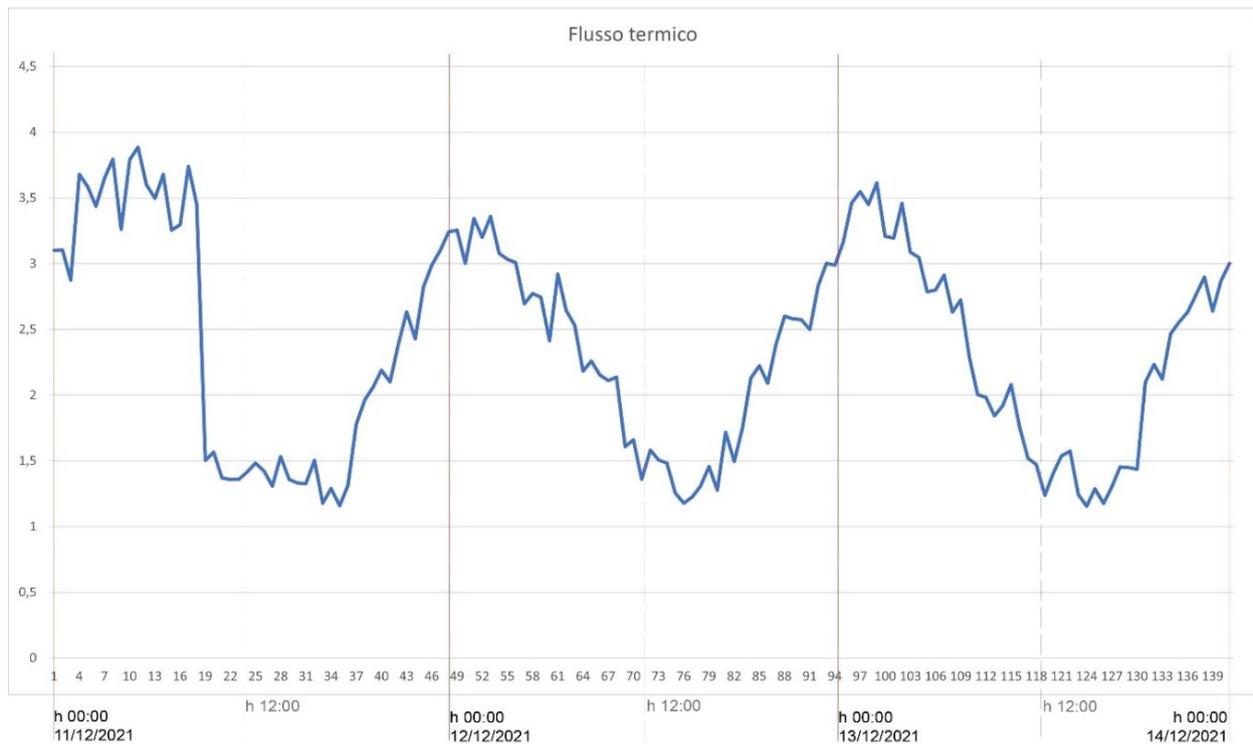


Figura 56 Diagramma del flusso termico Q in funzione del tempo post-intervento

Grazie all'intervento di isolamento termico realizzato il flusso termico specifico registrato durante il monitoraggio è passato da 11,83 a 2,27 W/m^2 ; di conseguenza il carico termico invernale dovuto alle dispersioni attraverso le pareti opache dell'intero dimostratore potrebbe potenzialmente ridursi di oltre l'80% passando da 2.084 a 379 W/m^2 .

L'energia dispersa per trasmissione ($Q_{H,tr}$) attraverso la parete perimetrale in tufo da 55 cm esposta a nord registrata in ambiente reale ante operam è di 0,85 kWh/m^2 ; attraverso l'applicazione del sistema di isolamento SC.01 l'energia dispersa per trasmissione si è ridotta dell'80% passando a 0,16 kWh/m^2 .

Tramite la simulazione effettuata con software certificato il valore $Q_{H,tr}$ ottenuto ante operam è di 0,64 kWh/m^2 , che si discosta dal valore misurato in ambiente reale di circa il 25%; nel post operam il valore simulato è di 0,16 kWh/m^2 mentre quello misurato è di 0,159 kWh/m^2 , ottenendo uno scostamento nullo.

7 Conclusioni

La Commissione europea attraverso la strategia Renovation Wave ["A Renovation Wave for Europe – Greening our buildings, creating jobs, improving lives" (COM(2020)662)] ha prefissato l'obiettivo di raddoppiare i tassi di ristrutturazione nei prossimi dieci anni per ridurre il consumo di energia e risorse negli edifici. Ciò permetterebbe di raggiungere un buon risultato in termini di sostenibilità ambientale, promuovendo al tempo stesso il rilancio economico ed occupazionale dell'intero settore delle costruzioni. L'applicazione dei principi di circolarità alla ristrutturazione degli edifici ridurrà ulteriormente le emissioni di gas serra legate ai materiali impiegati.

Minimizzare l'impronta ecologica degli edifici richiede efficienza delle risorse e circolarità combinate con la trasformazione del settore delle costruzioni, per esempio attraverso la promozione dell'impiego di materiali ecocompatibili, dei criteri di assemblaggio a secco, prefabbricazione e modularità.

Le più recenti Norme Comunitarie in materia di efficienza energetica e in particolare la direttiva europea 2018/844, fissa impegni ambiziosi per gli Stati membri. L'obiettivo principale è la riqualificazione energetica degli edifici e l'uso razionale dell'energia nell'intero corso del ciclo di vita dell'edificio e di ognuno dei suoi componenti, con lo scopo della decarbonizzazione del patrimonio immobiliare entro il 2050, con tappe intermedie nel 2030 e 2040.

Il settore dell'edilizia residenziale in particolare dovrà affrontare grandi sfide nei prossimi anni e decenni per far fronte a tali richieste promuovendo l'efficienza energetica tra gli obiettivi fondamentali della strategia per lo sviluppo sostenibile.

In questo contesto viene affrontata l'analisi dei processi (progettuali e produttivi) incentrati su sistemi e componenti del settore delle costruzioni puntando al paradigma dell'industria "smart" automatizzata e interconnessa che traguardi l'efficienza dei processi in serie nella specificità del prodotto edilizio. Lo sviluppo di questa tematica è stato affrontato in tre Linee di attività sequenziali articolate in altrettante annualità di ricerca (PTR 2019-2021). L'obiettivo della ricerca triennale si è basato sull'individuazione e promozione di soluzioni di efficientamento volte a indirizzare la domanda del mercato edilizio verso interventi di Deep Renovation degli immobili residenziali esistenti attraverso la valorizzazione dell'edilizia *off-site*.

L'edilizia *off-site* è tipica di processi edilizi caratterizzati dall'industrializzazione che sostituisce il più possibile fasi che nell'edilizia tradizionale vengono comunemente svolte in cantiere. Delocalizzando alcune lavorazioni in un luogo diverso da quello del manufatto definitivo, sul quale i componenti saranno montati in un secondo momento, è possibile ottimizzare i processi cantieristici, ridurre i costi e diminuire la presenza di manodopera in cantiere, con ricadute positive di tipo economico, di sicurezza sul lavoro e di riduzione dei tempi complessivi di realizzazione.

L'edilizia *off-site*, per rappresentare una strategia efficace, deve essere caratterizzata dalla realizzazione di sistemi standardizzati e modulari, tali da poter rendere l'intera filiera più efficiente, flessibile e compatibile con il maggior numero di interventi possibile, andando così a soddisfare sia i requisiti necessari in termini di prestazioni, sia le esigenze realizzative.

Una strategia che va ad influire positivamente sulla riduzione dell'impatto complessivo di un intervento di riqualificazione edilizia risiede inoltre nell'assemblaggio a secco: efficace sia per la riduzione dei tempi di posa, (annullando i tempi di attesa), sia per la promozione della transizione verso un'economia circolare, (riciclo di materiali e prodotti edilizi esistenti), contribuisce a ridurre al minimo i rifiuti al termine del ciclo di vita di un organismo edilizio.

L'attività di ricerca svolta dal C.I.T.E.R.A. all'interno di questo Progetto ha permesso di sviluppare soluzioni di efficientamento energetico di processi di produzione e di gestione dell'ambiente costruito basate su tali principi, per l'adempimento degli obiettivi europei di decarbonizzazione del patrimonio edilizio esistente. La terza annualità della ricerca si è concentrata sull'analisi dell'applicazione di sistemi di riqualificazione energetica delle pareti perimetrali esterne analizzati e proposti precedentemente che sono risultati essere quelli più largamente applicabili al patrimonio edilizio residenziale esistente sul territorio nazionale: un sistema di parete ventilata e un sistema a cappotto. Entrambi i sistemi scelti sono applicabili dall'esterno dell'edificio, con conseguenti benefici logistici, per la limitazione delle interferenze con gli abitanti durante la

messa in opera e per un miglior comportamento termo-igrometrico dovuto alla completa eliminazione dei ponti termici derivanti dalla discontinuità di materiale.

Le impreviste difficoltà riscontrate nel reperimento dei materiali e delle attrezzature dovute alla scarsa disponibilità di materie prime, imputabili in larga parte all'emergenza COVID-19 ed in parte alla forte accelerazione del ricorso al Superbonus edilizio, hanno limitato la messa in campo e il monitoraggio a una sola tipologia di sistema di isolamento applicata a un edificio-dimostratore.

La verifica e il monitoraggio dei requisiti delle prestazioni energetiche dei moduli prefabbricati selezionati tra quelli individuati durante la seconda annualità di ricerca, una volta accoppiati/messi in opera è stata effettuata attraverso l'impiego sia di software certificati (calcolo da modello) e sia attraverso test sperimentali (campagna di monitoraggio) effettuati su un dimostratore per la prova in campo. L'edificio dimostratore è inteso come modulo-prototipo di edilizia residenziale rappresentativo di una delle metodologie costruttive italiane più diffusa e consente di testare interventi di efficientamento con differenti livelli di complessità realizzativa: da quelli più leggeri o di superficie (*light renovation*) a quelli che prevedono utilizzo di elementi prefabbricati ad elevate prestazioni termo-acustiche nel caso di interventi su manufatti esistenti fortemente compromessi (*medium e deep renovation*).

Per la campagna di monitoraggio delle prestazioni in situ si è scelto di riqualificare un edificio esistente (casa cantoniera oggetto di un accordo di collaborazione tra il Centro di Ricerca CITERA e la Regione Lazio in materia di sostenibilità ed efficienza energetica degli edifici) tramite un sistema a cappotto, applicato su una tipologia di parete in muratura portante in tufo.

Inizialmente è stato effettuato il rilievo architettonico dell'edificio sia attraverso il metodo diretto sia indiretto. Quest'ultimo, realizzato tramite tecniche basate su sensori attivi (metodi *range-based*), in particolare attraverso tecnologia laser-scanning *LiDAR - Light Detection and Ranging*. Attraverso questa tipologia di rilievo ulteriormente post-processata è stato possibile creare un Building Information Model (BIM) che descrive le caratteristiche relazionali e gli attributi degli elementi dell'edificio. Sulla base del modello BIM, è stato realizzato un modello energetico del sistema edificio/impianto (Building Energy Model - BEM) con software certificato per svolgere simulazioni e verificare le prestazioni energetiche ante e post efficientamento.

La fase di posa in opera della soluzione di isolamento selezionata è stata monitorata in ogni sua fase per poter effettuare delle analisi sui vantaggi in termini di semplificazione e di velocità di realizzazione. La posa è stata realizzata a secco tramite giunzioni metalliche e senza ausilio di mezzi meccanici, sfruttando tutti i vantaggi dell'uso di una produzione *off-site*.

Il monitoraggio delle prestazioni in situ ha avuto come oggetto la misurazione dei flussi termici, della temperatura dell'aria interna ed esterna e delle temperature superficiali prima e dopo l'applicazione del sistema a cappotto, nel rispetto della norma UNI ISO 9869-1:2015 "Elementi per l'edilizia – Misurazione in situ della resistenza termica e della trasmittanza termica – Parte 1: Metodo del termoflussimetro".

I dati ottenuti dalla campagna sperimentale condotta hanno permesso di validare gli studi svolti nel corso delle precedenti annualità in termini di efficienza energetica.

La soluzione utilizzata ha come strato di finitura un pannello in calcio silicato da finire in opera, scelta per garantire una maggiore integrazione e rispetto delle tecniche tradizionali che contraddistinguono la maggioranza del patrimonio edilizio residenziale presente sul territorio nazionale. Per rendere il sistema proposto completamente prefabbricato, è possibile sostituire il pannello in calcio silicato con un sistema di pannellatura in altri materiali, ligneo, lapideo, plastico o metallico. In questo modo si ottimizzerebbe la filiera produttiva e si ridurrebbero ulteriormente i tempi di cantierizzazione.

La ricerca triennale svolta ha permesso di definire soluzioni di efficientamento con elevate prestazioni applicabili sulla maggior parte del patrimonio edilizio residenziale nazionale, ottimizzando non solo il processo di scelta del progettista, ma anche il processo produttivo dei sistemi di isolamento e le fasi di cantiere, garantendo una riduzione sia dei costi di produzione sia di quelli legati alla fase realizzativa (come ad esempio l'affitto del ponteggio, la manodopera o l'occupazione del suolo pubblico), senza tralasciare gli importanti vantaggi in termini di riduzione degli impatti ambientali e dei disagi agli utenti correlati alla fase di riqualificazione. Le soluzioni proposte basate sui principi dell'edilizia *off-site* consentono, infatti, di

risolvere uno dei principali motivi che molto spesso ostacola un intervento di efficientamento energetico dell'involucro opaco di un immobile, ovvero la riluttanza dei proprietari a lasciare l'edificio durante i lavori. Un altro scenario di sviluppo consiste nella digitalizzazione del processo di progettazione, mediante l'utilizzo di modelli informativi digitali dinamici, ma anche dello stesso processo di produzione, in modo da ottenere un sistema prefabbricato "ready to use" che consente un assemblaggio rapido e di precisione. Digitalizzazione, Big Data, AI, Internet of Things sono strumenti utili non solo in fase di progettazione, produzione e realizzazione, ma anche nel corso dell'intero ciclo di vita dell'edificio, consentendo un monitoraggio costante delle performance.

Per poter avviare una nuova filiera industriale è necessario, tuttavia, affrontare alcuni ostacoli costituiti principalmente da una scarsa applicazione di metodologie e soluzioni tecnologiche evolute. Il nostro contributo va nella direzione del tentativo di "rivoluzionare" l'attuale approccio alla progettazione degli edifici e all'intero processo produttivo e costruttivo delle aziende di settore per poter rendere più sostenibile l'intero parco edilizio.

L'inefficienza del patrimonio edilizio, infatti, comporta elevati consumi di energia; nel 2018, il consumo energetico del settore residenziale è stato di 32,1 Mtep.

Edilizia *off-site* e i *Modern Methods of Construction* costituiscono nuove modalità per l'efficientamento degli edifici, basate sulla progettazione, pianificazione, fabbricazione e pre-assemblaggio di elementi o componenti edilizi in stabilimento, prima dell'installazione in cantiere.

L'utilizzo di tecnologie di pre-produzione permette di realizzare la costruzione trasferendo la produzione in fabbrica. Con un maggiore controllo della qualità e un uso più efficiente di materiali, manodopera e tecniche di produzione, è possibile realizzare interventi più veloci, con meno rischi per i lavoratori e con un costo congruo. La digitalizzazione può essere impiegata sia nel processo di progettazione, per creare un modello informativo digitale dinamico, sia nel processo di produzione per ottenere un assemblaggio di precisione.

Le imprese italiane risultano ancora al margine del processo di innovazione centrato su di una produzione ibrida tra la fabbrica e il cantiere.

L'approccio di questa proposta indirizza all'innovazione di prodotto e di processo in modo da realizzare modelli di riqualificazione sostenibili e ripetibili per il patrimonio edilizio residenziale nazionale esistente.

I risultati raggiunti possono offrire un valido supporto finalizzato a promuovere lo sviluppo di tutta la filiera industriale del settore dell'efficientamento energetico basato sui principali criteri dell'edilizia *off-site*

Un contributo che riteniamo di particolare interesse si è concretizzato nell'elaborazione di un abaco di elementi/moduli prefabbricati standard in grado di rispondere alle diverse esigenze climatiche, geometrico/dimensionali e tecnico/prestazionali costituito una sorta di "produzione a catalogo" di schede di pacchetti di involucro edilizio opaco rappresentativi del parco edilizio residenziale nazionale che consente di catalogare le principali casistiche e poter individuare le relative specifiche soluzioni di isolamento da adottare in modo che siano compatibili con il contesto delineato.

Un concreto utilizzo di questo abaco si è tradotto in una matrice (intesa come sistema aperto/implementabile) che rappresenta le possibili configurazioni delle tipologie di involucro edilizio che si possono trovare all'interno del patrimonio edilizio nazionale, a prevalente uso residenziale in funzione di classe di epoca di realizzazione, tipologia edilizia e tipologia costruttiva. Attraverso questo strumento si è resa possibile l'individuazione di interventi standardizzati di riqualificazione sostenibile profonda del sistema involucro in modo da tradurli in soluzioni concrete da adottare, presenti sul mercato nazionale ed internazionale, legate al concetto di edilizia *off-site*. Le prestazioni degli scenari di isolamento sono state già precalcolate, per indirizzare la catena di produzione verso soluzioni standardizzate più efficienti e sostenibili per il patrimonio edilizio residenziale nazionale.

La rilevanza di questo strumento si evidenzierà al momento in cui, dovendo intervenire su un edificio esistente (come spesso accade carente di documentazione tecnica), il progettista potrà individuare, attraverso l'ausilio della matrice e delle schede, la casistica che corrisponda meglio al caso specifico e avrà le prime informazioni per effettuare una valutazione qualitativa dei possibili interventi di riqualificazione partendo da una baseline di riferimento conoscendone gli elementi costitutivi e le caratteristiche prestazionali.

La fase di test (simulazioni delle prestazioni energetiche-prova in campo) dell'applicazione di alcune soluzioni tecnologiche individuate su un edificio-dimostratore hanno avuto lo scopo di verificare la sperimentazione di metodologie progettuali- costruttive e realizzative avanzate consentendo una valutazione complessiva delle prestazioni ottenibili dalle singole soluzioni, fino ad una verifica quantitativa e qualitativa dei vantaggi in termini di semplificazione realizzativa. Il confronto tra risultati derivanti da calcolo (simulazioni del modello di edificio-test) e dal monitoraggio in situ hanno confermato l'incremento delle prestazioni in termini di efficienza energetica dei sistemi adottati una volta accoppiati alle strutture esistenti. Le valutazioni estese a confronti in termini di riduzione delle dispersioni termiche (periodo di climatizzazione invernale) tra sistemi differenziati e in condizioni climatiche diverse hanno inoltre fornito ulteriori indicazioni di convenienza nell'applicazione delle soluzioni proposte.

L'output di questa metodologia si è posto un duplice obiettivo: da un lato potrà essere uno strumento guida per il progettista per individuare all'interno di una sorta di "produzione a catalogo" di configurazioni ottimizzate predefinite la casistica che corrisponda meglio al caso specifico fornendo una baseline di riferimento in termini operativi e prestazionali, dall'altro fornirà indicazioni all'industria delle costruzioni per poter riorganizzare il proprio processo produttivo orientandolo su componenti e sistemi standardizzati che possano fornire prodotti riproducibili e adattabili su base modulare e con un maggior controllo di qualità del componente e del sistema che uscirà dalla fabbrica pronto per essere montato in situ.

Si può pensare come modello al riferimento al settore automotive sviluppando una *supply chain* con la personalizzazione del prodotto lungo un'unica linea di produzione.

Tutti i passaggi possono essere raggruppati in un unico processo produttivo facente capo ad un'unica azienda o può essere parcellizzato all'interno di una filiera industriale articolata ma coordinata secondo la tendenza all'automazione industriale che permette di aumentare la produttività e la qualità produttiva (Industria 4.0). Il filo rosso che ha guidato la ricerca si fonda sui principi di un'edilizia sostenibile che è stata intesa non solo nella direzione di una maggiore efficienza del patrimonio edilizio esistente, ma come re-interpretazione di prodotti/componenti/sistemi nell'ottica di un consumo consapevole di risorse, prediligendo materiali riciclati e riciclabili, razionalizzando le modalità di posa in opera, progettando sistemi il più possibile prefabbricati, assemblabili a secco per garantire in fase di dismissione la percentuale più elevata di riciclo o riuso dei componenti, nel rispetto delle specifiche tecniche dei componenti edilizi previste dai Criteri Ambientali Minimi (C.A.M.) vigenti.

I benefici per gli utenti del sistema elettrico nazionale possono essere intesi a breve e a medio termine e riguardano sia utenti civili sia utenti industriali. L'attività di progetto consente di acquisire e diffondere informazioni tecnico-scientifiche a vantaggio del sistema produttivo, che se ne può giovare in termini di competitività, dei progettisti che trovano uno strumento guida per le proprie scelte di intervento e degli utenti finali che ne riceveranno un beneficio in termini economici, di raggiungimento di prestazioni funzionali garantite e di minor disagio durante la realizzazione delle opere di riqualificazione.

La maggiore diffusione di interventi di riqualificazione grazie ad una migliore e più semplice implementazione delle tecniche di edilizia *off-site* consentirebbe di ridurre i costi delle bollette energetiche e di ottenere importanti risparmi in termini di fabbisogno energetico dell'edificio, con conseguente riduzione del consumo di energia primaria e di potenza installata. La diffusione dell'*off-site construction* porterebbe inoltre soprattutto benefici per gli utenti industriali, snellendo ed efficientando i processi e riducendone i costi.

L'applicazione delle metodologie sviluppate per l'individuazione di soluzioni che consentano di realizzare riqualificazioni del patrimonio edilizio a costo controllato risultano vantaggiose soprattutto in relazione a contesti di edilizia sociale e povertà energetica, in cui altrimenti il tasso di implementazione di questo tipo di soluzioni rimarrebbe inevitabilmente molto basso.

In concreto all'industria di prodotti/sistemi per l'edilizia potremmo proporre un processo che fornisce indicazioni su tipologia di prodotti (es: tipologie di materiali isolanti e range precalcolati di spessori comprensive di dati prestazionali messe in relazione con casistiche di strutture edilizie oggetto di intervento) e sistemi di assemblaggio in modo da offrire gli strumenti per poter organizzare la produzione secondo una standardizzazione avanzata e flessibile in grado di far fronte alle reali richieste del mercato con evidenti vantaggi in termini di costi di produzione ed economie di scala. Dalla fabbrica potranno uscire elementi/moduli con garanzia di qualità controllata e pronti per essere montati direttamente in cantiere.

Il dimostratore potrà consentire in futuro, una volta superate le difficoltà contingenti nel reperire sistemi di isolamento avanzati tra loro differenziati, di mettere a punto un modello edilizio semplificato per la posa in opera e la sperimentazione contemporanea di più componenti innovativi costituenti l'involucro, scelti anche in base al diverso orientamento delle facciate. L'edificio dimostratore potrà costituire un modulo-prototipo di edilizia residenziale rappresentativo di una delle tipologie costruttive italiane più diffusa e consentirà di testare su prospetti diversi interventi di efficientamento con differenti livelli di complessità realizzativa. Sarà inoltre possibile sperimentare le diverse modalità e tempistiche di posa in opera dei sistemi di isolamento in funzione del loro diverso livello di complessità e modularità.

L'esito della presente attività potrà agire come driver per promuovere lo sviluppo e l'adozione di principi, tecnologie dell'edilizia off-site.

8 Riferimenti bibliografici

1. United Nations, “UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE” https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conve ng.pdf
2. T. Bruckner, I.A. Bashmakov, Y. Mulugetta, H. Chum, A. de la Vega Navarro, J. Edmonds, A. Faaij, B. Fungtammasan, A. Garg, E. Hertwich, et al., “Energy Systems”. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Edenhofer, O.R., Pichs-Madruga, Y., Sokona, E., Farahani, S., Kadner, K., Seyboth, A., Adler, I., Baum, S., Brunner, P., Eickemeier, B., et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2014.
3. S. Tsemekidi-Tzeiranaki, P. Bertoldi, N. Labanca, L. Castellezzi, T. Serrenho, M. Economidou, P. Zangheri, “Energy Consumption and Energy Efficiency Trends in the EU-28 for the Period 2000–2016”, EUR 29473 EN; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2018.
4. Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency and the United Nations Environment Programme. 2019 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-Emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Available online: <https://www.unenvironment.org/resources/publication/2019-global-status-report-buildings-and-construction-sector>
5. F. Bean, J. Volt, V. Dorizas, E. Bourdakos, D. Staniaszek, A. Roscetti, L. Pagliano, “Future-Proof Buildings for All Europeans. A Guide to Implement the Energy Performance of Buildings Directive (2018/844). Buildings Performance Institute Europe (BPIE)” 2019. Available online: https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2019/04/Implementing-the-EPBD_BPIE_2019.pdf.
6. Communication from The Commission to The European Parliament, The European Council, The Council, The European Economic and Social Committee and The Committee Of The Regions. The European Green Deal, COM/2019/640 Final. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>.
7. A. Magrini, G. Lentini, S. Cuman, A. Bodrato, L. Marengo, “From nearly zero energy buildings (NZEB) to positive energy buildings (PEB): The next challenge—The most recent European trends with some notes on the energy analysis of a forerunner PEB example”, *Dev. Built Environ.* 3(2020).
8. C. Far, H. Far, “Improving energy efficiency of existing residential buildings using effective thermal retrofit of building envelope”, *Indoor Built Environ.* 28 (2018), pp. 1–17.
9. Eurostat. Energy Consumption in Households. Available online: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_consumption_in_households (accessed on 23 November 2020).
10. F. Filippidou, J.P. Jimenez Navarro, “Achieving the cost-effective energy transformation of Europe’s buildings”, EUR 29906 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-12394-1, doi:10.2760/278207, JRC117739.
11. L.E. Mavromatidis, A. Bykalyuk, H. Lequaya, “Development of polynomial regression models for composite dynamic envelopes thermal performance forecasting”, *Appl. Energy*, 104 (2013), pp. 379–391.
12. J.M.P. Sala Lizarraga, A. Picallo-Perez, “Design and optimization of the envelope and thermal installations of buildings”, in *Exergy Analysis and Thermoconomics of Buildings. Design and Analysis for Sustainable Energy Systems*, Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2020, pp. 911–1005.
13. Delivering the European Green Deal https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en
14. EUROPEAN COMMISSION, “A Renovation Wave for Europe - greening our buildings, creating jobs, improving lives” <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1603122220757&uri=CELEX:52020DC0662#footnote5>
15. S. Ajayi, J. Brinklow-Harris, H. A. Alaka, J. A. Dauda, “Managing the Benefits and Impediments to Offsite Construction in the UK Construction Industry”, In: Gorse, C and Neilson, C J (Eds) *Proceedings of the 35th Annual ARCOM Conference*, 2-4 September 2019, Leeds, UK, Association of Researchers in Construction Management, pp. 577-586.

- 16.D. Brown, P. Kivimaa, S. Sorrell, "An energy leap? Business model innovation and intermediation in the 'Energiesprong' retrofit initiative", *Energy Research & Social Science*, 58(2019), pp. 1-12
- 17.ISTAT, "18 Costruzioni" <https://www.istat.it/it/files/2015/12/C18.pdf>
- 18.Eurostat. Energy Consumption in Households. Available online: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_consumption_in_households
- 19.A. Shibani, A. Agha, D. Hassan, Y. Al-Hadeethi, M. Choudhury, "Effectiveness of the Modern Methods of Construction in Terms of Cost and Time: A Case Study of the United Kingdom", *Journal of Civil Engineering Research* 2021, 11(1), pp. 19-28.
- 20.L. Barazzetti, F. Banfi, R. Brumana, G. Gusmeroli, M. Previtali, G. Schiantarelli (2015). Cloud-to-BIM-to-FEM: Structural simulation with accurate historic BIM from laser scans. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 57, 71-87
- 21.F. Dellachà, "L'analisi termoflussimetrica: un utile ausilio per la diagnosi energetica", *ingenio sistema integrato di informazione per l'ingegnere*, 2014, pp 1-8.

9 Curriculum scientifico del gruppo di lavoro CITERA

Sofia Agostinelli nata a Roma nata a Roma 23/11/1995 laureata in Gestione Del Progetto E Della Costruzione Dei Sistemi Edilizi (Project And Construction Management Of Building Systems) [LM - Ordin. 2019].

Dottoranda di Ricerca in Energia e Ambiente del XXXVI° ciclo presso il DIAEE della Facoltà di Ingegneria della Sapienza Università di Roma.

Autrice e co-autrice di pubblicazioni nell'ambito della digitalizzazione del settore delle costruzioni e dell'efficientamento energetico dell'involucro edilizio.

Collabora alle attività di Ricerca del Centro CITERA nell'ambito della riqualificazione energetica degli edifici.

Fabrizio Cumo nato a Rimini 11/08/1968 laureato in Ingegneria nucleare c/o la Facoltà di Ingegneria della Sapienza Università di Roma. Dottore di Ricerca in Energetica - Sapienza Università di Roma - Ottobre 1996. Professore Associato in Fisica Tecnica Ambientale afferente al Dipartimento P.D.T.A. presso la Facoltà di Architettura - Sapienza Università di Roma.

Direttore del Centro di Ricerca Interdipartimentale Territorio Edilizia Restauro e Ambiente (C.I.T.E.R.A.) .

Direttore del Master di I Livello sul BIM - *Building Information Modeling* presso la Facoltà di Architettura della Sapienza Università di Roma.

Responsabile scientifico per il centro di ricerca CITERA di numerosi progetti di ricerca in collaborazione con il MATTM, il MIUR e l'ENEA inerenti alle tematiche della sostenibilità energetico-ambientale in edilizia.

Autore di circa 110 pubblicazioni su riviste e memorie di congressi internazionali e nazionali riguardanti la sostenibilità ambientale, l'energetica e la fisica tecnica ambientale (qualità dell'aria interna, trasmissione del calore, illuminotecnica)

Autore di 10 libri nell'ambito della Fisica Tecnica, Energetica e della Tecnologia dell'Architettura.

Cavaliere Ordine al Merito della Repubblica Italiana dal 27/12/2007.

Ufficiale Ordine al Merito della Repubblica Italiana dal 02/06/2011.

È stato membro esperto nominato dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio nella Commissione Interministeriale per il recepimento della Direttiva Europea 2002/91/CE sul contenimento del consumo energetico degli edifici e l'utilizzo di energie rinnovabili.

Federica Giustini nata a Roma il 20/06/1985, laureata in Architettura U.E. alla Facoltà di Architettura "Valle Giulia" della Sapienza Università di Roma con Tesi in Fisica Tecnica Ambientale.

Dottore di Ricerca in Energia e Ambiente del XXVII° ciclo presso il DIAEE della Facoltà di Ingegneria della Sapienza Università di Roma. Master di I Livello in BIM - Building Information Modeling presso la Facoltà di Architettura della Sapienza Università di Roma nel 2021.

Svolge attività di libera professione come Direttore dei Lavori e Coordinatore della Sicurezza in fase di Progettazione ed Esecuzione e attività di collaborazione professionale con studi di architettura ed ingegneria e con imprese di costruzione e ristrutturazione edilizia, occupandosi sia di sicurezza che di organizzazione e gestione del cantiere. Autrice e co-autrice di pubblicazioni nel settore della tecnologia dell'architettura e dell'efficientamento energetico dell'involucro edilizio.

Collabora alle attività di Ricerca del Centro CITERA nell'ambito della riqualificazione energetica degli edifici.

Elisa Pennacchia nata a Roma l'11/02/1988, laureata in Gestione del processo Edilizio presso la Facoltà di Architettura della Sapienza Università di Roma.

Dal 2017 Dottore di Ricerca in Energia e Ambiente del IXXX° ciclo presso il DIAEE della Facoltà di Ingegneria della Sapienza Università di Roma.

Docente a contratto del corso di *Tecnologia dei processi realizzativi* presso la Facoltà di Architettura della Sapienza Università di Roma. Le sue attività di ricerca riguardano principalmente il campo della tecnologia dell'architettura, dell'analisi del ciclo di vita degli edifici e dell'efficientamento energetico dell'involucro edilizio.

Collabora alle attività di Ricerca del Centro CITERA nell'ambito della riqualificazione energetica degli edifici.

Giuseppe Piras nato a Roma 05/12/1966 laureato in Architettura e in Ingegneria, dottore di ricerca in Riqualificazione e recupero insediativo.

Professore di Fisica tecnica ambientale all'Università La Sapienza di Roma dove svolge, presso il Dipartimento di Ingegneria Astronautica Elettrica ed Energetica, attività di ricerca nei settori dell'energetica civile e del controllo ambientale, tematiche sulle quali è autore di numerosi articoli e pubblicazioni.

È Referente della Sapienza Università di Roma per le iniziative nel campo del risparmio energetico e del controllo ambientale. È Direttore del Master universitario in "Gestione integrata e valorizzazione dei patrimoni immobiliari e urbani - Asset, Property, Facility & Energy Management" della Sapienza Università di Roma.

Coordinatore per le iniziative di risparmio energetico e salvaguardia ambientale della Sapienza Università di Roma.