



**POLITECNICO**  
**MILANO 1863**

SCUOLA DI ARCHITETTURA, URBANISTICA  
E INGEGNERIA DELLE COSTRUZIONI

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Sistemi Edilizi

Valutazione dell'impatto degli interventi di retrofit energetico  
sulla disponibilità di luce naturale in edifici residenziali

Tesi di Laurea Magistrale di:

**CHIARA MELI**

Matr. 945755

Relatore: Prof. Andrea Giovanni Mainini

Co-relatore: Prof. Juan Diego Blanco Cadena

Anno accademico 2021-2022



# Sinossi

Il patrimonio edilizio italiano residenziale si compone, per un'alta percentuale, di edifici risalenti al periodo compreso tra il 1960 e il 1980, antecedenti all'emanazione della prima legge in materia di efficienza energetica, la Legge n.373 del 30/03/1976 e per questo fortemente energivori e impattanti in termini di consumi energetici.

In questo contesto, gli interventi di retrofit edilizio sull'involucro si sono progressivamente diffusi come risposta agli obiettivi posti dalle normative, allo scopo di ridurre i consumi e le emissioni dei gas ad effetto serra. Tra i tipi di interventi più comuni si hanno l'applicazione di un sistema a cappotto in facciata e la sostituzione dei serramenti.

Le azioni di retrofit energetico, pur garantendo un aumento della prestazione termica ed energetica dell'edificio, hanno evidenziato alcune criticità legate, in particolare, all'apporto di luce naturale all'interno degli edifici stessi. Quest'ultimo aspetto è di cruciale importanza poiché interessa sia il comfort psico-fisiologico degli utenti, sia il consumo energetico dell'edificio legato alla necessità di illuminazione artificiale degli ambienti.

Il presente elaborato si propone di quantificare l'impatto delle più comuni azioni di retrofit energetico sul comfort luminoso all'interno degli ambienti. Tale valutazione è effettuata attraverso la determinazione e l'analisi del fattore medio di luce diurna, del quale è stata indagata la variazione in funzione di differenti parametri tecnico-costruttivi.

Attraverso la creazione di un modello parametrico, è stata studiata l'influenza sul fattore medio di luce diurna di differenti parametri, quali la geometria del locale e delle aperture, il numero di aperture, e la presenza di aggetti, sia per l'edificio allo stato di fatto, sia prevedendo una o più azioni di retrofit.

L'analisi delle modellazioni ha consentito di fornire una valutazione qualitativa e quantitativa degli effetti della riqualificazione energetica mediante interventi di facciata, i risultati ottenuti si propongono come strumento utile in fase di progettazione dell'intervento per comprendere quanto le azioni previste possano impattare il comfort interno in termini di apporto di luce naturale.



# Abstract

The Italian residential building asset is composed for a high percentage of buildings dating back to the period between 1960 and 1980, prior to the enactment of the first law on energy efficiency, the Law n.373 of 30/03/1976, thus having significant energetic impact.

In this context, the retrofit interventions on buildings' envelopes have gradually spread as a response to the benchmarks set by the newer regulations, in order to reduce consumption and emissions of greenhouse gases. The most common interventions are the application of a coating system on the facade and the replacement of windows and doors.

Energy retrofit actions, while ensuring an increase in thermal and energy performance of the buildings, have highlighted some critical issues, particularly related to the intake of natural light inside the buildings themselves. This aspect is of utmost importance since it affects both the psycho-physiological comfort of the users and the energy consumption of the building related to the need of artificial lighting of the rooms.

This work aims to quantify the impact of the most common energy retrofit actions on the indoor lighting comfort. The assessment is carried out through the determination and analysis of the average daylight factor, investigating the variation as a function of different technical and constructive parameters.

The influence of different parameters on the average daylight factor has been studied through the creation of a parametric model. The geometry of the rooms and openings, and the presence of overhangs have been analysed, both for the building as it is, and by providing one or more retrofit actions.

The modelling and the consequent analysis have provided a qualitative and quantitative assessment of the effects of energetic performance upgrading of buildings through interventions on the facade. The results obtained are proposed as a useful tool in the design phase of the interventions to better understand the impact of retrofit actions on the internal comfort in terms of natural light intakes.



# Indice

Sinossi.....	I
Abstract.....	III
Indice .....	V
Indice Figure.....	VII
Indice Tabelle .....	IX
Indice Grafici.....	XIII
Introduzione.....	1
1. Retrofit energetico .....	3
1.1 L'evoluzione normativa italiana in materia di efficienza energetica.....	3
1.2 Incentivi e agevolazioni fiscali .....	7
1.3 Classificazione edilizia .....	8
1.3.1 Progetto Tabula .....	9
1.4 Retrofit energetico .....	10
1.4.1 Retrofit con sistema a cappotto .....	11
1.4.2 Retrofit con sistemi prefabbricati .....	12
1.4.3 Retrofit con facciata ventilata.....	15
2. Relazione tra le caratteristiche dell'involucro e la luce naturale .....	17
2.1 La luce naturale negli ambienti interni .....	17
2.2 Daylight assessment.....	18
2.2.1 Modello statico .....	18
2.2.2 Modello dinamico ( <i>climate-based</i> ).....	20
2.2.3 Calcolo del LENI.....	21
2.3 Involucro e luce naturale.....	22
2.3.1 Tipologia di vetro .....	22
2.3.2 Riflettanza delle superfici opache.....	22
2.3.3 Spessore delle chiusure verticali opache .....	24
2.3.4 Orientamento delle aperture .....	26
3. Metodologia di indagine .....	29

3.1	Definizione dell'edificio di riferimento.....	29
3.1.1	Geometria dell'ambiente .....	29
3.1.2	Requisiti di illuminazione .....	30
3.1.3	Altezza delle aperture.....	32
3.1.4	Numero di aperture.....	33
3.1.5	Sporgenza orizzontale .....	33
3.2	Interventi di retrofit energetico.....	33
3.2.1	Tipologia di serramento .....	33
3.2.2	Sistema a cappotto.....	34
3.3	Definizione del modello .....	35
3.3.1	Geometria dell'ambiente .....	36
3.3.2	Geometria delle aperture .....	36
3.3.3	Chiusura opaca verticale .....	43
3.3.4	Superfici interne .....	46
3.3.5	Sporgenza orizzontale .....	47
3.4	Calcolo del fattore medio di luce diurna .....	48
3.5	Calcolo dei parametri climate-based .....	50
4.	Risultati.....	53
4.1	Valutazione dello stato di fatto .....	54
4.1.1	Numero di aperture.....	54
4.1.2	Altezza delle aperture.....	60
4.1.3	Presenza di una sporgenza orizzontale.....	65
4.1.4	Presenza di montanti interni .....	68
4.2	Azioni di retrofit energetico .....	69
4.2.1	Sostituzione del serramento .....	69
4.2.2	Aggiunta di un sistema a cappotto .....	73
4.2.3	Sostituzione del serramento e aggiunta di un sistema a cappotto .....	78
5.	Conclusioni.....	89
	Bibliografia.....	93
A.	Appendice A .....	97
B.	Appendice B .....	103

# Indice Figure

Figura 0.1: Consumi del settore edile a livello mondiale, stimato nell'anno 2019 [1].	1
Figura 1.1: Sezione orizzontale raccordo serramento – sistema ETICS [21].	12
Figura 1.2: Schematizzazione stratigrafia pannello prefabbricato [23].	13
Figura 1.3: Intervento di trasformazione dell'area residenziale di Dieselweg a Graz, in Austria [23].	14
Figura 1.4: Intervento di trasformazione di un edificio degli anni 70' [20].	16
Figura 2.1: Scenario dei coefficienti di riflettanza [37].	23
Figura 2.2: Identificazione delle zone dell'edificio [38].	24
Figura 2.3: Identificazione dell'edificio di riferimento [33].	25
Figura 2.4: Area illuminata da illuminazione naturale in funzione dell'orientamento [38].	27
Figura 3.1: Superficie locale con destinazione d'uso salotto.	30
Figura 3.2: Superficie locale con destinazione d'uso camera matrimoniale.	30
Figura 3.3: Schema esplicativo della superficie illuminante [39].	31
Figura 3.4: Rappresentazione vetro camera selettivo [41].	34
Figura 3.5: Definizione della geometria degli ambienti.	36
Figura 3.6: Definizione della superficie finestrata per l'ambiente salotto.	37
Figura 3.7: Definizione del numero di aperture, dell'altezza dell'apertura e dell'altezza del davanzale.	37
Figura 3.8: Esempio di casistiche differenziate dal numero di aperture presenti in facciata, definite dal parametro Break Up Dist.	38
Figura 3.9: Esempio di casistiche differenziate dall'altezza delle aperture, definite dai parametri Window Height e Sill Height.	38
Figura 3.10: Telaio fisso visto dall'esterno dell'ambiente.	40
Figura 3.11: Definizione del telaio fisso visto dall'esterno dell'ambiente.	40
Figura 3.12: Telaio fisso visto dall'interno dell'ambiente.	40
Figura 3.13: Definizione del telaio fisso visto dall'interno dell'ambiente.	41
Figura 3.14: Definizione telaio fisso.	41
Figura 3.15: Telaio mobile visto dall'esterno (a) e dell'interno dell'ambiente (b).	41
Figura 3.16: Definizione ante serramento.	42
Figura 3.17: Definizione del telaio mobile.	42

Figura 3.18: Definizione del componente Telaio.....	43
Figura 3.19: Definizione della superficie vetrata.....	43
Figura 3.20: Definizione del vano murario esterno.....	44
Figura 3.21: Definizione della coibentazione delle spallette.....	44
Figura 3.22: Definizione del davanzale esterno.....	45
Figura 3.23: Definizione del vano murario interno e del davanzale interno.....	45
Figura 3.24: Chiusura opaca verticale allo stato di fatto (a) e con la presenza di isolamento aggiuntivo e isolamento della spalletta (b).....	46
Figura 3.25: Definizione del soffitto.....	46
Figura 3.26: Definizione del pavimento interno.....	47
Figura 3.27: Definizione delle pareti interne.....	47
Figura 3.28: Sporgenza orizzontale.....	48
Figura 3.29: Definizione della sporgenza orizzontale.....	48
Figura 3.30: Griglia per il calcolo del FLDm per il locale salotto (a) e per la camera matrimoniale (b).....	49
Figura 3.31: Definizione del calcolo del fattore medio di luce diurna.....	50
Figura 3.32: Definizione del calcolo dei parametri climate-based.....	51
Figura 4.1: Dimensione porta finestra minima considerata al fine del calcolo del fattore medio di luce diurna per il locale salotto (a) e la camera matrimoniale (b).....	61

# Indice Tabelle

Tabella 1.1: Limiti di trasmittanza termica [11].	6
Tabella 1.2: Limiti di trasmittanza termica per Edifici di riferimento [13].	7
Tabella 1.3: Limiti di trasmittanza termica per Edifici esistenti soggetti a riqualificazione [13].	7
Tabella 1.4: Valori di trasmittanza massimi consentiti per l'accesso alle detrazioni [17].	8
Tabella 2.1: Valori del Fattore medio di luce diurna che permettono di superare un dato livello di illuminamento, considerando una frazione di ore di luce $F_{time, \%} = 50$ [32].	20
Tabella 2.5: Valori del coefficiente di sensibilità [37].	24
Tabella 2.6: Matrice delle simulazioni effettuate [38].	25
Tabella 2.7: Orientamento locali considerati [38].	27
Tabella 3.1: Superficie finestrata relativa al salotto.	32
Tabella 3.2: Superficie finestrata relativa alla camera matrimoniale.	32
Tabella 3.3: Window Wall Ratio.	32
Tabella 3.4: Altezza delle superfici finestrate e relativa altezza del davanzale.	32
Tabella 3.5: Calcolo trasmittanza parete allo stato di fatto.	35
Tabella 3.6: Calcolo trasmittanza parete con l'aggiunta di isolamento esterno.	35
Tabella 3.7: Fattore di scala per creazione telaio fisso.	40
Tabella 3.8: Valori riflettanza telaio [42].	43
Tabella 3.9: Valore riflettanza vano murario esterno [42].	44
Tabella 3.10: Valore riflettanza davanzale esterno in pietra [42].	45
Tabella 3.11: Valore riflettanza davanzale interno in legno [42].	45
Tabella 3.12: Valore riflettanza davanzale interno in legno [42].	47
Tabella 3.13: Radiance Parameters per il calcolo del FLD.	49
Tabella 3.14: Radiance Parameters [43].	49
Tabella 3.15: Radiance Parameters per il calcolo dei parametri climate-based.	50
Tabella 4.1: Rappresentazione codice di classificazione.	53
Tabella 4.2: Influenza del numero di aperture sul FLDm per il locale salotto.	55
Tabella 4.3: Influenza del numero di aperture sul FLDm per il locale camera matrimoniale.	55

Tabella 4.4: Influenza del numero di aperture sul FLDm per il locale salotto con esposizione aperture lato ovest.....	58
Tabella 4.5: Influenza del numero di aperture sul FLDm per il locale camera matrimoniale in funzione dell'altezza. ....	59
Tabella 4.6: Influenza dell'altezza delle aperture sul FLDm per il locale salotto. ....	61
Tabella 4.7: Influenza dell'altezza delle aperture sul FLDm per il locale camera matrimoniale.....	62
Tabella 4.8: Influenza della differente altezza delle aperture sul FLDm per il locale salotto con esposizione aperture lato ovest. ....	65
Tabella 4.9: Influenza della sporgenza orizzontale sul FLDm per il locale salotto .....	66
Tabella 4.10: Influenza della sporgenza orizzontale sul FLDm per il locale camera matrimoniale.....	67
Tabella 4.11: Influenza della presenza di montanti interni al serramento. ....	68
Tabella 4.12: Influenza della sostituzione del serramento sul FLDm per il locale salotto..	69
Tabella 4.13:Influenza della sostituzione del serramento sul FLDm per il locale camera matrimoniale.....	71
Tabella 4.14: Influenza dell'aggiunta di isolamento termico sul FLDm per il locale salotto in funzione del numero di aperture .....	72
Tabella 4.15: Influenza dell'aggiunta di isolamento termico sul FLDm per il locale salotto. ....	73
Tabella 4.16: Influenza dell'aggiunta di isolamento termico sul FLDm per il locale camera matrimoniale.....	75
Tabella 4.17: Influenza dell'aggiunta di isolamento termico sul FLDm per il locale salotto in funzione del numero di aperture .....	76
Tabella 4.18: Equazione linea di tendenza.....	78
Tabella 4.19: Influenza della sostituzione del serramento e dell'aggiunta di isolamento sul FLDm per il locale salotto. ....	78
Tabella 4.20: Influenza della sostituzione del serramento e dell'aggiunta di isolamento sul FLDm per il locale camera matrimoniale.....	80
Tabella 4.21: Confronto variazioni percentuali date dalle azioni di retrofit presenti. ....	81
Tabella 4.22: Influenza delle azioni di retrofit su DA per RAI 1/8. ....	83
Tabella 4.23: Influenza delle azioni di retrofit su DA per RAI 1/4. ....	83
Tabella 4.24: Influenza delle azioni di retrofit su UDI per RAI 1/8.....	84
Tabella 4.25:Influenza delle azioni di retrofit su UDI per RAI 1/4. ....	85
Tabella A.1: FLDm stato di fatto locale salotto. ....	97

Tabella A.2: FLDm stato di fatto locale camera matrimoniale. ....	100
Tabella B.1: FLDm azioni di retrofit locale salotto .....	103
Tabella B.2: FLDm azioni di retrofit locale camera matrimoniale.....	109



# Indice Grafici

Grafico 1.1: Numero di edifici residenziali in Italia suddivisi per periodo di costruzione [3]. .....	3
Grafico 4.1: Influenza del numero di aperture sul FLDm per il locale salotto (L) e camera matrimoniale (R) con esposizione aperture sud. ....	56
Grafico 4.2: Influenza del numero di aperture sul FLDm per il locale salotto (L) e camera matrimoniale (R) con esposizione aperture lato ovest.....	56
Grafico 4.3: Influenza del numero di aperture sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione aperture sud e ovest.....	57
Grafico 4.4: Influenza del numero di aperture sul FLDm per il locale camera matrimoniale (R) con esposizione aperture sud e ovest.....	57
Grafico 4.5: Influenza del numero di aperture sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione sud in funzione dell'altezza delle aperture.....	60
Grafico 4.6: Influenza dell'altezza delle aperture sul FLDm per il locale salotto (L) e camera matrimoniale (R) con esposizione aperture sud.....	63
Grafico 4.7: Influenza dell'altezza delle aperture sul FLDm per il locale salotto (L) e camera matrimoniale (R) con esposizione aperture ovest. ....	63
Grafico 4.8: Influenza dell'altezza delle aperture sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione sud e ovest.....	64
Grafico 4.9. Influenza dell'altezza delle aperture sul FLDm per il locale camera matrimoniale (R) con esposizione sud e ovest. ....	64
Grafico 4.10:Influenza della sporgenza orizzontale sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione sud. ....	66
Grafico 4.11:Influenza della sporgenza orizzontale sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione ovest.....	66
Grafico 4.12: Influenza della sporgenza orizzontale sul FLDm per il locale camera matrimoniale (R) con esposizione sud.....	67
Grafico 4.13: Influenza della sporgenza orizzontale sul FLDm per il locale camera matrimoniale (R) con esposizione ovest.....	68
Grafico 4.14: Influenza della sostituzione del serramento sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione aperture lato sud. ....	70
Grafico 4.15: Influenza della sostituzione del serramento sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione aperture lato ovest. ....	70

Grafico 4.16: Influenza della sostituzione del serramento sul FLDm per il locale camera matrimoniale (R) con esposizione aperture lato sud. ....	71
Grafico 4.17: Influenza della sostituzione del serramento sul FLDm per il locale camera matrimoniale (R) con esposizione aperture lato ovest. ....	72
I valori sono rappresentati nel Grafico 4.18. ....	73
Grafico 4.19: Influenza della sostituzione del serramento sul FLDm per il locale salotto (L) in funzione del numero di aperture. ....	73
Grafico 4.20: Influenza dell'aggiunta di isolamento termico sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione aperture lato sud. ....	74
Grafico 4.21: Influenza dell'aggiunta di isolamento termico sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione aperture lato ovest. ....	74
Grafico 4.22: Influenza dell'aggiunta di isolamento termico sul FLDm per il locale camera matrimoniale (R) con esposizione aperture lato sud. ....	75
Grafico 4.23: Influenza dell'aggiunta di isolamento termico sul FLDm per il locale camera matrimoniale (R) con esposizione aperture lato ovest. ....	76
Grafico 4.24: Influenza dell'aggiunta di isolamento termico sul FLDm per il locale salotto in funzione del numero di aperture. ....	77
Grafico 4.25: Variazione di FLDm in funzione dello spessore della facciata. ....	77
Grafico 4.26: Influenza della compresenza delle azioni di retrofit considerate sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione aperture lato sud. ....	79
Grafico 4.27: Influenza della compresenza delle azioni di retrofit considerate sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione aperture lato ovest. ....	79
Grafico 4.28: Influenza della compresenza delle azioni di retrofit considerate sul FLDm per il locale camera matrimoniale (R) con esposizione aperture lato sud. ....	80
Grafico 4.29: Influenza della compresenza delle azioni di retrofit considerate sul FLDm per il locale camera matrimoniale (R) con esposizione aperture lato ovest. ....	81
Grafico 4.30: Influenza delle azioni di retrofit sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione aperture lato ovest. ....	82
Grafico 4.31: Influenza delle azioni di retrofit sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione aperture lato ovest. ....	82

# Introduzione

Il settore edile e delle costruzioni rappresenta a livello mondiale circa il 35% del consumo totale di energia e il 38% delle emissioni totali di CO<sub>2</sub> [1]. Come si nota in Figura 0.1 una significativa percentuale dell'utilizzo energetico e delle emissioni è occupata dagli edifici residenziali, i quali consumano il 22% dell'energia totale e provocano il 17% delle emissioni globali, di cui l'11% è dato dalle emissioni indirette connesse alla generazione di energia, calore ed elettricità all'interno degli edifici [1].

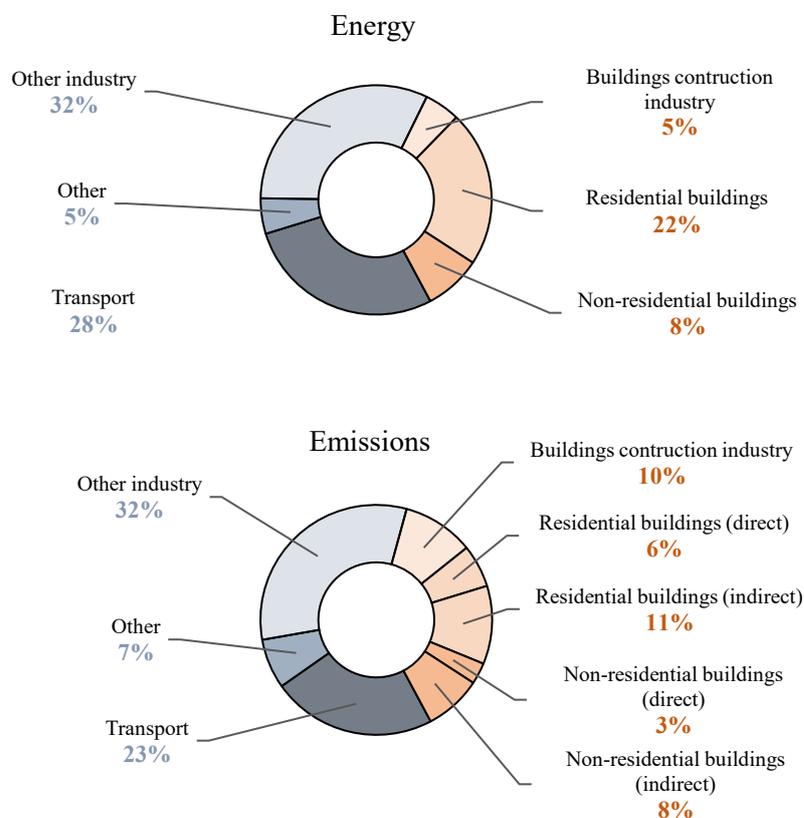


Figura 0.1: Consumi del settore edile a livello mondiale, stimato nell'anno 2019 [1].

Da molti decenni, infatti, la riduzione dei consumi e degli impatti ambientali legati ai processi edilizi rappresenta uno dei principali obiettivi delle politiche europee [2]. Questa viene garantita primariamente attraverso la riduzione della richiesta energetica, l'utilizzo di fonti rinnovabili e l'aumento dell'efficienza dell'energia richiesta.

Proprio in tali termini l'involucro edilizio svolge un ruolo fondamentale rappresentando un sistema capace di regolare il flusso termico, energetico e luminoso con l'ambiente esterno.

Con il passare degli anni e attraverso processi migliorativi di quest'ultimo, tramite azioni di retrofit energetico sull'esistente, la "pelle" dell'edificio passa dal rappresentare un elemento di protezione dell'edificio dall'ambiente esterno ad un sistema di interfaccia, capace del miglioramento del comfort ambientale e del conseguimento della diminuzione delle dispersioni termiche e dei relativi consumi energetici.

Lo scopo della seguente tesi è quello di verificare come l'aumento della prestazione termica dell'edificio, raggiunta tramite azioni di retrofit energetico sull'involucro edilizio esistente, possa incidere positivamente in termini di risparmio energetico, portando però al contempo ad una riduzione del comfort luminoso e visivo all'interno dell'edificio. È inizialmente analizzata nel Capitolo 1 l'esigenza di intervenire attraverso azioni di retrofit sul costruito, esaminando le differenti tipologie di retrofit. Nel Capitolo 2, è studiata la relazione tra le caratteristiche dell'involucro edilizio e la disponibilità di luce naturale, mettendo in luce i parametri di valutazione della stessa e i parametri tecnico costruttivi dell'edificio che influiscono sulla disponibilità di luce diurna. Attraverso la definizione di locali rappresentativi e la modellazione degli stessi in funzione dei parametri tecnico costruttivi, eseguita nel Capitolo 3, sono effettuate le simulazioni che portano ai risultati discussi nel Capitolo 4.

# 1. Retrofit energetico

## 1.1 L'evoluzione normativa italiana in materia di efficienza energetica

Dai dati dell'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT), relativi al censimento effettuato nell'anno 2011, si evince, come mostrato nel Grafico 1.1, che un'alta percentuale del patrimonio edilizio residenziale italiano ha un periodo di costruzione compreso tra il primo dopoguerra e l'inizio degli Anni Novanta. La ricerca fa emergere che il periodo di più intensa attività edilizia è il decennio 1971-1980 con 2.117.651 edifici residenziali, poco inferiore è il numero di costruzioni del decennio 1961-1970 con 2.050.833 edifici. Seguono poi il periodo del dopoguerra (1.700.836 edifici), e il decennio 1981-1990 (1.462.767 edifici). Questa raccolta di dati indica che circa il 75% degli edifici residenziali italiani è stato costruito precedentemente al 1980 e il circa il 50% tra il primo Dopoguerra e l'inizio degli Anni Ottanta [3].

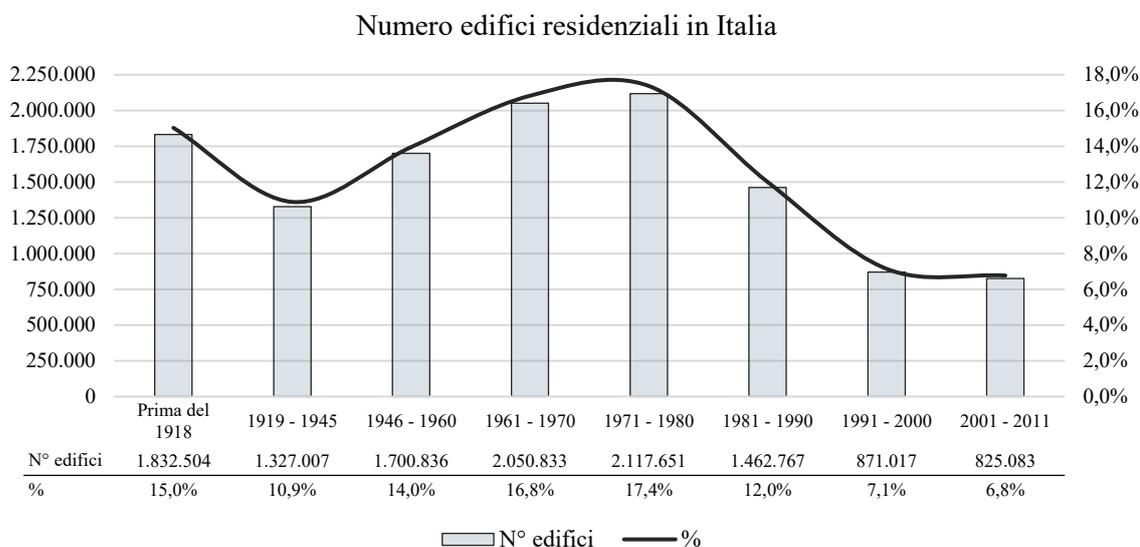


Grafico 1.1: Numero di edifici residenziali in Italia suddivisi per periodo di costruzione [3].

In Italia la prima norma in materia di efficienza energetica fu emanata solamente nell'anno 1976; non essendo presente fino a quel momento nel settore edile alcuna consapevolezza in materia di contenimento di consumi, il patrimonio edilizio residenziale italiano si compone in prevalenza di edifici energivori e impattanti in termini di consumi energetici.

Con l'emanazione della Legge n.373 del 30/03/1976 [4], si vede affermato per la prima volta lo scopo del contenimento energetico in edilizia. Tale legge oltre a regolare le caratteristiche prestazionali dei componenti edili, prescrive l'isolamento termico sia per

edifici di nuova costruzione sia per edifici soggetti a ristrutturazione, le cui caratteristiche vengono regolate dalla legge stessa [4].

Con il medesimo proposito, rivolto al risparmio energetico, alla Legge n. 373 fa seguito la Legge n.10 del 9/01/1991 [5], la quale favorisce l'uso razionale di energia ed il contenimento dei consumi incentivando l'uso di fonti rinnovabili. Tale norma introduce l'obbligo da parte dei progettisti di una verifica del progetto edilizio anche dal punto di vista energetico, tramite l'inserimento di una relazione tecnica, la quale sancisce la rispondenza del progetto alle prescrizioni della norma stessa. Un ulteriore documento introdotto all'Articolo 30 della norma è il documento di certificazione energetica dell'edificio, con validità temporale pari a cinque anni, il quale nei casi di compravendita o di locazione dell'immobile deve essere a conoscenza dell'acquirente o del locatario [5]. Pur essendo tali concetti all'avanguardia rispetto alle legislazioni del periodo considerato, non vennero emanati decreti attuativi che potessero concretizzarne i contenuti.

Successivamente il D.P.R. n. 412 del 26/08/1993 [6] presenta una classificazione degli edifici in funzione della propria destinazione d'uso e attua una suddivisione del territorio in sei differenti zone climatiche, funzione dei gradi giorno ed indipendenti dalla collocazione geografica. Sono determinati infine i criteri di progettazione energetica, identificando così le informazioni necessarie per il procedimento di certificazione energetica degli immobili [6].

Il primo accordo mondiale per il contenimento dei consumi fu stipulato solamente nel 1997. Durante la Conferenza delle Parti (COP 3) della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC), venne redatto il Protocollo di Kyoto. Tale accordo prefissa obiettivi quantificati di limitazione dei gas ad effetto serra responsabili del riscaldamento globale, imponendo per i paesi membri una diminuzione delle emissioni totali dei gas serra di almeno il 5% nel periodo compreso tra il 2008 e il 2012, rispetto ai livelli del 1990.

In ottemperanza al protocollo di Kyoto, il quale esprime che tali misure debbano essere raggiunte dagli stati membri attraverso misure nazionali, il Parlamento Europeo emana una serie di direttive. La prima fu la Direttiva Comunitaria 2002/91/CE sul rendimento energetico, rinominata EPBD - Energy Performance Building Directive [7], che recita:

*“L'energia impiegata nel settore residenziale e terziario, composto per la maggior parte di edifici, rappresenta oltre il 40% del consumo finale di energia delle Comunità. Essendo questo un settore in espansione, i suoi consumi di energia e quindi le sue emissioni di biossido di carbonio sono destinati ad aumentare”. [7]*

Attraverso tale premessa, considerando l'alto potenziale di risparmio energetico dato dal settore edilizio, l'EPBD definisce gli orientamenti comunitari in tema di prestazioni

energetiche del settore edile, promuovendo il miglioramento del rendimento energetico<sup>1</sup> degli edifici. Questa direttiva stabilisce per gli stati membri l'adozione di una metodologia di calcolo del rendimento energetico e l'applicazione di requisiti minimi dello stesso, stabiliti a livello nazionale o regionale, per edifici di nuova costruzione ed edifici sottoposti a significative ristrutturazioni, se di metratura superiore a 1000 m<sup>2</sup> [7].

La seconda importante direttiva emanata a livello europeo è la 2006/32/CE [8] concernente l'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici. Tale disposizione impone agli stati membri il raggiungimento di risparmio energetico, entro il nono anno di applicazione della norma, pari al 9% dell'ammontare medio annuo dei consumi rilevati nei cinque anni precedenti all'attuazione della stessa, da conseguire mediante misure di miglioramento dell'efficienza energetica. Per il raggiungimento di tale obiettivo vengono istituiti i PAEE, Piani di Azione nazionale in materia di Efficienza Energetica, nei quali ogni Paese membro definisce gli obiettivi nazionali intermedi per il conseguimento di quello globale [8]. L'Italia presenta il primo PAEE nel 2007.

Sempre in conformità a quanto stipulato mediante il protocollo di Kyoto, viene emanato dall'Unione Europea il "Piano 20-20-20 per il clima e l'energia". Attraverso questa direttiva, entrata in vigore nel 2009, viene previsto per gli stati membri la riduzione del 20% delle emissioni di anidride carbonica e della domanda di energia e il raggiungimento del 20% di produzione energetica da fonti rinnovabili. Oltre agli obiettivi di carattere generale l'Unione Europea fissa dei limiti per ogni Paese membro. Per l'Italia gli obiettivi da raggiungere entro il 2020 sono la riduzione del 13% nelle emissioni di anidride carbonica e il raggiungimento del 17% di produzione energetica da fonti rinnovabili.

Nel 2010 l'EPBD venne sostituita in maniera definitiva con l'emanazione della Direttiva 2010/31/UE [9], detta anche EPBD II, sulla prestazione energetica nell'edilizia. Attraverso tale disposizione viene introdotto l'edificio a energia quasi zero, definito dalla norma come "*edificio ad altissima prestazione energetica*", in cui "*il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili, compresa l'energia da fonti rinnovabili prodotta in loco o nelle vicinanze*" [9]. L'EPBD II prevede che entro la fine del 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione debbano rispettare le caratteristiche che permettono loro di essere considerati ad energia quasi zero.

Gli scopi della successiva Direttiva 2012/27/UE, attua a garantire il conseguimento dell'obiettivo dell'Unione Europea relativo all'efficienza energetica del 20% entro il 2020, vennero poi aggiornati dalla Direttiva 2018/2002/UE [10], la quale prevede il raggiungimento del 20% di produzione da fonti rinnovabili per il 2020 e del 32,5% per il 2030 [10].

---

<sup>1</sup> "Rendimento energetico di un edificio: la quantità di energia effettivamente consumata o che si prevede possa essere necessaria per soddisfare i vari bisogni connessi ad un uso standard dell'edificio, compresi, tra gli altri, il riscaldamento, il riscaldamento dell'acqua, il raffreddamento, la ventilazione e l'illuminazione".

A partire dalla Direttiva Europea del 2002 l'Italia aggiornò il proprio quadro normativo tramite una successione di diversi decreti. L'Italia fu uno dei primi paesi ad emanare una legge di recepimento alla Direttiva 2002/91/CE, tramite il D.lgs. n.192/2005, presto modificato e integrato con il D.lgs. n.311 del 2006.

Il Decreto n.311 [11] ristabilisce l'obbligatorietà della certificazione energetica per gli edifici, già introdotta dall'Articolo 30 della Legge 10, estendendo l'obbligo oltre che agli edifici di nuova costruzione anche agli edifici del patrimonio esistente. Tale decreto definisce inoltre, la determinazione della classe energetica dell'edificio attraverso l'introduzione dell'indice di prestazione energetica EP, il quale esprime il fabbisogno di energia primaria totale riferito all'unità di superficie utile o di volume lordo [11]. Gli indici di prestazione energetica, per la climatizzazione invernale, vengono indicati, in funzione delle diverse destinazioni d'uso e della zona climatica di appartenenza, così come indicato dal DPR n. 412 del 1993, e in funzione del rapporto di forma dell'edificio S/V [11]. Oltre ai valori limite degli indici di prestazione, vengono indicati i valori limite di trasmittanza termica dell'involucro edilizio, specificatamente delle strutture verticali opache, delle strutture orizzontali o inclinate opache e delle chiusure trasparenti [11]. In Tabella 1.1 vengono indicati i valori di trasmittanza termica previsti dall'Allegato C del Decreto n.311 per ogni zona climatica, validi dal 1° gennaio 2010.

Tabella 1.1: Limiti di trasmittanza termica [11].

<b>Limiti di trasmittanza termica [W/m<sup>2</sup>K]</b>				
	Strutture opache verticali	Coperture	Pavimenti	Chiusure trasparenti
A	0,62	0,38	0,65	4,6
B	0,48	0,38	0,49	3,0
C	0,40	0,38	0,42	2,6
D	0,36	0,32	0,36	2,4
E	0,34	0,30	0,33	2,2
F	0,33	0,29	0,32	2,0

Successivamente si ha l'emanazione del D.M. 26/06/2009 [12], il quale permette di redigere il certificato energetico di un edificio. Questa linea guida favorisce un'applicazione omogenea della certificazione energetica degli edifici su tutto il territorio nazionale, coerente con la Direttiva Europea 2002/91/CE e con i principi del D.lgs. n.192/2005 [12]. Secondo la linea guida la prestazione energetica complessiva dell'edificio è espressa attraverso l'indice di prestazione energetica globale EP<sub>gl</sub>, funzione della prestazione energetica per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la climatizzazione estiva e per l'illuminazione artificiale [12].

Nell'anno 2013 fu emesso il D.L. 63/2013, il quale oltre a recepire la Direttiva 2010/31/UE, interviene sul D.lgs.193/2005 aggiornandone il testo. La principale novità apportata dal decreto consiste nell'introduzione dell'Attestato di Prestazione Energetica (APE), strumento di controllo del consumo energetico dell'edificio, il quale si sostituisce all'Attestato di Certificazione energetica.

Nel 2015 si ha la pubblicazione del D.M. 26/06/2015 [13], che introduce sul territorio nazionale il concetto di “edifici a energia quasi zero” e ne individua le caratteristiche, definisce i limiti prestazionali minimi e le verifiche normative da rispettare in materia di efficienza energetica. Tale decreto individua i limiti di trasmittanza dell’involucro edilizio, diversificati per zona climatica e per tipologia edilizia. Sono indicati in Tabella 1.2 e Tabella 1.3 i valori di trasmittanza termica previsti dall’Appendice A del decreto, relativi all’edificio di riferimento e previsti dall’Appendice B relativi agli edifici esistenti soggetti a riqualificazione energetica, validi dal 1° gennaio 2021 [13].

Tabella 1.2: Limiti di trasmittanza termica per Edifici di riferimento [13].

<b>Limiti di trasmittanza termica - Edifici di riferimento [W/m<sup>2</sup>K]</b>				
Zona climatica	Strutture opache verticali	Coperture	Pavimenti	Chiusure trasparenti
A e B	0,43	0,35	0,44	3,00
C	0,34	0,33	0,38	2,20
D	0,29	0,26	0,29	1,80
E	0,26	0,22	0,26	1,40
F	0,24	0,20	0,24	1,10

Tabella 1.3: Limiti di trasmittanza termica per Edifici esistenti soggetti a riqualificazione [13].

<b>Limiti di trasmittanza termica - Edifici esistenti soggetti a riqualificazione energetica [W/m<sup>2</sup>K]</b>				
Zona climatica	Strutture opache verticali	Coperture	Pavimenti	Chiusure trasparenti
A e B	0,40	0,32	0,42	3,00
C	0,36	0,32	0,38	2,00
D	0,32	0,26	0,32	1,80
E	0,28	0,24	0,29	1,40
F	0,26	0,22	0,28	1,00

Infine, nel 2020 viene pubblicato il D.lgs. del 10/06/2020, n. 48 [14] con l’obiettivo finale del miglioramento delle prestazioni energetiche del patrimonio immobiliare italiano. Al fine di sostenere la ristrutturazione edilizia viene introdotta da tale decreto la “Strategia di ristrutturazione a lungo termine” con lo scopo di ottenere entro il 2050 “*un parco immobiliare decarbonizzato e ad alta efficienza energetica, facilitando la trasformazione, efficace in termini di costi, degli edifici esistenti in edifici a energia quasi zero*” [14]. Questa strategia mira a stimolare ed accelerare la riqualificazione energetica degli edifici, tramite approcci efficaci in termini di costi.

## 1.2 Incentivi e agevolazioni fiscali

Al fine di promuovere gli interventi di ristrutturazione e miglioramento dell’efficienza energetica vennero emanate in Italia diverse misure di agevolazione fiscale.

In materia di incentivi ed agevolazioni, la detrazione fiscale per gli interventi di ristrutturazione edilizia è stata introdotta dal D.P.R. n.917 del 1986 o TUIR, Testo Unico

delle Imposte sui Redditi. L'Articolo 16-bis di tale norma prevede un'agevolazione fiscale sugli interventi di ristrutturazione edilizia e consiste in una detrazione dall'IRPEF (imposta sul reddito delle persone fisiche), del 36% delle spese sostenute, fino all'ammontare complessivo delle stesse e non superiore a 48.000€ per ciascuna unità immobiliare. Nel corso degli anni questa normativa venne più volte modificata. La detrazione dall'IRPEF del 36% venne successivamente portata al 50% per le spese sostenute tra il 26 giugno 2012 e il 30 giugno 2013 secondo quanto prescritto dal D.L. n.83 del 2012, considerando un importo massimo di spesa pari a 96.000 euro. Questo fu prorogato fino al 31 dicembre del 2019 dall'emanazione della legge n.145 del 30/12/2018 [15].

Un vero rilancio nel settore della ristrutturazione edilizia è avvenuto con l'agevolazione, introdotta all'Articolo 119 del Decreto-legge n.34 del 19/05/2020. L'Articolo 119 *“incentivi per l'efficienza energetica, sisma bonus, fotovoltaico e colonnine di ricarica di veicoli elettrici”*, prevede una detrazione fino al 110 % per le spese sostenute in materia di interventi di efficienza energetica e di misure antisismiche sugli edifici. La detrazione interessa interventi di isolamento termico delle superfici opache verticali, orizzontali e inclinate con un'incidenza maggiore del 25% della superficie disperdente lorda dell'edificio stesso, interventi di sostituzione degli impianti di climatizzazione invernale, installazione di impianti solari fotovoltaici e l'installazione di infrastrutture per la ricarica di veicoli elettrici all'interno degli edifici [16].

Tali detrazioni fiscali vengono rese operative successivamente alla pubblicazione del Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico del 6/08/2020 (c.d. Ecobonus). Tale decreto all'Allegato E *“Requisiti degli interventi di isolamento termico”* stabilisce i valori di trasmittanza massimi per l'accesso alle detrazioni dell'Ecobonus.

Tabella 1.4: Valori di trasmittanza massimi consentiti per l'accesso alle detrazioni [17].

<b>Requisiti tecnici di soglia per tipologia di intervento [W/m<sup>2</sup>K]</b>				
Zona climatica	Strutture opache orizzontali: isolamento coperture	Strutture opache orizzontali: isolamento pavimenti	Strutture opache verticali: isolamento pareti perimetrali	Sostituzione finestre comprensive di infissi
A	≤ 0,27	≤ 0,40	≤ 0,38	≤ 2,60
B	≤ 0,27	≤ 0,40	≤ 0,38	≤ 2,60
C	≤ 0,27	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 1,75
D	≤ 0,22	≤ 0,28	≤ 0,26	≤ 1,67
E	≤ 0,20	≤ 0,25	≤ 0,23	≤ 1,30
F	≤ 0,19	≤ 0,23	≤ 0,22	≤ 1,00

### 1.3 Classificazione edilizia

Il panorama edilizio italiano risulta essere molto ampio e diversificato, fortemente correlato al periodo storico di costruzione e alle tecnologie esistenti, a loro volta connesse alle diverse zone climatiche. Pertanto, una classificazione e catalogazione del parco immobiliare esistente risulta essere un'operazione complessa.

### 1.3.1 Progetto Tabula

Tabula - *Typology Approach for BUiLding stock energy Assessment* è un progetto del Politecnico di Torino, finanziato dal programma europeo Intelligent Energy Europe, nato con lo scopo di creare una struttura armonizzata delle tipologie edilizie residenziali europee [18]. Per ciascun paese partecipante al progetto è stata sviluppata una “Tipologia Edilizia Nazionale” costituita da un insieme di edifici residenziali modello con caratteristiche energetiche, e classificata sulla base della regione/zona climatica, dell’epoca di costruzione e della classe di dimensione edilizia.

Lo scopo dell’identificazione degli “Edifici Tipo” è quello di rendere nota la prestazione ed il potenziale risparmio energetico raggiungibili attraverso azioni di riqualificazione dell’involucro edilizio e degli impianti termici. Sono previste una “riqualificazione tipica” tramite l’applicazione di misure comunemente usate all’interno del paese, ed una “riqualificazione avanzata”, attraverso l’introduzione di interventi che riflettono le migliori tecnologie disponibili. Il potenziale risparmio energetico viene esaminato tramite confronto della prestazione energetica precedente e successiva alla riqualificazione e tramite le norme tecniche europee a supporto della Direttiva comunitaria 2002/91/CE [18].

La classificazione edilizia del progetto Tabula parte dall’individuazione di tre aree climatiche (media, alpina e mediterranea), risultanti dal raggruppamento delle sei zone climatiche in cui è suddiviso il territorio nazionale, secondo quanto previsto dal D.P.R. n.412/1993. Per ogni area climatica sono individuati otto periodi, rappresentativi di determinate tipologie dimensionali e costruttive, che definiscono l’epoca di costruzione dell’edificio. Si ha una successiva classificazione per specifiche tipologie dimensionali, quali casa monofamiliare, casa a schiera, edificio multifamiliare e blocco di appartamenti.

La “Matrice della Tipologia Edilizia” italiana è stata sviluppata per l’area climatica media, ipotizzata coincidente con la zona climatica “E”, che comprende 4250 comuni italiani su un totale di 8100 [18].

Sulla base dell’evoluzione normativa e dei dati analizzati precedentemente il periodo di costruzione dell’edificio considerato per lo scopo della tesi sarà il decennio 1970 - 1980, il quale risulta essere il periodo di più intensa attività edilizia italiana, con la costruzione di 2.177.651 edifici residenziali; sono quindi tenute in considerazione la classe 5 e la classe 6 del progetto Tabula.

La classe 5, comprensiva del periodo tra il 1961 e il 1975, definisce l’epoca caratterizzata dalla crisi petrolifera, mentre la classe 6 è comprensiva del periodo tra il 1975 e il 1990 ed è rappresentativa della nascita dalle prime disposizioni legislative in materia di efficienza energetica negli edifici. Saranno considerate le tipologie costruttive nazionali di quel periodo, sia per quanto riguarda l’involucro opaco sia l’involucro trasparente.

Gli edifici italiani risultano caratterizzati da costruzioni tipicamente massive aventi come materiali principali laterizi, sia pieni che forati, e il calcestruzzo. In particolare, le due classi considerate, comprensive tra il 1961 e 1990 sono contraddistinte da coperture a falde

in laterizio o in latero cemento, e coperture falde con struttura e tavolato in legno. I solai sono principalmente in latero cemento, mentre le chiusure opache verticali sono in muratura a cassa vuota con soli mattoni forati o con mattoni forati e pieni (30-40 cm), muratura in mattoni forati (25-40 cm) e muratura in calcestruzzo (18-30 cm) [18].

In termini generali il periodo antecedente al 1976 è caratterizzato dall'assenza di materiale isolante all'interno delle strutture, facendo così dipendere i valori di trasmittanza termica unicamente dalla tipologia edilizia e dal suo spessore. Tra il 1976 e il 1991 si considera invece la presenza di un basso livello di isolamento [18]. Le chiusure trasparenti sono caratterizzate da vetro singolo precedentemente al 1975 e vetro camera singolo successivamente al 1975, con telaio in legno o telaio in metallo senza taglio termico [18].

Il periodo compreso tra il 1970 e il 1980 è rappresentato dunque da chiusure opache con un basso livello di isolamento, per la maggior parte dei casi nullo, il quale favorisce la presenza di ponti termici e dispersioni dell'involucro edilizio, risultando inadeguato in termini di comfort termico e contenimento dei consumi.

## 1.4 Retrofit energetico

I dati fino ad ora analizzati relativi al patrimonio immobiliare italiano identificano chiaramente l'importanza di intervenire sul patrimonio edilizio esistente, al fine di dare una risposta agli obiettivi posti dalle normative legate alla riduzione dei consumi e delle emissioni dei gas ad effetto serra.

Il retrofit energetico in ambito edile è definito come un *“intervento di riqualificazione edilizia finalizzato all'aumento della prestazione energetica tramite la riduzione degli input energetici necessari a determinare adeguate condizioni di comfort e tramite modalità eco-efficienti per il soddisfacimento dei fabbisogni dell'edificio”* [19].

Il processo di retrofit energetico sul patrimonio esistente coinvolge una pluralità di fattori, di natura tecnica, tecnologica, sociale e ambientale, risultando essere molto complesso.

Gli interventi di riqualificazione energetica si suddividono in interventi sull'involucro edilizio, definiti come passivi, e interventi sugli impianti o relativi ai servizi di controllo e regolazione, definiti come attivi. Nella progettazione risulta essere rilevante l'adozione di un approccio integrato tra interventi di tipo attivo e passivo, nonostante sia necessario differire nel tempo le due tipologie di azioni [20]. Un intervento di retrofit passivo effettuato precedentemente risulta essere vantaggioso nella scelta conseguente dei sistemi impiantistici, i quali saranno pertanto meno impattanti e costosi [20].

Un appropriato intervento di retrofit sull'involucro deve tener conto in egual misura del raggiungimento delle prestazioni energetiche prefissate e degli aspetti legati alla compatibilità dell'intervento con l'esistente, necessitando di una dettagliata conoscenza dell'edificio stesso.

Per lo scopo della tesi viene considerato il retrofit energetico di facciata, il quale può essere realizzato principalmente tramite tre strategie diverse:

- sistema a cappotto;
- sistemi prefabbricati;
- facciata ventilata.

#### 1.4.1 Retrofit con sistema a cappotto

Il sistema di riqualificazione energetica tradizionale maggiormente impiegato in ambito edilizio è il sistema di isolamento a cappotto, capace di fornire la risposta più efficace alle problematiche prestazionali legate agli edifici esistenti.

Il sistema a cappotto è una soluzione certificata, nota a livello europeo con l'acronimo ETICS – *External Thermal Insulation Composite Systems*, realizzata con materiali le cui proprietà sono state verificate e certificate come compatibili tra loro. A livello nazionale il documento di riferimento per i sistemi di isolamento a cappotto è la UNI/TR 11715:2018 “*Isolanti termici per l’edilizia - Progettazione e messa in opera dei sistemi isolanti termici per l’esterno*”, contenente le procedure per la corretta progettazione e posa dei sistemi di isolamento termico a cappotto per edifici nuovi ed esistenti [21].

La stratigrafia di un sistema a cappotto viene descritta secondo la UNI TR/11715 con i seguenti componenti:

- *strato di collante ed eventuale fissaggio meccanico*. Questo strato funge da elemento di connessione del pannello isolante allo strato di supporto, sopportando il carico verticale (peso proprio) e il carico orizzontale (spinta o depressione del vento). La norma definisce sistemi incollati e sistemi a fissaggio meccanico;
- *strato di isolamento termico*. Il pannello isolante ha funzione di isolamento termico e di protezione dal surriscaldamento estivo. I materiali isolanti maggiormente utilizzati sono: polistirene espanso sinterizzato (EPS), polistirene espanso estruso (XPS), lana minerale (MW), poliuretano espanso (PU);
- *sistema di intonaco*. Composto da un intonaco di base con rete di rinforzo avente funzione di assorbimento delle tensioni superficiali e sollecitazioni meccaniche, assorbimento delle tensioni igrotermiche e resistenza agli urti, e da un intonaco di finitura che funge da protezione dagli agenti atmosferici e dello strato di isolamento termico.

Nell’ambito della riqualificazione energetica i sistemi a cappotto rispondono alla richiesta di isolamento termico, contribuendo alla riduzione dei consumi energetici ed i costi legati al riscaldamento e al raffrescamento dell’edificio, portando ad un aumento del comfort abitativo. Tale sistema non svolge però alcuna funzione migliorativa per la tenuta all’aria delle chiusure esterne, che deve essere invece garantita attraverso ulteriori misure di progettazione [21]. Il sistema a cappotto appare inoltre critico nelle fasi operative dello

stesso, in quanto la necessità di ponteggi, spesso presenti per periodi duraturi, risulta essere impattante sul comfort degli occupanti.

Al fine di garantire un buon risultato in termini di isolamento dell'edificio e una buona funzionalità del sistema è necessaria una corretta esecuzione di tutti i giunti e i raccordi. Come rappresentato in Figura 1.1, il raccordo del sistema ETICS al serramento viene definito sulla base del posizionamento del serramento nella chiusura opaca verticale. Il posizionamento del serramento a filo interno o in mezzeria della facciata permette infatti di risvoltare di un determinato spessore l'isolamento applicato in facciata.

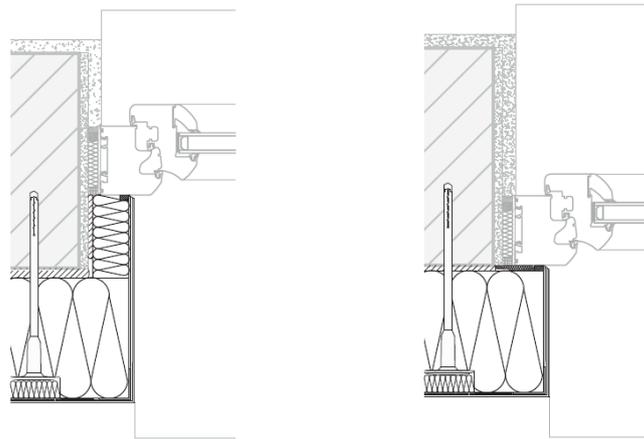


Figura 1.1: Sezione orizzontale raccordo serramento – sistema ETICS [21].

Dato il grande impatto che lo spessore di isolamento in aggiunta alla facciata provoca sull'infisso, lo studio di Claribel et al. [22] descrive ulteriori possibilità di progettazione del raccordo parete-serramento per la diminuzione dello spessore lungo il perimetro dell'infisso stesso. La prima soluzione presenta pannelli di isolamento termico applicati in facciata smussati in corrispondenza del perimetro del telaio del serramento con un taglio obliquo degli stessi. La seconda soluzione prevede l'utilizzo di pannelli di isolamento con uno spessore minore lungo il perimetro del serramento. Nonostante la sostituzione dei serramenti, davanzali e sistemi di drenaggio dell'acqua piovana sia maggiormente onerosa, essa è ritenuta la soluzione più prestante in termini di progettazione del dettaglio [22].

Nel caso di intervento di retrofit in cui non sia possibile la sostituzione del davanzale, è necessario l'allungamento delle piane esistenti, fissando al davanzale stesso un materiale aggiuntivo, prevedendo un profilo di guarnizione e un'adeguata manutenzione al fine risolvere eventuali problematiche di infiltrazione di acqua [21].

#### 1.4.2 Retrofit con sistemi prefabbricati

Negli ultimi anni, l'aumento di interessi e investimenti nel settore del recupero energetico degli edifici esistenti ha portato allo sviluppo di nuove tecniche di riqualificazione, quali la prefabbricazione. In termini generali la stratigrafia di un modulo prefabbricato viene descritta dai seguenti elementi:

1. strato di regolarizzazione sulla parte esistente;
2. strato portante, comprendente di isolamento termico e condotti impiantistici;
3. strato di isolamento termico;
4. strato di rivestimento [23].

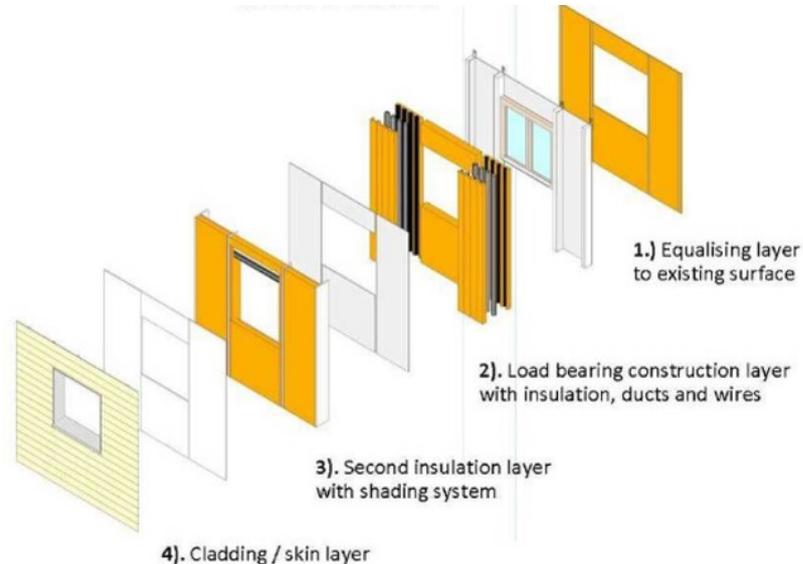


Figura 1.2: Schematizzazione stratigrafia pannello prefabbricato [23].

La prefabbricazione, dati i molteplici vantaggi, rappresenta uno strumento pronto a superare le problematiche legate al retrofit tradizionale, offre innumerevoli vantaggi, legati principalmente alla qualità del prodotto ed agli aspetti operativi del processo. La produzione degli elementi in fabbrica permette un maggior livello di qualità dei moduli stessi, rendendo la realizzazione in cantiere più rapida e sicura per gli operai. La fase di montaggio, necessitando di minori lavorazioni preliminari, permette inoltre, di arrecare un minore disturbo degli utenti dell'edificio durante le fasi operative. Aspetti critici sono la giunzione dei pannelli durante la messa in opera del sistema stesso e l'adattamento del pannello prefabbricato alla morfologia della facciata.

I sistemi prefabbricati possono essere classificati sulla base della tipologia del sistema sviluppato e sulla dimensione del modulo.

#### 1.4.2.1 Sistemi di completa prefabbricazione a grandi moduli

Il sistema prefabbricato a grandi moduli è composto da moduli di larghezza variabile, che coprono in verticale l'altezza interpiano dell'edificio [24]. Tali moduli richiedono una sottostruttura e includono, oltre al materiale isolante, anche serramenti e dotazioni impiantistiche [24]. Il serramento integrato nel modulo è un vantaggio in quanto permette il completamento del giunto tra finestra e parete in fabbrica, consentendo condizioni di maggior controllo.

Un esempio di soluzione con pannello a grandi moduli nasce all'interno del progetto Annex 50 "Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Buildings",

promosso dall'ECBCS (Energy Conservation for Building and Community System Programme), appartenente all'International Energy Agency (IEA). Tale esempio viene rappresentato dall'intervento di rinnovo dell'area residenziale di Dieselweg a Graz, in Austria.



Figura 1.3: Intervento di trasformazione dell'area residenziale di Dieselweg a Graz, in Austria [23].

Il progetto comprende moduli di dimensioni 12x3 m, in accordo con l'altezza interpiano dell'edificio considerato, uniti da un sistema maschio-femmina che permette l'unione verticale tra i pannelli.

Il modulo viene definito dalla seguente stratigrafia:

- strato di regolarizzazione della parete esistente;
- strato di irrigidimento, composto da un pannello in OBS;
- telaio in legno comprensivo di lana di roccia;
- strato di irrigidimento, composto da un pannello in OBS;
- strato di isolamento termico in lana di roccia;
- "solar comb";
- strato di ventilazione;
- strato di rivestimento esterno, composto da vetro temprato di sicurezza [23].

Al fine del raggiungimento delle prestazioni termiche l'elemento fondamentale di questa tecnologia è il "solar comb", strato costituito da molteplici canali di cellulosa con funzione di riduzione delle perdite di calore durante la stagione invernale, e funzione di scudo dai raggi solari durante le stagioni estive, capace di garantire durante l'anno una riduzione del fabbisogno energetico [23].

#### 1.4.2.2 Sistemi di completa prefabbricazione a piccoli moduli

Il sistema prefabbricato a piccoli moduli è composto da pannelli prefabbricati opachi applicati alle facciate esistenti, di dimensioni tali da poter essere facilmente maneggiati [24]. Di tale sistema risulta particolarmente critica l'interfaccia con gli altri elementi della facciata, quali ad esempio finestre, aperture o balconi.

Un esempio di sistema prefabbricato a piccoli moduli viene rappresentato dal progetto EASEE. Il progetto EASEE (Envelope Approach to improve Sustainability and Energy efficiency in Existing multi-storey multi-owner residential buildings) è stato finalizzato dall'Unione Europea nell'ambito del "Settimo Programma Quadro" di Ricerca e Sviluppo, e conta la partecipazione di un consorzio numeroso tra aziende, università e centri di ricerca. Il progetto si è rivolto agli edifici residenziali multipiano con parete esterna a cassa vuota, degli Anni '70, i quali necessitano il miglioramento delle prestazioni energetiche e la riduzione dello stato di degrado [25].

Il pannello risulta composto da un nucleo centrale in EPS contenuto in due strati di rivestimento in cemento fibro-rinforzato, dello spessore complessivo pari a 120 mm. L'efficacia di tale pannello è stata dimostrata su un edificio residenziale del 1971, scelto in accordo con Regione Lombardia, all'interno del parco edilizio di ALER Milano, avente caratteristiche che lo rendono emblematico dello stock rappresentativo della categoria scelta dal progetto. I risultati del progetto hanno portato a dimostrare l'efficacia del modulo prefabbricato nella riqualificazione esterna dell'involucro, caratterizzato da un miglioramento delle prestazioni termiche, nonché dall'aumento della durabilità dell'edificio stesso [26].

#### 1.4.2.3 Sistemi di parziale prefabbricazione

I sistemi parzialmente prefabbricati prevedono l'applicazione dei moduli prefabbricati prevalentemente in corrispondenza delle parti maggiormente critiche, come la parte finestrata dell'edificio, e il successivo completamento delle parti opache tramite altri pannelli prefabbricati o tramite metodi di retrofit tradizionale [24]. I moduli includono componenti quali finestre, condotti di ventilazione, schermature solari, isolamento termico, collettori solari e altri impianti.

#### 1.4.3 Retrofit con facciata ventilata

La facciata ventilata è definita dalla norma UNI 1108 come una "*facciata a schermo avanzato in cui l'intercapedine tra il rivestimento e la parete è progettata in modo tale che l'aria in essa presente possa fluire per effetto camino, al fine di migliorarne le prestazioni termo-energetiche complessive*" [27]. La stratigrafia di una facciata ventilata viene descritta attraverso i seguenti componenti:

- *struttura primaria*. Chiusura verticale con funzione portante del peso dell'intero sistema;
- *sistema di ancoraggio*. Strato di collegamento tra la chiusura verticale e il rivestimento esterno, il quale può essere costituito da fissaggi puntuali, sistema a montanti, sistema a traversi, oppure sistema a montanti e traversi;
- *sottostruttura della facciata abbinata allo strato di isolamento termico*;

- *strato di intercapedine*. Lo strato di intercapedine può essere classificato in non ventilato, debolmente ventilato o fortemente ventilato;
- *strato di rivestimento esterno*.

Le pareti ventilate, nella riqualificazione edilizia, rappresentano una valida alternativa al rivestimento a cappotto e un'ottima soluzione per il miglioramento delle prestazioni termiche, energetiche e acustiche dell'edificio, oltre ad essere contraddistinte dalla semplicità di posa in opera del sistema grazie al montaggio meccanico dei componenti. La presenza dell'isolamento termico a cappotto omogeneo e continuo sulla parete esistente, apporta all'edificio miglioramenti dal punto di vista energetico e termo-igrometrico, riducendo le dispersioni di calore e la presenza dei ponti termici. Tale vantaggio viene implementato dalla presenza dell'effetto camino determinato dall'intercapedine d'aria interposta tra il rivestimento esterno e lo strato di isolamento. La ventilazione aumenta gli scambi convettivi nell'intercapedine e favorisce l'assenza di fenomeni di condensazione.

Il rivestimento esterno protegge dagli agenti atmosferici durante la stagione invernale, mentre nella stagione estiva agisce come scudo riducendo il trasferimento dell'energia incidente sulla facciata verso l'interno della parete. Inoltre, rispetto ai sistemi tradizionali nell'applicazione di una facciata ventilata il rivestimento esterno permette una libertà compositiva dei prospetti.



Figura 1.4: Intervento di trasformazione di un edificio degli Anni 70 [20].

## 2. Relazione tra le caratteristiche dell'involucro e la luce naturale

### 2.1 La luce naturale negli ambienti interni

Il comfort abitativo è la condizione di benessere, intesa come l'insieme delle percezioni di una persona rispetto all'ambiente in cui essa si trova. Il comfort visivo o luminoso, insieme al comfort termico, acustico ed alla qualità dell'aria, contribuisce alla creazione della condizione di benessere di un individuo all'interno dell'edificio.

Nel corso degli anni è sempre più cresciuta la consapevolezza del valore del corretto apporto di luce naturale all'interno degli ambienti, diventando un fattore impattante nella progettazione edilizia, tanto che la luce naturale viene definita come un "materiale per l'architettura" e componente essenziale per la percezione dello spazio costruito, al pari dei materiali utilizzati per la costruzione dell'immobile [28].

Un corretto apporto di luce ha molteplici vantaggi, sia per quanto concerne aspetti di natura psico-fisiologica, sia per aspetti legati al consumo energetico dell'edificio.

Un'adeguata illuminazione dell'ambiente rende lo stesso più confortevole per l'utente, permettendo una visione e un contatto con il mondo esterno, il quale influisce positivamente sulla capacità di concentrazione, nonché sull'umore degli utenti, incidendo in modo favorevole sulla sensazione complessiva di benessere. Al contrario l'assenza di adeguata luce naturale e il conseguente eccessivo impiego di luce artificiale possono causare disturbi psico-fisici sull'individuo quali affaticamento visivo, demotivazione e desincronizzazione interna indotta dalla mancata percezione dello scorrere del tempo [29]. L'apporto di luce deve risultare equilibrato all'interno dell'ambiente, poiché anche un'eccessiva illuminazione naturale porta ad una situazione di discomfort visivo e termico, manifestabile con fenomeni di abbagliamento, surriscaldamento dell'ambiente, riflessione su superfici lucide, come ad esempio lo schermo di un computer.

Questo concetto viene enfatizzato ed acquista un maggior significato in relazione alla situazione mondiale odierna, caratterizzata dall'avvento della pandemia mondiale del Covid-19, che ha modificato il normale svolgimento della routine quotidiana dell'individuo, costringendolo a trascorrere una notevole quantità di tempo nella propria abitazione. Con la pandemia, infatti, l'utilizzo degli ambienti e dei locali che prima avevano uso saltuario è divenuto spesso continuativo, talvolta con destinazione d'uso differente rispetto a quella prevista.

L'importanza dell'illuminazione naturale non è solamente connessa a vantaggi di natura psico-fisiologica ma anche a benefici che concernono il potenziale risparmio energetico.

Un eccessivo consumo di luce artificiale esige, infatti, un elevato utilizzo degli impianti di illuminazione e di energia elettrica e ha possibilità di creare nella stagione estiva il surriscaldamento degli ambienti, che richiede a sua volta di far fronte ad un elevato consumo per il raffrescamento dell'ambiente stesso.

Un'abbondante illuminazione naturale, connessa ad un alto consumo di energia termica per irraggiamento risulta essere favorevole se si considerano i guadagni solari nei periodi invernali e svantaggioso se invece si parla di carichi solari dei mesi estivi, creando in tal modo un conflitto tra obiettivi [30]. A fronte di ciò, un adeguato comfort luminoso all'interno dell'edificio permetterebbe una diminuzione sensibile dei consumi energetici contribuendo alla realizzazione di edifici energeticamente più efficienti e meno impattanti sull'ambiente, nonché ad una riduzione dei costi legati alla gestione dell'edificio stesso.

## 2.2 Daylight assessment

### 2.2.1 Modello statico

La valutazione della luce naturale secondo quanto prevede il modello statico è una valutazione di tipo quantitativo, consistente nel fornire un valore che viene definito in relazione al raggiungimento di un valore di soglia.

#### **Fattore medio di luce diurna**

Il fattore di luce diurna è una grandezza adimensionale che esprime il rapporto tra l'illuminamento misurato in uno specifico punto dell'ambiente interno e l'illuminamento misurato all'esterno, su una superficie orizzontale, nelle stesse condizioni di tempo e di luogo, consentendo di valutare le condizioni luminose all'interno dell'ambiente in relazione alle condizioni esterne. Nel calcolo si considera la volta celeste senza presenza di ostruzioni e in condizioni di cielo coperto, in assenza di irraggiamento solare diretto.

$$FLD = \frac{E_{in}}{E_{out}} [\%] \quad (2.1)$$

Dove:

- $E_{int}$ : illuminamento medio dato dalla sola illuminazione naturale, misurato in un punto all'interno del locale considerato;
- $E_{est}$ : illuminamento medio dato dalla sola illuminazione naturale, misurato su una superficie esterna senza alcuna ostruzione, in condizioni di cielo coperto.

Considerando che il fattore di luce diurna cambia da punto a punto dell'ambiente, viene introdotto il fattore medio di luce diurna, calcolato come da Equazione (2.2).

$$FLD_m = \frac{A_{fin} \times \tau}{S_{tot} \times (1 - \rho_m)} \times \varepsilon \times \psi [\%] \quad (2.2)$$

Dove:

- $A_{fin}$ : superficie netta vetrata della finestra;
- $\tau$ : fattore di trasmissione luminosa del vetro della finestra;
- $\varepsilon$ : fattore finestra;
- $\psi$ : fattore di riduzione del fattore finestra;
- $S$ : superficie totale delle pareti dell'ambiente, compresi soffitto e pavimento;
- $\rho_m$ : fattore di riflessione medio ponderato delle superfici dell'ambiente.

Per un ambiente con  $n$  finestre il fattore medio di luce diurna vale:

$$FLD_m = \frac{\sum_{i=0}^n A_i \times \tau_i \times \varepsilon_i \times \psi_i}{S_{tot} \times (1 - \rho_m)} [\%] \quad (2.3)$$

Date  $k$  superfici con diversa finitura o colore, il fattore di riflessione medio ponderato delle superfici dell'ambiente viene calcolato come da Equazione (2.4).

$$\rho_m = \frac{\sum_k \rho_k \times S_k}{S_{tot}} [-] \quad (2.4)$$

Con:

$$S_{tot} = \sum_k S_k [-] \quad (2.5)$$

Il fattore medio di luce diurna è il parametro più diffuso per la misurazione dell'apporto di luce naturale all'interno dell'ambiente, permettendone la valutazione del livello di illuminamento. È un parametro di verifica normativa, riconosciuto all'interno della normativa italiana in ambito di edilizia residenziale nel Decreto ministeriale Sanità del 5 luglio 1975, all'Articolo 5.

*“Tutti i locali degli alloggi, eccettuati quelli destinati a servizi igienici, disimpegni, corridoi, vani-scala e ripostigli debbono fruire di illuminazione naturale diretta, adeguata alla destinazione d'uso. Per ciascun locale d'abitazione, l'ampiezza della finestra deve essere proporzionata in modo da assicurare un valore di fattore luce diurna medio non inferiore al 2%, e comunque la superficie finestrata apribile non dovrà essere inferiore a 1/8 della superficie del pavimento. Per gli edifici compresi nell'edilizia pubblica residenziale occorre assicurare, sulla base di quanto sopra disposto e dei risultati e sperimentazioni razionali, l'adozione di dimensioni unificate di finestre e, quindi, dei relativi infissi” [31].*

Oltre al limite minimo imposto dalla normativa sopra citata, la normativa BS EN 10737:2018 “*Daylight in buildings*” [32] fornisce il valore di Daylight Factor che permette il superamento di noti valori di illuminamento, quali 100, 300, 500 e 750 lux, per tutte le capitali europee appartenenti al CEN, considerando una frazione di ore di luce  $F_{time, \%} = 50$ . Per lo Stato Italiano i valori sono riportati in Tabella 2.1 [32].

Tabella 2.1: Valori del Fattore medio di luce diurna che permettono di superare un dato livello di illuminamento, considerando una frazione di ore di luce  $F_{\text{time, \%}} = 50$  [32].

	Aperture verticali	Aperture orizzontali
Nazione		Italia
Capitale		Roma
Latitudine		41,80°
Illuminazione media diffusa esterna $E_{v,d,med}$	19200	30900
DF per superare 100 lux	0,5%	0,3%
DF per superare 300 lux	1,6%	1,0%
DF per superare 500 lux	2,6%	1,6%
DF per superare 750 lux	3,0%	2,4%

Una valutazione positiva del fattore medio di luce diurna, essendo di carattere quantitativo, non necessariamente garantisce una buona qualità luminosa all'interno dell'ambiente, Tale definizione risulta essere indipendente dalle condizioni del cielo presenti, in quanto nel calcolo sono tenute in considerazione esclusivamente condizioni di cielo coperto. Attraverso tale semplificazione non vengono prese in esame le condizioni di cielo intermedio e sereno, le quali costituiscono possibili condizioni reali. Il calcolo non tiene inoltre in considerazione l'orientamento dell'ambiente, il periodo dell'anno e l'eventuale presenza di schermature solari mobili, tutti fattori che, come descritto precedentemente appaiono rilevanti nella definizione dell'apporto di luce.

## 2.2.2 Modello dinamico (*climate-based*)

La valutazione dinamica si impegna a risolvere i limiti e le imprecisioni presenti nella valutazione dell'illuminamento naturale basato su metodo statico, prendendo in esame le diverse condizioni di cielo e non esclusivamente la condizione di cielo coperto. Sono inoltre prese in considerazione le caratteristiche specifiche dell'ambiente in oggetto, i periodi dell'anno ed il comportamento dell'utente nell'utilizzo dell'ambiente stesso.

### **Daylight Autonomy (DA)**

Il fattore Daylight Autonomy (DA), o autonomia diurna, è rappresentato da un valore espresso in percentuale di tempo (t), misurato in ore diurne, nell'arco di un anno (T) in cui l'illuminamento dovuto alla sola luce naturale all'interno dell'ambiente garantisce un livello prefissato di illuminamento. Attraverso la valutazione di questo parametro viene individuata la costanza con cui un dato livello minimo di illuminamento viene mantenuto nell'ambiente e di conseguenza il tempo in cui un individuo può svolgere un'attività all'interno di un determinato ambiente senza il bisogno di ricorrere alla luce artificiale. Tale parametro ha l'inconveniente di non tenere in considerazione i valori inferiori al limite di illuminamento imposto, che risulterebbero tuttavia utili a garantire una buona visibilità da parte dell'utente. Al contempo tale valore non valuta la possibilità di un eccessivo illuminamento dell'ambiente, il quale risulta altrettanto svantaggioso in quanto potrebbe causare fenomeni di abbagliamento e discomfort [33] [34].

$$DA = \frac{t_{E>E_{max}}}{T} [\%] \quad (2.6)$$

### **Spatial Daylight Autonomy (sDA)**

Il fattore Spatial Daylight Autonomy (sDA), tradotto come autonomia spaziale della luce diurna indica la percentuale della superficie dell'ambiente in cui per una determinata percentuale di tempo occupato, viene raggiunto un dato livello di illuminamento. Con questo parametro, per la prima volta si ha una valutazione dell'apporto di luce naturale basato sull'area dell'ambiente stesso. Come per l'autonomia diurna anche in questo caso è necessaria la determinazione di un valore minimo di illuminamento [33] [34].

$$sDA = \frac{A_{E>E_{max}}}{T} [\%] \quad (2.7)$$

### **Useful Daylight Illuminance (UDI)**

Il fattore Useful Daylight Illuminance (UDI) o illuminamento naturale utile, indica la percentuale di tempo (t), misurato in ore diurne, nell'arco di un anno (T) in cui l'illuminazione naturale all'interno dell'edificio appartiene ad un determinato intervallo di illuminamento. Per la definizione del parametro UDI viene ipotizzato un valore limite minimo e massimo di illuminamento; quest'ultimo limita l'inclinazione al raggiungimento di un eccessivo illuminamento e i correlati fenomeni di abbagliamento, surriscaldamento o discomfort luminoso [33] [34].

$$UDI = \frac{t_{E_{min}<E<E_{max}}}{T} [\%] \quad (2.8)$$

### **Daylight Glare Probability (DGP)**

Il parametro Daylight Glare Probability (DGP) indica la probabilità di abbagliamento data dalla luce naturale, rappresentando la percentuale di occupanti recanti disturbo dalla condizione di abbagliamento [33].

#### **2.2.3 Calcolo del LENI**

Un ulteriore parametro di valutazione della disponibilità di luce naturale all'interno dell'ambiente è il LENI - *Lighting energy numeric indicator*, espresso in kWh/m<sup>2</sup>anno, descritto dalla norma UNI EN15193-1 del 2017 "*Energy performance of buildings - Energy requirements for lighting*", che permette la valutazione della prestazione di energia elettrica per l'illuminazione degli edifici. Per la definizione dell'indice sono prese in considerazione dal calcolo le caratteristiche dei sistemi di illuminazione, la tipologia del sistema di controllo della luce, le caratteristiche dell'edificio e la conseguente disponibilità di luce naturale, il fabbisogno di luce e il tempo di utilizzo degli ambienti [35].

## 2.3 Involucro e luce naturale

Al fine di garantire un adeguato benessere termico e sfruttare la luce naturale all'apice delle sue potenzialità è necessaria un'attenta e curata progettazione dell'edificio, che tenga in considerazione sia i parametri tecnico costruttivi, sia le condizioni ambientali in cui si trova l'edificio stesso. Vengono di seguito illustrati i parametri tecnico-costruttivi, i quali a parità di dimensione dell'apertura considerata, influiscono maggiormente sull'apporto di luce naturale all'interno dell'ambiente.

### 2.3.1 Tipologia di vetro

Il vetro è caratterizzato da proprietà ottiche, quali trasmissione luminosa, riflessione luminosa e assorbimento luminoso, che definiscono rispettivamente il flusso luminoso trasmesso attraverso la lastra, riflesso e assorbito dal vetro in relazione alla luce incidente su di esso. Il vetro singolo è caratterizzato da trasmissione luminosa molto alta e al contempo da scarse proprietà termiche. Migliori proprietà termiche caratterizzano la vetrocamera che a sua volta risulta essere caratterizzata da una minore trasmissione luminosa, che determina un calo del comfort luminoso all'interno dell'ambiente.

Lo studio di Lolli & Haase [36] analizza come influisce la sola modifica della trasmittanza del vetro sull'autonomia diurna dell'edificio. Per tale studio vengono considerati tre differenti edifici di epoche diverse:

- Edificio n.1 con anno di costruzione 1960, con finestre posizionate a sud, est e ovest e trasmittanza del vetro pari a 0,82;
- Edificio n.2 con anno di costruzione 1900, con finestre a nord-ovest e trasmittanza del vetro pari a 0,82;
- Edificio n.3 con anno di costruzione precedente al 1900, con finestre a nord-ovest e trasmittanza del vetro 0,75.

All'interno dell'ambiente sono considerati tre differenti livelli di illuminamento che corrispondono alle possibili attività dell'utente. La sostituzione della finestra esistente con un serramento composto da doppio vetrocamera e trasmittanza pari a 0,71, a parità di illuminamento (300 lux), provoca una riduzione dell'autonomia diurna rispettivamente del 20% e del 30% nei primi due edifici considerati, la riduzione dell'autonomia diurna nel terzo edificio risulta essere poco significativa data la lieve differenza tra i due valori di trasmittanza luminosa delle finestre. A parità di illuminamento, considerando 100 lux e 500 lux, la medesima sostituzione porta ad una riduzione dell'autonomia diurna minore del 5%.

### 2.3.2 Riflettanza delle superfici opache

La riflettanza delle superfici opache interne all'ambiente ha una valenza importante per quanto concerne l'influenza sull'illuminazione naturale e artificiale. In fase di

progettazione è dunque fondamentale considerare tale valore come parametro capace di ottimizzare il comfort luminoso all'interno dell'ambiente.

Lo studio di Makaremi et al. [37] si prefigge di quantificare l'effetto della riflettanza delle superfici interne, in particolare pareti, soffitto e pavimento, su diversi parametri di valutazione dell'illuminazione, quali illuminamento medio ( $E_{av}$ ), uniformità dell'illuminamento ( $U_o$ ) e valutazione dell'abbagliamento (UGR). Proponendosi di quantificare l'effetto della riflettanza sulla riduzione del consumo di elettricità, la ricerca si concentra esclusivamente sull'illuminazione artificiale.

Per lo studio viene considerato un locale di area  $10,385 \text{ m}^2$  e altezza pari a  $2,75 \text{ m}$ , con una luce fluorescente a soffitto posta al centro della stanza, avente potenza elettrica  $36 \text{ W}$  e flusso luminoso  $3350 \text{ lm}$ . Per la valutazione dell'illuminamento l'area di lavoro è situata a  $0,80 \text{ m}$  dal pavimento, mentre per l'abbagliamento l'area è situata ad un'altezza di  $1,20 \text{ m}$ .

Sono eseguite 64 diverse simulazioni, in cui si ha la variabilità dei valori di riflettanza delle pareti (W), del soffitto (C) e del pavimento (F), come mostrato in Figura 2.1.

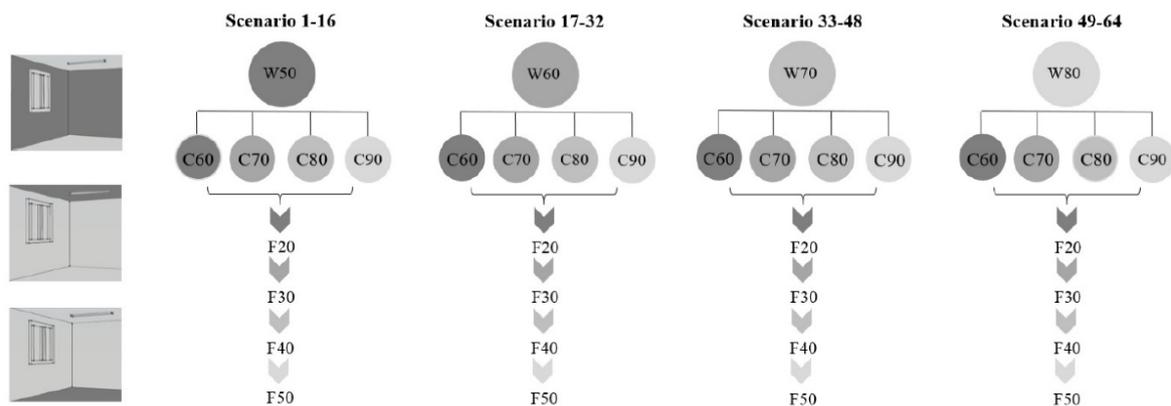


Figura 2.1: Scenario dei coefficienti di riflettanza [37].

Al fine di esaminare quantitativamente l'influenza dei cambiamenti delle variabili considerate è stata eseguita dal medesimo studio un'analisi di sensibilità. Per i valori di riflettanza relativi alla parete, soffitto e pavimento sono stati calcolati i coefficienti di sensibilità (SC), attraverso l'Equazione (2.9), al fine di verificare l'effetto di ogni parametro sull'output.

$$SC = \frac{\frac{E_{av,max} - E_{av,min}}{E_{av,max}}}{\frac{R_{w,max} - R_{w,min}}{R_{w,max}}} [-] \quad (2.9)$$

Dove  $E_{av,max}$  e  $E_{av,min}$  sono rispettivamente i valori massimo e minimo dell'illuminamento medio, mentre  $R_{w,max}$  e  $R_{w,min}$  sono i valori massimo e minimo dei parametri di input. Tale calcolo eseguito per ogni parametro di valutazione porta ai valori esposti nella Tabella 2.2.

I risultati ottenuti da tale studio dimostrano come i valori di riflettanza della parete incidano considerevolmente rispetto ai valori di riflettanza di pavimento e soffitto su tutti i parametri di valutazione considerati. Si può infatti osservare che il ruolo della riflettanza delle pareti per tutti i parametri considerati risulta rilevante rispetto alla variazione della riflettanza del soffitto e del pavimento, in particolar modo nella valutazione dell'illuminamento medio. Si può inoltre considerare trascurabile il coefficiente di sensibilità legato alla riflettanza del pavimento, avendo quest'ultima causato piccole variazioni nei parametri di output.

Tabella 2.2: Valori del coefficiente di sensibilità [37].

Parametri di input	Coefficienti di sensibilità		
	$E_{av}$	UGR	$U_o$
$R_{wall}$	0,58	-0,39	0,23
$R_{ceiling}$	0,23	-0,13	0,00
$R_{floor}$	0,05	-0,10	0,02

### 2.3.3 Spessore delle chiusure verticali opache

Molti studi in letteratura dimostrano, come l'aggiunta di isolamento in facciata al fine di ridurre i consumi energetici, portando ad un aumento dello spessore dell'imbotte esterna, influisca negativamente sulla disponibilità di luce diurna all'interno dell'ambiente considerato.

Lo studio di Altan et al. [38] è focalizzato sull'influenza dell'isolamento termico aggiunto in facciata e della contestuale sostituzione della tipologia di vetratura, sul livello di luce diurna negli spazi interni di un edificio residenziale. Dallo studio è stato considerato un locale abitativo, composto da stanze di medesima metratura pari a  $14,6 \text{ m}^2$  e di altezza di 2,6 m, ognuna avente due aperture verso l'esterno, della superficie totale di  $2,5 \text{ m}^2$ , posizionate a filo esterno della muratura e al centro della chiusura verticale, come mostrato in Figura 2.2.

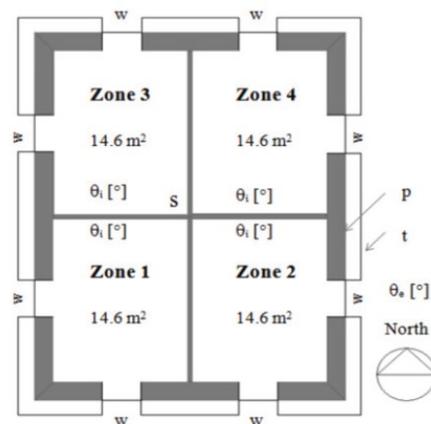


Figura 2.2: Identificazione delle zone dell'edificio [38].

Per ciascuno dei locali considerati sono state svolte diverse simulazioni, le quali comportano l'aggiunta alla facciata esistente (p) di diversi spessori di isolamento (t) e il passaggio da una vetrocamera singola (DGU) con trasmissione luminosa 0,78 a una doppia vetrocamera (TGU) con trasmissione luminosa 0,69.

Tabella 2.3: Matrice delle simulazioni effettuate [38].

Sp. isolamento in EPS [mm]	45	70	100	135	200	245	300	400
Trasmittanza parete U [W/m <sup>2</sup> K]	0,30	0,25	0,21	0,18	0,14	0,12	0,10	0,08
Tipologia vetro	DGU	DGU	DGU	TGU	TGU	TGU	TGU	TGU

Il fattore di luce diurna, considerando la presenza di 100 mm di isolamento e aperture con vetrocamera singola è pari a 1,12% nelle zone 1 e 2, esposte a sud-est e sud-ovest mentre pari a 1,14% nelle zone 3 e 4, esposte a nord-est e nord-ovest.

L'aggiunta di isolamento in facciata fino a 400 mm e la sostituzione delle lastre con una doppia vetrocamera fa diminuire il fattore di luce diurna rispettivamente del 42% (zona 1 e 2) e del 44% (zona 3 e 4). All'aggiunta di isolamento in facciata consegue inoltre una diminuzione dell'area illuminata all'interno dell'ambiente.

Lo studio dimostra infatti che l'aggiunta di isolamento non maggiore di 150-200 mm risulta essere efficiente, al fine di bilanciare il miglioramento termico e il mantenimento al contempo di un adeguato comfort illuminotecnico. Uno spessore maggiore di 200 mm ha un'influenza significativa sulla riduzione del livello di luce diurna.

Medesime conclusioni sono state raggiunte dallo studio di Mangkuto et al. [33] il quale determina la variazione dei fattori di valutazione della luce naturale all'interno dell'edificio, in funzione della variazione dello spessore dell'isolamento applicato alla facciata da 0,05 m a 0,5 m. In tale studio viene considerato un ambiente di dimensioni di 6x4 m, di altezza pari a 3 m, con un'apertura di 3x1 m sul lato corto dell'ambiente.

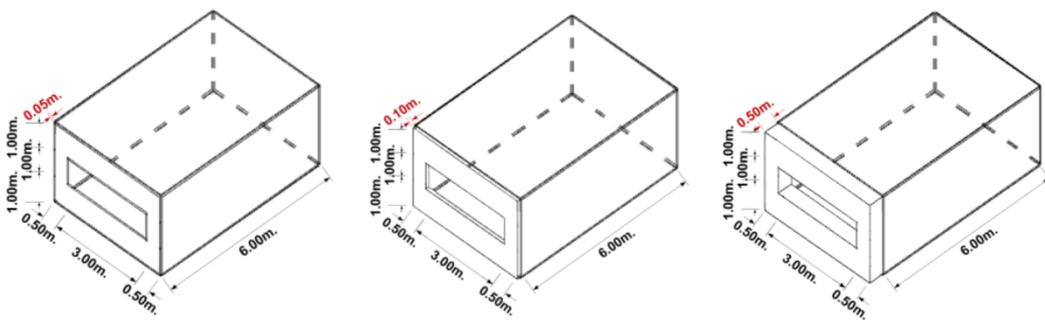


Figura 2.3: Identificazione dell'edificio di riferimento [33].

Lo studio definisce una relazione, specifica per il caso considerato, tra il fattore di luce diurna e lo spessore aggiuntivo in facciata, dalla quale si dimostra che per ogni aumento dello spessore pari a 0,05 m ci si aspetta una riduzione lineare di circa lo 0,235% del fattore di luce diurna. L'aggiunta dello spessore in facciata all'edificio non solo influenza il fattore di luce diurna ma porta ad una diminuzione dell'autonomia spaziale diurna, della

probabilità di abbagliamento e un aumento della domanda di energia richiesta per l'illuminazione.

Dallo studio di Lolli & Haase [36] sopra citato, considerando l'Edificio n.1 con anno di costruzione 1960, a parità di tipologia di finestra e di illuminamento, pari a 300 lux, l'aggiunta di isolamento termico alla parete, di spessore pari a 100 mm, fa diminuire l'autonomia diurna rispettivamente del 12% (considerando la finestra esistente,  $\tau=0,82$ ), del 24% (considerando la sostituzione con una vetrocamera avente  $\tau = 0,80$ ) e del 28% (considerando la sostituzione con una vetrocamera avente  $\tau = 0,71$ ).

Analogamente nell'Edificio n.3 con anno di costruzione precedente al 1900, l'aggiunta di 130 mm di isolamento in facciata riduce il valore medio di autonomia diurna del 45% ( $\tau = 0,75$ ), del 30% con ( $\tau = 0,80$ ) e del 40% ( $\tau = 0,71$ ). La maggiore riduzione dell'autonomia diurna, dell'Edificio n.3 rispetto all'Edificio n.1, è dovuta alla presenza su quest'ultimo di aperture solo su un orientamento.

#### 2.3.4 Orientamento delle aperture

La scelta dell'orientamento dell'edificio e delle aperture, sulla base alla latitudine e longitudine del sito, è fondamentale per garantire il risparmio energetico e la massima esposizione alla luce diurna.

L'esposizione delle aperture a nord permette un'illuminazione naturale, priva di radiazione diretta e molto uniforme durante l'arco della giornata, senza problemi di abbagliamento, non necessitando di schermature solari.

Le finestre esposte a sud ricevono maggiore luce e calore durante l'anno, sono esposte a raggi verticali d'estate e a raggi orizzontali in inverno, necessitando la progettazione di un sistema oscurante al fine di limitare l'irradiazione solare durante i mesi più caldi, che al contempo permetta la penetrazione di energia termica nei mesi freddi.

Le finestre esposte a est e a ovest rappresentano un compromesso tra irraggiamento solare e ombreggiamento, non presentando problematiche di abbagliamento.

Come descritto dai risultati degli studi analizzati precedentemente l'orientamento risulta essere rilevante solo nei confronti di alcuni parametri di valutazione della luce naturale all'interno.

Dagli studi di Mangkuto et al. [33] e Altan et al. [38] si intuisce che la condizione di cielo coperto, nel calcolo del Daylight Factor non permette di avere differenze sulla diminuzione del fattore di luce diurna legate all'orientamento. Quest'ultimo al contrario influenza i livelli di illuminamento, in condizioni di cielo sereno, e i guadagni solari [38]. A parità di spessore dell'isolamento in facciata si nota inoltre come l'area illuminata [ $m^2$ ] cambi in funzione dell'orientamento dell'ambiente dell'edificio considerato. In Figura 2.4 è riportata l'area illuminata per ogni zona, nelle condizioni di cielo sereno e con un livello di illuminamento interno maggiore di 150 lux. La simulazione viene svolta il 21 marzo ore 10.00.

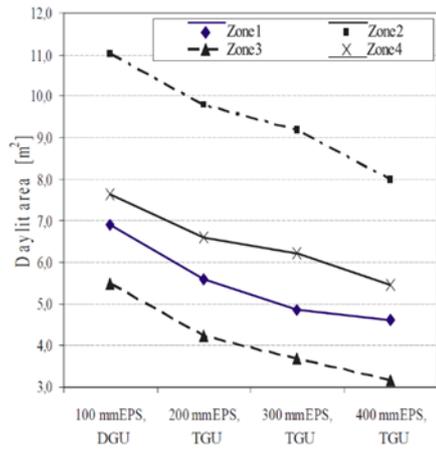


Figura 2.4: Area illuminata da illuminazione naturale in funzione dell'orientamento [38].

Tabella 2.4: Orientamento locali considerati [38].

Orientamento delle aperture	
Zona 1	Sud - Ovest
Zona 2	Sud - Est
Zona 3	Nord - Ovest
Zona 4	Nord - Est



## 3. Metodologia di indagine

Lo scopo della tesi è quello di evidenziare come un intervento di retrofit energetico sulla facciata esterna dell'edificio, attraverso l'adozione di un sistema a cappotto e la sostituzione dei serramenti, influenzi la presenza di luce naturale all'interno dell'ambiente. Nella presente sezione sono identificati l'edificio di riferimento, i relativi parametri di modellazione, e le modalità di definizione del modello su Grasshopper.

### 3.1 Definizione dell'edificio di riferimento

L'edificio assunto come riferimento è identificativo dell'arco temporale compreso tra il 1970 ed il 1980, periodo di più intensa attività edilizia in Italia. Il suddetto decennio risulta inoltre particolarmente rappresentativo perché caratterizzato da edifici fortemente energivori, data l'assenza in tale periodo storico di norme riguardanti l'efficienza energetica.

L'edificio è caratterizzato da chiusure opache verticali in mattoni forati dello spessore di 40 cm, in accordo con il progetto Tabula. Gli infissi, con telaio in legno e vetro singolo, sono posizionati dietro la mazzetta muraria posta in mezzera della parete.

#### 3.1.1 Geometria dell'ambiente

All'interno dell'edificio di riferimento sono considerati due diversi ambienti, con destinazione d'uso salotto e camera matrimoniale. Al fine di identificare la dimensione rappresentativa del locale all'interno dell'edificio nel periodo storico considerato è stata svolta un'analisi del parco immobiliare, prendendo in considerazione dieci edifici con periodo di costruzione 1970-1980, situati a Milano. La superficie delle abitazioni analizzate è compresa tra 60 m<sup>2</sup> e 99 m<sup>2</sup> ed è stato considerato un valore medio per la definizione della geometria dei singoli locali impiegati nella modellazione, come riportato nel dettaglio in seguito.

#### **Salotto**

Dalla media delle superfici considerate per il locale salotto, mostrate in Figura 3.1, si ottiene una superficie del locale identificativo pari a 20,40 m<sup>2</sup>, approssimato a 20,0 m<sup>2</sup>, con dimensioni 4x5 m e altezza 2,90 m.

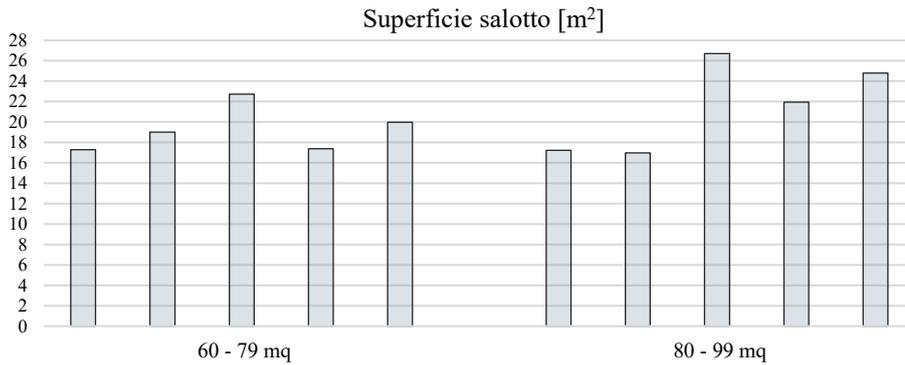


Figura 3.1: Superficie locale con destinazione d'uso salotto.

### Camera matrimoniale

Dalla media delle superfici considerate per il locale camera matrimoniale, mostrate in Figura 3.2, si ottiene una superficie del locale identificativo pari a  $15,3 \text{ m}^2$ , approssimato a  $15,0 \text{ m}^2$ , con dimensioni  $3,5 \times 4,285 \text{ m}$  e altezza  $2,90 \text{ m}$ .

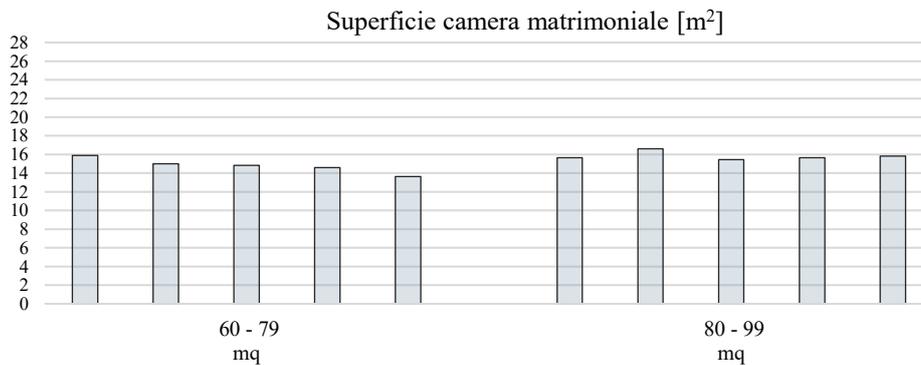


Figura 3.2: Superficie locale con destinazione d'uso camera matrimoniale.

### 3.1.2 Requisiti di illuminazione

La definizione della superficie finestrata dei locali è ripresa dalle prescrizioni normative presenti in materia di illuminazione naturale, che fanno riferimento al fattore medio di luce diurna e al rapporto aero-illuminante (RAI). Il Regolamento Edilizio della città di Milano [39], all'Articolo 105 "Requisiti di illuminazione naturale e diretta", comma 1, esplicita che:

*“L'illuminazione naturale diretta può essere del tipo perimetrale o zenitale o mista e nei locali agibili tale requisito si considera soddisfatto quando la superficie totale dell'apertura finestrata, misurata convenzionalmente alla luce architettonica detratta l'eventuale porzione ad altezza inferiore a 60 cm dal pavimento, sia pari ad almeno 1/10 della superficie di pavimento del locale interessato ed inoltre, per gli ambienti con destinazione residenziale, la distanza tra il serramento e il punto più distante da questo del pavimento di ogni singolo locale non superi 2,5*

volte l'altezza da terra del punto più elevato della superficie finestrata” [39].

Risulta inoltre significativo il comma 4 del medesimo Articolo, il quale esplicita:

“Nel caso in cui l'apertura finestrata sia coperta da sporgenze, (aggetti, velette, balconi, coperture, ecc.) superiori a 150 cm, calcolate per un'altezza  $p=L/2$  (ove  $p$ =proiezione della sporgenza sulla parete e  $L$ =lunghezza della sporgenza dall'estremo alla parete, calcolata dall'asse del serramento perpendicolarmente alla parete o formante un angolo di 45 gradi con questa) così come dallo schema esplicativo. La porzione di parete finestrata che - in base allo sviluppo grafico dello schema seguente - si verrà a trovare nella porzione "p" sarà considerata utile per 1/3 agli effetti illuminanti” [39].

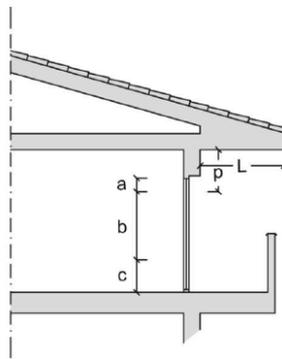


Figura 3.3: Schema esplicativo della superficie illuminante [39].

Dove:

- L: lunghezza dell'aggetto superiore;
- P: proiezione dell'aggetto =  $L/2$  si calcola solo per  $L > 150$  cm;
- a: superficie finestrata utile per 1/3 o 1/2 agli effetti dell'illuminazione;
- b: superficie utile agli effetti dell'illuminazione;
- c: superficie anche se finestrata, comunque, non utile ai fini dell'illuminazione (c = 60 cm).

La superficie finestrata utile è uguale a:  $b + 1/3 a$  o  $1/2 a$ .

Considerando il Regolamento Edilizio della città di Milano, per definizione, la superficie finestrata viene identificata dal rapporto tra la superficie del vano murario esterno e la superficie del pavimento. Essendo i serramenti posti dietro la mazzetta muraria, la superficie totale dell'apertura finestrata sarà comprensiva di una porzione del telaio fisso e del completo telaio mobile del serramento. Sono indicati in Tabella 3.1 e Tabella 3.2 i rapporti aero-illuminanti e le relative superfici finestrate considerate nelle simulazioni per il locale salotto e la camera matrimoniale.

Tabella 3.1: Superficie finestrata relativa al salotto.

Superficie pavimento [m <sup>2</sup> ]	RAI [-]	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]
20	1/10	2,00
20	1/8	2,50
20	1/6	3,33
20	1/4	5,00
20	1/3	6,67
20	1/2	10,00

Tabella 3.2: Superficie finestrata relativa alla camera matrimoniale.

Superficie pavimento [m <sup>2</sup> ]	RAI [-]	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]
15	1/10	1,50
15	1/8	1,875
15	1/6	2,50
15	1/4	3,75
15	1/3	5,00
15	1/2	7,50

Viene definito in Tabella 3.3 il valore di Window-to-Wall Ratio, ovvero il rapporto tra la superficie finestrata e la superficie della parete in cui si trova il serramento stesso.

Tabella 3.3: Window Wall Ratio.

RAI	WWR			
	Salotto		Camera matrimoniale	
	Lato sud	Lato ovest	Lato sud	Lato ovest
1/10	0,17	0,14	0,15	0,12
1/8	0,22	0,17	0,18	0,15
1/6	0,29	0,23	0,25	0,20
1/4	0,43	0,34	0,37	0,30
1/3	0,57	0,46	0,49	0,40
1/2	0,86	0,69	0,74	0,60

### 3.1.3 Altezza delle aperture

Al fine analizzare l'evoluzione del fattore medio di luce diurna sono state considerate, a parità di RAI, differenti altezze delle aperture, mostrate in Tabella 3.4.

Tabella 3.4: Altezza delle superfici finestate e relativa altezza del davanzale.

Altezza superficie finestrata [m]	Altezza del davanzale [m]
Finestre	
1,00	1,00
1,20	1,00
1,50	1,00
1,70	1,00
Porte finestre	
2,45	0,00

### 3.1.4 Numero di aperture

Per ogni valore di rapporto aero-illuminante saranno considerate diverse opzioni, differenziate per il numero di finestre considerato, prendendo in esame quattro differenti casi:

- presenza di 4 finestre;
- presenza di 3 finestre;
- presenza di 2 finestre;
- presenza di 1 finestra.

### 3.1.5 Sporgenza orizzontale

Un ulteriore parametro considerato è la presenza di un balcone in calcestruzzo, il quale costituisce una sporgenza orizzontale avente proiezione verso l'esterno pari a 1,40 m.

## 3.2 Interventi di retrofit energetico

### 3.2.1 Tipologia di serramento

Rispetto alla tipologia di serramento sono distinte due casistiche, di cui la prima prevede l'analisi dello stato di fatto, mentre per la seconda si considera la sostituzione del serramento. La tipologia di serramento più diffusa negli edifici analizzati e quindi impiegata per la modellazione è quella di vetro singolo con telaio in legno; per l'intervento di retrofit, invece, si prevede una vetrocamera a controllo solare, con telaio in PVC. L'impiego di PVC per il telaio garantisce migliori valori di isolamento rispetto ai materiali tradizionali, quali legno ed alluminio, permettendo così la riduzione dei consumi per il riscaldamento dell'ambiente interno.

Il valore di trasmittanza termica (U) massima delle chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti, comprensivi degli infissi, verso l'esterno e verso ambienti non climatizzati, soggette a riqualificazione per la zona climatica E, individuato nell'Allegato B del D.D.U.O. di Regione Lombardia n. 6480 del 30 luglio 2015, risulta essere 1,40 W/m<sup>2</sup>K [40]. Il valore del fattore di trasmissione solare totale per componenti finestrati con orientamento da est a ovest passando per sud, in presenza di schermatura mobile è pari a 0,35 [40].

#### **Serramento esistente**

Fino agli anni Settanta gli infissi erano realizzati con un'unica lastra di vetro, la quale forniva un bassissimo isolamento e poca protezione dall'ambiente esterno. Di conseguenza, per le simulazioni sono stati adottati un vetro con spessore pari a 4 mm e trasmittanza luminosa pari a 0,88 e un telaio in legno dello spessore di 55 mm.

## Serramento sostitutivo

Il vetro selettivo (o basso emissivo selettivo) viene realizzato attraverso un processo di “coating” o rivestimento di una delle due lastre della vetrocamera. Nei vetri selettivi il coating viene posto internamente alla lastra esterna del vetro camera, allo scopo di filtrare e respingere la radiazione termica entrante nell’edificio, evitando così il surriscaldamento negli ambienti durante la stagione estiva.

La trasmissione luminosa della vetrocamera a controllo solare è stata calcolata tramite il programma di calcolo *Pilkington Spectrum* [41]; tale software permette la composizione di diverse tipologie di vetrate e il calcolo delle prestazioni luminose ed energetiche secondo la norma EN 410. Il vetro scelto, come mostrato in Figura 3.4, è composto da due lastre dello spessore di 6 mm e un’intercapedine di 12 mm contenente argon (90%).

I vetri selezionati, partendo dalla lastra più esterna sono i seguenti:

- Lastra 1: Pilkington Suncool Clear, Annealed
- Lastra 2: Pilkington Optifloat Clear, Annealed

Dall’analisi della vetrocamera emerge un valore di trasmissione luminosa pari 0,65.

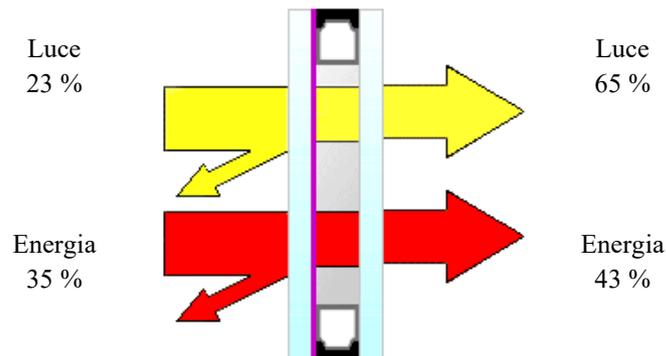


Figura 3.4: Rappresentazione vetro camera selettivo [41].

Il telaio considerato è in PVC dello spessore pari a 70 mm.

### 3.2.2 Sistema a cappotto

Per la valutazione dello spessore dell’isolamento applicabile in facciata è considerato lo spessore minimo per il raggiungimento del limite di trasmittanza della parete. Secondo quanto previsto dal Regolamento Edilizio di Milano la prestazione di trasmittanza della chiusura verticale deve rispettare i valori massimi definiti dall’Allegato B del D.D.U.O. di Regione Lombardia n. 6480 del 30 luglio 2015, pari a  $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$  per la zona climatica E [40].

Il valore della trasmittanza termica (U) per una determinata parete con  $n$  strati è calcolabile attraverso l’Equazione (3.1).

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_1^n \frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (3.1)$$

Dove:

- $\alpha_i$ : coefficiente di adduzione interno [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ];
- $\alpha_e$ : coefficiente di adduzione esterno [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ];
- $s_n$ : spessore dello strato della parete [m];
- $\lambda_n$ : conduttività di progetto del materiale [ $\text{W/mK}$ ].

La trasmittanza della parete allo stato di fatto, come identificato dal progetto Tabula è pari a  $1,26 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Tabella 3.5: Calcolo trasmittanza parete allo stato di fatto.

Stratigrafia	$\alpha$ [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]	s [m]	$\lambda$ [ $\text{W/mK}$ ]	U [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]
Interno	7,7			
Muratura in forati		0,4	0,64	1,26
Esterno	25			

Come mostrato in Tabella 3.6, al fine del raggiungimento del limite imposto è ritenuta necessaria una coibentazione della parete di spessore pari a 12 cm, realizzata mediante EPS, grazie a cui si ottiene una trasmittanza pari a  $0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Il sistema a cappotto viene risvoltato sulla spalletta della finestra per uno spessore pari a 1 cm. Allo spessore dell'isolamento è aggiunto uno strato di intonaco, composto da rasante e finitura esterna, con spessore pari a 1 cm

Tabella 3.6: Calcolo trasmittanza parete con l'aggiunta di isolamento esterno.

Stratigrafia	$\alpha$ [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]	s [m]	$\lambda$ [ $\text{W/mK}$ ]	U [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]
Interno	7,7			
Muratura in forati		0,4	0,64	
Isolamento termico in EPS		0,12	0,04	0,26
Esterno	25			

### 3.3 Definizione del modello

Il modello parametrico dell'ambiente è stato progettato con il software Grasshopper per Rhino, mentre per le analisi illuminotecniche sono utilizzati i Ladybug Tools, tra cui Honeybee e Ladybug. Honeybee permette infatti il collegamento di Grasshopper con ulteriori software e motori di calcolo quali EnergyPlus, Radiance, OpenStudio e Daysim al fine di svolgere simulazioni energetiche ed illuminotecniche, mentre Ladybug permette l'importazione in Grasshopper di file standard di EnergyPlus Weather.

### 3.3.1 Geometria dell'ambiente

La geometria dei due differenti ambienti è stata creata tramite il componente *Box 2Pt*, il quale permette la creazione di una geometria partendo da due punti nello spazio, definiti attraverso coordinate espresse in metri, e un piano di base. Il primo vertice è definito dalle coordinate (0, 0, 0) mentre il secondo vertice definisce le tre coordinate dell'ambiente (4, 5, 2.90) per il salotto e (3.5, 4.28, 2.9) per la camera matrimoniale. La geometria del locale viene creata al netto dello spessore delle chiusure opache verticali, le quali saranno definite in seguito.

Il successivo collegamento al componente *Mass2Zone* permette la trasformazione dell'ambiente in una zona avente le proprietà necessarie al fine di eseguire una simulazione energetica.

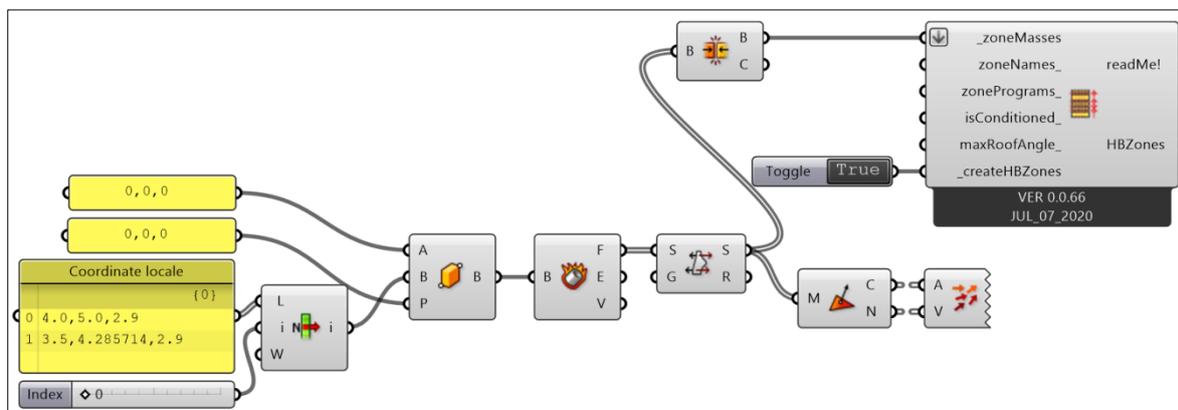


Figura 3.5: Definizione della geometria degli ambienti.

### 3.3.2 Geometria delle aperture

Definita la zona, si ha la creazione delle aperture tramite il componente *Glazing based on ratio*, il quale permette di generare un'apertura su una superficie o una zona di Honeybee basate sul rapporto tra la superficie finestrata e la parete ospitante l'apertura stessa. Il rapporto, definito precedentemente nella Tabella 3.3, viene assegnato come input per ogni parete dell'ambiente, definita dal proprio orientamento.

Nel caso in esame in Figura 3.6 le due liste di valori sono riferite all'ambiente salotto e rispettivamente la parete esposta a sud rappresenta la dimensione minore dell'ambiente, mentre la parete esposta ad ovest la dimensione maggiore.

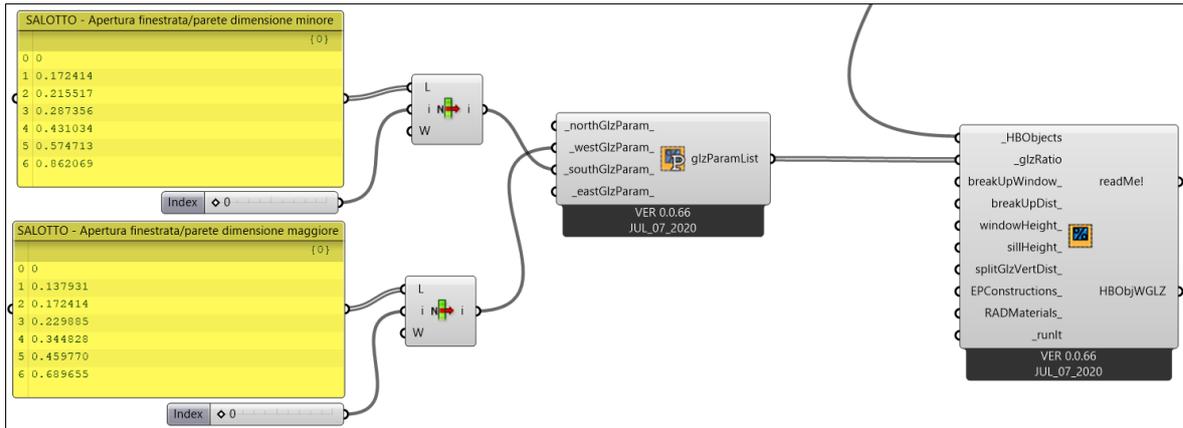


Figura 3.6: Definizione della superficie finestrata per l'ambiente salotto.

Ulteriori parametri assegnati al componente *Glazing based on ratio* sono la distanza tra le finestre, *Break Up Dist*, il quale permette di definire, a parità di area finestrata, un diverso numero di aperture presenti sulla facciata. Tali valori sono differenti a seconda della parete del locale che viene considerata. I valori da 0 a 3 della lista permettono rispettivamente la creazione di 4, 3, 2 ed 1 apertura.

Sono infine definite l'altezza dell'apertura, *Window Height*, e l'altezza del davanzale, *Sill Height*.

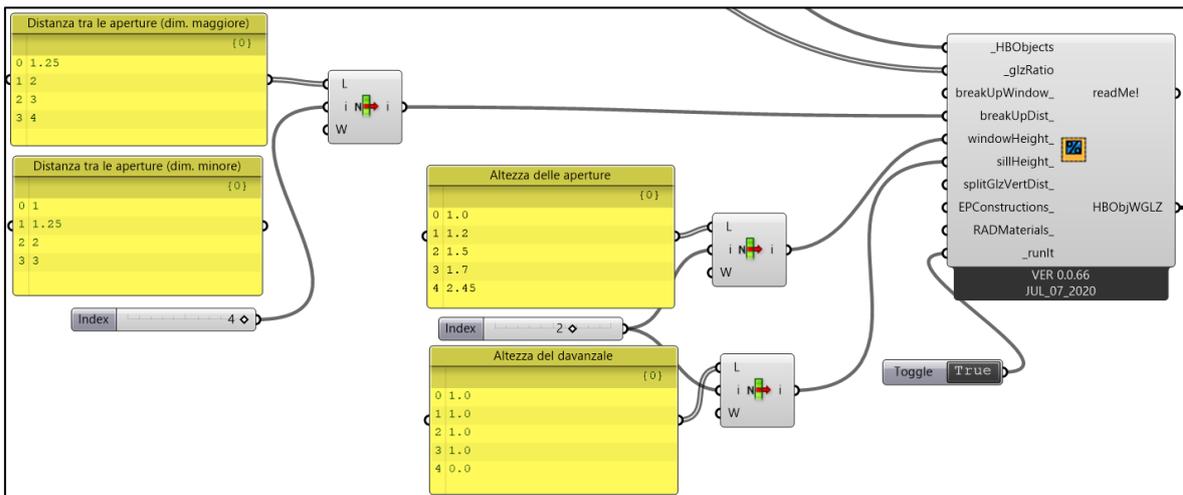


Figura 3.7: Definizione del numero di aperture, dell'altezza dell'apertura e dell'altezza del davanzale.

Il componente *Glazing based on ratio* da come output una nuova zona di Honeybee contenente le aperture create precedentemente.

In Figura 3.8 sono mostrate le possibili casistiche presenti al variare del parametro *Break Up Dist*, nel caso specifico viene considerato un rapporto aero-illuminante pari a 1/10 con aperture di altezza 1,50 m posizionate sul lato ovest dell'ambiente.

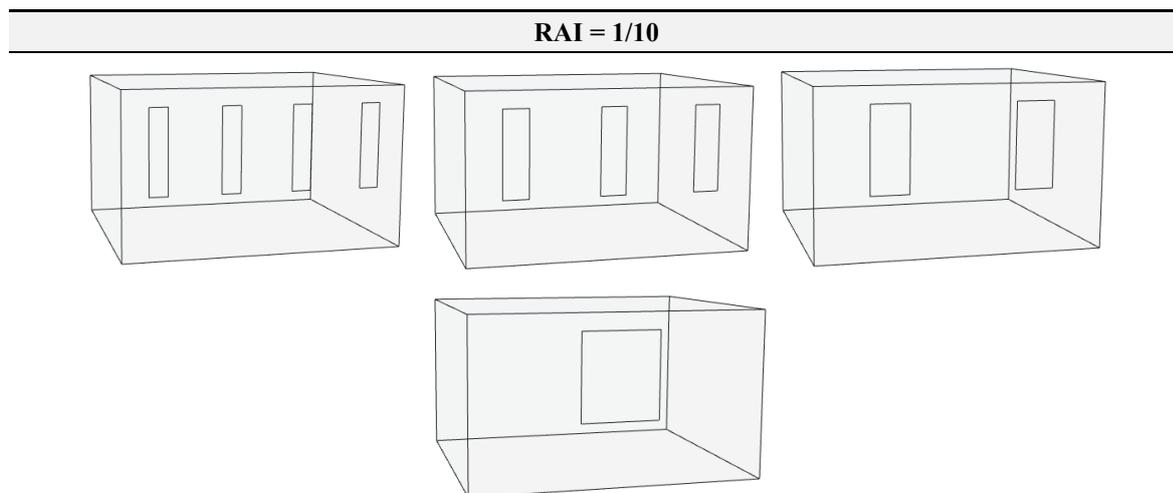


Figura 3.8: Esempio di casistiche differenziate dal numero di aperture presenti in facciata, definite dal parametro Break Up Dist.

In Figura 3.9 sono definite le casistiche in funzione dei parametri *Window Height* e *Sill Heigh*, mostrando a parità di rapporto aero-illuminante (1/10) le aperture con altezza rispettivamente 1,00 m, 1,20 m, 1,50 m e 2,45 m.

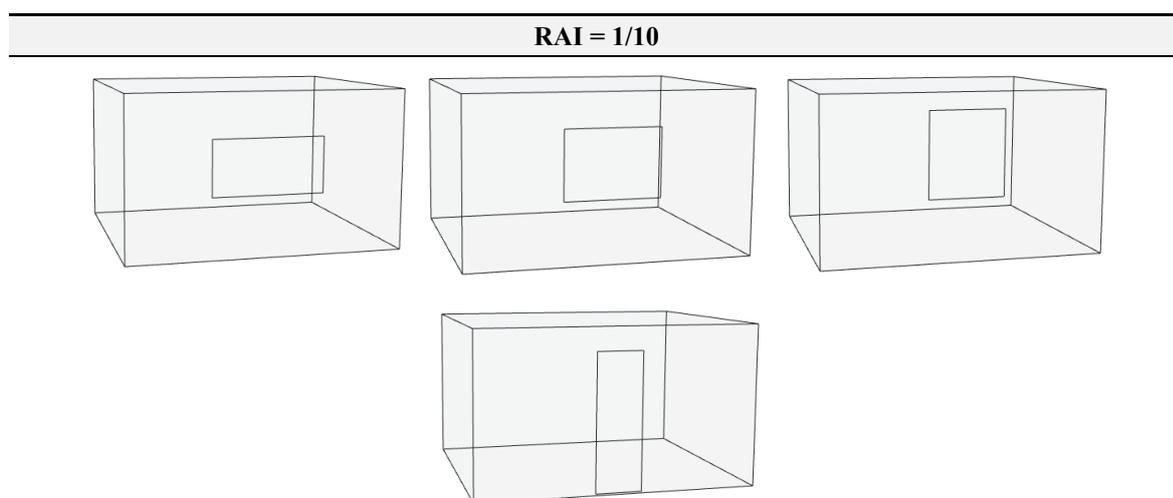


Figura 3.9: Esempio di casistiche differenziate dall'altezza delle aperture, definite dai parametri Window Height e Sill Height.

Le fasi successive alla creazione dell'ambiente e delle aperture sono la definizione del telaio fisso, del telaio mobile e della superficie vetrata del serramento. Il serramento, posizionato dietro la mazzetta muraria posta in mezzera della parete, definisce due vani murari, uno interno con larghezza maggiore ed uno esterno con larghezza minore. Il vano murario esterno comprenderà la superficie vetrata, il telaio mobile e solamente una porzione del telaio fisso, al contrario il vano interno comprenderà il telaio fisso completamente.

Attraverso il componente *Decompose Based On Type* la zona creata viene suddivisa in base alla tipologia di superficie considerata. In questo componente, il parametro *Windows*, perimetro dell'apertura creata precedentemente, coincide con il perimetro del vano murario esterno, il quale diviene la base per la creazione del telaio del serramento.

### **Telaio fisso**

La superficie del telaio fisso viene definita a partire dalla superficie del vano murario esterno. Attraverso l'operatore *Scale NU*, che permette di scalare le dimensioni di altezza e larghezza dell'apertura di due fattori differenti, viene determinata la porzione di telaio fisso come visto dall'esterno dell'edificio. Il telaio sarà infatti visibile per l'intera larghezza nei due lati orizzontali, pari a 0,06 m mentre solo per la porzione scoperta dalla mazzetta muraria per i lati verticali dell'apertura pari a 0,02 m. Il fattore di scala lungo l'asse x, per i due lati verticali del serramento, viene definito, sulla base della geometria dell'apertura, dall'Equazione (3.2).

$$\text{Fattore di scala}_{\text{asse x}} = \frac{(l - l_x)}{l} \quad [-] \quad (3.2)$$

Dove:

- l: larghezza dell'apertura;
- $l_x$ : larghezza totale del telaio lungo i due lati verticali.

Il fattore di scala lungo l'asse y, per i due lati orizzontali del serramento, viene definito, sulla base della geometria dell'apertura, dall'Equazione (3.3).

$$\text{Fattore di scala}_{\text{asse y}} = \frac{(h - l_y)}{h} \quad [-] \quad (3.3)$$

Dove:

- h: altezza dell'apertura;
- $l_y$ : larghezza totale del telaio lungo i due lati orizzontali.

Tale superficie sarà poi estrusa verso l'esterno dell'ambiente di uno spessore pari a +0,0375 m considerando il telaio in legno e di +0,045 m per il telaio in PVC. Le dimensioni del telaio sono inserite come dati di input attraverso *Panels*.

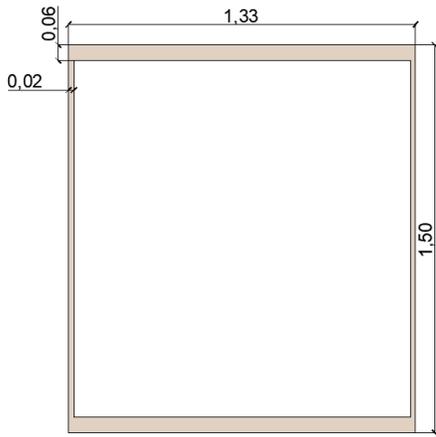


Tabella 3.7: Fattore di scala per la creazione del telaio fisso.

Fattore di scala asse x	0,97
Fattore di scala asse y	0,92

Figura 3.10: Telaio fisso visto dall'esterno dell'ambiente.

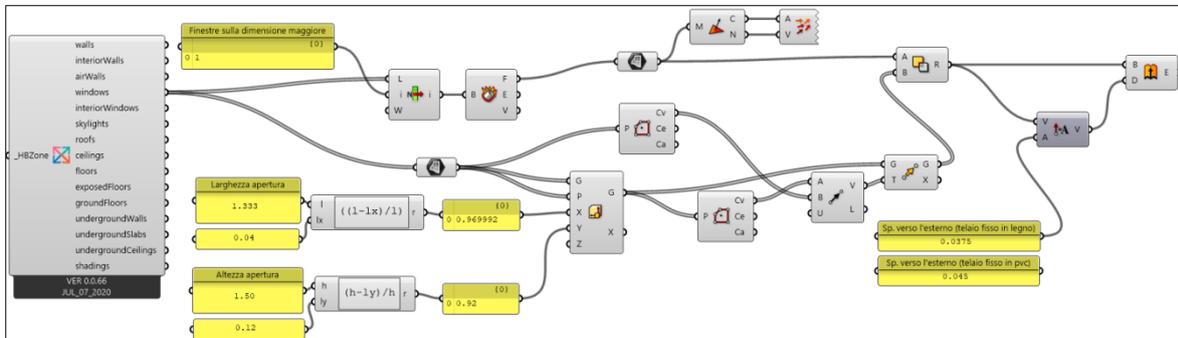


Figura 3.11: Definizione del telaio fisso visto dall'esterno dell'ambiente.

Successivamente, i due lati verticali vengono scalati anche verso l'esterno in modo da comprendere la superficie, prima esclusa, presente dietro la mazzetta muraria pari a 0,04 m per ciascun lato.

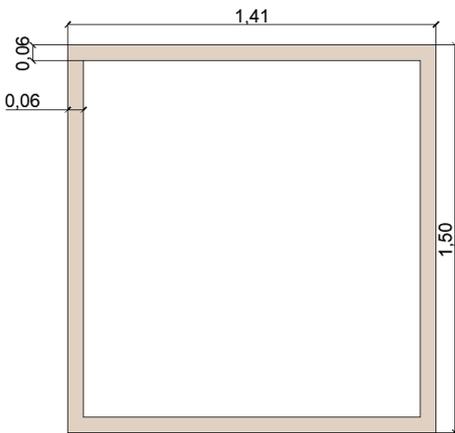


Tabella 3.8: Fattore di scala per la creazione del telaio fisso.

Fattore di scala asse x	1,06
-------------------------	------

Figura 3.12: Telaio fisso visto dall'interno dell'ambiente.

Tale superficie viene poi estrusa verso l'interno dell'ambiente di -0,0175 m per il telaio in legno e di -0,025 m per il telaio in PVC. Dalla somma dei due valori di estrusione, non

simmetrici, in modo da determinare successivamente lo sfasamento con il telaio mobile, si ottiene lo spessore totale del telaio, pari a 0,055 m per il legno e 0,070 m per il PVC.

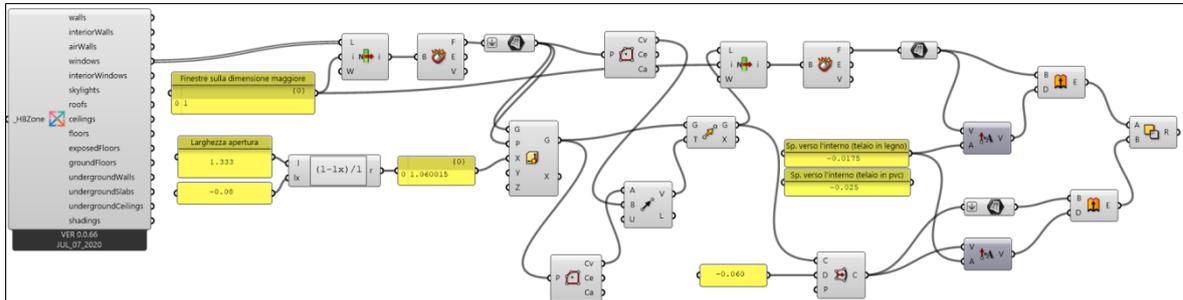


Figura 3.13: Definizione del telaio fisso visto dall'interno dell'ambiente.

Tramite il componente *Union Solid*, le due parti del telaio fisso vengono unite creando un unico componente.

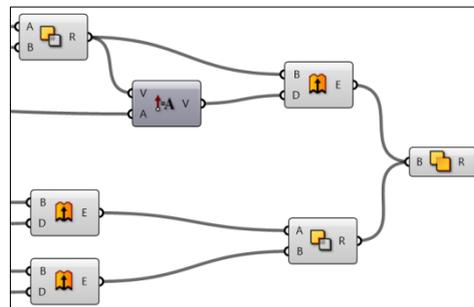


Figura 3.14: Definizione del telaio fisso.

### Telaio mobile

La creazione del telaio mobile si ha tramite un offset di 0,06 m dal perimetro interno del telaio fisso. Lo spessore di tale telaio viene definito tramite estrusione della superficie simmetricamente nelle due direzioni, di 0,0275 m per il telaio in legno e di 0,035 m per il telaio in PVC.

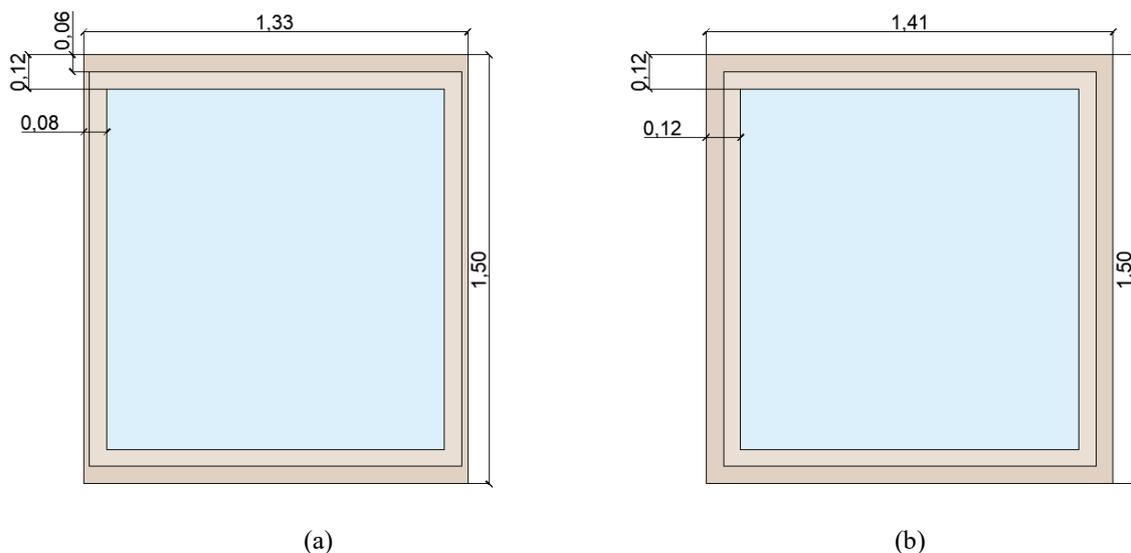


Figura 3.15: Telaio mobile visto dall'esterno (a) e dell'interno dell'ambiente (b).

Attraverso il componente *Mesh Surface* risulta possibile definire il numero di ante delle aperture considerate attraverso la creazione di montanti verticali (U) e orizzontali (V) di larghezza pari a 0,012 m come illustrato in Figura 3.16.

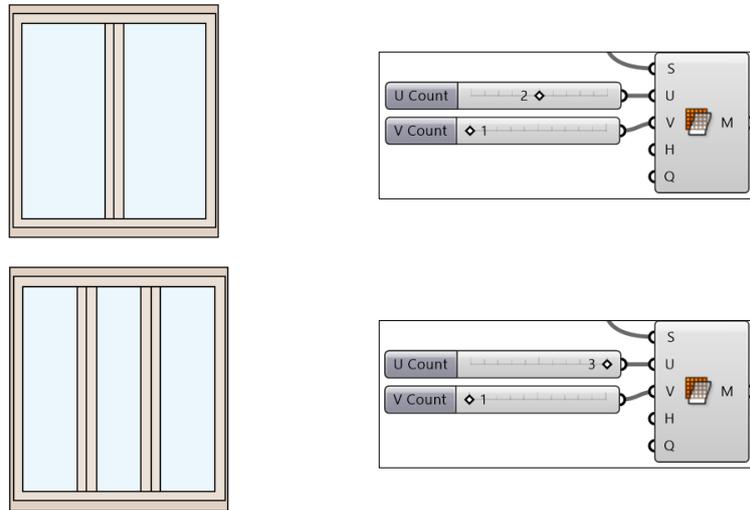


Figura 3.16: Definizione ante serramento.

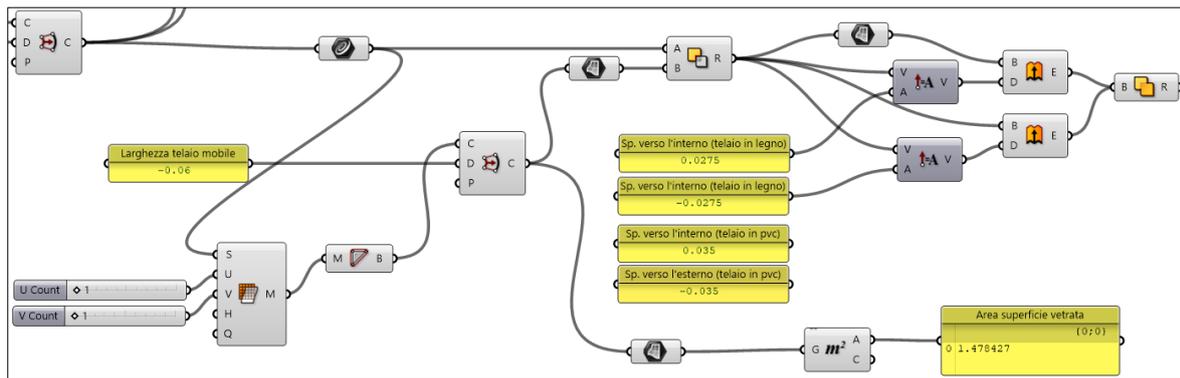


Figura 3.17: Definizione del telaio mobile.

I due componenti *Union Solid*, relativi al telaio fisso e mobile sono uniti creando un unico solido. Il componente Telaio viene quindi traslato in modo da porsi dietro la mazzetta muraria, posta in mezzera della chiusura opaca verticale.

Successivamente la geometria del telaio viene collegata al componente *Create HB Srfs*, il quale permette l'assegnazione a ciascun elemento di un valore di riflettanza luminosa e di creare una superficie che può essere inserita nel componente *Run Daylight Simulation*.

I valori di input di riflettanza assegnati al telaio, attraverso il componente *Radiance Opaque Material*, sono 0,1571 per il telaio in legno e 0,871 per il telaio in pvc. Tali valori sono selezionati dal software *Spectral material database* [42].

Tabella 3.8: Valori riflettanza telaio [42].

Elementi costruttivi	Riflettanza luminosa	Rendering sample
Telaio in legno	15,71%	
Telaio in PVC	87,07%	

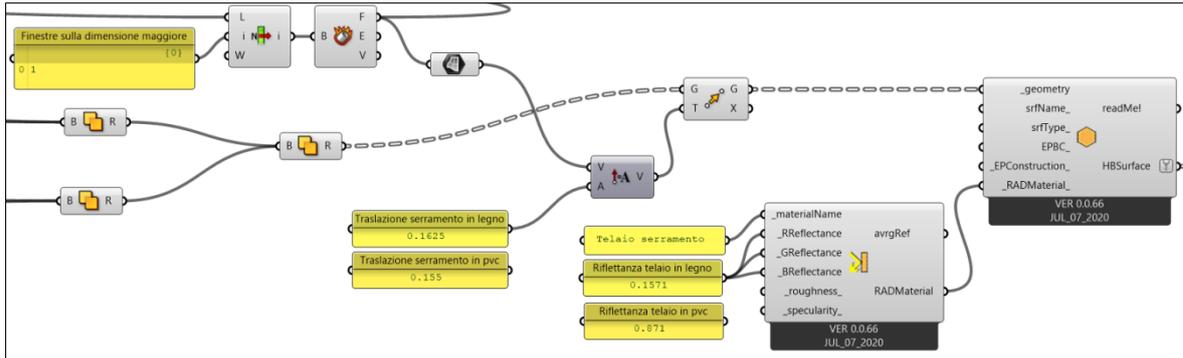


Figura 3.18: Definizione del componente Telaio.

### Superficie trasparente

L'area della superficie vetrata, posizionata in mezzeria del telaio mobile è definita dalla differenza tra la superficie del componente *Windows* e la somma delle superfici del telaio fisso e del telaio mobile. Attraverso il componente *Radiance Glass Material* sono assegnati i valori di trasmittanza luminosa del vetro, rispettivamente 0,88 per il vetro singolo e 0,65 per la vetro camera.

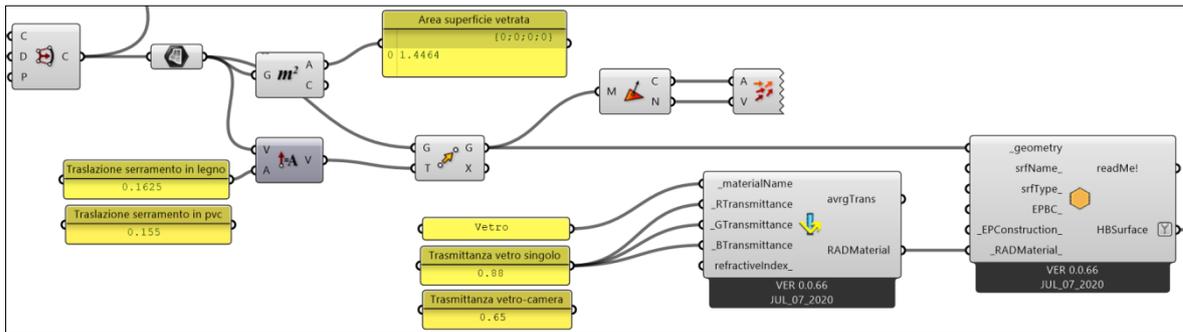


Figura 3.19: Definizione della superficie vetrata.

### 3.3.3 Chiusura opaca verticale

La chiusura opaca verticale ha spessore 0,40 m. Tale spessore viene generato come estrusione del foro murario tramite il componente *Extrude Windows*.

Lo spessore del muro viene suddiviso in due parti: una prima estrusione dello spessore di 0,20 m che rappresenta la parte del vano interna all'ambiente ed una seconda estrusione,

del medesimo spessore, che rappresenta la parte esterna del vano murario, la quale verrà tralata al fine di sommarsi alla prima.

### Vano murario esterno

Lo spessore pari a 0,20 m rappresenta l'imbotte esterna allo stato di fatto, mentre l'aumento di questo spessore fino a 0,33 m rappresenta l'aggiunta del sistema di coibentazione in facciata. Al vano murario esterno viene assegnato un valore di riflettanza luminosa pari a 0,5531.

Tabella 3.9: Valore riflettanza vano murario esterno [42].

Elementi costruttivi	Riflettanza luminosa	Rendering sample
Vano murario esterno	55,31%	

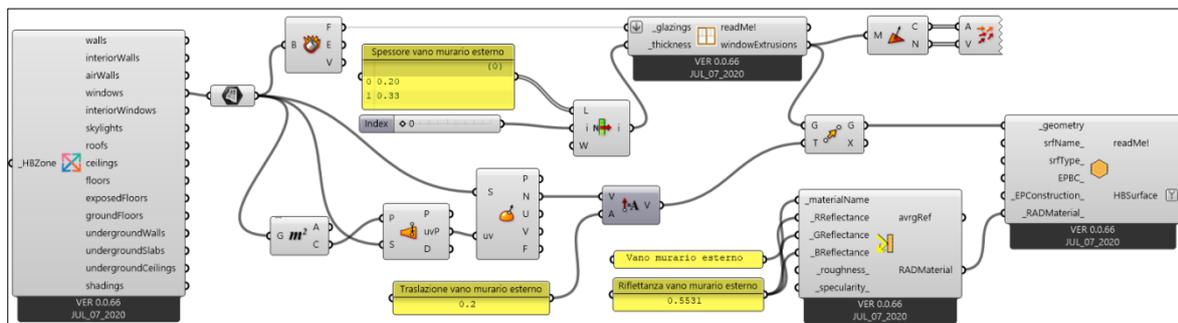


Figura 3.20: Definizione del vano murario esterno.

Dalla geometria del vano murario esterno si procede alla creazione del risvolto dell'isolamento, definito per estrusione verso l'interno delle due superfici verticali del vano dello spessore di 0,02 m, il quale avrà il medesimo valore di riflettanza del vano murario esterno.

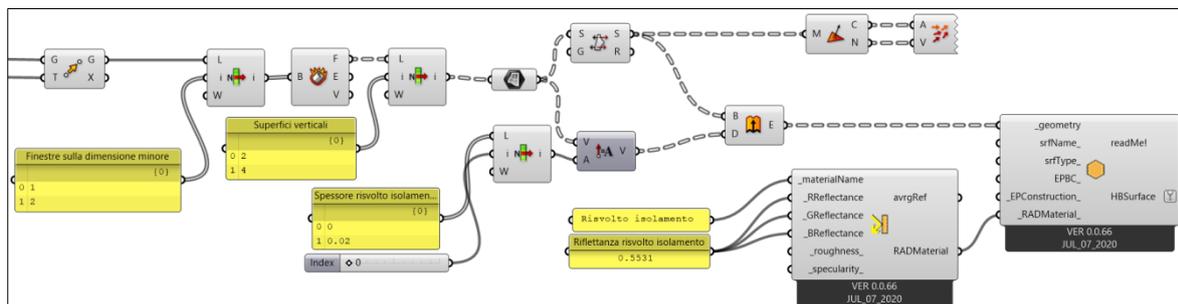
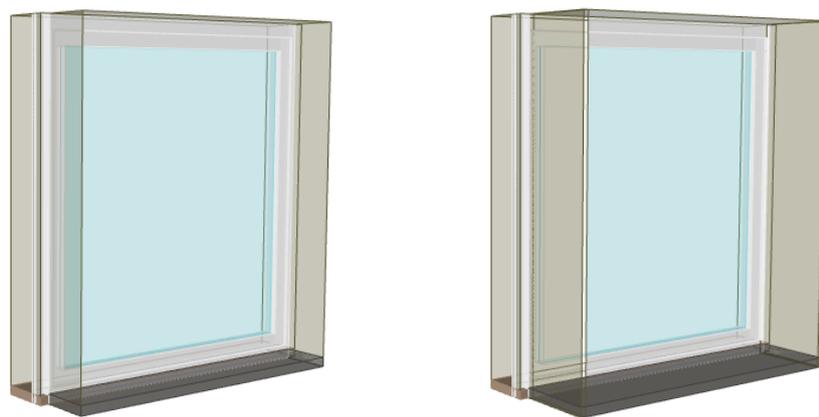


Figura 3.21: Definizione della coibentazione delle spallette.

Sempre tramite estrusione si ha la creazione del davanzale esterno in pietra, avente spessore 0,04 m e riflettanza pari a 0,2154.





(a)

(b)

Figura 3.24: Chiusura opaca verticale allo stato di fatto (a) e con la presenza di isolamento aggiuntivo e isolamento della spalletta (b).

### 3.3.4 Superfici interne

Successivamente sono definite le superfici interne del locale, per tali elementi del modello il componente *Flip* permette di invertire la normale della superficie, in modo da assegnare i valori di riflettanza alle superfici interne del locale.

I valori di riflettanza sono pari a:

- soffitto: 80%;
- pavimento: 30%;
- pareti interne: 50%.

Tali valori rispecchiano i valori presenti in letteratura e consigliati dalla normativa BS EN 17037, ovvero valori compresi tra 0,7 e 0,9 per il soffitto, tra 0,2 e 0,4 per il pavimento e tra 0,5 e 0,8 per le pareti interne.

#### Soffitto

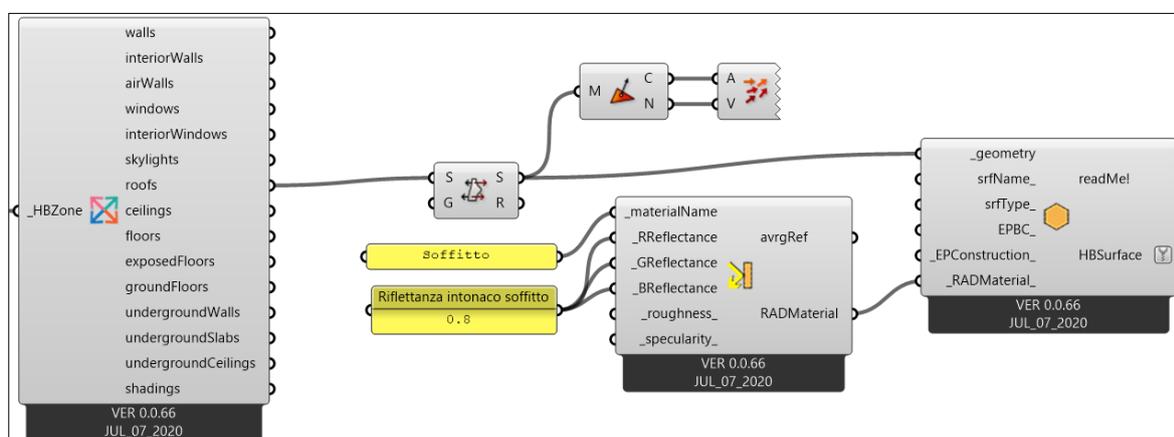


Figura 3.25: Definizione del soffitto.

## Pavimento

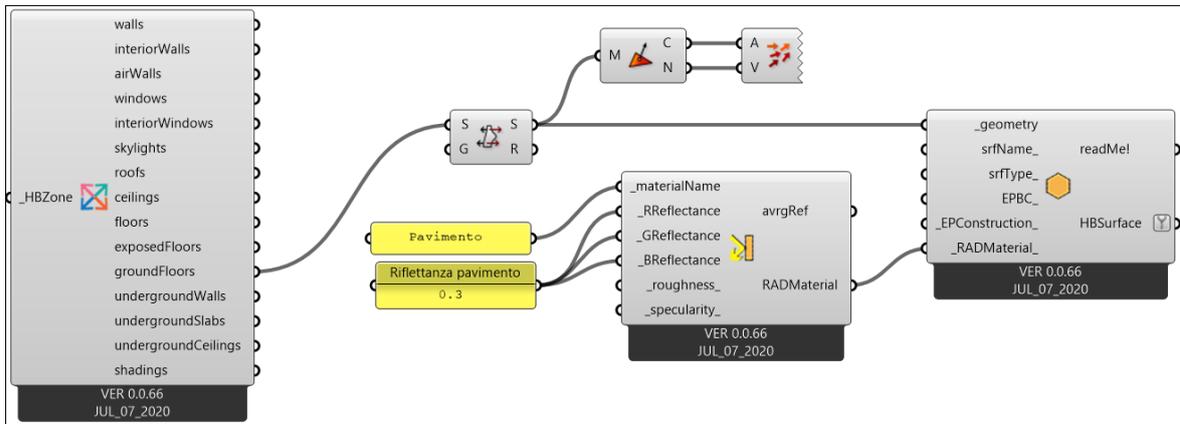


Figura 3.26: Definizione del pavimento interno.

## Pareti interne

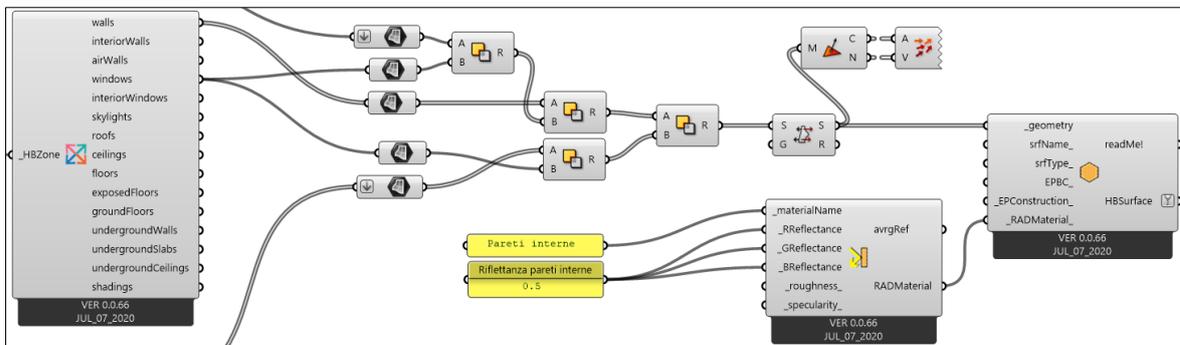


Figura 3.27: Definizione delle pareti interne.

### 3.3.5 Sporgenza orizzontale

Infine, viene definita la sporgenza orizzontale in calcestruzzo di larghezza pari a 1,40 m, con riflettanza pari a 0,3798%.

Tabella 3.12: Valore riflettanza avanzale interno in legno [42].

Elementi costruttivi	Riflettanza luminosa	Rendering sample
Sporgenza orizzontale	37,98%	

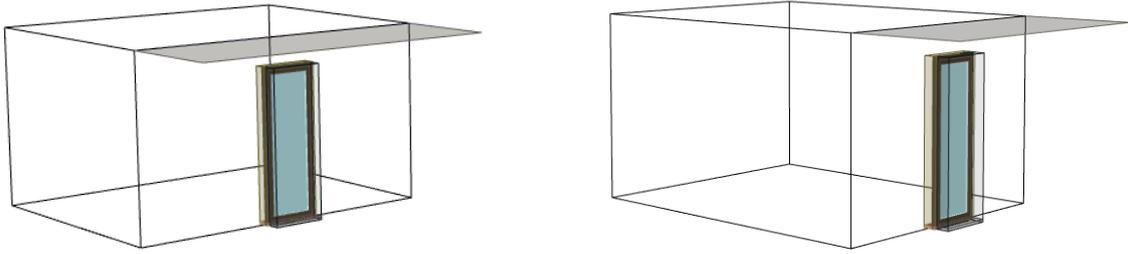


Figura 3.28: Sporgenza orizzontale.

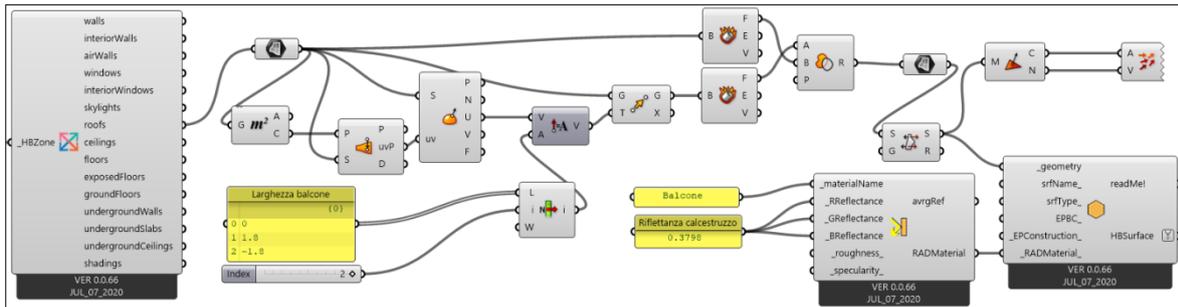


Figura 3.29: Definizione della sporgenza orizzontale.

### 3.4 Calcolo del fattore medio di luce diurna

Successivamente alla creazione dell'ambiente si procede al calcolo del fattore medio di luce diurna, attraverso il componente *Run Daylight Simulation*, al quale sono collegati tutti i componenti *Create HB Srf*s che costituiscono il modello.

A tale componente è collegata l'*Analysis Recipe for Daylight Factor Simulation*, che permette di identificare gli input per il calcolo del fattore medio di luce diurna. I valori di input per tale simulazione sono la definizione della griglia di calcolo, la definizione delle condizioni del cielo e la scelta dei Radiance Parameters.

Al fine di individuare i punti per il calcolo del fattore medio di luce diurna viene definita, attraverso i componenti *Daylight Factor Simulation* e *Generate Test Points*, una griglia di punti distanziati 0,25 m l'uno dall'altro e posta ad un'altezza di 0,76 m dal pavimento, definito come piano di lavoro. Viene determinato un margine pari a 0,50 m dal perimetro del pavimento, nella cui zona non vengono calcolati i dati di illuminamento. I punti totali del calcolo sono pari a 192 per il locale salotto e 130 per il locale camera matrimoniale.

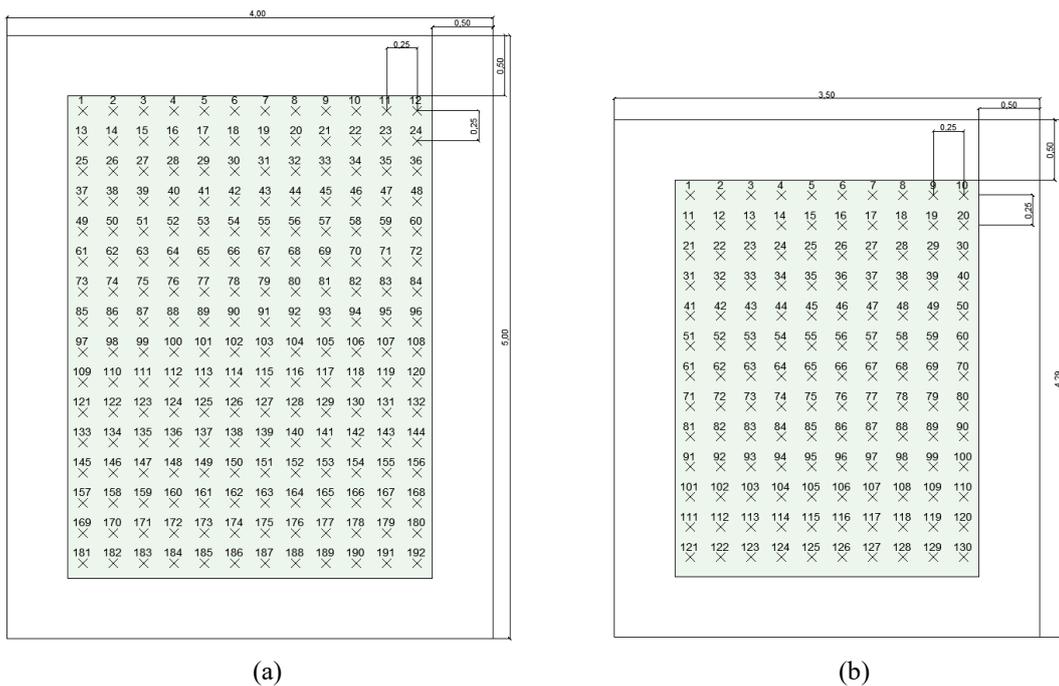


Figura 3.30: Griglia per il calcolo del  $FLD_m$  per il locale salotto (a) e per la camera matrimoniale (b).

Per il calcolo del fattore medio di luce diurna è identificata la tipologia di cielo coperto e viene collegato al componente *Generate Standard CIE Sky* il *Weather File*, contenente i dati climatici della città di Milano.

Infine, sono definiti i *Radiance Parameters* come nella Tabella 3.13, i quali specificano nella simulazione il comportamento della luce indiretta; un valore pari a 0 di tali fattori implicherebbe infatti l'assenza del calcolo indiretto.

Tabella 3.13: *Radiance Parameters* per il calcolo del FLD.

<b>Radiance Parameters</b>	<b>Valore</b>
Ambient bounces (ab)	7
Ambient division (ad)	1500
Ambient sampling (as)	100
Ambient accuracy (aa)	0,1
Ambient resolution (ar)	300

La definizione di tali parametri influenza notevolmente il tempo e la precisione delle simulazioni effettuate. Nella Tabella 3.14 sono identificati i valori dei parametri che portano ad avere un rendering da veloce “min” a un rendering avente massima precisione “max” [43].

Tabella 3.14: *Radiance Parameters* [43].

<b>Parametro</b>	<b>Descrizione</b>	<b>“Min”</b>	<b>“Fast”</b>	<b>“Accur”</b>	<b>“Max”</b>
ab	Ambient bounces	0	0	2	8
ad	Ambient division	0	32	512	4096
as	Ambient super-samples	0	32	256	1024
aa	Ambient accuracy	0,5	0,2	0,15	0

Parametro	Descrizione	“Min”	“Fast”	“Accur”	“Max”
ar	Ambient resolution	8	32	128	0

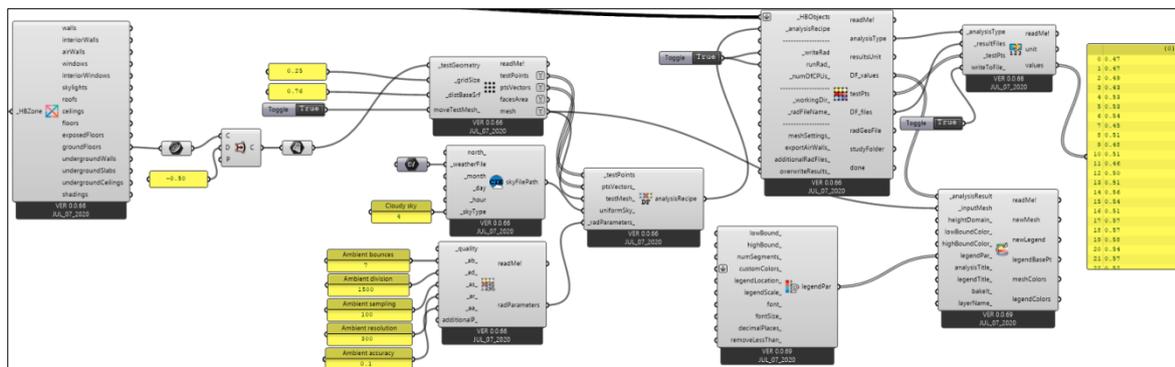


Figura 3.31: Definizione del calcolo del fattore medio di luce diurna.

### 3.5 Calcolo dei parametri climate-based

Analogamente, attraverso il componente *Run Daylight Simulation*, al quale sono collegati tutti i componenti *Create HB Srf*s che costituiscono il modello, Grasshopper permette il calcolo dei parametri climate-based, in particolare del fattore Daylight Autonomy (DA) e Useful Daylight Simulation (UDI).

A tale componente è collegata l'*Analysis Recipe for Annual Daylight Simulation*, che permette di identificare gli input per il calcolo dei parametri. I valori di input per tale simulazione sono la definizione della griglia di calcolo, la scelta dei Radiance Parameters e la definizione dei valori di illuminamento.

La griglia del calcolo risulta essere la medesima del fattore medio di luce diurna, avente punti distanziati 0,25 m l'uno dall'altro e posta ad un'altezza di 0,76 m dal pavimento.

I Radiance Parameter scelti sono i seguenti:

Tabella 3.15: Radiance Parameters per il calcolo dei parametri climate-based.

Radiance Parameters	Valore
Ambient bounces (ab)	6
Ambient division (ad)	2048
Ambient sampling (as)	50
Ambient accuracy (aa)	0,1
Ambient resolution (ar)	300

Il valore di soglia per il calcolo del fattore DA è pari a 300 lux. Il calcolo del fattore UDI viene eseguito dal software per valori di illuminamento minori di 100 lux, per valori compresi tra 100 e 2000 lux e per valori maggiori di 2000 lux. Il calcolo annuale tiene in considerazione il periodo di occupazione del locale salotto compreso dalle ore 8.00 alle ore 20.00.

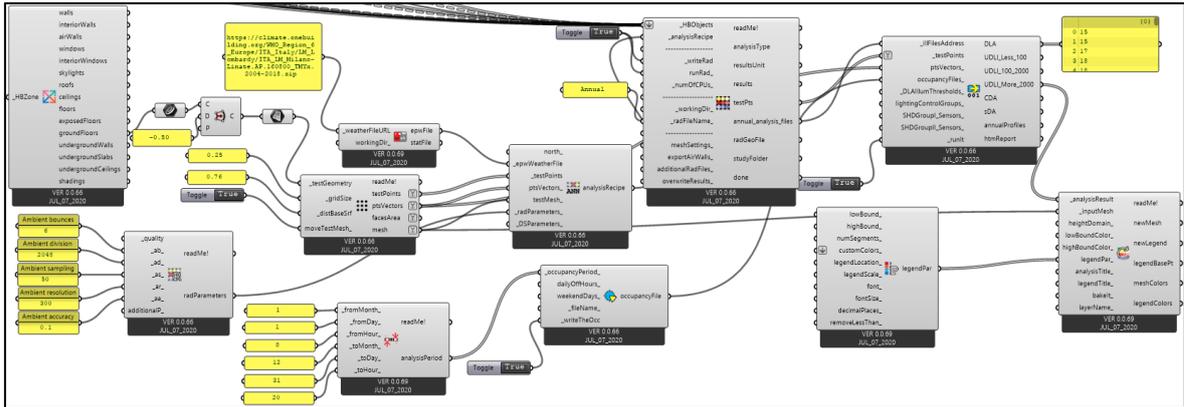


Figura 3.32: Definizione del calcolo dei parametri climate-based.



## 4. Risultati

Il modello definito al Capitolo 3 è stato impiegato per eseguire le simulazioni dei parametri di valutazione di disponibilità di luce diurna. Nel seguente capitolo le differenti casistiche considerate vengono codificate attraverso il sistema descritto in Tabella 4.1. Tale codice permette l'identificazione del locale considerato, della superficie finestrata attraverso il rapporto aero-illuminante, del numero e delle caratteristiche geometriche delle aperture. Sono poi indicati la presenza di un oggetto orizzontale e il possibile intervento attraverso azioni di retrofit.

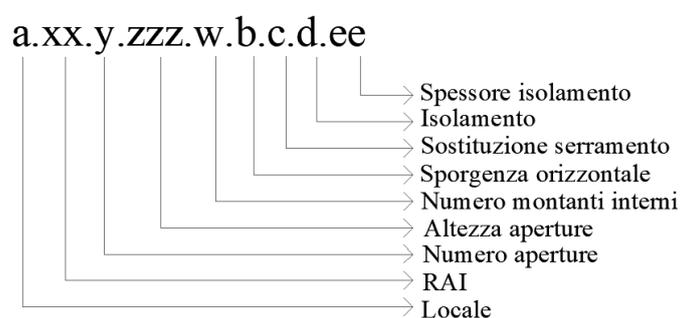


Tabella 4.1: Rappresentazione codice di classificazione.

a	Locale	L	Salotto (Living room)
		R	Camera matrimoniale (Room)
xx	RAI	10	1/10
		8	1/8
		6	1/6
		4	1/4
		3	1/3
		2	1/2
y	Numero di aperture	4	
		3	
		2	
		1	
zzz	Altezza delle aperture	100	
		120	
		150	
		170	
		245	
w	Numero di montanti interni	0	
		1	
		2	
		3	
b	Sporgenza orizzontale	N	Assenza di una sporgenza orizzontale
		B	Presenza di una sporgenza orizzontale

<b>c</b>	Serramento	E	Serramento esistente
		W	Sostituzione del serramento
<b>d</b>	Isolamento	U	Assenza di isolamento esterno
		I	Presenza di isolamento esterno
<b>ee</b>		13	Spessore di isolamento esterno <sup>2</sup>

Le simulazioni sono inizialmente svolte per l'edificio esistente allo stato di fatto, valutando singolarmente l'impatto sul fattore medio di luce diurna di ciascun parametro, quale il numero, l'altezza delle aperture, la presenza di una sporgenza orizzontale e la presenza di montanti interni al serramento. Successivamente è analizzato l'impatto sul FLDm delle singole azioni di retrofit e l'impatto della compresenza degli interventi sull'edificio.

Tutti i valori di FLDm delle simulazioni svolte e discusse nel seguente capitolo, accompagnati dalle caratteristiche geometriche delle casistiche considerate, quali altezza, larghezza e superficie trasparente totale dell'apertura, sono esposte nell'Appendice A per le simulazioni allo stato di fatto e nell'Appendice B per le simulazioni riguardanti le azioni di retrofit energetico.

## 4.1 Valutazione dello stato di fatto

### 4.1.1 Numero di aperture

In questa sezione è presentato l'effetto del numero di aperture sul valore del fattore medio di luce diurna, assumendo un'altezza delle aperture sempre pari a 1,50 m. Sono posti a confronto casi con il medesimo rapporto aero-illuminante, i cui valori adottati per la presente analisi sono 1/10, 1/8, 1/6 e 1/4. Le simulazioni sono eseguite per il locale salotto e per la camera matrimoniale, considerando il posizionamento delle aperture sia sulla dimensione maggiore dei locali, orientata a ovest, sia su quella minore, orientata a sud.

Il primo risultato che si osserva, dai dati evidenziati in Tabella 4.2 per il locale salotto, è la diminuzione del FLDm in seguito all'aumento del numero di aperture; ciò è dovuto alla modalità di calcolo della superficie finestrata per il RAI, in cui viene considerato anche il telaio. Ad un maggior numero di aperture corrisponde un rapporto perimetro/area più elevato e, di conseguenza, si riduce la superficie trasparente per fare spazio al telaio. La diversa configurazione porta, quindi, ad avere valori di FLDm minori, con riduzioni percentuali massime nel caso di RAI pari a 1/10 (-68%) e minime per RAI pari a 1/4 (-29%). Per rapporti aero-illuminanti maggiori, infatti, l'influenza del telaio sulla superficie totale è meno rilevante ed è possibile osservarne gli effetti nei valori di FLDm.

<sup>2</sup> La presenza del valore di spessore di isolamento esterno "ee" è presente all'interno del sistema di codificazione con la sola presenza dell'azione di retrofit di aggiunta dell'isolamento stesso.

Tabella 4.2: Influenza del numero di aperture sul FLDm per il locale salotto.

	FLDm Lato sud	FLDm Lato ovest		FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato sud	FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato ovest
Finestre					
L.10.1.150.0.N.E.U	1,95	2,04	L.10.4.150.0.N.E.U	0,63 (-68)	0,66 (-68)
			L.10.3.150.0.N.E.U	0,94 (-52)	0,98 (-52)
			L.10.2.150.0.N.E.U	1,34 (-32)	1,40 (-32)
L.8.1.150.0.N.E.U	2,51	2,65	L.8.4.150.0.N.E.U	1,08 (-57)	1,12 (-58)
			L.8.3.150.0.N.E.U	1,42 (-44)	1,48 (-44)
			L.8.2.150.0.N.E.U	1,84 (-27)	1,95 (-27)
L.6.1.150.0.N.E.U	3,42	3,64	L.6.4.150.0.N.E.U	1,88 (-45)	1,94 (-47)
			L.6.3.150.0.N.E.U	2,23 (-35)	2,34 (-36)
			L.6.2.150.0.N.E.U	2,68 (-22)	2,84 (-22)
L.4.1.150.0.N.E.U	4,92	5,44	L.4.4.150.0.N.E.U	3,50 (-29)	3,64 (-33)
			L.4.3.150.0.N.E.U	3,88 (-21)	4,05 (-26)
			L.4.2.150.0.N.E.U	4,29 (-13)	4,58 (-16)

Analoghe considerazioni risultano valide per i dati evidenziati in Tabella 4.3, per la camera matrimoniale.

Tabella 4.3: Influenza del numero di aperture sul FLDm per il locale camera matrimoniale.

	FLDm Lato sud	FLDm Lato ovest		FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato sud	FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato ovest
Finestre					
R.10.1.150.0.N.E.U	1,79	1,85	R.10.4.150.0.N.E.U	0,30 (-83)	0,32 (-83)
			R.10.3.150.0.N.E.U	0,63 (-65)	0,64 (-65)
			R.10.2.150.0.N.E.U	1,07 (-40)	1,13 (-39)
R.8.1.150.0.N.E.U	2,34	2,45	R.8.4.150.0.N.E.U	0,68 (-71)	0,70 (-71)
			R.8.3.150.0.N.E.U	1,07 (-54)	1,12 (-55)
			R.8.2.150.0.N.E.U	1,54 (-34)	1,63 (-34)
R.6.1.150.0.N.E.U	3,23	3,42	R.6.4.150.0.N.E.U	1,41 (-56)	1,44 (-58)
			R.6.3.150.0.N.E.U	1,83 (-43)	1,90 (-45)
			R.6.2.150.0.N.E.U	2,35 (-27)	2,48 (-28)
R.4.1.150.0.N.E.U	4,80	5,22	R.4.4.150.0.N.E.U	2,95 (-38)	3,05 (-42)
			R.4.3.150.0.N.E.U	3,41 (-29)	3,55 (-32)
			R.4.2.150.0.N.E.U	3,94 (-18)	4,15 (-21)

Dal confronto tra i valori ottenuti per i due locali emerge, come rappresentato nel Grafico 4.1 per l'esposizione a sud e nel Grafico 4.2 per esposizione a ovest, che i valori di FLDm, a parità di casistica considerata risultano maggiori per il locale salotto rispetto alla camera matrimoniale. Le differenze tra i due locali sono dovute al discostamento tra i valori di WWR, sempre maggiore per il locale salotto.

Inoltre, la presenza di un maggior numero di aperture, comporta un aumento della superficie del telaio rispetto alla superficie vetrata, la quale risulta essere maggiormente impattante per WWR minori.

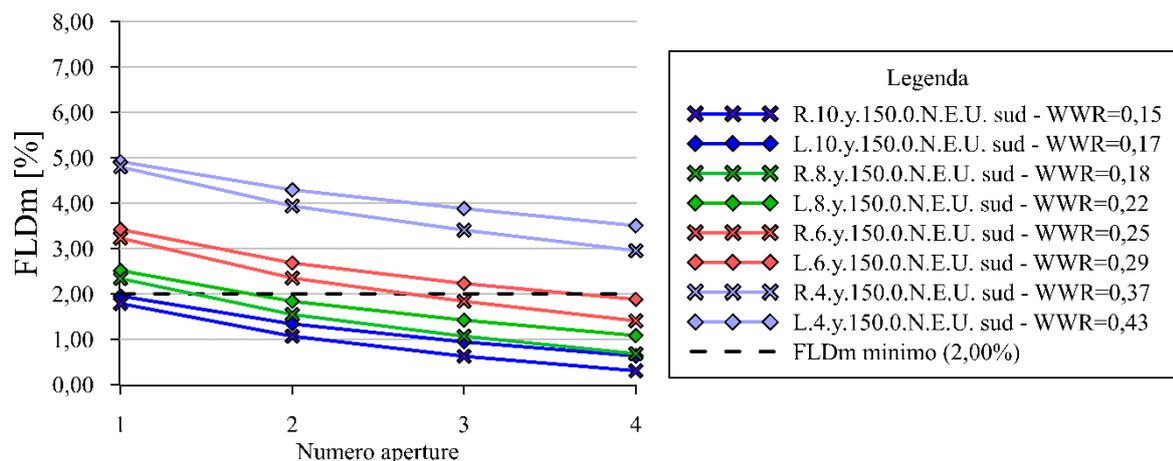


Grafico 4.1: Influenza del numero di aperture sul FLDm per il locale salotto (L) e camera matrimoniale (R) con esposizione aperture sud.

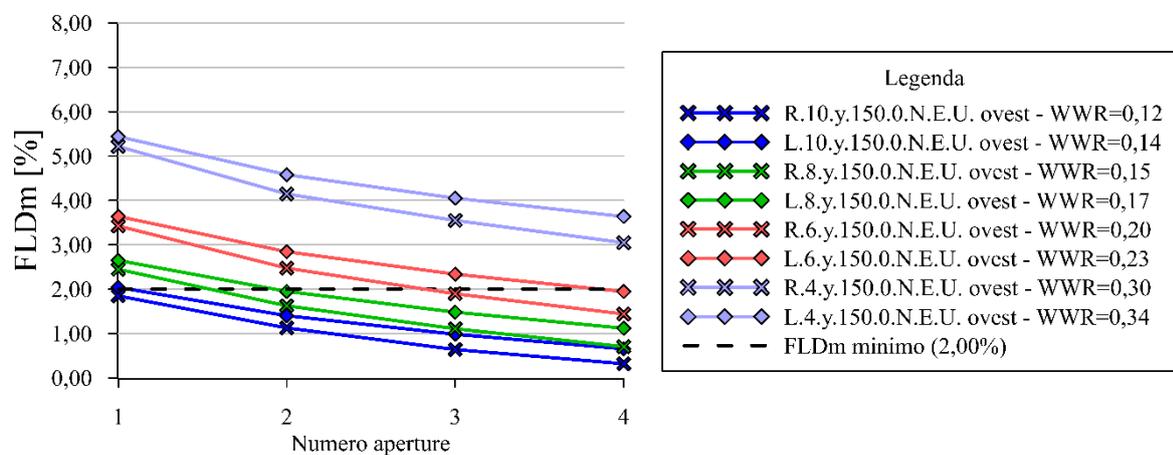


Grafico 4.2: Influenza del numero di aperture sul FLDm per il locale salotto (L) e camera matrimoniale (R) con esposizione aperture lato ovest.

È posto in rilievo, a parità del locale considerato, nel Grafico 4.3 per il locale salotto e nel Grafico 4.4 per la camera matrimoniale, la variazione di FLDm in funzione del differente orientamento. L'orientamento delle aperture non influenza il fattore medio di luce diurna; perciò, le differenze tra i due suddetti casi sono dovute al diverso valore di WWR che, per i locali esaminati, è maggiore quando le aperture sono collocate sulla dimensione minore. Nonostante ciò, per tutte le casistiche, i valori di FLDm risultano essere maggiori con presenza di aperture sulla dimensione maggiore dell'ambiente. Il posizionamento delle aperture sulla dimensione maggiore garantisce infatti, una maggior uniformità della distribuzione dell'illuminamento, data dalla minor profondità del locale.

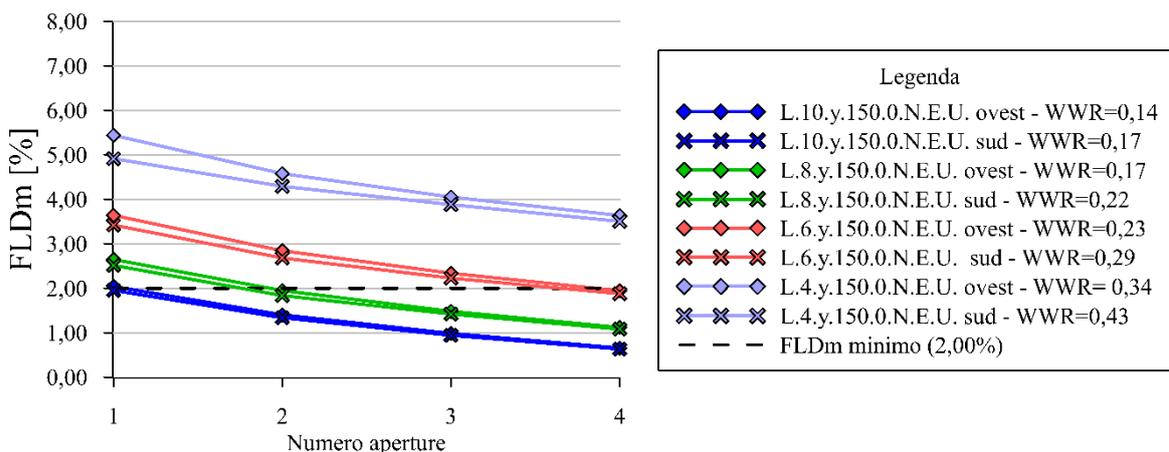


Grafico 4.3: Influenza del numero di aperture sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione aperture sud e ovest.

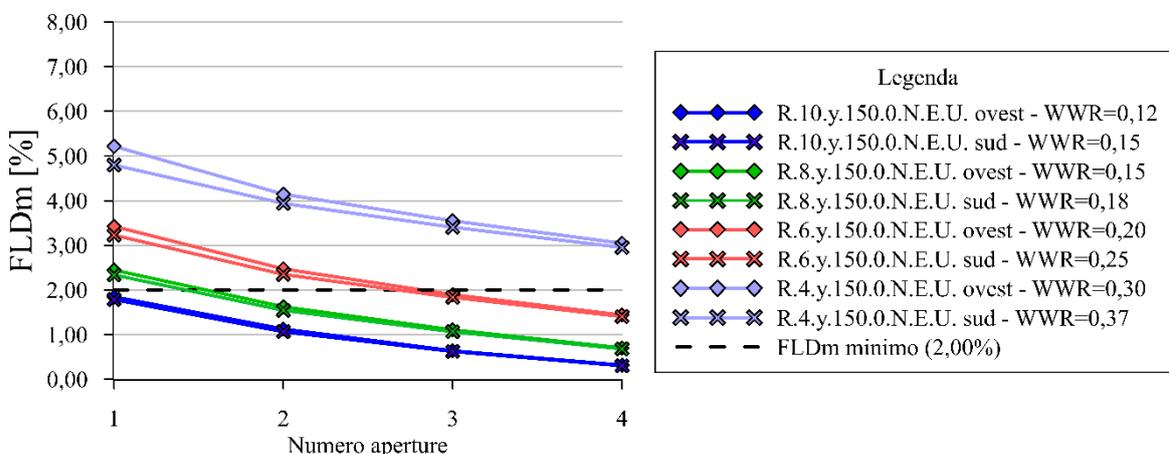
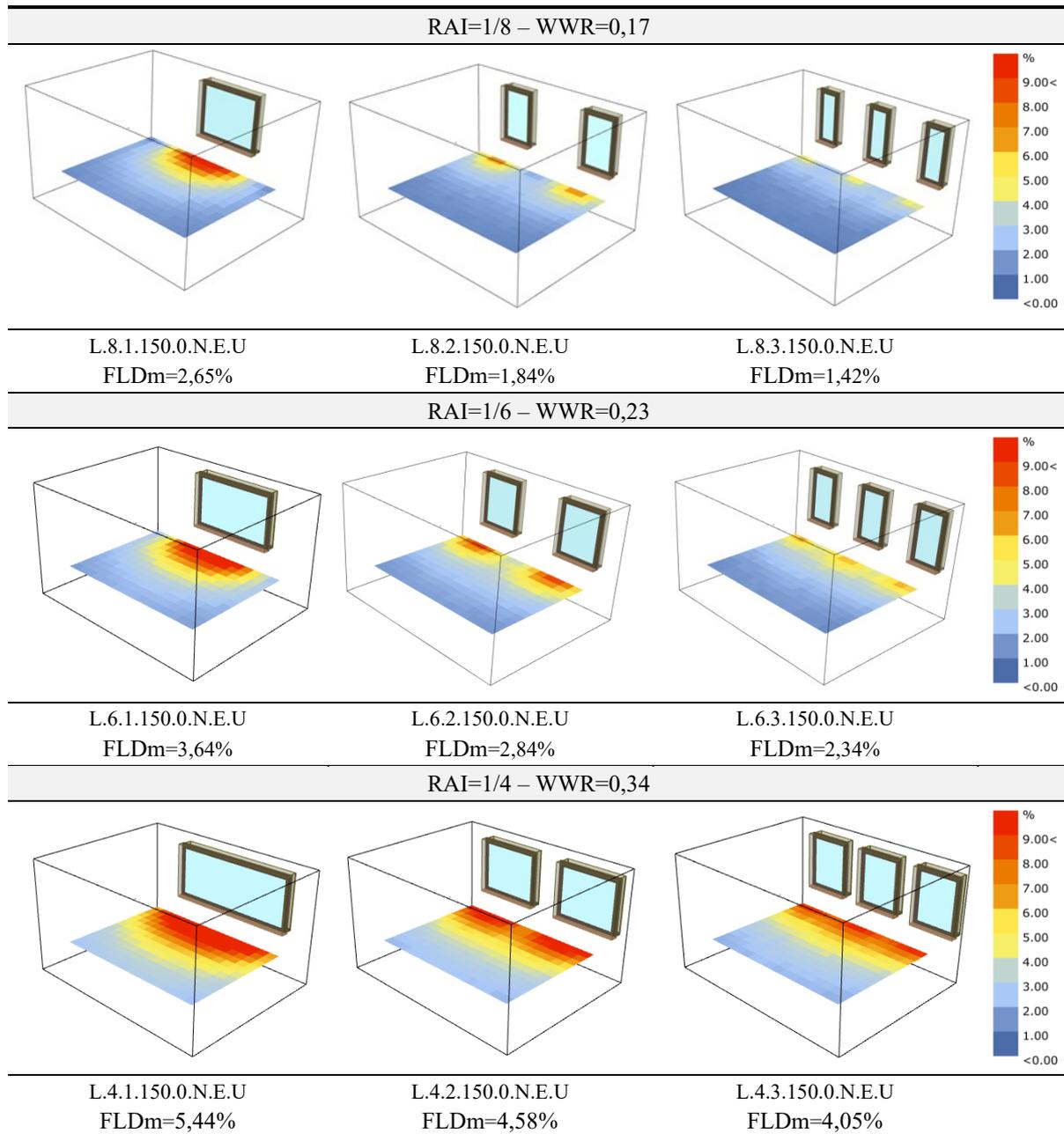


Grafico 4.4: Influenza del numero di aperture sul FLDm per il locale camera matrimoniale (R) con esposizione aperture sud e ovest.

Sono illustrate in Tabella 4.4 le differenti distribuzioni dei valori di FLDm per le casistiche aventi la presenza di un numero di aperture variabile da 1 a 3 per RAI pari ad 1/8, 1/6 ed 1/4. Emerge dalle immagini una diminuzione del fattore medio di luce diurna, con l'aumento del numero di aperture, data dalla riduzione della superficie trasparente.

Tabella 4.4: Influenza del numero di aperture sul FLDm per il locale salotto con esposizione aperture lato ovest.



È presentato di seguito l'effetto del numero di aperture sul valore del FLDm, in funzione dell'altezza delle stesse, considerata pari a 1,00 m, 1,20 m e 1,50 m. Sono posti a confronto casi aventi il medesimo rapporto aero-illuminante, i cui valori adottati sono 1/10, 1/8 e 1/6. Le simulazioni sono eseguite per il locale salotto considerando il posizionamento delle aperture sulla dimensione minore del locale, orientata a sud.

I dati presenti in Tabella 4.5 e il Grafico 4.5 mostrano come l'aumento dell'altezza dell'apertura risulti essere favorevole nelle casistiche aventi la presenza di una singola apertura e sfavorevole nei casi aventi la presenza di 4 aperture. Ciò è dovuto al rapporto

perimetro/area dell'apertura, il cui aumento porta ad una maggiore superficie del telaio a discapito della superficie trasparente. Per la singola apertura tale rapporto diminuisce per altezze maggiori, le quali garantiscono dunque una maggior superficie vetrata portando ad un aumento del FLDm. Al contrario per la presenza di più aperture tale rapporto diminuisce per altezza minori, le quali risultano quindi maggiormente vantaggiose.

Tabella 4.5: Influenza del numero di aperture sul FLDm per il locale camera matrimoniale in funzione dell'altezza.

	Sup. trasparente	FLDm lato sud		Sup. trasparente ( $\Delta\%$ )	FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato sud
Finestre					
L.10.1.100.0.N.E.U	1,40	1,72	L.10.4.100.0.N.E.U	1,03	0,85 (-50)
			L.10.3.100.0.N.E.U	1,16	1,05 (-39)
			L.10.2.100.0.N.E.U	1,28	1,30 (-24)
L.10.1.120.0.N.E.U	1,45	1,86	L.10.4.120.0.N.E.U	0,99	0,79 (-58)
			L.10.3.120.0.N.E.U	1,14	1,04 (-44)
			L.10.2.120.0.N.E.U	1,29	1,35 (-28)
L.10.1.150.0.N.E.U	1,48	1,95	L.10.4.150.0.N.E.U	0,87	0,63 (-68)
			L.10.3.150.0.N.E.U	1,08	0,94 (-52)
			L.10.2.150.0.N.E.U	1,28	1,34 (-32)
L.8.1.100.0.N.E.U	1,78	2,15	L.8.4.100.0.N.E.U	1,41	1,24 (-42)
			L.8.3.100.0.N.E.U	1,54	1,46 (-32)
			L.8.2.100.0.N.E.U	1,66	1,71 (-20)
L.8.1.120.0.N.E.U	1,85	2,35	L.8.4.120.0.N.E.U	1,39	1,22 (-48)
			L.8.3.120.0.N.E.U	1,54	1,49 (-37)
			L.8.2.120.0.N.E.U	1,69	1,81 (-23)
L.8.1.150.0.N.E.U	1,90	2,51	L.8.4.150.0.N.E.U	1,29	1,08 (-57)
			L.8.3.150.0.N.E.U	1,50	1,42 (-44)
			L.8.2.150.0.N.E.U	1,70	1,84 (-27)
L.6.1.100.0.N.E.U	2,41	2,74	L.6.4.100.0.N.E.U	2,21	1,92 (-30)
			L.6.3.100.0.N.E.U	2,17	2,14 (-22)
			L.6.2.100.0.N.E.U	2,29	2,38 (-13)
L.6.1.120.0.N.E.U	2,51	3,11	L.6.4.120.0.N.E.U	2,05	1,96 (-37)
			L.6.3.120.0.N.E.U	2,21	2,24 (-28)
			L.6.2.120.0.N.E.U	2,36	2,56 (-18)
L.6.1.150.0.N.E.U	2,60	3,42	L.6.4.150.0.N.E.U	1,99	1,88 (-45)
			L.6.3.150.0.N.E.U	2,20	2,23 (-35)
			L.6.2.150.0.N.E.U	2,40	2,68 (-22)

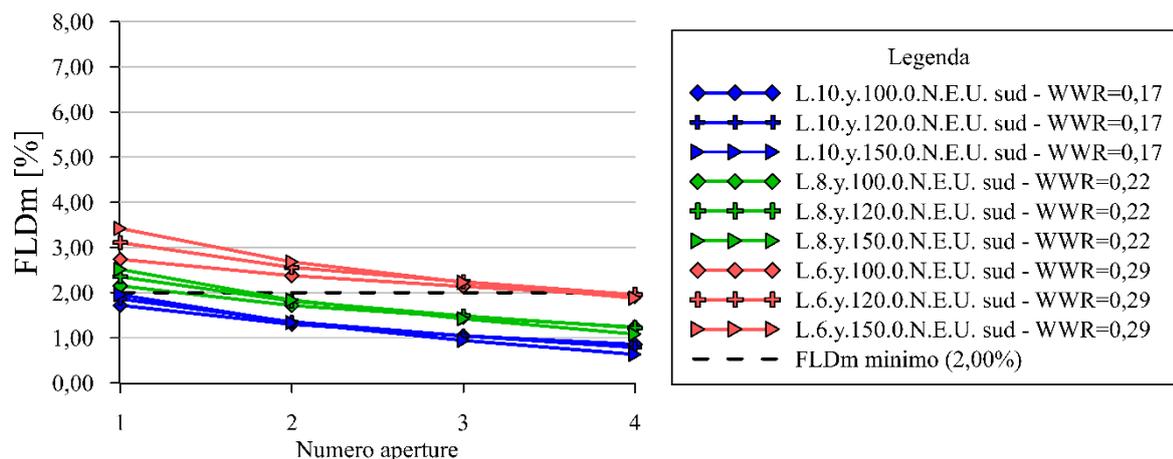


Grafico 4.5: Influenza del numero di aperture sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione sud in funzione dell'altezza delle aperture.

#### 4.1.2 Altezza delle aperture

In questa sezione è presentata l'influenza dell'altezza delle aperture sul fattore medio di luce diurna, assumendo la presenza di un'unica apertura. Sono posti a confronto i casi con il medesimo rapporto aero-illuminante, i cui valori adottati per la presente analisi sono 1/10, 1/8 ed 1/6. Le simulazioni sono eseguite per il locale salotto e per la camera matrimoniale, considerando il posizionamento delle aperture sia sulla dimensione maggiore dei locali, orientata a ovest, sia su quella minore, orientata a sud.

In tale valutazione sono considerate aperture aventi altezza pari a 1,00 m, 1,20 m, 1,50 m, 1,70 m e 2,45 m.

Si nota che il Regolamento Edilizio di Milano considera la superficie totale dell'apertura finestrata, misurata convenzionalmente alla luce architettonica, con la detrazione dell'eventuale porzione ad altezza inferiore a 60 cm dal pavimento. Per tale motivo, considerando un rapporto aero-illuminante pari a 1/10 ed 1/8 l'apertura finestrata di altezza pari a 2,45 m non risulta essere sufficiente per entrambi i locali considerati dallo studio. Al contrario un RAI pari a 1/6, come mostrato in Figura 4.1, permette alle porte finestre nei due locali di garantire una superficie finestrata minima, pari a 2,00 m<sup>2</sup> per il salotto e 1,50 m<sup>2</sup> per la camera matrimoniale. In tale paragrafo viene considerata tuttavia la presenza di porte finestre per RAI minori di 1/6 al fine di analizzare l'andamento del fattore medio di luce diurna.

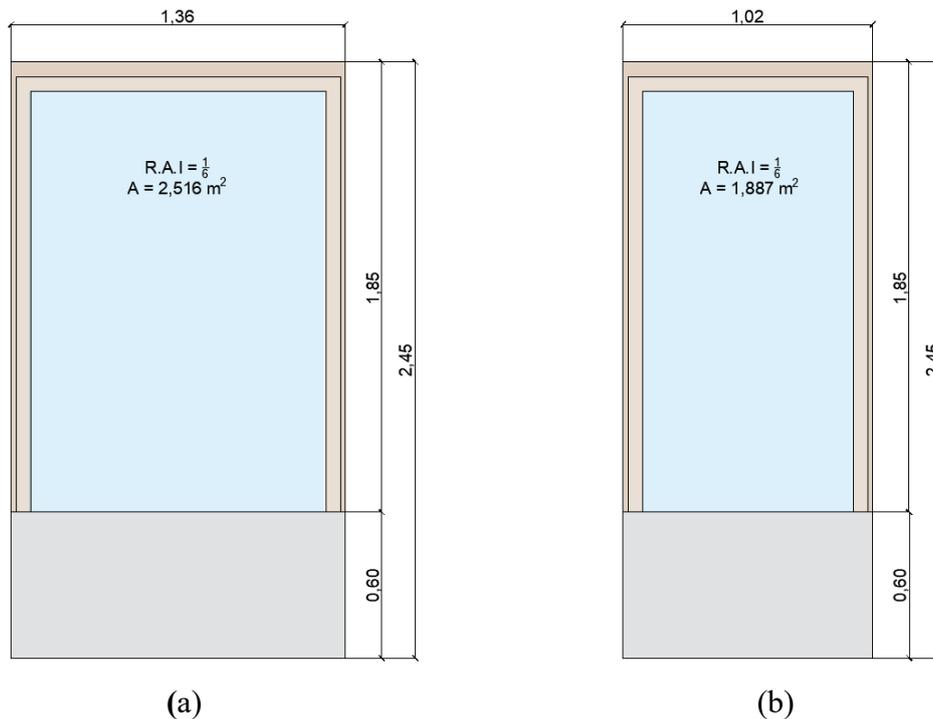


Figura 4.1: Dimensione porta finestra minima considerata al fine del calcolo del fattore medio di luce diurna per il locale salotto (a) e la camera matrimoniale (b).

Il primo risultato che si osserva, dai dati evidenziati in Tabella 4.6 per il locale salotto, è l'incremento del FLDm in funzione dell'aumento dell'altezza dell'apertura da 1,00 m ad 1,70 m, il quale risulta minimo per RAI pari a 1/10 (+13%) e massimo per RAI pari a 1/6 (+28%). Tale incremento del valore di FLDm risulta essere connesso alla diminuzione del rapporto perimetro/area della singola apertura e al conseguente aumento delle superficie trasparente a discapito della superficie del telaio. Inoltre, la differente forma dell'apertura ne modifica l'interazione con l'emisfero; per le finestre aventi altezza maggiore, l'affaccio alla porzione più alta della volta celeste risulta agevolato, e di conseguenza, si ha un migliore accesso alla luce naturale.

Al contrario la presenza di una portafinestra, con altezza pari a 2,45 m, porta ad una riduzione del FLDm, a causa della maggiore disomogeneità della distribuzione dei valori di FLDm.

Tabella 4.6: Influenza dell'altezza delle aperture sul FLDm per il locale salotto.

	FLDm Lato sud	FLDm Lato ovest		FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato sud	FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato ovest
			Finestre		
			L.10.1.120.0.N.E.U	1,86 (+8)	1,96 (+8)
L.10.1.100.0.N.E.U	1,72	1,81	L.10.1.150.0.N.E.U	1,95 (+14)	2,04 (+13)
			L.10.1.170.0.N.E.U	1,97 (+15)	2,04 (+13)
			L.8.1.120.0.N.E.U	2,35 (+10)	2,51 (+9)
L.8.1.100.0.N.E.U	2,15	2,32	L.8.1.150.0.N.E.U	2,51 (+17)	2,65 (+14)
			L.8.1.170.0.N.E.U	2,56 (+19)	2,68 (+16)
L.6.1.100.0.N.E.U	2,74	3,05	L.6.1.120.0.N.E.U	3,11 (+14)	3,39 (+11)

	FLDm Lato sud	FLDm Lato ovest		FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato sud	FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato ovest
			L.6.1.150.0.N.E.U	3,42 (+25)	3,64 (+20)
			L.6.1.170.0.N.E.U	3,51 (+28)	3,71 (+22)
Porte finestre					
L.10.1.100.0.N.E.U	1,72	1,81	L.10.1.245.0.N.E.U	1,24 (-28)	1,28 (-29)
L.8.1.100.0.N.E.U	2,15	2,32	L.8.1.245.0.N.E.U	1,67 (-22)	1,73 (-25)
L.6.1.100.0.N.E.U	2,74	3,05	L.6.1.245.0.N.E.U	2,37 (-13)	2,47 (-19)

I valori relativi alla camera matrimoniale sono presentati in Tabella 4.7. Differentemente dal locale salotto, il passaggio dell'altezza dell'apertura da 1,50 m ad 1,70 m per RAI pari a 1/10, porta ad una diminuzione del FLDm, data dalla diminuzione della superficie trasparente dell'apertura, in seguito alla conformazione del telaio stesso.

Tabella 4.7: Influenza dell'altezza delle aperture sul FLDm per il locale camera matrimoniale.

	FLDm Lato sud	FLDm Lato ovest		FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato sud	FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato ovest
Finestre					
			R.10.1.120.0.N.E.U	1,74 (+6)	1,82 (+6)
R.10.1.100.0.N.E.U	1,63	1,73	R.10.1.150.0.N.E.U	1,79 (+10)	1,85 (+7)
			R.10.1.170.0.N.E.U	1,76 (+8)	1,83 (+6)
			R.8.1.120.0.N.E.U	2,23 (+8)	2,37 (+7)
R.8.1.100.0.N.E.U	2,06	2,22	R.8.1.150.0.N.E.U	2,34 (+14)	2,45 (+10)
			R.8.1.170.0.N.E.U	2,34 (+14)	2,44 (+10)
			R.6.1.120.0.N.E.U	3,00 (+11)	3,24 (+10)
R.6.1.100.0.N.E.U	2,71	2,96	R.6.1.150.0.N.E.U	3,23 (+19)	3,42 (+16)
			R.6.1.170.0.N.E.U	3,27 (+20)	3,44 (+16)
Porte finestre					
R.10.1.100.0.N.E.U	1,63	1,73	R.10.1.245.0.N.E.U	1,06 (-35)	1,08 (-37)
R.8.1.100.0.N.E.U	2,06	2,22	R.8.1.245.0.N.E.U	1,48 (-28)	1,52 (-32)
R.6.1.100.0.N.E.U	2,71	2,96	R.6.1.245.0.N.E.U	2,15 (-21)	2,23 (-25)

Dal confronto tra i valori ottenuti per i due locali emerge, come rappresentato nel Grafico 4.6 per l'esposizione sud e nel Grafico 4.7 per l'esposizione ovest, che i valori di FLDm, a parità di casistica considerata risultano maggiori per il locale salotto rispetto alla camera matrimoniale. Le differenze tra i due locali sono dovute al differente valore di WWR, sempre maggiore per il locale salotto. Si nota che nei Grafici 4.6 e 4.7 risulta assente la curva che unisce i dati relativi alle finestre al valore di FLDm della porta finestra, non essendo stati analizzati i dati che ne definiscono l'andamento.

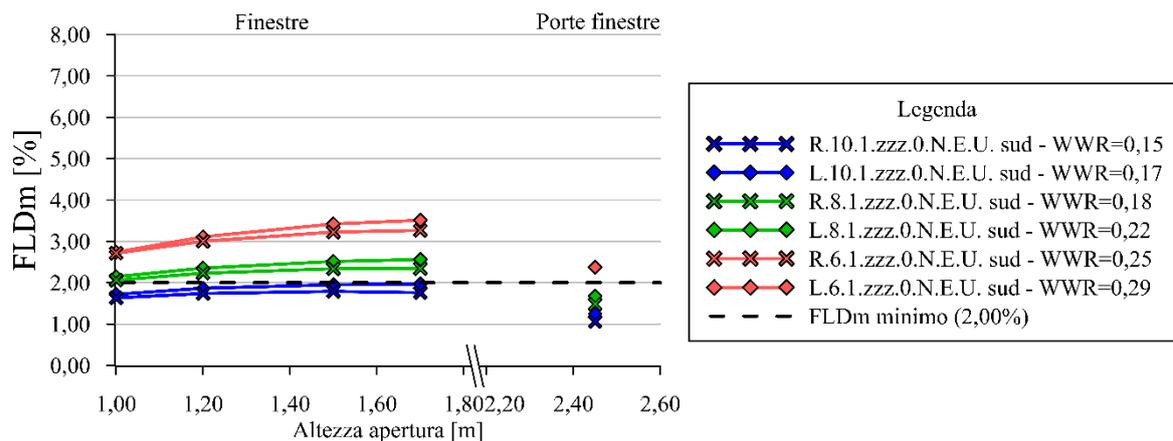


Grafico 4.6: Influenza dell'altezza delle aperture sul FLDm per il locale salotto (L) e camera matrimoniale (R) con esposizione aperture sud.

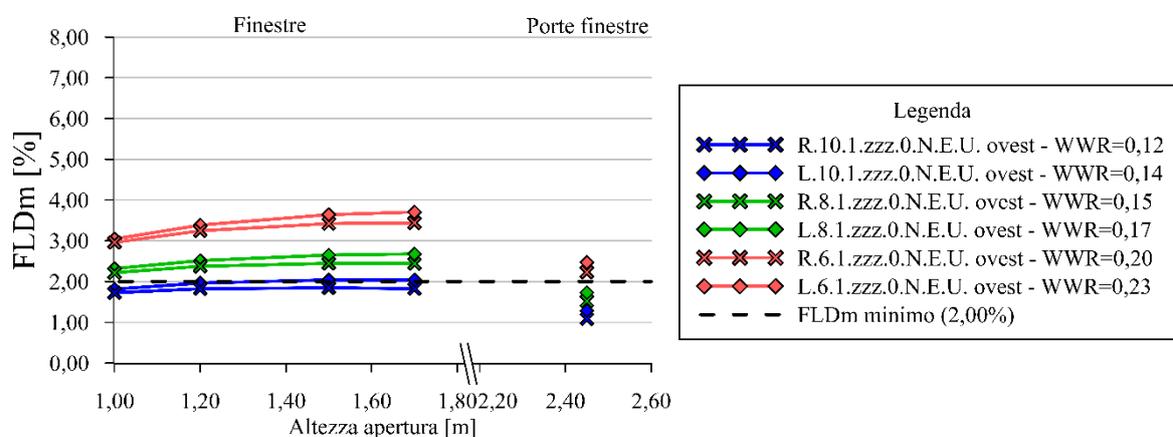


Grafico 4.7: Influenza dell'altezza delle aperture sul FLDm per il locale salotto (L) e camera matrimoniale (R) con esposizione aperture ovest.

Viene messa in evidenza, a parità di locale considerato, nel Grafico 4.8 per il locale salotto e nel Grafico 4.9 per la camera matrimoniale, l'influenza del differente orientamento sul FLDm in funzione dell'altezza delle aperture. Analogamente a quanto analizzato per il differente numero di aperture, anche in tale caso il discostamento tra i valori è attribuito al posizionamento delle aperture sulla dimensione maggiore dell'ambiente, la quale garantisce una maggior uniformità della distribuzione dell'illuminamento, data la minor profondità del locale.

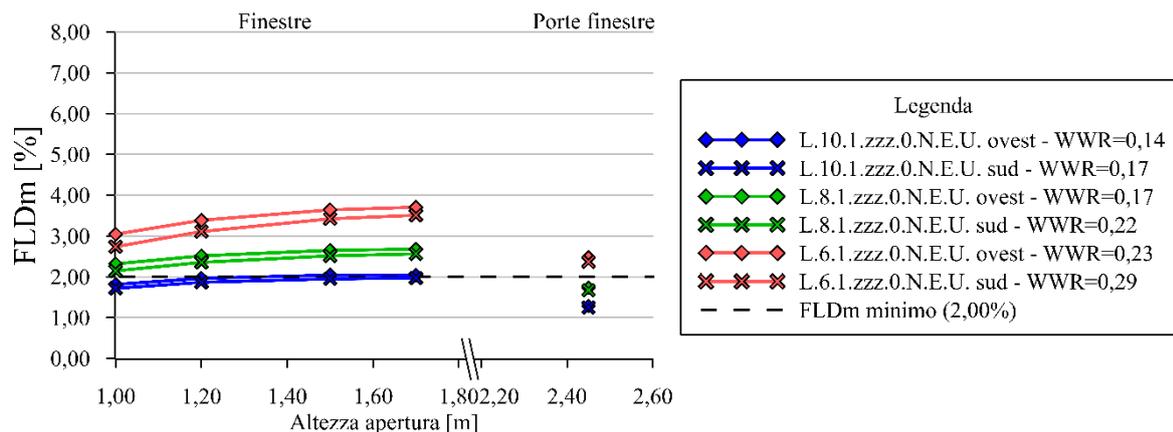


Grafico 4.8: Influenza dell'altezza delle aperture sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione sud e ovest

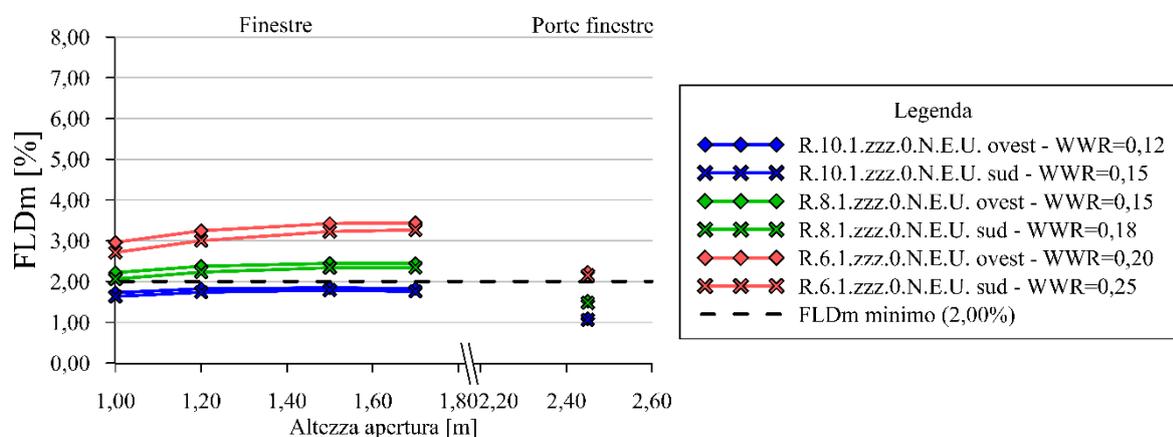
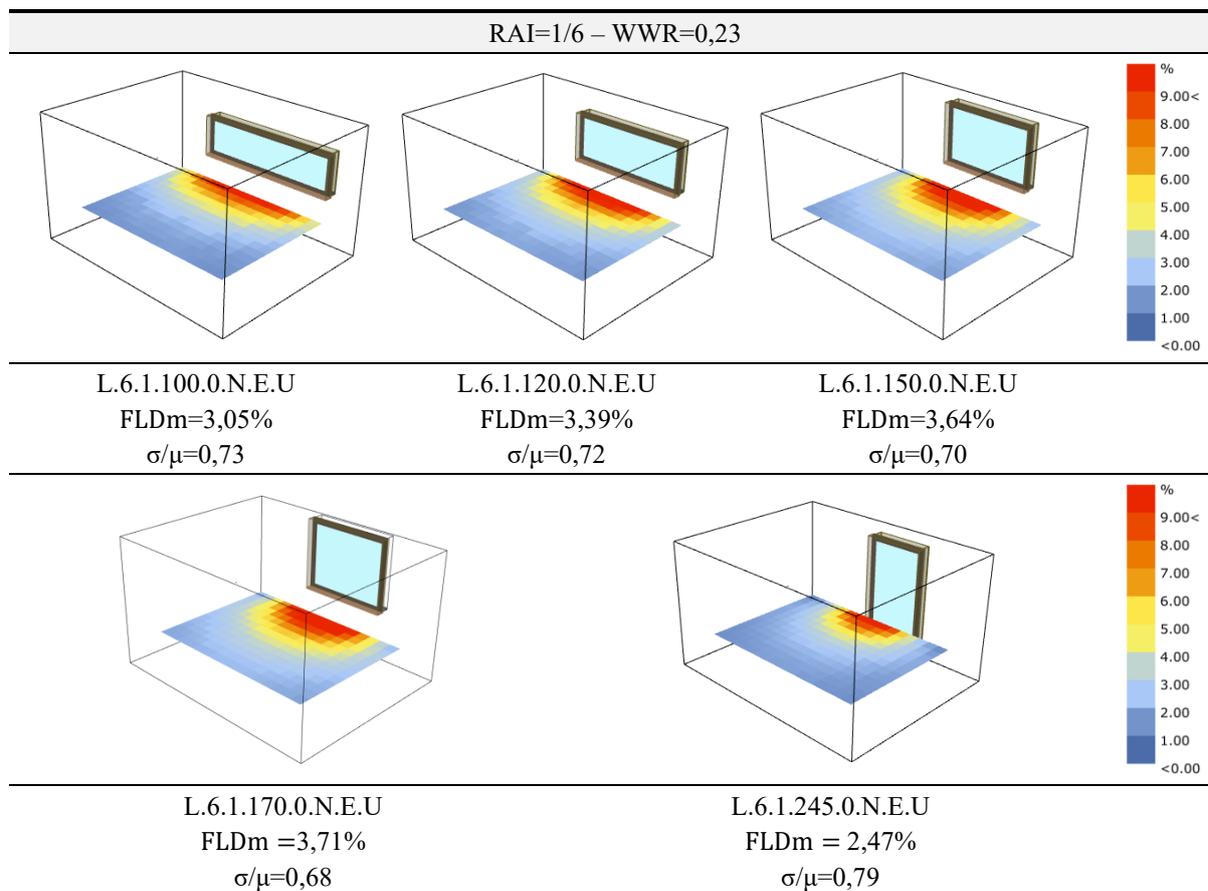


Grafico 4.9. Influenza dell'altezza delle aperture sul FLDm per il locale camera matrimoniale (R) con esposizione sud e ovest.

Sono illustrate in Tabella 4.8 le differenti distribuzioni dei valori di FLDm per le casistiche aventi la presenza di una singola apertura con altezza variabile, posta sulla dimensione maggiore del locale salotto. Sono confrontati i casi con il medesimo rapporto aero-illuminante, pari ad 1/6. Si nota come la presenza di una porta finestra provoca una riduzione del FLDm; ciò è dovuto ad una maggiore disomogeneità della distribuzione dei valori di FLDm, risulta infatti maggiore, rispetto alle finestre, il rapporto tra la deviazione standard e il valore medio di FLDm ( $\sigma/\mu$ ).

Tabella 4.8: Influenza della differente altezza delle aperture sul FLDm per il locale salotto con esposizione aperture lato ovest.



### 4.1.3 Presenza di una sporgenza orizzontale

In questa sezione è presentata l'influenza sul FLDm della presenza di una sporgenza orizzontale con proiezione verso l'esterno pari a 1,40 m, assumendo esclusivamente le casistiche aventi porte finestre di altezza 2,45 m. Sono posti a confronto casi aventi il medesimo rapporto aero-illuminante, i cui valori considerati sono 1/6, 1/4 ed 1/3 e la presenza più aperture. Le simulazioni sono eseguite per il locale salotto e per la camera matrimoniale, considerando il posizionamento delle aperture sia sulla dimensione maggiore dei locali, orientata a ovest, sia su quella minore, orientata a sud.

Dai dati evidenziati in Tabella 4.9 per il locale salotto, la presenza di una sporgenza orizzontale genera una riduzione media del 29% e del 31% rispettivamente per le aperture posizionate sul lato sud e ovest dell'ambiente salotto. A parità di RAI, la riduzione del FLDm risulta maggiore con la diminuzione del numero di aperture e dunque con l'aumento della superficie trasparente.

Tabella 4.9: Influenza della sporgenza orizzontale sul FLDm per il locale salotto

	FLDm Lato sud	FLDm Lato ovest		FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato sud	FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato ovest
Porte finestre					
L.6.4.245.0.N.E.U	0,80	0,83	L.6.4.245.0.B.E.U	0,57 (-29)	0,58 (-31)
L.6.3.245.0.N.E.U	1,17	1,23	L.6.3.245.0.B.E.U	0,84 (-28)	0,85 (-31)
L.6.2.245.0.N.E.U	1,64	1,73	L.6.2.245.0.B.E.U	1,16 (-29)	1,19 (-32)
L.6.1.245.0.N.E.U	2,37	2,47	L.6.2.245.0.B.E.U	1,64 (-31)	1,65 (-33)
L.4.4.245.0.N.E.U	1,94	1,99	L.4.4.245.0.B.E.U	1,41 (-27)	1,41 (-29)
L.4.3.245.0.N.E.U	2,36	2,46	L.4.3.245.0.B.E.U	1,72 (-27)	1,73 (-30)
L.4.2.245.0.N.E.U	2,87	3,03	L.4.2.245.0.B.E.U	2,07 (-28)	2,10 (-31)
L.4.1.245.0.N.E.U	3,70	3,92	L.4.2.245.0.B.E.U	2,55 (-31)	2,63 (-33)
L.3.4.245.0.N.E.U	3,12	3,23	L.3.4.245.0.B.E.U	2,28 (-27)	2,29 (-29)
L.3.3.245.0.N.E.U	3,56	3,72	L.3.3.245.0.B.E.U	2,61 (-27)	2,62 (-30)
L.3.2.245.0.N.E.U	4,05	4,31	L.3.2.245.0.B.E.U	2,95 (-27)	3,01 (-30)
L.3.1.245.0.N.E.U	4,89	5,27	L.3.2.245.0.B.E.U	3,42 (-30)	3,54 (-33)

I dati ottenuti per il locale salotto sono rappresentati nel Grafico 4.10 per l'esposizione delle aperture a sud e nel Grafico 4.11 per l'esposizione a ovest.

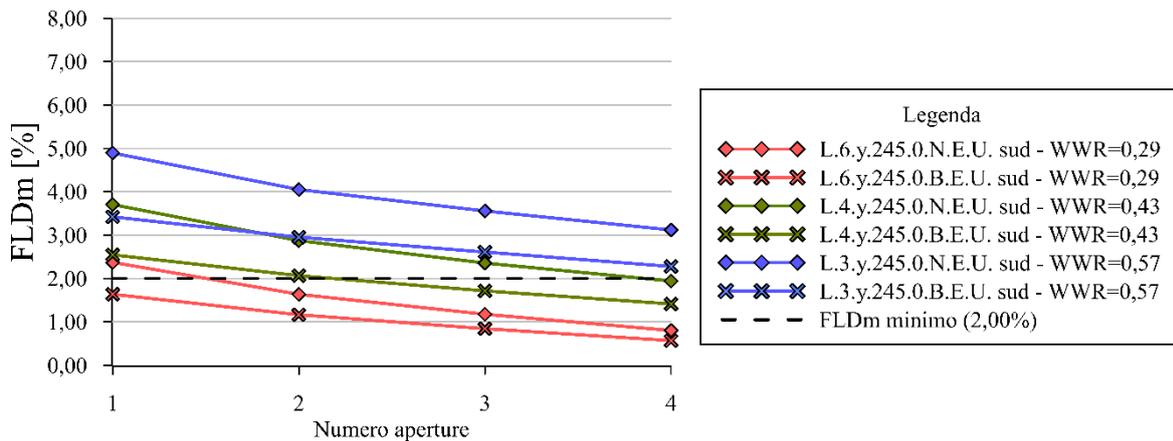


Grafico 4.10: Influenza della sporgenza orizzontale sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione sud.

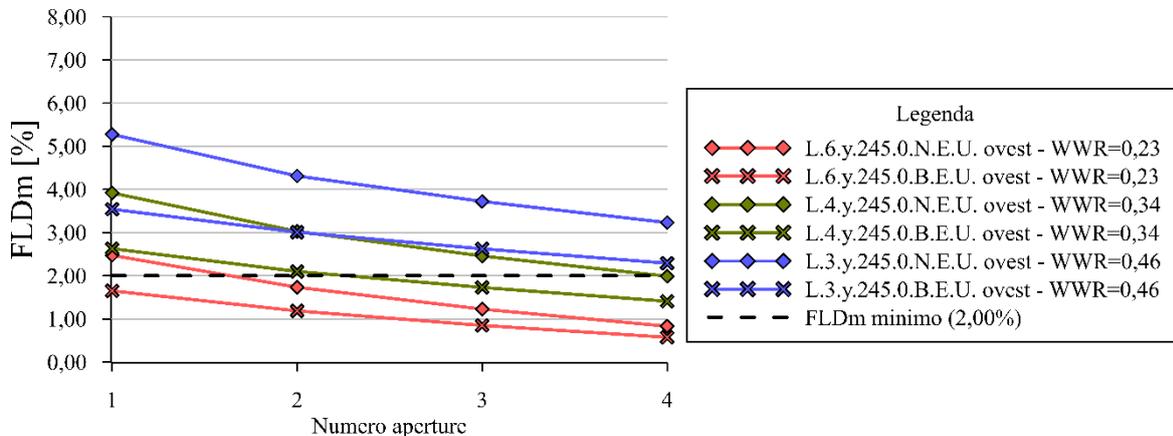


Grafico 4.11: Influenza della sporgenza orizzontale sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione ovest

Medesime considerazioni possono essere effettuate per la camera matrimoniale. Per tale locale le riduzioni del FLDm risultano essere superiori al salotto per la prevalenza delle casistiche considerate, con una variazione percentuale media del 30% e del 32% rispettivamente per l'esposizione a sud ed ovest.

Tabella 4.10: Influenza della sporgenza orizzontale sul FLDm per il locale camera matrimoniale

	FLDm Lato sud	FLDm Lato ovest		FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato sud	FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato ovest
Porte finestre					
R.6.4.245.0.N.E.U	0,41	0,41	R.6.4.245.0.B.E.U	0,28 (-30)	0,28 (-31)
R.6.3.245.0.N.E.U	0,80	0,82	R.6.3.245.0.B.E.U	0,55 (-30)	0,56 (-31)
R.6.2.245.0.N.E.U	1,32	1,39	R.6.2.245.0.B.E.U	0,91 (-31)	0,93 (-33)
R.6.1.245.0.N.E.U	2,15	2,23	R.6.1.245.0.B.E.U	1,45 (-33)	1,48 (-34)
R.4.4.245.0.N.E.U	1,41	1,44	R.4.4.245.0.B.E.U	1,00 (-29)	0,99 (-31)
R.4.3.245.0.N.E.U	1,89	1,96	R.4.3.245.0.B.E.U	1,35 (-29)	1,35 (-31)
R.4.2.245.0.N.E.U	2,47	2,61	R.4.2.245.0.B.E.U	1,76 (-29)	1,79 (-31)
R.4.1.245.0.N.E.U	3,44	3,64	R.4.1.245.0.B.E.U	2,34 (-32)	2,40 (-34)
R.3.4.245.0.N.E.U	2,50	2,57	R.3.4.245.0.B.E.U	1,81 (-28)	1,80 (-30)
R.3.3.245.0.N.E.U	3,01	3,13	R.3.3.245.0.B.E.U	2,19 (-27)	2,20 (-30)
R.3.2.245.0.N.E.U	3,63	3,83	R.3.2.245.0.B.E.U	2,62 (-28)	2,64 (-31)
R.3.1.245.0.N.E.U	4,65	4,96	R.3.1.245.0.B.E.U	3,19 (-31)	3,29 (-34)

I dati ottenuti per il locale salotto sono rappresentati nel Grafico 4.12 per l'esposizione delle aperture a sud e nel Grafico 4.13 per l'esposizione a ovest.

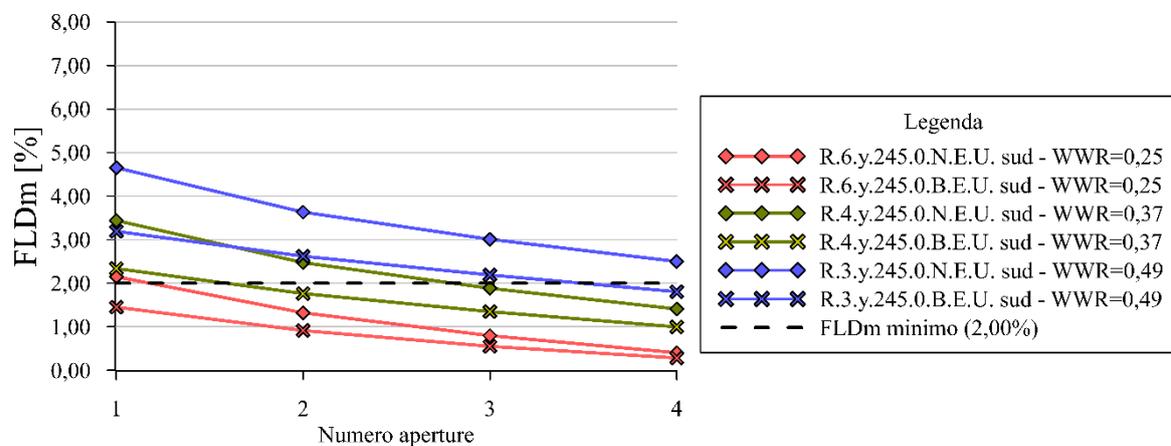


Grafico 4.12: Influenza della sporgenza orizzontale sul FLDm per il locale camera matrimoniale (R) con esposizione sud.

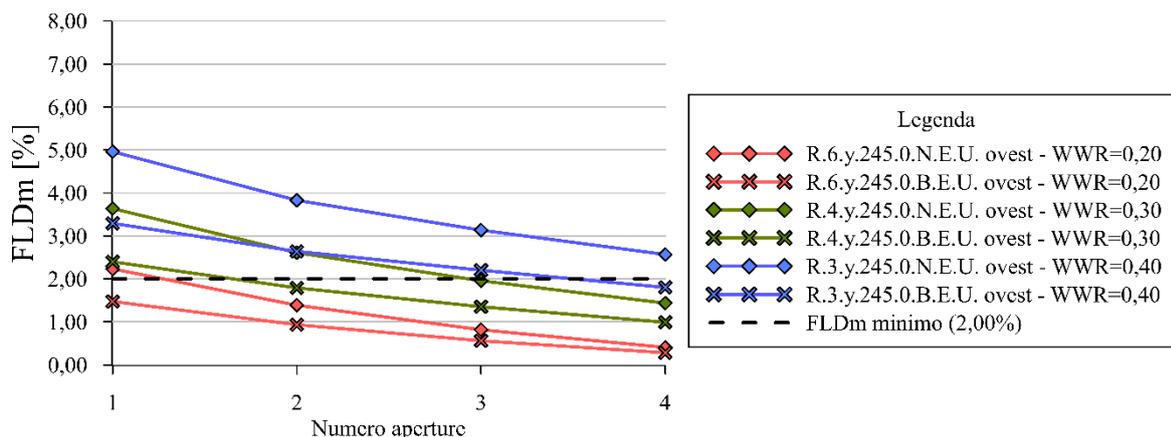


Grafico 4.13: Influenza della sporgenza orizzontale sul FLDm per il locale camera matrimoniale (R) con esposizione ovest.

#### 4.1.4 Presenza di montanti interni

Viene esposta in tale paragrafo l'influenza della presenza di montanti interni al serramento aventi larghezza pari 12 cm, considerando la presenza di un'unica apertura, avente altezza pari a 1,50 m per differenti valori di RAI, pari a 1/10, 1/8, 1/6 ed 1/4. È considerata la presenza di un montante per RAI pari ad 1/10, la presenza fino a 2 montanti per RAI pari ad 1/8 ed 1/6 e la presenza fino a 3 montanti interni per RAI pari ad 1/4.

Le simulazioni sono eseguite per il locale salotto, considerando il posizionamento delle aperture sulla dimensione minore, orientata a sud. Dai dati esposti in Tabella 4.11 emerge che la riduzione del FLDm risulta essere proporzionale alla riduzione della superficie vetrata data dalla presenza dei montanti stessi. La presenza di un montante risulta essere meno impattante per RAI maggiori, si hanno infatti riduzioni minime per RAI pari a 1/4 (-5%) e massime per RAI pari a 1/10 (-14%).

Tabella 4.11: Influenza della presenza di montanti interni al serramento.

	Sup. trasparente	FLDm Lato sud		Sup. trasparente ( $\Delta\%$ )	FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato sud
Finestre					
L.10.1.150.0.N.E.U	1,48	1,95	L.10.1.150.1.N.E.U	1,33 (-10)	1,68 (-14)
L.8.1.150.0.N.E.U	1,90	2,51	L.8.1.150.1.N.E.U	1,75 (-8)	2,25 (-11)
			L.8.1.150.2.N.E.U	1,60 (-16)	1,98 (-21)
L.6.1.150.0.N.E.U	2,60	3,42	L.6.1.150.1.N.E.U	2,45 (-6)	3,14 (-8)
			L.6.1.150.2.N.E.U	2,30 (-12)	2,87 (-16)
L.4.1.150.0.N.E.U.	4,00	4,92	L.4.1.150.1.N.E.U	3,85 (-4)	4,65 (-5)
			L.4.1.150.2.N.E.U	3,70 (-8)	4,39 (-11)
			L.4.1.150.3.N.E.U	3,55 (-11)	4,16 (-15)

## 4.2 Azioni di retrofit energetico

In tale sezione è analizzata l'influenza delle azioni di retrofit energetico sul fattore medio di luce diurna, applicate separatamente e congiuntamente sull'edificio, considerando RAI pari o maggiori ad 1/8 nelle casistiche che garantiscono un fattore medio di luce diurna almeno pari al 2,00%.

### 4.2.1 Sostituzione del serramento

In questo paragrafo è presentata la sola influenza della sostituzione del serramento esistente, avente vetro singolo ( $\tau=0,88$ ) e telaio in legno, con un serramento avente telaio in PVC e vetro camera ( $\tau=0,65$ ).

Per tale studio è assunta la presenza di una singola apertura avente altezza pari a 1,50 m. Sono posti a confronto casi con il medesimo rapporto aero-illuminante, i cui valori adottati per la presente analisi sono 1/8, 1/6, 1/4, 1/3 ed 1/2. Le simulazioni sono eseguite per il locale salotto e per la camera matrimoniale, considerando il posizionamento delle aperture sia sulla dimensione maggiore dei locali, orientata a ovest, sia su quella minore, orientata a sud. Si nota che l'assenza di valori di FLDm in Tabella 4.12 e Tabella 4.13 è data dall'impossibilità geometrica di rappresentazione di tali casistiche.

Il primo risultato che si osserva, dai dati evidenziati in Tabella 4.12 per il locale salotto, è una riduzione del fattore medio di luce diurna con la sostituzione del serramento. Per le finestre si hanno riduzioni del FLDm comprese tra il 29% e il 30%, mentre per le porte finestre risultano comprese tra il 30% e il 31%. La riduzione del FLDm data dalla sostituzione del serramento può dunque considerarsi indipendente dal valore di RAI.

Si nota che per il RAI pari ad 1/8 tale azione di retrofit porta ad una diminuzione che non permette il rispetto del limite normativo, pari al 2,00%, in tutte le casistiche considerate. Al contrario per il RAI pari ad 1/6 i valori di FLDm ottenuti risultano maggiori del 2,00% escluse le casistiche con presenza di aperture di altezza pari a 1,00 m e 2,45 m esposte a sud.

Le riduzioni percentuali risultano analoghe per i due orientamenti.

Tabella 4.12: Influenza della sostituzione del serramento sul FLDm per il locale salotto

	FLDm Lato sud	FLDm Lato ovest		FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato sud	FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato ovest
Finestre					
L.8.1.100.0.N.E.U	2,15	2,32	L.8.1.100.0.N.W.U	1,52 (-29)	1,63 (-30)
L.8.1.120.0.N.E.U	2,35	2,51	L.8.1.120.0.N.W.U	1,67 (-29)	1,77 (-30)
L.8.1.150.0.N.E.U	2,51	2,65	L.8.1.150.0.N.W.U	1,78 (-29)	1,86 (-30)
L.6.1.100.0.N.E.U	2,74	3,05	L.6.1.100.0.N.W.U	1,94 (-29)	2,16 (-29)
L.6.1.120.0.N.E.U	3,11	3,39	L.6.1.120.0.N.W.U	2,20 (-29)	2,39 (-29)
L.6.1.150.0.N.E.U	3,42	3,64	L.6.1.150.0.N.W.U	2,39 (-30)	2,56 (-30)
L.4.1.100.0.N.E.U	-	-	L.4.1.100.0.N.W.U	-	-
L.4.1.120.0.N.E.U	-	4,85	L.4.1.120.0.N.W.U	-	3,40 (-30)

	FLDm Lato sud	FLDm Lato ovest		FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato sud	FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato ovest
L.4.1.150.0.N.E.U	4,92	5,44	L.4.1.150.0.N.W.U	3,45 (-30)	3,81 (-30)
L.3.1.120.0.N.E.U	-	-	L.3.1.120.0.N.W.U	-	-
L.3.1.150.0.N.E.U	-	6,87	L.3.1.150.0.N.W.U	-	4,81 (-30)
Porte finestre					
L.8.1.245.0.N.E.U	1,67	1,73	L.8.1.245.0.N.W.U	1,16 (-31)	1,21 (-30)
L.6.1.245.0.N.E.U	2,37	2,47	L.6.1.245.0.N.W.U	1,65 (-31)	1,72 (-30)
L.4.1.245.0.N.E.U	3,70	3,92	L.4.1.245.0.N.W.U	2,57 (-31)	2,72 (-31)
L.3.1.245.0.N.E.U	4,89	5,27	L.3.1.245.0.N.W.U	3,40 (-31)	3,66 (-31)
L.2.1.245.0.N.E.U	-	7,56	L.2.1.245.0.N.W.U	-	5,25 (-31)

I dati ottenuti per il locale salotto sono rappresentati nel Grafico 4.14 per l'esposizione delle aperture a sud e nel Grafico 4.15 per l'esposizione delle aperture ad ovest.

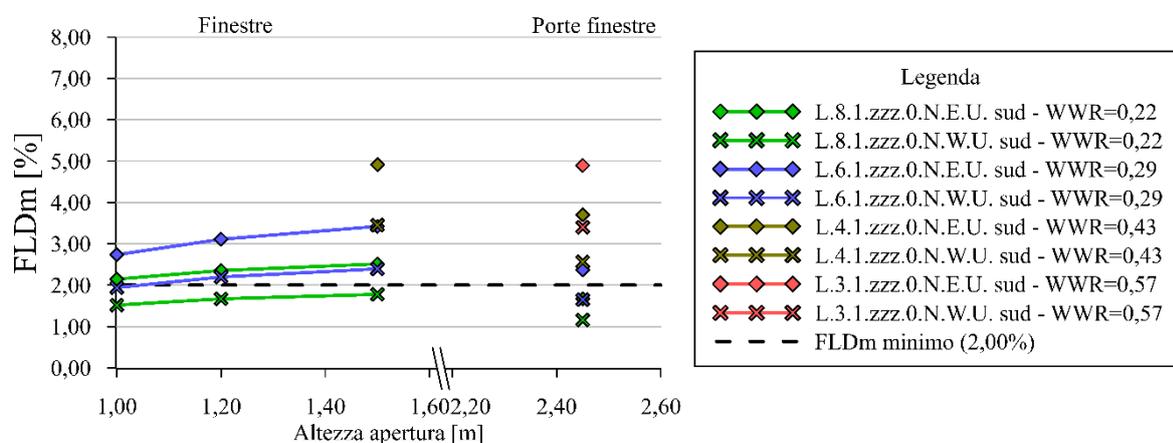


Grafico 4.14: Influenza della sostituzione del serramento sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione aperture lato sud.

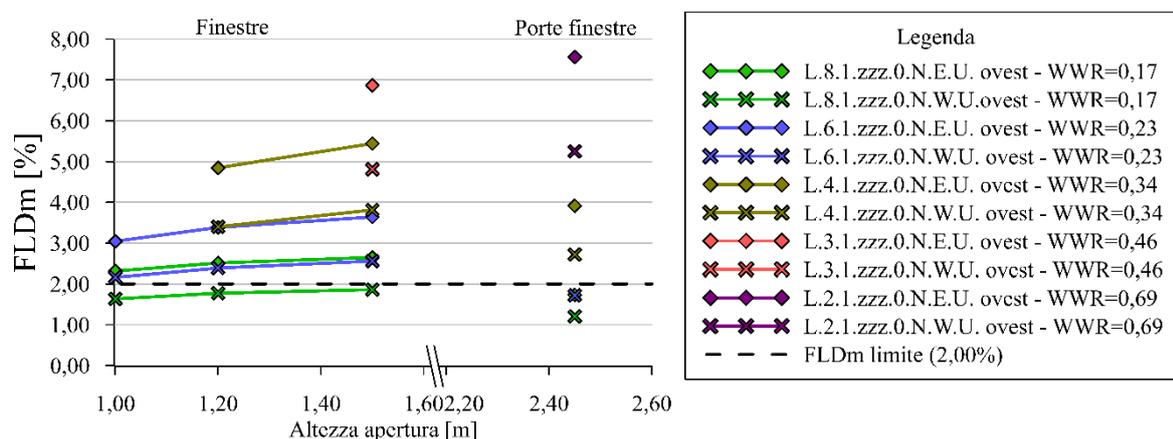


Grafico 4.15: Influenza della sostituzione del serramento sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione aperture lato ovest.

Medesime considerazioni possono essere ritenute valide per i valori di FLDm della camera matrimoniale, mostrati in Tabella 4.13.

Tabella 4.13: Influenza della sostituzione del serramento sul FLDm per il locale camera matrimoniale

	FLDm Lato sud	FLDm Lato ovest		FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato sud	FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato ovest
Finestre					
R.8.1.100.0.N.E.U	2,06	2,218	R.8.1.100.0.N.W.U	1,47 (-29)	1,57 (-29)
R.8.1.120.0.N.E.U	2,23	2,373	R.8.1.120.0.N.W.U	1,58 (-29)	1,67 (-30)
R.8.1.150.0.N.E.U	2,34	2,447	R.8.1.150.0.N.W.U	1,65 (-30)	1,72 (-30)
R.6.1.100.0.N.E.U	2,71	2,963	R.6.1.100.0.N.W.U	1,93 (-29)	2,11 (-29)
R.6.1.120.0.N.E.U	3,00	3,244	R.6.1.120.0.N.W.U	2,12 (-29)	2,30 (-29)
R.6.1.150.0.N.E.U	3,23	3,423	R.6.1.150.0.N.W.U	2,27 (-30)	2,40 (-30)
R.4.1.100.0.N.E.U	-	4,189	R.4.1.100.0.N.W.U	-	2,97 (-29)
R.4.1.120.0.N.E.U	4,24	4,756	R.4.1.120.0.N.W.U	3,00 (-29)	3,37 (-29)
R.4.1.150.0.N.E.U	4,80	5,218	R.4.1.150.0.N.W.U	3,37 (-30)	3,66 (-30)
R.3.1.120.0.N.E.U	-	5,900	R.3.1.120.0.N.W.U	-	4,16 (-30)
R.3.1.150.0.N.E.U	6,05	6,751	R.3.1.150.0.N.W.U	4,23 (-30)	4,73 (-30)
Porte finestre					
R.8.1.245.0.N.E.U	1,48	1,517	R.8.1.245.0.N.W.U	1,03 (-30)	1,06 (-30)
R.6.1.245.0.N.E.U	2,15	2,231	R.6.1.245.0.N.W.U	1,50 (-30)	1,56 (-30)
R.4.1.245.0.N.E.U	3,44	3,635	R.4.1.245.0.N.W.U	2,39 (-30)	2,54 (-30)
R.3.1.245.0.N.E.U	4,65	4,961	R.3.1.245.0.N.W.U	3,24 (-30)	3,47 (-30)
R.2.1.245.0.N.E.U	6,65	7,328	R.2.1.245.0.N.W.U	4,61 (-31)	5,10 (-30)

I dati ottenuti per il locale camera matrimoniale sono rappresentati nel Grafico 4.16 per l'esposizione delle aperture a sud e nel Grafico 4.17 per l'esposizione delle aperture ad ovest.

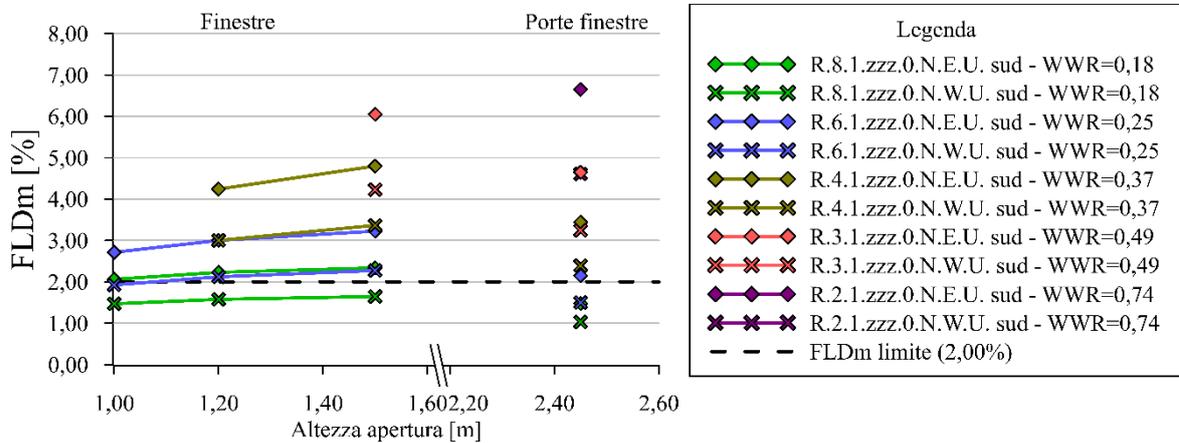


Grafico 4.16: Influenza della sostituzione del serramento sul FLDm per il locale camera matrimoniale (R) con esposizione aperture lato sud.

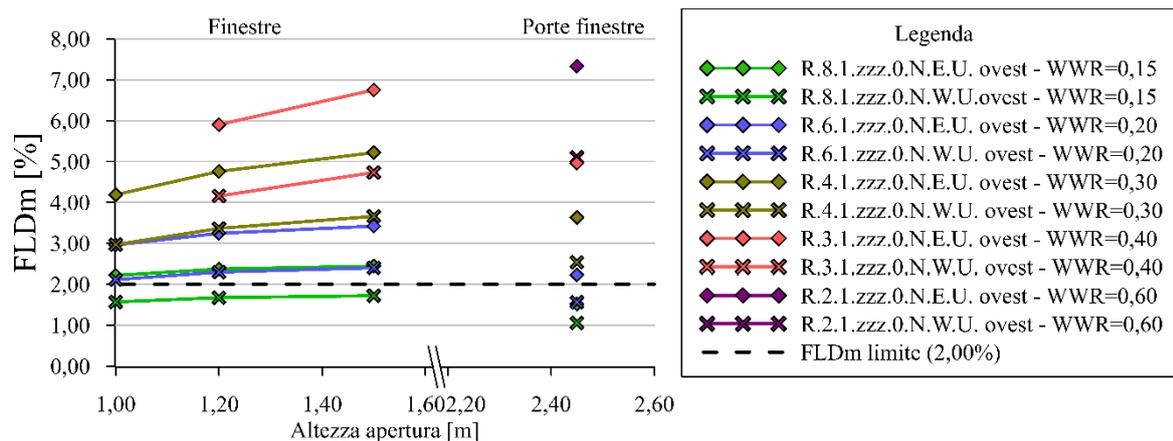


Grafico 4.17: Influenza della sostituzione del serramento sul FLDm per il locale camera matrimoniale (R) con esposizione aperture lato ovest.

Dal confronto tra i valori ottenuti per i due locali emerge che, nonostante i valori di FLDm risultino maggiori per il locale salotto, le diminuzioni percentuali per i locali considerati sono prevalentemente analoghe.

È determinata di seguito l'influenza della sostituzione del serramento sui valori di FLDm in funzione del numero di aperture. Per tale analisi sono considerate le casistiche aventi finestre di altezza 1,50 m per RAI pari ad 1/8 ed 1/6 e le casistiche aventi porte finestre di altezza 2,45 m per RAI pari a 1/6.

Dai valori ottenuti, in Tabella 4.14, si mostra che la riduzione del FLDm risulta analoga a parità di RAI per le casistiche differenziate dal numero di aperture.

Tabella 4.14: Influenza dell'aggiunta di isolamento termico sul FLDm per il locale salotto in funzione del numero di aperture

	FLDm Lato sud	FLDm Lato ovest		FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato sud	FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato ovest
Finestre					
L.8.4.150.0.N.E.U.	1,08	1,12	L.8.4.150.0.N.W.U.	0,76 (-30)	0,79 (-29)
L.8.3.150.0.N.E.U.	1,42	1,48	L.8.3.150.0.N.W.U.	1,00 (-30)	1,04 (-30)
L.8.2.150.0.N.E.U.	1,84	1,95	L.8.2.150.0.N.W.U.	1,29 (-30)	1,37 (-30)
L.8.1.150.0.N.E.U.	2,51	2,65	L.8.1.150.0.N.W.U.	1,78 (-29)	1,86 (-30)
L.6.4.150.0.N.E.U.	1,88	1,94	L.6.4.150.0.N.W.U.	1,32 (-30)	1,37 (-30)
L.6.3.150.0.N.E.U.	2,23	2,34	L.6.3.150.0.N.W.U.	1,57 (-29)	1,66 (-29)
L.6.2.150.0.N.E.U.	2,68	2,84	L.6.2.150.0.N.W.U.	1,88 (-30)	2,00 (-30)
L.6.1.150.0.N.E.U.	3,42	3,64	L.6.1.150.0.N.W.U.	2,39 (-30)	2,56 (-30)
Porte finestre					
L.6.4.245.0.N.E.U.	0,80	0,83	L.6.4.245.0.N.W.U.	0,56 (-31)	0,58 (-30)
L.6.3.245.0.N.E.U.	1,17	1,23	L.6.3.245.0.N.W.U.	0,82 (-30)	0,85 (-31)
L.6.2.245.0.N.E.U.	1,64	1,73	L.6.2.245.0.N.W.U.	1,15 (-30)	1,21 (-30)
L.6.1.245.0.N.E.U.	2,37	2,47	L.6.1.245.0.N.W.U.	1,65 (-31)	1,72 (-30)

I valori sono rappresentati nel Grafico 4.18.

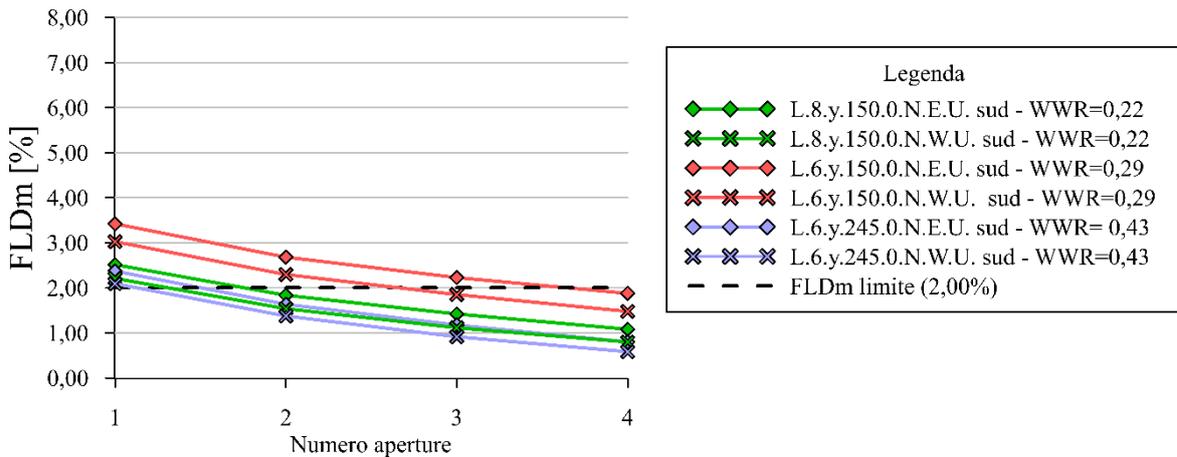


Grafico 4.19: Influenza della sostituzione del serramento sul FLDm per il locale salotto (L) in funzione del numero di aperture.

#### 4.2.2 Aggiunta di un sistema a cappotto

In tale sezione viene analizzata la sola influenza dell'aggiunta di un sistema di isolamento esterno alla facciata. Per questo studio è assunta la presenza di una singola apertura avente altezza pari a 1,50 m. Sono posti a confronto casi con il medesimo rapporto aero-illuminante, i cui valori adottati sono 1/8, 1/6, 1/4, 1/3 ed 1/2. Le simulazioni sono eseguite per il locale salotto e per la camera matrimoniale, considerando il posizionamento delle aperture sia sulla dimensione maggiore dei locali, orientata a ovest, sia su quella minore, orientata a sud.

Dai dati evidenziati in Tabella 4.15 si dimostra una riduzione del FLDm con l'aumento dello spessore dell'imbotte esterna dato dall'aggiunta di un sistema di coibentazione in facciata. A parità di RAI la diminuzione dell'altezza dell'apertura da 1,50 m a 1,00 m, e la conseguente diminuzione di superficie trasparente, porta ad un'aumento della riduzione del FLDm.

Con la presenza della porta finestra è registrato un aumento dell'impatto rispetto alle aperture aventi altezza 1,50 m. Emerge inoltre una diminuzione dell'impatto dato dall'aggiunta del cappotto termico con l'aumento del RAI; per le porte finestre, le riduzioni risultano minime (-9%) per RAI pari a 1/2 e massime (-14%) per RAI pari ad 1/8.

Tabella 4.15: Influenza dell'aggiunta di isolamento termico sul FLDm per il locale salotto.

	FLDm Lato sud	FLDm Lato ovest		FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato sud	FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato ovest
Finestre					
L.8.1.100.0.N.E.U	2,15	2,32	L.8.1.100.0.N.E.I13	1,85 (-14)	1,98 (-15)
L.8.1.120.0.N.E.U	2,35	2,51	L.8.1.120.0.N.E.I13	2,05 (-12)	2,19 (-13)
L.8.1.150.0.N.E.U	2,51	2,65	L.8.1.150.0.N.E.I13	2,21 (-12)	2,32 (-12)
L.6.1.100.0.N.E.U	2,74	3,05	L.6.1.100.0.N.E.I13	2,38 (-13)	2,65 (-13)

	FLDm	FLDm		FLDm ( $\Delta\%$ )	FLDm ( $\Delta\%$ )
	Lato sud	Lato ovest		Lato sud	Lato ovest
L.6.1.120.0.N.E.U	3,11	3,39	L.6.1.120.0.N.E.I13	2,73 (-12)	2,96 (-13)
L.6.1.150.0.N.E.U	3,42	3,64	L.6.1.150.0.N.E.I13	3,03 (-12)	3,23 (-11)
L.4.1.100.0.N.E.U	-	-	L.4.1.100.0.N.E.I13	-	-
L.4.1.120.0.N.E.U	-	4,85	L.4.1.120.0.N.E.I13	-	4,27 (-12)
L.4.1.150.0.N.E.U	4,92	5,44	L.4.1.150.0.N.E.I13	4,39 (-11)	4,85 (-11)
L.3.1.120.0.N.E.U	-	-	L.3.1.120.0.N.E.I13	-	-
L.3.1.150.0.N.E.U	-	6,87	L.3.1.150.0.N.E.I13	-	6,17 (-10)
Porte finestre					
L.8.1.245.0.N.E.U	1,67	1,73	L.8.1.245.0.N.E.I13	1,44 (-14)	1,49 (-14)
L.6.1.245.0.N.E.U	2,37	2,47	L.6.1.245.0.N.E.I13	2,09 (-12)	2,17 (-12)
L.4.1.245.0.N.E.U	3,70	3,92	L.4.1.245.0.N.E.I13	3,32 (-10)	3,51 (-11)
L.3.1.245.0.N.E.U	4,89	5,27	L.3.1.245.0.N.E.I13	4,44 (-9)	4,77 (-10)
L.2.1.245.0.N.E.U	-	7,56	L.2.1.245.0.N.E.I13	-	6,92 (-9)

I dati ottenuti per il locale salotto sono rappresentati nel Grafico 4.20 per l'esposizione delle aperture a sud e nel Grafico 4.21 per l'esposizione delle aperture ad ovest.

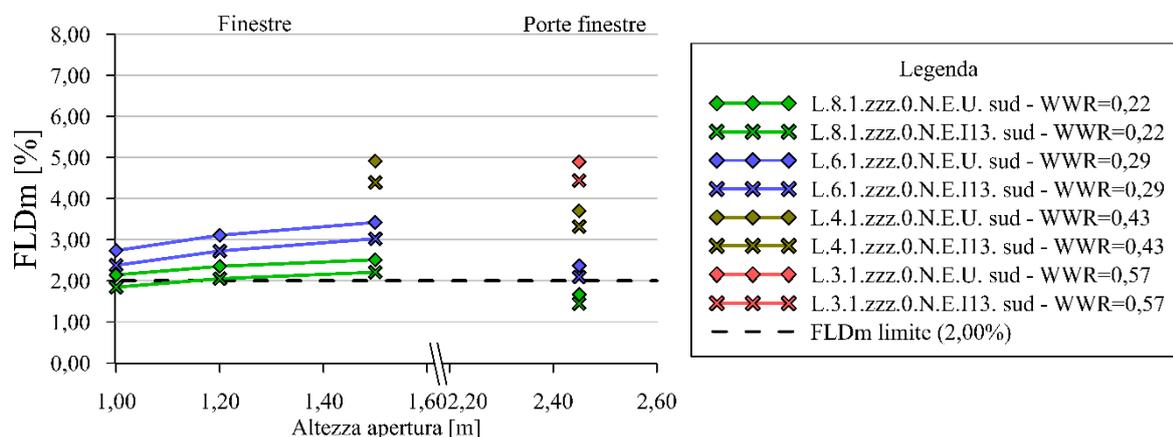


Grafico 4.20: Influenza dell'aggiunta di isolamento termico sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione aperture lato sud.

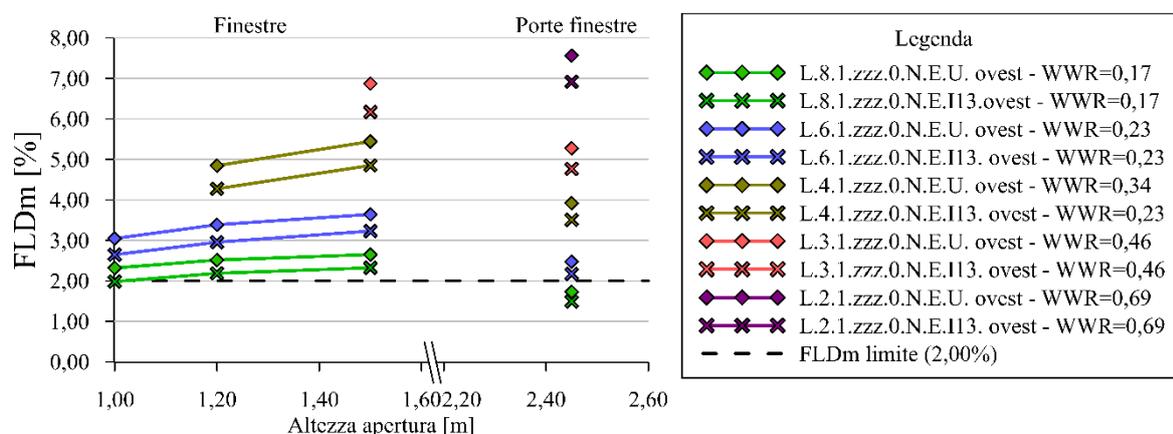


Grafico 4.21: Influenza dell'aggiunta di isolamento termico sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione aperture lato ovest.

Medesime considerazioni risultano valide per il locale camera matrimoniale, i cui valori di FLDm e le relative riduzioni percentuali sono riportati in Tabella 4.16.

Tabella 4.16: Influenza dell'aggiunta di isolamento termico sul FLDm per il locale camera matrimoniale.

	FLDm Lato sud	FLDm Lato ovest		FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato sud	FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato ovest
Finestre					
R.8.1.100.0.N.E.U	2,06	2,22	R.8.1.100.0.N.E.I13	1,76 (-15)	1,87 (-16)
R.8.1.120.0.N.E.U	2,23	2,37	R.8.1.120.0.N.E.I13	1,92 (-14)	2,03 (-15)
R.8.1.150.0.N.E.U	2,34	2,45	R.8.1.150.0.N.E.I13	2,02 (-14)	2,10 (-14)
R.6.1.100.0.N.E.U	2,71	2,96	R.6.1.100.0.N.E.I13	2,33 (-14)	2,54 (-14)
R.6.1.120.0.N.E.U	3,00	3,24	R.6.1.120.0.N.E.I13	2,62 (-13)	2,80 (-14)
R.6.1.150.0.N.E.U	3,23	3,42	R.6.1.150.0.N.E.I13	2,82 (-13)	2,98 (-13)
R.4.1.100.0.N.E.U	-	4,19	R.4.1.100.0.N.E.I13	-	3,62 (-14)
R.4.1.120.0.N.E.U	4,24	4,76	R.4.1.120.0.N.E.I13	3,73 (-12)	4,16 (-13)
R.4.1.150.0.N.E.U	4,80	5,22	R.4.1.150.0.N.E.I13	4,24 (-12)	4,612 (-12)
R.3.1.120.0.N.E.U	-	5,90	R.3.1.120.0.N.E.I13	-	5,19 (-12)
R.3.1.150.0.N.E.U	6,05	6,75	R.3.1.150.0.N.E.I13	5,38 (-11)	6,00 (-11)
Porte finestre					
R.8.1.245.0.N.E.U	1,48	1,52	R.8.1.245.0.N.E.I13	1,24 (-16)	1,26 (-17)
R.6.1.245.0.N.E.U	2,15	2,23	R.6.1.245.0.N.E.I13	1,86 (-14)	1,92 (-14)
R.4.1.245.0.N.E.U	3,44	3,64	R.4.1.245.0.N.E.I13	3,05 (-11)	3,21 (-12)
R.3.1.245.0.N.E.U	4,65	4,96	R.3.1.245.0.N.E.I13	4,16 (-11)	4,43 (-11)
R.2.1.245.0.N.E.U	6,65	7,33	R.2.1.245.0.N.E.I13	6,01 (-10)	6,61 (-10)

I dati ottenuti per il locale camera matrimoniale sono rappresentati nel Grafico 4.22 per l'esposizione delle aperture a sud e nel Grafico 4.23 per l'esposizione delle aperture ad ovest.

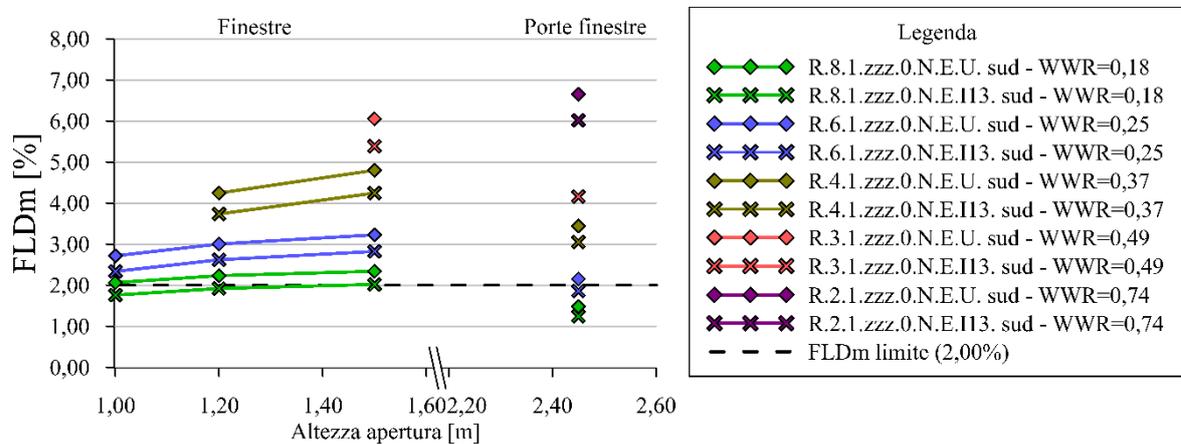


Grafico 4.22: Influenza dell'aggiunta di isolamento termico sul FLDm per il locale camera matrimoniale (R) con esposizione aperture lato sud.

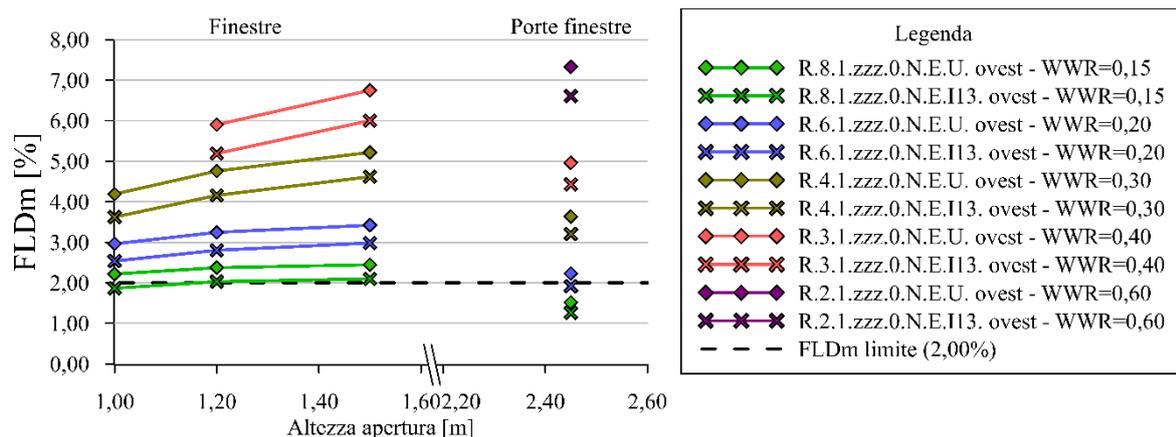


Grafico 4.23: Influenza dell'aggiunta di isolamento termico sul FLDm per il locale camera matrimoniale (R) con esposizione aperture lato ovest.

È determinata in Tabella 4.17 l'influenza dell'aggiunta di isolamento termico sui valori di FLDm in funzione del numero di aperture considerate. A tal fine sono tenute in considerazione le casistiche aventi finestre di altezza 1,50 per RAI pari ad 1/8 ed 1/6 e le casistiche aventi porte finestre di altezza 2,45 m per RAI pari a 1/6.

Il primo risultato che si osserva è una maggiore riduzione del FLDm conseguentemente all'aumento del numero di aperture, da cui consegue una diminuzione della superficie trasparente del serramento a discapito della superficie del telaio. Per RAI pari ad 1/8 la riduzione aumenta da 12% a 27% con il passaggio da 1 a 4 aperture.

Tabella 4.17: Influenza dell'aggiunta di isolamento termico sul FLDm per il locale salotto in funzione del numero di aperture

	FLDm Lato sud	FLDm Lato ovest		FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato sud	FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato ovest
Finestre					
L.8.4.150.0.N.E.U	1,08	1,12	L.8.4.150.0.N.E.I13	0,80 (-26)	0,82 (-27)
L.8.3.150.0.N.E.U	1,42	1,48	L.8.3.150.0.N.E.I13	1,12 (-21)	1,17 (-21)
L.8.2.150.0.N.E.U	1,84	1,95	L.8.2.150.0.N.E.I13	1,54 (-16)	1,62 (-17)
L.8.1.150.0.N.E.U	2,51	2,65	L.8.1.150.0.N.E.I13	2,21 (-12)	2,32 (-12)
L.6.4.150.0.N.E.U	1,88	1,94	L.6.4.150.0.N.E.I13	1,48 (-21)	1,51 (-22)
L.6.3.150.0.N.E.U	2,23	2,34	L.6.3.150.0.N.E.I13	1,85 (-17)	1,91 (-18)
L.6.2.150.0.N.E.U	2,68	2,84	L.6.2.150.0.N.E.I13	2,27 (-14)	2,42 (-15)
L.6.1.150.0.N.E.U	3,42	3,64	L.6.1.150.0.N.E.I13	3,03 (-12)	3,23 (-11)
Porte finestre					
L.6.4.245.0.N.E.U	0,80	0,83	L.6.4.245.0.N.E.I13	0,58 (-27)	0,60 (-29)
L.6.3.245.0.N.E.U	1,17	1,23	L.6.3.245.0.N.E.I13	0,91 (-22)	0,95 (-23)
L.6.2.245.0.N.E.U	1,64	1,73	L.6.2.245.0.N.E.I13	1,37 (-16)	1,44 (-17)
L.6.1.245.0.N.E.U	2,37	2,47	L.6.1.245.0.N.E.I13	2,09 (-12)	2,17 (-12)

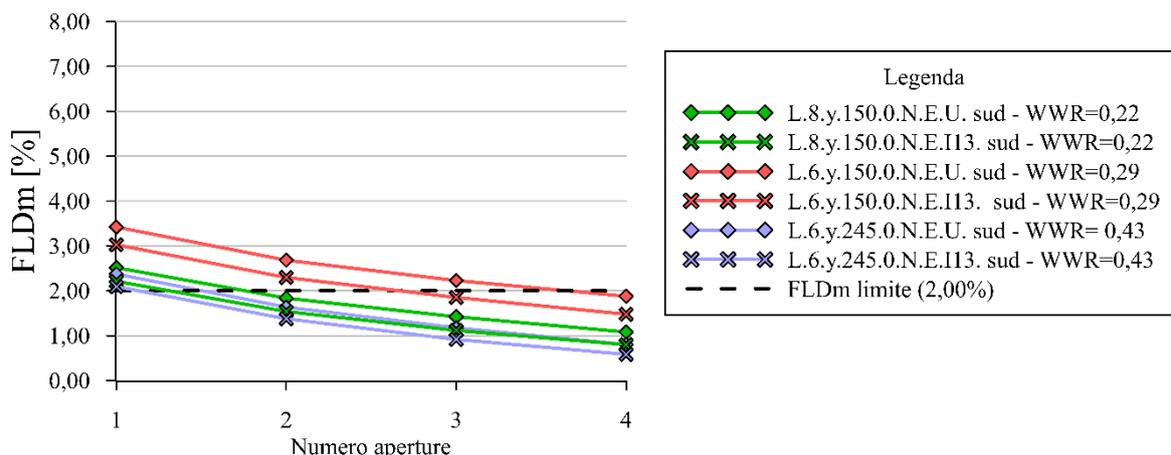


Grafico 4.24: Influenza dell'aggiunta di isolamento termico sul FLDm per il locale salotto in funzione del numero di aperture.

#### 4.2.2.1 Influenza dello spessore dell'imbotte esterna

È analizzata l'influenza dello spessore dell'imbotte esterna sul fattore medio di luce diurna. È considerato il locale salotto, nelle casistiche aventi un'apertura di altezza 1,50 m esposta a ovest, e sono posti a confronto casi aventi rapporto aero-illuminante pari a 1/10, 1/8, 1/6, 1/4 ed 1/3.

A partire dall'imbotte esterna di spessore pari a 0,20 m è considerato un aumento di 0,02 m fino allo spessore totale di 0,5 m. Il Grafico 4.25 mostra i dati ottenuti dalle simulazioni e dunque il rapporto tra lo spessore della facciata del locale considerato e la dimensione dell'apertura, data dal RAI.

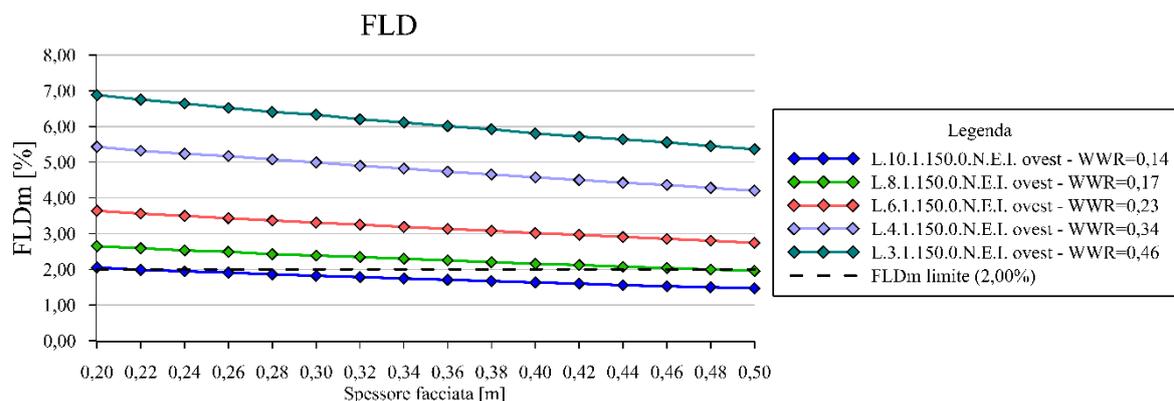


Grafico 4.25: Variazione di FLDm in funzione dello spessore dell'imbotte esterna.

Per ciascuna casistica, al fine di identificare la riduzione percentuale del fattore medio di luce diurna è definita l'equazione della linea di tendenza, funzione dello spessore dell'isolamento (x) espresso in metri. Dalle equazioni riportate in Tabella 4.18 si deduce che per ogni aumento dello spessore dell'imbotte esterna pari a 0,02 m si ha una riduzione lineare di circa il 2,207% considerando un rapporto aero-illuminante pari ad 1/10, del 2,005% per RAI pari ad 1/8, dell'1,871% per RAI pari ad 1/6, ed infine del 1,698% e del 1,646% per RAI pari a 1/4 ed 1/3. Dai valori ottenuti emerge una riduzione della

diminuzione lineare data dall'aumento dell'imbotte esterna con l'aumentare del rapporto aero-illuminante.

Tabella 4.18: Equazione linea di tendenza.

RAI	WWR			
1/10	0,14	L.10.1.150.0.N.E.I	$FLDm = -1,9107 x + 2,4047$	$R^2 = 0,9953$
1/8	0,17	L.8.1.150.0.N.E.I	$FLDm = -2,2844 x + 3,0814$	$R^2 = 0,9969$
1/6	0,23	L.6.1.150.0.N.E.I	$FLDm = -2,9352 x + 4,1991$	$R^2 = 0,9984$
1/4	0,34	L.4.1.150.0.N.E.I	$FLDm = -4,057 x + 6,2134$	$R^2 = 0,9986$
1/3	0,46	L.3.1.150.0.N.E.I	$FLDm = -4,9976 x + 7,8312$	$R^2 = 0,9974$

#### 4.2.3 Sostituzione del serramento e aggiunta di un sistema a cappotto

In questa sezione è analizzata l'influenza della compresenza delle azioni di retrofit sull'edificio. Per tale studio viene assunta la presenza di una singola apertura avente altezza pari a 1,50 m. Sono posti a confronto casi con il medesimo rapporto aero-illuminante, i cui valori adottati sono 1/8, 1/6, 1/4, 1/3 ed 1/2. Le simulazioni sono eseguite per il locale salotto e per la camera matrimoniale, considerando il posizionamento delle aperture sia sulla dimensione maggiore dei locali, orientata a ovest, sia su quella minore, orientata a sud.

Il primo risultato che si osserva, dai dati presenti in Tabella 4.19 per il locale salotto, è una diminuzione del FLDm data dalla presenza delle azioni di retrofit energetico. L'aumento del RAI e il conseguente aumento della superficie trasparente a discapito della superficie del telaio porta ad una diminuzione della riduzione percentuale dei valori di FLDm. Le diminuzioni per le finestre risultano comprese tra il 37% e il 39% mentre sono comprese tra il 37% e il 40% con la presenza di porte finestre.

Tabella 4.19: Influenza della sostituzione del serramento e dell'aggiunta di isolamento sul FLDm per il locale salotto.

	FLDm Lato sud	FLDm Lato ovest		FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato sud	FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato ovest
Finestre					
L.8.1.100.0.N.E.U	2,15	2,32	L.8.1.100.0.N.W.I13	1,31 (-39)	1,40 (-39)
L.8.1.120.0.N.E.U	2,35	2,51	L.8.1.120.0.N.W.I13	1,45 (-39)	1,54 (-39)
L.8.1.150.0.N.E.U	2,51	2,65	L.8.1.150.0.N.W.I13	1,56 (-38)	1,63 (-39)
L.6.1.100.0.N.E.U	2,74	3,05	L.6.1.100.0.N.W.I13	1,68 (-39)	1,87 (-39)
L.6.1.120.0.N.E.U	3,11	3,39	L.6.1.120.0.N.W.I13	1,93 (-38)	2,09 (-38)
L.6.1.150.0.N.E.U	3,42	3,64	L.6.1.150.0.N.W.I13	2,12 (-38)	2,26 (-38)
L.4.1.100.0.N.E.U	-	-	L.4.1.100.0.N.W.I13	-	-

	FLDm	FLDm		FLDm ( $\Delta\%$ )	FLDm ( $\Delta\%$ )
	Lato sud	Lato ovest		Lato sud	Lato ovest
L.4.1.120.0.N.E.U	-	4,85	L.4.1.120.0.N.W.I13	-	3,01 (-38)
L.4.1.150.0.N.E.U	4,92	5,44	L.4.1.150.0.N.W.I13	3,09 (-37)	3,41 (-37)
L.3.1.120.0.N.E.U	-	-	L.3.1.120.0.N.W.I13	-	-
L.3.1.150.0.N.E.U	-	6,87	L.3.1.150.0.N.W.I13	-	4,32 (-37)
Porte finestre					
L.8.1.245.0.N.E.U	1,67	1,73	L.8.1.245.0.N.W.I13	1,01 (-40)	1,03 (-40)
L.6.1.245.0.N.E.U	2,37	2,47	L.6.1.245.0.N.W.I13	1,45 (-39)	1,51 (-39)
L.4.1.245.0.N.E.U	3,70	3,92	L.4.1.245.0.N.W.I13	2,31 (-38)	2,43 (-38)
L.3.1.245.0.N.E.U	4,89	5,27	L.3.1.245.0.N.W.I13	3,07 (-38)	3,30 (-37)
L.2.1.245.0.N.E.U	-	7,56	L.2.1.245.0.N.W.I13	-	4,80 (-37)

I dati ottenuti per il locale salotto sono rappresentati nel Grafico 4.26 per l'esposizione delle aperture a sud e nel Grafico 4.27 per l'esposizione delle aperture ad ovest.

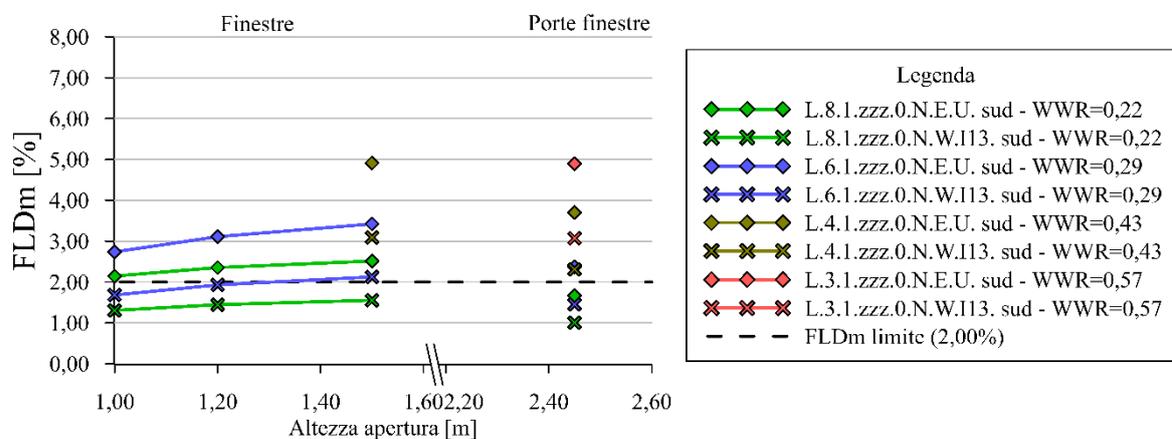


Grafico 4.26: Influenza della compresenza delle azioni di retrofit considerate sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione aperture lato sud.

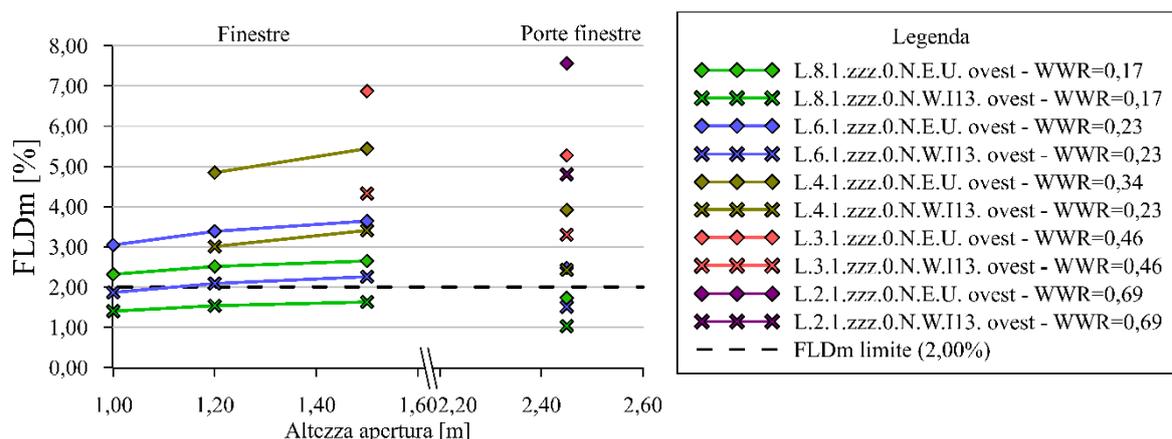


Grafico 4.27: Influenza della compresenza delle azioni di retrofit considerate sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione aperture lato ovest.

Medesime considerazioni possono ritenersi valide per la camera matrimoniale, i cui valori di FLDm e le relative riduzioni percentuali date dalle azioni di retrofit sono esposti in Tabella 4.20.

Tabella 4.20: Influenza della sostituzione del serramento e dell'aggiunta di isolamento sul FLDm per il locale camera matrimoniale

	FLDm Lato sud	FLDm Lato ovest		FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato sud	FLDm ( $\Delta\%$ ) Lato ovest
Finestre					
R.8.1.100.0.N.E.U	2,06	2,22	R.8.1.100.0.N.W.I13	1,25 (-39)	1,25 (-44)
R.8.1.120.0.N.E.U	2,23	2,37	R.8.1.120.0.N.W.I13	1,35 (-39)	1,35 (-43)
R.8.1.150.0.N.E.U	2,34	2,45	R.8.1.150.0.N.W.I13	1,42 (-39)	1,42 (-42)
R.6.1.100.0.N.E.U	2,71	2,96	R.6.1.100.0.N.W.I13	1,65 (-40)	1,80 (-39)
R.6.1.120.0.N.E.U	3,00	3,24	R.6.1.120.0.N.W.I13	1,85 (-39)	1,98 (-39)
R.6.1.150.0.N.E.U	3,23	3,42	R.6.1.150.0.N.W.I13	1,98 (-39)	2,10 (-39)
R.4.1.100.0.N.E.U	-	4,19	R.4.1.100.0.N.W.I13	-	2,55 (-39)
R.4.1.120.0.N.E.U	4,24	4,76	R.4.1.120.0.N.W.I13	2,64 (-38)	2,94 (-38)
R.4.1.150.0.N.E.U	4,80	5,22	R.4.1.150.0.N.W.I13	2,99 (-38)	3,24 (-38)
R.3.1.120.0.N.E.U	-	5,90	R.3.1.120.0.N.W.I13	-	3,64 (-38)
R.3.1.150.0.N.E.U	6,05	6,75	R.3.1.150.0.N.W.I13	3,78 (-38)	4,22 (-38)
Porte finestre					
R.8.1.245.0.N.E.U	1,48	1,52	R.8.1.245.0.N.W.I13	0,87 (-41)	0,88 (-42)
R.6.1.245.0.N.E.U	2,15	2,23	R.6.1.245.0.N.W.I13	1,30 (-40)	1,34 (-40)
R.4.1.245.0.N.E.U	3,44	3,64	R.4.1.245.0.N.W.I13	2,12 (-38)	2,23 (-39)
R.3.1.245.0.N.E.U	4,65	4,96	R.3.1.245.0.N.W.I13	2,89 (-38)	3,09 (-38)
R.2.1.245.0.N.E.U	6,65	7,33	R.2.1.245.0.N.W.I13	4,17 (-37)	4,61 (-37)

I dati ottenuti per il locale camera matrimoniale sono rappresentati nel Grafico 4.28 per l'esposizione delle aperture a sud e nel Grafico 4.29 per l'esposizione delle aperture ad ovest.

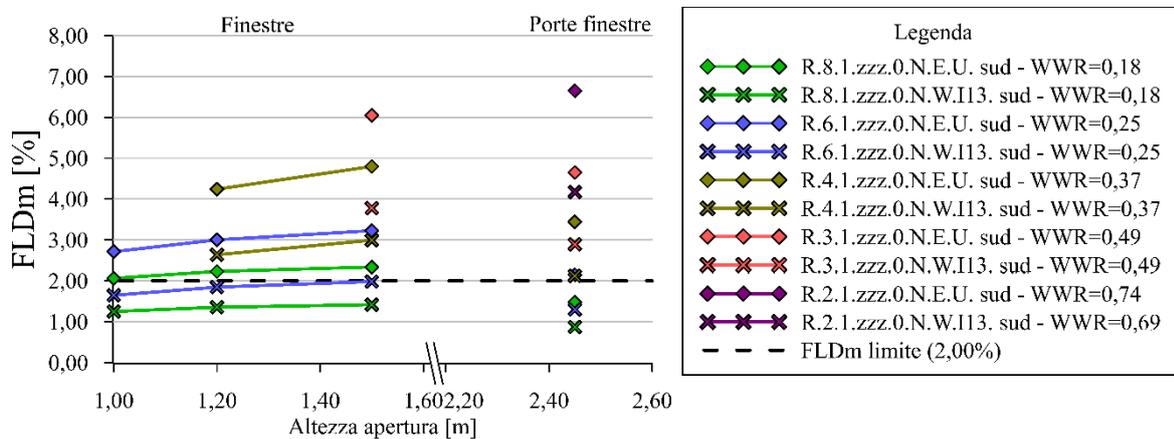


Grafico 4.28: Influenza della compresenza delle azioni di retrofit considerate sul FLDm per il locale camera matrimoniale (R) con esposizione aperture lato sud.

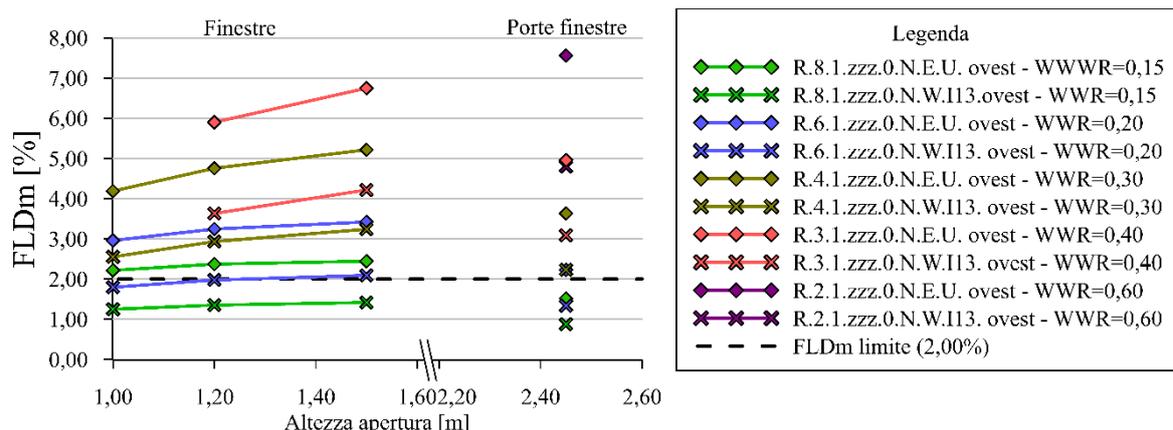


Grafico 4.29: Influenza della compresenza delle azioni di retrofit considerate sul FLDm per il locale camera matrimoniale (R) con esposizione aperture lato ovest.

È analizzato il confronto tra l'impatto delle singole azioni di retrofit sul FLDm. Sono comparate in Tabella 4.21 le riduzioni dei valori di FLDm, date dalle singole azioni di retrofit, quali la sostituzione del serramento (L.xx.y.zzz.0.N.W.U), l'aggiunta di un cappotto esterno (L.xx.y.zzz.0.N.E.I13) e dalla compresenza delle azioni di retrofit (L.xx.y.zzz.0.N.W.I13). Per tale analisi è considerato il locale salotto con la presenza di una singola apertura con esposizione ad ovest.

Dai risultati ottenuti emerge una maggiore diminuzione del FLDm data dalla sostituzione del serramento esistente rispetto alla diminuzione causata dall'aumento dello spessore dell'imbotte per l'aggiunta di isolamento termico in facciata.

Tabella 4.21: Confronto variazioni percentuali date dalle azioni di retrofit presenti.

Stato di fatto	Sostituzione serramento	Aggiunta sistema a cappotto	Compresenza azioni di retrofit
	L.xx.y.zzz.1.N.W.U	L.xx.y.zzz.1.N.E.I13	L.xx.y.zzz.1.N.W.I13
	$\Delta\%$	$\Delta\%$	$\Delta\%$
Finestre			
L.8.1.100.0.N.E.U	-30	-15	-39
L.8.1.120.0.N.E.U	-30	-13	-39
L.8.1.150.0.N.E.U	-30	-12	-39
L.6.1.100.0.N.E.U	-29	-13	-39
L.6.1.120.0.N.E.U	-29	-13	-38
L.6.1.150.0.N.E.U	-30	-11	-38
L.4.1.100.0.N.E.U	-	-	-
L.4.1.120.0.N.E.U	-30	-12	-38
L.4.1.150.0.N.E.U	-30	-11	-37
L.3.1.120.0.N.E.U	-	-	-
L.3.1.150.0.N.E.U	-30	-10	-37
Porte finestre			
L.8.1.245.0.N.E.U	-30	-14	-40
L.6.1.245.0.N.E.U	-30	-12	-39
L.4.1.245.0.N.E.U	-31	-11	-38
L.3.1.245.0.N.E.U	-31	-10	-37
L.2.1.245.0.N.E.U	-31	-9	-37

Sono mostrate le casistiche aventi RAI 1/8 e 1/6 rispettivamente nei Grafico 4.30 e Grafico 4.31.

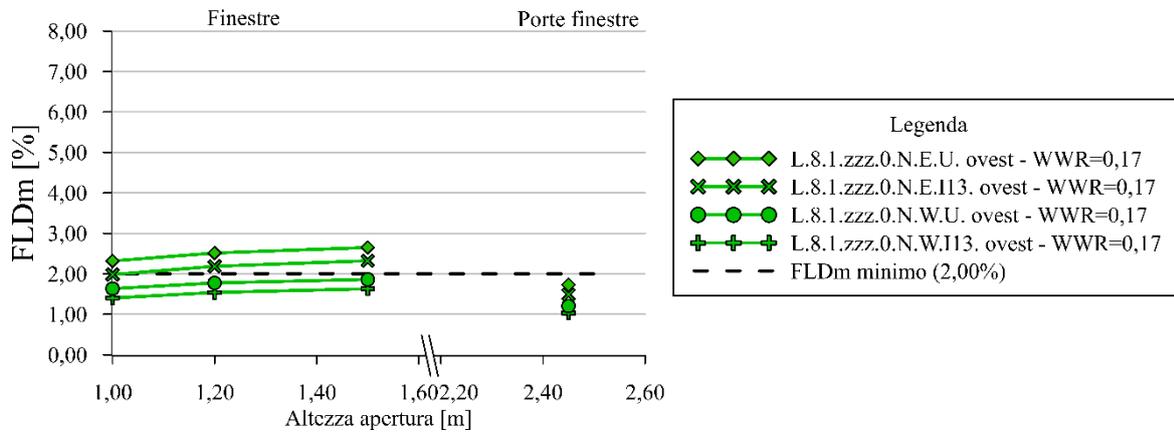


Grafico 4.30: Influenza delle azioni di retrofit sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione aperture lato ovest.

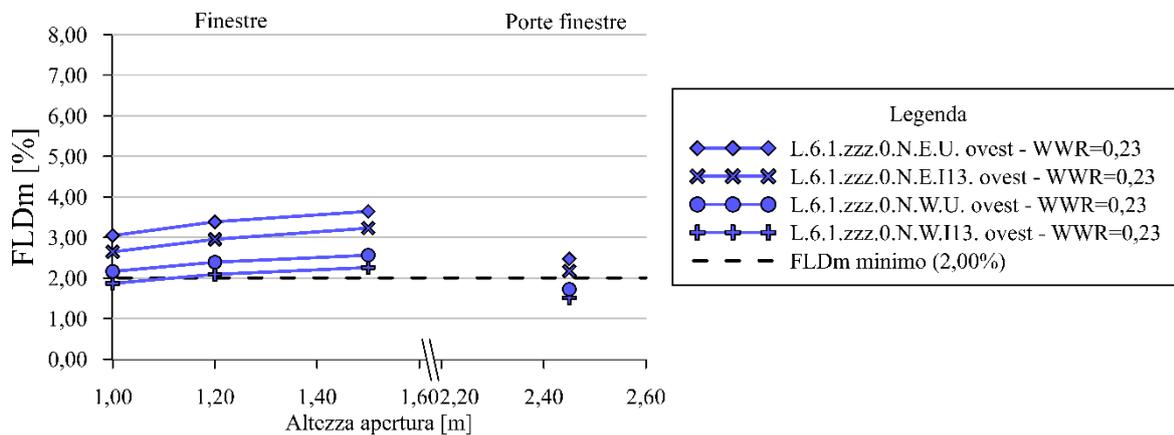


Grafico 4.31: Influenza delle azioni di retrofit sul FLDm per il locale salotto (L) con esposizione aperture lato ovest.

È infine valutato come le singole azioni di retrofit e la compresenza delle stesse influiscano sui parametri climate-based, quali Daylight Autonomy (DA) e Useful Daylight Illuminance (UDI). Le simulazioni sono eseguite per il locale salotto considerando due differenti RAI, pari a 1/8 e 1/4, con singola apertura di altezza pari a 1,50 m, esposta a sud.

Dai dati ottenuti, esplicitati in Tabella 4.22 per il RAI pari ad 1/8 e in Tabella 4.23 per il RAI pari a 1/4, si osserva che l'azione di retrofit di sostituzione del serramento, rispetto all'adozione di un sistema a cappotto, risulta maggiormente impattante sul fattore Daylight Autonomy. Tale impatto, risulta essere superiore per RAI pari ad 1/8 rispetto alla casistica avente RAI 1/4.

Tabella 4.22: Influenza delle azioni di retrofit su DA per RAI 1/8.

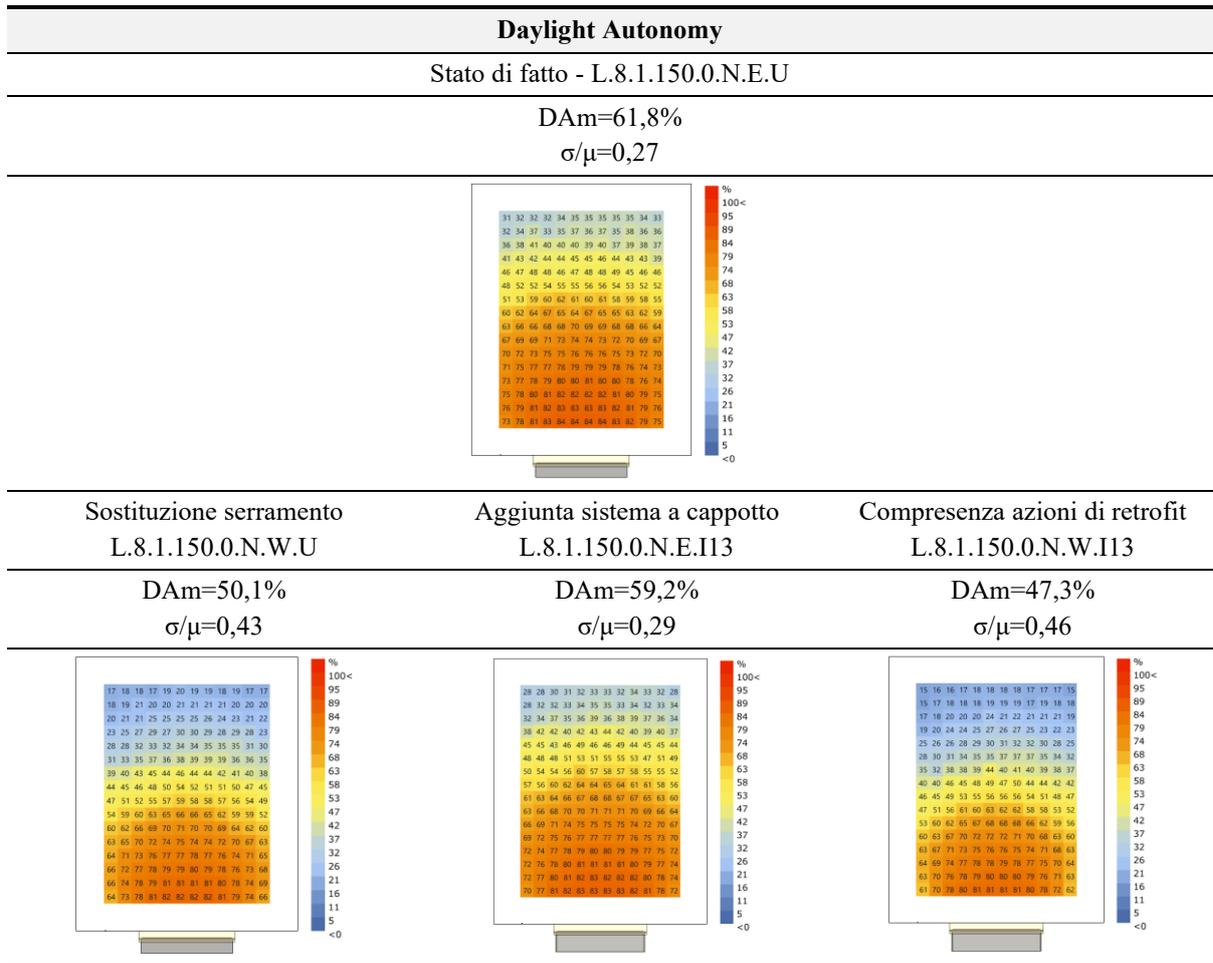
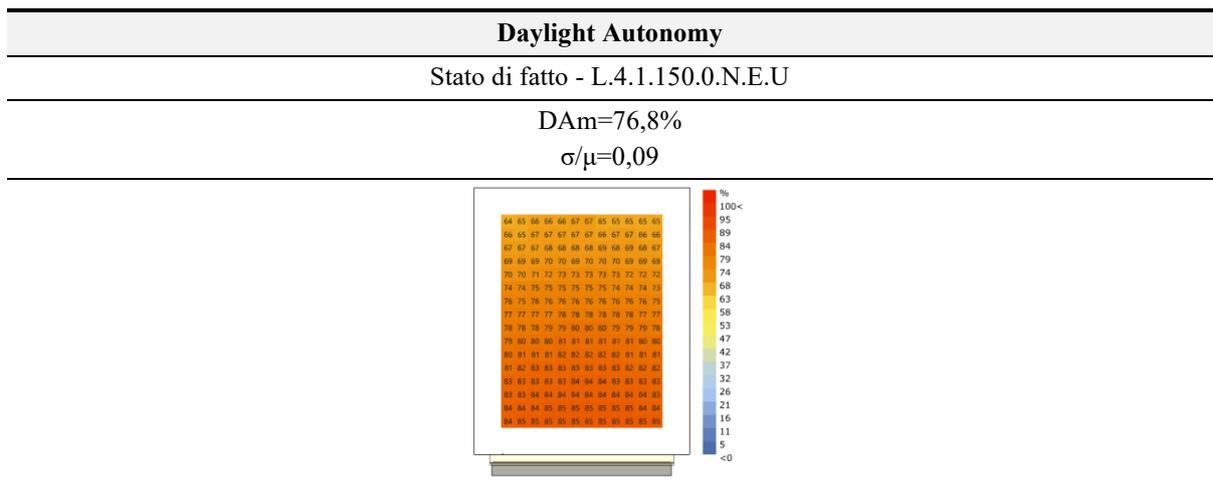
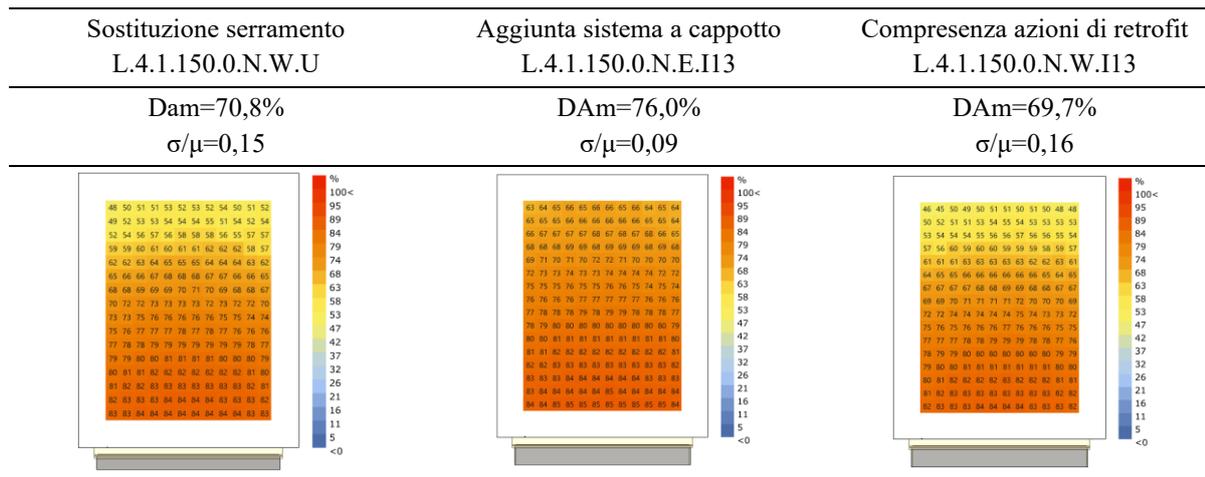


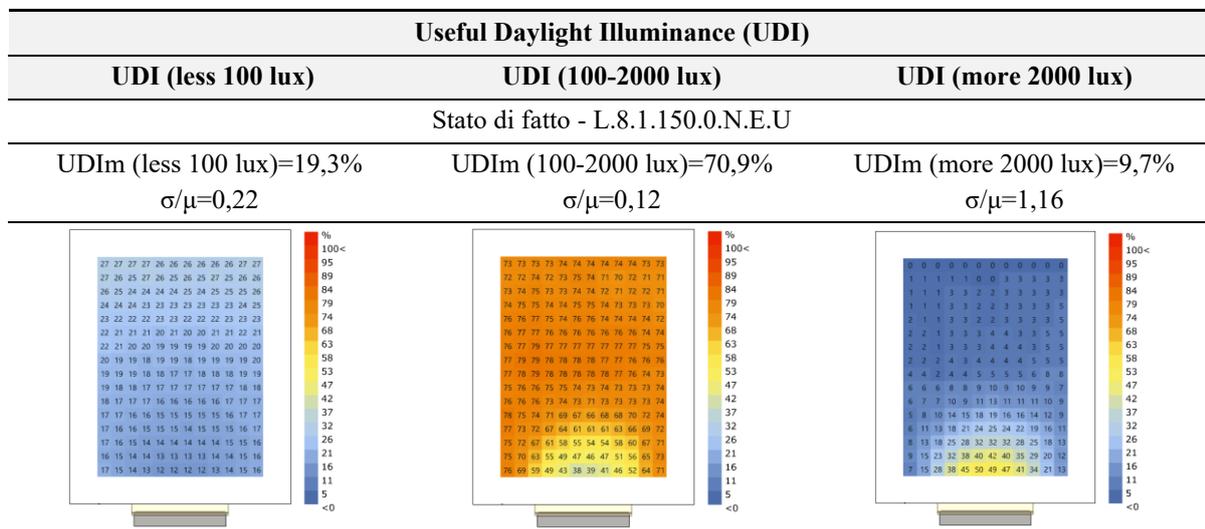
Tabella 4.23: Influenza delle azioni di retrofit su DA per RAI 1/4.





Considerando il parametro Useful Daylight Illuminance, dai dati ottenuti, mostrati in Tabella 4.24 per RAI pari a 1/8 e in Tabella 4.25 per RAI pari a 1/4, si nota che la sostituzione del serramento, rispetto all'aggiunta di un sistema a cappotto, risulta essere maggiormente impattante. Le azioni di retrofit portano un maggiore aumento della percentuale di tempo in cui l'illuminamento risulta essere minore di 100 lux e una conseguente diminuzione della percentuale di tempo con illuminamento maggiore di 2000 lux. Per RAI pari a 1/4, è dimostrato inoltre un aumento della percentuale di tempo in cui l'illuminamento risulta essere compreso tra 100 e 2000 lux, ed una migliore distribuzione della luce in prossimità delle aperture, come si nota dal rapporto  $\sigma/\mu$ .

Tabella 4.24: Influenza delle azioni di retrofit su UDI per RAI 1/8.



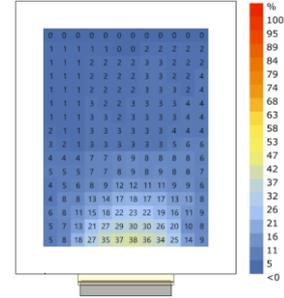
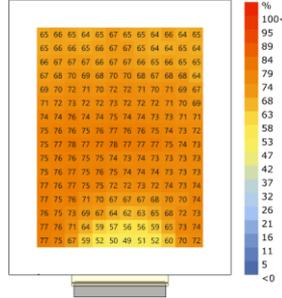
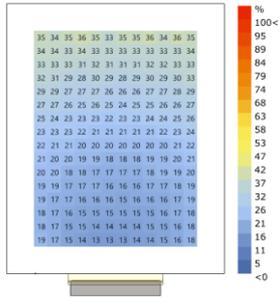
**UDI (less 100 lux)                      UDI (100-2000 lux)                      UDI (more 2000 lux)**

**Sostituzione serramento - L.8.1.150.0.N.W.U**

UDI<sub>m</sub> (less 100 lux)=23,0%  
σ/μ=0,29

UDI<sub>m</sub> (100-2000 lux)=70,1%  
σ/μ=0,08

UDI<sub>m</sub> (more 2000 lux)=7,0%  
σ/μ=1,16

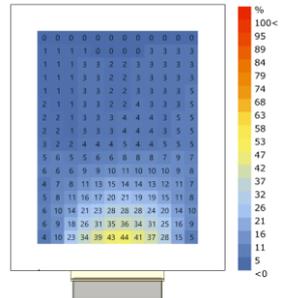
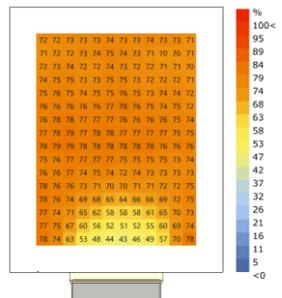
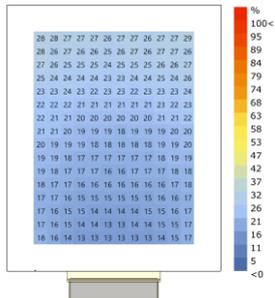


**Aggiunta sistema a cappotto - L.8.1.150.0.N.E.I13**

UDI<sub>m</sub> (less 100 lux)=19,9%  
σ/μ=0,22

UDI<sub>m</sub> (100-2000 lux)=72,0%  
σ/μ=0,10

UDI<sub>m</sub> (more 2000 lux)=8,2%  
σ/μ=1,18



**Compresenza azioni di retrofit - L.8.1.150.0.N.W.I13**

UDI<sub>m</sub> (less 100 lux)=23,8%  
σ/μ=0,29

UDI<sub>m</sub> (100-2000 lux)=70,3%  
σ/μ=0,07

UDI<sub>m</sub> (more 2000 lux)=5,8%  
σ/μ=1,16

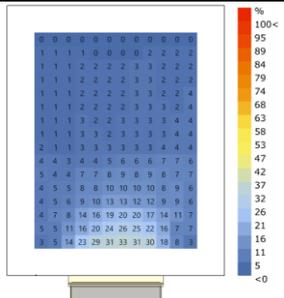
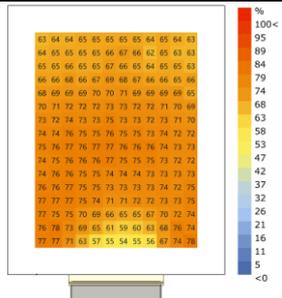
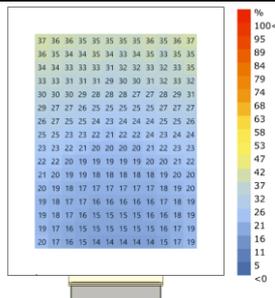
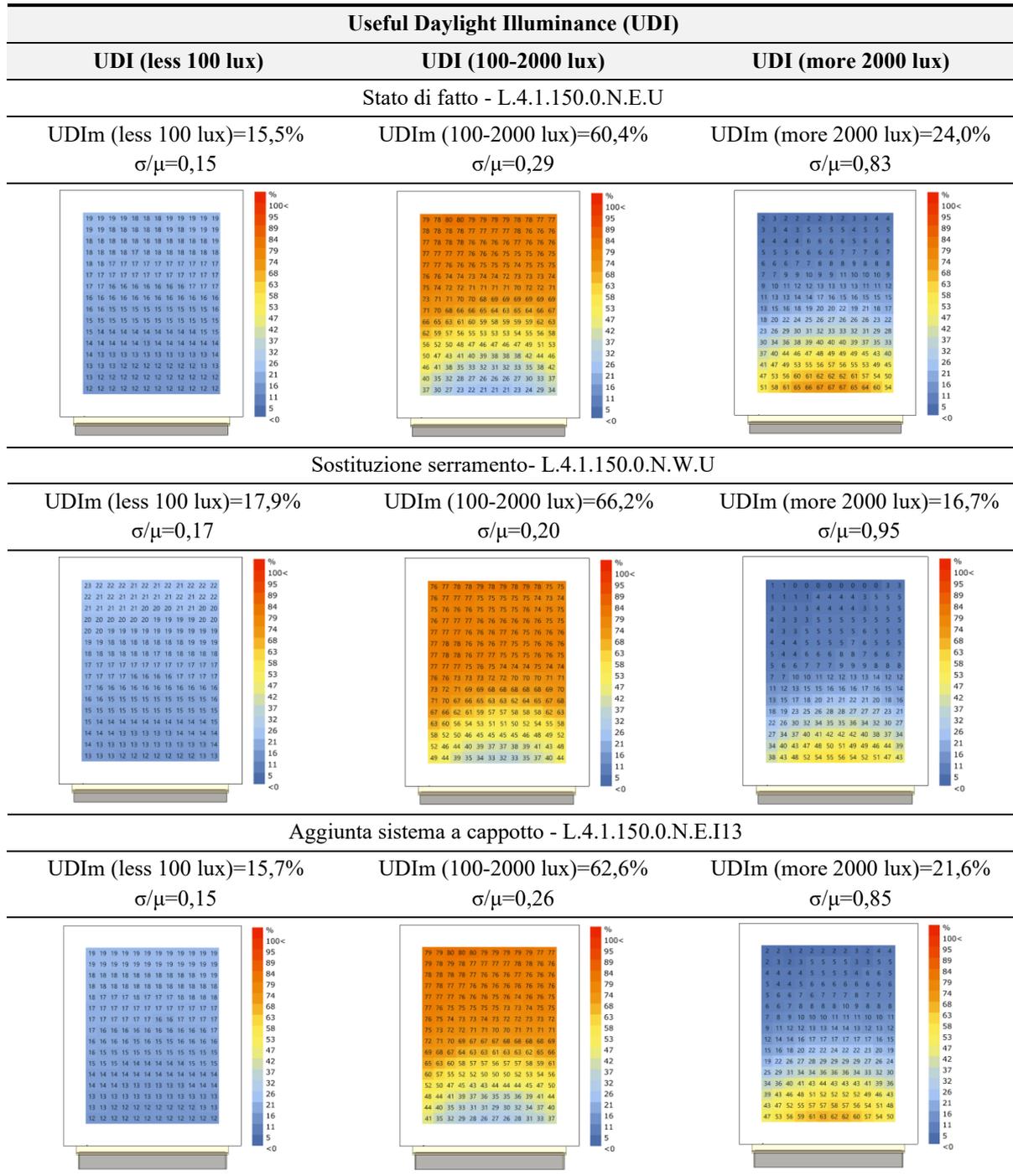


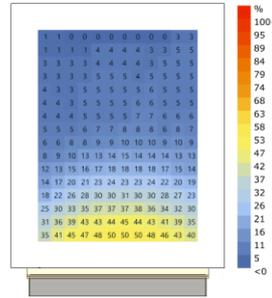
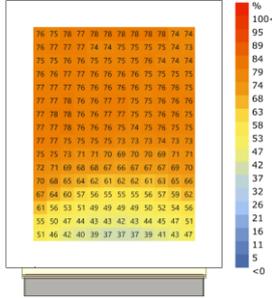
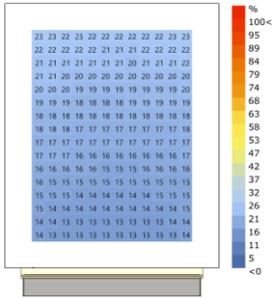
Tabella 4.25: Influenza delle azioni di retrofit su UDI per RAI 1/4.



UDI (less 100 lux)	UDI (100-2000 lux)	UDI (more 2000 lux)
--------------------	--------------------	---------------------

Compresenza azioni di retrofit - L.4.1.150.0.N.W.I13

UDI <sub>Im</sub> (less 100 lux) = 17,4% $\sigma/\mu=0,17$	UDI <sub>Im</sub> (100-2000 lux) = 67,8% $\sigma/\mu=0,17$	UDI <sub>Im</sub> (more 2000 lux) = 14,8% $\sigma/\mu=0,95$
---	---	--





## 5. Conclusioni

Al fine di garantire un miglioramento in termini di prestazione termica ed energetica degli edifici, gli interventi di retrofit energetico sull'involucro si sono progressivamente diffusi come risposta al patrimonio edilizio esistente, costituito da edifici fortemente impattanti in termini di consumo energetico.

Questo studio si è focalizzato sulla quantificazione dell'impatto delle azioni di retrofit, quali l'applicazione di un sistema a cappotto in facciata e la sostituzione dei serramenti, sull'apporto di luce naturale all'interno degli edifici stessi, attraverso la valutazione del fattore medio di luce diurna e dei fattori Daylight Autonomy e Useful Daylight Illuminance.

L'analisi è stata condotta in funzione di differenti parametri tecnico-costruttivi, quali la geometria del locale e delle finestre, il numero di aperture, la presenza di un oggetto orizzontale e la previsione di azioni di retrofit singole o compresenti sull'edificio.

Considerando i locali analizzati allo stato di fatto, dai risultati ottenuti è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- Il locale salotto, avente dimensione maggiore rispetto alla camera matrimoniale, a parità di rapporto aero-illuminante garantisce un fattore medio di luce diurna maggiore in tutte le casistiche considerate. Le differenze tra i due locali sono dovute al discostamento tra i valori di WWR, sempre maggiore per il locale salotto e crescente con l'incremento del RAI.
- La presenza di aperture sulla dimensione maggiore del locale garantisce un aumento del FLDm in tutte le casistiche considerate, rispetto alla presenza delle medesime sulla dimensione minore. Data la minore profondità del locale, la prima configurazione garantisce infatti, una migliore distribuzione dell'illuminamento all'interno del locale.
- A parità di RAI un maggior numero di aperture porta ad una riduzione del FLDm. Questa correlazione è da attribuirsi alla modalità di calcolo della superficie finestrata proposta dal Regolamento Edilizio di Milano, per cui viene considerata l'intera superficie del vano murario, comprensiva del telaio. Poiché ad un maggior numero di aperture corrisponde un rapporto perimetro/area più elevato, la superficie occupata dal telaio costituisce una percentuale più significativa rispetto al totale. In generale, a parità di numero di aperture un RAI minore porta ad un maggiore impatto sulla riduzione del FLDm. Ad esempio, considerando il locale salotto e aperture di altezza pari a 1,50 m, il passaggio da 1 a 4 aperture porta a riduzioni comprese tra il 32% ed il 68% per RAI pari ad 1/10, mentre per RAI pari ad 1/4 sono limitate all'intervallo 13-33%.

- L'aumento dell'altezza delle aperture da 1,00 m a 1,70 m, data la conformazione del telaio, porta ad un aumento della superficie trasparente, garantendo di conseguenza un aumento del fattore medio di luce diurna. Inoltre, a parità di RAI, per le finestre aventi altezza maggiore, l'affaccio alla porzione più alta della volta celeste risulta agevolato, e di conseguenza, si ha un migliore accesso alla luce naturale. Di contro, la presenza di una porta finestra di altezza pari a 2,45 m, a parità di RAI risulta penalizzante a causa della maggiore disomogeneità della distribuzione dell'illuminamento.
- La presenza di una sporgenza orizzontale, considerata esclusivamente per le casistiche con porta finestra, riduce i valori del fattore medio di luce diurna in percentuali comprese tra il 27% e il 33% per il locale salotto e tra il 27% e il 34% per la camera matrimoniale. A parità di RAI, la riduzione del FLDm risulta maggiore con la diminuzione del numero di aperture e dunque con l'aumento della superficie trasparente.
- La presenza di montanti interni causa una riduzione del fattore medio di luce diurna proporzionale alla riduzione della superficie trasparente data dai montanti stessi.

Rispetto all'impatto delle azioni di retrofit sul fattore medio di luce diurna, invece, è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- La sostituzione del serramento esistente avente telaio in legno e vetro singolo con un serramento avente telaio in PVC e vetrocamera porta ad una riduzione del FLDm compresa tra il 29% e il 31%. Tale riduzione risulta essere indipendente dal rapporto aero-illuminante considerato, dall'altezza e dal numero di aperture, il cui contributo è poco significativo se confrontato con l'impatto della sostituzione del serramento.
- L'aumento dello spessore dell'imbotte esterna dato dall'aggiunta di un sistema di coibentazione in facciata porta ad una riduzione del FLDm di entità proporzionale alla diminuzione della superficie trasparente; si ha quindi una maggiore penalizzazione per RAI minori oppure, a parità di RAI, per l'aumento del numero di aperture. Considerando, ad esempio, il locale salotto, a parità di altezza di apertura si ha una riduzione del FLDm del 11% per RAI pari a 1/4 e del 15% per RAI pari a 1/8. Inoltre, con il medesimo RAI, l'aumento del numero di finestre da 1 a 4 porta a diminuzioni comprese tra il 12% e il 27%.

Dal confronto tra le due azioni di retrofit presenti sull'edificio si evince che la sostituzione del serramento risulta maggiormente penalizzante sul FLDm, rispetto all'aumento dello spessore dell'imbotte esterna data dall'aggiunta di isolamento termico.

La valutazione dei parametri climate-based porta alla medesima constatazione, che vede come maggiormente impattante l'azione di retrofit di sostituzione del serramento, la quale porta a una più rilevante diminuzione del parametro Daylight Autonomy. Per il fattore Useful Daylight Illuminance, le azioni di retrofit portano un aumento della percentuale di tempo in cui l'illuminamento risulta essere minore di 100 lux e una conseguente

diminuzione della percentuale di tempo con illuminamento maggiore di 2000 lux. Per RAI pari a 1/4 si ha inoltre un aumento della percentuale di tempo in cui l'illuminamento risulta essere compreso tra 100 e 2000 lux, ed una migliore distribuzione della luce in prossimità delle aperture, come si nota dal rapporto  $\sigma/\mu$

In conclusione, data l'analisi dei dati ottenuti, risulta opportuno valutare correttamente la scelta tecnica in fase di sostituzione, poiché vetri eccessivamente performanti provocano una forte diminuzione del comfort visivo all'interno dell'ambiente. Nonostante l'effetto del cappotto risulti meno impattante, anche in tal caso risulta necessario trovare il corretto bilancio tra il guadagno prestazione e la perdita di illuminamento interno.



# Bibliografia

- [1] UN environment programme, «2020 Global status report for buildings and construction - Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector».
- [2] E. Palumbo e S. Politi, «Efficientamento dell'involucro edilizio: interazione tra energia inglobata ed energia operativa», *TECHNE 16*, 2018.
- [3] «Istat - Istituto Nazionale di Statistica». Available: [www.istat.it](http://www.istat.it).
- [4] LEGGE 30 marzo 1976, n. 373, «Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici», GU n.148 del 07-06-1976.
- [5] LEGGE 9 gennaio 1991, n. 10, «Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia», GU n.13 del 16-01-1991.
- [6] DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA 26 agosto 1993, n. 412, «Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'articolo 4 della Legge 9 gennaio 1991, n.10».
- [7] DIRETTIVA 2002/91/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico nell'edilizia.
- [8] DIRETTIVA 2006/32/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 5 aprile 2006 concernente l'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e recante abrogazione della direttiva 93/76/CEE del Consiglio.
- [9] DIRETTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia.
- [10] DIRETTIVA 2018/2002/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO dell'11 dicembre 2018 che modifica la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica.
- [11] D.lgs. n.311 del 2006 «Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo n.

- 192 del 2005, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia», G.U. n. 26 del 1° febbraio 2007.
- [12] DECRETO 26 giugno 2009 «Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici», GU n. 158 del 10-7-2009.
- [13] DECRETO 26 giugno 2015 «Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici», GU n. 162 del 15-7-2015.
- [14] D.lgs. del 10 giugno 2020, n. 48 «Attuazione della direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 30 maggio 2018, che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica».
- [15] Agenzia delle entrate, «Ristrutturazioni edilizie: Le agevolazioni fiscali», *L'agenzia informa*, luglio 2019.
- [16] DECRETO-LEGGE 19 maggio 2020, n. 34, «Misure urgenti in materia di salute, sostegno al lavoro e all'economia, nonché di politiche sociali connesse all'emergenza epidemiologica da COVID-19», GU n.128 del 19-5-2020.
- [17] Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico del 6/08/2020 (c.d. Ecobonus).
- [18] V. Corrado, I. Ballarini e S. P. Corgnati, «Building Typology Brochure - Italy - Fascicolo sulla Tipologia Edilizia Italiana», 2014.
- [19] D. D'Olimpo, *Il retrofitting energetico e bioclimatico nella riqualificazione edilizia. Tecnologie e soluzioni tecniche per il miglioramento della prestazione energetico-ambientale degli edifici*, Roma: Legislazione Tecnica, 2017.
- [20] A. Andaloro, E. Gasparri, E. S. Mazzucchelli e A. Stefanazzi, «Innovazione tecnologica, prestazionale e architettonica di sistemi di rivestimento a parete ventilata», *Rehabend*, 2014.
- [21] Cortexa, *Manuale per l'applicazione del sistema a cappotto. Il manuale di riferimento in Italia per l'Eccellenza nel sistema a cappotto*, Origgi Consulting S.r.l., 2021.
- [22] F. Claribel, J. De Brito e C. O. Cruz, «Thermal Retrofitting of Facades: Architectural Integration of ETICS», *ASCE*.
- [23] I. E. A. 50, «Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Buildings, "Building Renovation Case Studies" », *International Energy Agency*, 2011.

- [24] E. Seghezzi e G. Masera, «Retrofit attraverso Pannelli Prefabbricati: lo Stato dell'Arte», in *Sostenibilità ambientale, economia circolare e produzione edilizia. La ricerca scientifica nel settore delle costruzioni nell'era delle nuove sfide ambientali e digitali*, Maggioli Editore, pp. 349-366.
- [25] G. Salvalai, «Soluzioni prefabbricate per la riqualificazione energetica dell'involucro», *azero*, pp. 56 - 69, 2016.
- [26] G. Salvalai, G. Iannaccone, M. M. Sesana e P. Emilio, «Outer facade retrofitting trough precast insulation panels: method and planning tool applied to an Italian residential building», *TEMA - Technologies Engineering Materials Architecture*, vol. 3, n. 2, pp. 12 - 23, 2017.
- [27] UNI 11018:2003 «Rivestimenti e sistemi di ancoraggio per facciate ventilate a montaggio meccanico - Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione e la manutenzione. Rivestimenti lapidei e ceramici».
- [28] V. Lo Verso, «La luce naturale come materiale per l'architettura degli ambienti confinati», *Arquiteturarevista*, vol. 2, n. 2, 2006.
- [29] A. Giachetta, *Illuminazione naturale: principi e componenti*.
- [30] Minergie sapere, «Illuminazione naturale. Massima qualità dell'illuminazione negli spazi Minergie», Minergie Svizzera.
- [31] Decreto ministeriale Sanità 5 luglio 1975 «Modificazioni alle istruzioni ministeriali 20 giugno 1896, relativamente all'altezza minima ed ai requisiti igienico-sanitari principali dei locali di abitazione», GU n. 190 del 18/7/1975.
- [32] BS EN 10737:2018 «Daylight in buildings», 2018.
- [33] R. A. Mangkuto, R. F. Fela e S. S. Utami, «Effect of facade thickness on daylight performance in a reference office building», *International building performance simulation association*, pp. 1044 - 1051, 2019.
- [34] B. Gherri, *Luce naturale e daylighting assessment. Nuovo protocollo per la valutazione degli spazi confinati*.
- [35] C. Aghemo, A. Pellegrino e L. V. V. R. M., «Studio preliminare e identificazione di edifici tipo per la validazione del metodo di calcolo del LENI», 2016.
- [36] N. Lolli e M. Haase, «Consequences of energy retrofitting for daylight availability in Norwegian apartments based on measurements and simulations», *Energy Procedia*,

pp. 241 - 246, 2017.

- [37] N. Makaremi, S. Schiavoni, A. L. Pisello, F. Asdrubali e F. Cotana, «Quantifying the effects of interior surface reflectance on indoor lighting», *Energy Procedia*, pp. 306 - 316, 2017.
- [38] H. Altan, J. Mohelnikova e P. Hofman, «Thermal and daylight Evaluation of building zones», *Energy Procedia*, pp. 2784 - 2789, 2015.
- [39] Regolamento Edilizio Comune di Milano.
- [40] DECRETO N. 6480 del 30/07/2015.
- [41] «pilkington spectrum» [Online].
- [42] «Spectral database material». Available: <https://spectraldb.com/>.
- [43] «Setting Rendering Options». Available: [https://floyd.lbl.gov/radiance/refer/Notes/rpict\\_options.html](https://floyd.lbl.gov/radiance/refer/Notes/rpict_options.html).

# A. Appendice A

Tabella A.1: FLDm stato di fatto locale salotto.

RAI = 1/10						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
					WWR = 0,17	WWR = 0,14
L.10.4.100.0.N.E.U	2,00	1,00	0,50	1,03	0,85	0,89
L.10.4.120.0.N.E.U	2,00	1,20	0,42	0,99	0,79	0,83
L.10.4.150.0.N.E.U	2,00	1,50	0,33	0,87	0,63	0,66
L.10.3.100.0.N.E.U	2,00	1,00	0,67	1,16	1,05	1,11
L.10.3.120.0.N.E.U	2,00	1,20	0,56	1,14	1,04	1,10
L.10.3.150.0.N.E.U	2,00	1,50	0,44	1,08	0,94	0,98
L.10.2.100.0.N.E.U	2,00	1,00	1,00	1,28	1,30	1,39
L.10.2.120.0.N.E.U	2,00	1,20	0,83	1,29	1,35	1,43
L.10.2.150.0.N.E.U	2,00	1,50	0,67	1,28	1,34	1,40
L.10.1.100.0.N.E.U	2,00	1,00	2,00	1,40	1,72	1,81
L.10.1.120.0.N.E.U	2,00	1,20	1,67	1,45	1,86	1,96
L.10.1.150.0.N.E.U	2,00	1,50	1,33	1,48	1,95	2,04
L.10.1.170.0.N.E.U	2,00	1,70	1,18	1,48	1,97	2,04
L.10.1.245.0.N.E.U	2,00	2,45	0,82	1,45	1,24	1,28
RAI = 1/8						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
					WWR = 0,22	WWR = 0,17
L.8.4.100.0.N.E.U	2,50	1,00	0,63	1,41	1,24	1,31
L.8.4.120.0.N.E.U	2,50	1,20	0,52	1,39	1,22	1,27
L.8.4.150.0.N.E.U	2,50	1,50	0,42	1,29	1,08	1,12
L.8.3.100.0.N.E.U	2,50	1,00	0,83	1,54	1,46	1,54
L.8.3.120.0.N.E.U	2,50	1,20	0,69	1,54	1,49	1,56
L.8.3.150.0.N.E.U	2,50	1,50	0,56	1,50	1,42	1,48
L.8.2.100.0.N.E.U	2,50	1,00	1,25	1,66	1,71	1,84
L.8.2.120.0.N.E.U	2,50	1,20	1,04	1,69	1,81	1,93
L.8.2.150.0.N.E.U	2,50	1,50	0,83	1,70	1,84	1,95
L.8.1.100.0.N.E.U	2,50	1,00	2,50	1,78	2,15	2,32
L.8.1.120.0.N.E.U	2,50	1,20	2,08	1,85	2,35	2,51
L.8.1.150.0.N.E.U	2,50	1,50	1,67	1,90	2,51	2,65
L.8.1.170.0.N.E.U	2,50	1,70	1,47	1,91	2,56	2,68
L.8.1.245.0.N.E.U	2,50	2,45	1,02	1,90	1,67	1,73

RAI = 1/6						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
					WWR = 0,29	WWR = 0,23
L.6.4.100.0.N.E.U	3,33	1,00	0,83	2,21	1,92	2,01
L.6.4.120.0.N.E.U	3,33	1,20	0,69	2,05	1,96	2,05
L.6.4.150.0.N.E.U	3,33	1,50	0,56	1,99	1,88	1,94
L.6.4.245.0.N.E.U	3,33	2,45	0,34	1,59	0,80	0,83
L.6.3.100.0.N.E.U	3,33	1,00	1,11	2,17	2,14	2,26
L.6.3.120.0.N.E.U	3,33	1,20	0,93	2,21	2,24	2,36
L.6.3.150.0.N.E.U	3,33	1,50	0,74	2,20	2,23	2,34
L.6.3.245.0.N.E.U	3,33	2,45	0,45	1,95	1,17	1,23
L.6.2.100.0.N.E.U	3,33	1,00	1,67	2,29	2,38	2,56
L.6.2.120.0.N.E.U	3,33	1,20	1,39	2,36	2,56	2,74
L.6.2.150.0.N.E.U	3,33	1,50	1,11	2,40	2,68	2,84
L.6.2.245.0.N.E.U	3,33	2,45	0,68	2,30	1,64	1,73
L.6.1.100.0.N.E.U	3,33	1,00	3,33	2,41	2,74	3,05
L.6.1.120.0.N.E.U	3,33	1,20	2,78	2,51	3,11	3,39
L.6.1.150.0.N.E.U	3,33	1,50	2,22	2,60	3,42	3,64
L.6.1.170.0.N.E.U	3,33	1,70	1,96	2,63	3,51	3,71
L.6.1.245.0.N.E.U	3,33	2,45	1,36	2,65	2,37	2,47
L.6.4.245.0.B.E.U	3,33	2,45	0,34	1,59	0,57	0,58
L.6.3.245.0.B.E.U	3,33	2,45	0,45	1,95	0,84	0,85
L.6.2.245.0.B.E.U	3,33	2,45	0,68	2,30	1,16	1,19
L.6.1.245.0.B.E.U	3,33	2,45	1,36	2,65	1,64	1,65
RAI = 1/4						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
					WWR = 0,43	WWR = 0,34
L.4.4.100.0.N.E.U	5,00	1,00	1,25	-	-	-
L.4.4.120.0.N.E.U	5,00	1,20	1,04	3,39	-	3,63
L.4.4.150.0.N.E.U	5,00	1,50	0,83	3,39	3,50	3,64
L.4.4.245.0.N.E.U	5,00	2,45	0,51	3,10	1,94	1,99
L.4.3.100.0.N.E.U	5,00	1,00	1,67	-	-	-
L.4.3.120.0.N.E.U	5,00	1,20	1,39	3,54	-	3,92
L.4.3.150.0.N.E.U	5,00	1,50	1,11	3,60	3,88	4,05
L.4.3.245.0.N.E.U	5,00	2,45	0,68	3,45	2,36	2,46
L.4.2.100.0.N.E.U	5,00	1,00	2,50	/	-	-
L.4.2.120.0.N.E.U	5,00	1,20	2,08	3,69	-	4,27
L.4.2.150.0.N.E.U	5,00	1,50	1,67	3,80	4,29	4,58
L.4.2.245.0.N.E.U	5,00	2,45	1,02	3,80	2,87	3,03
L.4.1.100.0.N.E.U	5,00	1,00	5,00	-	-	-
L.4.1.120.0.N.E.U	5,00	1,20	4,17	3,85	-	4,85
L.4.1.150.0.N.E.U	5,00	1,50	3,33	4,10	4,92	5,44
L.4.1.245.0.N.E.U	5,00	2,45	2,04	4,16	3,70	3,92
L.4.4.245.0.B.E.U	5,00	2,45	0,51	3,10	1,41	1,41

Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
L.4.3.245.0.B.E.U	5,00	2,45	0,68	3,45	1,72	1,73
L.4.2.245.0.B.E.U	5,00	2,45	1,02	3,80	2,07	2,10
L.4.1.245.0.B.E.U	5,00	2,45	2,04	4,16	2,55	2,63
<b>RAI = 1/3</b>						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLD <sub>m</sub> [%] Lato sud	FLD <sub>m</sub> [%] Lato ovest
					WWR = 0,57	WWR = 0,46
L.3.4.150.0.N.E.U	6,67	1,50	1,11	4,79	-	5,33
L.3.4.245.0.N.E.U	6,67	2,45	0,68	4,60	3,12	3,23
L.3.3.150.0.N.E.U	6,67	1,50	1,48	5,00	-	5,75
L.3.3.245.0.N.E.U	6,67	2,45	0,91	4,95	3,56	3,72
L.3.2.150.0.N.E.U	6,67	1,50	2,22	5,20	0,00	6,20
L.3.2.245.0.N.E.U	6,67	2,45	1,36	5,31	4,05	4,31
L.3.1.120.0.N.E.U	6,67	1,20	5,56	-	-	-
L.3.1.150.0.N.E.U	6,67	1,50	4,44	5,40	-	6,87
L.3.1.245.0.N.E.U	6,67	2,45	2,72	5,67	4,89	5,27
L.3.4.245.0.B.E.U	6,67	2,45	0,68	4,60	2,28	2,29
L.3.3.245.0.B.E.U	6,67	2,45	0,91	4,95	2,61	2,62
L.3.2.245.0.B.E.U	6,67	2,45	1,36	5,31	2,95	3,01
L.3.1.245.0.B.E.U	6,67	2,45	2,72	5,67	3,42	3,54
<b>RAI = 1/2</b>						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
					WWR = 0,86	WWR = 0,69
L.2.4.245.0.N.E.U	10,00	2,45	1,02	7,61	-	5,69
L.2.3.245.0.N.E.U	10,00	2,45	1,36	7,96	-	6,14
L.2.2.245.0.N.E.U	10,00	2,45	2,04	8,31	-	6,71
L.2.1.245.0.N.E.U	10,00	2,45	4,08	8,67	-	7,56
L.2.4.245.0.N.E.U	10,00	2,45	1,02	7,61	-	4,07
L.2.3.245.0.N.E.U	10,00	2,45	1,36	7,96	-	4,40
L.2.2.245.0.N.E.U	10,00	2,45	2,04	8,31	-	4,77
L.2.1.245.0.N.E.U	10,00	2,45	4,08	8,67	-	5,24

Tabella A.2: FLDm stato di fatto locale camera matrimoniale.

RAI = 1/10						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
					WWR = 0,15	WWR = 0,12
R.10.8.100.0.N.E.U	1,50	1,00	0,19	0,17	0,04	0,04
R.10.8.120.0.N.E.U	1,50	1,20	0,16	-	-	-
R.10.8.150.0.N.E.U	1,50	1,50	0,13	-	-	-
R.10.4.100.0.N.E.U	1,50	1,00	0,38	0,65	0,61	0,64
R.10.4.120.0.N.E.U	1,50	1,20	0,31	0,59	0,51	0,52
R.10.4.150.0.N.E.U	1,50	1,50	0,25	0,45	0,30	0,32
R.10.3.100.0.N.E.U	1,50	1,00	0,50	0,78	0,85	0,89
R.10.3.120.0.N.E.U	1,50	1,20	0,42	0,74	0,792	0,81
R.10.3.150.0.N.E.U	1,50	1,50	0,33	0,66	0,625	0,64
R.10.2.100.0.N.E.U	1,50	1,00	0,75	0,90	1,140	1,21
R.10.2.120.0.N.E.U	1,50	1,20	0,63	0,89	1,139	1,21
R.10.2.150.0.N.E.U	1,50	1,50	0,50	0,86	1,067	1,13
R.10.1.100.0.N.E.U	1,50	1,00	1,50	1,02	1,632	1,73
R.10.1.120.0.N.E.U	1,50	1,20	1,25	1,05	1,738	1,82
R.10.1.150.0.N.E.U	1,50	1,50	1,00	1,06	1,788	1,85
R.10.1.170.0.N.E.U	1,50	1,70	0,88	1,05	1,757	1,83
R.10.1.245.0.N.E.U	1,50	2,45	0,61	1,00	1,058	1,08
RAI = 1/8						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
					WWR = 0,18	WWR = 0,15
R.8.8.100.0.N.E.U	1,88	1,00	0,23	0,45	0,25	0,26
R.8.8.120.0.N.E.U	1,88	1,20	0,20	0,27	0,08	0,08
R.8.8.150.0.N.E.U	1,88	1,50	0,16	0,04	0,00	0,00
R.8.4.100.0.N.E.U	1,88	1,00	0,47	0,94	0,99	1,04
R.8.4.120.0.N.E.U	1,88	1,20	0,39	0,89	0,90	0,93
R.8.4.150.0.N.E.U	1,88	1,50	0,31	0,77	0,68	0,70
R.8.3.100.0.N.E.U	1,88	1,00	0,63	1,06	1,24	1,31
R.8.3.120.0.N.E.U	1,88	1,20	0,52	1,04	1,21	1,26
R.8.3.150.0.N.E.U	1,88	1,50	0,42	0,97	1,07	1,11
R.8.2.100.0.N.E.U	1,88	1,00	0,94	1,18	1,55	1,65
R.8.2.120.0.N.E.U	1,88	1,20	0,78	1,19	1,59	1,69
R.8.2.150.0.N.E.U	1,88	1,50	0,63	1,17	1,54	1,63
R.8.1.100.0.N.E.U	1,88	1,00	1,88	1,30	2,06	2,22
R.8.1.120.0.N.E.U	1,88	1,20	1,56	1,35	2,23	2,37
R.8.1.150.0.N.E.U	1,88	1,50	1,25	1,37	2,34	2,45
R.8.1.170.0.N.E.U	1,88	1,70	1,11	1,38	2,34	2,44
R.8.1.245.0.N.E.U	1,88	2,45	0,77	1,34	1,48	1,52

RAI = 1/6						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
					WWR = 0,25	WWR = 0,20
R.6.4.100.0.N.E.U	2,50	1,00	0,63	1,41	1,64	1,71
R.6.4.120.0.N.E.U	2,50	1,20	0,52	1,39	1,60	1,66
R.6.4.150.0.N.E.U	2,50	1,50	0,42	1,29	1,41	1,44
R.6.4.245.0.N.E.U	2,50	2,45	0,26	0,84	0,41	0,41
R.6.3.100.0.N.E.U	2,50	1,00	0,83	1,54	1,90	2,00
R.6.3.120.0.N.E.U	2,50	1,20	0,69	1,54	1,94	2,01
R.6.3.150.0.N.E.U	2,50	1,50	0,56	1,50	1,83	1,90
R.6.3.245.0.N.E.U	2,50	2,45	0,34	1,19	0,80	0,82
R.6.2.100.0.N.E.U	2,50	1,00	1,25	1,66	2,21	2,35
R.6.2.120.0.N.E.U	2,50	1,20	1,04	1,69	2,32	2,48
R.6.2.150.0.N.E.U	2,50	1,50	0,83	1,70	2,35	2,48
R.6.2.245.0.N.E.U	2,50	2,45	0,51	1,55	1,32	1,39
R.6.1.100.0.N.E.U	2,50	1,00	2,50	1,78	2,71	2,96
R.6.1.120.0.N.E.U	2,50	1,20	2,08	1,85	3,00	3,24
R.6.1.150.0.N.E.U	2,50	1,50	1,67	1,90	3,23	3,42
R.6.1.170.0.N.E.U	2,50	1,70	1,47	1,91	3,27	3,44
R.6.1.245.0.N.E.U	2,50	2,45	1,02	1,90	2,15	2,23
R.6.4.245.0.B.E.U	2,50	2,45	0,26	0,84	0,28	0,28
R.6.3.245.0.B.E.U	2,50	2,45	0,34	1,19	0,55	0,56
R.6.2.245.0.B.E.U	2,50	2,45	0,51	1,55	0,91	0,93
R.6.1.245.0.B.E.U	2,50	2,45	1,02	1,90	1,45	1,48
RAI = 1/4						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
					WWR = 0,37	WWR = 0,30
R.4.4.100.0.N.E.U	3,75	1,00	0,94	2,36	-	3,10
R.4.4.120.0.N.E.U	3,75	1,20	0,78	2,39	3,02	3,17
R.4.4.150.0.N.E.U	3,75	1,50	0,63	2,34	2,95	3,05
R.4.4.245.0.N.E.U	3,75	2,45	0,38	1,97	1,41	1,44
R.4.3.100.0.N.E.U	3,75	1,00	1,25	2,49	-	3,37
R.4.3.120.0.N.E.U	3,75	1,20	1,04	2,54	3,37	3,54
R.4.3.150.0.N.E.U	3,75	1,50	0,83	2,55	3,41	3,55
R.4.3.245.0.N.E.U	3,75	2,45	0,51	2,32	1,89	1,96
R.4.2.100.0.N.E.U	3,75	1,00	1,88	2,61	-	3,71
R.4.2.120.0.N.E.U	3,75	1,20	1,56	2,69	3,74	4,01
R.4.2.150.0.N.E.U	3,75	1,50	1,25	2,75	3,94	4,15
R.4.2.245.0.N.E.U	3,75	2,45	0,77	2,68	2,47	2,61
R.4.1.100.0.N.E.U	3,75	1,00	3,75	2,73	-	4,19
R.4.1.120.0.N.E.U	3,75	1,20	3,13	2,85	4,24	4,76
R.4.1.150.0.N.E.U	3,75	1,50	2,50	2,95	4,80	5,22
R.4.1.245.0.N.E.U	3,75	2,45	1,53	3,03	3,44	3,64
R.4.4.245.0.B.E.U	3,75	2,45	0,38	1,97	0,997	0,99

Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
R.4.3.245.0.B.E.U	3,75	2,45	0,51	2,32	1,348	1,35
R.4.2.245.0.B.E.U	3,75	2,45	0,77	2,68	1,763	1,79
R.4.1.245.0.B.E.U	3,75	2,45	1,53	3,03	2,338	2,40
<b>RAI = 1/3</b>						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
					WWR = 0,49	WWR = 0,40
R.3.4.150.0.N.E.U	5,00	1,50	0,83	3,39	-	4,68
R.3.4.245.0.N.E.U	5,00	2,45	0,51	3,10	2,50	2,57
R.3.3.150.0.N.E.U	5,00	1,50	1,11	3,60	-	5,16
R.3.3.245.0.N.E.U	5,00	2,45	0,68	3,45	3,01	3,13
R.3.2.150.0.N.E.U	5,00	1,50	1,67	3,80	5,44	5,76
R.3.2.245.0.N.E.U	5,00	2,45	1,02	3,80	3,63	3,83
R.3.1.120.0.N.E.U	5,00	1,20	4,17	3,85	-	5,90
R.3.1.150.0.N.E.U	5,00	1,50	3,33	4,00	6,05	6,75
R.3.1.245.0.N.E.U	5,00	2,45	2,04	4,16	4,65	4,96
R.3.4.245.0.B.E.U	5,00	2,45	0,51	3,10	1,81	1,80
R.3.3.245.0.B.E.U	5,00	2,45	0,68	3,45	2,19	2,20
R.3.2.245.0.B.E.U	5,00	2,45	1,02	3,80	2,62	2,64
R.3.1.245.0.B.E.U	5,00	2,45	2,04	4,16	3,19	3,29
<b>RAI = 1/2</b>						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
					WWR = 0,74	WWR = 0,60
R.2.4.245.0.N.E.U	7,50	2,45	0,77	5,35	4,74	4,89
R.2.3.245.0.N.E.U	7,50	2,45	1,02	5,71	5,26	5,48
R.2.2.245.0.N.E.U	7,50	2,45	1,53	6,06	5,83	6,17
R.2.1.245.0.N.E.U	7,50	2,45	3,06	6,41	6,65	7,33
R.2.4.245.0.N.E.U	7,50	2,45	0,77	5,35	3,48	3,47
R.2.3.245.0.N.E.U	7,50	2,45	1,02	5,71	3,89	3,90
R.2.2.245.0.N.E.U	7,50	2,45	1,53	6,06	4,30	4,33
R.2.1.245.0.N.E.U	7,50	2,45	3,06	6,41	4,76	4,95

## B. Appendice B

Tabella B.1: FLDm azioni di retrofit locale salotto

RAI = 1/10						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
						WWR = 0,14
Aggiunta di un sistema a cappotto						
L.10.1.150.0.N.E.I02	2,00	1,50	1,33	1,48		1,99
L.10.1.150.0.N.E.I04	2,00	1,50	1,33	1,48		1,94
L.10.1.150.0.N.E.I06	2,00	1,50	1,33	1,48		1,91
L.10.1.150.0.N.E.I08	2,00	1,50	1,33	1,48		1,86
L.10.1.150.0.N.E.I10	2,00	1,50	1,33	1,48		1,82
L.10.1.150.0.N.E.I12	2,00	1,50	1,33	1,48		1,78
L.10.1.150.0.N.E.I14	2,00	1,50	1,33	1,48		1,75
L.10.1.150.0.N.E.I16	2,00	1,50	1,33	1,48		1,71
L.10.1.150.0.N.E.I18	2,00	1,50	1,33	1,48		1,68
L.10.1.150.0.N.E.I20	2,00	1,50	1,33	1,48		1,63
L.10.1.150.0.N.E.I22	2,00	1,50	1,33	1,48		1,60
L.10.1.150.0.N.E.I24	2,00	1,50	1,33	1,48		1,56
L.10.1.150.0.N.E.I26	2,00	1,50	1,33	1,48		1,53
L.10.1.150.0.N.E.I28	2,00	1,50	1,33	1,48		1,50
L.10.1.150.0.N.E.I30	2,00	1,50	1,33	1,48		1,47
RAI = 1/8						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
					WWR = 0,22	WWR = 0,17
Sostituzione del serramento						
L.8.1.100.0.N.W.U	2,50	1,00	2,50	1,78	1,52	1,63
L.8.1.120.0.N.W.U	2,50	1,20	2,08	1,85	1,67	1,77
L.8.1.150.0.N.W.U	2,50	1,50	1,67	1,90	1,78	1,86
L.8.1.245.0.N.W.U	2,50	2,45	1,02	1,90	1,16	1,21
L.8.4.150.0.N.W.U	2,50	1,50	0,42	1,29	0,76	0,79
L.8.3.150.0.N.W.U	2,50	1,50	0,56	1,50	1,00	1,04
L.8.2.150.0.N.W.U	2,50	1,50	0,83	1,70	1,29	1,36
Aggiunta di un sistema a cappotto						
L.8.1.100.0.N.E.I13	2,50	1,00	2,50	1,78	1,86	1,98
L.8.1.120.0.N.E.I13	2,50	1,20	2,08	1,85	2,05	2,19
L.8.1.150.0.N.E.I13	2,50	1,50	1,67	1,90	2,21	2,32
L.8.1.245.0.N.E.I13	2,50	2,45	1,02	1,90	1,44	1,49
L.8.4.150.0.N.E.I13	2,50	1,50	0,42	1,29	0,80	0,82

Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
L.8.3.150.0.N.E.I13	2,50	1,50	0,56	1,50	1,12	1,17
L.8.2.150.0.N.E.I13	2,50	1,50	0,83	1,70	1,54	1,62
L.8.1.150.0.N.E.I02	2,50	1,50	1,67	1,90		2,59
L.8.1.150.0.N.E.I04	2,50	1,50	1,67	1,90		2,53
L.8.1.150.0.N.E.I06	2,50	1,50	1,67	1,90		2,49
L.8.1.150.0.N.E.I08	2,50	1,50	1,67	1,90		2,43
L.8.1.150.0.N.E.I10	2,50	1,50	1,67	1,90		2,39
L.8.1.150.0.N.E.I12	2,50	1,50	1,67	1,90		2,35
L.8.1.150.0.N.E.I14	2,50	1,50	1,67	1,90		2,30
L.8.1.150.0.N.E.I16	2,50	1,50	1,67	1,90		2,25
L.8.1.150.0.N.E.I18	2,50	1,50	1,67	1,90		2,20
L.8.1.150.0.N.E.I20	2,50	1,50	1,67	1,90		2,16
L.8.1.150.0.N.E.I22	2,50	1,50	1,67	1,90		2,12
L.8.1.150.0.N.E.I24	2,50	1,50	1,67	1,90		2,08
L.8.1.150.0.N.E.I26	2,50	1,50	1,67	1,90		2,04
L.8.1.150.0.N.E.I28	2,50	1,50	1,67	1,90		1,99
L.8.1.150.0.N.E.I30	2,50	1,50	1,67	1,90		1,96
Sostituzione del serramento e aggiunta di un sistema a cappotto						
L.8.1.100.0.N.W.I13	2,50	1,00	2,50	1,78	1,31	1,40
L.8.1.120.0.N.W.I13	2,50	1,20	2,08	1,85	1,45	1,54
L.8.1.150.0.N.W.I13	2,50	1,50	1,67	1,90	1,56	1,63
L.8.1.245.0.N.W.I13	2,50	2,45	1,02	1,90	1,01	1,03
<b>RAI = 1/6</b>						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
					WWR =	WWR =
					0,29	0,23
Sostituzione del serramento						
L.6.1.100.0.N.W.U	3,33	1,00	3,33	2,41	1,94	2,16
L.6.1.120.0.N.W.U	3,33	1,20	2,78	2,51	2,22	2,39
L.6.1.150.0.N.W.U	3,33	1,50	2,22	2,60	2,39	2,56
L.6.1.245.0.N.W.U	3,33	2,45	1,36	2,65	1,65	1,72
L.6.4.150.0.N.W.U	3,33	1,50	0,56	1,99	1,32	1,37
L.6.3.150.0.N.W.U	3,33	1,50	0,74	2,20	1,57	1,65
L.6.2.150.0.N.W.U	3,33	1,50	1,11	2,40	1,88	2,00
L.6.4.245.0.N.W.U	3,33	2,45	0,34	1,59	0,56	0,58
L.6.3.245.0.N.W.U	3,33	2,45	0,45	1,95	0,82	0,85
L.6.2.245.0.N.W.U	3,33	2,45	0,68	2,30	1,15	1,21
Aggiunta di un sistema a cappotto						
L.6.1.100.0.N.E.I13	3,33	1,00	3,33	2,41	2,38	2,65
L.6.1.120.0.N.E.I13	3,33	1,20	2,78	2,51	2,73	2,96
L.6.1.150.0.N.E.I13	3,33	1,50	2,22	2,60	3,03	3,23
L.6.1.245.0.N.E.I13	3,33	2,45	1,36	2,65	2,09	2,17
L.6.4.150.0.N.E.I13	3,33	1,50	0,56	1,99	1,48	1,51
L.6.3.150.0.N.E.I13	3,33	1,50	0,74	2,20	1,85	1,91

Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
L.6.2.150.0.N.E.I13	3,33	1,50	1,11	2,40	2,30	2,42
L.6.4.245.0.N.E.I13	3,33	2,45	0,34	1,59	0,58	0,60
L.6.3.245.0.N.E.I13	3,33	2,45	0,45	1,95	0,91	0,95
L.6.2.245.0.N.E.I13	3,33	2,45	0,68	2,30	1,37	1,44
L.6.1.150.0.N.E.I02	3,33	1,50	2,22	2,60		3,56
L.6.1.150.0.N.E.I04	3,33	1,50	2,22	2,60		3,50
L.6.1.150.0.N.E.I06	3,33	1,50	2,22	2,60		3,43
L.6.1.150.0.N.E.I08	3,33	1,50	2,22	2,60		3,37
L.6.1.150.0.N.E.I10	3,33	1,50	2,22	2,60		3,31
L.6.1.150.0.N.E.I12	3,33	1,50	2,22	2,60		3,25
L.6.1.150.0.N.E.I14	3,33	1,50	2,22	2,60		3,19
L.6.1.150.0.N.E.I16	3,33	1,50	2,22	2,60		3,13
L.6.1.150.0.N.E.I18	3,33	1,50	2,22	2,60		3,08
L.6.1.150.0.N.E.I20	3,33	1,50	2,22	2,60		3,02
L.6.1.150.0.N.E.I22	3,33	1,50	2,22	2,60		2,97
L.6.1.150.0.N.E.I24	3,33	1,50	2,22	2,60		2,91
L.6.1.150.0.N.E.I26	3,33	1,50	2,22	2,60		2,86
L.6.1.150.0.N.E.I28	3,33	1,50	2,22	2,60		2,80
L.6.1.150.0.N.E.I30	3,33	1,50	2,22	2,60		2,74
Sostituzione del serramento e aggiunta di un sistema a cappotto						
L.6.1.100.0.N.W.I13	3,33	1,00	3,33	2,41	1,68	1,87
L.6.1.120.0.N.W.I13	3,33	1,20	2,78	2,51	1,93	2,09
L.6.1.150.0.N.W.I13	3,33	1,50	2,22	2,60	2,12	2,26
L.6.1.245.0.N.W.I13	3,33	2,45	1,36	2,65	1,45	1,51
<b>RAI = 1/4</b>						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
					WWR = 0,43	WWR = 0,34
Sostituzione del serramento						
L.4.1.100.0.N.W.U	5,00	1,00	5,00	-	-	-
L.4.1.120.0.N.W.U	5,00	1,20	4,17	3,85	-	3,40
L.4.1.150.0.N.W.U	5,00	1,50	3,33	4,00	3,45	3,81
L.4.1.245.0.N.W.U	5,00	2,45	2,04	4,16	2,57	2,72
Aggiunta di un sistema a cappotto						
L.4.1.100.0.N.E.I13	5,00	1,00	5,00	-	-	-
L.4.1.120.0.N.E.I13	5,00	1,20	4,17	3,85	-	4,27
L.4.1.150.0.N.E.I13	5,00	1,50	3,33	4,00	4,39	4,85
L.4.1.245.0.N.E.I13	5,00	2,45	2,04	4,16	3,32	3,51
L.4.1.150.0.N.E.I02	5,00	1,50	3,33	4,00		5,32
L.4.1.150.0.N.E.I04	5,00	1,50	3,33	4,00		5,24
L.4.1.150.0.N.E.I06	5,00	1,50	3,33	4,00		5,17
L.4.1.150.0.N.E.I08	5,00	1,50	3,33	4,00		5,08
L.4.1.150.0.N.E.I10	5,00	1,50	3,33	4,00		4,99
L.4.1.150.0.N.E.I12	5,00	1,50	3,33	4,00		4,90

Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
L.4.1.150.0.N.E.I14	5,00	1,50	3,33	4,00		4,82
L.4.1.150.0.N.E.I16	5,00	1,50	3,33	4,00		4,73
L.4.1.150.0.N.E.I18	5,00	1,50	3,33	4,00		4,66
L.4.1.150.0.N.E.I20	5,00	1,50	3,33	4,00		4,58
L.4.1.150.0.N.E.I22	5,00	1,50	3,33	4,00		4,50
L.4.1.150.0.N.E.I24	5,00	1,50	3,33	4,00		4,42
L.4.1.150.0.N.E.I26	5,00	1,50	3,33	4,00		4,36
L.4.1.150.0.N.E.I28	5,00	1,50	3,33	4,00		4,28
L.4.1.150.0.N.E.I30	5,00	1,50	3,33	4,00		4,20
Sostituzione del serramento e aggiunta di un sistema a cappotto						
L.4.1.100.0.N.W.I13	5,00	1,00	5,00	-	-	-
L.4.1.120.0.N.W.I13	5,00	1,20	4,17	3,85	-	3,01
L.4.1.150.0.N.W.I13	5,00	1,50	3,33	4,00	3,09	3,41
L.4.1.245.0.N.W.I13	5,00	2,45	2,04	4,16	2,31	2,43
<b>RAI = 1/3</b>						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
					WWR = 0,57	WWR = 0,46
Sostituzione del serramento						
L.3.1.120.0.N.W.U	6,67	1,20	5,56	-	-	-
L.3.1.150.0.N.W.U	6,67	1,50	4,44	5,40	-	4,81
L.3.1.245.0.N.W.U	6,67	2,45	2,72	5,67	3,40	3,66
Aggiunta di un sistema a cappotto						
L.3.1.120.0.N.E.I13	6,67	1,20	5,56	-	-	-
L.3.1.150.0.N.E.I13	6,67	1,50	4,44	5,40	-	6,17
L.3.1.245.0.N.E.I13	6,67	2,45	2,72	5,67	4,44	4,77
L.3.1.150.0.N.E.I02	6,67	1,50	4,44	5,40		6,75
L.3.1.150.0.N.E.I04	6,67	1,50	4,44	5,40		6,64
L.3.1.150.0.N.E.I06	6,67	1,50	4,44	5,40		6,52
L.3.1.150.0.N.E.I08	6,67	1,50	4,44	5,40		6,41
L.3.1.150.0.N.E.I10	6,67	1,50	4,44	5,40		6,33
L.3.1.150.0.N.E.I12	6,67	1,50	4,44	5,40		6,20
L.3.1.150.0.N.E.I14	6,67	1,50	4,44	5,40		6,11
L.3.1.150.0.N.E.I16	6,67	1,50	4,44	5,40		6,01
L.3.1.150.0.N.E.I18	6,67	1,50	4,44	5,40		5,92
L.3.1.150.0.N.E.I20	6,67	1,50	4,44	5,40		5,81
L.3.1.150.0.N.E.I22	6,67	1,50	4,44	5,40		5,72
L.3.1.150.0.N.E.I24	6,67	1,50	4,44	5,40		5,64
L.3.1.150.0.N.E.I26	6,67	1,50	4,44	5,40		5,56
L.3.1.150.0.N.E.I28	6,67	1,50	4,44	5,40		5,45
L.3.1.150.0.N.E.I30	6,67	1,50	4,44	5,40		5,37

Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
Sostituzione del serramento e aggiunta di un sistema a cappotto						
L.3.1.120.0.N.W.I13	6,67	1,20	5,56	-	-	-
L.3.1.150.0.N.W.I13	6,67	1,50	4,44	5,40	-	4,32
L.3.1.245.0.N.W.I13	6,67	2,45	2,72	5,67	3,07	3,30
<b>RAI = 1/2</b>						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
					WWR = 0,86	WWR = 0,69
Sostituzione del serramento						
L.2.1.245.0.N.W.U	10,00	2,45	4,08	8,67	-	5,25
Aggiunta di un sistema a cappotto						
L.2.1.245.0.N.E.I13	10,00	2,45	4,08	8,67	-	6,92
Sostituzione del serramento e aggiunta di un sistema a cappotto						
L.2.1.245.0.N.W.I13	10,00	2,45	4,08	8,67	-	4,80



Tabella B.2: FLDm azioni di retrofit locale camera matrimoniale

<b>RAI = 1/8</b>						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
					WWR = 0,18	WWR = 0,15
Sostituzione del serramento						
R.8.1.100.0.N.W.U	1,88	1,00	1,88	1,30	1,47	1,57
R.8.1.120.0.N.W.U	1,88	1,20	1,56	1,35	1,58	1,67
R.8.1.150.0.N.W.U	1,88	1,50	1,25	1,37	1,65	1,72
R.8.1.245.0.N.W.U	1,88	2,45	0,77	1,34	1,03	1,06
Aggiunta di un sistema a cappotto						
R.8.1.100.0.N.E.I13	1,88	1,00	1,88	1,30	1,76	1,87
R.8.1.120.0.N.E.I13	1,88	1,20	1,56	1,35	1,92	2,03
R.8.1.150.0.N.E.I13	1,88	1,50	1,25	1,37	2,02	2,10
R.8.1.245.0.N.E.I13	1,88	2,45	0,77	1,34	1,24	1,26
Sostituzione del serramento e aggiunta di un sistema a cappotto						
R.8.1.100.0.N.W.I13	1,88	1,00	1,88	1,30	1,25	1,25
R.8.1.120.0.N.W.I13	1,88	1,20	1,56	1,35	1,35	1,35
R.8.1.150.0.N.W.I13	1,88	1,50	1,25	1,37	1,42	1,42
R.8.1.245.0.N.W.I13	1,88	2,45	0,77	1,34	0,87	0,88
<b>RAI = 1/6</b>						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
					WWR = 0,25	WWR = 0,20
Sostituzione del serramento						
R.6.1.100.0.N.W.U	2,50	1,00	2,50	1,78	1,93	2,11
R.6.1.120.0.N.W.U	2,50	1,20	2,08	1,85	2,12	2,30
R.6.1.150.0.N.W.U	2,50	1,50	1,67	1,90	2,27	2,40
R.6.1.245.0.N.W.U	2,50	2,45	1,02	1,90	1,50	1,56
Aggiunta di un sistema a cappotto						
R.6.1.100.0.N.E.I13	2,50	1,00	2,50	1,78	2,33	2,54
R.6.1.120.0.N.E.I13	2,50	1,20	2,08	1,85	2,62	2,80
R.6.1.150.0.N.E.I13	2,50	1,50	1,67	1,90	2,82	2,98
R.6.1.245.0.N.E.I13	2,50	2,45	1,02	1,90	1,86	1,92
Sostituzione del serramento e aggiunta di un sistema a cappotto						
R.6.1.100.0.N.W.I13	2,50	1,00	2,50	1,78	1,65	1,80
R.6.1.120.0.N.W.I13	2,50	1,20	2,08	1,85	1,85	1,98
R.6.1.150.0.N.W.I13	2,50	1,50	1,67	1,90	1,98	2,10
R.6.1.245.0.N.W.I13	2,50	2,45	1,02	1,90	1,30	1,34

<b>RAI = 1/4</b>						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
					WWR = 0,37	WWR = 0,30
Sostituzione del serramento						
R.4.1.100.0.N.W.U	3,75	1,00	3,75	2,73	-	2,97
R.4.1.120.0.N.W.U	3,75	1,20	3,13	2,85	3,00	3,37
R.4.1.150.0.N.W.U	3,75	1,50	2,50	2,95	3,37	3,66
R.4.1.245.0.N.W.U	3,75	2,45	1,53	3,03	2,40	2,54
Aggiunta di un sistema a cappotto						
R.4.1.100.0.N.E.I13	3,75	1,00	3,75	2,73	-	3,62
R.4.1.120.0.N.E.I13	3,75	1,20	3,13	2,85	3,73	4,16
R.4.1.150.0.N.E.I13	3,75	1,50	2,50	2,95	4,24	4,62
R.4.1.245.0.N.E.I13	3,75	2,45	1,53	3,03	3,05	3,21
Sostituzione del serramento e aggiunta di un sistema a cappotto						
R.4.1.100.0.N.W.I13	3,75	1,00	3,75	2,73	-	2,55
R.4.1.120.0.N.W.I13	3,75	1,20	3,13	2,85	2,64	2,94
R.4.1.150.0.N.W.I13	3,75	1,50	2,50	2,95	2,99	3,24
R.4.1.245.0.N.W.I13	3,75	2,45	1,53	3,03	2,12	2,23
<b>RAI = 1/3</b>						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
					WWR = 0,49	WWR = 0,40
Sostituzione del serramento						
R.3.1.120.0.N.W.U	5,00	1,20	4,17	3,85	-	4,16
R.3.1.150.0.N.W.U	5,00	1,50	3,33	4,00	4,23	4,73
R.3.1.245.0.N.W.U	5,00	2,45	2,04	4,16	3,24	3,47
Aggiunta di un sistema a cappotto						
R.3.1.120.0.N.E.I13	5,00	1,20	4,17	3,85	-	5,19
R.3.1.150.0.N.E.I13	5,00	1,50	3,33	4,00	5,38	6,00
R.3.1.245.0.N.E.I13	5,00	2,45	2,04	4,16	4,16	4,43
Sostituzione del serramento e aggiunta di un sistema a cappotto						
R.3.1.120.0.N.W.I13	5,00	1,20	4,17	3,85	-	3,64
R.3.1.150.0.N.W.I13	5,00	1,50	3,33	4,00	3,78	4,22
R.3.1.245.0.N.W.I13	5,00	2,45	2,04	4,16	2,89	3,09

RAI = 1/2						
Codice	Superficie finestrata [m <sup>2</sup> ]	H [m]	L [m]	Sup. trasparente totale [m <sup>2</sup> ]	FLDm [%] Lato sud	FLDm [%] Lato ovest
					WWR = 0,74	WWR = 0,60
Sostituzione del serramento						
R.2.2.245.0.N.W.U	7,50	2,45	3,06	6,41	4,61	5,10
Aggiunta di un sistema a cappotto						
R.2.1.245.0.N.E.I13	7,50	2,45	3,06	6,41	6,01	6,61
Sostituzione del serramento e aggiunta di un sistema a cappotto						
R.3.2.245.0.N.W.I13	7,50	2,45	3,06	6,41	4,17	4,61