

UN NUOVO VOLTO PER LA SCUOLA DROVETTI DI TORINO

*IL RUOLO DELLA LUCE NATURALE PER IL COMFORT VISIVO
E IL RISPARMIO ENERGETICO*



/ TESI DI LAUREA MAGISTRALE
/ MARIO GIOMPAPA



Politecnico di Torino

Facoltà di Architettura

Corso di Laurea Magistrale in Architettura per il progetto sostenibile

Tesi di Laurea Magistrale

A.A. 2019/2020

Un nuovo volto per la scuola Drovetti di Torino.

Il ruolo della luce naturale per il comfort visivo e il risparmio energetico.

Relatore: Anna Pellegrino

Candidato: Mario Giompapa

*Alla mia famiglia,
la migliore che io possa desiderare*

*e alla Musica,
che più di chiunque altro
riesce a capirmi*

“

Mi piace pensare che tu abbia colto il limone più aspro che la vita possa offrirti e ne abbia fatto qualcosa di vagamente simile a una limonata

THIS IS US

”

INDICE

ABSTRACT	12
-----------------------	-----------

PARTE I **14**

1 LE PREMESSE: UN NUOVO MODELLO DI EDILIZIA SCOLASTICA

1.1. Linee guida del Miur 2013: progettare l'edilizia scolastica del futuro.....	17
1.1.1. Spazi flessibili per una didattica innovativa.....	17
1.1.2. Il rapporto con il quartiere e la città: la scuola come Civic Center.....	18
1.1.3. Scuola e sostenibilità.....	19
1.2. Indire: quando lo spazio insegna.....	20
1.2.1. 1+4 spazi educativi del terzo millennio.....	21
1.2.2. Alcuni esempi internazionali.....	23
1.2.2.1. Vittra TelefonPlan.....	24
1.2.2.2. 4het Gymnasium.....	26
1.2.2.3. Ørestad Gymnasium.....	28

2 SCUOLE SOSTENIBILI: PREMessa

2.1. Edilizia scolastica sostenibile: il ruolo della luce naturale.....	31
2.2. Proposte e iniziative per la riqualificazione sostenibile delle scuole.....	32
2.2.1. "Scuola innova": secondo forum sull'edilizia scolastica.....	32
2.2.2. "Agibile e bella": architetture di qualità per la qualità delle scuole.....	33
2.2.3. "Torino fa scuola": due scuole, un processo da replicare.....	33
2.3. Scuole innovative: alcuni esempi virtuosi da imitare nel territorio nazionale.....	36
2.3.1. Scuola elementare a Brugnera (PN).....	38
2.3.2. Scuola dell'infanzia a Bagnolo Mella (BS).....	40
2.3.3. Scuola dell'infanzia a Nichelino (TO).....	42
2.3.4. Polo scolastico a Collecchio (PR).....	44
2.3.5. Scuola dell'infanzia bioecologica a Ponticelli (BO).....	46

2.3.6. Scuola dell'infanzia a Cascina (PI).....	48
2.3.7. Polo scolastico a Mole di Maiolati Spontini (AN).....	50
2.3.8. Polo scolastico ad Avezzano (AQ).....	52
2.3.9. Scuola elementare a Roma.....	54
2.3.10. Scuola dell'infanzia a Bisceglie (BT).....	56
2.3.11. Scuola dell'infanzia ad Andria.....	58
2.3.12. Scuola dell'infanzia a Faiano (SA).....	60

PARTE II **62**

3 ILLUMINAZIONE NATURALE: FONDAMENTI, BENEFICI E PARAMETRI PROGETTUALI

3.1. Benefici della luce naturale.....	65
3.1.1. La vista verso l'esterno.....	65
3.1.2. Effetti non visivi della luce: il ritmo circadiano.....	66
3.2. Le sorgenti di luce naturale: il sole e la volta celeste.....	67
3.3. Percorso solare e orientamento ottimale degli edifici.....	68
3.4. Modalità di penetrazione della luce.....	70
3.5. Metodi e strumenti per il progetto della luce naturale.....	71
3.5.1. Prestazione visiva e comfort visivo.....	72
3.5.2. Parametri tradizionali.....	72
3.5.3. Parametri di tipo dinamico.....	73

4 STRATEGIE E SISTEMI PER IL CONTROLLO DELL'ILLUMINAZIONE NATURALE

4.1. Il serramento: classificazione, funzioni e prestazioni.....	77
4.1.1. Parametri prestazionali energetici.....	78
4.1.2. Tipologie di apertura e ricambi d'aria.....	80
4.2. Tipologie di telaio: prestazioni a confronto.....	82
4.3. Componente trasparente.....	84
4.4. Componente schermante.....	88
4.5. Sistemi di conduzione e ridirezionamento della luce.....	92
4.5.1. Light shelves.....	92
4.5.2. Light pipes.....	95
4.5.3. Eliostati.....	95

5	LUCE, COMFORT E PRESTAZIONE ENERGETICA: QUADRO NORMATIVO E PROTOCOLLI DI CERTIFICAZIONE	
5.1.	I protocolli di sostenibilità ambientale: la certificazione LEED.....	97
5.1.1.	LEED for School: crediti LEED per l'illuminazione.....	98
5.2.	Normative vigenti e legislazione sulle prestazioni energetiche dell'involucro trasparente.....	100
5.2.1.	UNI EN ISO 10077-1: 2018.....	100
5.2.2.	UNI TS 11300-1: 2014.....	102
5.2.3.	Decreto ministeriale 11/01/2017.....	104
5.3.	Normative di riferimento sui requisiti illuminotecnici ed il comfort visivo.....	105
5.3.1.	UNI 10840: 2007.....	105
5.3.2.	UNI 12464: 2011.....	106
5.3.3.	CEN EN 17037: 2018.....	106

PARTE III **110**

6	INTRODUZIONE AL CASO STUDIO: L'ISTITUTO DROVETTI DI TORINO	
6.1.	Inquadramento: il rapporto con il quartiere e la città.....	113
6.2.	La rinascita della Drovetti: progetti e iniziative in cui è coinvolto l'Istituto.....	114
6.2.1.	Il laboratorio città sostenibile.....	114
6.3.	Analisi architettonica, distributiva e funzionale.....	116
6.4.	Rilievo fotografico e percettivo.....	122
6.5.	"La scuola gemella": l'istituto Italo Calvino.....	132
7	STATO DI FATTO: INVOLUCRO TRASPARENTE, LUCE NATURALE E PRESTAZIONE ENERGETICA	
7.1.	Analisi dell'illuminazione naturale e dei serramenti.....	135
7.1.1.	A scala di edificio: studi di ombreggiamento.....	136
7.1.2.	A scala di ambiente: l'atrio, le aule e i corridoi distributivi.....	137
7.1.3.	A scala di apertura: abaco dei serramenti e sistemi di schermatura adoperati.....	138
7.2.	Analisi delle prestazioni energetiche dell'involucro trasparente.....	152
7.2.1.	Analisi critica dei risultati.....	152

7.3.	Analisi delle prestazioni visive.....	158
7.3.1.	Ambienti oggetto di studio.....	158
7.3.2.	Determinazione dei parametri di illuminazione naturale tramite il software Diva-for-Rhino.....	160
7.3.3.	Analisi critica dei risultati.....	190

8 PROPOSTA DI PROGETTO: UN NUOVO VOLTO PER LA SCUOLA DROVETTI

8.1.	Analisi delle criticità e delle esigenze.....	203
8.2.	I light shelves e la struttura esterna.....	208
8.2.1.	Il colore come filo conduttore del progetto.....	216
8.3.	Descrizione dettagliata dei nuovi serramenti e dei sistemi di illuminazione naturale adoperati.....	225
8.4.	Gli ambienti interni: nuova luce e spazi colorati.....	236
8.4.1.	Le aule.....	236
8.4.2.	I corridoi distributivi.....	236
8.5.	Analisi delle prestazioni energetiche dell'involucro trasparente e confronto con lo stato di fatto.....	244
8.6.	Analisi delle prestazioni visive.....	250
8.6.1.	Determinazione dei parametri di illuminazione naturale tramite il software Diva-for-Rhino.....	252
8.6.2.	Analisi critica dei risultati e confronto con lo stato di fatto.....	268

<i>CONCLUSIONI</i>	282
--------------------------	------------

<i>BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA</i>	284
--	------------

<i>ALLEGATI</i>	290
-----------------------	------------

<i>RINGRAZIAMENTI</i>	297
-----------------------------	------------

ABSTRACT

La luce naturale, in risposta alla repentina evoluzione e innovazione dell'edilizia scolastica, riveste un ruolo sempre più importante nell'ambito della progettazione degli spazi di apprendimento, garantendo il corretto svolgimento dei compiti visivi connessi alle attività didattiche e contribuendo in larga parte al benessere psicofisico degli studenti.

Crescere, studiare e relazionarsi in ambienti accoglienti e ben illuminati, in cui viene garantito in ogni momento il contatto diretto con la natura attraverso le aperture, può generare molteplici benefici fisici e psicologici nei bambini; stimolandone la produttività, le emozioni e la voglia di divertirsi ed interagire con gli altri.

Oltre a questi aspetti, in accordo con i requisiti di sostenibilità ambientale e con i principi dell'architettura bioclimatica, bisogna in egual modo tener conto degli effetti della radiazione

solare diretta sul risparmio energetico e sulle prestazioni dell'involucro trasparente, mirando a facilitarne o a limitarne l'ingresso a seconda delle stagioni, dell'orientamento dell'edificio e delle peculiari caratteristiche climatiche e ambientali del sito.

Il presente lavoro di tesi, strutturato in tre parti, si inserisce in questo contesto, proponendosi di fornire un quadro complessivo e dettagliato in merito alla corretta gestione dell'illuminazione naturale negli ambienti di apprendimento, in riferimento alla progettazione dell'involucro trasparente e all'impiego di sistemi e dispositivi innovativi per il controllo della radiazione solare e la regolazione della luce, con il fine ultimo di assicurare prestazioni ottimali in termini di comfort visivo e risparmio energetico.

Nella prima parte viene presentato il tema dell'edilizia scolastica, analizzando nel dettaglio i recenti cambiamenti in merito all'organizzazione del sistema scolastico italiano sulla base degli esempi esteri, volti a sperimentare nuove forme di didattica innovativa e a ripensare gli spazi di

apprendimento per adattarsi alle nuove esigenze, nonché a ridurre gli impatti ambientali promuovendo l'uso intensivo di risorse rinnovabili di energia. A questo proposito, vengono in seguito riportati alcuni casi studio interessanti selezionati su scala nazionale e internazionale.

Nella seconda parte vengono dapprima illustrati i caratteri salienti del progetto dell'illuminazione naturale; in riferimento ai principali benefici, ai parametri progettuali e alle prestazioni dell'involucro trasparente per il comfort termico e visivo degli utenti. Nello specifico, vengono inoltre forniti alcuni metodi e sistemi innovativi finalizzati al controllo della radiazione solare diretta e ad una gestione ottimale e diversificata dell'illuminazione naturale negli ambienti. Relativamente agli spazi di apprendimento, sono infine riportate le linee guida e le normative di riferimento cui attenersi per il soddisfacimento dei requisiti minimi per il comfort visivo ed il risparmio energetico.

Nella terza ed ultima parte i concetti finora espressi trovano un'applicazione concreta in

uno specifico caso studio: l'Istituto Bernardino Drovetti di Torino. La scuola oggetto di studio, attualmente impegnata a sperimentare nuove forme di didattica innovativa sulla scia degli esempi esteri, presenta delle caratteristiche particolarmente interessanti dal punto di vista illuminotecnico. Dopo averne analizzato nel dettaglio le caratteristiche dell'involucro trasparente e le condizioni di illuminazione naturale dei locali scolastici più rappresentativi (tramite l'uso di sistemi e software computerizzati), si è proceduto ad elaborare una nuova proposta progettuale per l'Istituto, ricorrendo a dei sistemi innovativi e ad espedienti progettuali volti a migliorare le prestazioni energetiche dell'involucro trasparente e a garantire adeguati livelli di comfort visivo negli ambienti interni.

Tramite un nuovo disegno di facciata, vivace e accattivante, la scuola si colora e prende vita acquisendo un volto del tutto nuovo, con l'intento di creare un ambiente più adatto ad accompagnare gli studenti nella crescita e nell'apprendimento.

PARTE I



La scuola Ørestad Gymnasium
Copenhagen, Danimarca

© https://www.oerestadgym.dk/wp-content/uploads/2018/11/IMG_5972-2.jpg

Nel seguente capitolo viene introdotto il tema dell'edilizia scolastica, analizzando nel dettaglio le nuove direttive volte a garantire edifici accoglienti, sicuri e sostenibili; capaci di adeguarsi alle nuove concezioni di didattica sperimentate negli ultimi anni. Alla fine del capitolo vengono inoltre riportati tre casi studio - individuati su scala internazionale - ritenuti particolarmente interessanti, nei quali vengono applicate e sperimentate le nuove forme di didattica innovativa, prestando al tempo stesso una particolare attenzione verso gli aspetti legati al risparmio energetico e all'illuminazione naturale degli ambienti.

1 Le premesse: un nuovo modello di edilizia scolastica

1.1. LINEE GUIDA DEL MIUR 2013: PROGETTARE L'EDILIZIA SCOLASTICA DEL FUTURO

Con l'avvento delle smart cities e delle città sostenibili, progettate per fornire servizi sempre più evoluti e all'avanguardia, anche le scuole necessitano di evolversi per adattarsi al costante e repentino cambiamento. A tale scopo, la conferenza unificata dell'11 aprile 2013 ha approvato le nuove Linee guida del MIUR per l'edilizia scolastica, contenenti indirizzi e direttive progettuali per la costruzione delle nuove scuole sostenibili. Con il consolidarsi e l'evolversi delle nuove forme di didattica - non più basate sull'impostazione frontale - risulta necessario un cambiamento anche nella realizzazione degli edifici scolastici, che dovranno rispondere a parametri e criteri architettonici del tutto nuovi.

Le nuove Linee guida sostituiscono le oramai obsolete norme tecniche del 1975, caratterizzate da uno stile troppo rigido e "prescrittivo". L'approccio delle nuove norme, al contrario, è

di tipo "prestazionale"; basato su criteri progettuali più flessibili e meno rigidi, sicuramente più adatti ad una scuola e una didattica in continuo mutamento¹.

1.1.1. SPAZI FLESSIBILI PER UNA DIDATTICA INNOVATIVA

Il modello di scuola proposto da MIUR si basa su spazi modulari, flessibili e interscambiabili; che possono adattarsi e rispondere al meglio ai nuovi sistemi educativi in fase di sperimentazione.

La "flessibilità" è dunque una delle parole chiave delle nuove linee guida: l'aula deve sapersi evolvere e trasformarsi a seconda delle esigenze e delle attività che devono svolgersi. Arredi flessibili e pareti scorrevoli possono "aprire" lo spazio verso gli spazi comuni e i corridoi, che assumono in tal modo una loro valenza imprescindibile al pari degli altri spazi.

Nonostante la nuova idea di scuola debba essere intesa come uno spazio unico e integra-

to, il MIUR ha ritenuto opportuno individuare e contraddistinguere cinque diverse categorie di ambienti: l'aula, lo spazio di gruppo, lo spazio laboratoriale, lo spazio individuale, lo spazio informale e di relax.

L'aula è stato da sempre lo spazio dedicato alla didattica frontale: l'insegnante sedeva sulla cattedra e impartiva agli studenti – disposti in file di banchi – le conoscenze da acquisire. Nell'aula moderna, al contrario, l'insegnante siede e si muove in mezzo agli studenti; in tal modo il rapporto tra insegnante e studenti si fa più esplicito e diretto, contribuendo a stimolare l'interesse e la creatività dei bambini.

Lo spazio di gruppo prevede l'organizzazione in gruppi di lavoro, dove l'insegnante assume il ruolo di facilitatore ed organizzatore delle attività. Tali spazi dovranno essere dunque progettati in modo tale che siano adatti per i lavori di gruppo, con attrezzature e arredi flessibili che consentano configurazioni diverse coerentemente con l'alternarsi delle varie fasi dell'attività didattica.

Lo spazio laboratoriale si identifica come lo “spazio del fare”, in cui gli studenti sono coinvolti in attività laboratoriali di vario tipo. A seconda delle attività che devono svolgersi, bisogna fornire ai bambini le attrezzature, le risorse e i materiali adeguati ai diversi contesti laboratoriali. Rappresenta lo spazio del “*learning by doing*”, dove è possibile imparare mettendo in atto e realizzando ciò che si è studiato a livello teorico²⁻³.

Lo spazio individuale è destinato alle attività da svolgersi in maniera autonoma, dove lo studente potrà lavorare singolarmente al di fuori

delle attività didattiche supportate dal docente. Tale spazio deve rispondere alle esigenze del singolo, separato dall'aula e da altri contesti destinati alla cooperazione e all'incontro sociale

Lo spazio informale e di relax, al contrario, rappresenta il luogo dove i bambini devono potersi dedicare ad attività ricreative, trovare occasioni per interagire in maniera informale con altre persone, rilassarsi, o avere accesso a risorse non strettamente legate alle materie scolastiche.

Un altro spazio indispensabile per la vita all'interno della scuola è *l'Agorà*, che rappresenta il cuore simbolico e funzionale della comunità scolastica. Tale spazio è pensato per accogliere tutti gli studenti, gli insegnanti ed eventuali enti esterni in occasione di assemblee o riunioni collettive; le sue dimensioni dovranno essere dunque rapportate alle proporzioni dell'intero plesso scolastico¹.

1.1.2. IL RAPPORTO CON IL QUARTIERE E LA CITTÀ: LA SCUOLA COME CIVIC CENTER

In accordo con le direttive delle linee guida, la scuola dovrà configurarsi come un “Civic Center” in grado di promuovere e ospitare eventi di interesse sociale e culturale, che coinvolgono il quartiere e la cittadinanza. L'intento è quello di fare della scuola un “incubatore di attività” aperte a tutti, non più solamente funzionali alla sfera didattica-educativa, ma riguardanti tematiche legate al benessere collettivo dell'intera cittadinanza. A tale scopo, le nuove scuole devono essere ubicate in punti strategici della

città, in modo tale che possano diventare elementi di connessione e costituire un punto di ritrovo per l'intera comunità cittadina.

In aggiunta agli ambienti di grandi dimensioni – come l'atrio, l'agora, l'Auditorium o la biblioteca – che ben si prestano ad accogliere le attività di “civic center”, potrebbe essere opportuno predisporre alcuni spazi per il supporto alla funzione di centro civico, che possono diventare al tempo stesso un modo per arricchire e integrare le attività scolastiche. Esempi di spazi integrativi potrebbero essere: bar, piccoli negozi, librerie, spazi per il coworking, sedi di associazioni culturali o sportive¹.

1.1.3. SCUOLA E SOSTENIBILITÀ

In un'ottica di risparmio energetico e sostenibilità ambientale, le nuove scuole dovranno essere inoltre dotate di impianti tecnologici all'avanguardia. Gli edifici dovranno disporre di un impianto di climatizzazione per il riscaldamento invernale e il raffrescamento estivo (la necessità di prevederli entrambi varia in relazione alla zona climatica e alle caratteristiche dell'involucro edilizio), nonché di impianti per la generazione di energia da fonti rinnovabili (il solare termico per coprire il fabbisogno di acqua calda sanitaria, l'impianto fotovoltaico per la produzione di energia elettrica). Qualora la ventilazione naturale non sia sufficiente per garantire i ricambi d'aria minimi dettati da normativa, si dovrà ricorrere ad un impianto aeraulico per la ventilazione forzata. Il progetto, ai fini del risparmio energetico, deve tener conto inoltre dell'orientamento dell'edificio a favore

dell'illuminazione naturale, al fine di garantire degli apporti energetici gratuiti e il risparmio dell'energia elettrica utilizzata per l'illuminazione artificiale. Il progetto deve altresì adottare delle strategie per il controllo della radiazione solare nei mesi più caldi, al fine di limitare un surriscaldamento eccessivo degli ambienti.

Una particolare attenzione, inoltre, deve essere rivolta all'impianto idrico e alla gestione delle acque piovane, per consentirne il recupero destinato all'uso sanitario e all'irrigazione.

Tutti gli impianti devono essere accessibili per consentirne la corretta manutenzione, devono essere altresì dotati di sistemi di domotica per controllare e monitorare al meglio le prestazioni impiantistiche dell'edificio.

Lo spazio flessibile – concetto alla base su cui si fonda la nuova didattica – presuppone similmente una “flessibilità impiantistica”: una stanza può raddoppiare o dimezzare le proprie dimensioni aprendo o chiudendo le pareti scorrevoli, con densità di frequentazione sempre diverse; gli impianti devono essere progettati in modo tale che possano adattarsi ai diversi gradi di affollamento e alle differenti conformazioni dello spazio.

La scelta dei materiali rappresenta un'altra componente fondamentale per la qualità delle scuole, che devono sottostare a requisiti di durata, manutenibilità, sostenibilità, costo ed estetica.

I materiali impiegati per l'involucro edilizio devono soddisfare i seguenti requisiti: avere prestazioni termofisiche adeguate, avere una durata proporzionata a quella di obsolescenza dell'edificio, deve esserne consentita la cor-

[1] Decreto Ministeriale 11/04/2013: linee guida del Miur per progettare l'edilizia scolastica

[2] <http://www.indire.it/progetto/architetture-scolastiche/>

[3] <http://www.indire.it/progetto/architetture-scolastiche/norme-tecniche/>

retta manutenzione, devono avere un costo proporzionato all'investimento, devono essere reperiti da una filiera locale ai fini della reperibilità futura e della sostenibilità, devono essere facilmente disassemblabili a fine vita per consentirne lo smaltimento o il riciclo.

Trattandosi di una scuola, i materiali devono altresì contribuire a creare un ambiente cromatico, materico, variegato e luminoso; volto a stimolare i sensi dei bambini e ad accompagnarli nel loro percorso di crescita¹.

1.2. INDIRE: QUANDO LO SPAZIO INSEGNA

L'Istituto Nazionale di Documentazione, Innovazione e Ricerca Educativa (Indire) è uno dei più noti enti del Ministero dell'Istruzione e rappresenta ad oggi il principale punto di riferimento per la ricerca educativa in Italia.

L'obiettivo cardine dell'istituto è quello di sviluppare nuove forme di didattica innovativa, volte ad innalzare il livello di apprendimento degli studenti e a garantire allo stesso tempo il funzionamento ottimale del contesto scolastico italiano.

L'Indire, fondato nel 1925, ha la sua sede centrale a Firenze ed è ulteriormente dislocato nel territorio nazionale in altri tre nuclei a Roma, Torino e Napoli.

Tutte le attività di ricerca in cui è coinvolto Indire sono finalizzate alla realizzazione della mission dell'istituto, ovvero quella di "sostenere l'innovazione in atto nelle scuole italiane e indirizzare i processi di trasformazione delle metodologie

e degli strumenti didattici, delle architetture interne ed esterne, degli arredi e degli ambienti di apprendimento nelle scuole del nostro Paese" [<http://www.indire.it/ricerca/>].

In merito alle architetture scolastiche la ricerca dell'Indire è incentrata sullo studio degli spazi della scuola messi in relazione ai tempi di apprendimento. Fino ad oggi l'aula è stata considerata come il principale luogo di apprendimento; tutti gli altri ambienti assumevano un ruolo marginale ed erano destinati ad un'attività specifica, nel momento in cui tale attività non veniva più svolta questi ambienti risultavano spesso inutilizzati.

Questa visione arcaica della didattica - basata sulla centralità dell'aula come unico luogo di apprendimento - non è più ritenuta adeguata dai ricercatori Indire, in quanto non rispecchia le attuali esigenze formative che necessitano al contrario di spazi flessibili, modulari, fluidi e polifunzionali.

L'idea alla base è quella di pensare alla scuola come un unico spazio integrato e flessibile, in cui i vari microambienti sono destinati a scopi diversificati e interscambiabili e godono tutti della stessa dignità e importanza. Tale modo di concepire lo spazio, inteso come un sistema fluido e dinamico, comporta naturalmente che anche gli arredi debbano essere progettati come elementi "flessibili" in modo tale che possano adattarsi alla svariate attività a seconda delle esigenze.

Questa nuova visione implica un nuovo modo di fare scuola non più basato sulla didattica frontale, bensì su un rapporto diretto ed egua-

litario tra docente e studente: l'insegnante non siede più sulla cattedra ma in mezzo agli studenti, ponendosi sullo stesso piano dei bambini. In tal modo gli studenti si sentono anch'essi parte integrante della lezione e sono più propensi a parteciparvi attivamente, stimolando allo stesso tempo il dialogo e l'integrazione sociale. Tutto ciò comporta ovviamente uno sforzo maggiore da parte dei docenti, che devono essere predisposti a ideare e progettare nuovi setting di apprendimento al fine di ripensare la didattica nella sua totalità.

Si tratta dunque di un "processo partecipativo" in cui tutti i soggetti coinvolti, studenti compresi, cooperano insieme alla realizzazione di spazi funzionali che mutano e si trasformano a seconda delle attività didattiche che si devono svolgere²⁻³.

1.2.1. 1+4 SPAZI EDUCATIVI DEL TERZO MILLENNIO

Sulla base di questi obiettivi si fonda il percorso di ricerca sulle Architetture scolastiche di Indire, che si è concretizzato con la pubblicazione del "manifesto 1+4 Spazi educativi del terzo millennio" [Figura 1.1].

Il manifesto individua all'interno della scuola cinque spazi distinti⁵⁻⁶, ma allo stesso tempo fluidi e interscambiabili; tali spazi sono:

- lo spazio di gruppo
- lo spazio esplorazione
- l'agorà
- lo spazio individuale
- lo spazio informale

Lo "spazio di gruppo"

Tale spazio - identificato nel manifesto col numero "1" - rappresenta l'ambiente per la didattica quotidiana, dove gli studenti hanno a disposizione materiali, strumenti ed arredi utili allo svolgimento delle attività e all'interazione sociale: i bambini plasmano e trasformano lo spazio a seconda delle loro esigenze, stimolando la loro creatività e intraprendenza.

L'allestimento di questo ambiente deve disporre di postazioni di lavoro flessibili che consentano di cambiarne la disposizione a seconda che si debbano svolgere attività di gruppo o individuali.

Gli studenti devono poter progettare, collaborare e lavorare in gruppi (con i banchi di lavoro solitamente disposti ad isola); realizzare lavori multimediali tramite il supporto di tecnologie e strumenti digitali; svolgere test e prove individuali (con postazioni di lavoro separate); discutere e confrontarsi su tematiche condivise (con un setting delle postazioni che promuova lo scambio di idee e la comunicazione); presentare all'intera classe lavori singoli o di gruppo tramite il supporto di un proiettore (con una disposizione delle sedute in modo che tutti godano di una visione ottimale).

Lo "spazio esplorazione"

Questo ambiente rappresenta lo spazio della scoperta, dove i bambini si divertono a creare e a sperimentare cooperando insieme, seguendo la logica dei concetti pedagogici del "learning by doing" e del "cooperative learning".

E' il luogo che rappresenta la gioia di impara-

[4] LEONARDO TOSI (a cura di), *Fare didattica in spazi flessibili. Progettare, allestire e utilizzare ambienti di apprendimento*, Firenze, Giunti Scuola, 2018.

[5] SAMUELE BORRI (a cura di), *L'aula si è rotta: un libro su come cambia l'edilizia scolastica in Europa e nel mondo*, Firenze, Ediguada, 2018.



1+4 SPAZI EDUCATIVI

1+4 SPAZI EDUCATIVI PER LA SCUOLA DEL TERZO MILLENNIO

Perché cambiare gli spazi dell'apprendimento? Quale è la configurazione degli spazi educativi più efficace per l'apprendimento nel terzo millennio?

Il percorso di ricerca condotto da Indire ha cercato di dare una risposta a queste domande proponendo il modello 1+4 per il nuovo millennio.

1 rappresenta l'ambiente di apprendimento polifunzionale del gruppo-classe, l'evoluzione dell'aula tradizionale che si apre alla scuola e al mondo. Un ambiente a spazi flessibili in continuità con gli altri ambienti della scuola.

4 sono gli spazi complementari, e non più subordinati, agli ambienti della didattica quotidiana. Sono l'agorà, lo spazio informale, lo spazio individuale e lo spazio per l'esplorazione.

Il modello proposto si basa su molteplici livelli di analisi (Brofenbrenner, 1989) e propone una visione che si discosta dall'idea di scuola come somma di aule (Airoldi, 1978) per estendersi, oltre la dimensione didattica, al contesto sociale influenzando la qualità delle relazioni (Leemans e van Ahlefeld, 2013, Lefebvre, 1991).

Il percorso di ricerca che ha condotto al modello 1+4, si è sviluppato lungo direttrici differenziate e sinergiche: l'analisi di casi di eccellenza a livello europeo, l'analisi delle politiche educative volte a promuovere spazi educativi innovativi, lo studio della normativa tecnica per l'edilizia scolastica, l'osservazione e la valorizzazione dei percorsi di ripensamento degli spazi promossi da scuole di avanguardia a livello nazionale, la cooperazione e la riflessione all'interno dei contesti di ricerca e degli organismi internazionali.

SPAZIO INFORMALE

- * Luogo dell'incontro informale e del riposo.
- Ambienti comodi con sedute morbide per leggere, parlare, ascoltare musica.

SPAZIO INDIVIDUALE

- * Spazi per il raccoglimento, la riflessione, la lettura.
- Postazioni riparate e protette con strumenti di lettura/scrittura individuale.

SPAZIO ESPLORAZIONE

- * Spazio della scoperta e dell'esplorazione del mondo.
- Ambiente dotato di strumenti per l'osservazione, la sperimentazione e la manipolazione.

SPAZIO DI GRUPPO

- * Luogo in cui i gruppi di studenti si raccolgono e costruiscono la propria identità.
- Area che permette soluzioni flessibili per lo svolgimento di attività differenziate.

AGORÀ

- * Luogo della comunità scolastica tutta.
- Ambiente per la condivisione di eventi aperti anche al territorio.

re pensando e facendo: gli studenti maturano competenze per risolvere problemi; osservano fenomeni con strumenti appositi; applicano strategie di intervento; analizzano e descrivono gli esiti delle loro sperimentazioni.

L' "Agorà"

E' lo spazio destinato ad accogliere tutta la comunità scolastica: gli studenti, i genitori, il corpo docenti ed eventuali enti esterni all'Istituto. Rappresenta la "piazza" della scuola dove tutti devono poter riunirsi per tenere riunioni e assemblee volte a condividere tematiche che coinvolgono potenzialmente tutti gli studenti, il personale della scuola e le famiglie. Data la moltitudine di persone che deve ospitare tale spazio tale ambiente dev'essere contraddistinto da una dimensione e un assetto spaziale adeguati ad accoglierle nel migliore dei modi.

Lo "spazio individuale"

Rappresenta lo spazio in cui il bambino può rilassarsi o dedicarsi ad attività da svolgersi in maniera autonoma. E' una sorta di spazio di ritiro individuale in cui gli studenti possono leggere, riflettere, studiare e meditare; maturando competenze legate all'autoresponsabilizzazione e alla gestione autonoma del tempo. Tali spazi devono essere silenziosi e separati dagli altri ambienti, così che gli studenti possano concentrarsi o concedersi un momento di relax dalle attività scolastiche.

Lo "spazio informale"

Tale ambiente è dedicato a tutte quelle attività che non riguardano lo studio e l'apprendimento: rappresenta lo spazio in cui i bambini possono divertirsi liberamente concedendosi una pausa tra una lezione e l'altra. Deve essere contraddistinto da sedute morbide e divani colorati dove gli studenti possono confrontarsi e giocare insieme, stimolando l'aggregazione sociale e imparando a vivere in una comunità. I ricercatori Indire ritengono che tali spazi debbano sostituire i vecchi corridoi, i quali non assumevano nessuna funzione in particolare se non quella di spostarsi da un luogo ad un altro. Corridoi angusti, scale e zone di passaggio assumono un ruolo preminente, divenendo i luoghi per imparare a vivere insieme⁴⁻⁵.

Figura 1.1

Il manifesto 1+4 spazi educativi per il terzo millennio
© <http://www.indire.it/progetto/1l-modello-1-4-spazi-educativi/>

1.2.2. ALCUNI ESEMPI INTERNAZIONALI

Lo scopo dell'attività di ricerca è dunque quello di sensibilizzare le autorità e gli amministratori

[6] GIOVANNI BIONDI, SAMUELE BIORRI, LEONARDO TOSI, *Dall'aula all'ambiente di apprendimento*, Firenze, Altralinea Edizioni, 2016.

degli enti locali ad incentivare e promuovere una didattica moderna che ponga al centro di tutto gli studenti, con il fine ultimo di allestire spazi in grado di garantire adeguati livelli di confort e benessere.

A tal proposito, i ricercatori Indire hanno individuato su scala internazionale alcuni esempi virtuosi di edilizia scolastica innovativa, in cui vengono sperimentati e applicati tali concetti legati a una didattica innovativa: la scuola "Vittra TelefonPlan" a Stoccolma (Svezia), la scuola "4het Gynasium" ad Amsterdam (Olanda), la scuola "Orestad Gymnasium" a Copenhagen (Danimarca).

1.2.2.1. VITTRA TELEFONPLAN

La scuola TelefonPlan, sita a Stoccolma, si estende per una superficie di circa 600 mq e può accogliere fino a 250 studenti, con età compresa tra i 6 e gli 11 anni.

La pianta della scuola [Figura 1.2] evidenzia come gli spazi vengano trattati in maniera del tutto diversa rispetto alla scuola tradizionale: i vari ambienti - con funzioni diversificate e interscambiabili - si inseriscono in unico spazio fluido che varia, muta e si trasforma a seconda delle esigenze degli studenti.

Gli spazi destinati alla didattica sono organizzati in modo tale che studenti e insegnanti possano collaborare, confrontarsi e progettare insieme le lezioni [Figura 1.4]. Sono previsti inoltre alcuni "spazi informali" [Figura 1.3] - con giochi e allestimenti colorati che richiamano la natura [Figure 1.5-1.6] - dove i bambini possono dedicarsi ad attività ricreative come

leggere, ascoltare musica o divertirsi insieme; gli "spazi individuali" invece sono luoghi più chiusi e nascosti pensati per rilassarsi o per le attività ricreative o di studio individuali [Figura 1.7]. Tutti gli ambienti sono in generale luminosi e ariosi al fine di garantire condizioni di confort e benessere ottimali; con effetti positivi sull'umore, la concentrazione e la creatività dei bambini⁷.

Figura 1.3

Vittra TelefonPlan - Lo spazio informale
© <http://www.indire.it/quandolospazioinsegna/scuole/vittra/>



Figura 1.2

Vittra TelefonPlan - Pianta piano primo
© <http://www.indire.it/quandolospazioinsegna/scuole/vittra/>



Figura 1.4

Vittra TelefonPlan - Lo spazio per lo studio collettivo
© <http://www.indire.it/quandolospazioinsegna/scuole/vittra/>



Figura 1.6

Vittra TelefonPlan - Lo spazio informale
© <http://www.indire.it/quandolospazioinsegna/scuole/vittra/>



Figura 1.5

Vittra TelefonPlan - Lo spazio informale
© <http://www.indire.it/quandolospazioinsegna/scuole/vittra/>



Figura 1.7

Vittra TelefonPlan - La caverna
© <http://www.indire.it/quandolospazioinsegna/scuole/vittra/>



1.2.2.2. 4HET GYMNASIUM

La scuola 4het Gymnasium di Amsterdam consta di una superficie di circa 4000 mq ripartiti in tre blocchi e può ospitare fino a 650 studenti.

L'edificio presenta una struttura a corte che contribuisce a creare un senso di condivisione e di appartenenza: la struttura "abbraccia" lo spazio esterno che diventa un luogo di ricreazione e socializzazione [Figura 1.8]. In tal modo vengono migliorate considerevolmente le condizioni di luce naturale della scuola, garantendo livelli di comfort e benessere ottimali. L'atrio a doppia altezza è pensato come una sorta di "agorà" in cui gli studenti possono riunirsi o dedicarsi ad attività di studio collettivo o individuale [Figura 1.9]; le pareti degli spazi distributivi – come i corridoi e le scale – sono rivestite di lastre di ardesia su cui gli studenti possono scrivere per scambiarsi idee e proposte: non sono più meri luoghi di passaggio, bensì divengono spazi per la condivisione e per la progettualità condivisa⁸ [Figura 1.10-1.11].



Figura 1.10
4het Gymnasium - Le scale e gli spazi distributivi
© <http://www.indire.it/quandolospazioinsegna/scuole/4het-gymnasium/>



Figura 1.9
4het Gymnasium - L'atrio a doppia altezza
© <http://www.indire.it/quandolospazioinsegna/scuole/4het-gymnasium/>



Figura 1.8
4het Gymnasium - La corte interna
© <http://www.indire.it/quandolospazioinsegna/scuole/4het-gymnasium/>

Figura 1.11
4het Gymnasium - Gli spazi per lo studio collettivo
© <http://www.indire.it/quandolospazioinsegna/scuole/4het-gymnasium/>



1.2.2.3. ORESTAD GYMNASIUM

Sita a Copenhagen in Danimarca, la scuola Orestad Gymnasium può ospitare fino a 1150 studenti e ha una superficie di ben 12000 m² ripartiti su più livelli, ai quali si accede attraverso una monumentale scala distributiva che connota e caratterizza l'intero spazio [Figura 1.12]. La luce naturale penetra dall'alto e dalle pareti vetrate permeando l'intero ambiente [Figura 1.13], contribuendo in larga parte al benessere psicofisico degli studenti. La mensa e la palestra sono pensati come ampissimi spazi fluidi e multifunzionali che, grazie alle pareti scorrevoli, possono essere usati anche come luogo di ritrovo informale o di studio individuale [Figura 1.14]. Sulle aule a pianta circolare, inoltre, vengono ricavati degli "spazi morbidi" pensati per il relax e la socializzazione⁹ [Figure 1.15-1.16].

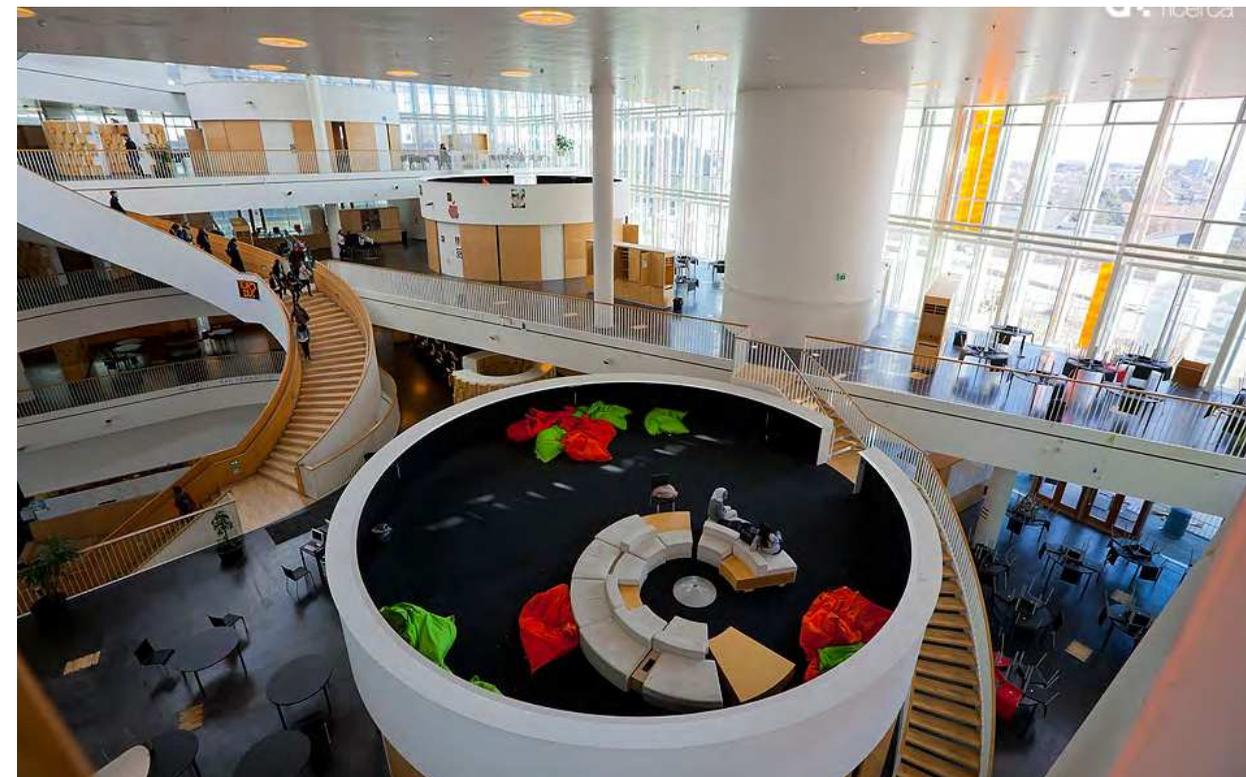
▼ Figura 1.12

Orestad Gymnasium - Sezione longitudinale: lo scalone centrale
© <http://www.indire.it/quandolospazioinsegna/scuole/orestad/>



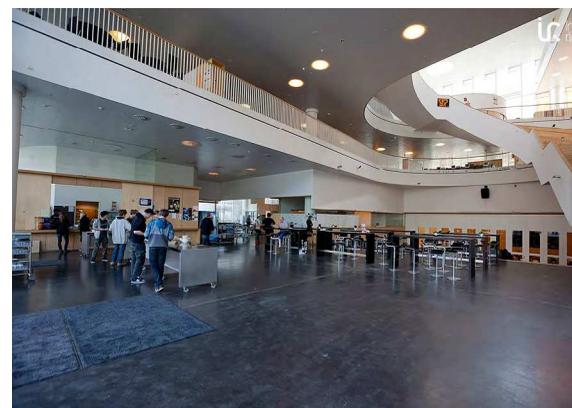
► Figura 1.15

Orestad Gymnasium - Vista d'insieme
© <http://www.indire.it/quandolospazioinsegna/scuole/orestad/>



▼ Figura 1.14

Orestad Gymnasium - La mensa come spazio fluido
© <http://www.indire.it/quandolospazioinsegna/scuole/orestad/>



▼ Figura 1.16

Orestad Gymnasium - Gli spazi "morbidi" per il relax
© <http://www.indire.it/quandolospazioinsegna/scuole/orestad/>



▼ Figura 1.13

Orestad Gymnasium - L'illuminazione degli spazi
© <http://www.indire.it/quandolospazioinsegna/scuole/orestad/>



[7] <http://www.indire.it/quandolospazioinsegna/scuole/vitra/>

[8] <http://www.indire.it/quandolospazioinsegna/scuole/4het-gymnasium/>

[9] <http://www.indire.it/quandolospazioinsegna/scuole/orestad/>

Nel seguente capitolo vengono illustrate alcune importanti proposte e iniziative volte a fare emergere la qualità architettonica di alcuni edifici scolastici - siti nel territorio nazionale - costruiti o ristrutturati negli ultimi anni, che si sono distinti per l'accurata attenzione verso un approccio sostenibile del progetto, mirato allo sfruttamento delle risorse rinnovabili e al risparmio energetico. A valle di tali considerazioni, vengono successivamente individuati e approfonditi alcuni progetti ritenuti particolarmente interessanti, in quanto adottano tecnologie innovative e accorgimenti progettuali mirati ad un controllo ottimale della luce naturale e all'uso intensivo delle risorse rinnovabili.

2 Scuole sostenibili: premesse

2.1. EDILIZIA SCOLASTICA SOSTENIBILE: IL RUOLO DELLA LUCE NATURALE

La progettazione di edifici scolastici sostenibili ed ecocompatibili rappresenta un tema sempre più attuale e di primaria importanza per l'edilizia del futuro: le scuole sono i principali luoghi di aggregazione in cui verranno educate le generazioni a venire, rappresentando dunque un'importante risorsa per la formazione di una società moderna che agisca nella salvaguardia e tutela dell'ambiente. In linea con questi principi, risulta dunque fondamentale che gli edifici scolastici rispettino determinati canoni di comfort ed efficienza energetica, proponendosi di assumere un importante ruolo paradigmatico per un approccio sostenibile alla progettazione. La sostenibilità è un concetto molto ampio che conta svariati campi di applicazione e abbraccia molteplici aspetti, strettamente legati alla salvaguardia dell'ambiente e al progresso economico e sociale. Nell'ambito degli ambienti di apprendimento, tuttavia, bisogna considerare

ulteriori parametri in ragione dell'importante funzione educativa e sociale a cui questi devono assolvere.

Ai fini di una progettazione sostenibile degli edifici scolastici non ci si può infatti limitare alla riduzione dei consumi e all'efficientamento energetico dell'involucro, bisogna bensì pianificare una progettazione accurata che garantisca il soddisfacimento di una vasta gamma di requisiti; con l'intento di assicurare ambienti salubri, confortevoli, stimolanti e produttivi.

La luce naturale riveste un ruolo di primaria importanza in tal senso, rappresentando una risorsa fondamentale per il comfort e la qualità degli ambienti interni. Recenti studi hanno inoltre dimostrato che una corretta esposizione alla luce naturale può avere influenze positive sulla stabilità emotionale e la produttività, contribuendo in larga parte alla regolazione dei ritmi circadiani e avendo molteplici benefici sulla salute, la crescita e i processi di apprendimento dei bambini.

Dal punto di vista del risparmio energetico, oltre

a contribuire alla riduzione dei consumi di energia elettrica generati dall'illuminazione artificiale, l'esposizione alla radiazione solare diretta può inoltre fornire degli apporti energetici gratuiti durante la stagione invernale, contribuendo a ridurre i dispendi energetici e le emissioni di anidride carbonica dovuti alla climatizzazione invernale. Allo stesso modo, un'adeguata protezione dalla radiazione solare nei mesi estivi può in parte contribuire alla riduzione dei consumi per il raffrescamento estivo.

La progettazione bioclimatica, volta a sfruttare il Sole e le altre risorse naturali (acqua, aria, terreno ecc.) per assicurare edifici confortevoli e termicamente efficienti, costituisce uno dei principali fattori chiave su cui far leva per la progettazione di scuole sostenibili ed ecocompatibili. Alla fine del capitolo vengono presentati alcuni casi studio interessanti che hanno fatto di tali concetti il principale criterio compositivo, assumendo un importante ruolo paradigmatico per le altre realtà scolastiche italiane¹⁰⁻¹¹.

2.2. PROPOSTE E INIZIATIVE PER LA RIQUALIFICAZIONE SOSTENIBILE DELLE SCUOLE

Analizzando l'attuale situazione in Italia, gran parte degli edifici scolastici utilizzati non risultano essere conformi agli standard di sostenibilità e funzionalità educativa finora citati. Si tratta per lo più di edifici in pessimo stato di conservazione, poco efficienti dal punto di vista energetico e inadatti per lo svolgimento delle attività didattiche in piena sicurezza e nel benessere degli studenti.

Per far fronte a tale situazione, sono state re-

centemente avanzate alcune proposte volte ad innescare strategie e scenari di riqualificazione dell'edilizia scolastica italiana, mirate ad incentivare l'impiego di risorse rinnovabili e a garantire migliori condizioni di comfort negli ambienti interni¹⁰.

2.2.1. "SCUOLA INNOVA": SECONDO FORUM SULL'EDILIZIA SCOLASTICA_ ROMA, 17 OTTOBRE 2017

L'evento "Scuola Innova" è stato promosso in occasione del secondo Forum sull'edilizia scolastica sostenibile (il primo si è tenuto nel novembre 2016). Tale evento (organizzato da Legambiente, l'editoriale la Nuova Ecologia ed il Kyoto Club) mira a perseguire l'ambizioso obiettivo di elaborare nuove proposte e iniziative finalizzate ad attivare nuovi processi di riqualificazione per l'edilizia scolastica, con l'intento di garantire nelle scuole italiane adeguati livelli di sicurezza, risparmio energetico e innovazione strutturale. Tale obiettivo, considerato lo stato di precarietà in cui versa attualmente il patrimonio scolastico italiano, risulta essere ad oggi ancora più urgente considerato il recente sisma che ha interessato le regioni dell'Italia centrale.

I fondi messi a disposizione per la riqualificazione del patrimonio scolastico italiano, seppur esigui, non sembrano attualmente essere sfruttati adeguatamente per garantire un'ordinaria manutenzione degli edifici scolastici; volta alla messa in sicurezza delle strutture e all'efficientamento energetico delle stesse. In occasione dell'evento, grazie ad un sinergico confronto fra sindaci, imprese progettisti e



Figura 2.1

La locandina dell'evento "Scuola Innova" tenutosi a Roma © <https://www.ediliziascolastica.it/eventi/scuola-innova-secondo-forum-sulledilizia-scolastica/>

associazioni, sono state avanzate svariate proposte e iniziative volte a migliorare la qualità delle scuole italiane, mettendo in atto strumenti innovativi che possano innescare processi di riqualificazione del patrimonio scolastico nazionale; che garantiscano al tempo stesso elevati livelli di sicurezza, efficienza energetica e funzionalità educativa e sociale¹² [Figura 2.1].

2.2.2. "AGIBILE E BELLA": ARCHITETTURE DI QUALITÀ PER LA QUALITÀ DELLE SCUOLE_ BIENNALE DI VENEZIA, 2014

"Agibile e bella" è un concorso indetto nel 2014 incentrato sul tema dell'edilizia scolastica italiana, frutto della collaborazione sinergica tra il Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo e il Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca. Tale iniziativa,

[10] <https://www.ingeno-web.it/27050-gli-edifici-scolastici-piu-green-di-italia-ambienti-per-il-futuro-delleducazione>.

realizzata in collaborazione con In/Arch, si pone l'obiettivo di far emergere esempi virtuosi di architetture scolastiche italiane realizzate negli ultimi 20 anni, non solo in riferimento agli edifici di nuova costruzione ma anche alla riqualificazione e ristrutturazione di edifici esistenti. Il concorso ha visto la partecipazione di 146 opere candidate, delle quali 12 sono state selezionate dalla giuria quali esempi virtuosi di edilizia scolastica, assegnando inoltre 11 menzioni¹³.

2.2.3. "TORINO FA SCUOLA":

DUE SCUOLE, UN PROCESSO DA REPLICARE

Torino Fa Scuola è un progetto promosso da due Enti privati, la Compagnia di San Paolo e la Fondazione Giovanni Agnelli, in cooperazione con la Città di Torino e la Fondazione per la Scuola. La cooperazione tra questi promotori è finalizzata alla volontà di creare una nuova "traiettoria" per la scuola. Tale progetto si è sviluppato in seguito a riflessioni di carattere architettonico, pedagogico e socio-culturale inerenti alle nuove esigenze della scuola. L'obiettivo primario è la riqualificazione degli edifici scolastici in visione delle nuove necessità didattiche e del risparmio energetico, considerando un orizzonte temporale orientato ai prossimi 30-40 anni. Le iniziative del progetto partono da due scuole torinesi, la Scuola Enrico Fermi di Via Carlo Giacomini 24 e la Scuola Giovanni Pascoli in Piazza Bernini, ponendosi l'obiettivo di creare un modello di scuola che sia replicabile nelle altre città italia-

[11] ANNA PELLEGRINO, SILVIA CAMMARANO, VALERIA SAVIO, *Daylighting for Green Schools: a resource for indoor quality and energy efficiency in educational environments*, Energy Procedia, Elsevier, 2015.

ne. La scuola Enrico Fermi è stata inaugurata il 12 settembre 2019, esito di un bando di concorso indetto nel 2017. Il progetto prevede una riorganizzazione degli spazi interni (coerente con le nuove necessità didattiche) nonché un totale ridisegno della facciata: l'aggiunta di nuovi volumi esterni fornisce spazi aggiuntivi per attività all'aperto [Figura 2.2] e garantisce allo stesso tempo la protezione dalla radiazione solare estiva [Figura 2.3]. Il progetto della scuola Giovanni Pascoli, anch'essa inaugurata lo scorso 12 settembre 2019, si basa su un assetto interno con spazi luminosi, colorati, flessibili e multifunzionali [Figura 2.5]; la copertura con gli orti didattici fornisce lo spazio educativo all'aperto di cui la scuola era priva¹⁴ [Figura 2.6].



Figura 2.5
Scuola Giovanni Pascoli - Lo spazio interno
© <https://www.torinofascuola.it/giovanni-pascoli/>

Figura 2.6
Scuola Giovanni Pascoli - Gli orti didattici sul tetto
© <https://www.torinofascuola.it/giovanni-pascoli/>



Figura 2.2
Scuola Enrico Fermi - Vista d'insieme
© <https://www.torinofascuola.it/enrico-fermi/>



[13] https://www.archiportale.com/news/2014/10/architettura/agibile-e-bella-architetture-di-qualita-per-la-qualita-delle-scuole_42063_3.html

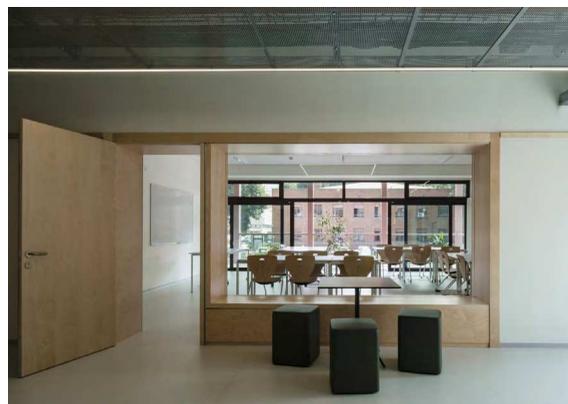
[14] <https://www.torinofascuola.it/>

Figura 2.3
Scuola Enrico Fermi - Gli spazi esterni aggiuntivi
© <https://www.torinofascuola.it/enrico-fermi/>



[12] <https://www.ediliziascolastica.it/eventi/scuola-innova-secondo-forum-sulle-dilizia-scolastica/>

Figura 2.4
Scuola Enrico Fermi - Gli spazi distributivi e le aule
© <https://www.torinofascuola.it/enrico-fermi/>



2.3. SCUOLE INNOVATIVE: ALCUNI ESEMPI VIRTUOSI DA IMITARE NEL TERRITORIO NAZIONALE

Negli ultimi vent'anni si è manifestata nel campo dell'edilizia scolastica una maggiore attenzione verso lo sviluppo sostenibile, inteso nelle sue tre accezioni e dimensioni principali: ambiente, economia e società. Al fine di perseguire tale obiettivo, "le forme ed i caratteri del nostro ambiente costruito dovranno, d'ora in poi, basarsi su un approccio che comporti l'assunzione di responsabilità nei confronti dell'ambiente, ed il ruolo dell'architettura sarà proprio quello di esprimere questa forma di rispetto" [Pepe, 2009]. Di seguito vengono riportati 12 esempi di edilizia scolastica italiana che si sono distinti in un'ottica di sostenibilità, basandosi su criteri mirati alla salvaguardia dell'ambiente e alla riduzione dei consumi energetici. Vengono in particolare analizzati i sistemi di illuminazione naturale impiegati e le strategie adottate per la corretta gestione della luce naturale; intesa in termini sia di prestazioni visive, sia di risparmio energetico.



1 Brugnera (PN)
Scuola elementare



2 Bagnolo Mella (BS)
Scuola dell'infanzia



3 Nichelino (TO)
Scuola dell'infanzia



4 Collecchio (PR)
Polo scolastico



5 Ponticelli (BO)
Scuola dell'infanzia bioecologica



6 CASCINA (PI)
Scuola dell'infanzia



7 Moie (AN)
Polo scolastico



8 Avezzano (AQ)
Polo scolastico



9 Roma
Scuola elementare



10 Bisceglie (BT)
Scuola dell'infanzia



11 ANDRIA
Scuola dell'infanzia



12 FAIANO (SA)
Scuola dell'infanzia



2.3.1. SCUOLA ELEMENTARE A BRUGNERA (PORDENONE)

L'ampliamento della Scuola Elementare di Brugnera - all'interno del Campus scolastico che comprende la scuola media, la scuola materna, la scuola del mobile e la biblioteca - è stato realizzato nel 2007 su progetto dell'architetto Claudio Costalonga.

L'ampia vetrata dell'atrio d'ingresso, a doppia altezza, illumina uniformemente gli spazi distributivi [Figura 2.5]. La presenza di sporti orizzontali in alluminio garantisce la protezione dall'irraggiamento nei mesi più caldi, evitando un surriscaldamento eccessivo degli ambienti interni [Figura 2.6]. La palestra e la mensa sono illuminate da ampi lucernai e aperture con vetro selettivo che, grazie alle superfici sguinciate, donano una grande quantità di luce naturale diffusa all'ambiente [Figura 2.7]; le ampie vetrate ad ovest sul giardino pensile (che funge da regolatore termoigrometrico) raccolgono la luce pomeridiana [Figura 2.8], che in caso di abbagliamento viene opportunamente schermata tramite tende esterne automatizzate [Figura 2.9]. I serramenti sono realizzati in alluminio con taglio termico e vetri selettivi ($U_w = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$). I ricambi d'aria vengono effettuati tramite ventilazione meccanica con recupero di calore, al fine di minimizzare le dispersioni termiche nei mesi più freddi¹⁵.

/Impresa/progettista: Costalonga & Sonego

/Anno fine lavori: 2007

✓ Figura 2.8

Fronte ovest - Il giardino pensile

© <https://www.archilovers.com/projects/98841/ristrutturazione-e-ampliamento-scuola-elementare.html>



✓ Figura 2.9

Le tende esterne per il controllo dell'abbagliamento

© <https://www.archilovers.com/projects/98841/ristrutturazione-e-ampliamento-scuola-elementare.html>



> Figura 2.5

Vista dall'ingresso principale

© <https://www.archilovers.com/projects/269051/brugnera-pn-ampliamento-scuola-elementare.html>

✓ Figura 2.7

Vista interna della palestra

© <https://www.archilovers.com/projects/269051/brugnera-pn-ampliamento-scuola-elementare.html>



▲ Figura 2.6

I frangisole in alluminio per la protezione solare

© <https://www.archilovers.com/projects/269051/brugnera-pn-ampliamento-scuola-elementare.html>

¹⁵ DOMENICO PEPE, *Scuole ecocompatibili: dal nido per l'infanzia all'istituto superiore*, Roma, DeI editore, 2009.

2.3.2. SCUOLA DELL'INFANZIA A BAGNOLO MELLA (BRESCIA)

Su progetto dell'architetto Simone Firmo, la nuova scuola dell'infanzia Pietro Nenni sostituisce nel 2017 il precedente edificio, ed è stata selezionata da Legambiente tra le 10 scuole italiane ritenute virtuose e innovative.

La tecnologia costruttiva in legno, insieme ad altri accorgimenti volti al risparmio energetico, hanno consentito alla scuola di ottenere la certificazione LEED Platinum, una tra le prime in Italia a raggiungere un risultato così elevato.

Le aule, pensate come blocchi separati e autonomi rivolti a sud-ovest, godono di un'elevata disponibilità di luce naturale grazie all'orientamento favorevole [Figura 2.10].

Lo sporto della copertura metallica consente di schermare la radiazione solare durante i mesi estivi, evitando un surriscaldamento eccessivo nei mesi più caldi; allo stesso tempo consente la penetrazione della radiazione termica durante i mesi più freddi, garantendo apporti energetici gratuiti a sostegno dell'impianto di riscaldamento [Figura 2.11].

La regolazione della luce naturale, in caso di abbagliamento, è regolata da tende esterne a rullo integrate nei serramenti [Figura 2.12].

Le vetrate a tutta altezza - con vetro selettivo - consentono l'ingresso di un'elevata quantità di luce naturale, illuminando uniformemente gli spazi e garantendo prestazioni luminose ottimali¹⁶ [Figure 2.13-2.14].

/ Impresa/progettista: Arch. Simone Firmo

/ Anno fine lavori: 2017

✓ Figura 2.10

Vista d'insieme della scuola

© <https://www.teknoring.com/news/materiali-e-soluzioni/coperture-in-alluminio-la-nuova-scuola-dellinfanzia-a-bagnolo-mella/>



> Figura 2.14

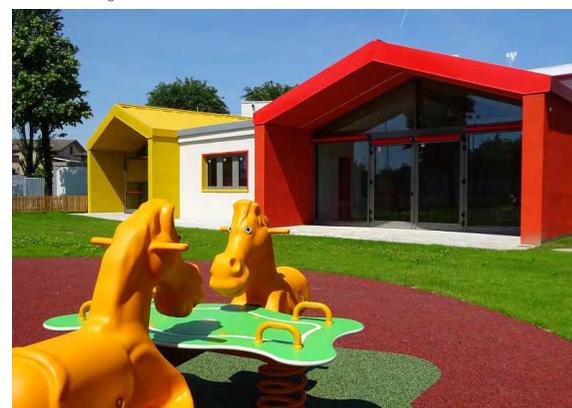
La mensa come spazio fluido e multifunzionale

© <https://www.ediliziascolastica.it/progetti/scuola-dellinfanzia-pietro-nenni-bagnolo-bs/>

✓ Figura 2.11

Vista dei singoli moduli dall'esterno

© <https://www.ediliziascolastica.it/progetti/scuola-dellinfanzia-pietro-nenni-bagnolo-bs/>



▲ Figura 2.13

Gli spazi per la collettività

© <https://www.ediliziascolastica.it/progetti/scuola-dellinfanzia-pietro-nenni-bagnolo-bs/>



▲ Figura 2.12

Le tende esterne colorate per il controllo dell'abbagliamento

© <https://www.ediliziascolastica.it/progetti/scuola-dellinfanzia-pietro-nenni-bagnolo-bs/>



[16] <https://www.ediliziascolastica.it/progetti/scuola-dellinfanzia-pietro-nenni-bagnolo-bs/>

2.3.3. SCUOLA DELL'INFANZIA A NICHELINO (TORINO)

L'intervento risulta vincitore del bando asili promosso dalla Compagna di San Paolo di Torino, per il merito di aver adottato strategie indirizzate alla compatibilità ambientale e al risparmio energetico. L'edificio, la cui costruzione è stata ultimata nel 2008, prevede l'uso di fonti rinnovabili di energia (collettori solari per il riscaldamento dell'acqua e ventilazione meccanica), l'utilizzo di materiali biocompatibili a zero emissioni, una forma architettonica e dei sistemi passivi per favorire il guadagno solare nella stagione invernale. Le principali caratteristiche architettoniche e costruttive si basano su una concezione del progetto eco-sostenibile e bioclimatica che mira a ridurre gli impatti ambientali [Figura 2.15-2.16]. Sono stati creati diversi spazi con condizioni ambientali differenti per essere utilizzati a seconda le stagioni e del periodo della giornata: i soggiorni climatizzati, le serre chiuse d'inverno e aperte nella stagione calda. Gli sporti orizzontali, integrati con la copertura, consentono nei mesi caldi di limitare l'ingresso della radiazione termica [Figura 2.17-2.18]. L'ampio giardino centrale, delimitato da finestre a tutta altezza, consente alla luce naturale di permeare uniformemente gli spazi garantendo un'elevata disponibilità di luce naturale e una buona uniformità di illuminamento¹⁵ [Figura 2.19-2.20].

/ Impresa/progettista: Arch. Giancarlo Pavoni

/ Anno fine lavori: 2008

✓ Figura 2.15

Vista d'insieme della scuola

© <https://www.pavoniartechstudio.it/progetti/educativo-culturale/nuovo-asilo-a-nichelino-to.html>



✓ Figura 2.17

Vista del fronte ovest

© <https://www.pavoniartechstudio.it/progetti/educativo-culturale/nuovo-asilo-a-nichelino-to.html>



▲ Figura 2.19

Il giardino centrale

© <https://www.pavoniartechstudio.it/progetti/educativo-culturale/nuovo-asilo-a-nichelino-to.html>



▲ Figura 2.20

Vista del giardino centrale dall'ingresso principale

© <https://www.pavoniartechstudio.it/progetti/educativo-culturale/nuovo-asilo-a-nichelino-to.html>

> Figura 2.18

Gli sporti orizzontali per la protezione solare

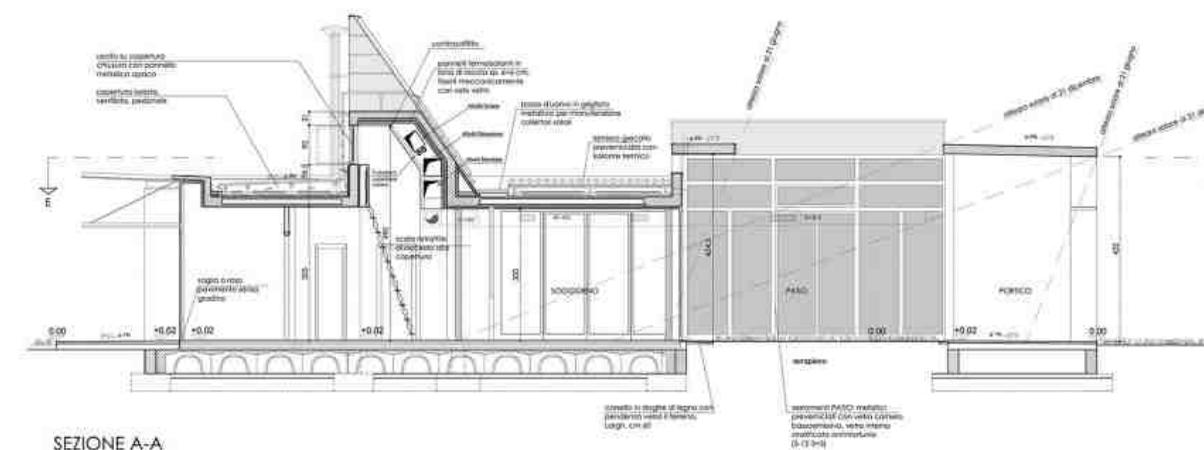
© <https://www.pavoniartechstudio.it/progetti/educativo-culturale/nuovo-asilo-a-nichelino-to.html>



✓ Figura 2.16

Sezione longitudinale

© <https://www.pavoniartechstudio.it/progetti/educativo-culturale/nuovo-asilo-a-nichelino-to.html>



[15] DOMENICO PEPE, *Scuole ecocompatibili: dal nido per l'infanzia all'istituto superiore*, Roma, DeI editore, 2009.

2.3.4. POLO SCOLASTICO A COLLECCHIO (PARMA)

Con un nuovo edificio all'avanguardia, di funzionale collegamento ai due preesistenti, è stato realizzato il nuovo polo scolastico di Collecchio, fortemente voluto dall'Amministrazione comunale, grazie all'impegno congiunto degli uffici interni del Comune, dell'Impresa esecutrice Allodi srl e della Dirigenza Scolastica.

Finita di costruire ed inaugurata nel 2017, la nuova scuola è frutto di un approccio progettuale mirato a garantire la massima efficienza energetica ed un notevole comfort ambientale, assicurati dall'impiego di tecniche costruttive innovative e di materiali prevalentemente naturali e riciclabili.

La regolazione della luce naturale e la schermatura dalla radiazione solare diretta è garantita attraverso un sistema fisso di frangisole orizzontali [Figura 2.22], disposti l'uno dall'altro ad una distanza tale da consentire allo stesso tempo la vista verso l'esterno [Figura 2.23].

Il profondo sporto della copertura sul fronte sud dell'edificio è stato opportunamente dimensionato al fine di garantire l'ingresso della radiazione termica nei mesi invernali e di impedirne l'ingresso nei mesi caldi¹⁷ [Figura 2.24].

/ Impresa/progettista: Allodi srl

/ Anno fine lavori: 2017

V Figura 2.21

Vista del fronte sud

© <https://www.parmapress24.it/2017/04/03/polo-scolastico-collecchio-primo-protocollo-passivhaus-inaugurazione-bonaccini/>



> Figura 2.23

Gli spazi distributivi interni

© <https://www.italiachecambia.org/2018/01/scuola-passivhaus-bioedilizia-favorisce-concentrazione-studenti/>

V Figura 2.22

Vista del fronte principale - I frangisole per la protezione solare

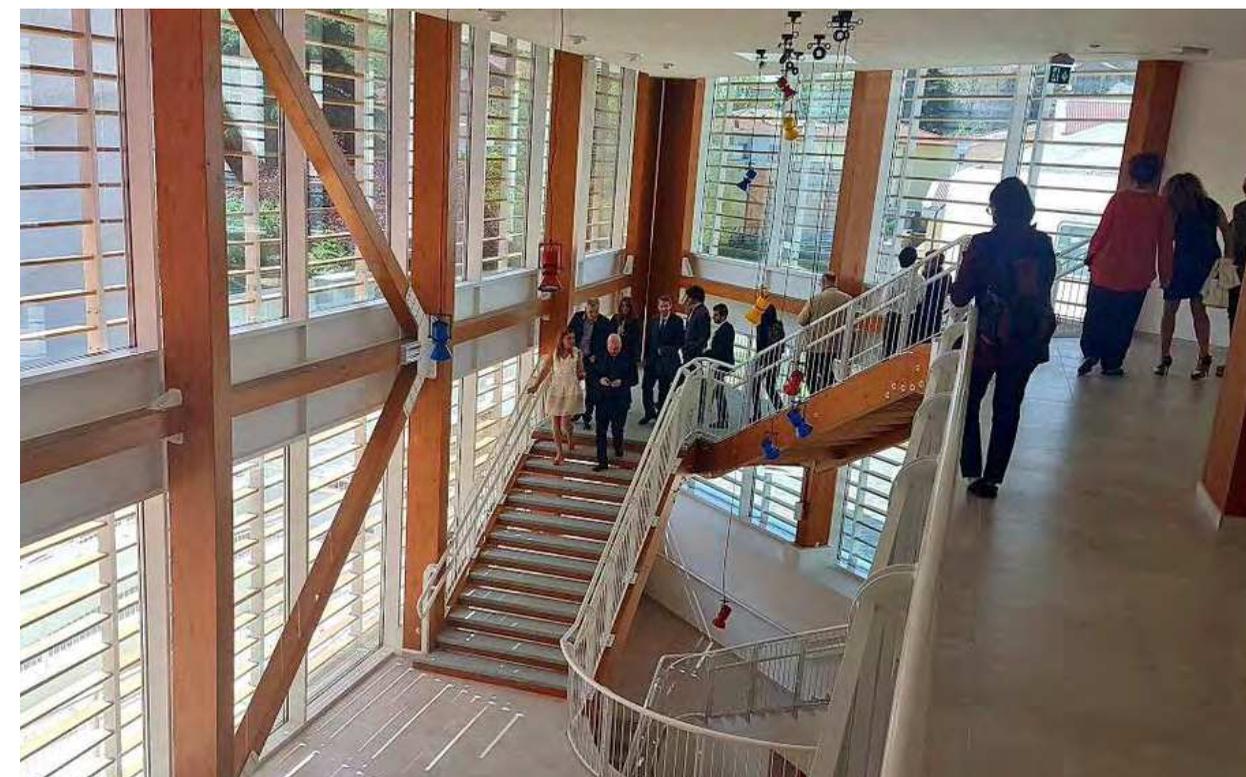
© <https://www.parmapress24.it/2017/04/03/polo-scolastico-collecchio-primo-protocollo-passivhaus-inaugurazione-bonaccini/>



^ Figura 2.24

Lo sporto della copertura per il controllo della radiazione solare

© <https://www.italiachecambia.org/2018/01/scuola-passivhaus-bioedilizia-favorisce-concentrazione-studenti/>



[17] <https://www.impresediinews.it/10-scuole-da-copiare-esempi-virtuosi-di-edilizia-sostenibile-e-antisismica/>

2.3.5. SCUOLA DELL'INFANZIA BIOECOLOGICA A PONTICELLI (BOLOGNA)

L'edificio, la cui realizzazione è stata ultimata nel 2008 su progetto dello studio Ecoarch, è un sistema ad elevato rendimento energetico ed è costituito da una struttura in legno abbinata a setti in calcestruzzo (utilizzati anche come sistema di accumulo termico) fortemente coibentata.

È dotato di un sistema di gestione automatizzato che, in base alle condizioni climatiche, regola il recupero di calore dalla vetrata a doppia pelle, la qualità dell'aria, il raffrescamento notturno e l'illuminazione mediante veneziane che provvedono automaticamente al controllo dell'illuminazione a seconda delle esigenze [Figura 2.25]. La qualità dell'aria è garantita da un sistema di ventilazione meccanica: l'aria pulita viene prelevata dall'esterno attraverso le vetrate a doppia pelle, mentre l'aria esausta viene espulsa attraverso i camini solari che svettano al di sopra dell'edificio¹⁵ [Figure 2.26-2.27].

/ Impresa/progettista: studio Ecoarch

/ Anno fine lavori: 2008



▲ Figura 2.26

I camini solari per il controllo della qualità dell'aria indoor
© <https://studioecoarch.it/progetti/progetto-architettura-scuola-infanzia-ponticelli-bologna/>

◀ Figura 2.27

Vista d'insieme dell'intervento
© <https://studioecoarch.it/progetti/progetto-architettura-scuola-infanzia-ponticelli-bologna/>



[15] DOMENICO PEPE, *Scuole ecocompatibili: dal nido per l'infanzia all'istituto superiore*, Roma, DeI editore, 2009.

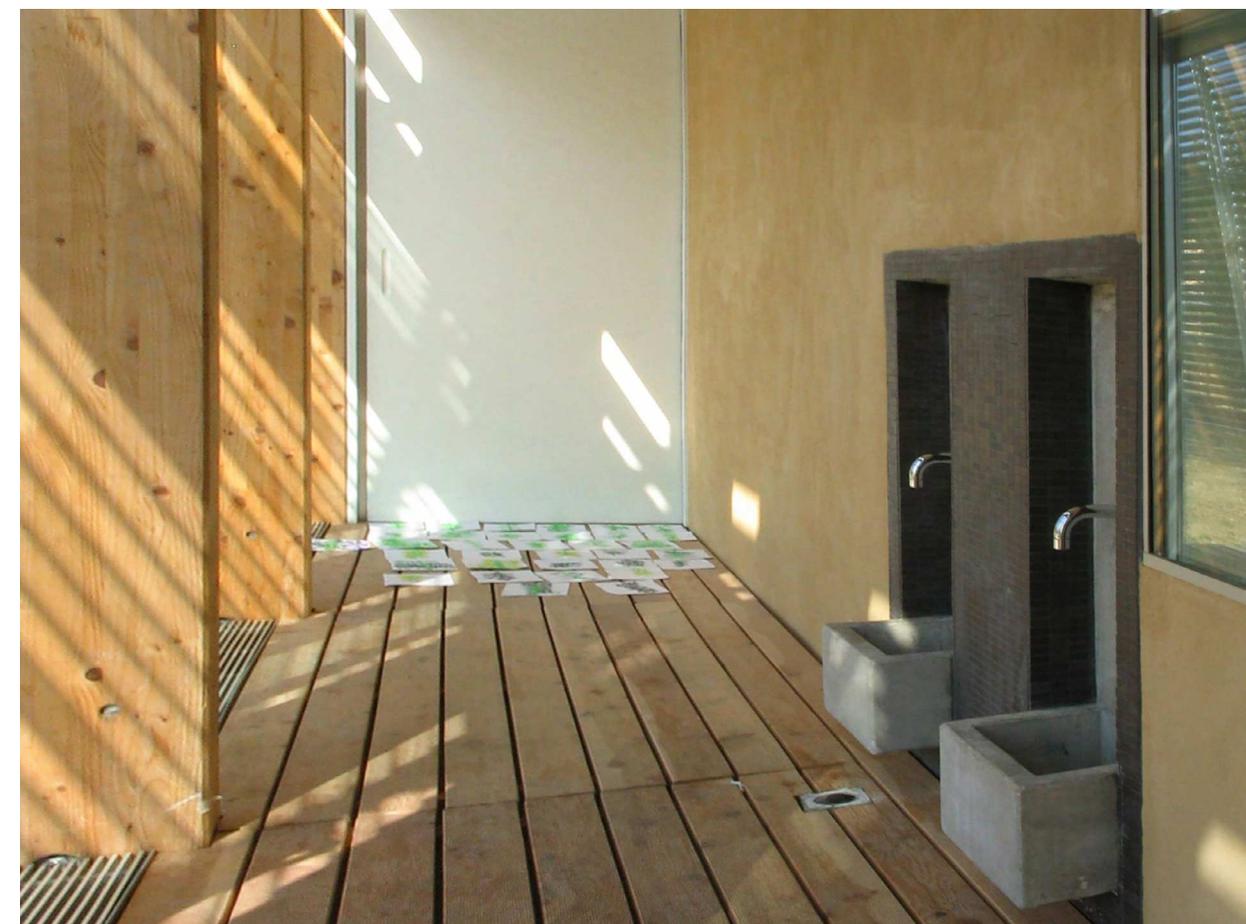
➤ Figura 2.25

Le veneziane a libro automatizzate per la regolazione della luce
© <https://studioecoarch.it/progetti/progetto-architettura-scuola-infanzia-ponticelli-bologna/>



▼ Figura 2.28

Gli spazi esterni coperti
© <https://studioecoarch.it/progetti/progetto-architettura-scuola-infanzia-ponticelli-bologna/>



2.3.6. SCUOLA DELL'INFANZIA MARIA MONTESSORI A CASCINA (PISA)

L'edificio, la cui costruzione è stata ultimata nel 2013 su progetto dello studio Colucci&Partners, ha ottenuto la certificazione Casa Clima A, garantendo dunque un consumo energetico quasi pari a zero. La scuola è dotata di collettori solari per la produzione di acqua calda sanitaria, di pannelli fotovoltaici per coprire il fabbisogno di energia elettrica, nonché di un impianto di ricambio d'aria con recuperatore di calore che estrae l'aria viziata e immette l'aria esterna in ambiente. L'edificio è altresì dotato di un impianto microeolico che contribuisce insieme a quello fotovoltaico alla produzione di energia elettrica.

La parte strutturale è realizzata totalmente in legno di abete seguendo il sistema costruttivo X-Lam, utilizzando dunque materiali biodegradabili, ecocompatibili e facili da disassemblare. Un attento studio è stato fatto sull'illuminazione naturale degli ambienti interni: le ampie vetrate consentono alla luce di permeare tutti gli ambienti in modo uniforme, ciò è anche consentito grazie al cortile interno con aperture a tutta altezza [Figura 2.29]. La regolazione della luce naturale viene effettuata tramite veneziane esterne con lamelle automatizzate, orientabili e impacchettabili [Figura 2.30]; i profondi sguinci esterni in legno di abete consentono inoltre di schermare la radiazione solare nei mesi più caldi¹⁸ [Figura 2.31].

/ Impresa/progettista: studio Colucci&Partners

/ Anno fine lavori: 2013

> Figura 2.30

Le veneziane esterne automatizzate e impacchettabili
© <http://www.colucciandpartners.it/portfolio/scuola-dinfanzia-di-cascina-pisa/>

∨ Figura 2.31

Gli sguinci in legno per il controllo della radiazione solare
© <http://www.colucciandpartners.it/portfolio/scuola-dinfanzia-di-cascina-pisa/>



∨ Figura 2.29

Il cortile interno con vetrate a tutt'altezza

© <https://www.archilovers.com/projects/136372/nuova-scuola-dellinfanzia-di-cascina.html>



[18] <http://www.colucciandpartners.it/portfolio/scuola-dinfanzia-di-cascina-pisa/>

2.3.7. POLO SCOLASTICO CARLO URBANI A MOIE DI MAIOLATI SPONTINI (ANCONA)

Il progetto è l'esito di un concorso di progettazione indetto nel 2006 dal Comune di Maiolati Spontini, l'intervento interessa un'area di 21.000 m², in cui trovano posto una scuola primaria e una scuola secondaria di primo grado. Il progetto si confronta con le ultime normative mirate al risparmio energetico ed utilizza tecnologie costruttive ed impiantistiche che interagiscono con le condizioni climatiche esterne. Le pareti esterne sono rivestite con un sistema a cappotto in materiale naturale (fibra di legno), che garantisce l'isolamento termico e la corretta diffusione del vapore. L'introduzione di sistemi di schermatura in alluminio orientabili e con movimentazione elettrica consente di regolare il flusso luminoso entrante e di mantenere un elevato comfort visivo in qualsiasi condizione atmosferica [Figura 2.32]. I giardini verdi in copertura minimizzano l'impatto visivo degli edifici ed attenuano le prestazioni termiche dell'involucro [Figura 2.33]. Le tende esterne colorate impreziosiscono gli spazi interni distributivi, connotandoli e caratterizzandoli con sfumature e giochi cromatici suggestivi [Figure 2.34]. Tra le scelte tecnologiche messe in campo a garanzia di un'alta efficienza energetica, vanno ricordati l'installazione in copertura di un impianto fotovoltaico e la realizzazione di un sistema di raccolta e recupero delle acque piovane, utilizzate per l'irrigazione delle aree verdi¹⁵.

/ Impresa/progettista: Petrini Solustri and Partners

/ Anno fine lavori: 2018

▼ Figura 2.33

Vista a volo d'uccello - I giardini verdi in copertura

© http://www.petrinisolustriandpartners.it/sito/index.php?option=com_content&view=article&id=72&Itemid=197



▼ Figura 2.32

Le veneziane esterne impacchettabili con lamelle orientabili

© http://www.petrinisolustriandpartners.it/sito/index.php?option=com_content&view=article&id=72&Itemid=197



▼ Figura 2.35

Vista d'insieme del polo scolastico

© http://www.petrinisolustriandpartners.it/sito/index.php?option=com_content&view=article&id=72&Itemid=197



▲ Figura 2.36

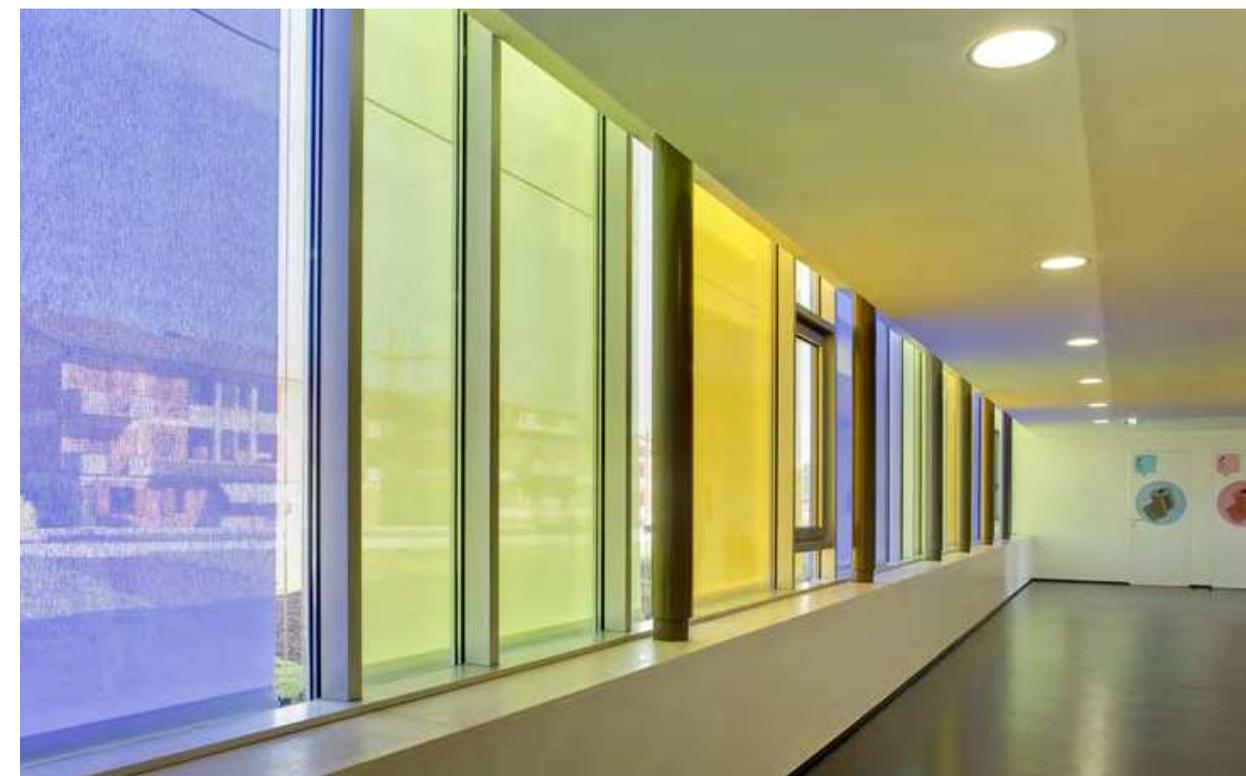
Le tende colorate automatizzate per la regolazione della luce

© <https://www.archilovers.com/projects/124274/nuovo-polo-scolastico.html>

▼ Figura 2.34

I corridoi distributivi - Le tende esterne connotano l'ambiente interno con giochi di luce cromatici e suggestivi

© http://www.petrinisolustriandpartners.it/sito/index.php?option=com_content&view=article&id=72&Itemid=197



[15] DOMENICO PEPE, *Scuole ecocompatibili: dal nido per l'infanzia all'istituto superiore*, Roma, DeI editore, 2009.

2.3.8. SCUOLA ELEMENTARE A. VIVENZA AD AVEZZANO (AQUILA)

L'edificio è stato recentemente ristrutturato in seguito alle ingenti scosse sismiche che hanno interessato l'Italia centrale nello scorso decennio. Grazie ad una particolare attenzione da parte del progettista rivolta al risparmio energetico, la scuola ha ottenuto nell'aprile del 2017 la certificazione CasaClima A.

Gli ambienti della nuova scuola sono ariosi e luminosi, caratterizzati dal verde tenue dei materiali e dal legno dei soffitti.

L'edificio è dotato di un impianto di riscaldamento a pavimento; le pareti scorrevoli consentono inoltre di gestire gli spazi più ampi in maniera fluida e funzionale. La nuova struttura della Vivenza è stata pensata e costruita nel rispetto delle norme antisismiche e ponendo una particolare attenzione all'ambiente, in particolare in merito ai consumi energetici e ai materiali impiegati.

L'esposizione favorevole a sud-est garantisce un buon livello di illuminazione naturale in tutte le aule della scuola [Figura 2.37]; le veneziane esterne in alluminio, con lamelle regolabili e impacchettabili, consentono la regolazione della luce e della radiazione solare a seconda delle esigenze nelle varie stagioni dell'anno [Figure 2.38-2.39].

/Impresa/progettista: Arch. Nicola Guglielmi

/Anno fine lavori: 2017

Figura 2.37

Pianta piano rialzato

© http://www.nicolaguglielmi.it/progetti_detail.php?id=142

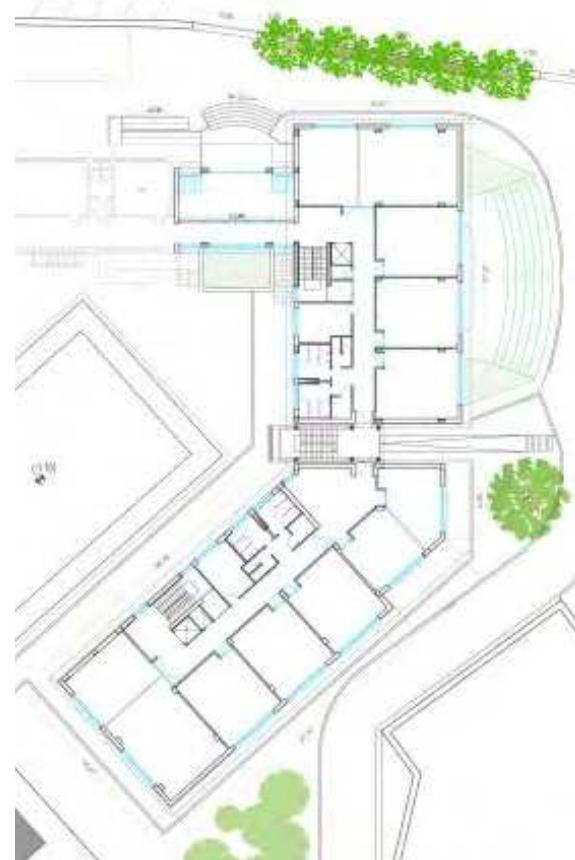


Figura 2.40

Vista a volo d'uccello della scuola

© http://www.nicolaguglielmi.it/progetti_detail.php?id=142



Figura 2.38

Le veneziane automatizzate per la regolazione della luce

© <https://www.ic3avezzano.edu.it/project/la-nostra-scuola/>

Figura 2.39

Vista d'insieme dell'intervento

© http://www.nicolaguglielmi.it/progetti_detail.php?id=142



[19] <http://www.nicolaguglielmi.it/index.php>

[20] <https://www.agenziacasaclima.it/it/scuola-media-avivenza--16-6416.html>

2.3.9. SCUOLA ELEMENTARE DON FILIPPO RINALDI A ROMA

La Scuola è stata demolita e ricostruita nel 2008; il progetto, redatto dallo studio Mars Architetti, è stato realizzato rispondendo ad esigenze di sostenibilità ambientale attraverso sistemi passivi e attivi di risparmio energetico. Durante i mesi caldi l'assetto dell'edificio consente il massimo sfruttamento delle fonti di raffrescamento e la protezione dai raggi solari; ciò è reso possibile dall'ampio sporto del pergolato in legno che è stato opportunamente dimensionato secondo le carte solari del sito [Figura 2.42-2.43].

Nei mesi invernali, al contrario, l'assetto dell'edificio è volto a ridurre le dispersioni termiche e consente alla radiazione solare di penetrare attraverso le pareti vetrate.

L'edificio è inoltre dotato di pannelli solari posti in copertura per soddisfare il fabbisogno di acqua calda sanitaria²¹.

Figura 2.41

Particolare dell'involucro e dei serramenti in alluminio
© <https://www.archilovers.com/projects/15035/scuola-elementare-don-filippo-rinaldi.html>



[21] https://www.edilportale.com/aziende/mars-architetti_117723.html

/ Impresa/progettista: studio Mars Architetti

/ Anno fine lavori: 2008

Figura 2.42

Vista d'insieme del fronte sud
© <https://www.archilovers.com/projects/15035/scuola-elementare-don-filippo-rinaldi.html>

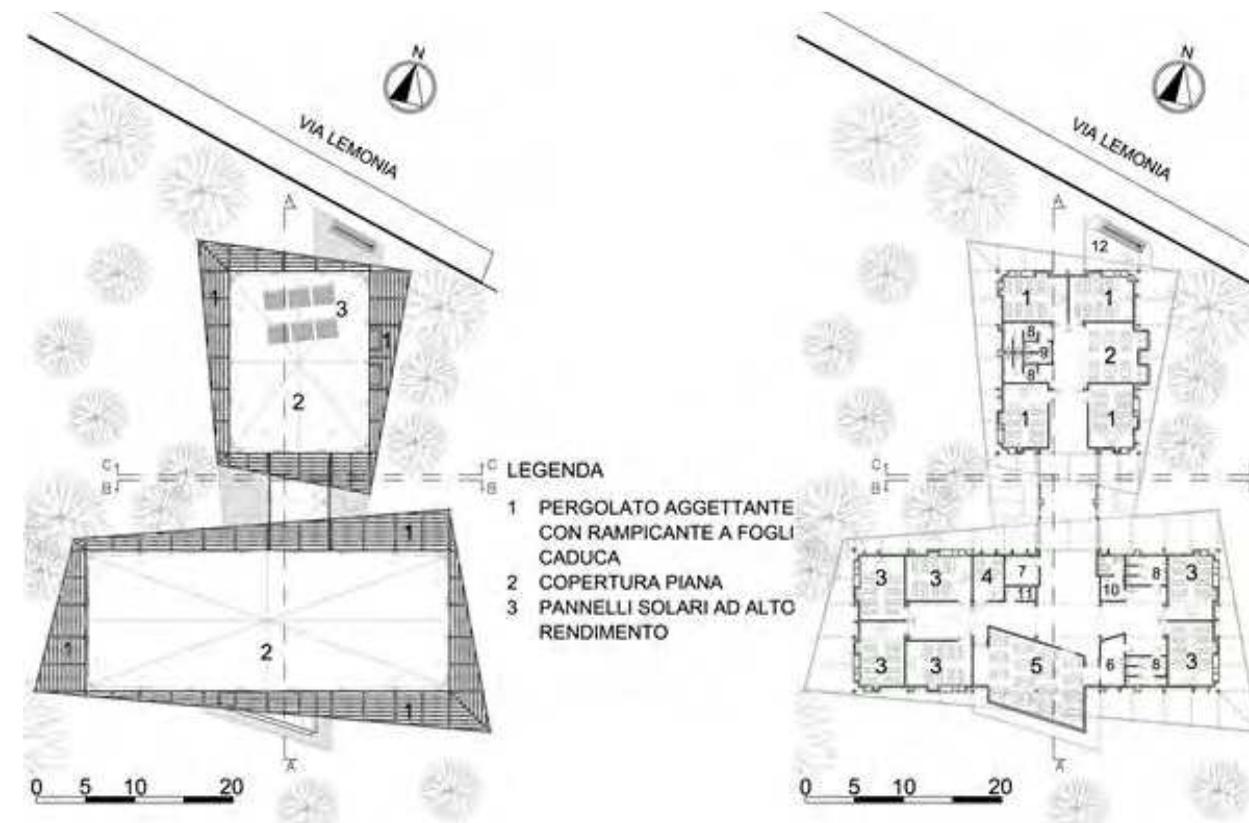
Figura 2.43

Il pergolato aggettante per la protezione dalla radiazione estiva
© <https://www.archilovers.com/projects/15035/scuola-elementare-don-filippo-rinaldi.html>



Figura 2.44

Planimetria generale dell'intervento
© <https://www.archilovers.com/projects/15035/scuola-elementare-don-filippo-rinaldi.html>



2.3.10. SCUOLA DELL'INFANZIA SANDRO PERTINI A BISCEGLIE (BT)

Il progetto, redatto dall'architetto Luca Peralta, è stato premiato nel 2017 da Legambiente quale esempio virtuoso di architettura scolastica, in occasione del secondo forum sull'edilizia scolastica tenutosi a Roma. L'innovativo impianto planimetrico della scuola è caratterizzato da uno schema che alterna spazi didattici e distributivi definiti da muri paralleli [Figura 2.45]. Un corridoio anulare definisce l'ingresso principale e abbraccia la corte interna, collegando tutte le funzioni interne ed esterne. [Figura 2.46]

A rafforzare la spiccata sensibilità ambientale del progetto, si è previsto un uso massiccio di materiali sostenibili e di sistemi passivi che consentono di ridurre il fabbisogno energetico. Tra questi bisogna sicuramente citare: il corretto orientamento dell'edificio e dei singoli ambienti per massimizzare gli apporti interni, la peculiare forma dell'edificio, la presenza della corte aperta centrale che favorisce l'illuminazione e la ventilazione²² [Figura 2.47-2.48].



/ Impresa/progettista: Arch. Luca Peralta

/ Anno fine lavori: 2017

Figura 2.45

Planimetria generale dell'intervento

© https://www.theplan.it/attachments/2_Pianta.jpg

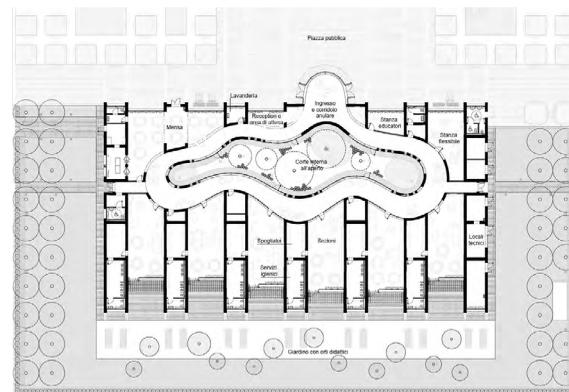


Figura 2.49

Vista dall'alto del fronte nord

© <https://i.ytimg.com/vi/dSjx7HTtqQ0/maxresdefault.jpg>



Figura 2.50

Vista dall'alto del fronte sud

© https://www.theplan.it/attachments/Bird_eye_view_of_the_South_side.jpg

Figura 2.46

Il corridoio anulare come elemento di cerniera tra i vari ambienti
© https://www.theplan.it/attachments/The_safety_decorations_with_didactic.jpg



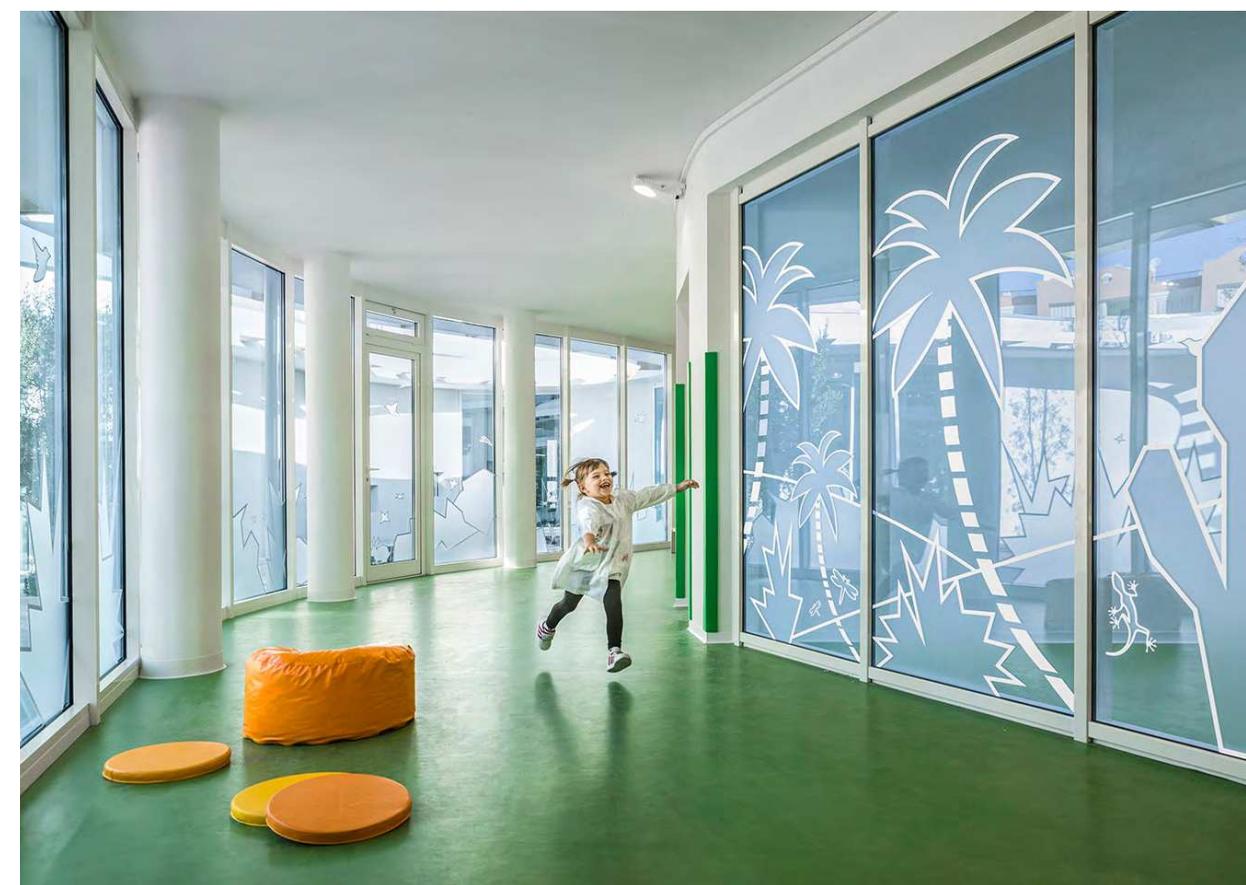
Figura 2.47

Il cortile centrale: uno spazio ricreativo e di condivisione sociale
© <https://www.ediliziascolastica.it/progetti/scuola-materna-sandro-pertini-bisceglie/>



Figura 2.48

Vista dal cortile centrale: il contatto con il mondo esterno
© <https://www.ediliziascolastica.it/progetti/scuola-materna-sandro-pertini-bisceglie/>



^[22] <https://www.ediliziascolastica.it/progetti/scuola-materna-sandro-pertini-bisceglie/>

2.3.11. SCUOLA MATERNA ARISTIDE GABELLI AD ANDRIA

Su progetto dell'architetto Giuseppe Cimmino, la scuola materna di Andria è stata selezionata da Legambiente come uno dei 10 esempi virtuosi di edilizia scolastica realizzati negli ultimi 20 anni.

L'involucro è caratterizzato da pareti vetrate opportunamente schermate da una struttura metallica esterna, che assolve la duplice funzione di schermare la radiazione solare e allo stesso tempo di "privatizzare" l'edificio, garantendo la sicurezza e la privacy dei bambini [Figura 2.51-2.52].

Negli spazi esterni sono stati realizzati degli orti collettivi pensati appositamente per i bambini, al fine di stimolarne l'integrazione sociale e di mantenere un contatto diretto con la natura e con il mondo esterno²³ [Figura 2.53].

Figura 2.51

Vista d'insieme della scuola dal viale alberato

© <https://www.archilovers.com/projects/122038/asilo-nido-comunale.html>



²³ <https://andria.news24.city/2017/10/14/scuola-innova-lasilo-nido-gabelli-gli-istituti-ecosostenibili-ditalia/>

/ Impresa/progettista: Arch. Giuseppe Cimmino

/ Anno fine lavori: 2012

Figura 2.53

Gli orti collettivi: il contatto diretto con la natura

© <https://www.archilovers.com/projects/122038/asilo-nido-comunale.html>



Figura 2.52

La rete metallica esterna per il controllo della radiazione solare

© <https://www.archilovers.com/projects/122038/asilo-nido-comunale.html>

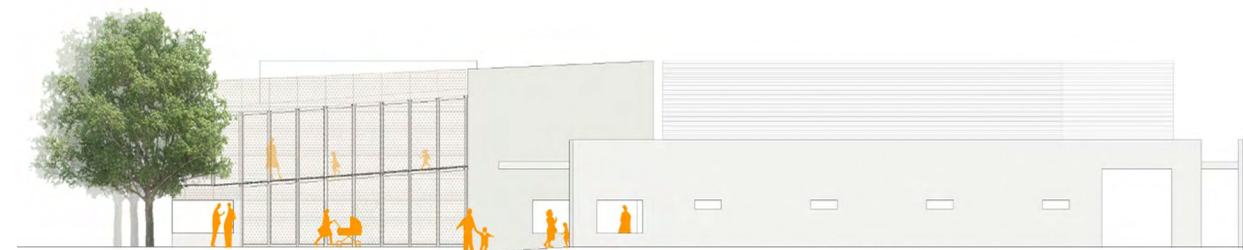
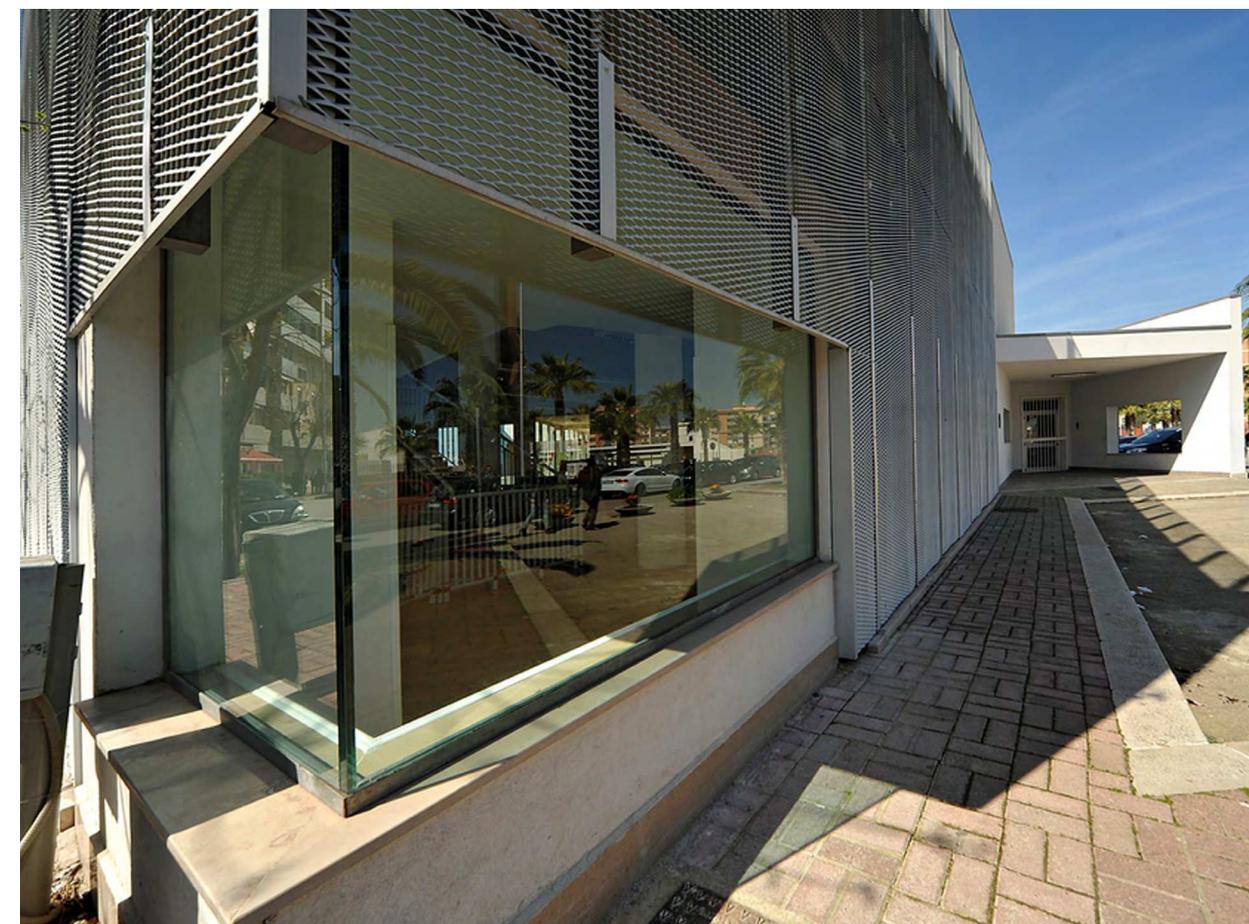


Figura 2.54

Prospetto principale

© <https://www.archilovers.com/projects/122038/asilo-nido-comunale.html>



2.3.12. SCUOLA DELL'INFANZIA A FAIANO (SALERNO)

Il nuovo edificio, finito di costruire nel 2018, è stato progettato dall'architetto Angelo Verderosa, distinguendosi in particolare per le innovazioni tecnologiche impiegate e per l'attenzione rivolta al risparmio energetico.

Dalle ampie aperture della nuova scuola si intravedono il mare, la montagna, l'orto e la vecchia scuola. L'orientamento, l'interazione dell'architettura col paesaggio circostante, il percorso solare dall'alba al tramonto, rappresentano essi stessi degli spunti di apprendimento che il bambino inizia a cogliere già dai primi anni d'infanzia.

Per massimizzare l'ingresso della luce naturale e favorire al tempo stesso l'integrazione sociale, sono stati realizzati dei grandi oblò che collegano tra loro le varie aule, permettendo ai bambini di esplorare e curiosare al di fuori della propria aula [Figura 2.55].

Le ampie vetrate consentono l'ingresso di un'elevata quantità di luce naturale all'interno degli ambienti [Figura 2.56]; la sua regolazione avviene tramite tende esterne a rullo, con colorazioni diverse al fine di integrarsi al meglio con l'architettura.

Lo sporto del tetto consente inoltre di schermare la radiazione solare diretta durante i mesi caldi, al fine di evitare il surriscaldamento eccessivo degli ambienti interni [Figura 2.57].

L'edificio dispone inoltre di un impianto fotovoltaico (posto sulla copertura) e di pannelli solari per la produzione di acqua calda sanitaria¹⁵⁻²⁴.

/Impresa/progettista: Arch. Angelo Verderosa

/Anno fine lavori: 2018

Figura 2.58

Vista del fronte ovest

© https://www.verderosa.it/portfolio_page/scuola-dellinfanzia-a-faiano/



Figura 2.59

Vista dall'alto della scuola

© <https://i.ytimg.com/vi/Qn217NtZm-s/maxresdefault.jpg>



[24] https://www.verderosa.it/portfolio_page/scuola-dellinfanzia-a-faiano/

Figura 2.56

Vista interna di un'aula

© https://www.verderosa.it/portfolio_page/scuola-dellinfanzia-a-faiano/



Figura 2.55

Gli oblò come elementi di cerniera tra le aule

© https://www.verderosa.it/portfolio_page/scuola-dellinfanzia-a-faiano/

Figura 2.57

Lo sporto del tetto e le tende esterne garantiscono il controllo della luce e della radiazione termica

© https://issuu.com/verderosastudio/docs/faiano___brochure



[15] DOMENICO PEPE, *Scuole ecocompatibili: dal nido per l'infanzia all'istituto superiore*, Roma, DeI editore, 2009.

PARTE II



Nel seguente capitolo viene introdotto il tema dell'illuminazione naturale, illustrandone i caratteri salienti e i principali parametri progettuali utili a garantire un'adeguata condizione di comfort visivo negli ambienti interni, tenendo anche conto degli aspetti energetici legati alla radiazione solare diretta e all'orientamento ottimale degli edifici. Vengono inoltre approfonditi gli aspetti relativi al benessere psicofisico degli utenti, evidenziando le influenze positive che una corretta progettazione dell'illuminazione naturale può avere sull'umore e sulla produttività delle persone e degli studenti in particolare.

3 Illuminazione naturale: fondamenti, benefici e parametri progettuali

3.1. BENEFICI DELLA LUCE NATURALE

La luce naturale riveste da sempre un ruolo dominante nell'architettura; sia in termini estetici, sia funzionali. Gli effetti positivi che l'illuminazione naturale genera sull'uomo sono molteplici: oltre a garantire una generale condizione di benessere e stabilità emozionale, l'esposizione alla luce naturale genera benefici fisici e psicologici nei bambini e negli adulti, influenzando positivamente sulla loro produttività. Secondo alcuni recenti studi scientifici, chi lavora in ambienti ariosi e ben illuminati è molto più produttivo di chi, al contrario, svolge attività di studio o lavorative in ambienti cupi e privi di luce naturale.

Il risparmio energetico è un altro aspetto fondamentale di cui tener conto: il sole rappresenta una fonte di energia gratuita e inesauribile, che può contribuire in larga parte a diminuire i consumi e i costi dovuti all'illuminazione artificiale e all'impianto di climatizzazione.

Oltre a questi aspetti, la luce naturale qualifica

lo spazio e ne valorizza le proporzioni, creando una gerarchia tra i vari elementi. E' una luce "dinamica", che varia e si trasforma a seconda delle stagioni e delle ore del giorno, donando agli spazi connotazioni e configurazioni sempre diverse³⁰⁻³¹.

3.1.1. LA VISTA VERSO L'ESTERNO

La presenza di superfici finestrate, che consentono di vedere lo spazio esterno al luogo di lavoro, costituisce un elemento essenziale nella determinazione di una condizione di benessere psicofisico per gli occupanti. Ciò è attribuito ad alcuni fattori di natura psicologica: la vista verso l'esterno consente di mantenere un rapporto diretto e costante con il mondo esterno, garantendo la percezione del passare del tempo; consente di conoscere in ogni momento le condizioni meteorologiche esterne; consente di orientarsi attraverso la vista del sole e dell'orizzonte; aiuta a mantenere un contatto con il contesto sociale al di fuori

dell'ambiente, grazie ai continui stimoli ricevuti dall'esterno.

Al fine di soddisfare tali condizioni di benessere, è opportuno che la vista dalla finestra contenga tutte e tre le fasce che generalmente la compongono: la fascia superiore, legata alla vista del cielo; la fascia intermedia, corrispondente alla vista dell'orizzonte o di scenari urbani e/o naturali; la fascia inferiore, comprendente persone o oggetti in primo piano. L'assenza di una o più fasce visibili può alterare e ridurre la condizione di benessere percepita dall'utente. Sebbene sia stato riscontrato un effettivo miglioramento della produttività dovuto alla vista verso l'esterno, tale condizione non può essere generalizzata per tutti gli utenti: il rapporto tra la luce naturale e gli stati cognitivi dell'uomo è infatti piuttosto complesso e varia a seconda dei soggetti³²⁻³³.

3.1.2. EFFETTI NON VISIVI DELLA LUCE:

IL RITMO CIRCADIANO

La luce – in particolare quella naturale – riveste un ruolo fondamentale nella regolazione dell'orologio biologico e nell'alternarsi del sonno e della veglia.

Per ritmo circadiano si intende una sorta di "orologio" endogeno che provvede alla regolarizzazione dei ritmi giornalieri dell'organismo, in relazione al ciclo naturale del giorno e della notte [Figura 3.1]. In tal senso, la luce naturale rappresenta il principale strumento di regolarizzazione dei ritmi sonno-veglia, insieme ad altri fattori di natura sociale e alla variazione della temperatura interna.

L'esposizione alla luce, sia naturale che artificiale, controlla e monitora la corretta secrezione della melatonina, meglio conosciuta come "ormone del sonno". Nello specifico, la presenza di luce contribuisce alla sua soppressione e inibizione, garantendo migliori livelli di concentrazione e influenzando positivamente sulla produttività dei bambini durante le attività scolastiche. Per contro, un'eccessiva esposizione alla luce artificiale durante le ore serali ostacola la secrezione di melatonina, provocando insofferenza e disturbi del sonno [Figura 3.2]. In definitiva, un'adeguata esposizione alla luce naturale nell'arco di una giornata, a differenza di quanto avviene per quella artificiale, permette una regolazione ottimale dei livelli di melatonina in relazione ai ritmi sonno-veglia; avendo effetti benefici sulla salute, sull'umore e sul rendimento durante le ore lavorative³²⁻³⁴.

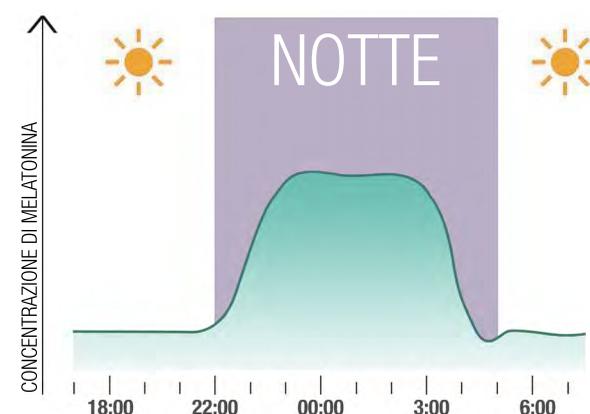


Figura 3.2

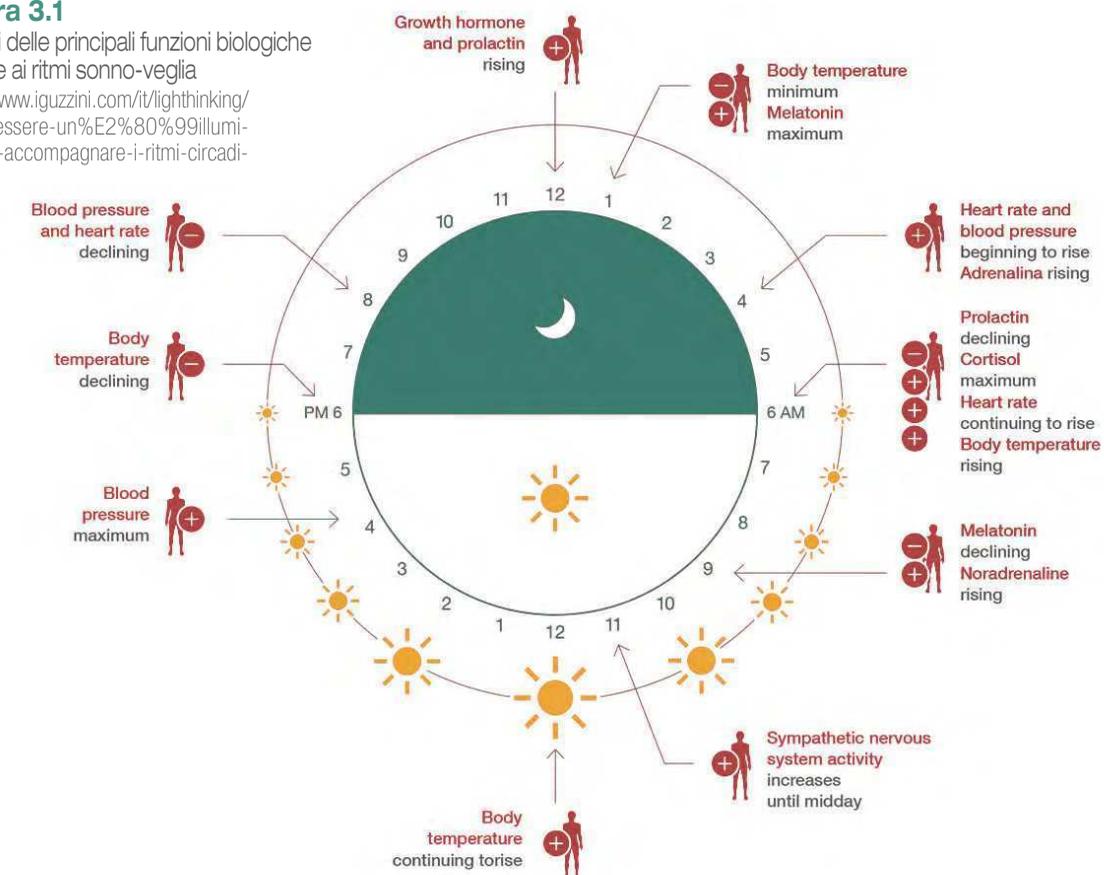
Variazione dei livelli di melatonina nell'arco di un giorno
© Rielaborazione grafica dell'autore sulla base dei dati presenti su <https://www.vitabasix.com/wp-content/uploads/2017/03/Melachron-2018-ig-IT.jpg>

[30] CHIARA AGHEMO, VALERIO LO VERSO, *Guida alla progettazione dell'illuminazione naturale*, AIDI, 2003.

Figura 3.1

L'alternarsi delle principali funzioni biologiche in relazione ai ritmi sonno-veglia

© <https://www.iguzzini.com/it/lightthinking/luce-e-benessere-un%E2%80%99illuminazione-per-accompagnare-i-ritmi-circadiani/>



3.2. LE SORGENTI DI LUCE NATURALE: IL SOLE E LA VOLTA CELESTE

La luce naturale rappresenta l'effetto che l'emissione visibile del sole ha sull'occhio umano. Il sole è una fonte di energia gratuita che emette un'elevatissima quantità di energia con lunghezze d'onda comprese tra 0.2 e 3 μm . Di tale energia, solo una piccola parte viene percepita dall'occhio umano come luce, corrispondente ad un intervallo di lunghezze d'onda compreso tra 380 e 780 nm.

Tale intervallo, definito come "spettro visibile",

[31] NICK BAKER, KOEN STEEMERS, *Daylight design of buildings*, New York, Earthscan, 2017.

comprende tutti i colori percepibili dall'uomo – variabili dal rosso al violetto – che insieme danno vita al fenomeno della luce.

Oltre alla luce del Sole, che rappresenta la "componente diretta", esiste anche una "componente diffusa" della luce naturale, che viene comunemente identificata come luce del cielo. La luce del cielo non è altro che il risultato della riflessione dei raggi luminosi sulla superficie terrestre e del loro assorbimento da parte dei gas costituenti l'atmosfera.

La luce del sole e quella della volta celeste sono entrambe di primaria importanza per la

[32] PETER TREGENZA, MICHAEL WILSON, *DAYLIGHTING Architecture and lighting design*, Abingdon, Routledge, 2011.

quantità e la qualità dell'illuminazione degli ambienti interni, in quanto presentano caratteristiche e connotazioni differenti.

La luce del sole è caratterizzata da una temperatura di colore correlata di circa 5500 K, più calda rispetto a quella della volta celeste. Essendo un tipo di luce fortemente concentrata e direzionale, essa può portare a contrasti molto marcati e sbalzi di luminanza eccessivi che possono provocare disturbi alla visione, incorrendo in fenomeni di abbagliamento e discomfort visivo. Oltre ad essere una fonte di luce, il sole è anche una potente fonte di energia, che può contribuire in larga parte al riscaldamento degli edifici durante i mesi invernali. Per tali motivi, è opportuno prevedere dei sistemi di oscuramento e schermatura solare volti a limitare eventuali problemi di abbagliamento e un surriscaldamento eccessivo degli ambienti durante i mesi più caldi. La luce del cielo, al contrario, è contraddistinta da una temperatura di colore di circa 6500 K (con una tonalità di colore tendente all'azzurro) e una luminanza molto più contenuta, con contrasti meno marcati e un aspetto molto più uniforme.

Una percezione ottimale degli spazi risulta essere legata alla presenza di fonti di luce con intensità e direzionalità differenti; tale condizione si verifica quando viene assicurata la presenza di luce diretta e diffusa.

Inoltre, la quantità di luce naturale che penetra all'interno degli ambienti sembra dipendere fortemente dalle condizioni atmosferiche e meteorologiche del cielo, in particolare dal suo grado di nuvolosità e torbidità (presenza di aerosol nell'atmosfera a causa dell'inquina-

mento), influenzando in modi differenti la componente diretta e quella diffusa: in condizioni di cielo sereno la componente diretta prevale su quella diffusa; al contrario, in condizione di cielo torbido o nuvoloso, la componente diffusa è preponderante rispetto a quella diretta, in quanto aumenta la quota parte di radiazione assorbita e rifratta³⁰⁻³².

3.3. PERCORSO SOLARE E ORIENTAMENTO OTTIMALE DEGLI EDIFICI

In un'ottica di risparmio energetico e di massimizzazione dell'esposizione alla luce naturale, l'orientamento riveste un ruolo fondamentale nella progettazione di un edificio, divenendo uno dei principi chiave dell'architettura bioclimatica.

In relazione al percorso solare - che varia a seconda del sito (latitudine e longitudine), delle stagioni e delle ore del giorno - bisogna prevedere, sin dalle prime fasi progettuali, l'orientamento ottimale dell'edificio a seconda della sua futura destinazione d'uso.

Uno strumento utile a determinare la posizione del sole in ogni periodo dell'anno è la carta solare, che rappresenta la proiezione su una superficie bidimensionale delle orbite compiute dal sole. In tale carta, la cui costruzione varia a seconda della latitudine specifica del sito, i cerchi concentrici rappresentano le varie altezze solari (che variano da 90° a 0° con un intervallo di 10°), mentre i raggi rappresentano le linee di uguale azimut.

Le carte solari mostrano in maniera immediata come varia il percorso solare a seconda delle

[33] Materiale didattico: ANNA PELLEGRINO, "Il progetto della luce naturale", Laboratorio disciplinare di progettazione fisico tecnica dell'edificio, a.a. 2018/2019, Politecnico di Torino.

diverse latitudini del sito [Figure 3.3-3.4].

Risulta evidente inoltre come l'esposizione a sud sia quella maggiormente esposta ai raggi del sole, mentre l'esposizione a nord è totalmente priva di radiazione solare diretta, caratterizzata da una luce diffusa e uniforme in tutte le ore del giorno; situazioni intermedie si riscontrano invece nelle esposizioni ad est e ad ovest, dove si può godere della radiazione diretta rispettivamente al mattino e nel tardo pomeriggio.

L'altezza solare rappresenta indubbiamente il parametro più importante per la progettazione di un edificio in relazione al suo orientamento [Figure 3.5]. Nelle esposizioni a sud, il sole è caratterizzato da un'altezza solare maggiore e un'elevata potenza radiante nelle stagioni più calde, con una conseguente riduzione dei fenomeni di abbagliamento e maggiori problematiche legate al surriscaldamento degli ambienti; sarebbe opportuno dunque prevedere dei sistemi di ombreggiamento volti a schermare la radiazione solare diretta, in modo particolare per quegli edifici che non dispongono di un impianto di climatizzazione per il raffrescamento estivo. Nei mesi più freddi, al contrario, si ha un'altezza solare minore (alto rischio di abbagliamento) e una bassa potenza radiante del sole; occorre dunque prevedere dei sistemi di schermatura volti a risolvere eventuali problemi di abbagliamento e che consentano allo stesso tempo la penetrazione dell'energia termica.

Nelle esposizioni ad est e ad ovest, invece, il sole è sempre caratterizzato da altezze solari minime, con elevati rischi di abbagliamento in

[35] GIUSEPPINA ALCAMO, MARCO SALA, *illuminazione naturale e simulazioni energetiche*, Firenze, Alinea editrice, 2007.

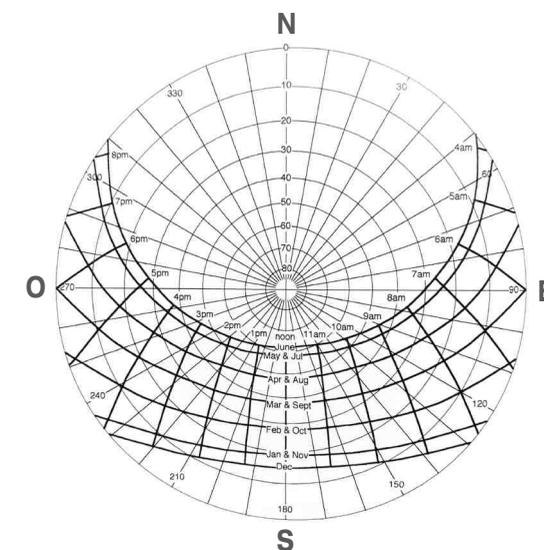


Figura 3.3

Carta solare - Latitudine 51°

© PETER TREGENZA, MICHAEL WILSON, DAYLIGHTING Architecture and lighting design, Abingdon, Routledge, 2011

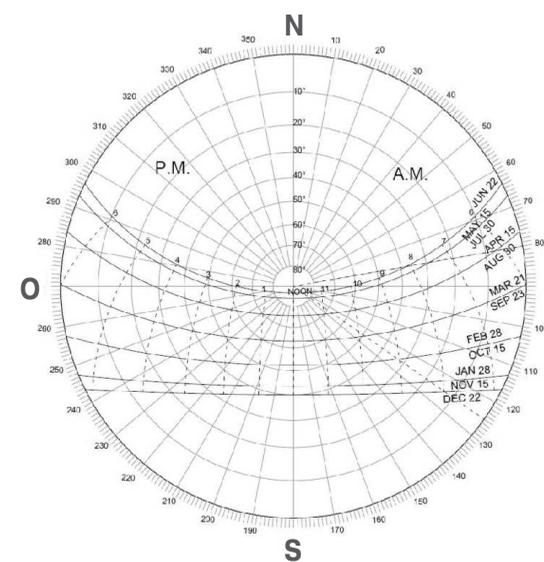


Figura 3.4

Carta solare - Latitudine 27°

© https://www.researchgate.net/figure/Sun-path-diagram-of-Luc-know_fig1_321037119

[34] SHOUB MA'UDEH BARAA AL-KHATATEBH, *Daylighting retrofit methods as a tool for enhancing daylight provision in existing educational spaces - A Case Study*, Buildings 2019, Volume 9 (7).

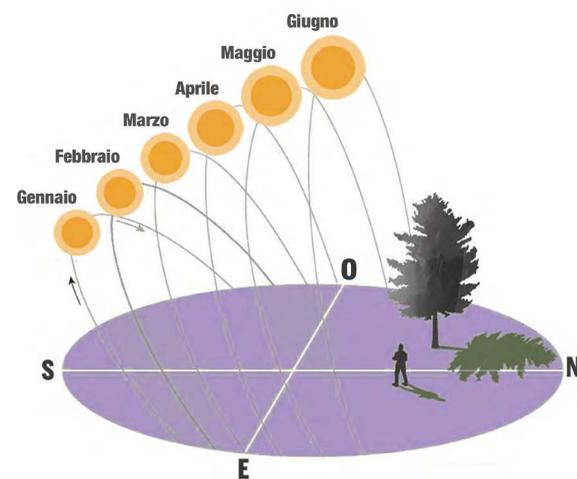
ambidue i casi; è indispensabile dunque intervenire con dei sistemi di schermatura per il controllo dell'abbagliamento.

Oltre a questi aspetti, bisogna anche tener conto della zona climatica o dell'orografia del sito: nelle zone alpine, caratterizzate da temperature piuttosto basse anche in estate, può non essere necessario ricorrere a dei sistemi per il controllo della radiazione termica, al contrario bisogna favorirne l'ingresso per garantire degli apporti energetici gratuiti durante i mesi più freddi; tuttavia, la presenza di rilievi montuosi, può ostacolare in modo marcato la presenza di radiazione solare diretta⁴¹.

Appare dunque evidente come l'approccio alla progettazione in relazione all'orientamento sia

Figura 3.5

Variazione dell'altezza solare a seconda delle stagioni
© Elaborazione grafica dell'autore



tutt'altro che semplice, in quanto i parametri che entrano in gioco sono molteplici e spesso contrastanti tra loro; sta al progettista trovare il giusto compromesso tra le varie alternative possibili, con l'obiettivo ultimo di favorire il risparmio energetico e la disponibilità di luce naturale negli ambienti interni³²⁻³⁵.

3.4. MODALITÀ DI PENETRAZIONE DELLA LUCE

Se l'orientamento rappresenta un parametro fondamentale per la progettazione, altrettanto importante è la scelta della corretta modalità di penetrazione della luce in funzione della destinazione d'uso.

Esistono tre diverse tipologie di penetrazione della luce naturale, ognuna delle quali presenta caratteristiche peculiari e differenziate: l'illuminazione laterale o "sidelighting", attraverso le pareti verticali dell'involucro; l'illuminazione zenitale o "toplighting", attraverso il soffitto; l'illuminazione dall'interno o "corelighting", sfruttando l'illuminazione naturale degli ambienti contigui.

L'illuminazione laterale consiste nella penetrazione della luce tramite facciate trasparenti o aperture disposte lungo le pareti perimetrali dell'involucro; le aperture possono essere disposte solo da un lato (illuminazione unilaterale) o su due lati (illuminazione bilaterale). Tale tipologia presenta molti limiti, tra i quali il surriscaldamento in prossimità della finestra, la possibilità di abbagliamento e una scarsa uniformità di illuminamento per gli ambienti molto profondi (con valori molto alti vicino alle aperture e molto bassi in prossimità del lato

opposto all'apertura) [Figura 3.6].

L'illuminazione zenitale prevede l'ingresso dell'illuminazione naturale tramite lucernari e coperture trasparenti. Sebbene tale tipologia di penetrazione della luce garantisca elevati livelli di illuminamento e un buon grado di uniformità, occorre prestare attenzione all'incremento del carico termico dovuto alla radiazione solare diretta, che può influire negativamente sul raffrescamento estivo [Figura 3.7].

L'illuminazione dall'interno, invece, consiste nell'illuminare in maniera indiretta un ambiente sfruttando la luce naturale di spazi contigui molto luminosi. Tali spazi – quali gallerie vetrate, corti interne o cavedi – fungono da elementi di cerniera che permettono di illuminare locali che altrimenti sarebbero illuminati unilateralmente, garantendo migliori livelli di uniformità di illuminamento³⁰⁻³²⁻³⁶.

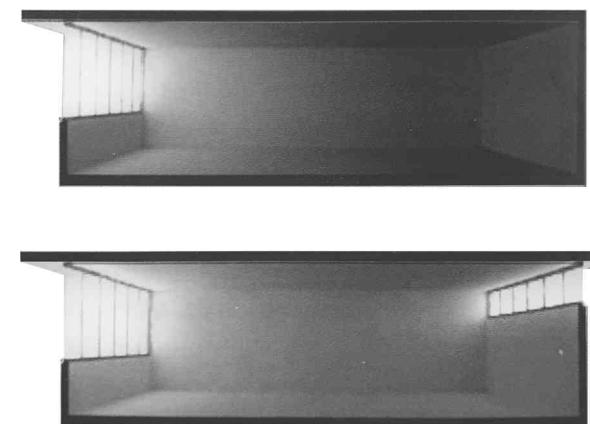


Figura 3.6

Distribuzione della luce in ambienti con illuminazione unilaterale (in alto) e bilaterale (in basso)

© CHIARA AGHEMO, VALERIO LO VERSO, Guida alla progettazione dell'illuminazione naturale, AIDI, 2003

[37] LUIGI GIOVANNINI, FABIO FAVOINO, VALERIO L.M. LO VERSO, ANNA PELLEGRINO, VALENTINA SERRA, A simplified approach for the annual and spatial evaluation of the comfort classes of daylight glare using vertical illuminances, Buildings 2018, Volume 8 (171).

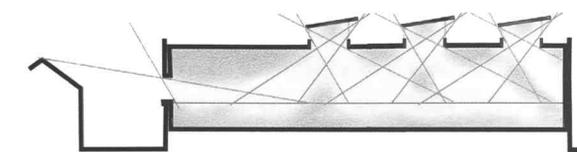


Figura 3.7

Distribuzione della luce in ambienti con illuminazione zenitale
© PETER TREGENZA, MICHAEL WILSON, DAYLIGHTING Architecture and lighting design, Abingdon, Routledge, 2011

L'illuminazione dall'interno può rappresentare un ottimo espediente per gli edifici scolastici: gli atri, i corridoi e gli spazi distributivi possono fungere da "spazi filtro" utili a migliorare le condizioni di illuminazione naturale delle aule e degli spazi per la didattica.

3.5. METODI E STRUMENTI PER IL PROGETTO DELLA LUCE NATURALE

La qualità di un progetto di illuminazione naturale viene valutata in relazione alla sua capacità di rispondere ad un complesso insieme di esigenze, che fanno riferimento a svariati ambiti. Il progetto deve in primo luogo soddisfare le esigenze degli utenti, garantendo condizioni di benessere e livelli di luce adeguati in relazione al compito visivo che si deve svolgere; in seconda istanza, deve essere volto al risparmio energetico, attraverso il contenimento dei consumi per l'illuminazione artificiale e l'impianto di climatizzazione (riscaldamento e raffrescamento).

Oltre a questi aspetti, il progetto deve inoltre impiegare sistemi di illuminazione naturale (in modo particolare i sistemi di schermatura) che

[36] BARBARA GHERFI, Assessment of daylight performance in buildings: methods and design strategies, Southampton, Wit Press, 2015.

siano coerenti con le caratteristiche formali, cromatiche e materiche dell'edificio; garantendo un'integrazione ottimale con l'architettura e l'ambiente costruito circostante.

3.5.1. PRESTAZIONE VISIVA E COMFORT VISIVO

Il progetto dell'illuminazione naturale deve garantire il soddisfacimento di aspetti di tipo qualitativo e quantitativo: dal punto di vista qualitativo, deve contribuire a creare un ambiente luminoso confortevole e rilassante (confort visivo), che sia stimolante per la produttività degli individui; in termini quantitativi, deve invece fornire condizioni visive sufficienti per lo svolgimento di una determinata attività (prestazione visiva). In relazione alle diverse attività che devono svolgersi corrispondono differenti requisiti di prestazione visiva. In relazione a questi due obiettivi principali, il progettista deve provvedere a progettare delle aperture e dei sistemi di illuminazione adeguati a seconda delle esigenze degli utenti; facendo riferimento ad alcuni parametri specifici ritenuti indispensabili per il progetto della luce naturale³⁰⁻³³.

3.5.2. PARAMETRI TRADIZIONALI

Attualmente, secondo quanto prescritto dalla normativa italiana vigente, il parametro principale per il progetto dell'illuminazione naturale è il **fattore medio di luce diurna** (FLDm), definito come "rapporto tra l'illuminamento medio dell'ambiente chiuso e l'illuminamento che si avrebbe, nelle identiche condizioni di tempo e luogo, su una superficie orizzontale esposta all'aperto in modo da ricevere luce dall'intera

volta celeste senza irraggiamento diretto del sole" [Aghemo, 2003]. In sintesi, il fattore medio di luce diurna è un indice adimensionale che permette di descrivere le prestazioni luminose di un ambiente, definendo la percentuale di luce naturale che si ha nell'ambiente interno rispetto a quella dell'ambiente esterno.

$$\text{FLDm [\%]} = \frac{A_f \cdot \tau_t}{(1 - \rho_{l,m}) \cdot A_{\text{tot}}} \cdot \varepsilon \cdot \psi$$

A_f = superficie vetrata netta della finestra
 τ_t = fattore di trasmissione luminosa del vetro
 $\rho_{l,m}$ = fattore di riflessione luminosa medio ponderato delle superfici interne dell'ambiente
 ε = fattore finestra
 ψ = fattore di riduzione del fattore finestra

Il fattore medio di luce diurna dipende dunque dalla porzione di volta celeste visibile, dalle dimensioni e dalle caratteristiche della finestra, nonché dalle caratteristiche fotometriche e dalle dimensioni dell'ambiente. Tale parametro, tuttavia, presenta molteplici limiti legati ad alcuni fattori significativi che non vengono contemplati nel calcolo: viene considerata esclusivamente la componente diffusa (si ipotizza una condizione di cielo sempre coperto) trascurando la radiazione diretta; risulta indipendente dal sito, dall'orientamento dell'ambiente e dall'alternarsi delle stagioni; e, infine, non tiene conto della presenza di eventuali schermature mobili³⁰. Un altro parametro fondamentale utile a definire la qualità dell'ambiente luminoso è l'**uniformità di illuminamento**, che descrive il modo in cui la luce naturale si distribuisce all'interno di tutto l'ambiente analizzato. Nel caso di un ambiente illuminato unilateralmente, ad esempio, si regi-

strano elevati valori di illuminamento in prossimità della finestra e valori sempre più bassi man mano che ci si allontana dall'apertura, con conseguenti valori di uniformità insoddisfacenti. A tal proposito, l'uniformità di illuminamento costituisce un parametro fondamentale nel caso delle aule scolastiche, in quanto bisogna garantire prestazioni visive adeguate in tutte le parti dell'ambiente in cui viene svolto il compito visivo³⁰⁻³². Al fine di scongiurare sensazioni di discomfort e disturbo alla visione, bisogna inoltre controllare eventuali fenomeni di **abbagliamento** tramite schermature e opportuni accorgimenti progettuali. Nell'ambiente interno – per quanto concerne l'illuminazione naturale – una sensazione di abbagliamento può essere percepita in due diversi casi: per via diretta, attraverso la visione di una parte della volta celeste attraverso la finestra (anche in assenza di radiazione solare diretta); per via indiretta, tramite la riflessione della luce naturale sulle superfici visibili dall'utente, generando un contrasto di luminanza eccessivo tra le zone più illuminate (generalmente in prossimità delle aperture) e le parti più buie dell'ambiente. Attualmente, il parametro che viene utilizzato per valutare la protezione dall'abbagliamento è il DGP (Daylight glare probability), che rappresenta la probabilità che si verifichino fenomeni di abbagliamento per uno specifico punto di osservazione (ai fini del calcolo vengono considerate solo le aperture verticali). Per gli ambienti più sfavorevoli, bisogna garantire che i valori limite di DGP non vengano superati per almeno il 5% delle ore di utilizzo dell'ambiente (DGP_{e<5%})³³⁻³⁷⁻³⁸.

[38] SAN KLEINDIENST, MARLYNE ANDERSEN, *The Adaptation of Daylight Glare Probability to Dynamic Metrics in a Computational Setting*, paper presented at 11th European Lighting Conference, Istanbul, September 2009.

$$\text{DGPs [\%]} = 6,22 \cdot 10^{-5} E_v + 0,184$$

Formula semplificata per il calcolo del DGP

$E_v [lx]$ = illuminamento verticale (misurato su un piano verticale all'altezza degli occhi)

Il grado di piacevolezza dell'ambiente è fortemente influenzato inoltre dalla **resa cromatica** dei colori: l'utilizzo di vetri colorati in pasta o con trattamenti superficiali può alterare sensibilmente la corretta restituzione del colore, generando una condizione di disagio negli utenti che non percepiscono come "naturali" le superfici e gli oggetti dell'ambiente luminoso. Per gli ambienti scolastici e lavorativi è opportuno dunque prediligere l'impiego di vetri chiari (caratterizzati da un'indice di resa cromatica R_a molto alto con valori prossimi al 100%), che garantiscono una restituzione del colore ottimale³⁰.

3.5.3. PARAMETRI DI TIPO DINAMICO

Per via dei molteplici limiti del fattore medio di luce diurna, sono stati introdotti dei nuovi parametri (**CBDM – Climate based daylight modeling**) che si basano su un'interazione dinamica tra le peculiarità del sito, la variabilità delle condizioni di illuminazione esterna, le caratteristiche dell'edificio e il profilo di utilizzo dell'ambiente da parte degli utenti nell'arco dell'anno. Si tratta di parametri non ancora standardizzati e approvati dalla comunità scientifica, ma che costituiscono un valido strumento per la progettazione dell'illuminazione naturale. Sono stati individuati in tutto cinque indicatori, ognu-

[39] YASHA J. GROBMAN, GUY AUSTERN, YANIV HATEL, ISAAC GUEDI CAPELLUTO, *Evaluating the influence of varied external shading elements on internal daylight illuminances*, Buildings 2020, Volume 10 (22).

no dei quali presenta peculiarità diverse utili a descrivere le caratteristiche dell'ambiente luminoso: Daylight Autonomy (DA), Continuous Daylight Autonomy (DAcon), Maximum Daylight Autonomy (DAmax), Useful Daylight illuminance (UDI), Annual light exposure³²⁻³⁶⁻³⁹.

DA - Daylight Autonomy [%]

La Daylight Autonomy definisce la percentuale di tempo nell'arco di un anno in cui la sola luce naturale è in grado di garantire il livello minimo di illuminamento definito secondo normativa. Ad esempio, considerando il caso in cui venga richiesto un illuminamento minimo di 500 lux e la Daylight Autonomy è pari al 60%, la luce naturale è in grado di garantire il raggiungimento dell'illuminamento target (500 lux) per un tempo pari al 60% rispetto alle ore di utilizzo dell'ambiente nell'arco di un anno. Ciò sta a significare che per il 40% del tempo, durante il quale non è garantito il raggiungimento del valore minimo di illuminamento richiesto, si dovrà dunque ricorrere all'accensione dell'impianto di illuminazione artificiale. La Daylight Autonomy rappresenta dunque un importante parametro per valutare l'effettiva disponibilità di luce naturale, considerando l'arco di tempo dell'anno in cui l'ambiente viene utilizzato³²⁻³³.

DAcon – Continuous Daylight Autonomy [%]

La Continuous Daylight Autonomy rappresenta il contributo percentuale che la sola luce naturale è in grado di fornire al fine di garantire il raggiungimento del valore minimo di illuminamento richiesto dalla normativa. Rispetto alla Daylight Autonomy, tale parametro - basandosi su contributi percentuali - fornisce indi-

cazioni più dettagliate sull'effettiva disponibilità di luce naturale: se in un determinato punto dell'ambiente analizzato si ha un illuminamento di 300 lux a fronte dei 500 lux richiesti dalla normativa, la luce naturale contribuisce con un credito di 0,6 (300 lux/500 lux) ai fini del raggiungimento dell'illuminamento target. Poiché si tiene conto anche dei contributi percentuali, ne consegue che la Continuous Daylight Autonomy è sempre caratterizzata da valori più alti rispetto alla Daylight Autonomy³²⁻³³.

DAmax – Maximum Daylight Autonomy [%]

La Maximum Daylight Autonomy definisce la percentuale di tempo nell'arco di un anno in cui viene superato di 10 volte l'illuminamento target definito secondo normativa. Ad esempio, ponendo per ipotesi che nell'ambiente analizzato venga richiesto un illuminamento di 500 lux, un valore di DAmax pari al 20% sta ad indicare che l'illuminamento risulta maggiore di 5000 lux per un periodo di tempo pari al 20% rispetto alle ore di utilizzo totali. Tale parametro è utile a valutare la possibilità che si verifichino fenomeni di abbagliamento, in quanto valori troppo elevati di illuminamento aumentano la probabilità che si verifichino potenziali condizioni di abbagliamento³²⁻³³.

UDI – Useful Daylight Illuminance [%]

È un indicatore che rappresenta la percentuale di tempo - considerando le ore di utilizzo dell'ambiente nell'arco di un anno - in cui la disponibilità di luce naturale risulta "utile" allo svolgimento del compito visivo, mantenendosi entro valori di illuminamento né troppo bassi (<100 lx) né troppo alti (>2500 lx).

Tale indicatore è utile per valutare l'effettiva disponibilità di luce naturale indipendentemente dai valori minimi richiesti dalla normativa, in quanto definisce quel periodo di tempo in cui è garantito un livello di illuminazione quantomeno accettabile per lo svolgimento delle attività. Per garantire prestazioni visive adeguate, è opportuno che valori di UDI siano sempre maggiori o quantomeno prossimi all'80%³²⁻³³. Inoltre, al fine di valutare separatamente i due casi di illuminazione troppo scarsa e troppo elevata, sono state introdotte altre due varianti di tale parametro: *UDI_{exceeded} [%]*, che rappresenta la percentuale di tempo in cui i valori di illuminamento risultano maggiori di 2500 lx (potenziale condizione di abbagliamento); *UDI_{fell-short}*, che definisce al contrario la percentuale di tempo in cui si hanno valori di illuminamento minori 100 lx (livello di illuminazione inadeguato per svolgimento dei compiti visivi)³³.

Annual light exposure [lxh/anno]

È un parametro che rappresenta la quantità cumulata di flusso luminoso incidente su una superficie calcolato su base annua, considerando le ore effettive di utilizzo dell'ambiente. Risulta particolarmente utile per quegli ambienti destinati a mostre o allestimenti museali³²⁻³³.

I parametri finora citati costituiscono un importante strumento per la valutazione delle caratteristiche luminose di un ambiente confinato, per i quali tuttavia non vengono forniti dei valori di riferimento standardizzati a supporto del

progettista. A tal proposito, sono stati introdotti altri due parametri che rivestono un ruolo preminente nella progettazione dell'illuminazione naturale: Spatial Daylight Autonomy (sDA), Annual sunlight exposure (ASE)³³⁻⁴⁰.

sDA - Spatial Daylight Autonomy [%]

La Spatial Daylight Autonomy rappresenta la percentuale di spazio dell'ambiente in cui viene garantito un livello minimo di illuminamento per una frazione specifica di tempo rispetto alle ore totali di utilizzo. Nello specifico, per il calcolo di tale parametro si fa riferimento a un illuminamento minimo pari a 300 lx e una frazione di tempo pari al 50% delle ore di utilizzo (*sDA_{300lx, 50%}*). Affinchè l'illuminazione naturale di un ambiente possa essere considerata accettabile, è opportuno garantire valori di *sDA_{300lx, 50%}* almeno superiori al 55% (condizioni ottimali si hanno per valori superiori al 75%)³³⁻⁴⁰.

ASE – Annual Sunlight exposure [%]

È un parametro che definisce la percentuale di spazio in cui viene superato un determinato valore di illuminamento considerando una frazione specifica delle ore di utilizzo dell'ambiente. In particolare, si fa riferimento a un illuminamento di 1000 lx e una frazione di tempo pari a 250 ore (*ASE_{1000lx, 250h}*). Secondo alcune ricerche sperimentali, al fine di garantire adeguate condizioni di comfort visivo ed evitare fenomeni di abbagliamento è opportuno garantire livelli di *ASE_{1000lx, 250h}* inferiori al 7% (condizioni ottimali si hanno per valori inferiori al 3%)³³⁻⁴⁰.

[40] MARIA BEATRIZ PIDERIT MORENO, CONSTANZA YAÑEZ LABARCA, *Methodology for assessing daylighting design strategies in classroom with a Climate-Based method*, Sustainability 2015, Volume 7, pp. 880-897.

[41] Materiale didattico: ANNA PELLEGRINO (lezione di E. Fabrizio), "Il clima esterno: bilanci e variabili meteorologiche", Atelier il progetto sostenibile di architettura, a.a. 2016/2017, Politecnico di Torino.

Nel seguente capitolo vengono dapprima illustrate le principali caratteristiche del serramento e delle singole parti che lo compongono, elencandone tipologie e alternative possibili in un'ottica di comfort visivo e risparmio energetico.

Vengono in seguito presentate e approfondite alcune strategie progettuali volte a migliorare le condizioni di illuminazione naturale degli ambienti interni, tramite alcuni sistemi e dispositivi che consentono di controllare e regolare la distribuzione della luce in ambiente, nonché a fornire migliori prestazioni in termini di isolamento termico e risparmio energetico.

4 Strategie e sistemi per il controllo dell'illuminazione naturale

4.1. IL SERRAMENTO: CLASSIFICAZIONE, FUNZIONI E PRESTAZIONI

I serramenti esterni, che rientrano insieme ai muri perimetrali nel sistema tecnologico dell'involucro edilizio, assolvono l'importante funzione di garantire l'illuminazione naturale, il soleggiamento e la ventilazione naturale degli ambienti interni, nonché di consentire il passaggio di persone, animali, oggetti tra l'esterno e l'interno dell'edificio. A seconda delle differenti funzioni che assumono i serramenti esterni possono essere suddivisi in tre diverse categorie: finestre, nel caso in cui la funzione principale sia quella di consentire l'illuminazione, i ricambi d'aria e la visibilità tra interno ed esterno; porte-finestre, che oltre alle funzioni sopraelencate garantiscono il passaggio delle persone; porte, se la loro funzione si limita al passaggio di persone e alla protezione da eventuali intrusioni dall'esterno⁴³.

Il serramento, a seguito della repentina evoluzione tecnologica degli ultimi anni, è ormai

divenuto un sistema estremamente complesso che consta di molteplici subcomponenti (realizzati con svariati materiali e tecnologie) che, una volta assemblati, vanno a costituire l'elemento finito.

I vari elementi che compongono il serramento possono essere ripartiti in tre diversi gruppi o categorie: il telaio, che costituisce il profilo del serramento (realizzato in alluminio, legno, PVC ecc.) con eventuali materiali isolanti all'interno per migliorarne l'isolamento termico (poliammide ecc.); la componente trasparente, che comprende i vetri (lastra singola, doppia, tripla ecc.), il distanziatore (realizzato in alluminio o materiale isolante), i gas in intercapedine (aria, argon, kripton ecc.), eventuali rivestimenti (basso emissivi, a controllo solare ecc.), materiali polimerici interposti tra le lastre di vetro stratificato, utilizzate sia per l'incollaggio sia per migliorare l'isolamento acustico del serramento (PVB ecc.); altre componenti accessorie (guarnizioni, ferramenta ecc.). Oltre ad assolvere le principali funzioni di illuminazione,

ventilazione e passaggio; i serramenti esterni devono inoltre rispondere a determinate caratteristiche funzionali e ad alcuni requisiti di seguito elencati, che possono assumere caratteristiche e importanze diverse a seconda della destinazione d'uso dell'edificio:

- *controllo ambientale*, in riferimento alla capacità dei serramenti di controllare il passaggio di luce, calore, suono, aria, acqua, vapore ecc.
- *resistenza*, relativamente alle prestazioni meccaniche del serramento e alla sua capacità di resistere agli urti e alle sollecitazioni meccaniche.
- *sicurezza*, intesa come capacità di resistenza al fuoco o all'intrusione di persone o animali
- *aspetto e assorbimento delle variazioni dimensionali*, in riferimento alla possibilità di controllare eventuali variazioni di forma causate da errori di posa o fabbricazione, sollecitazioni esterne, fenomeni termici/igrometrici, agenti atmosferici ecc.
- *durabilità*, verificando che il tipo di serramento scelto abbia una durata adeguata alla destinazione d'uso dell'edificio, rendendo inoltre possibile il montaggio e l'eventuale sostituzione di componenti senza incorrere a danni o menomazioni.
- *sostenibilità economica*, premurandosi di avere sin dall'inizio un costo chiaro e definito, che tenga anche conto degli eventuali costi di manutenzione.

A seconda delle diverse tipologie di componenti e dei sistemi di controllo impiegati (tipologie di vetro, telaio, sistemi schermanti)

si possono ottenere prestazioni diverse che rispondono in maniera differente ai requisiti finora elencati; sta al progettista scegliere fra le varie alternative possibili al fine di trovare il giusto compromesso che consenta di soddisfare il maggior numero di requisiti, tenendo ovviamente conto della destinazione d'uso dell'edificio. Nei seguenti paragrafi vengono illustrati i criteri di scelta e le varie tipologie in merito al telaio e alle componenti trasparenti, oltre ai principali sistemi di controllo che possono essere adoperati per garantire elevati livelli di comfort visivo negli ambienti indoor, evidenziandone i principali vantaggi e svantaggi anche in un'ottica di risparmio energetico⁴³.

4.1.1. PARAMETRI PRESTAZIONALI ENERGETICI

Al fine di determinare le prestazioni termiche del serramento, analizzato in tutte le sue componenti, sono stati introdotti due parametri fondamentali utili a valutare il flusso netto di energia che attraversa l'involucro trasparente: la trasmittanza termica della finestra "Uw", il coefficiente di trasmissione solare "TSET" (altrimenti detto fattore solare "FS" o "g").

La trasmittanza termica della finestra Uw, il cui calcolo semplificato è riportato nella normativa UNI EN ISO 10077-1: 2007, rappresenta il principale parametro di riferimento per valutare le dispersioni energetiche attraverso l'involucro trasparente.

Il valore di tale parametro dipende principalmente dalla trasmittanza termica delle componenti vetrate (Ug) e del telaio (Uf) e dalle loro caratteristiche geometriche:

$$U_w \text{ [W/m}^2\text{K]} = \frac{A_g U_g + A_f U_f + l_g \psi_g}{A_g + A_f}$$

Ug [W/m²K] = trasmittanza termica delle componenti vetrate

Ag [m²] = area delle componenti vetrate

Uf [W/m²K] = trasmittanza termica del telaio

Af [m²] = area del telaio

lg [m] = lunghezza del perimetro delle componenti vetrate

ψg [W/mK] = Trasmittanza termica lineare del giunto tra telaio

e vetrata (da considerarsi solo in caso di vetrata multistrato per via della presenza del distanziatore)

Nel caso in cui siano presenti sistemi di schermatura esterni (tapparelle, tende, veneziane) che creano una ulteriore intercapedine d'aria ventilata, è possibile anche valutare il valore della trasmittanza termica Uw+shut quando gli schermi sono totalmente abbassati. Tale valore sarà tanto più basso quanto minore sarà la permeabilità all'aria nell'intercapedine ventilata (UNI EN ISO 10077-1: 2007).

$$U_{w+shut} \text{ [W/m}^2\text{K]} = (\Delta R + 1/U_w)^{-1}$$

ΔR = resistenza termica aggiuntiva dovuta alla presenza della schermatura abbassata che crea un'ulteriore intercapedine ventilata

Uw [W/m²K] = trasmittanza termica della finestra

Un altro parametro utile a definire le prestazioni energetiche della finestra è il fattore solare g [-] del componente vetrato, che rappresenta il rapporto tra l'energia termica globale (radiazione solare) trasmessa attraverso il vetro e l'energia incidente. Detto più semplicemente, tale parametro definisce la percentuale di energia solare che è in grado di passare attraverso il componente vetrato.

Il fattore solare riveste dunque un ruolo fon-

damentale ai fini di garantire un adeguato isolamento termico nei mesi estivi. Ciò vale in modo particolare per i climi più caldi, nei quali bisogna garantire valori del fattore solare molto contenuti al fine di minimizzare gli apporti termici, evitando un eccessivo surriscaldamento degli ambienti e limitando i dispendi di energia per il raffrescamento estivo.

Ad abbassare ulteriormente il valore del fattore solare del vetro possono contribuire i sistemi di schermatura e ombreggiamento esterni (tende, veneziane, tapparelle ecc.), che bloccano l'ingresso della radiazione solare in ambiente arrecando notevoli benefici nelle stagioni più calde. A tal proposito, è stato introdotto il parametro g_{gl+sh} [-], presente nella norma UNI 11300-1: 2014, che tiene conto della riduzione del fattore solare quando le schermature esterne vengono utilizzate.

Infine, un ulteriore parametro utile a valutare le condizioni di ombreggiamento degli edifici e il grado di esposizione alla radiazione solare diretta è il fattore di riduzione per ombreggiamento F_{sh,ob}. Tale parametro, viene ricavato in funzione dei fattori di ombreggiamento relativi alle ostruzioni esterne (F_{hor}), agli oggetti orizzontali (F_{ov}) e verticali (F_{fin}). Il valore di tali fattori varia a seconda del clima, della latitudine, delle stagioni, dell'orientamento e delle caratteristiche geometriche degli elementi ombreggianti. Per via della molteplicità di variabili da tenere in considerazione, i fattori di ombreggiatura possono essere ricavati in maniera semplificata tramite interpolazione lineare, facendo riferimento ai valori riportati nell'appendice D della norma UNI TS 11300-1: 2014.

4.1.2. TIPOLOGIE DI APERTURA E RICAMBI D'ARIA

Un altro aspetto di primaria importanza di cui si deve tener conto per la progettazione dei serramenti è la scelta del corretto sistema di apertura: il modo in cui la finestra si apre influenza fortemente la qualità dell'aria indoor e può inoltre limitare l'uso delle schermature e lo sfruttamento dello spazio nelle immediate vicinanze dell'apertura.

Al fine di poter operare la scelta più opportuna, occorre dunque conoscere le molteplici possibilità di apertura della finestra [Figura 4.1], che vengono di seguito elencate evidenziandone i principali vantaggi e svantaggi :

- *a battente*: l'anta si apre ruotando sull'asse verticale verso l'interno (alla francese) o verso l'esterno (all'inglese). In ambedue i casi vengono garantiti ricambi d'aria ottimali, tuttavia, qualora non siano presenti sistemi di bloccaggio, le ante tendono a sbattere in caso di forte vento. Inoltre, in caso di apertura verso l'interno, occorre verificare che vi sia abbastanza spazio per l'angolo di apertura e che l'ingombro non sia eccessivo rapportato alle dimensioni dell'ambiente. L'apertura verso l'esterno, invece, se da un lato garantisce un netto risparmio di spazio, può rendere difficili le operazioni di pulizia e manutenzione dei serramenti. Un altro significativo svantaggio legato all'apertura a battente è legato alle limitazioni nell'uso delle schermature interne (in caso di apertura verso l'interno) ed esterne (in caso di apertura verso l'esterno), in quanto possono entrare in conflitto con l'apertura delle ante impedendo la corretta ventilazione naturale degli ambienti.

È sconsigliato infine adoperare tale sistema di apertura in caso di luci troppo grandi (in modo particolare per le finestre in PVC), in quanto si potrebbe incorrere alla rottura delle cerniere per via delle eccessive sollecitazioni meccaniche.

- *A vasistas*: l'anta si apre verso l'interno ruotando sull'asse orizzontale inferiore. Nonostante la portata di ventilazione sia nettamente inferiore rispetto alla classica apertura a battente, l'apertura a vasistas rende sempre possibili i ricambi d'aria grazie al minimo ingombro ad ante aperte, consentendo l'apertura della finestra anche in presenza di persone o arredi e senza entrare in conflitto con eventuali schermature interne. Tale sistema di apertura rende tuttavia più difficili le operazioni di pulizia e manutenzione, in quanto accessibili solamente dall'esterno. Anche in questo caso, per via dell'eccessivo peso gravante sulle cerniere, è sconsigliato l'uso di tale sistema per finestre con luci troppo grandi.

- *Anta-ribalta*: l'anta si apre verso l'interno ruotando sia sull'asse verticale sia orizzontale. Tale sistema di apertura altro non è che l'integrazione e la combinazione tra il sistema "a vasistas" e a "battente, come tale vengono sommati i vantaggi dell'una e dell'altra derivandone prestazioni decisamente migliori.

- *Scorrevole orizzontale*: l'anta scorre in direzione orizzontale su appositi binari, sovrappo-
nendosi all'altra o nascondendosi all'interno di un'intercapedine ricavata nel muro (a scomparsa). Le ante scorrevoli vengono generalmente adoperate per porte-finestre o finestre



Figura 4.1

Rappresentazione schematica dei principali sistemi di apertura
© <http://www.serramenti.me/immagini/aperture.jpg>

di grandi dimensioni; in quanto, non essendoci movimenti rotatori, riescono ad assorbire carichi considerevoli con il minimo rischio di rotture o danneggiamenti.

Per quanto concerne i ricambi d'aria, questo sistema presenta il limite di ridurre a metà la superficie dell'apertura, dimezzando dunque anche la portata di ventilazione; è possibile rimediare adoperando ante scorrevoli "a scomparsa" all'interno del muro, che possono rendere tuttavia particolarmente difficili le operazioni di assemblaggio, smontaggio, manutenzione e pulizia.

- *Scorrevole verticale*: l'anta scorre in direzione verticale su appositi binari, sovrappo-
nendosi all'altra o all'interno del muro; tale sistema di apertura è anche detto "saliscendi" o "ghigliottina". Presenta a grandi linee gli stessi vantaggi e svantaggi delle ante scorrevoli orizzontali, con l'ulteriore limite che la presenza del telaio

in mezzera può essere d'intralcio per la vista verso l'esterno.

- *A bilico*: l'anta si apre ruotando sull'asse intermedio orizzontale o verticale. Tale sistema presenta il vantaggio di poter coprire grandi superfici con un'unica specchiatura, garantendo dunque una visione ottimale verso l'esterno. Grazie alle varie angolazioni di apertura disponibili, è possibile inoltre direzionare il flusso d'aria a seconda delle esigenze.

I sistemi di apertura finora elencati corrispondono a quelli tradizionalmente impiegati, esistono tuttavia altre varianti che possono risultare vantaggiose in determinate condizioni: "*a visiera*", con rotazione dell'anta verso l'esterno attorno all'asse orizzontale inferiore; "*a sporgere*", con rotazione dell'anta verso l'esterno attorno all'asse superiore; "*a libro*", in cui le ante scorrono orizzontalmente e possono impacchettarsi consentendo l'apertura dell'intera superficie⁴³⁻⁴⁵.

4.2. TIPOLOGIE DI TELAIO: PRESTAZIONI

A CONFRONTO

La scelta della corretta tipologia di telaio, in relazione alle esigenze e alla destinazione d'uso dell'edificio, rappresenta indubbiamente un fattore di primaria importanza nella progettazione dei serramenti. Sul mercato sono presenti svariate alternative, ognuna delle quali presenta caratteristiche e peculiarità che soddisfano determinati requisiti a discapito di altri; occorre dunque conoscerne i principali svantaggi e vantaggi al fine di poter operare la scelta più adeguata, ragionando in termini di risparmio energetico, comfort visivo, isolamento acustico e disponibilità economica⁴⁴.

Di seguito vengono riportate le principali tipologie di telaio disponibili sul mercato, illustrandone per ognuna le principali caratteristiche e confrontandone le prestazioni:

- *Telai in legno*

Il legno rappresenta da secoli il materiale più utilizzato per la realizzazione dei serramenti, per la sua facile reperibilità, disponibilità, leggerezza e, in modo particolare, per le sue intrinseche proprietà di isolante termico ed acustico. A partire dagli anni trenta, con l'avvento dei serramenti in alluminio e successivamente di quelli in PVC, si era registrato un netto calo nell'impiego di tale materiale, dovuto alle sue molteplici criticità in termini di lavorabilità e durabilità. Negli ultimi anni, tuttavia, grazie all'utilizzo del legno lamellare, di vetrocamera particolarmente performanti e all'integrazione con profilati in alluminio per migliorarne la tenuta all'acqua e all'umidità, i telai in legno

stanno riscuotendo un ottimo successo sul mercato, divenendo particolarmente competitivi con i materiali concorrenti. L'aspetto più critico dei serramenti in legno è legato alla sua scarsa durabilità dovuta alla presenza di umidità, che può provocare considerevoli variazioni dimensionali e la formazione di muffe (in quanto materiale organico) che ne alterano le proprietà e le prestazioni. Al fine di scongiurare tali fenomeni di degrado chimico-fisico, è dunque opportuno proteggere la superficie del legno con opportune finiture superficiali (impregnanti preservanti, anti-tarbo, anti-muffa ecc.) che proteggano il materiale da variazioni di umidità, dalla pioggia, dai raggi ultravioletti e da altri agenti esterni (funghi e parassiti). Un altro principale limite è dato dall'impossibilità di realizzare forme complesse, al contrario di altri materiali quali l'alluminio, che può essere facilmente estruso realizzando design moderni e accattivanti. Se da un lato l'impiego del legno non offre prestazioni ottimali in termini di lavorabilità e durabilità, tale materiale risulta essere senza alcun dubbio il più prestante in termini di isolamento termico e risparmio energetico, consentendo di avere valori di trasmittanza termica della finestra talmente bassi da favorirne l'utilizzo nelle case passive ($U_w \leq 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$)⁴⁶⁻⁴⁷ [Figura 4.2].

- *Telai in alluminio*

I serramenti in alluminio cominciano a diffondersi intorno agli anni trenta del Novecento a seguito dell'invenzione della tecnologia dell'estrusione, che ne ha consentito la produzione in massa con forme particolarmente comples-

se e costi contenuti. Il principale svantaggio di tale materiale sta nell'elevata conducibilità termica dell'alluminio (caratteristica comune a tutti i materiali metallici), che implica dei valori di trasmittanza termica decisamente più elevati rispetto al legno e al PVC. L'evoluzione tecnologica ha tuttavia permesso di realizzare dei telai a taglio termico attraverso l'inserimento di barrette di materiale isolante (poliammide) all'interno del profilo, che interrompono il flusso termico (dovuto all'elevata conducibilità termica dell'alluminio) garantendo prestazioni termiche decisamente migliori. Ciononostante, i serramenti in alluminio non consentono di avere prestazioni tanto elevate quanto quelle dei materiali concorrenti, in quanto caratterizzati da valori di trasmittanza termica del telaio ($U_f \geq 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$) leggermente più alti rispetto a quelli del legno e del PVC. Sebbene non siano termicamente performanti quanto le altre due tipologie, i serramenti in alluminio presentano caratteristiche ottimali in termini di durabilità e performance meccaniche, tali da consentire la realizzazione di profili estremamente sottili con un design leggero e minimale. Ciò consente inoltre di massimizzare l'ingresso di luce naturale in ambiente, aumentando la superficie delle componenti trasparenti rispetto a quella occupata dal telaio [Figura 4.3].

Un elemento critico dei profili in alluminio è legato al loro costo particolarmente elevato, motivo per il quale si decide spesso di ripiegare sui serramenti in PVC, decisamente più economici ma meno soddisfacenti in termini di durabilità, resistenza meccanica e attrattiva estetica⁴⁶⁻⁴⁷⁻⁵⁰.



Figura 4.2

Sezione di un serramento in legno lamellare
 © <https://www.rusconiserramenti.com/wp-content/uploads/2017/01/sezione-serramento-legno.jpg>



Figura 4.3

Sezione di un serramento in alluminio a taglio termico con anta a scomparsa
 © https://img.edilportale.com/product-thumbs/b_WICLINE-75-MAX-WICONA-405145-rel1db821f6.jpg

[43] GIOVANNA MOTTURA, ALESSANDRA PENNISI, *Serramenti e schermature solari*, Santarcangelo di Romagna (RM), Maggioli editore, 2014.

[44] GIANFRANCO CELLAI, *Serramenti e schermature per la riqualificazione energetica ed ambientale: criteri per la riqualificazione energetica ed ambientale*, Roma, EPC editore, 2013.

- *Telai in PVC*

L'utilizzo del PVC (polivinile di cloruro) come materiale per la produzione dei serramenti è stato introdotto in tempi piuttosto recenti, a partire dagli anni settanta del Novecento.

Attualmente tale materiale viene largamente impiegato nei paesi nordici, in cui sono state sviluppate tecnologie innovative che prevedono l'inserimento di materiali a bassissima conducibilità termica (poliuretano espanso ecc.) all'interno del profilo, migliorando ulteriormente le proprietà isolanti intrinseche del PVC e raggiungendo valori di trasmittanza termica del telaio decisamente performanti ($U_f \approx 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$). Trattandosi di un materiale polimerico, tale materiale presenta tuttavia molteplici criticità in termini di durabilità e resistenza meccanica. Per ottemperare a tale limite, i serramenti in PVC presentano generalmente uno spessore del telaio decisamente maggiore rispetto ai profili realizzati in legno o all'alluminio, derivandone una minore penetrazione della luce naturale e un peggioramento delle condizioni di illuminazione naturale degli ambienti interni [Figura 4.4]. Al fine di migliorarne le prestazioni meccaniche e la resistenza agli urti, sono attualmente in atto delle sperimentazioni volte ad inserire delle cariche in fibra di vetro all'interno del frame, che contribuiscono inoltre a mitigare l'elevato coefficiente di dilatazione termica del PVC. Quest'ultimo aspetto rappresenta un ulteriore punto critico del PVC, che può comportare serie problematiche per le zone caratterizzate da climi caldi, in cui il raggiungimento di temperature troppo elevate può portare a deformazioni irreversibili del materiale⁴⁶⁻⁴⁷.



▲ **Figura 4.4**

Sezione di un serramento in PVC con rinforzi metallici
© <http://www.picardiporteefinestre.com/pvc/>

4.3. COMPONENTE TRASPARENTE

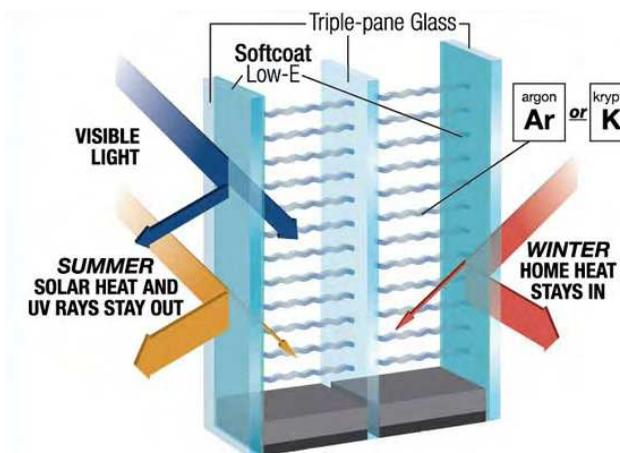
Le componenti trasparenti rappresentano gli elementi preponderanti in termine di superficie, come tali rivestono un ruolo fondamentale ai fini della valutazione delle prestazioni energetiche del serramento, nonché a garantire la corretta illuminazione naturale degli ambienti. Esistono sul mercato numerose alternative e soluzioni, ognuna delle quali presenta specifiche caratteristiche e peculiarità che conferiscono prestazioni molto diverse in termini di isolamento termico e confort visivo. A seconda delle caratteristiche e delle condizioni climatiche del sito, della destinazione d'uso e delle specifiche esigenze degli utenti; risulta dunque fondamentale disporre dei mezzi e delle cono-

scenze per poter operare la scelta più adeguata, al fine di trarre quanti più vantaggi mirati al risparmio energetico e al comfort visivo negli ambienti indoor⁴⁸. Vengono qui di seguito riportate le molteplici tipologie di vetro presenti attualmente sul mercato, analizzandone per ognuna i principali svantaggi e vantaggi:

- *Vetrocamera basso-emissivi*

Al fine di garantire un adeguato isolamento termico nei mesi invernali, con l'obiettivo di trattenere il più possibile il calore all'interno degli ambienti, vengono sempre più adoperati i vetrocamera basso-emissivi, che garantiscono valori di trasmittanza termica molto ridotti limitando considerevolmente le dispersioni termiche. La presenza di una o due camere d'aria, altrimenti riempite con altri gas con buone proprietà isolanti (argon, kripton), permette di avere un'intercapedine a bassa conducibilità termica che abbate considerevolmente le dispersioni termiche. Le proprietà isolanti del vetrocamera migliorano gradualmente all'aumentare dello spessore dell'intercapedine, fino ad un massimo di 16 millimetri. Oltre questa soglia, infatti, si vengono a generare dei movimenti convettivi all'interno della camera d'aria che ne riducono sensibilmente le prestazioni termiche e acustiche. Al fine di conferire proprietà isolanti ancora più elevate, è possibile rivestire una o più lastre del vetrocamera con sottilissimi strati di ossidi metallici (*Low E*), che contribuiscono a ridurre considerevolmente l'emissività. A seconda del numero di rivestimenti basso-emissivi applicati e della loro posizione, si possono ottenere prestazioni diver-

se. Ad esempio, se si considera il caso di un triplo vetro, composto da due camere d'aria e rivestimento basso-emissivo su due lastre, si riescono ad ottenere valori di trasmittanza termica U_g fino a $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ [Figura 4.5]. Nel caso di un doppio vetro, invece, costituito da una camera d'aria e con rivestimento basso-emissivo su una sola lastra, si riescono a raggiungere valori di trasmittanza termica U_g sicuramente soddisfacenti ma difficilmente inferiori a $1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Infine, al fine di migliorare l'isolamento acustico delle vetrata, si consiglia l'uso di vetri stratificati (generalmente posti nella parte interna) che contribuiscono a potenziare l'effetto smorzante del vetro nei confronti delle onde sonore. A tale scopo, si ottengono prestazioni migliori all'aumentare dello spessore dei vetri e dello strato viscoelastico (PVB) interposto tra le due lastre⁴⁵⁻⁴⁷⁻⁴⁹.



▲ **Figura 4.5**

Funzionamento di un triplo vetro con due camere d'aria e doppio rivestimento basso-emissivo in seconda e in quinta posizione
© <https://www.stanekwindows.com/what-is-low-e-glass-and-does-it-make-windows-more-energy-efficient.aspx>

[46] GIOVANNI TISI, *Serramenti e sistemi oscuranti*, Palermo, Flaccovio, 2011.

- *Vetri a controllo solare*

Il controllo solare riveste un ruolo fondamentale nei mesi estivi, in particolare per quelle zone caratterizzate da climi particolarmente caldi o temperati.

A tal proposito, come spiegato nei paragrafi precedenti, bisogna garantire valori del fattore solare "g" molto contenuti, al fine di limitare l'ingresso della radiazione termica e un surriscaldamento eccessivo degli ambienti interni. I vetri a controllo solare sono prodotti ad elevato contenuto tecnologico, che consentono la riflessione verso l'esterno di gran parte della radiazione termica (limitando la vista verso l'interno) a discapito della trasmissione luminosa. Questi tipi di vetro vengono generalmente abbinati a vetrocamera basso-emissivi, al fine di garantire un adeguato isolamento termico anche nelle stagioni più fredde.

Per via della bassa trasmissione luminosa, che rappresenta il principale limite dei vetri a controllo solare, vengono generalmente impiegati per le facciate continue, in cui la percentuale di involucro trasparente risulta preponderante rispetto all'involucro opaco; se ne sconsiglia al contrario l'uso per quegli edifici che presentano aperture molto piccole, in quanto non si riuscirebbero a garantire sufficienti livelli di illuminazione naturale negli ambienti interni.

I vetri a controllo solare possono essere suddivisi in due diverse categorie: i *vetri riflettenti*, ottenuti tramite il deposito di ossidi metallici sulla lastra vetrata [Figura 4.6]; i *vetri assorbenti* (o colorati in pasta), che possono in parte contribuire anche al controllo dell'abbagliamento⁴⁷⁻⁴⁸⁻⁴⁹.



▲ **Figura 4.6**

Facciata continua realizzata con vetri riflettenti
© <https://www.gruppobizzotto.com/vetrieria-valsugana/vetrate-riflettenti>

- *Vetri selettivi*

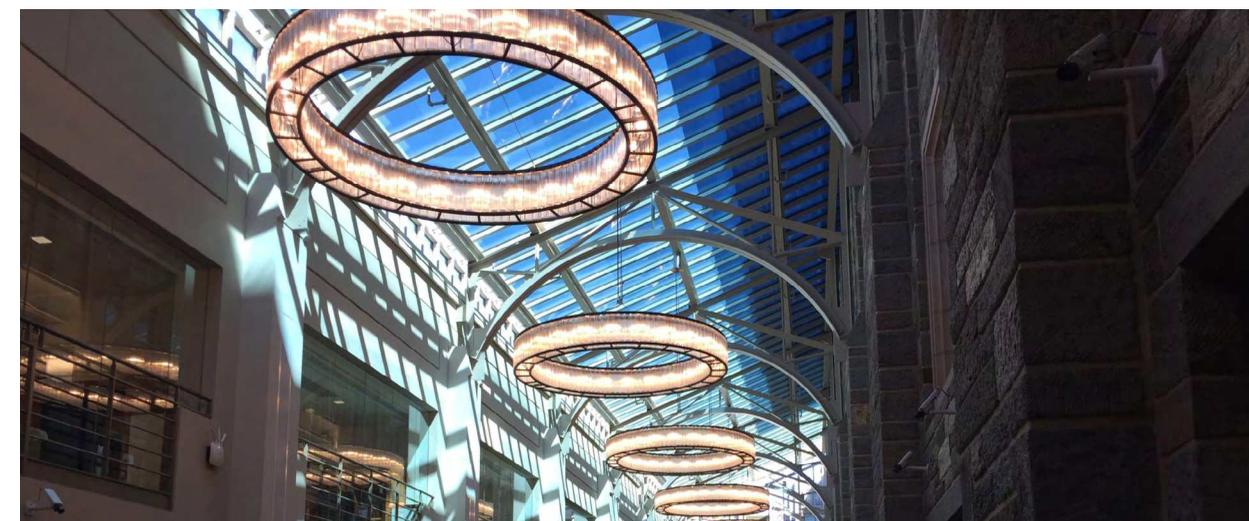
I vetri selettivi rappresentano la soluzione migliore se si vogliono garantire al tempo stesso prestazioni termiche ottimali (garantendo valori del fattore solare "g" molto contenuti) e una discreta trasmissione luminosa ($TL > 70\%$). Tali tipologie di vetri, grazie al deposito di particolari ossidi metallici in superficie, sono infatti caratterizzati da una bassa trasmittanza termica e un elevato indice di selettività, che rappresenta il rapporto tra la trasmissione luminosa (TL) e il fattore solare (g): al crescere di tale rapporto aumentano anche le prestazioni del vetro, cui corrispondono valori di trasmissione sempre più elevati pur garantendo valori del fattore solare sempre più contenuti. Al fine di garantire prestazioni ottimali sia in termini di illuminazione sia in termini di risparmio energetico, bisogna orientare la scelta su dei vetri caratterizzati da indici di selettività prossimi a 2.

Le tipologie finora illustrate corrispondono a quelle maggiormente impiegate nell'edilizia; esistono tuttavia ulteriori tipologie di vetri, ad alto contenuto tecnologico e con costi non

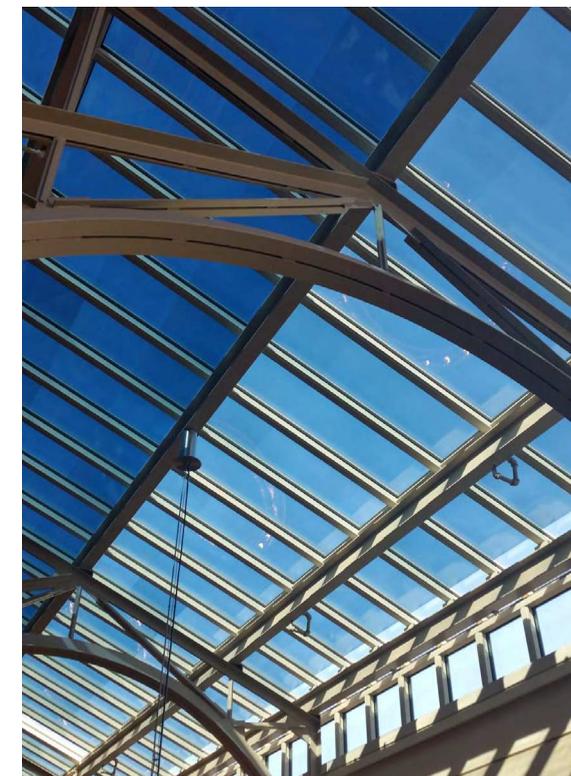
sempre accessibili, il cui utilizzo può risultare utile e necessario in determinate condizioni particolari: i *vetri fotocromici*, che si scuriscono in presenza della radiazione solare diretta e ritornano trasparenti in condizione di luce diffusa (utili per il controllo dell'abbagliamento); i *vetri termocromici*, che si opacizzano al raggiungere di una temperatura troppo elevata per poi tornare trasparenti nel momento in cui questa si normalizza (utili per i climi particolarmente caldi); i *vetri elettrocromici*, che consentono di variare la trasmissione luminosa e il fattore solare a seguito di particolari reazioni elettrochimiche [Figura 4.7-4.8]; i *vetri TIM (Transparent Insulation Materials)*, costituiti da materiali trasparenti (aerogel, policarbonato ecc.) che garantiscono un ottimo isolamento termico pur garantendo valori di trasmissione luminosa molto elevati⁴⁷⁻⁴⁹.

▼ **Figura 4.7**

Princeton Firestone Library (NJ):
vista d'insieme della copertura realizzata con vetri elettrocromici
© <http://www.lampartners.com/portfolio/princeton-firestone-library/>



[47] Materiale didattico: VALENTINA SERRA, "L'elemento di involucro trasparente", corso di Fisica Tecnica Ambientale, a.a. 2014/2015, Politecnico di Torino.



▲ **Figura 4.8**

Princeton Firestone Library (NJ):
dettaglio dei vetri elettrocromici adoperati per la copertura
© <http://www.lampartners.com/portfolio/princeton-firestone-library/>

[48] MONICA CANNIVELLO, *Prestazioni dell'involucro in regime estivo. Criteri per la riqualificazione energetica*, Firenze, Ainea Editrice, 2011.

4.4. COMPONENTE SCHERMANTE

Al fine di fornire un'adeguata protezione dall'abbagliamento ed evitare un surriscaldamento eccessivo degli ambienti nei mesi più caldi, risulta fondamentale ricorrere all'uso di sistemi di schermatura, in modo particolare per quelle esposizioni (sud, est, ovest) maggiormente esposte alla radiazione solare diretta. In ragione della totale assenza di soleggiamento, l'installazione di schermature a nord risulta essere superflua, possono essere tuttavia adoperate per altri scopi legati all'oscuramento, alla sicurezza e alla coerenza estetica del progetto.

A seconda delle esigenze degli utenti, delle caratteristiche intrinseche dell'edificio e delle condizioni climatiche del sito; la scelta della corretta tipologia di schermatura dev'essere ben ponderata ai fini di trarne quanti più benefici in termini di confort visivo e risparmio energetico. Le molteplici tipologie di schermature presenti sul mercato, a seconda che vengano poste all'interno dell'ambiente o all'esterno, possono essere suddivise in due grandi macrocategorie, che vengono di seguito descritte riportandone i caratteri salienti e i principali vantaggi e svantaggi:

- *Schermature interne*

I sistemi di schermatura interni (tende a rullo, scorritende, veneziane ecc.) si caratterizzano principalmente per i costi molto contenuti e per la facilità di installazione, ma non garantiscono tuttavia prestazioni adeguate in termini di protezione dalla radiazione termica estiva. A differenza degli schermi esterni, che bloccano la radiazione termica prima di consentirne l'in-

gresso in ambiente, le tende interne intercettano la radiazione solare solo dopo che questa è entrata attraverso le componenti trasparenti dell'involucro, bloccando solamente la radiazione luminosa e consentendo invece alla radiazione termica (responsabile del surriscaldamento e dell'innalzamento delle temperature) di disperdersi in ambiente.

Anche per quanto concerne gli aspetti legati al comfort visivo (protezione dell'abbagliamento, uniformità di illuminamento ecc.), le schermature interne garantiscono prestazioni non sempre soddisfacenti. Sebbene consentano una protezione ottimale dai fenomeni di abbagliamento, presentano infatti parecchi limiti legati all'impossibilità di diversificare i livelli di illuminazione naturale in ambiente, provocando condizioni di discomfort visivo dovuti ad una scarsa disponibilità di luce naturale in ambiente quanto le schermature sono abbassate.

Le tende alla veneziana interne, costituite da lamelle (generalmente in alluminio) orientabili e impacchettabili che consentono di regolare l'ingresso della radiazione luminosa a seconda delle esigenze, garantiscono in tal senso prestazioni decisamente migliori rispetto alle classiche tende scorrevoli o a rullo, seppur non paragonabili a quelle garantite dai sistemi di schermatura esterni.

Negli ultimi anni si stanno sperimentando nuove tipologie di veneziane, le cui lamelle presentano particolari forme geometriche che consentono di avere un comportamento diversificato a seconda dell'altezza solare e della diversa inclinazione dei raggi solari, mirando a schermare la radiazione solare in estate e a favorirne l'ingres-

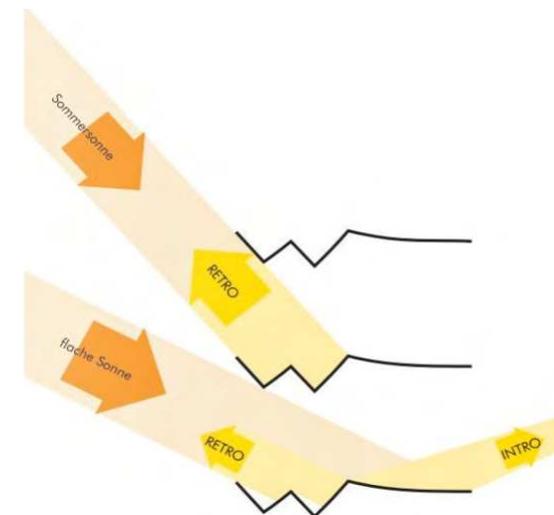


Figura 4.9

Lamelle con sezione a "w", che consentono di respingere la radiazione solare in estate e di facilitarne l'ingresso nei mesi invernali
 © <https://www.yumpu.com/de/document/read/8458951/tageslichtsysteme-fur-intelligente-fassaden-retrosolar->

so nei mesi invernali [Figura 4.9].

Sul mercato sono inoltre presenti delle soluzioni che prevedono l'inserimento di veneziane motorizzate all'interno del vetrocamera, sicuramente più comode in termini di risparmio di spazio ma con costi di installazione e manutenzione decisamente più elevati⁵³⁻⁵⁴.

- *Schermature esterne*

I sistemi di schermatura esterni, come già anticipato nel paragrafo precedente, sono caratterizzate da prestazioni nettamente migliori in merito al controllo dell'illuminazione naturale; ma soprattutto forniscono, se opportunamente dimensionate e progettate, un notevole contributo ai fini del contenimento delle dispersioni in inverno e del controllo della radiazione termi-

[49] Materiale didattico: ANNA PELLEGRINO (presentazione a cura di Lorenza Bianco), "Prestazioni fisico tecniche dell'involucro trasparente: soluzioni tradizionali e innovative", Atelier il progetto sostenibile di architettura, a.a. 2016/2017, Politecnico di Torino.

ca in estate. Le varie tipologie di schermature esterne possono essere ripartite in due categorie distinte, in relazione al fatto che siano fisse o che possano variare la loro posizione (tramite controllo manuale o motorizzato) a seconda delle esigenze degli utenti.

I sistemi fissi presentano il limite di non poter diversificare l'ingresso della radiazione solare al variare delle ore del giorno, delle stagioni e delle condizioni atmosferiche; sono caratterizzate tuttavia da costi di installazione e manutenzione decisamente più accessibili e non necessitano del controllo manuale degli utenti ai fini del loro funzionamento. Tra le varie schermature fisse si possono distinguere almeno tre tipologie: gli oggetti (o schermi) orizzontali, generalmente impiegati per le esposizioni a sud, che garantiscono una protezione ottimale dal soleggiamento e dall'abbagliamento limitatamente nei mesi estivi (elevate altezze solari) [Figura 4.10]; gli oggetti (o schermi) verticali, particolarmente performanti per le esposizioni ad est e ad ovest (cui corrispondono altezze solari minori) ai fini del controllo dell'abbagliamento; frangisole a lamelle fisse, generalmente realizzate in legno o in alluminio, che possono essere disposti sia in posizione orizzontale (indicati per le esposizioni a sud) sia in posizione verticale (raccomandati per le esposizioni ad est e ad ovest).

Le schermature mobili, per contro, presentano il vantaggio di potersi adattare in modo fluido e funzionale alle diverse esigenze degli utenti e alle attività che devono svolgersi, tenendo oltremodo conto della variazione dell'altezza solare nei vari periodi dell'anno e delle condizioni climatiche esterne. Esistono svariate tipologie di

[50] RENATO SUZZANI, *Manuale del serramentista in alluminio*, Milano, Tecniche Nuove, 2008.

schermature mobili, alcune più tradizionali, altre decisamente più innovative. Tra le soluzioni più tradizionali vi sono: le tapparelle con cassonetto interno, generalmente impiegate per uso domestico, che sebbene non consentano un controllo ottimale dell'illuminazione contribuiscono tuttavia a ridurre considerevolmente le dispersioni termiche in inverno (ciò è reso possibile grazie all'intercapedine d'aria ferma che viene automaticamente a formarsi tra la finestra e le tapparelle, contribuendo ad abbassare i valori di trasmittanza termica della finestra); persiane o scuri esterni, anche queste generalmente impiegate per le abitazioni, che oltre ad assolvere alle funzioni appena elencate forniscono un'adeguata protezione da eventuali intrusioni esterne; le veneziane esterne con lamelle orientabili, che garantiscono un discreto controllo dei livelli di illuminazione in ambiente e forniscono un'adeguata protezione dalla radiazione termica estiva; frangisole esterni, orientabili e controllabili da remoto, che oltre ad assicurare ottime prestazioni in termini di comfort visivo garantiscono un'adeguata vista verso l'esterno [Figura 4.11]; tende tecniche esterne, con controllo motorizzato e disponibili in svariate colorazioni [Figura 4.12]. Le soluzioni più innovative possono essere molteplici, con forme complesse e sistemi di movimentazione motorizzata che variano in relazione alle specifiche esigenze del progetto, all'effetto che si vuole ottenere e alle scelte architettoniche operate del progettista⁴⁴⁻⁴⁶⁻⁵¹⁻⁵² [Figura 4.13-4.14-4.15].

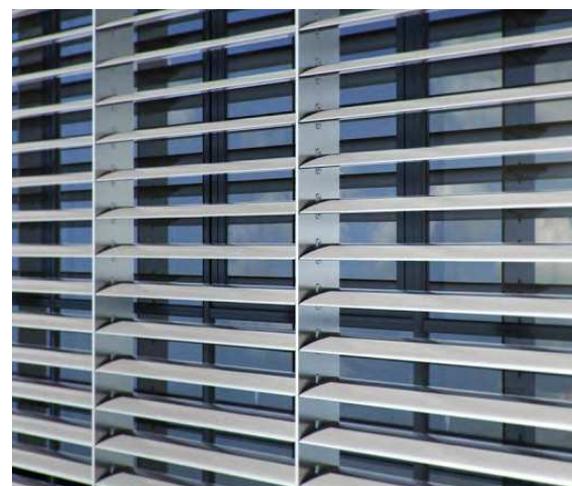
> Figura 4.11

Frangisole esterni in alluminio
© <http://www.ialc.it/it/pale-fisse-e-orientabili-schuco-alb>



▲ Figura 4.10

Aggetti orizzontali per la protezione dalla radiazione termica nei mesi estivi
© <http://www.lampartners.com/portfolio/genzyme-allston-landing-facility-expansion/>



< Figura 4.12

Tende tecniche colorate
© <https://a5n2t9u6.stackpathcdn.com/wp-content/uploads/2017/09/tende-tecniche-installazione-esterni.jpg>

▼ Figura 4.13

Frangisole fissi in legno
© <https://i.pinimg.com/originals/01/f4/78/01f478760162b1b6d0d086c79aea94f3.jpg>



▼ Figura 4.14

Panelli frangisole in lamiera d'alluminio forato
© <http://www.zucchiarchitetti.com/projects/offices/ed031/>



▼ Figura 4.15

Panelli in alluminio automatizzati con apertura "a ginocchio"
© <http://www.salazarposada.com/en/blog/detail/blog-40>



[51] GIOVANNA MOTTURA, ALESSANDRA PENNIS, *Progettare sistemi di protezione solare degli edifici: controllo del soleggiamento e microclima*, Rimini, Maggioli editore, 2006.

[52] MARCO SALA, *Schermature solari*, Firenze, Ainea editrice, 2000.

4.5. SISTEMI DI CONDUZIONE E RIDIREZIONAMENTO DELLA LUCE

A seconda del numero di aperture, della loro dimensione e delle modalità con cui queste vengono disposte all'interno di un ambiente, non sempre si riescono a garantire condizioni di illuminazione naturale adeguate; in modo particolare per quegli spazi (aule scolastiche, laboratori, uffici, biblioteche ecc.) che richiedono elevati valori di illuminamento al fine di consentire il corretto svolgimento dei relativi compiti visivi. Se si considera il caso di un ambiente illuminato unilateralmente, ad esempio, si registrano valori di illuminamento troppo elevati vicino alle aperture (con potenziale rischio di abbagliamento) e valori troppo bassi in prossimità della parete opposta a quella finestrata (con una disponibilità di luce naturale inadeguata ai fini del corretto svolgimento delle attività previste). Non sono rari i casi, inoltre, di ambienti totalmente privi di aperture (seminterati, bagni ciechi ecc.), dove la totale assenza di illuminazione naturale, oltre ad innalzare i costi di energia elettrica per l'impianto di illuminazione artificiale, può avere ripercussioni fortemente negative sullo stato emozionale e sul benessere psico-fisico degli utenti. Al fine di risolvere (o quantomeno attenuare) tali problematiche, sono stati sperimentati e applicati alcuni sistemi innovativi volti a ridirezionare i fasci luminosi verso gli spazi poco illuminati, sfruttando le leggi della riflessione e le proprietà riflettenti di

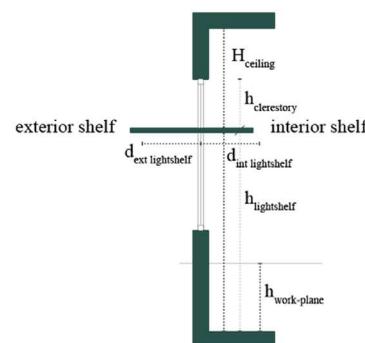
> Figura 4.16

Dimensioni ottimali dei light shelves esterni e interni
© <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/1/71>

alcuni materiali. Nei seguenti paragrafi vengono presentate alcune alternative valide in tal senso, che - se opportunamente pensate e progettate - possono contribuire a migliorare considerevolmente le condizioni di illuminazione naturale in ambiente³²⁻⁵³⁻⁵⁴.

4.5.1. LIGHT SHELVES

I light shelves vengono generalmente impiegati per quegli ambienti illuminati unilateralmente che richiedono un'elevata disponibilità di luce naturale (scuole, uffici, biblioteche ecc.), mirando a migliorarne le prestazioni visive e a rendere più uniforme la distribuzione della luce in ambiente. Tali dispositivi non sono altro che delle "mensole riflettenti", rivestite sulla superficie superiore con un materiale ad elevato coefficiente di riflessione ($\rho = 95\%$), che reindirizzano i fasci luminosi verso le zone più lontane dall'apertura. I light shelves vengono direttamente ancorati al serramento (dividendolo in due parti) e possono essere posizionati internamente, esternamente o in entrambi i lati. A seconda della loro po-



$$d_{int \text{ lightshelf}} = h_{clerestory}$$

$$d_{ext \text{ lightshelf}} \leq h_{lightshelf} - h_{work-plane}$$

sizione e della profondità dello sporto, possono avere effetti diversi sull'illuminazione naturale degli ambienti. I light shelves esterni, oltre a rendere più uniforme la distribuzione della luce, contribuiscono al controllo dell'abbagliamento e consentono di schermare la radiazione termica in corrispondenza di elevate altezze solari, riducendo i carichi termici nei mesi estivi ed evitando un surriscaldamento eccessivo degli ambienti [Figura 4.18-4.19]. A tale scopo, si ottengono prestazioni migliori all'aumentare della profondità dello sporto. Anche i light shelves interni possono in parte contribuire al controllo dell'abbagliamento, seppur in misura minore rispetto a quelli esterni.

Al fine di garantire prestazioni ottimali in termini di comfort visivo e risparmio energetico, è possibile installare i light shelves sia internamente che esternamente, massimizzando la riflessione della luce e garantendo al tempo stesso una protezione ottimale dall'abbagliamento e dalla radiazione termica estiva [Figure 4.20-4.21-4.22]. Occorre tuttavia prestare molta attenzione a dimensionare correttamente gli sporti, in quanto un oggetto

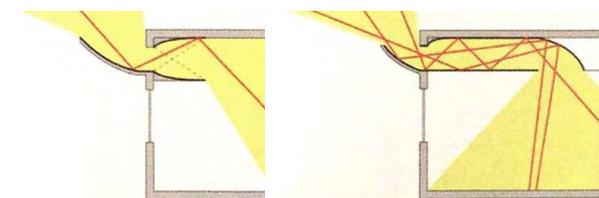
> Figura 4.18

Clackmas High School (Oregon): i light shelves visti dall'esterno
© <http://2030palette.org/intermediate-light-shelves/>



[53] AHMAD ELTAWEL, YUEHONG SU, *Evaluation of Suitability of a Parametrically Controlled Louvers for Various Orientations throughout a Year Comparing to an Existing Case*, Buildings 2017, Volume 7(4).

troppo profondo potrebbe sortire l'effetto contrario a quello voluto, riducendo drasticamente la disponibilità di luce naturale in ambiente. In generale, bisogna assicurarsi che la dimensione dello sporto esterno sia proporzionata rispetto alla superficie dell'apertura; l'oggetto interno dev'essere inoltre sempre minore rispetto a quello esterno⁵⁵ [Figura 4.16]. L'uso di light shelves curvi può infine contribuire a massimizzarne ulteriormente le prestazioni, assumendo un comportamento differenziato al variare dell'inclinazione dei raggi solari nei vari periodi dell'anno³²⁻⁵⁵⁻⁵⁶ [Figura 4.17].



> Figura 4.17

Light shelves e controsoffitti con andamento curvilineo
© PETER TREGENZA, MICHAEL WILSON, DAYLIGHTING Architecture and lighting design, Abingdon, Routledge, 2011

> Figura 4.19

The Leo and Dottie Kolligian Library (California): i light shelves visti dall'esterno
© <http://2030palette.org/intermediate-light-shelves/>



[54] Materiale didattico: Anna Pellegrino, "Sistemi di illuminazione naturale", Laboratorio di progettazione fisico tecnica dell'edificio, a.a. 2018/2019, Politecnico di Torino.



Figura 4.20

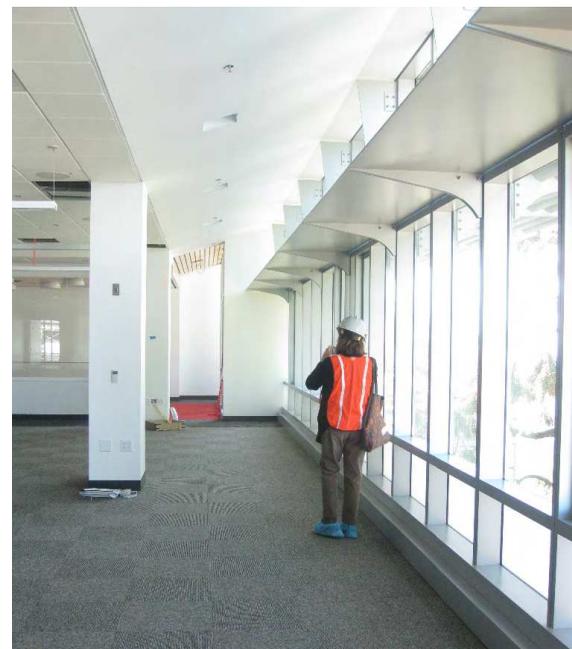
Genzyme Allston Landing Facility (Massachusetts): i light shelves visti dall'interno
 © <http://www.lampartners.com/portfolio/genzyme-allston-landing-facility-expansion/>

Figura 4.21

La riflessione della luce sul soffitto tramite i light shelves
 © https://rmw.com/wp/wp-content/uploads/2014/02/IMG_0284.jpg

Figura 4.22

Thurston Elementary School I (Oregon): i light shelves garantiscono un'adeguata protezione dall'abbagliamento e rendono più uniforme la distribuzione della luce naturale in ambiente
 © <http://2030palette.org/intermediate-light-shelves/>



4.5.2. LIGHT PIPES

I light pipes, comunemente noti come "tunnel solari" o "tubi solari", vengono generalmente impiegati per illuminare spazi ciechi totalmente privi di illuminazione naturale (corridoi, sottotetti, bagni ecc.). Sono costituiti da tubi rivestiti internamente con materiali altamente riflettenti, i quali - attraverso ripetute riflessioni - consentono di incanalare i fasci luminosi e trasportarli verso gli ambienti che si intendono illuminare [Figura 4.23]. I tunnel solari sono disponibili sul mercato in svariate misure e tipologie: a seconda delle esigenze, possono essere rigidi o flessibili; possono inoltre presentare una o più curve variando più volte la loro direzione. Tuttavia, all'aumentare della lunghezza del tunnel e del numero di curve presenti lungo il suo percorso, i tubi solari possono ridurre in modo più o meno marcato le loro prestazioni³².

4.5.3. ELIOSTATI

Gli Eliostati sono dei dispositivi che, seguendo la traiettoria apparente percorsa dal Sole, consentono di riflettere la radiazione solare direzionandola lungo una specifica direzione. Un eliostato è essenzialmente costituito da uno specchio, fissato a un apposito sostegno che ne consente la rotazione, che intercetta e proietta i fasci luminosi. Possono essere installati sulla copertura, per direzionare l'energia solare verso i pannelli per il solare termico (per la produzione di acqua calda sanitaria) o l'impianto fotovoltaico (per la produzione di energia elettrica) migliorandone l'efficienza; oppure per riflettere

la radiazione solare verso le facciate esposte a nord. Se abbinati ai tunnel solari, gli eliostati consentono inoltre di proiettare e concentrare la luce all'interno del tubo, permettendo di illuminare locali e spazi normalmente privi di illuminazione naturale³² [Figura 4.24].

Figura 4.23

Tubo solare installato sulla copertura e passante per il sottotetto
 © <https://velcdn.azureedge.net/~media/marketing/au/img/460/sun%20tunnel%20rigid%20cutaway.jpg>

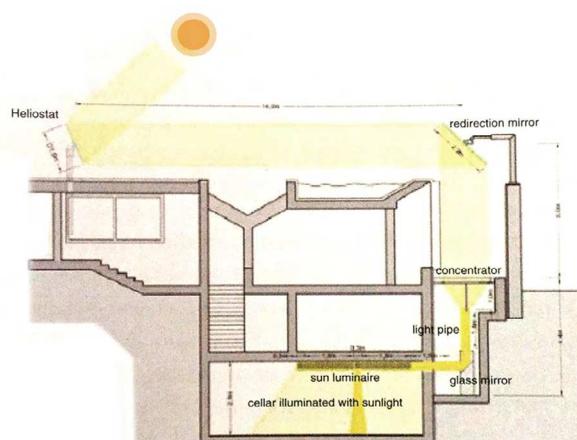


Figura 4.24

Uso combinato di un eliostato e un tubo solare per illuminare i locali seminterrati
 © PETER TREGENZA, MICHAEL WILSON, DAYLIGHTING Architecture and lighting design, Abingdon, Routledge, 2011

[55] ANTONIS KONTADAKIS, ARIS TSANGRASSOULIS, LAMBROS DOULIOS, STELIOS ZEREFOS, *A review of light shelf designs for daylight environments*, Sustainability 2018, Volume10 (71).

[56] MOHAMMAD HOSSEIN MOAZZENI, ZAHRA GHIABAKLOU, *Investigating the influence of light shelf geometry parameters on daylight performance and visual comfort, a case study of educational space in tehran, Iran*, Buildings 2016, Volume 6 (26).

Nel seguente capitolo vengono illustrati i requisiti e le linee guida su cui fare riferimento per il progetto della luce naturale negli edifici scolastici, al fine di garantire adeguati livelli di comfort visivo e di benessere psico-fisico negli ambienti indoor.

In un'ottica improntata alla sostenibilità ambientale, mirando al risparmio energetico degli edifici e a minimizzare gli impatti ambientali sugli ecosistemi, vengono inoltre riportate le principali norme in merito ai requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici, con particolare riferimento all'involucro trasparente.

5 Luce, comfort e prestazione energetica: quadro normativo e protocolli di certificazione

5.1. I PROTOCOLLI DI SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE: LA CERTIFICAZIONE LEED

Tutti gli edifici, oltre ad avere influenze importanti sul sistema economico e produttivo, hanno forti ripercussioni sugli ecosistemi e sul futuro dell'ambiente. A seconda dei criteri e dei metodi con i quali vengono progettati, costruiti, gestiti e smaltiti; possono avere un impatto ambientale più o meno importante sulla salute del nostro pianeta.

Il consumo di energia per gli edifici, in riferimento alla climatizzazione degli edifici e al soddisfacimento del fabbisogno di acqua calda sanitaria, costituisce la principale causa delle emissioni di anidride carbonica nell'atmosfera, incidendo in modo considerevole sul riscaldamento globale. Secondo recenti studi, il loro consumo corrisponde a circa il 40% delle materie prime a livello globale [Fantozzi, 2017]. Al fine di contenere l'impatto ambientale degli edifici e di poter valutare il grado di sostenibilità

dei processi di costruzione, sono stati introdotti i protocolli di certificazione ambientale, elencati qui di seguito, i quali prevedono l'assegnazione di un punteggio in relazione all'ottenimento di obiettivi più o meno performanti rispetto alle prestazioni minime richieste: *LEED* (Stati Uniti), *BREAM* (Regno Unito), *DGNB* (Germania), *HQE* (Francia), *Protocollo Itaca* (Italia), *CasaClima* (Italia).

Tra i vari protocolli di certificazione ambientale sopraelencati, il LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), esito del lavoro elaborato dall'organizzazione *USBGC* (U.S. Green Building Council), risulta essere ad oggi quello maggiormente diffuso e radicato a livello internazionale [Figura 5.1]. Il protocollo LEED viene largamente adoperato anche in Italia, grazie all'associazione *GBCI* (Green Building Council Italia) che ha provveduto a creare una versione locale⁵⁷ [Figura 5.2].

Il sistema di certificazione LEED rappresenta uno strumento utile per i progettisti "per iden-

tificare e mettere in atto pratiche progettuali, costruttive e gestionali in cui il livello di sostenibilità dell'intervento sia misurabile in ogni fase del processo costruttivo, fino alle fasi di gestione e manutenzione dell'opera" [Fantozzi, 2017]. Il LEED individua quattro livelli di classificazione mediante l'attribuzione di crediti (appartenenti a diverse categorie) che, una volta sommati, forniscono il punteggio complessivo ottenuto: Certificato (40-49 punti), Argento (50-59 punti), Oro (60-79 punti), Platino (80 punti e superiore)⁵⁷.

Le categorie tematiche su cui il LEED fa riferimento, alle quali possono essere assegnati uno o più punti a seconda dei casi, sono le seguenti: *sostenibilità del sito*, in riferimento agli aspetti ambientali del luogo in cui verrà costruito l'edificio; *gestione delle acque*, per quanto concerne la gestione e lo smaltimento delle acque, promuovendo la riduzione dei consumi idrici e il riutilizzo delle acque meteoriche; *energia e atmosfera*, relativamente alle prestazioni energetiche dell'edificio e all'impiego di risorse rinnovabili; *materiali e risorse*, promuovendo il riciclo dei materiali e la riduzione degli impatti ambientali durante le fasi di trasporto degli stessi; *qualità ambientale interna*, in riferimento alla qualità degli ambienti interni, con particolare riguardo alla salubrità dell'aria, alla sicurezza e alla corretta ventilazione e illuminazione degli spazi; *innovazione nella progettazione*, promuovendo l'uso di aspetti ed espedienti progettuali innovativi che contribuiscono a rendere più sostenibile l'intervento; *priorità regionale*, orientando la progettazione verso l'esaltazione delle peculiarità ambientali

del luogo.

I sistemi di verifica LEED, anche detti standard di certificazione, variano a seconda della tipologia di costruzione e della destinazione d'uso dell'edificio che si intende certificare; di seguito vengono riportate tutte le tipologie attualmente presenti nel sito GBCI: *LEED BD+C: New Construction and Major Renovation*, per la certificazione di nuovi edifici e grandi ristrutturazioni di almeno nove piani; *LEED O+M: Existing Buildings*, per la certificazione di interventi di ristrutturazione, mirando al miglioramento e al mantenimento del costruito; *LEED ID+C: Commercial Interiors*, per la certificazione di spazi interni ad uso commerciale, in riferimento ad ambienti interni sostenibili e ad alte prestazioni ambientali; *LEED ND V4: Neighborhood Development*, sviluppato da GBC Italia al fine di promuovere riqualificazioni o nuove espansioni in riferimento alla sostenibilità ambientale del territorio, delle infrastrutture e degli edifici sostenibili; *LEED 2009 Italia per Nuove Costruzioni e Ristrutturazioni*, con particolare riferimento alla realtà costruttiva italiana e riconosciuto a livello internazionale; *GBC HOME*, utilizzato per la certificazione degli edifici residenziali⁵⁷⁻⁵⁸⁻⁵⁹.

5.1.1. LEED FOR SCHOOL: CREDITI LEED PER L'ILLUMINAZIONE

Tra le varie tipologie di sistemi di verifica LEED elencati nel precedente paragrafo, è stato realizzato da *GBC Italia* uno specifico standard di certificazione applicabile all'edilizia scolastica: il *LEED for School 2009* (valido per i progetti

presentati fino al 2021, per la certificazione di edifici posteriori a tale data bisognerà fare riferimento alla versione LEED BD+C V4).

Il *LEED for School* è un sistema di certificazione ambientale che mira alla realizzazione di scuole "Green", ossia di edifici scolastici a basso impatto ambientale caratterizzati da ambienti sani e stimolanti per il benessere e la produttività degli studenti. Il protocollo per le scuole presenta le medesime categorie tematiche adoperate per gli altri sistemi di certificazione, con l'unica differenza che viene richiesto il soddisfacimento di alcuni prerequisiti e crediti aggiuntivi in merito ad alcune categorie.

All'interno della categoria "qualità ambientale interna", sono in particolare esplicitati alcuni requisiti in merito all'illuminazione naturale degli spazi scolastici, con l'obiettivo di connettere gli studenti con l'ambiente esterno (garantendo un'adeguata visione attraverso le aperture) e di rafforzare i ritmi circadiani massimizzando l'ingresso della luce naturale in ambiente. A tal proposito, sono stati inseriti due crediti in riferimento alla corretta illuminazione naturale degli ambienti, alla protezione dell'abbagliamento e alla visione verso l'esterno⁶⁰:

- *Credito EQ - Luce naturale (Daylight) (2-3 punti)*

Per quanto concerne il primo credito, relativo alla corretta disponibilità di luce naturale e al controllo dell'abbagliamento, possono essere assegnati da 1 a 3 punti a seconda delle prestazioni ottenute.

Ai fini dell'attribuzione del punteggio è possibi-

⁵⁷ FABIO FANTOZZI, GIANPAOLO SCATIZZI, FRANCESCA VENTURELLI, *La certificazione energetica e ambientale Leed. Guida ai principi*, Milano, Hoepli, 2017.



Figura 5.1

Certificazione LEED - U.S. Green Building Council
© <https://cdn.greatnews.life/wp-content/uploads/images/leed-logo.jpg>



Figura 5.2

Green Building Council Italia
© https://www.gbcsitalia.org/image/company_logo?img_id=29080&t=1592603967946

⁵⁸ LEED 2016 v4 for building design and construction.

le scegliere tra tre diverse opzioni:

Opzione 1 – Dimostrare attraverso simulazioni computerizzate che la spatial Daylight Autonomy (sDA_{300lx,50%}) sia maggiore o uguale al 55% (cui corrisponde l'assegnazione di 2 punti) o al 75% (cui corrisponde l'assegnazione di 3 punti). In merito al controllo dei fenomeni di abbagliamento, occorre inoltre dimostrare che non si abbiano valori di ASE_{1000lx,250h} superiori al 10%. Ai fini del calcolo bisogna considerare la superficie regolarmente occupata in cui viene svolto il compito visivo.

Opzione 2 – Dimostrare tramite simulazioni computerizzate che nella giornata dell'equinozio (in condizioni di cielo sereno) i valori di illuminamento siano compresi tra 300 lux e 3000 lux (considerando un lasso temporale compreso tra le 9:00 e le 15:00) per almeno il 75% (1 punto) o il 90% (2 punti) della superficie. Anche in questo caso bisogna considerare la superficie regolarmente occupata in cui viene svolto il compito visivo.

Opzione 3 – Misurare manualmente (tramite un luxometro) i valori di illuminamento sulla superficie regolarmente utilizzata a un'ora qualsiasi tra le 9:00 e le 15:00, verificando che tali valori siano compresi tra 300 lux e 3000 lux per almeno il 75% (1 punto) o il 90% (2 punti) della superficie⁵⁹⁻⁶⁰.

• *Credito EQ – Viste di qualità (Quality Views) (1 punto)*

Tale credito riguarda le finalità volte a garantire un'adeguata visione verso l'esterno, assicurando la *visione attraverso le componenti trasparenti per almeno il 75% dello spazio regolar-*

mente occupato.

Ai fini del conseguimento del punteggio previsto (1 punto), bisogna garantire il soddisfacimento dei seguenti requisiti: le superfici trasparenti devono restituire una visione chiara dello spazio esterno, senza schermature interne al vetro, trame, serigrafie o tinte che potrebbero compromettere la corretta restituzione del colore; la vista verso l'esterno deve comprendere almeno due delle tre fasce che generalmente la compongono (cielo, orizzonte, persone/oggetti in primo piano)⁵⁹⁻⁶⁰.

5.2. NORMATIVE VIGENTI E LEGISLAZIONE SULLE PRESTAZIONI ENERGETICHE DELL'INVOLUCRO TRASPARENTE

Nei seguenti paragrafi vengono presentati il quadro normativo italiano e i decreti ministeriali – attualmente vigenti nel territorio nazionale – in merito alle prestazioni energetiche degli edifici. In particolare, ai fini di questo lavoro di tesi, viene posta una particolare attenzione sui requisiti minimi richiesti per quanto concerne la parte trasparente dell'involucro, tenendo anche conto della presenza di eventuali sistemi di schermatura e della loro influenza sulle prestazioni energetiche delle finestre.

5.2.1. UNI EN ISO 10077-1: 2018

La norma "UNI EN ISO 10077-1: 2018_Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti - Calcolo della trasmittanza termica - Parte 1: Generalità" definisce i metodi per il calcolo della trasmittanza termica delle finestre con o senza sistemi oscuranti.

Al fine di poter determinare il valore della trasmittanza termica globale della finestra $U_w^{(1)}$, vengono dapprima forniti alcuni metodi di calcolo e valori tabellati utili a determinare le trasmittanze termiche dei componenti vetrati e dei telai, i cui valori variano a seconda delle diverse tipologie adoperate.

Per quanto concerne le componenti trasparenti, vengono riportati i valori di trasmittanza termica U_g per vetrate doppie o triple riempite con differenti gas (Aria, Argon, Krypton, Xenon) e con una o più lastre con trattamento superficiale. In merito ai telai, dopo aver illustrato alcune generalità sulle varie tipologie di profili impiegati per l'edilizia, vengono forniti: alcuni valori approssimati di trasmittanza termica per telai in PVC con due o tre camere cave e rinforzati tramite inserti metallici; i valori di trasmittanza termica per telai in legno e metallo-legno (con un contenuto di umidità pari al 12%) in funzione della variazione dello spessore; alcuni metodi di calcolo per determinare la trasmittanza termica dei telai metallici (con o senza taglio termico) in relazione allo spessore del profilo e alla larghezza del taglio termico (quando presente). I metodi sopramenzionati vanno adoperati nel caso in cui non si posseggano valori più precisi; in caso contrario, si consiglia di utilizzare i valori di trasmittanza termica direttamente forniti dalle aziende produttrici, i quali presentano un grado di attendibilità e precisione maggiore. In aggiunta a quanto detto finora, vengono riportati alcuni valori tipici di trasmittanza termica lineare ψ della giunzione telaio-vetrata (da includere nel calcolo solo in caso di vetrata multistrato per via delle

presenza del distanziatore) in relazione al tipo di telaio impiegato (legno, PVC, metallo con o senza taglio termico) [Tabella 5.1]. Viene considerato anche il caso in cui vengano adoperati dei distanziatori migliorati termicamente, caratterizzati da una minore conduttività termica rispetto a quelli tradizionali [Tabella 5.2].

Al fine di poter determinare il valore della trasmittanza termica in presenza di sistemi oscuranti chiusi $U_{w+shut}^{(2)}$, che contribuiscono a creare una ulteriore intercapedine d'aria (ventilata) tra la finestra e la chiusura oscurante, vengono riportati alcuni valori caratteristici della resistenza termica aggiuntiva ΔR a seconda del tipo di chiusura adoperata e del grado di permeabilità all'aria⁶¹ [Tabella 5.3].

⁽¹⁾ TRASMITTANZA TERMICA DELLA FINESTRA

$$U_w [W/m^2K] = \frac{A_g U_g + A_f U_f + l_g \psi_g}{A_g + A_f}$$

$U_g [W/m^2K]$ = trasmittanza termica delle componenti vetrate

$A_g [m^2]$ = area delle componenti vetrate

$U_f [W/m^2K]$ = trasmittanza termica del telaio

$A_f [m^2]$ = area del telaio

$l_g [m]$ = lunghezza del perimetro delle componenti vetrate

$\psi_g [W/mK]$ = Trasmittanza termica lineare del giunto tra telaio e vetrata (da considerarsi solo in caso di vetrata multistrato per via della presenza del distanziatore)

⁽²⁾ TRASMITTANZA TERMICA DELLA FINESTRA CON CHIUSURA OSCURANTE

$$U_{w+shut} [W/m^2K] = (\Delta R + 1/U_w)^{-1}$$

ΔR = resistenza termica aggiuntiva dovuta alla presenza della schermatura abbassata che crea un'ulteriore intercapedine ventilata

$U_w [W/m^2K]$ = trasmittanza termica della finestra

[59] LEED 2009 Italia per Nuove Costruzioni e Ristrutturazioni.

[60] LEED for School 2009.

TABELLA 5.1 Valori di trasmittanza termica lineare per tipologie comuni di distanziatori di vetrate (alluminio, acciaio)

© Elaborazione grafica dell'autore sulla base dei dati presenti nella norma UNI EN ISO 10077-1:2018

Tipo di telaio	Trasmittanza termica lineare per differenti tipi di vetrata ψ [W/mK]	
	vetrata doppia o tripla vetro non trattato intercapedine con aria o gas	vetrata doppia o tripla vetro a bassa emissività intercapedine con aria o gas
Legno o PVC	0,06	0,08
Metallo con taglio termico	0,08	0,11
Metallo senza taglio termico	0,02	0,05

TABELLA 5.2 Valori di trasmittanza termica lineare per distanziatori di vetrate con prestazioni termiche migliorate

© Elaborazione grafica dell'autore sulla base dei dati presenti nella norma UNI EN ISO 10077-1:2018

Tipo di telaio	Trasmittanza termica lineare per differenti tipi di vetrata a prestazione termica migliorata ψ [W/mK]	
	Vetrata doppia o tripla vetro non trattato intercapedine con aria o gas	Vetrata doppia o tripla vetro a bassa emissività intercapedine con aria o gas
Legno o PVC	0,05	0,06
Metallo con taglio termico	0,06	0,08
Metallo senza taglio termico	0,01	0,04

5.2.2. UNI TS 11300-1: 2014

La norma "UNI TS 11300-1:2014_Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale" fornisce gli strumenti e i metodi necessari per determinare il fabbisogno di energia termica degli edifici per la climatizzazione estiva e invernale. Ai fini di questo lavoro di tesi, ci si limita a riportare gli aspetti della norma re-

lativi alle prestazioni energetiche dell'involucro trasparente; tralasciando le parti riguardanti l'involucro opaco, gli apporti termici interni e la ventilazione degli ambienti.

Oltre ad includere alcuni richiami alla norma UNI EN ISO 10077-1: 2018 (analizzata nel precedente paragrafo), la normativa in questione approfondisce gli aspetti relativi agli apporti termici solari attraverso l'involucro trasparente, dovuti alla radiazione solare incidente sulle

TABELLA 5.3 Resistenza termica aggiuntiva per finestre con chiusure oscuranti chiuse

© Elaborazione grafica dell'autore sulla base dei dati presenti nella norma UNI EN ISO 10077-1:2018

Tipo di chiusura oscurante	Resistenze termiche aggiuntive per una specifica permeabilità all'aria delle chiusure oscuranti ΔR [m ² x K/W]		
	Elevata o molto elevata permeabilità all'aria	Media permeabilità all'aria	A tenuta o bassa permeabilità all'aria
Chiusure oscuranti avvolgibili di alluminio	0,09	0,12	0,15
Chiusure oscuranti avvolgibili di legno e di plastica senza riempimenti in schiuma	0,12	0,16	0,22
Chiusure oscuranti avvolgibili di plastica con riempimento in schiuma	0,13	0,19	0,26
Chiusure oscuranti avvolgibili di legno, spessore da 25 a 30 mm	0,14	0,22	0,30

componenti vetrate e trasmessa in ambiente. Vengono dunque fornite indicazioni più dettagliate ai fini del calcolo del fattore solare g [-] (percentuale di energia solare trasmessa attraverso il componente vetrato) riportandone il valore approssimativo per le principali tipologie di vetro [Tabella 5.4]; nonché del parametro g_{gl+sh} [-], che rappresenta la trasmittanza di energia solare globale della finestra in presenza di schermature esterne o sistemi di ombreggiamento⁶².

Al fine di poter determinare il parametro g_{gl+sh} , vengono inoltre riportati i fattori di riduzione

⁶¹ UNI EN ISO 10077-1: 2018_Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti - Calcolo della trasmittanza termica - Parte 1.

TABELLA 5.4

Trasmittanza di energia solare totale $g_{gl,n}$ di alcuni tipi di vetro
© Elaborazione grafica dell'autore sulla base dei dati presenti nella norma UNI TS 11300-1: 2014

Tipi di vetro	$g_{gl,n}$ [-]
Vetro singolo	0,85
Doppio vetro normale	0,75
Doppio vetro con rivestimento basso-emissivo	0,87
Triplo vetro normale	0,70
Triplo vetro con rivestimento basso-emissivo	0,50
Doppio infisso	0,75

⁶² UNI TS 11300-1:2014_Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.

(g_{gl+sh}/g_{gl}) per le principali tipologie di schermatura [Tabella 5.5]; esistono tuttavia alcuni software, tra i quali Parasol, che consentono di ricavare tale valore in maniera più precisa, in quanto tengono conto delle effettive dimensioni della tenda, delle sue specifiche proprietà ottiche e della sua posizione e inclinazione rispetto alla finestra.

Nell'appendice D vengono infine riportati i valori tabulari dei fattori di ombreggiamento al variare dell'orientamento e della latitudine, attraverso i quali è possibile ricavare per interpolazione lineare il fattore di riduzione per ombreggiatura ($F_{sh,ob}$)⁶².

5.2.3. DECRETO MINISTERIALE 11/01/2017

Il D.M. 11/01/2017 definisce gli obblighi e gli obiettivi minimi in termini di risparmio energetico e riduzione dell'impatto ambientale degli

edifici, in vigore dal 2017 e avente validità fino al 2020. All'interno dell'allegato 2, vengono illustrati i requisiti minimi di prestazione energetica dell'involucro edilizio; in particolare, in merito all'involucro trasparente, sono riportati i valori massimi consentiti di trasmittanza termica degli infissi esterni (o comunicanti con ambienti non climatizzati) a partire dal 1° luglio 2015 (attualmente in vigore) e dal 1° gennaio 2021, in relazione alla zona climatica di appartenenza dell'edificio [Tabella 5.6].

Inoltre, al fine di assicurare un'adeguata protezione dalla radiazione solare diretta e una conseguente riduzione dei dispendi energetici per il raffrescamento estivo, il decreto prevede di garantire valori di g_{gl+sh} (in presenza di schermature mobili) minori o uguali a 0,35 per tutti gli edifici di nuova costruzione e le ristrutturazioni⁶³⁻⁶⁴ [Tabella 5.7].

▼ TABELLA 5.5 Fattori di riduzione (g_{gl+sh}/g_{gl}) per alcuni tipi di tenda

© Elaborazione grafica dell'autore sulla base dei dati presenti nella norma UNI TS 11300-1: 2014

Tipo di tenda	Proprietà ottiche della tenda		Fattori di riduzione (g_{gl+sh}/g_{gl}) [-]	
	assorbimento	trasmissione	tenda interna	tenda esterna
Veneziane bianche	0,1	0,05	0,25	0,10
		0,1	0,30	0,15
		0,3	0,45	0,35
Tende bianche	0,1	0,5	0,65	0,55
		0,7	0,80	0,75
		0,9	0,95	0,95
Tessuti colorati	0,3	0,1	0,42	0,17
		0,3	0,57	0,37
		0,5	0,77	0,57
Tessuti rivestiti di alluminio	0,2	0,05	0,20	0,08

[63] Decreto Ministeriale 26/06/2015_appendice B: requisiti minimi di trasmittanza per i serramenti esterni.

▼ TABELLA 5.6

Trasmittanze termiche massime consentite per gli infissi esterni a partire dal 1° luglio 2015 e dal 1° gennaio 2021

© Elaborazione grafica dell'autore sulla base dei dati presenti nel D.M. 11/01/2017

Zona climatica	U [W/m²K]	
	2015	2021
A e B	3,20	3,00
C	2,40	2,00
D	2,10	1,80
E	1,90	1,40
F	1,70	1,00

5.3. NORMATIVE DI RIFERIMENTO SUI REQUISITI ILLUMINOTECNICI ED IL COMFORT VISIVO

Nei seguenti paragrafi vengono introdotti alcuni riferimenti normativi e prescrizioni in merito all'illuminazione naturale degli spazi di apprendimento. Per quanto concerne il sistema normativo italiano, vengono approfondite la norma UNI 10840: 2007, che contiene alcune prescrizioni specifiche sull'illuminazione naturale e artificiale dei locali scolastici, e la norma UNI EN 12464-1: 2011, riguardante i requisiti di illuminazione per i luoghi di lavoro.

L'attuale sistema normativo italiano presenta tuttavia molteplici limiti, legati al mancato aggiornamento delle norme rispetto alle nuove esigenze della didattica e alla presenza di in-

[64] Decreto Ministeriale 11/01/2017_adozione dei criteri ambientali minimi per l'edilizia.

▼ TABELLA 5.7

Valori massimi consentiti di g_{gl+sh} in presenza di schermature mobili a partire dal 1° luglio 2015 e dal 1° gennaio 2021

© Elaborazione grafica dell'autore sulla base dei dati presenti nel D.M. 11/01/2017

Zona climatica	g_{gl+sh} [-]	
	2015	2021
Tutte le zone	0,35	0,35

dici oramai inadeguati e datati. Per tale motivo, si è ritenuto opportuno introdurre la norma europea CEN EN 17037:2018, che include ulteriori indici e prescrizioni ai fini di garantire un adeguato comfort visivo negli ambienti confinati.

5.3.1. UNI 10840: 2007

La norma "UNI 10840: 2007_Luce e illuminazione - Locali scolastici - Criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale" fornisce gli strumenti necessari per il progetto dell'illuminazione delle aule e degli altri locali scolastici (spazi distributivi, sale comuni, sale professori, laboratori progettuali ecc.), al fine di assicurare adeguate condizioni di comfort visivo ed il be-

[65] UNI 10840: 2007_Luce e illuminazione - Locali scolastici - Criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale.

nessere psicofisico degli studenti.

Nella presente norma vengono illustrati i metodi per il calcolo del fattore medio di luce diurna FLD_m [%], che rappresenta il principale parametro di riferimento per il progetto della luce naturale, di cui vengono riportati i valori minimi da garantire nei vari locali scolastici a seconda delle attività che devono svolgersi. La norma definisce inoltre i valori minimi di illuminamento medio mantenuto Em [lx] e degli indici di resa cromatica Ra [-] da assicurare a seconda del tipo di ambiente [Tabella 5.8].

Oltre a queste prescrizioni, sono presenti delle linee guida in merito all'uniformità dell'illuminazione e al controllo dell'abbagliamento: occorre prevedere dei sistemi schermanti regolabili (tende, veneziane, schermi ecc.) al fine di ridurre l'eccessiva luminanza in prossimità delle aperture e di fornire un'adeguata protezione dall'abbagliamento; bisogna assicurare una corretta visione della lavagna da ogni parte dell'aula, verificando che nessuna parte della finestra venga riflessa sulla sua superficie; infine, si sconsiglia l'uso di dispositivi (tende colorate, filtri ecc.) che possono alterare la corretta percezione dei colori per tutti quegli ambienti in cui vengono svolte le regolari attività didattiche (aule, laboratori ecc.), in quanto possono causare condizioni di affaticamento visivo e psico-fisico⁶⁵.

5.3.2. UNI 12464: 2011

La norma "UNI 12464: 2011_Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni" riporta i requisiti

> TABELLA 5.8

Requisiti di illuminazione per i principali locali scolastici a seconda del tipo di compito visivo o attività
© Elaborazione grafica dell'autore sulla base dei dati presenti nella norma UNI 10840: 2007

di illuminazione (naturale, artificiale o mista) da assicurare per tutti i locali interni destinati ad attività lavorative, tenendo conto della durata e delle tipologie di attività che devono svolgersi (attività industriali e artigianali, uffici, ospedali ecc.). Per ciascuna delle attività, vengono indicati i valori minimi richiesti di illuminamento medio mantenuto Em [lx], di resa cromatica Ra [-] e di UGR [-] (quest'ultimo parametro viene adoperato per valutare l'abbagliamento causato da sorgenti di luce artificiale, non fa riferimento in alcun modo alla luce naturale). Tra le varie attività e destinazioni d'uso previste, vengono anche forniti i requisiti illuminotecnici per quanto riguarda i locali scolastici, per i quali si rimanda alla norma UNI 10840: 2007 analizzata nel precedente paragrafo⁶⁶⁻⁶⁷.

5.3.3. CEN EN 17037: 2018

La norma "CEN EN 17037: 2018_Daylight in buildings" - oltre a richiamare i metodi di calcolo utili a verificare la disponibilità di luce naturale negli ambienti indoor - fornisce: gli strumenti e i requisiti minimi da rispettare per la protezione dall'abbagliamento; alcune prescrizioni e vincoli progettuali per garantire un'adeguata visione verso l'esterno; alcuni metodi e raccomandazioni in merito alla durata dell'esposizione alla radiazione solare diretta all'interno degli ambienti confinati.

A differenza delle norme finora citate, la pre-

Tipo di interno, compito visivo o attività	FLD _m [%]	Em [lx]	Ra [-]	Note
Aule giochi	≥ 5	≥ 300	≥ 80	
Nido	≥ 5	≥ 300	≥ 80	
Aule per lavoro manuale	≥ 3	≥ 300	≥ 80	
Aule scolastiche	≥ 3	≥ 300	≥ 80	L'illuminazione deve essere regolabile
Aule in scuole serali e per adulti	-	≥ 500	≥ 80	L'illuminazione deve essere regolabile
Sale lettura	≥ 3	≥ 500	≥ 80	L'illuminazione deve essere regolabile
Lavagna	-	≥ 500	≥ 80	Evitare le riflessioni speculari
Tavolo per dimostrazioni	-	≥ 500	≥ 80	In sale lettura 750 lx
Aule educazione artistica	≥ 3	≥ 500	≥ 80	
Aule educazione artistica in scuole d'arte	≥ 3	≥ 750	≥ 90	
Aule per disegno tecnico	≥ 3	≥ 750	≥ 80	
Aule per educazione tecnica e laboratori	≥ 3	≥ 500	≥ 80	
Aule lavori artigianali	≥ 3	≥ 500	≥ 80	
Laboratori di insegnamento	≥ 3	≥ 500	≥ 80	
Aule di pratica della musica	≥ 3	≥ 300	≥ 80	
Laboratori di informatica	≥ 3	≥ 300	≥ 80	
Laboratori linguistici	≥ 3	≥ 300	≥ 80	
Aule di preparazione e officine	≥ 3	≥ 500	≥ 80	
Ingressi	≥ 1	≥ 200	≥ 80	
Zone di circolazione, corridoi	≥ 1	≥ 100	≥ 80	
Scale	≥ 1	≥ 150	≥ 80	
Sale comuni per gli studenti, aula magna	≥ 2	≥ 200	≥ 80	
Sale professori	≥ 2	≥ 300	≥ 80	
Biblioteca: scaffali	-	≥ 200	≥ 80	Sul piano verticale al bordo dei libri
Biblioteca: zone di lettura	≥ 3	≥ 500	≥ 80	
Magazzini materiale didattico	≥ 1	≥ 100	≥ 80	
Palazzetti, palestre, piscine	≥ 2	≥ 300	≥ 80	
Mensa	≥ 2	≥ 200	≥ 80	
Cucina	≥ 1	≥ 500	≥ 80	
Bagni	≥ 1	≥ 100	≥ 80	

[66] UNI 12464: 2011_Luce e illuminazione: illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1.

[67] Materiale didattico: ANNA PELLEGRINO, "La normativa tecnica UNI EN 12464-1: 2011", Laboratorio disciplinare di progettazione fisico tecnica dell'edificio, a.a. 2018/2019, Politecnico di Torino.

sente normativa pone l'attenzione sugli effetti benefici che la luce naturale può avere sugli occupanti: l'esposizione alla luce del sole e la visione verso l'esterno, in modo particolare negli ambienti di apprendimento, possono infatti influire positivamente sul benessere psicofisico e sulla produttività degli studenti, provvedendo a regolarne i ritmi circadiani (responsabili dell'alternanza sonno-veglia) e a stimolarne la produttività e l'intelligenza emotiva. Per quanto concerne le prescrizioni relative alla protezione dall'abbagliamento, viene introdotto l'indice DGP [-] (Daylight glare probability), che rappresenta la probabilità che si verifichino fenomeni di abbagliamento per uno specifico punto di osservazione [Tabella 5.9]. Tale indice, per via della complessità di calcolo, viene generalmente ricavato tramite software computerizzati; è possibile tuttavia calcolarlo manualmente tramite le formule qui riportate, nella versione estesa⁽³⁾ e semplificata⁽⁴⁾. Al fine di garantire il soddisfacimento dei requisiti minimi, bisogna verificare che i valori di DGP non siano superiori a 0,45 per almeno il 5% delle ore di utilizzo dell'ambiente⁶⁸⁻⁶⁹.

A seconda dei valori di $DGP_{e<5\%}$ ottenuti, è possibile distinguere tre diversi livelli di protezione dall'abbagliamento all'interno dell'ambiente (minimo, medio ed elevato) [Tabella 5.10].

In merito alla visione verso l'esterno, la norma prevede che la vista dalla finestra contenga almeno una delle tre fasce (cielo, scenari urbani e/o naturali, persone/oggetti in primo piano) per almeno il 75% dello spazio utilizzato. Anche in questo caso, in relazione al numero di

fasce visibili e alla distanza della vista (presenza di ostruzioni esterne che possono limitare la visione) si possono distinguere tre diversi livelli in termini di qualità della vista (minimo, medio ed elevato) [Tabella 5.11]. Infine, in riferimento al tempo di esposizione minimo alla radiazione solare (Sunlight exposure), occorre verificare che la luce diretta penetri in ambiente per almeno un'ora e mezza nell'arco di una giornata, prendendo in considerazione un qualsiasi giorno compreso tra il 1° febbraio e il 21 marzo. A seconda del numero di ore in cui viene garantita la penetrazione della radiazione solare diretta, vengono definiti tre livelli qualitativi (minimo, medio ed elevato) rispetto al grado di soleggiamento degli ambienti⁶⁸⁻⁶⁹ [Tabella 5.12].

(3) DAYLIGHT GLARE PROBABILITY (FORMULA ORIGINARIA)

$$DGP [\%] = 5,87 \cdot 10^{-5} \cdot E_v + 9,18 \cdot$$

$$10^{-2} \log \left(1 + \sum_j \frac{L_{s,j}^2 \omega_{s,j}}{E_v^{1,87} P_j^2} \right) + 0,16$$

$E_v [lx]$ = illuminamento verticale (misurato su un piano verticale all'altezza degli occhi)

L_s = luminanza della sorgente luminosa

ω = angolo solido della sorgente luminosa

P = indice di posizione della sorgente luminosa

(4) DAYLIGHT GLARE PROBABILITY (FORMULA SEMPLIFICATA)

$$DGPs [\%] = 6,22 \cdot 10^{-5} E_v + 0,184$$

$E_v [lx]$ = illuminamento verticale (misurato su un piano verticale all'altezza degli occhi)

▼ TABELLA 5.9

Criteri di valutazione dell'abbagliamento: confronto tra i valori di DGP (Daylight Glare Probability)

© Elaborazione grafica dell'autore sulla base dei dati presenti nella norma CEN EN 17037: 2018

Appena percettibile	$DGP \leq 0,35$
Accettabile	$0,35 < DGP \leq 0,40$
Fastidioso	$0,40 < DGP \leq 0,45$
Intollerabile	$DGP \geq 0,45$

▼ TABELLA 5.10

Livelli raccomandati di protezione dall'abbagliamento per uno specifico punto di osservazione

© Elaborazione grafica dell'autore sulla base dei dati presenti nella norma CEN EN 17037: 2018

Grado di protezione dall'abbagliamento	$DGP_{e<5\%}$ [-]
Minimo	0,45
Medio	0,40
Elevato	0,35

▼ TABELLA 5.11 Livelli raccomandati di visione verso l'esterno per uno specifico punto di osservazione

© Elaborazione grafica dell'autore sulla base dei dati presenti nella norma CEN EN 17037: 2018

Livelli raccomandati di visione verso l'esterno attraverso le aperture	Parametri		
	Angolo orizzontale della visione verso l'esterno	Distanza della vista esterna	Numero di fasce visibili per almeno il 75% della superficie utilizzata - cielo - orizzonte (paesaggio urbano/naturale) - oggetti in primo piano
Minimo	$\geq 14^\circ$	≥ 6 m	1 (orizzonte)
Medio	$\geq 28^\circ$	≥ 20 m	2
Elevato	$\geq 54^\circ$	≥ 50 m	3

▼ TABELLA 5.12 Livelli raccomandati di esposizione alla radiazione solare diretta (Sunlight exposure)

© Elaborazione grafica dell'autore sulla base dei dati presenti nella norma CEN EN 17037: 2018

Livelli raccomandati di esposizione alla radiazione solare diretta	Sunlight exposure Tempo di esposizione alla luce del Sole
Minimo	1,5 ore
Medio	3,0 ore
Elevato	4,0 ore

[68] CEN EN 17037: 2018_Daylight in buildings.

[69] CLOTILDE PIERSON, JAN WIENOLD, MAGALI BODART, Daylight discomfort glare evaluation with evalglare: influence of parameters and methods on the accuracy of discomfort glare prediction, Buildings 2018, Volume 8 (94).

PARTE III



La scuola Bernardino Drovetti di Torino
Vista del fronte sud dopo l'intervento

© Elaborazione grafica
dell'autore



Nel seguente capitolo viene introdotto e analizzato l'Istituto Bernardino Drovetti di Torino, selezionato come caso studio per questo lavoro di tesi in quanto presenta alcune caratteristiche che lo rendono particolarmente interessante dal punto di vista illuminotecnico. La scuola si è inoltre distinta negli ultimi anni per aver messo in atto proposte e iniziative volte a sperimentare nuove forme didattiche innovative sulla scia degli esempi esteri, ponendosi di assumere un importante ruolo paradigmatico all'interno del panorama scolastico italiano.

6 Introduzione al caso studio: l'Istituto Drovetti di Torino

6.1. INQUADRAMENTO: IL RAPPORTO CON IL QUARTIERE E LA CITTÀ

L'Istituto comprensivo Bernardino Drovetti di Torino, situato in via Bardonecchia al civico 34, ospita la scuola dell'infanzia e la scuola secondaria di primo grado ad indirizzo musicale. Si tratta di uno stabile degli anni '70 totalmente realizzato in calcestruzzo armato, con una superficie totale di circa 10'000 m² e un cortile esterno di oltre 12'000 m².

L'edificio sorge a nord del quartiere Cenisia [Figura 6.1], a pochi passi dal mercato di corso Racconigi e dalla stazione metro in piazza Rivoli. Il quartiere - insieme ai due quartieri limitrofi Cit Turin e San Paolo - vanta di un importante passato industriale che ha lasciato una forte impronta sul tessuto urbano; a tale periodo di intensa attività industriale corrispose inoltre una forte crescita demografica ed urbanistica, in particolare a partire dagli anni '60. Con la crisi degli anni '70, tuttavia, la vocazio-

ne industriale del quartiere iniziò a venire meno e molti stabilimenti furono costretti a chiudere i battenti. Anche nell'isolato in cui oggi è situata la scuola Drovetti era presente un edificio industriale, che venne abbattuto nel 1971 e sostituito pochi anni dopo con l'attuale plesso scolastico.

La scuola si trova in una posizione centrale e strategica rispetto alla città metropolitana di Torino, facilmente raggiungibile da ogni parte del centro abitato grazie alla vicinanza della metro e di alcuni principali assi viari (corso Vittorio Emanuele II, corso Francia, corso Trapani e corso Lecce).

L'area circostante la scuola gode inoltre di tutti i servizi essenziali per la cittadinanza, tra i quali anche il mercato rionale di corso Racconigi (il secondo più grande della città dopo quello di Porta Palazzo), il parco della Tesoriera (sito a nord-ovest dell'area di progetto), nonché di un consistente numero di scuole statali di ogni ordine e grado [Figura 6.2].



Figura 6.1

Individuazione della scuola Drovetti nel quartiere Cenisia
© Elaborazione grafica dell'autore

6.2. LA RINASCITA DELLA DROVETTI: PROGETTI E INIZIATIVE IN CUI È COINVOLTO L'ISTITUTO

La Drovetti non ha avuto affatto un passato facile: per via dei numerosi episodi di bullismo e dei continui problemi di disciplina la scuola ha rischiato più volte di chiudere. Nonostante la forte densità demografica del quartiere, i genitori preferivano infatti spostarsi e iscrivere i propri figli in altre scuole piuttosto che portarli in via Bardonecchia. La situazione è precipitata nel 2016, quando il numero di iscritti fu così esiguo che si pensò di chiudere la scuola ed utilizzarla come "polmone" in caso di lunghe manutenzioni in altre scuole della città⁷⁰⁻⁷¹. Fu forse proprio la difficile situazione in cui versava la Drovetti che spinse il comune, la circoscrizione 3 e la dirigenza scolastica ad attuare un piano volto a risollevarne le sorti della Drovetti, con l'obiettivo di trasformarla in un nuovo

polo che funga da modello per le altre scuole [Figure 6.3-6.4], in cui vengano sperimentate nuove forme di didattica innovativa sulla base degli esempi esteri.

I progetti in atto sulla scuola prevedono la realizzazione di spazi destinati alla musica, al teatro, al cinema e allo sport; sulla scia delle direttive proposte dal MIUR mirate all'innovazione della didattica e ad un nuovo modo di concepire gli spazi di apprendimento⁷².

6.2.1. IL LABORATORIO CITTÀ SOSTENIBILE: LA SCUOLA COME CENTRO CIVICO E L'EDUCATIONAL LIVING LAB

Il Laboratorio città sostenibile opera all'interno di ITER (Istituzione Torinese per una Educazione Responsabile) con il fine di promuovere progettualità mirate a sensibilizzare lo sviluppo urbano ecocompatibile e la trasformazione sostenibile della città. L'attività progettuale pone la sua attenzione su aspetti educativi e partecipativi rivolgendo un particolare interesse sul tema dell'edilizia scolastica⁷³. L'istituto Drovetti rappresenta la scuola principale su cui tali progetti verranno sperimentati, applicati e realizzati; essa è dunque destinata ad assumere un importante ruolo paradigmatico per il futuro dell'edilizia scolastica italiana. Tra le tante proposte progettuali in cui è coinvolto l'Istituto - in ottemperanza all'iniziativa "Scuola centro civico" promossa dall'Area Servizi Educativi della Città di Torino - vi è anche quella di trasformare la Drovetti in un "Civic Center", mirando ad aprire la scuola al quartiere e ad ospitare convegni, eventi culturali e qualsiasi altra attività di interesse pubblico. La scuola ben si presta

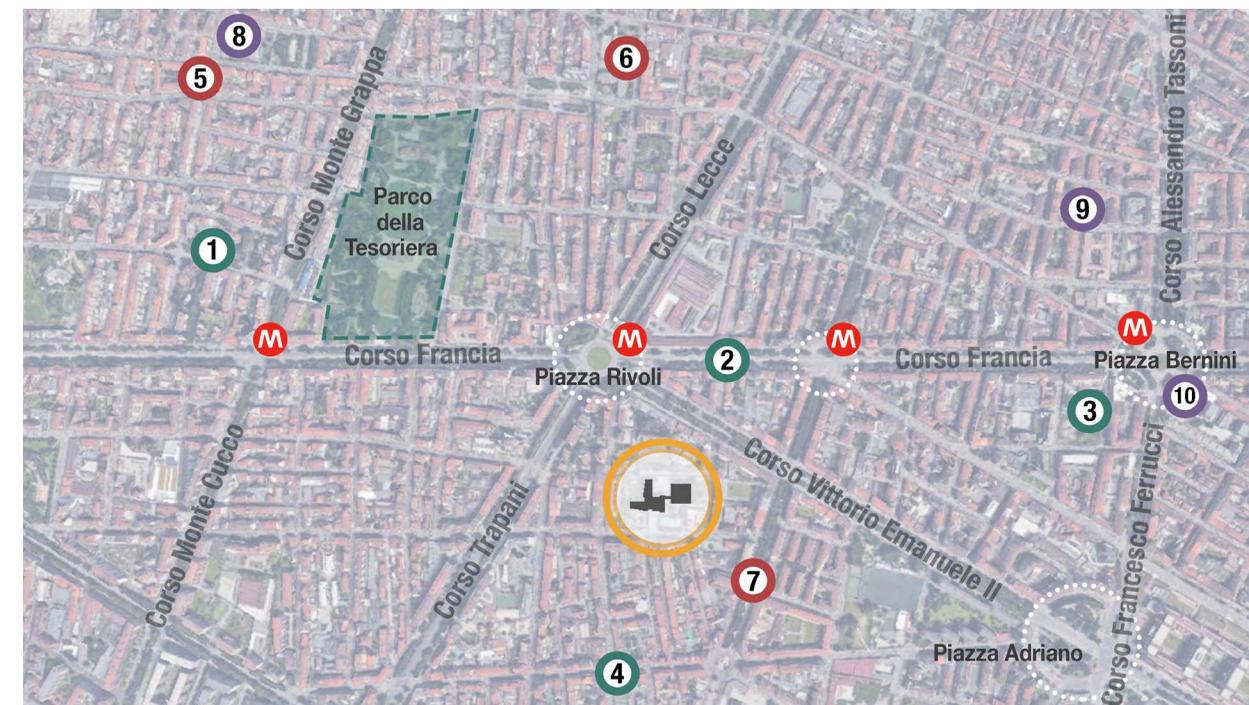


Figura 6.2

Individuazione dei principali assi viari, degli spazi verdi e delle altre scuole pubbliche presenti nelle vicinanze della scuola Drovetti

- | | |
|--|---|
| 1. Scuola dell'infanzia municipale | 6. Scuola primaria Italo Calvino |
| 2. Scuola dell'infanzia Duchessa Elena D'Aosta | 7. Scuola primaria Gabrio Casati |
| 3. Scuola dell'infanzia municipale | 8. Scuola secondaria di primo grado Schweitzer |
| 4. Scuola dell'infanzia "Happy & bright" | 9. Scuola secondaria di primo grado Costantino Nigra |
| 5. Scuola primaria Duca D'Aosta | 10. Scuola secondaria di primo grado Giovanni Pascoli |

infatti ad assumere tale ruolo, sia per l'elevata disponibilità di spazi (una superficie netta di più di 10'000 m² e un cortile esterno di oltre 12'000 m²), sia per la sua posizione strategica nella città di Torino. L'ampio e luminoso atrio a tutt'altezza, inoltre, potrebbe diventare un luogo di condivisione sociale adatto ad ospitare eventi per la comunità scolastica e la cittadinanza⁷⁴⁻⁷⁵.

Un altro progetto ambizioso, già in fase di realizzazione, è quello di utilizzare alcuni spazi della scuola come "Educational Living Lab",

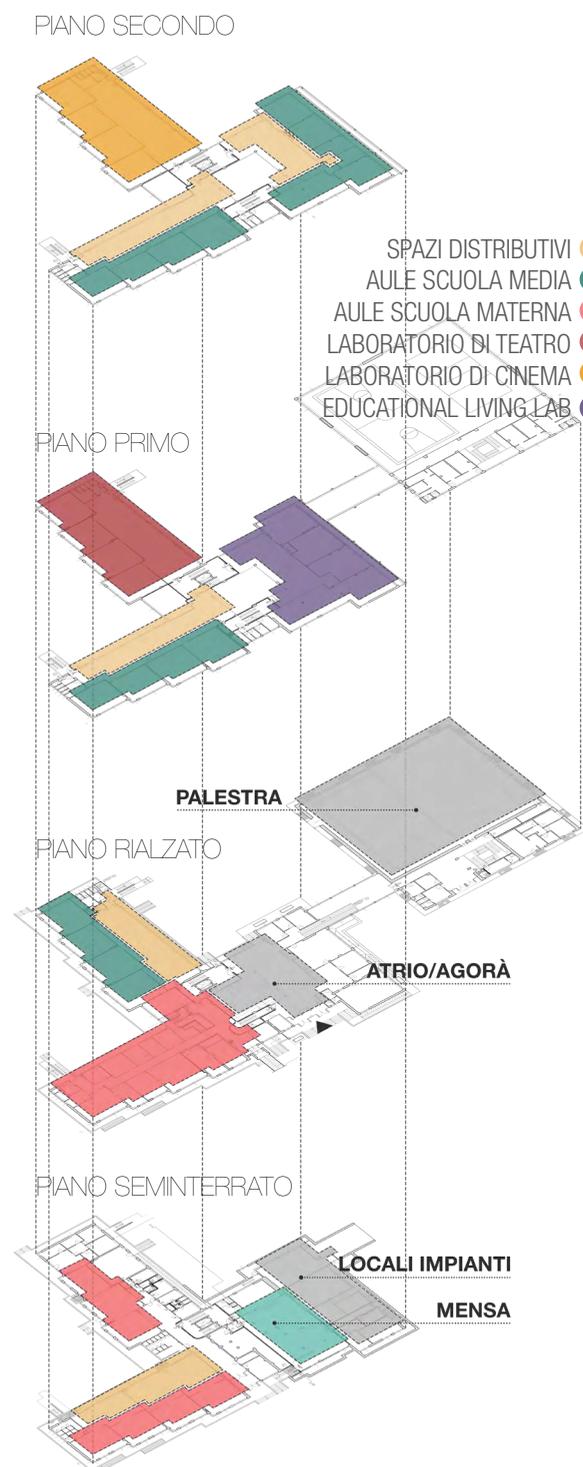
nei quali verranno teorizzati e sviluppati nuovi modelli per l'innovazione della didattica e il ripensamento dei luoghi per l'apprendimento. Si tratta dunque di ambienti laboratoriali specializzati, dotati di attrezzature adeguate che consentano di effettuare il testing diretto delle iniziative proposte tramite l'uso di tecnologie innovative e lo sviluppo di contenuti digitali. Tali ambienti saranno accessibili a tutte le comunità scolastiche della città, sotto la supervisione di un team di esperti e con la partecipazione attiva di studenti, docenti e cittadini⁷⁴.

[70] <https://www.lastampa.it/torino/quartieri/cenisia/2016/02/12/news/tropo-bullismo-e-pochi-iscritti-chiude-la-drovetti-1.36563538>

[71] <https://www.lastampa.it/torino/2014/10/31/news/in-fuga-dalla-drovetti-e-nelle-mani-dei-bulli-1.35608318>

6.3. ANALISI ARCHITETTONICA, DISTRIBUTIVA E FUNZIONALE

La scuola si sviluppa su quattro livelli, di cui uno parzialmente interrato, con una superficie di circa 10'000 m² e un cortile esterno di circa 12'500 m². Gli elementi che connotano e caratterizzano maggiormente l'edificio sono la struttura in calcestruzzo armato (lasciata a vista sia all'interno che all'esterno) e le finestre a nastro che corrono lungo le facciate principali (Vista 1). Le ampie aperture a nastro e le finestre ad angolo creano un interessante gioco di pieni e vuoti che contribuisce ad alleggerire la massiccia struttura in cemento armato [Figura 6.5]. L'ala est e l'ala ovest, inoltre, risultano essere sfalsati di mezzo piano al fine di caratterizzare maggiormente lo spazio e creare un suggestivo gioco di affacci nell'atrio di ingresso a tutt'altezza (Vista 10). Tale atrio, che costituisce senz'ombra di dubbio l'elemento più caratterizzante dell'edificio, risulta illuminato da sei ampi lucernari in plexiglass che garantiscono una notevole quantità di luce naturale in tutti gli ambienti distributivi, connotando allo stesso tempo gli spazi interni della scuola (Vista 9). La presenza di due ampi corpi scala, posti in posizione centrale rispetto alla pianta dell'edificio, consente il collegamento tra i vari piani e tra le due parti sfalsate dell'edificio. Separata dalla struttura principale vi è la palestra, che si presenta come un elemento monolitico anch'esso realizzato in calcestruzzo, alla quale è possibile accedere attraverso una passerella coperta che funge da cerniera tra le due parti (Vista 6). Al piano seminterrato e rialzato è presente la



sezione della scuola dell'infanzia, che gode di un ingresso privato realizzato tramite una passerella illuminata da oblò in plexiglass (Vista 5). Al primo e al secondo piano vi sono invece le classi della scuola secondaria di primo grado ad indirizzo musicale, alle quali si accede attraverso ampi corridoi distributivi (Vista 14). Alcuni spazi delle ale est e nord del primo e secondo piano verranno invece adibiti alle nuove attività laboratoriali predisposte dal "Laboratorio città sostenibile", tra le quali il laboratorio di cinema, il laboratorio di teatro e l'EDULab (Educational Living Lab)⁷⁴ [Figura 6.6-6.7].

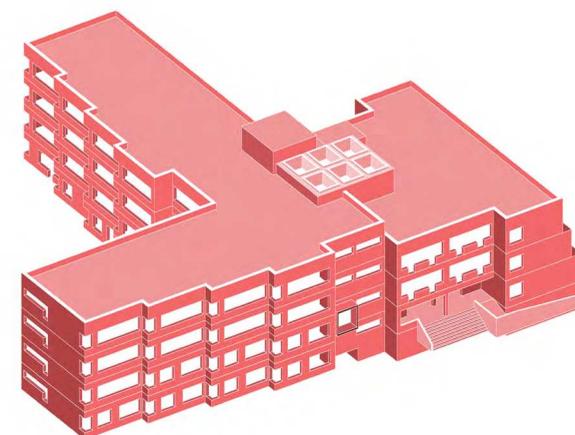


Figura 6.5
Modello 3D dell'edificio: le finestre a nastro e i lucernari
© Elaborazione grafica dell'autore

Figura 6.6
Analisi delle funzioni per i principali ambienti della scuola
© Elaborazione grafica dell'autore

Figura 6.7
I nuovi spazi per l'EDULab in fase di allestimento
© foto di Anna Pellegrino (dicembre 2019)

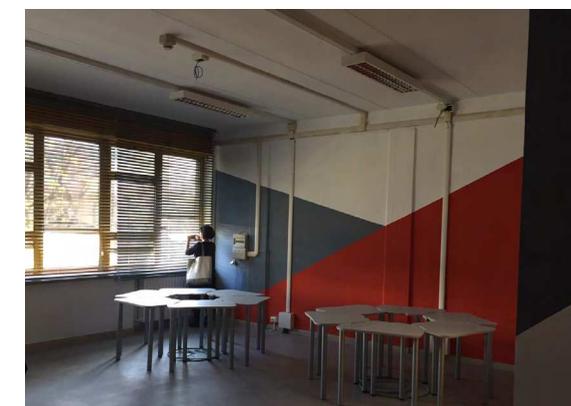
[72] <http://www.torinotoday.it/scuola/nuovo-progetto-drovetti.html>
[73] http://www.comune.torino.it/iter/servizi/laboratorio_citta_sostenibile/index.shtml



Figura 6.3
Inaugurazione del nuovo anno scolastico_11 settembre 2017
© <http://www.spaziotorino.it/scatto/?p=7637>



Figura 6.4
Inaugurazione del nuovo anno scolastico_11 settembre 2017
© <http://www.spaziotorino.it/scatto/?p=7637>



[74] <https://www.torinocitylab.it/it/experiment-to/edulab>
[75] <https://www.torinocitylab.it/it/submit-to/challenge/educational-lab>

**STATO DI FATTO_ PLANIMETRIA GENERALE
CON PIANTA DELLA COPERTURA**



7

8

6

4

5

3

1

2

13.80

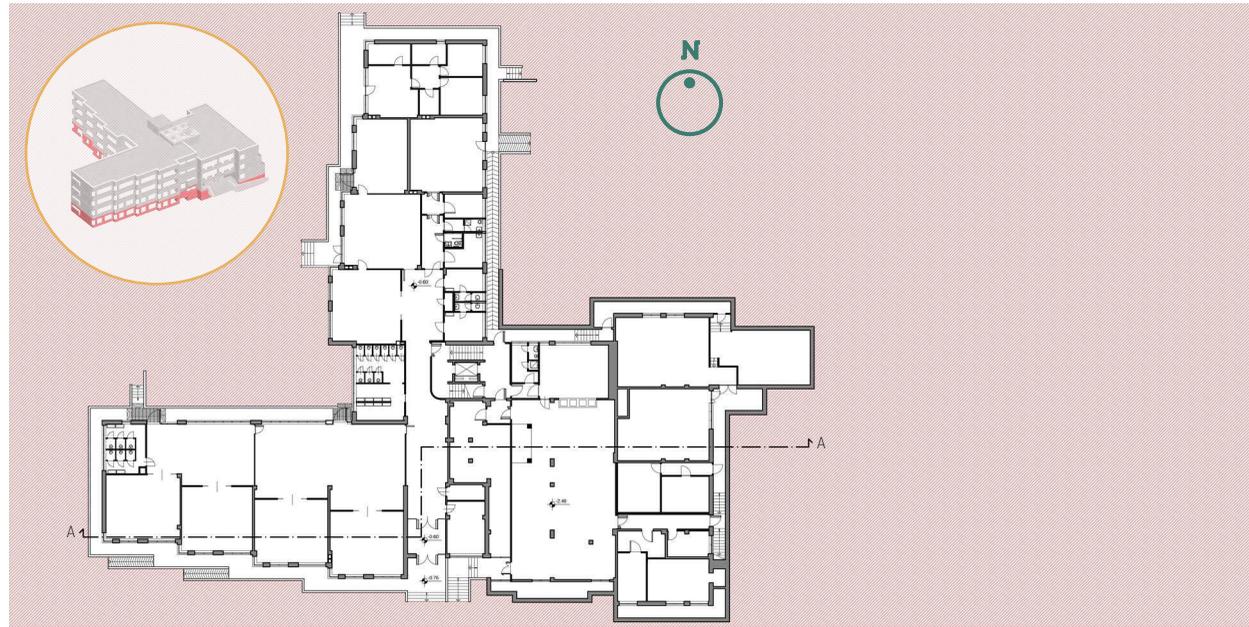
PROSPETTO SUD



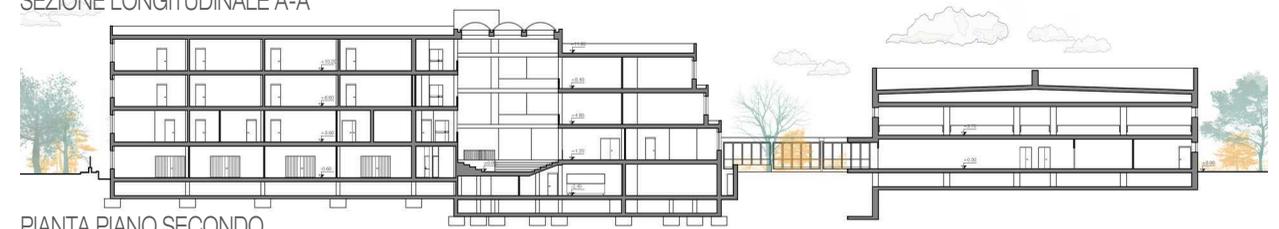
PIANTA PIANO RIALZATO



PIANTA PIANO SEMINTERRATO



SEZIONE LONGITUDINALE A-A



PIANTA PIANO SECONDO



PIANTA PIANO PRIMO



6.4. RILIEVO FOTOGRAFICO E PERCETTIVO

Durante il primo sopralluogo è stata fatta una prima analisi fotografica e percettiva sullo stato di fatto e sulle condizioni di conservazione della scuola, ponendo un'attenzione particolare sulle caratteristiche dell'involucro trasparente e i sistemi di schermatura adoperati. In generale si è riscontrato un pessimo stato di conservazione di tutti gli elementi che costituiscono l'involucro trasparente: quasi tutti gli infissi sono realizzati con telai in ferro con bassissime prestazioni termiche, ad eccezione di alcune finestre al piano seminterrato e rialzato (di pertinenza della scuola materna) recentemente sostituite, per le quali sono stati utilizzati dei telai in alluminio con prestazioni termiche decisamente migliori (Vista 8). Quasi tutte le finestre sono munite di vetrocamera; gli infissi del fabbricato della palestra montano invece un vetro

singolo con prestazioni termiche ulteriormente peggiorative (Vista 6). Per gli ambienti esposti a sud sono state adoperate delle veneziane interne orientabili e impacchettabili con il fine di schermare la radiazione diretta ed evitare fenomeni di abbagliamento, che si presentano tuttavia in un pessimo stato di conservazione (Vista 12). Per le finestre esposte ad est e ad ovest, invece, sono state montate delle tende esterne a rullo direttamente ancorate al telaio, anch'esse nella maggior parte dei casi inutilizzabili in quanto deteriorate e rovinate (Vista 11). Nelle pagine seguenti vengono riportate alcune immagini rappresentative della scuola, utili a descriverne le principali caratteristiche architettoniche, distributive e funzionali; nonché a metterne in risalto le principali criticità riscontrate nella lettura dello stato di fatto, in particolare in merito all'involucro trasparente.

1_Vista del fronte sud dal cortile interno



2_Vista del fronte sud dall'ingresso principale



3_Vista del fronte sud: gli alberi ad alto fusto



5_Vista della passerella dal cortile

La passerella, che funge da ingresso privato per la scuola dell'infanzia, è illuminata da oblò posti lungo le pareti perimetrali e in copertura. Gli oblò, realizzati in plexiglass con apertura a vasistas, sono irrimediabilmente danneggiati e necessitano di essere sostituiti



4_Vista del fronte est

Le finestre al primo e secondo piano presentano delle tende esterne a rullo in pessimo stato di conservazione. Al piano seminterrato e rialzato sono presenti delle inferriate a protezione da eventuali atti vandalici.



6_Vista della palestra dal cortile

L'edificio della palestra si presenta come un corpo a se stante separato dall'edificio principale, dal quale vi si può accedere tramite una passerella coperta. I serramenti di accesso alla palestra sono composti da vetri singoli e telaio in ferro, con prestazioni termiche molto scarse. I telai presentano parecchi fenomeni di degrado, corrosione e distacco della finitura superficiale (foto a destra).



7_Vista dal cortile dei corridoi distributivi esposti ad est



9_Vista dei lucernari dal secondo piano



8_Vista del fronte nord-ovest dal cortile

Come si evince dalla foto, gran parte dei serramenti del piano rialzato (di pertinenza della scuola materna) sono stati recentemente sostituiti con infissi in alluminio con prestazioni termiche migliori. Le finestre esposte ad ovest non presentano alcun sistema di schermatura solare.



10_Vista degli spazi distributivi al primo piano illuminati dai lucernai





11_Vista di un'aula del primo piano esposta ad est



12_Vista di un'aula del primo piano esposta a sud-est
Per il controllo dell'abbagliamento vengono adoperate delle veneziane interne impacchettabili con lamelle regolabili, che presentano tuttavia delle funzionalità ridotte per via del pessimo stato di conservazione. È necessario prevedere dei sistemi di protezione solare esterni al fine di minimizzare i carichi termici nei mesi più caldi.



Come si evince dalle foto, le schermature esterne sono deteriorate e andrebbero sostituite con tecnologie più innovative e funzionali. Considerata l'esposizione, bisogna inoltre prevedere dei sistemi di protezione solare al fine di evitare fenomeni di abbagliamento durante le prime ore del mattino. I telai, realizzati in ferro, sono caratterizzati da basse prestazioni termiche. Le guaine si presentano in uno stato di degrado avanzato e potrebbero essere causa di infiltrazioni.





13_Vista di un'aula del secondo piano esposta ad ovest



14_Vista del corridoio distributivo del secondo piano esposto ad est



La struttura del telaio individua più vetrate di dimensioni diverse, seguendo una geometria ben precisa che si ripete per tutti i serramenti. Ciò consente di avere più di una tipologia di apertura per ogni finestra (a battente, a vasistas).

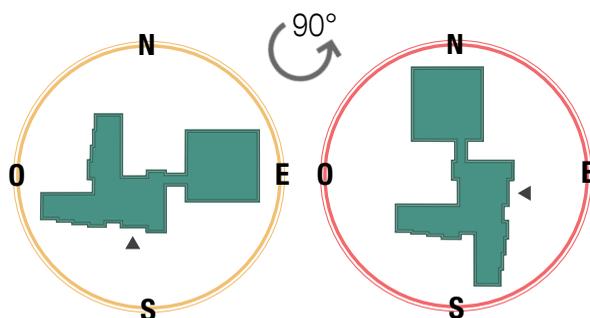
6.5. "LA SCUOLA GEMELLA": L'ISTITUTO ITALO CALVINO

Situata a ridosso del lato est del quartiere Parella, è stata costruita un'altra scuola che risulta essere l'esatta copia della scuola Drovetti, posta ad una distanza di solo 700 metri da quest'ultima: si tratta dell'Istituto Italo Calvino, che ospita la scuola primaria intitolata al noto scrittore del Novecento. L'edificio, sito in via Zumaglia al civico 41, presenta le medesime caratteristiche dimensionali e architettoniche della scuola Drovetti, con la sola e unica differenza che risulta essere ruotato di 90° rispetto all'edificio di via Bardonecchia [Figura 6.8].

Lo stabile è stato sottoposto ad ingenti lavori di ristrutturazione negli ultimi anni, attraverso la realizzazione di un cappotto esterno e la sostituzione dei vecchi serramenti con infissi in PVC, al fine di migliorarne le prestazioni energetiche. Con lo scopo di ravvivare e vivacizzare l'aspetto esterno della scuola, le superfici esterne dell'edificio sono state trattate con cromie differenti che si alternano per tutta la lunghezza dell'edificio. Anche nel caso dell'Istituto Italo Calvino non sono stati adoperati sistemi di schermature e ombreggiamento esterni, i quali sarebbero stati utili a schermare la radiazione solare diretta e ad evitare un surriscaldamento eccessivo degli ambienti nei mesi più caldi. Gli unici sistemi di controllo ad essere stati adottati sono le veneziane interne per il controllo dell'abbagliamento e la regolazione della luce [Figura 6.9].

Considerato che i due edifici presentano la stessa destinazione d'uso e le medesime ca-

ratteristiche architettoniche e dimensionali, l'Istituto di via Zumaglia rappresenta sicuramente un tassello importante per questo lavoro di tesi: i sistemi di controllo per l'illuminazione naturale adottati per l'Istituto Drovetti (analizzati nell'ultimo capitolo) potrebbero essere altresì replicati e testati per la scuola di via Zumaglia, valutando in particolare il diverso comportamento di tali sistemi per orientamenti diversi.



FRONTE NORD



FRONTE SUD



FRONTE SUD



FRONTE SUD



FRONTE EST



FRONTE EST_Vista dall'ingresso della scuola



▲ Figura 6.9

L'Istituto Italo Calvino: alcune foto dall'esterno
© Foto di Mario Giompapa (settembre 2019)

◀ Figura 6.8

La scuola Drovetti e l'Istituto Italo Calvino a confronto
© Elaborazione grafica dell'autore

Dopo aver effettuato una prima analisi percettiva e architettonica dell'edificio e sul suo attuale stato di conservazione; nel seguente capitolo, al fine di poter elaborare una proposta progettuale coerente ed adeguata, si è proceduto con uno studio più dettagliato relativamente alle prestazioni energetiche dell'involucro trasparente e alle attuali condizioni di illuminazione naturale degli ambienti interni (aule e corridoi distributivi), facendo emergere le principali criticità riscontrate nell'analisi dello stato di fatto e confrontando i risultati ottenuti con gli attuali valori normativi di riferimento.

7 Stato di fatto: involucro trasparente, luce naturale e prestazione energetica

7.1. ANALISI DELL'ILLUMINAZIONE NATURALE E DEI SERRAMENTI

La scuola Bernardino Drovetti risulta essere particolarmente interessante per quanto riguarda gli aspetti legati all'illuminazione naturale: la sua pianta articolata, le ampie finestre a nastro, i corridoi luminosi e la luce zenitale proveniente dai lucernari conferiscono alla struttura un'importante valenza dal punto di vista illuminotecnico [Figura 7.1], per tale motivo tali aspetti meritano di essere studiati ed esaminati nel dettaglio, al fine di poter elaborare una proposta progettuale coerente ed adeguata. Nei seguenti paragrafi vengono studiate in maniera dettagliata le attuali condizioni di illuminazione naturale della scuola, partendo da una scala più ampia (in riferimento all'isolato e alle eventuali ostruzioni causate dagli edifici limitrofi) fino ad arrivare ad un rilievo di dettaglio dei singoli serramenti e dei componenti schermanti adoperati.

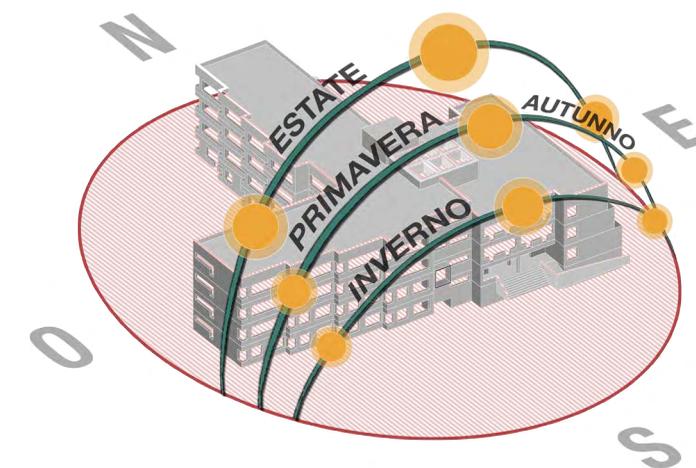


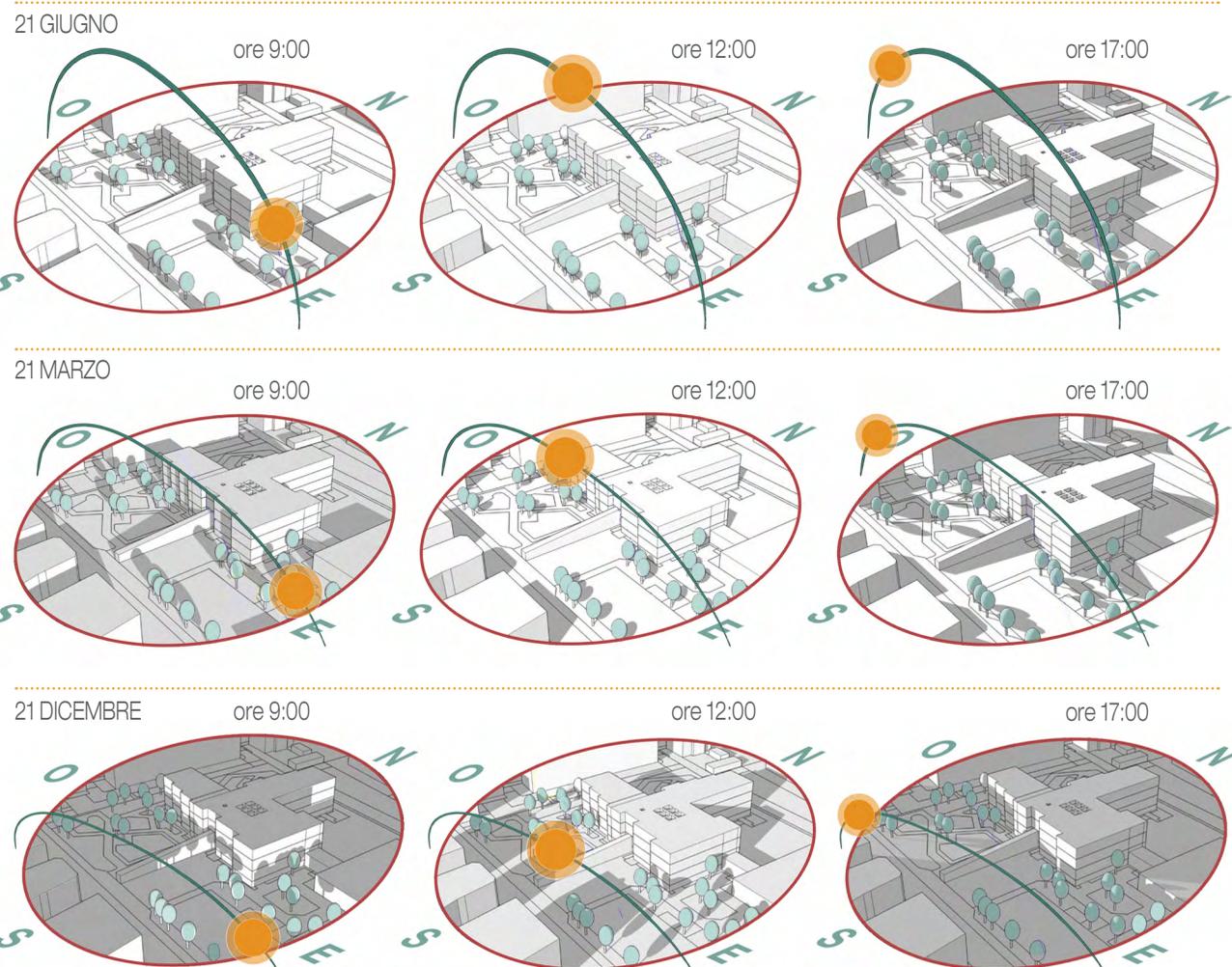
Figura 7.1

Rappresentazione schematica del percorso solare al variare delle stagioni in relazione all'edificio
© Elaborazione grafica dell'autore

7.1.1. A SCALA DI EDIFICIO:**STUDI DI OMBREGGIAMENTO**

La scuola si trova all'interno di un grande cortile (circa 12'500 m²) caratterizzato da una vegetazione ricca e rigogliosa, comprendente alberi ad alto fusto che possono in parte ostruire la penetrazione della radiazione solare diretta, fornendo allo stesso una protezione dall'abbagliamento. Ciò può accadere in modo particolare nei mesi invernali, quando si

ha un'altezza solare minore. L'ostruzione della componente diretta da parte delle alberature può rappresentare un vantaggio nei mesi estivi, in quanto una minore penetrazione della radiazione termica può influire positivamente sul raffrescamento degli ambienti. Inoltre, la vista della vegetazione dalle aperture influisce positivamente sulla produttività e sul benessere psico-fisico dei bambini, in quanto godono di un contatto visivo diretto con il mondo esterno



e con l'ambiente naturale. La scuola è circondata in tutte le direzioni da edifici residenziali piuttosto alti (fino a 7 piani fuori terra) che possono in parte ostacolare la penetrazione della luce, soprattutto nelle esposizioni ad est e ad ovest cui corrispondono altezze solari minori. Tuttavia, la presenza di tali edifici può anche rappresentare un vantaggio quando si hanno altezze solari minime (prima mattina e tardo pomeriggio), in quanto contribuiscono in larga parte al controllo dei fenomeni di abbagliamento [Figura 7.2].

Figura 7.2

Valutazione degli ombreggiamenti nei vari mesi dell'anno
© Elaborazione grafica dell'autore

7.1.2. A SCALA DI AMBIENTE: L'ATRIO, LE AULE E I CORRIDOI DISTRIBUTIVI

Subito all'ingresso della scuola si trova un ampio e arioso atrio, al cui centro è posto un piccolo anfiteatro dove bambini e insegnanti possono riunirsi in occasione di lezioni collettive o attività ricreative. Tale spazio, che si sviluppa per tutta l'altezza

dell'edificio creando un interessante gioco di affacci tra i piani sfalsati, è interamente illuminato dai lucernari posti in copertura, la cui luce permea dall'alto gli spazi distributivi della scuola [Figura 7.5].

Gran parte delle aule sono illuminate unilateralmente da ampie aperture a nastro che corrono per tutta la lunghezza della parete; le finestre ad angolo, presenti nelle aule a sud e ad ovest, ampliano la vista verso l'esterno e rendono più uniforme l'illuminazione degli ambienti [Figura 7.3]. Data l'illuminazione unilaterale e considerato che gli ambienti sono molto profondi,

**Figura 7.3**

Modello 3D schematico di un'aula tipo
© Elaborazione grafica dell'autore

Figura 7.4

Modello 3D schematico dei corridoi distributivi
© Elaborazione grafica dell'autore

si riscontra una scarsa uniformità di illuminamento per gran parte delle aule, con sbalzi di luminanza troppo marcati tra le zone vicino alle aperture e quelle poste in prossimità della parete opposta a quella finestrata. I corridoi, con una superficie netta di circa 165 m², si presentano come ampi spazi distributivi e di socializzazione, anch'essi illuminati unilateralmente da ampie finestre a nastro che si ripetono per l'intera lunghezza della parete [Figura 7.4].

7.1.3. A SCALA DI APERTURA: ABACO DEI SERRAMENTI E SISTEMI DI SCHERMATURA ADOPERATI

In questo paragrafo vengono analizzate nel dettaglio le caratteristiche geometriche dei singoli serramenti, nonché delle varie tipologie di schermature adoperate. Sono

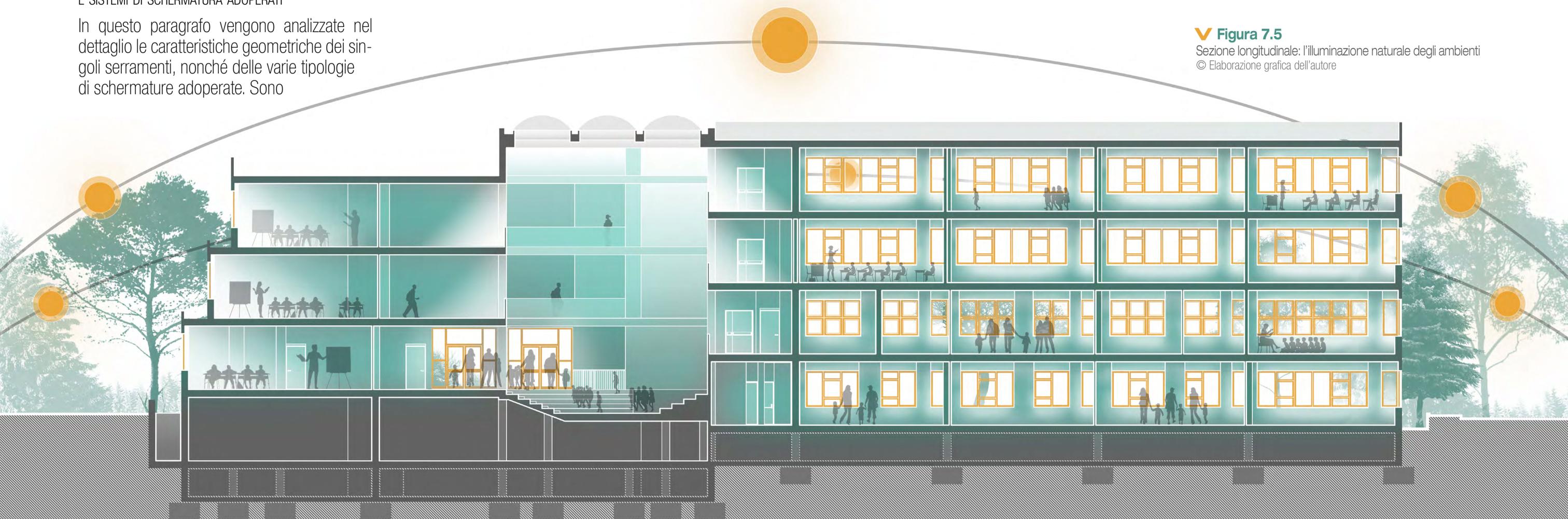
state individuate in tutto 63 tipologie di finestre (riportate nell'abaco dei serramenti), che sono state opportunamente individuate e catalogate a seconda delle diverse caratteristiche geometriche e termofisiche (tipologie di telaio e vetri adoperati). Per quanto concerne la componente trasparente, la maggior parte dei serramenti montano un doppio vetro con distanziatore, ad eccezione delle finestre della palestra che hanno una singola lastra di vetro. Quasi tutti i serramenti sono caratterizzati da un telaio in ferro (privo di taglio termico) con bassissime prestazioni termiche; fanno eccezione le fine-

stre della sezione materna recentemente sostituite (contrassegnate nell'abaco e nelle piante con un asterisco) le quali montano un telaio in alluminio con taglio termico, caratterizzate da prestazioni termiche decisamente migliori. Tutti i serramenti si aprono verso l'interno e presentano una struttura del telaio che individua più vetrate di dimensioni diverse, consentendo di avere più tipologie di apertura ("a battente" per le parti più grandi e "a vasistas" per le parti più piccole). Per quanto riguarda i sistemi di schermatura adoperati, in alcune finestre (per lo più ad est) sono state montate delle tende

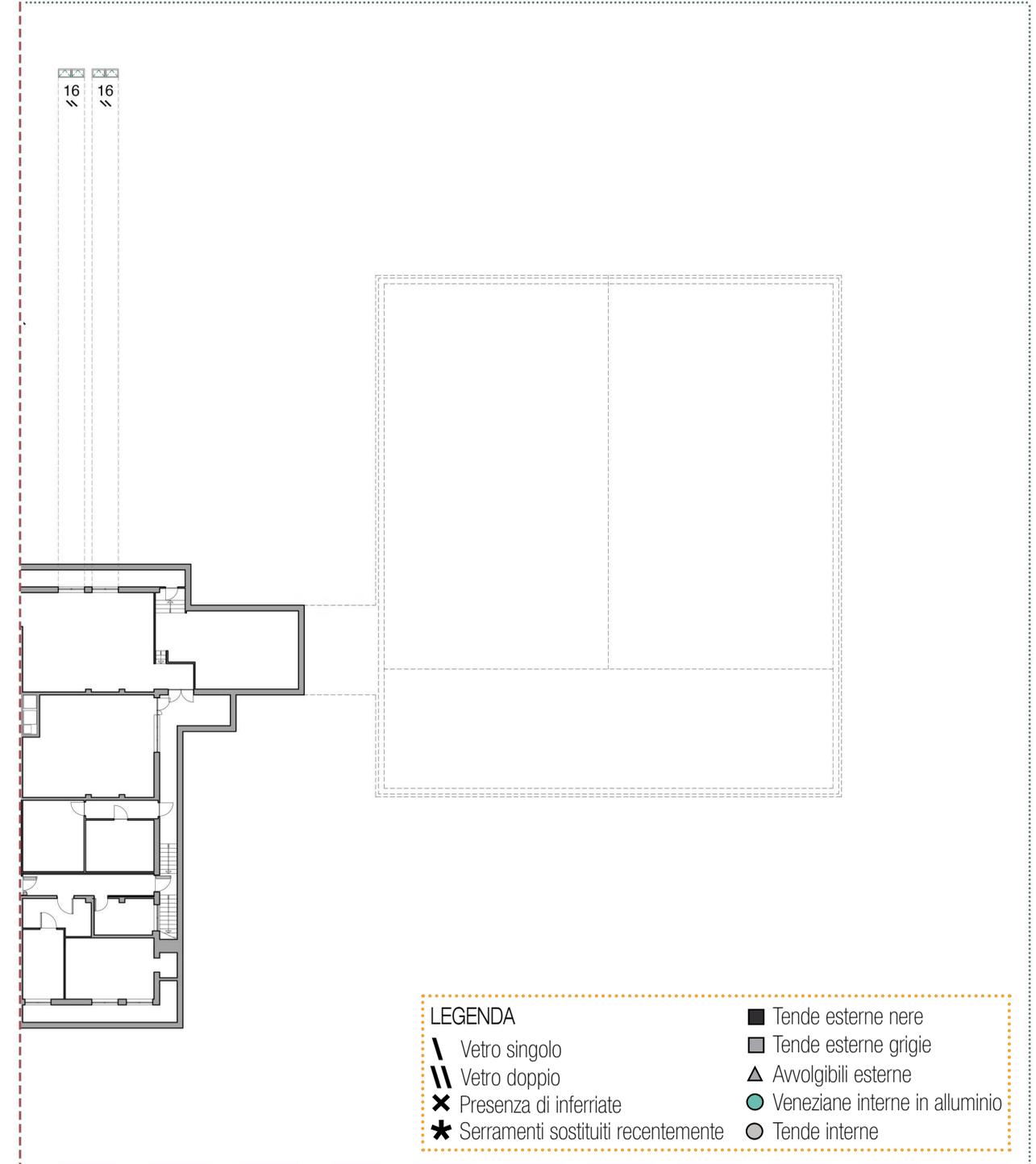
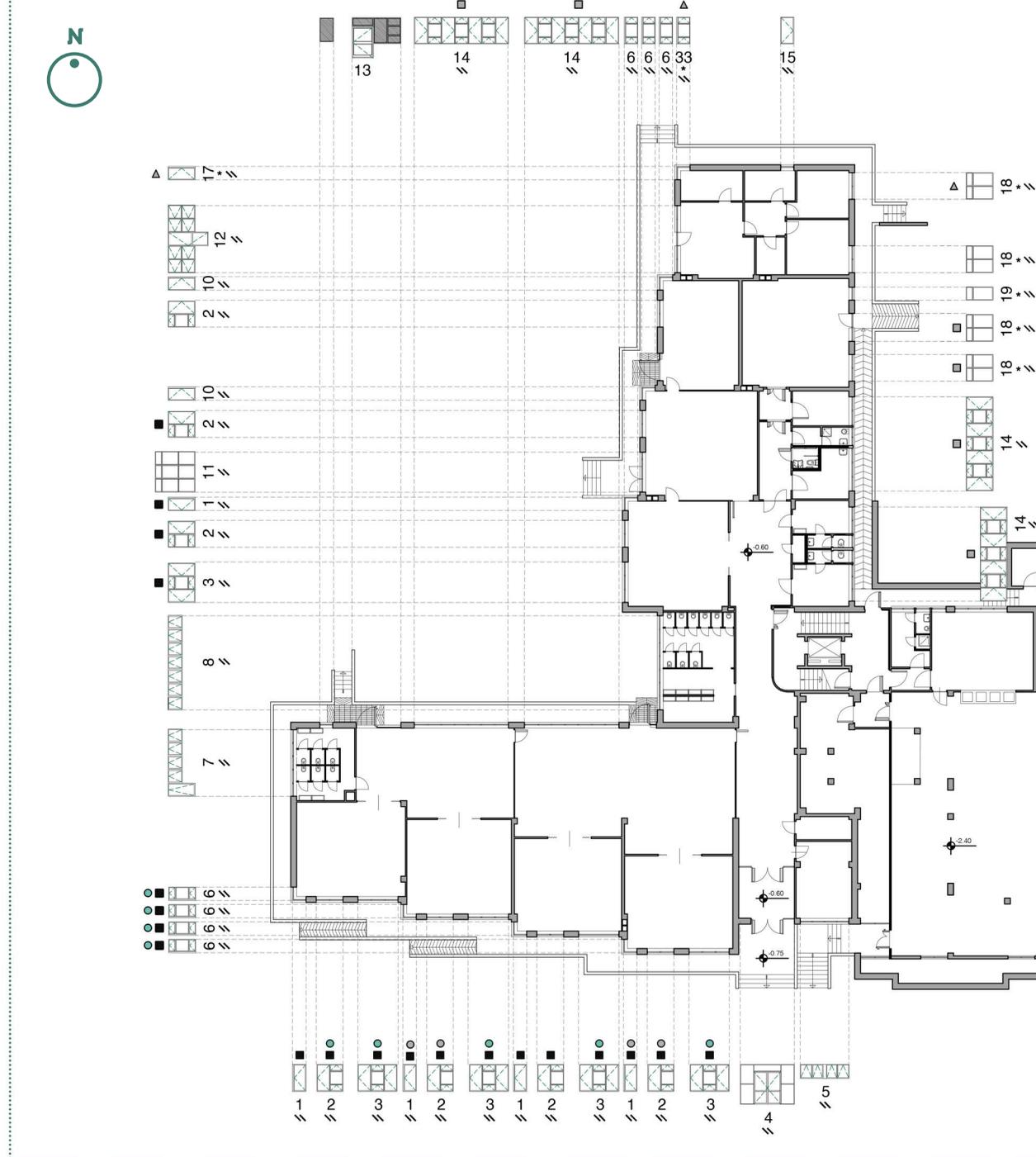
esterne a rullo direttamente ancora al telaio, che risultano essere inutilizzate per via del cattivo stato di conservazione. Per gli ambienti a sud, invece, sono state adoperate delle semplici veneziane interne con lamelle regolabili per il controllo dell'abbagliamento, anch'esse in pessimo stato di conservazione. Per i serramenti della scuola materna, recentemente sostituiti, sono state montate delle avvolgibili esterne con cassonetto interno. Infine, a protezione di eventuali atti vandalici, alcune finestre del piano seminterrato e rialzato presentano delle inferriate all'esterno.

Figura 7.5

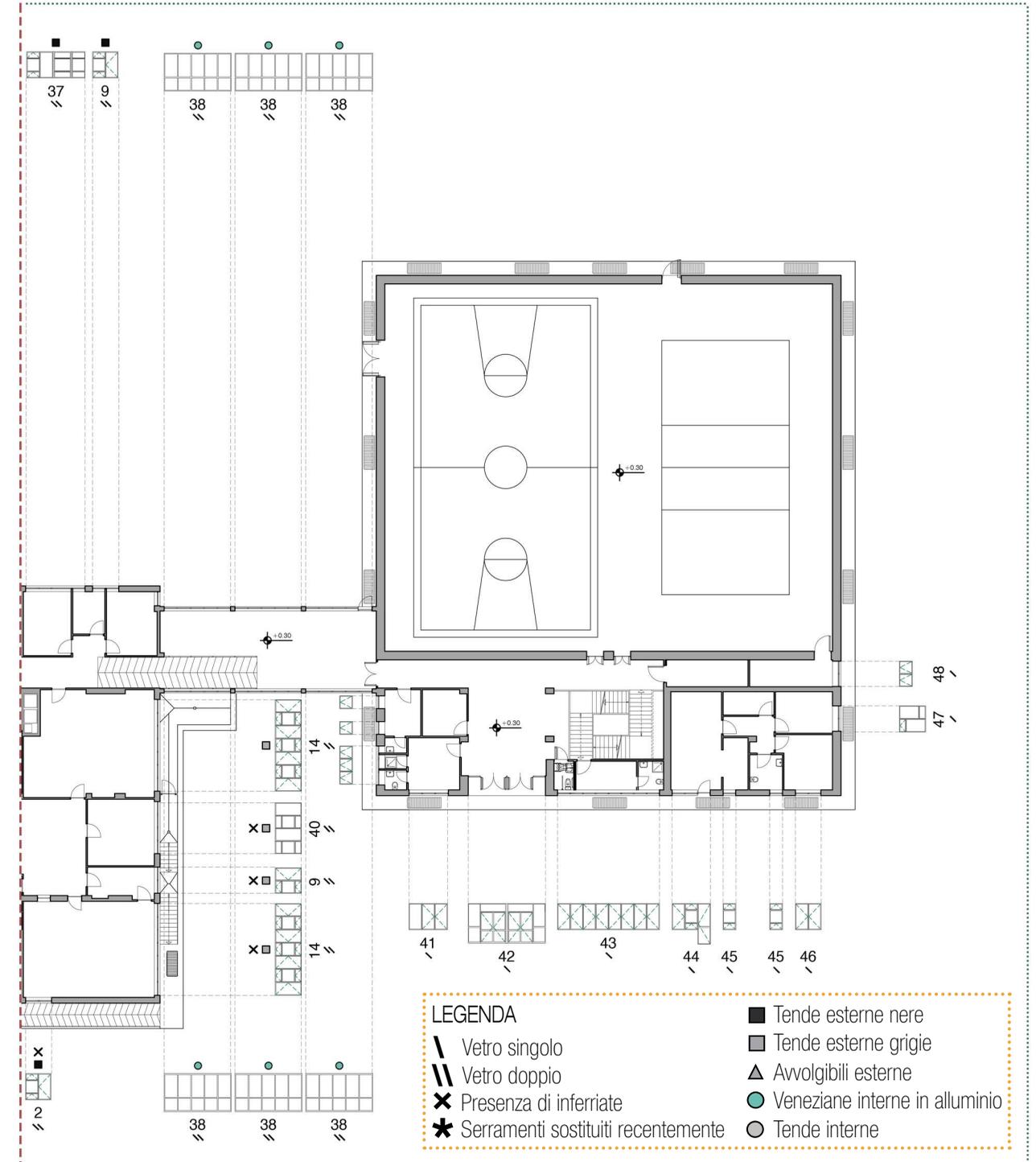
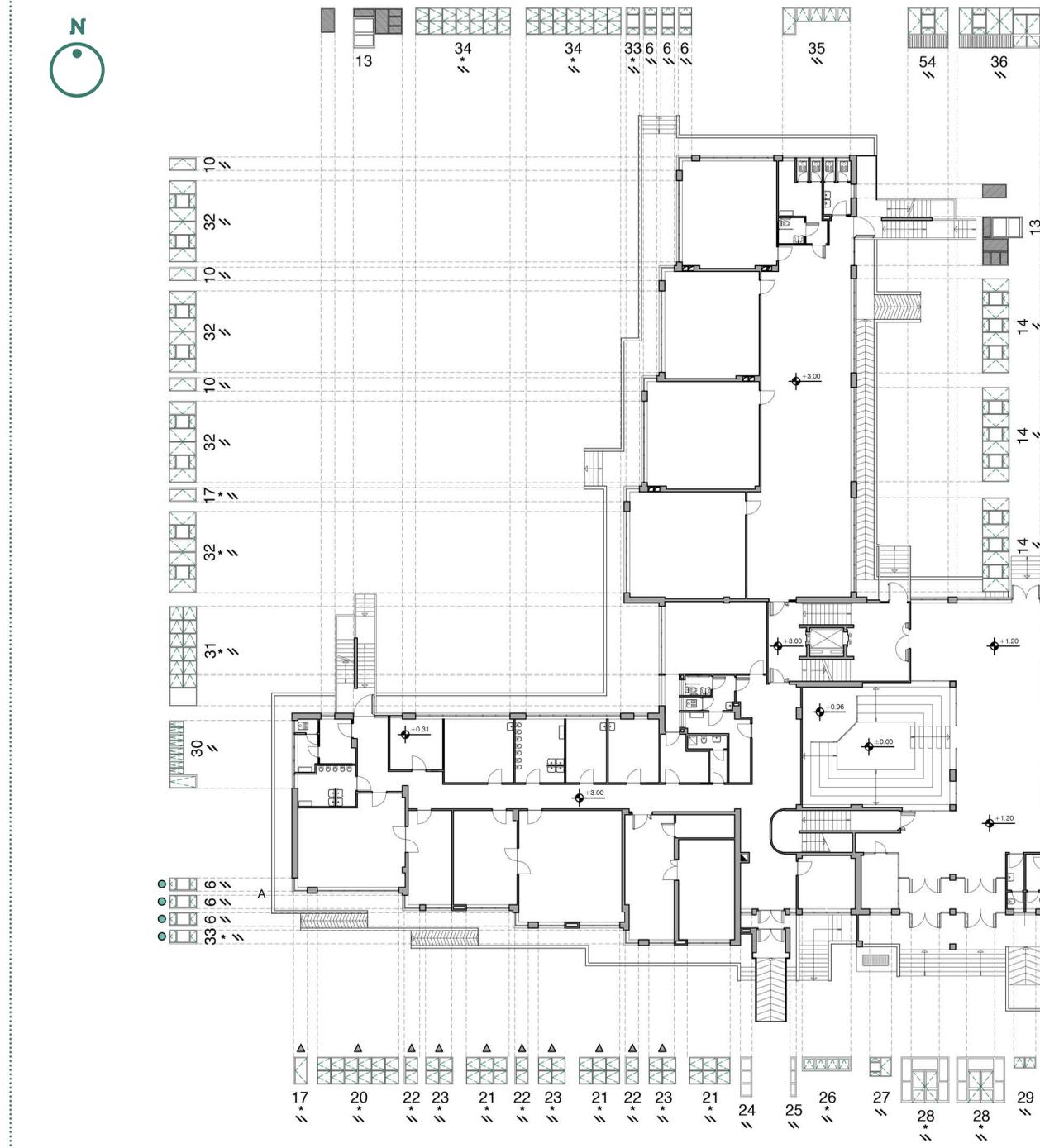
Sezione longitudinale: l'illuminazione naturale degli ambienti
© Elaborazione grafica dell'autore



PIANTA PIANO SEMINTERRATO_ INDIVIDUAZIONE DEI SERRAMENTI E DELLE SCHERMATURE ADOPERATE

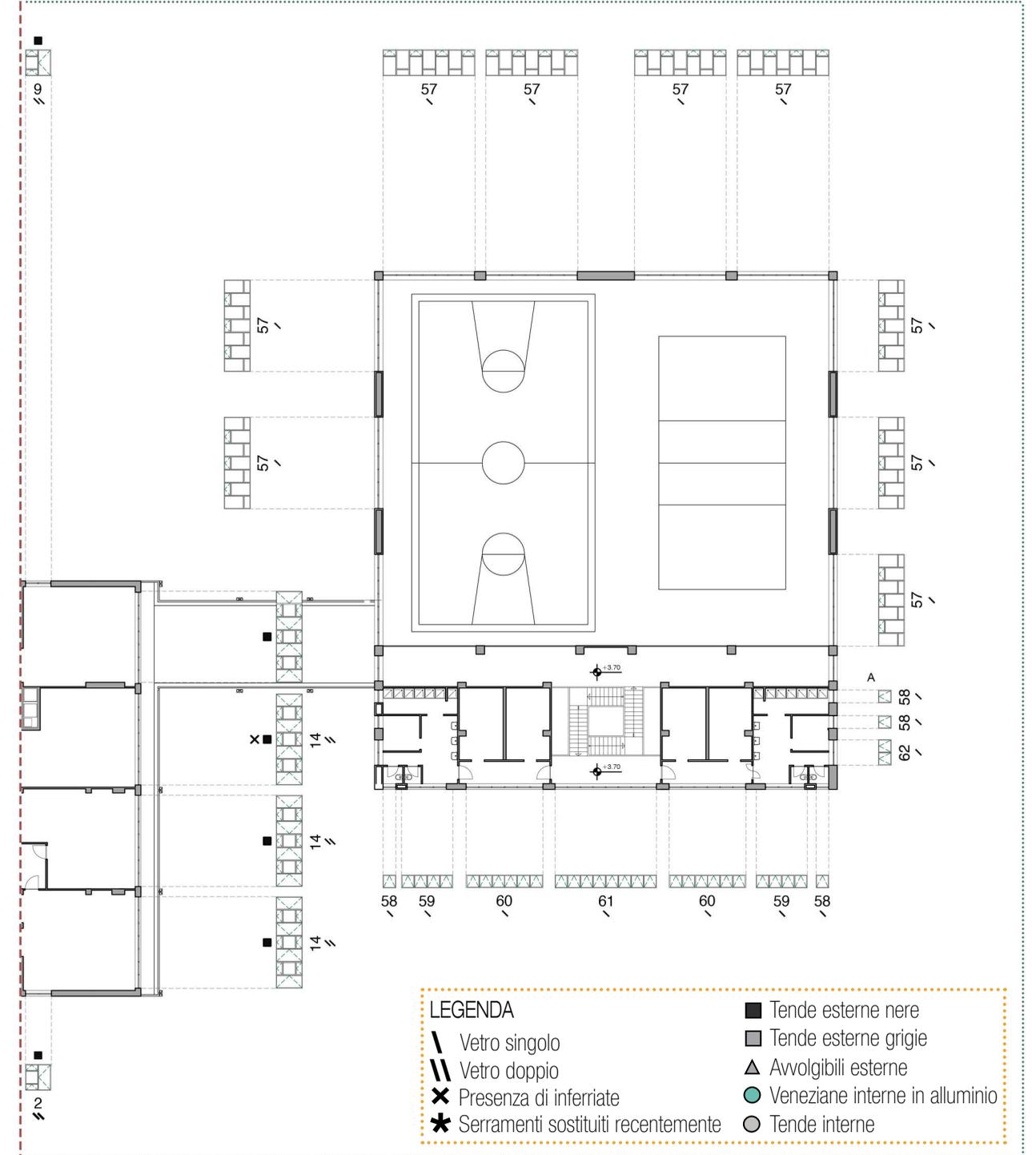


PIANTA PIANO RIALZATO_ INDIVIDUAZIONE DEI SERRAMENTI E DELLE SCHERMATURE ADOPERATE

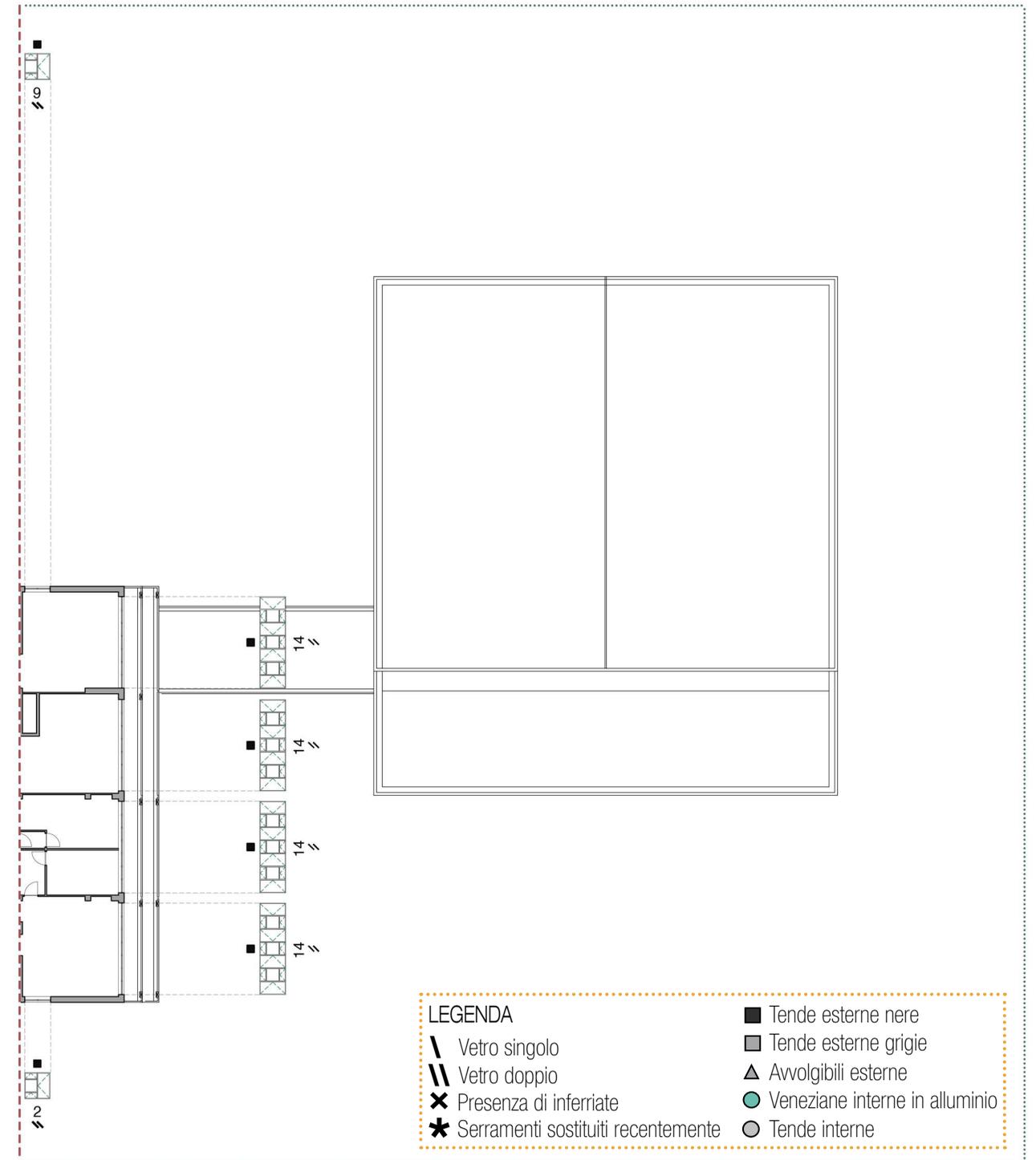


- LEGENDA**
- Vetro singolo
 - Vetro doppio
 - Presenza di inferriate
 - Serramenti sostituiti recentemente
 - Tende esterne nere
 - Tende esterne grigie
 - Avvolgibili esterne
 - Veneziane interne in alluminio
 - Tende interne

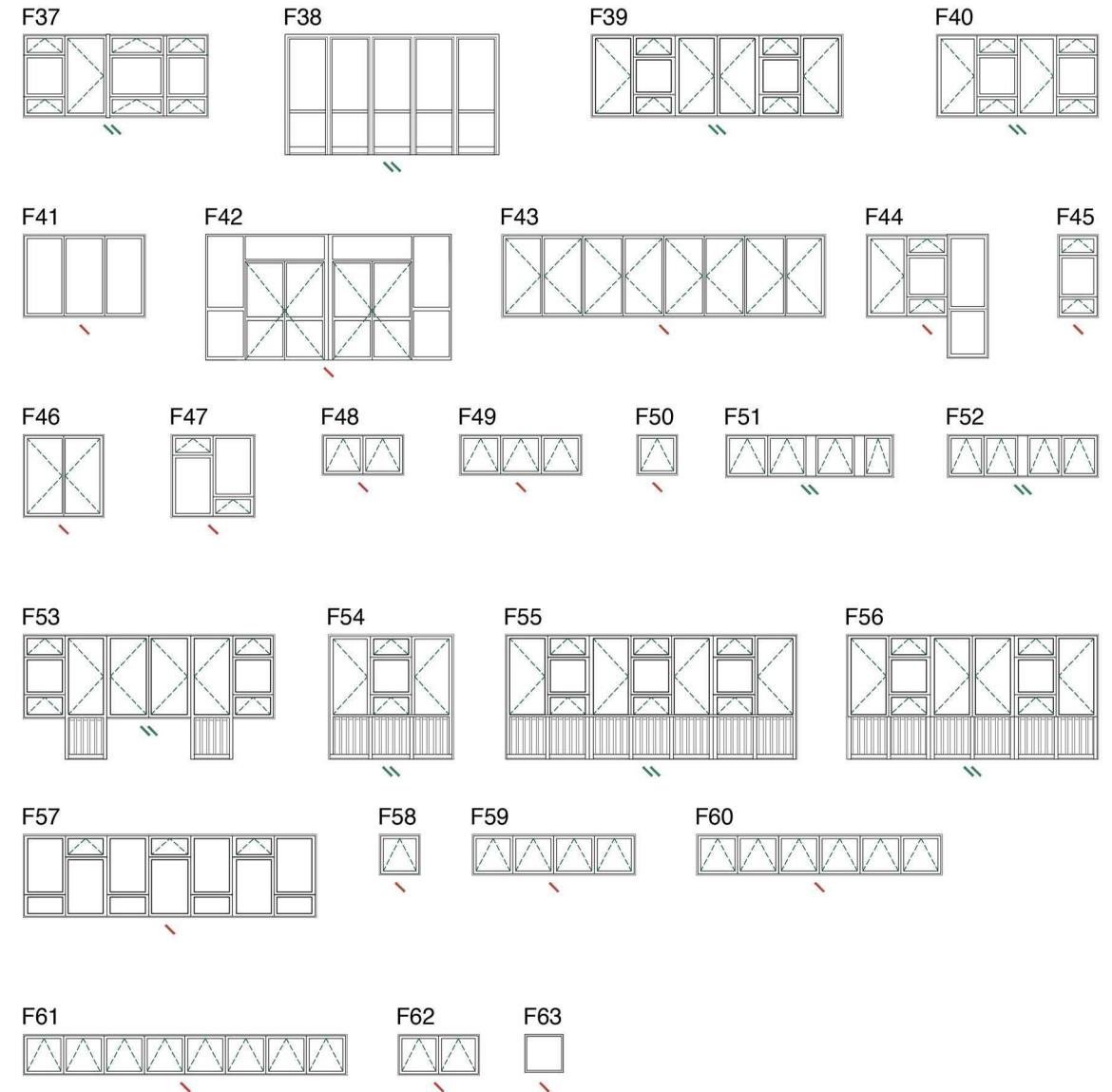
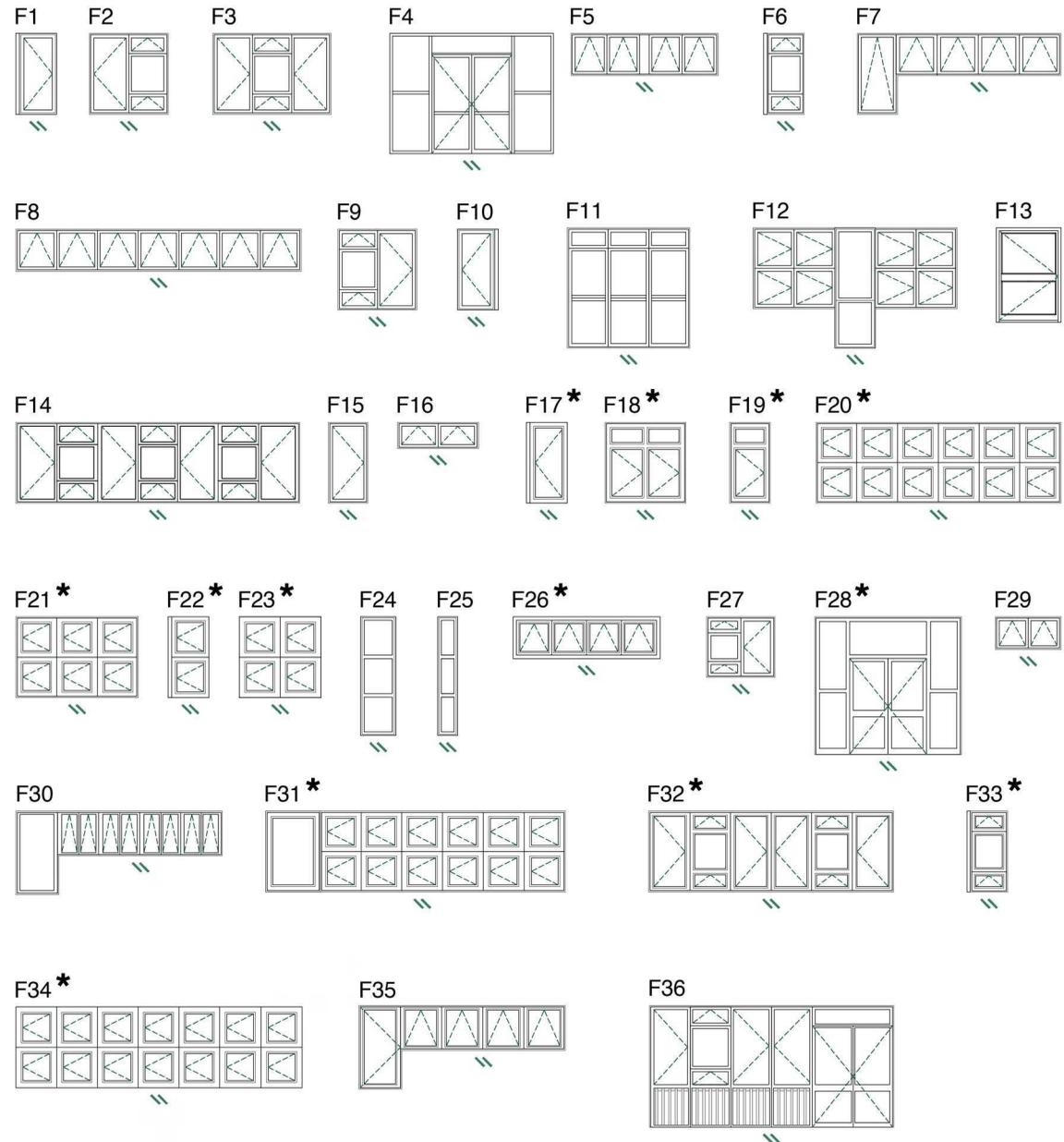
PIANTA PIANO PRIMO_ INDIVIDUAZIONE DEI SERRAMENTI E DELLE SCHERMATURE ADOPERATE



PIANTA PIANO SECONDO_ INDIVIDUAZIONE DEI SERRAMENTI E DELLE SCHERMATURE ADOPERATE



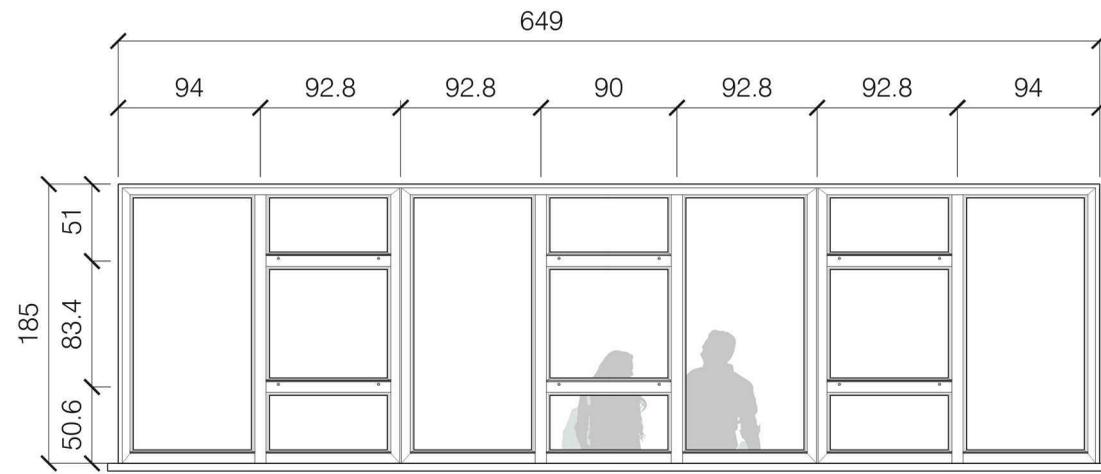
ABACO DEI SERRAMENTI



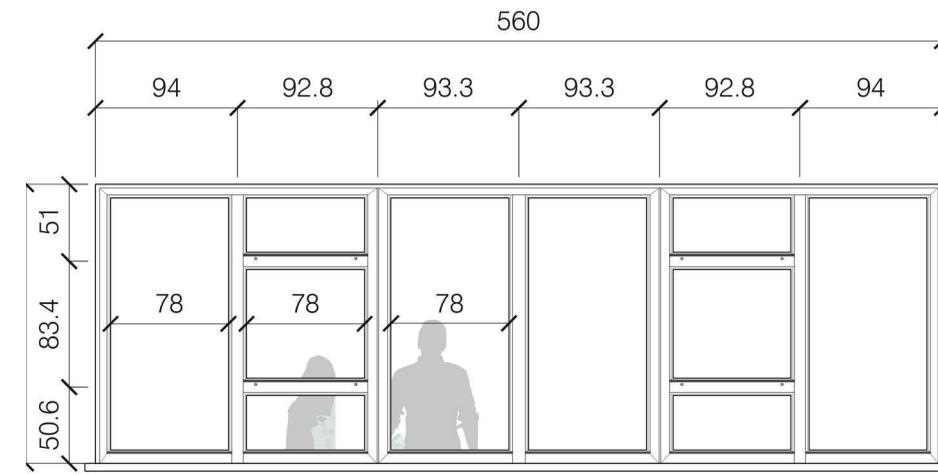
LEGENDA

-  Vetro singolo
-  Vetro doppio
-  Serramenti sostituiti recentemente

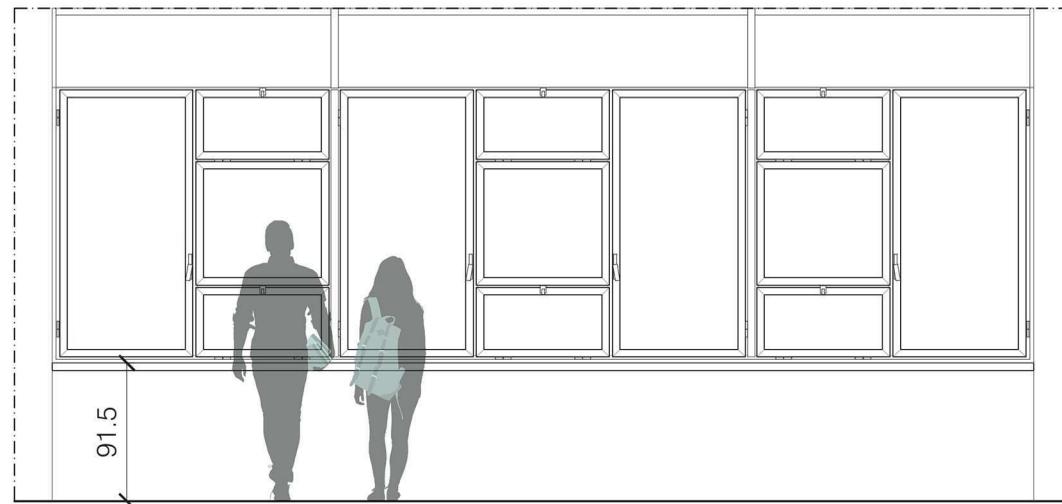
DETTAGLI DEI SERRAMENTI



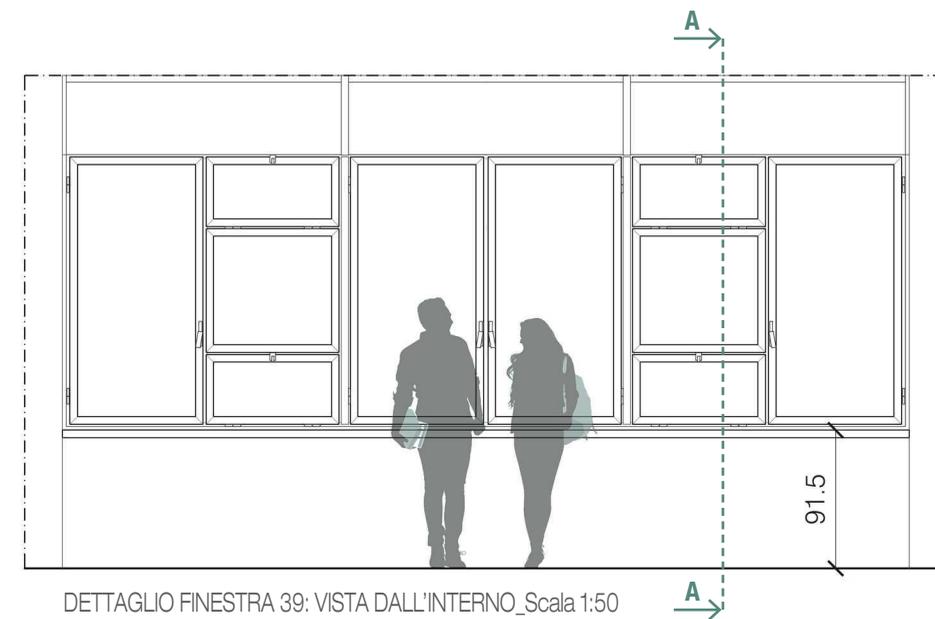
DETTAGLIO FINESTRA 14: VISTA DALL'ESTERNO_Scala 1:50



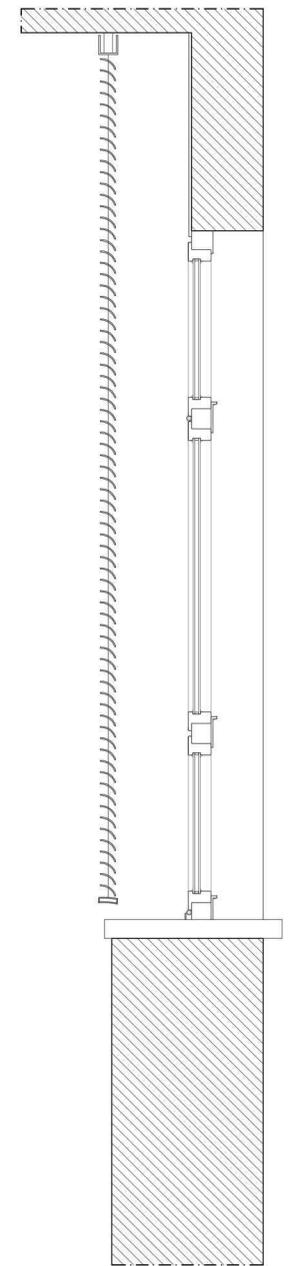
DETTAGLIO FINESTRA 39: VISTA DALL'ESTERNO_Scala 1:50



DETTAGLIO FINESTRA 14: VISTA DALL'INTERNO_Scala 1:50



DETTAGLIO FINESTRA 39: VISTA DALL'INTERNO_Scala 1:50



SEZIONE A-A: _Scala 1:20

7.2. ANALISI DELLE PRESTAZIONI ENERGETICHE DELL'INVOLUCRO TRASPARENTE

Per ogni tipologia di finestra sono stati calcolati i principali parametri utili a definire le prestazioni termofisiche dell'involucro trasparente

[Tabelle 7.1-7.2].

Per i serramenti in ferro privi di taglio termico è stata considerata una trasmittanza termica del telaio U_f pari a $7 \text{ W/m}^2\text{K}$ (UNI TS 11300) e una trasmittanza del vetro U_g pari a $3 \text{ W/m}^2\text{K}$ (vetrocamera con due lastre di vetro chiaro prive di trattamenti superficiali e rivestimenti basso emissivi). Per i serramenti in alluminio con taglio termico si è ipotizzata una trasmittanza termica del telaio U_f pari a $2,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ (UNI TS 11300), anche in questo caso si è considerato un doppio vetro senza trattamenti superficiali ($U_g = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$). Infine, per i serramenti con vetro singolo, è stata considerata una trasmittanza del vetro U_g pari a $5,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ [Figure 7.6-7.7]. Per quanto riguarda le componenti trasparenti, si è considerato un fattore solare del vetro g_{gl} pari a $0,88$ per il vetro singolo, che si riduce a $0,8$ in presenza di vetrocamera⁷⁶. Nel caso in cui siano presenti schermature, è stato inoltre calcolato (tramite il software *Parasol*) il fattore solare del vetro quando le schermature sono attive ($g_{gl+sh} [-] = 0,63$). Una volta individuate le prestazioni termiche dei singoli componenti, si è proceduto al calcolo delle trasmittanze termiche delle finestre: come si può evincere dai valori in grassetto riportati in tabella, si registrano valori di U_w intorno a $4 \text{ W/m}^2\text{K}$ per i serramenti in ferro e valori prossimi a $3 \text{ W/m}^2\text{K}$ per i serramenti in

alluminio. Per le finestre con vetro singolo si hanno valori ancora peggiorativi, con valori di trasmittanza termica U_w superiori a $6 \text{ W/m}^2\text{K}$. Per le finestre che dispongono di tende esterne, sono stati inoltre calcolati i valori di trasmittanza termica quando le schermature sono utilizzate (U_w+shut), ipotizzando un indice di alta permeabilità all'aria per via del cattivo stato di conservazione delle schermature (UNI TS 11300).

7.2.1. ANALISI CRITICA DEI RISULTATI

Dalle analisi effettuate sullo stato di fatto, appare dunque evidente che le prestazioni energetiche dell'involucro trasparente sono del tutto insoddisfacenti: i valori di trasmittanza termica sono infatti ben lontani dai valori minimi richiesti dalla normativa vigente. Secondo il D.M. 11/01/2017, in riferimento alla zona climatica E, bisogna garantire per tutti i serramenti valori di trasmittanza non superiori a $1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$. Inoltre, al fine di minimizzare l'ingresso della radiazione termica nei mesi estivi ed evitare un surriscaldamento eccessivo degli ambienti, occorre utilizzare dei vetri caratterizzati da un basso fattore solare g_{gl} , in modo particolare per quegli edifici che non dispongono di un impianto di climatizzazione per il raffrescamento estivo (come nel caso dell'Istituto Drovetti). Bisogna inoltre progettare dei sistemi di ombreggiamento e protezione solare utili a schermare la radiazione solare diretta, così da contribuire a ridurre i carichi solari nei mesi più caldi.

In vista di una riqualificazione energetica della

scuola, risulta quindi necessario sostituire gli attuali serramenti con infissi e sistemi di schermatura caratterizzati da prestazioni termiche più performanti, cercando di garantire allo stesso tempo un'adeguata illuminazione naturale degli ambienti.

> Figura 7.6

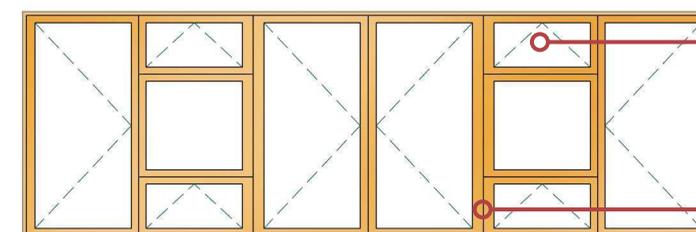
Caratteristiche termofisiche del vetro singolo e del vetrocamera
© <https://www.agc-yourglass.com/configurator/it>

✓ Figura 7.7

Caratteristiche termofisiche delle differenti tipologie di serramenti
© Elaborazione grafica dell'autore



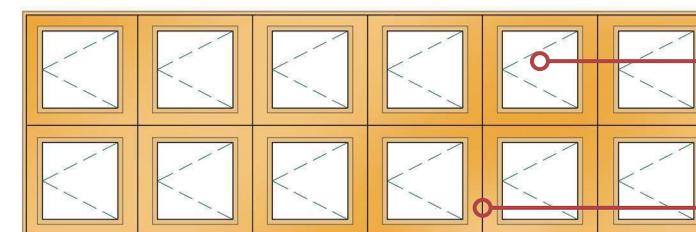
FINESTRA 39



DOPPIO VETRO SENZA TRATTAMENTI SUPERFICIALI
 U_g (trasmittanza termica del vetrocamera) = $3 \text{ W/m}^2\text{K}$
 g_{gl} (fattore solare del vetro) = $0,8 [-]$

TELAIO IN FERRO SENZA TAGLIO TERMICO
 U_f (trasmittanza termica del telaio) = $7 \text{ W/m}^2\text{K}$

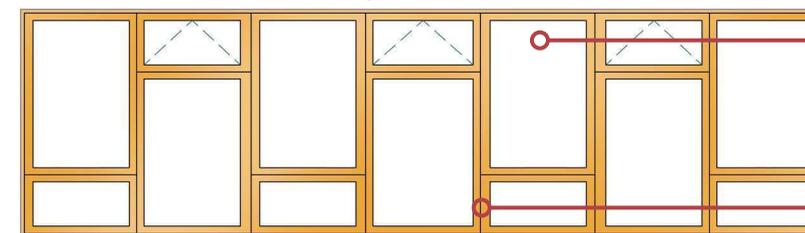
FINESTRA 20 *(sostituito recentemente)



DOPPIO VETRO SENZA TRATTAMENTI SUPERFICIALI
 U_g (trasmittanza termica del vetrocamera) = $3 \text{ W/m}^2\text{K}$
 g_{gl} (fattore solare del vetro) = $0,8 [-]$

TELAIO IN ALLUMINIO CON TAGLIO TERMICO
 U_f (trasmittanza termica del telaio) = $2,4 \text{ W/m}^2\text{K}$

FINESTRA 57 (fabbricato adibito a palestra)



VETRO SINGOLO
 U_g (trasmittanza termica del vetro) = $5,8 \text{ W/m}^2\text{K}$
 g_{gl} (fattore solare del vetro) = $0,88 [-]$

TELAIO IN FERRO SENZA TAGLIO TERMICO
 U_f (trasmittanza termica del telaio) = $7 \text{ W/m}^2\text{K}$

[76] <https://www.agc-yourglass.com/configurator/app/request>

LEGENDA

- / Vetro singolo
 // Vetro doppio
 * Serramenti sostituiti recentemente

TABELLA 7.1 Caratteristiche geometriche e termofisiche dei serramenti

TIPOLOGIE	PROPRIETÀ GEOMETRICHE					PROPRIETÀ TERMOFISICHE					Ug	Uf	Ψ
	Aw,p	Ag	Af	Ff	lg	Uw	Uw+shut	ggl	ggl+sh	ε			
	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[-]	[m]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[-]	[-]	[-]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m K]
// F1	1,72	1,07	0,65	0,38	4,60	4,53	3,22	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01
// F2	3,33	2,26	1,07	0,32	12,04	4,32	3,11	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01
// F3	5,00	3,54	1,45	0,29	17,06	4,20	3,05	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01
// F4	10,29	8,25	2,04	0,20	35,92	3,83	3,83	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
// F5	3,23	2,03	1,20	0,37	11,44	4,52	4,52	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
// F6	1,72	0,92	0,80	0,47	6,72	4,91	4,91	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
// F7	5,29	3,67	1,62	0,31	17,31	4,26	4,26	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
// F8	6,26	4,38	1,88	0,30	22,16	4,23	4,23	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
// F9	3,33	2,26	1,07	0,32	12,04	4,32	3,11	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01
// F10	1,72	1,07	0,65	0,38	4,60	4,53	3,22	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01
// F11	7,70	5,45	2,25	0,29	27,96	4,20	4,20	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
// F12	9,46	6,67	2,79	0,29	32,77	4,21	4,21	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
// F14	12,01	8,58	3,42	0,28	42,29	4,18	4,18	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01
// F15	1,67	1,20	0,46	0,28	4,78	4,14	4,14	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01
// F16	1,11	0,65	0,46	0,41	4,78	4,70	4,70	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
// F17*	1,72	0,97	0,75	0,43	5,78	2,94	2,33	0,80	0,63	0,89	3	2,4	0,06
// F18*	3,42	1,88	1,55	0,45	13,79	2,97	2,34	0,80	0,63	0,89	3	2,4	0,06
// F19*	1,71	0,88	0,83	0,48	5,32	2,90	2,30	0,80	0,63	0,89	3	2,4	0,06
// F20*	10,36	5,85	4,51	0,44	33,52	2,93	2,32	0,80	0,63	0,89	3	2,4	0,06
// F21*	5,17	2,93	2,25	0,43	16,76	2,93	2,32	0,80	0,63	0,89	3	2,4	0,06
// F22*	1,72	1,03	0,69	0,40	5,75	2,96	2,34	0,80	0,63	0,89	3	2,4	0,06
// F23*	3,45	1,95	1,50	0,43	11,17	2,93	2,32	0,80	0,63	0,89	3	2,4	0,06
// F24	2,18	1,54	0,64	0,29	8,64	4,22	4,22	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
// F25	1,22	0,70	0,53	0,43	6,54	4,78	4,78	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
// F26*	3,23	1,64	1,59	0,49	10,24	2,90	2,90	0,80	0,80	0,89	3	2,4	0,06
// F27	2,17	1,28	0,89	0,41	9,08	4,68	4,68	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
// F28*	10,58	7,42	3,16	0,30	34,30	3,02	3,02	0,80	0,80	0,89	3	2,4	0,06
// F29	1,13	0,68	0,44	0,39	4,68	4,61	4,61	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
// F30	5,68	3,83	1,85	0,33	24,74	4,35	4,35	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
// F31*	12,67	7,48	5,20	0,41	38,76	2,94	2,94	0,80	0,63	0,89	3	2,4	0,06
// F32*	10,36	6,48	3,88	0,37	32,42	2,96	2,96	0,80	0,63	0,89	3	2,4	0,06
// F33*	1,72	0,77	0,95	0,55	6,18	2,88	2,88	0,80	0,63	0,89	3	2,4	0,06
// F34*	12,10	6,83	5,28	0,44	39,11	2,93	2,32	0,80	0,63	0,89	3	2,4	0,06
// F35	5,68	3,58	2,11	0,37	17,14	4,51	4,51	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
// F36	15,55	11,98	3,57	0,23	55,16	3,95	3,95	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
// F37	7,62	5,09	2,53	0,33	29,31	4,37	4,37	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
// F38	12,73	9,34	3,39	0,27	39,35	4,10	4,10	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
// F39	10,36	7,46	2,90	0,28	34,73	4,15	4,15	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01
// F40	6,66	4,64	2,02	0,30	24,56	4,25	4,25	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01

LEGENDA

- / Vetro singolo
 // Vetro doppio
 * Serramenti sostituiti recentemente

$A_{w,p}$ [m²]
 Area proiettata totale della finestra

A_g [m²]
 Area del componente vetrato

A_f [m²]
 Area del telaio

F_f [-]
 Rapporto tra l'area del telaio (A_f) e l'area del vano finestra ($A_{w,p}$)

l_g [m]
 Lunghezza del perimetro del componente vetrato

U_w [W/m²K]
 Trasmittanza termica della finestra

U_{w+shut} [W/m²K]
 Trasmittanza termica della finestra e chiusura oscurante insieme (se non sono presenti schermature esterne il valore coincide con U_w).

g_{gl} [-]
 Fattore solare del componente vetrato.

g_{gl+sh} [-]
 Fattore solare del componente vetrato quando la schermatura solare è utilizzata (calcolato tramite il software *Parasol*).

ϵ [-]
 Emissività della finestra sul lato esterno

U_g [W/m²K]
 Trasmittanza termica del componente vetrato

U_f [W/m²K]
 Trasmittanza termica del telaio

Ψ [W/mK]
 Trasmittanza termica lineare del giunto tra telaio e vetrata (UNI EN ISO 10077)

TABELLA 7.2 Caratteristiche geometriche e termofisiche dei serramenti

TIPOLOGIE	PROPRIETÀ GEOMETRICHE					PROPRIETÀ TERMOFISICHE					U_g [W/m ² K]	U_f [W/m ² K]	Ψ [W/m K]
	$A_{w,p}$ [m ²]	A_g [m ²]	A_f [m ²]	F_f [-]	l_g [m]	U_w [W/m ² K]	U_{w+shut} [W/m ² K]	g_{gl} [-]	g_{gl+sh} [-]	ϵ [-]			
/ F41	5,03	3,86	1,17	0,23	14,65	6,08	6,08	0,88	0,88	0,89	5,8	7	0
/ F42	15,29	12,39	2,90	0,19	54,72	6,03	6,03	0,88	0,88	0,89	5,8	7	0
/ F43	13,32	10,75	2,57	0,19	39,58	6,03	6,03	0,88	0,88	0,89	5,8	7	0
/ F44	5,84	4,13	1,71	0,29	20,14	6,15	6,15	0,88	0,88	0,89	5,8	7	0
/ F45	1,68	1,00	0,68	0,40	7,08	6,28	6,28	0,88	0,88	0,89	5,8	7	0
/ F46	3,33	2,58	0,76	0,23	9,76	6,07	6,07	0,88	0,88	0,89	5,8	7	0
/ F47	3,45	2,39	1,06	0,31	12,37	6,17	6,17	0,88	0,88	0,89	5,8	7	0
/ F48	1,65	1,10	0,55	0,33	5,94	6,20	6,20	0,88	0,88	0,89	5,8	7	0
/ F49	2,47	1,66	0,82	0,33	8,91	6,20	6,20	0,88	0,88	0,89	5,8	7	0
/ F50	0,82	0,53	0,29	0,36	2,91	6,23	6,23	0,88	0,88	0,89	5,8	7	0
// F51	3,59	2,18	1,41	0,39	11,84	4,60	4,60	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
// F52	3,23	2,04	1,18	0,37	11,48	4,50	4,50	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
// F53	12,19	8,81	3,38	0,28	41,32	4,14	4,14	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01
// F54	7,77	5,70	2,07	0,27	24,74	4,10	4,10	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
// F55	18,05	13,37	4,69	0,26	65,45	4,07	4,07	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
// F56	15,58	11,57	4,01	0,26	54,61	4,06	4,06	0,80	0,80	0,89	3	7	0,01
/ F57	12,07	8,50	3,57	0,30	43,62	6,16	6,16	0,88	0,88	0,89	5,8	7	0
/ F58	0,82	0,53	0,29	0,36	2,91	6,23	6,23	0,88	0,88	0,89	5,8	7	0
/ F59	3,30	2,25	1,05	0,32	12,01	6,18	6,18	0,88	0,88	0,89	5,8	7	0
/ F60	4,96	3,41	1,55	0,31	18,10	6,18	6,18	0,88	0,88	0,89	5,8	7	0
/ F61	6,54	4,50	2,04	0,31	24,01	6,17	6,17	0,88	0,88	0,89	5,8	7	0
/ F62	1,65	1,10	0,55	0,33	5,94	6,20	6,20	0,88	0,88	0,89	5,8	7	0
/ F63	0,72	0,59	0,13	0,18	3,07	6,02	6,02	0,88	0,88	0,89	5,8	7	0

7.3. ANALISI DELLE PRESTAZIONI VISIVE

Dopo aver valutato le caratteristiche energetiche dell'involucro trasparente, si è proceduto ad analizzare le condizioni di illuminazione naturale dei principali ambienti scolastici. Le verifiche sono state effettuate per il primo e il secondo piano, su un campione totale di 14 ambienti comprendenti aule, laboratori e corridoi distributivi. Per la determinazione dei parametri di illuminazione naturale è stato utilizzato il software Diva-for-Rhino, un plug-in sviluppato per Rhinoceros e Grasshoper specializzato nell'illuminazione diurna.

Per ogni ambiente analizzato sono stati calcolati il Fattore medio di luce diurna e i principali parametri dinamici per l'illuminazione naturale: Daylight Autonomy (DA), Continuous Daylight Autonomy (DAcon), Useful Daylight illuminance (UDI), spatial Daylight Autonomy (sDA), Annual Sunlight Exposure (ASE).

In aggiunta ai parametri sopramenzionati, è stata valutata per ogni ambiente la presenza di potenziali fenomeni di abbagliamento tramite il calcolo del DGP (Daylight glare probability), considerando come punto di osservazione quello in cui la probabilità che si verifichino condizioni di abbagliamento risulta maggiore.

7.3.1. AMBIENTI OGGETTO DI STUDIO

Gli ambienti analizzati sono stati selezionati secondo criteri ben precisi, che tengono conto delle loro dimensioni, delle diverse esposizioni, delle destinazioni d'uso e delle caratteristiche peculiari dell'involucro trasparente, con il fine ultimo di fornire un quadro complessivo delle

condizioni di illuminazione naturale della scuola media. Le verifiche sono state effettuate per un totale di 14 ambienti ugualmente ripartiti tra primo e secondo piano (12 aule e 2 corridoi distributivi); opportunamente individuati e numerati [Figura 7.8].

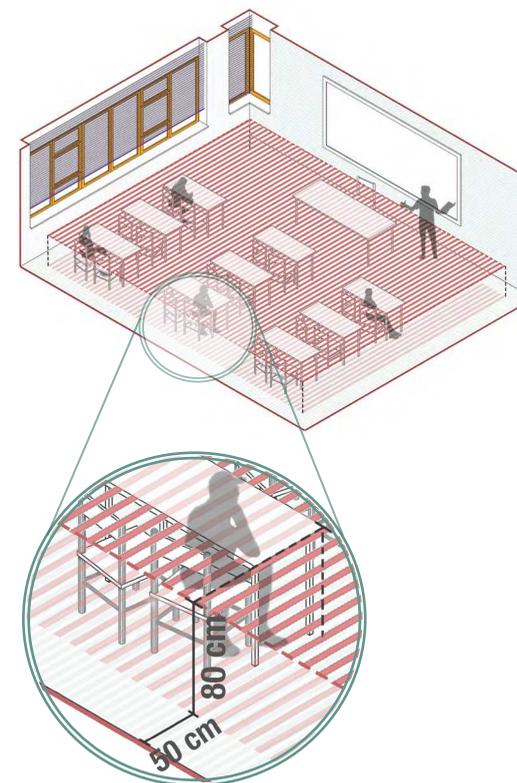
Per quanto concerne le aule, i vari parametri sono stati determinati sulla base di una griglia di calcolo posta ad un'altezza di 80 cm rispetto al piano di calpestio, corrispondente all'altezza dei banchi di lavoro sui quali vengono svolti i vari compiti visivi (leggere, scrivere ecc.) [Figura 7.9]. L'abbagliamento è stato invece valutato considerando il punto di osservazione più sfavorevole ad un'altezza di 120 cm rispetto al piano di calpestio [Figura 7.10]. Per quanto riguarda invece i due corridoi distributivi esposti ad est (7Est), l'abbagliamento è stato calcolato considerando un'altezza del punto di osservazione di 160 cm.

7.3.2. DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DI ILLUMINAZIONE NATURALE TRAMITE IL SOFTWARE DIVA-FOR-RHINO

Nelle pagine seguenti vengono presentati gli esiti dei calcoli effettuati tramite il software Diva-forRhino, riferiti a tutti gli ambienti del primo e secondo piano evidenziati nelle piante [Figura 7.8]. Viene dapprima riportato un layout esemplificativo utile a descrivere i parametri analizzati e a rendere più agevole la lettura dei risultati.

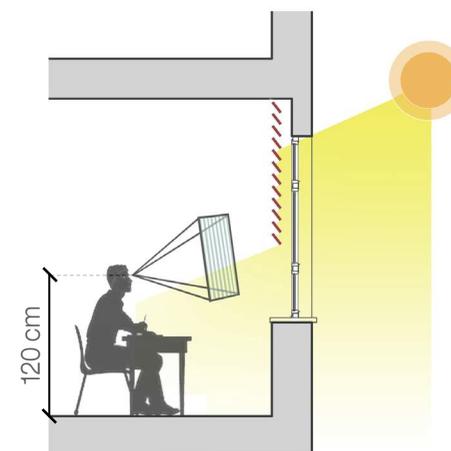
> Figura 7.10

Rappresentazione schematica di una potenziale condizione di abbagliamento (punto di osservazione più sfavorevole)
© Elaborazione grafica dell'autore



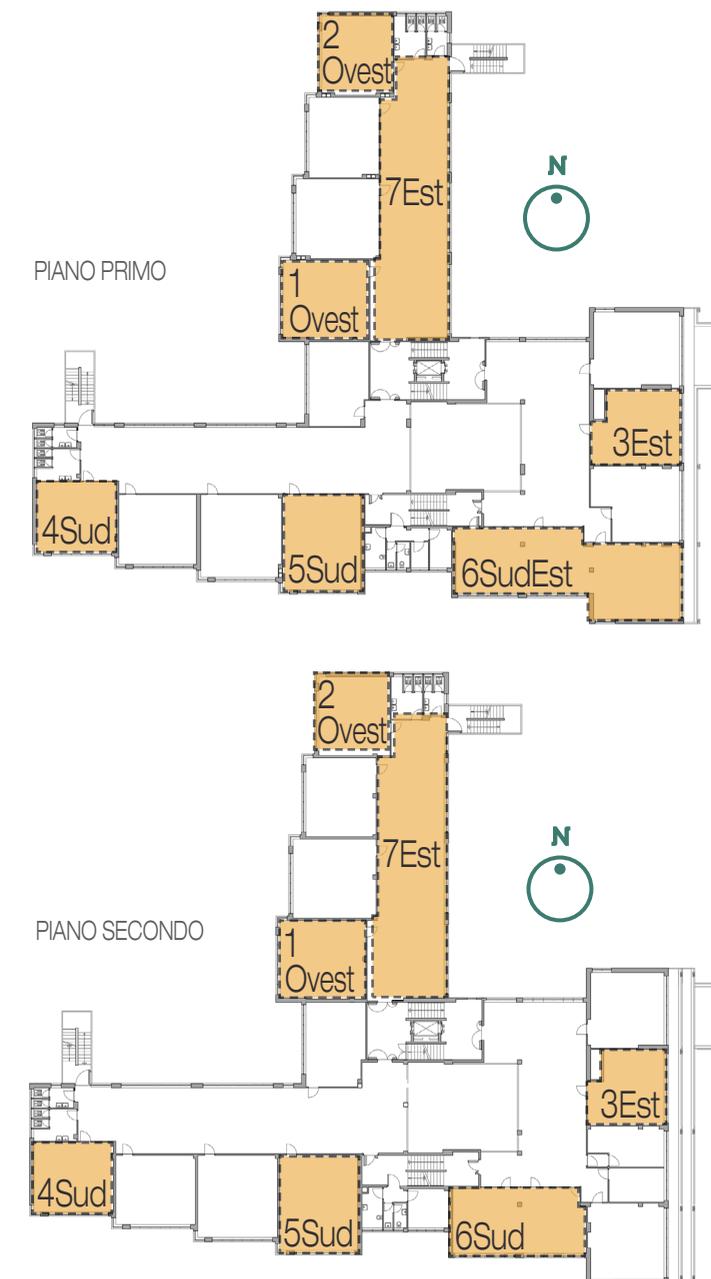
▲ Figura 7.9

Individuazione della griglia di calcolo in un'aula tipo
© Elaborazione grafica dell'autore



▼ Figura 7.8

Individuazione degli ambienti del primo e secondo piano per i quali sono state effettuate le verifiche illuminotecniche
© Elaborazione grafica dell'autore



LAYOUT ESEMPLIFICATIVO DI RIFERIMENTO PER LE PAGINE SEGUENTI

Pianta
dell'ambiente
analizzato

Rendering
dell'ambiente
analizzato

▼ DGP

Il DGP rappresenta la probabilità che si verifichino fenomeni di abbagliamento per uno specifico punto di osservazione.
 $DGP \leq 0,35$

Fotografie
dell'ambiente
analizzato

▼ Profilo di occupazione

Il profilo di occupazione rappresenta il numero di ore nell'arco di un anno in cui gli ambienti sono effettivamente utilizzati. Considerato che la scuola risulta occupata anche nelle ore pomeridiane, sono state considerate 9 ore al giorno (dalle ore 8:00 alle ore 17:00) per tutti i giorni feriali (da lunedì a sabato), per un totale di 2349 ore all'anno.

▼ Annual Glare (Abbagliamento calcolato su base annuale)

L'Annual Glare rappresenta la probabilità che si verifichino fenomeni di abbagliamento per uno specifico punto di osservazione, considerando tutte le ore di utilizzo dell'ambiente nell'arco di un anno.

Confronto con i
valori
normativi

▼ FLDm (Fattore medio di luce diurna)

La normativa vigente definisce dei valori minimi del Fattore medio di luce diurna a seconda della destinazione d'uso.

Per le aule scolastiche: $FLDm \geq 3 \%$
Per i corridoi: $FLDm \geq 1 \%$

▼ DA (Daylight Autonomy)

Definisce la percentuale di tempo nell'arco di un anno in cui la sola luce naturale è in grado di garantire il livello minimo di illuminamento definito secondo normativa, che varia a seconda della destinazione d'uso.

Per le aule scolastiche: $E_m = 500 \text{ lx}$
Per i corridoi: $E_m = 100 \text{ lx}$

▼ DAcon (Continuous Daylight Autonomy)

Rappresenta il contributo percentuale che la sola luce naturale è in grado di fornire al fine di garantire il raggiungimento del valore minimo di illuminamento richiesto dalla normativa.

Per le aule scolastiche: $E_m = 500 \text{ lx}$
Per i corridoi: $E_m = 100 \text{ lx}$

▼ UDIexceeded (Useful Daylight illuminance)

Rappresenta la percentuale di tempo in cui i valori di illuminamento risultano maggiori di 2500 lx (potenziale condizione di abbagliamento)

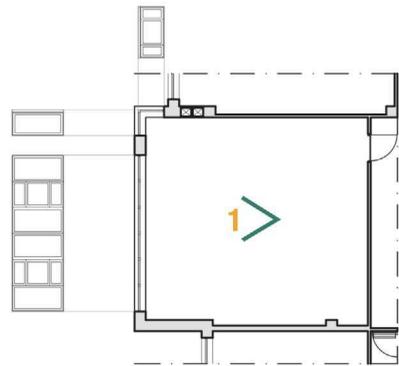
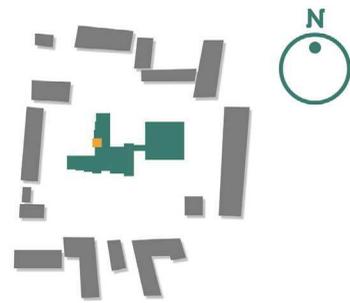
▼ UDI (Useful Daylight illuminance)

Definisce la percentuale di tempo in cui la disponibilità di luce naturale risulta "utile" allo svolgimento del compito visivo, mantenendosi entro valori di illuminamento né troppo bassi (<100 lx) né troppo alti (>2500 lx).

▼ ASE (Annual Sunlight Exposure)

Definisce la percentuale di spazio in cui viene superato un determinato valore di illuminamento considerando una frazione specifica delle ore di utilizzo dell'ambiente esaminato. Nello specifico, si fa riferimento a un illuminamento di 1000 lx e una frazione di tempo pari a 250 ore (ASE1000 lx, 250h)

AULA 10vest (primo piano)



Rendering

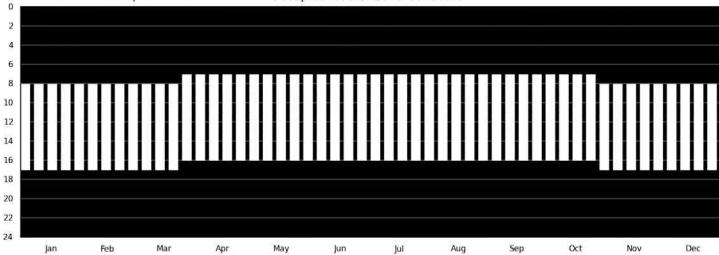


DGP=26% (Vista 1)
02/05 ore 17:00



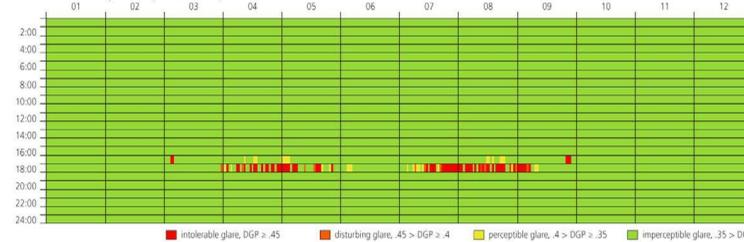
Profilo di occupazione

Occupied Hours: 2349 Schedule



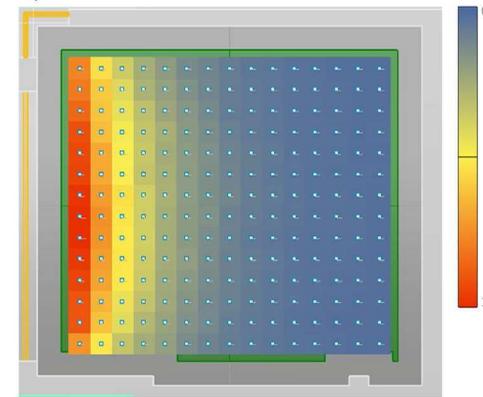
(1) occupied
(0) unoccupied

Annual glare (Vista 1)

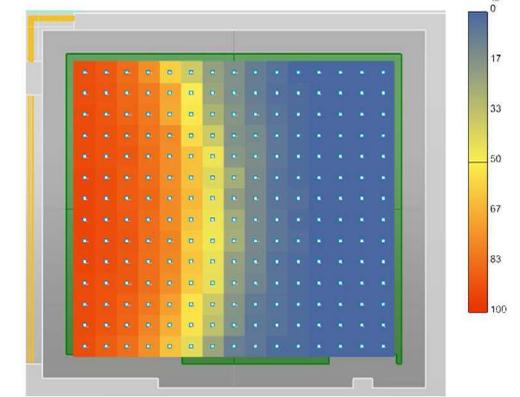


FLDm = 2,2 % < 3 % (NON VERIFICATO)
sDA300, 50% = 52 % < 55 % (NON VERIFICATO)
ASE1000, 250h = 18 % > 7 % (NON VERIFICATO)

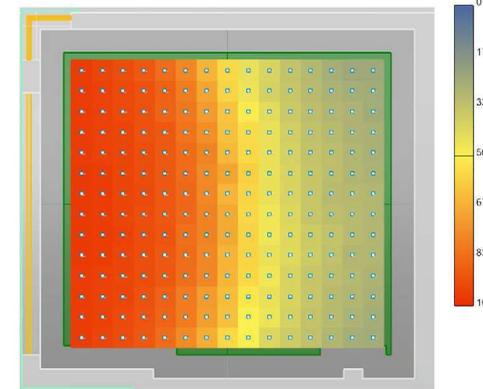
FLDm
2,2 %



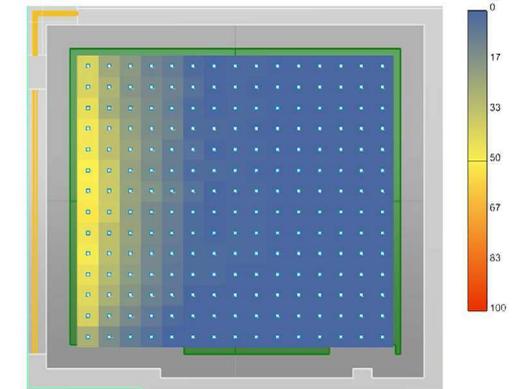
DA500 lx_ Daylight autonomy
37 %



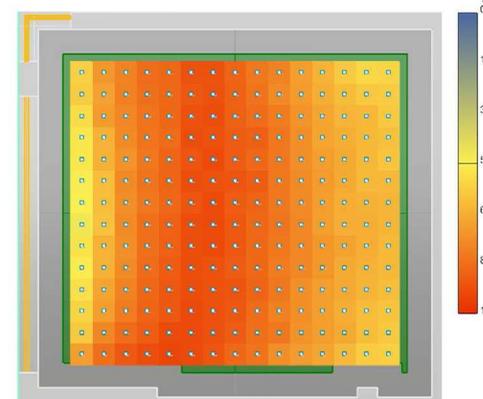
DAcon 500 lx_ Continuous daylight autonomy
63 %



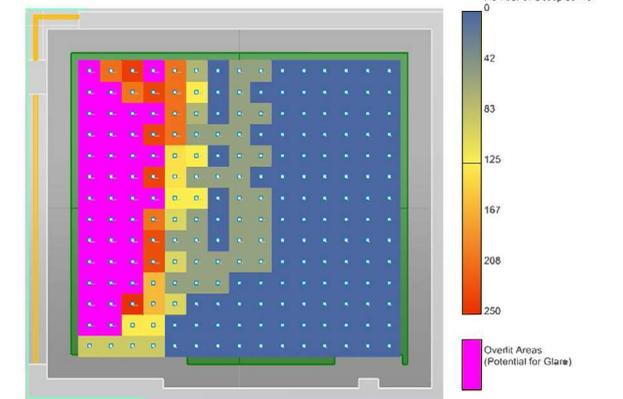
UDIexceed 2000 lx
8 %



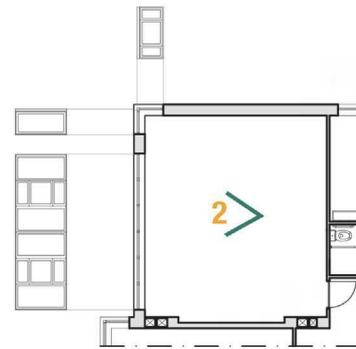
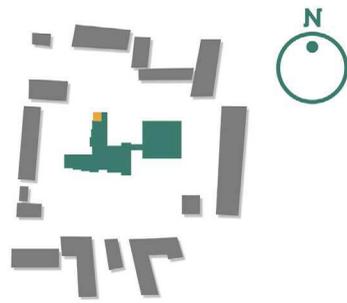
UDI100-2000 lx
76 %



ASE1000 lx, 250 h
18 %



AULA 20vest (primo piano)

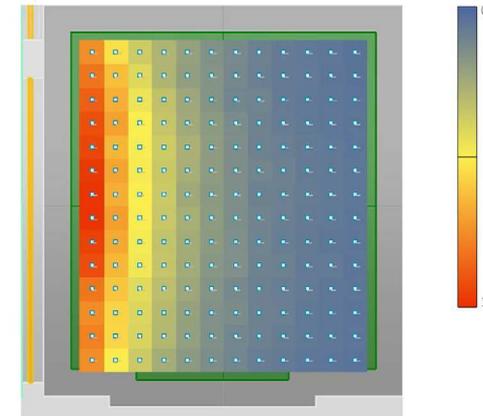


DGP=32% (Vista 2)
02/05 ore 17:00

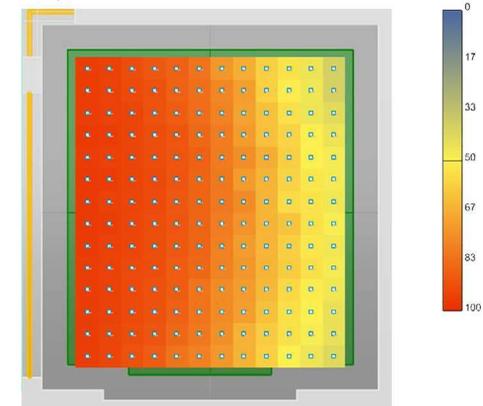


FLDm = 2,6 % < 3 % (NON VERIFICATO)
sDA300, 50% = 78 % > 55 % (VERIFICATO)
ASE1000, 250h = 23 % > 7 % (NON VERIFICATO)

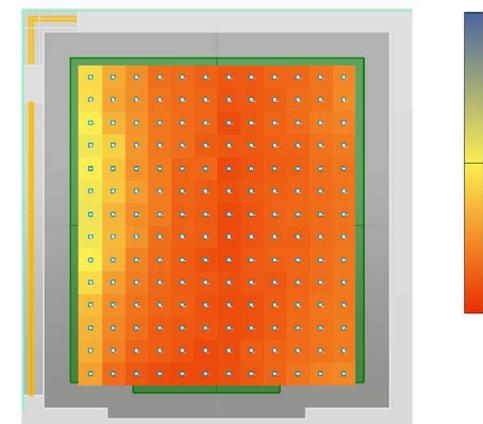
FLDm
2,6 %



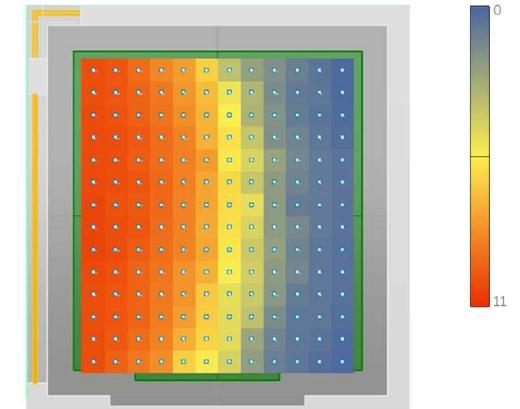
DAcon 500 lx_ Continuous daylight autonomy
76 %



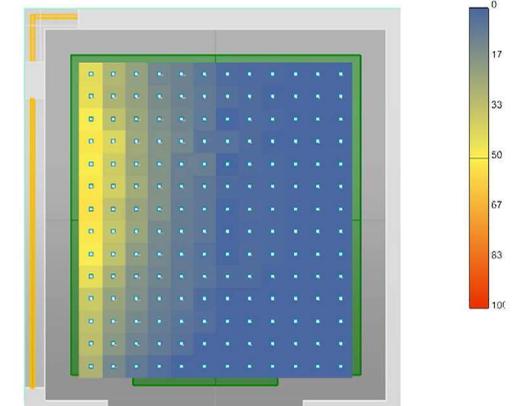
UDI100-2000 lx
81 %



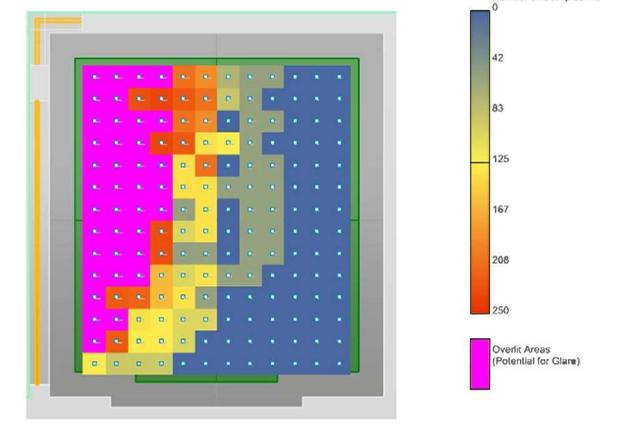
DA500 lx_ Daylight autonomy
50 %



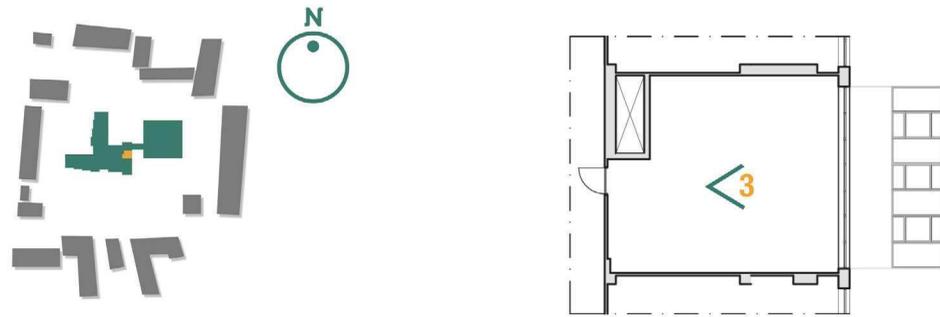
UDlexceed 2000 lx
10 %



ASE1000 lx, 250 h
23 %



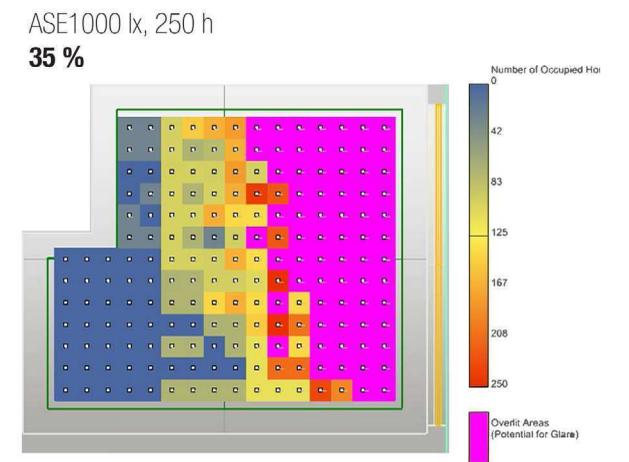
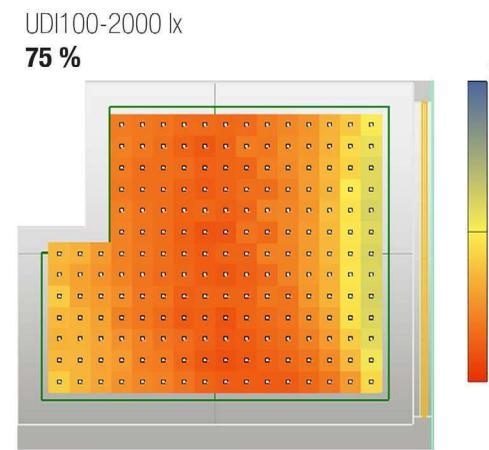
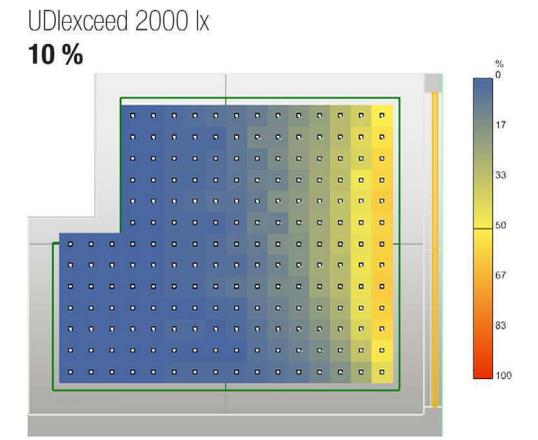
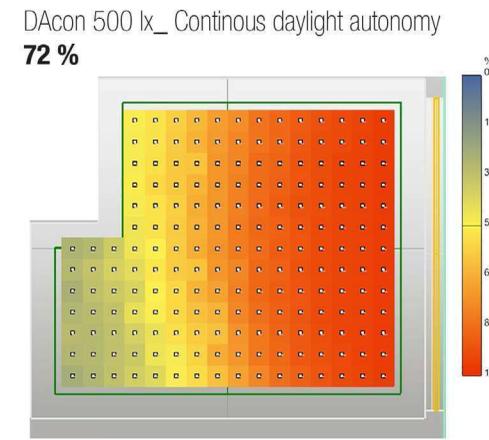
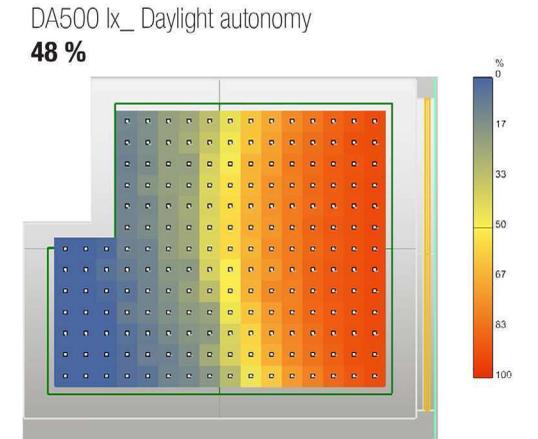
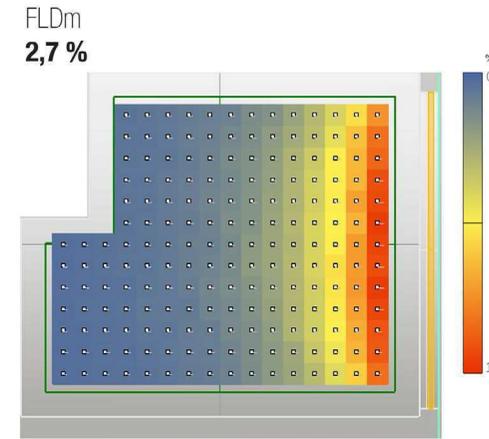
AULA 3Est (primo piano)



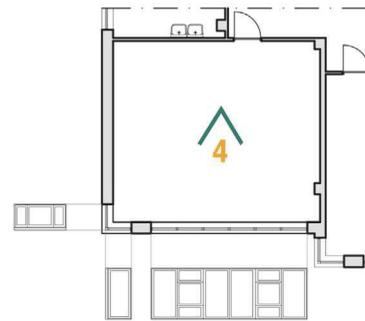
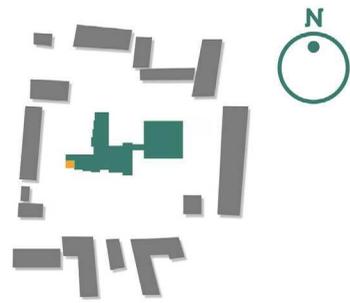
DGP=34% (Vista 3)
02/06 ore 9:00



FLDm = 2,7 % < 3 % (NON VERIFICATO)
sDA500, 50% = 71 % > 55 % (VERIFICATO)
ASE1000, 250h = 35 % > 7 % (NON VERIFICATO)

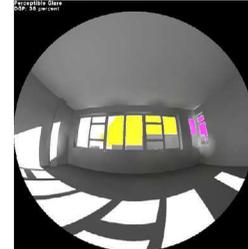


AULA 4Sud (primo piano)



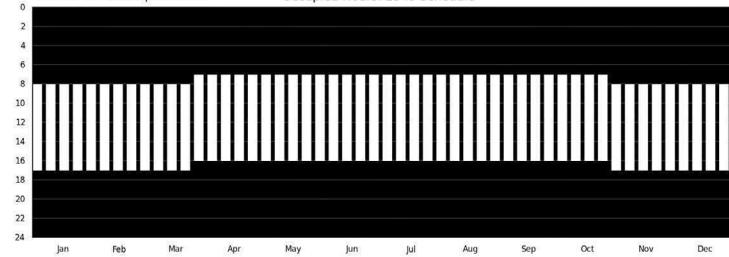
DGP=34% (Vista 4)

02/02 ore 14:00



Profilo di occupazione

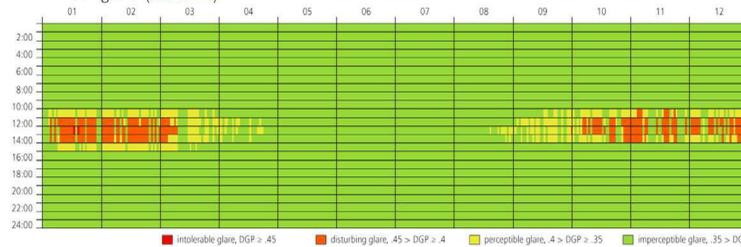
Occupied Hours: 2349 Schedule



(1) occupied

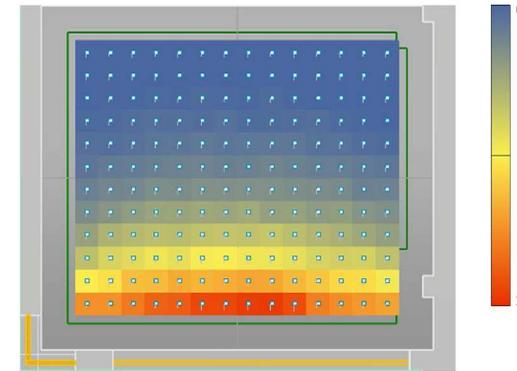
(0) unoccupied

Annual glare (Vista 4)

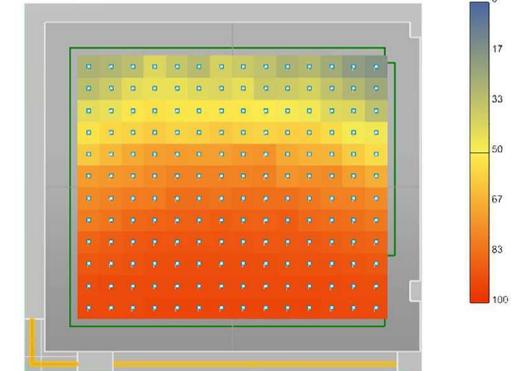


FLDm = 3,2 % > 3 % (VERIFICATO)
 sDA300, 50% = 99 % > 55 % (VERIFICATO)
 ASE1000, 250h = 56 % > 7 % (NON VERIFICATO)

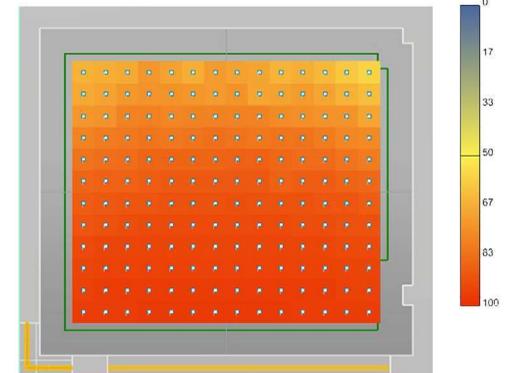
FLDm
3,2 %



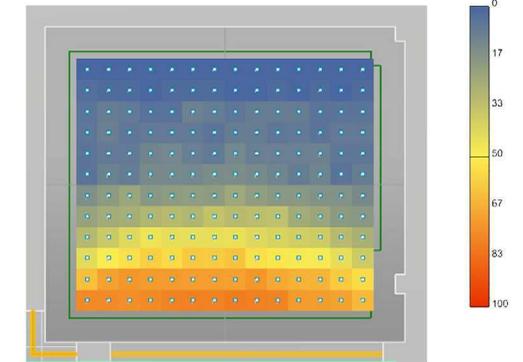
DA500 lx_ Daylight autonomy
70 %



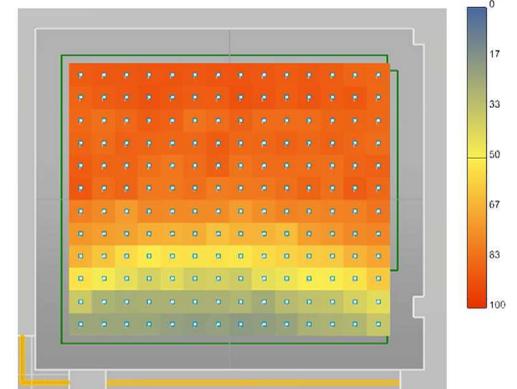
DAcon 500 lx_ Continuous daylight autonomy
86 %



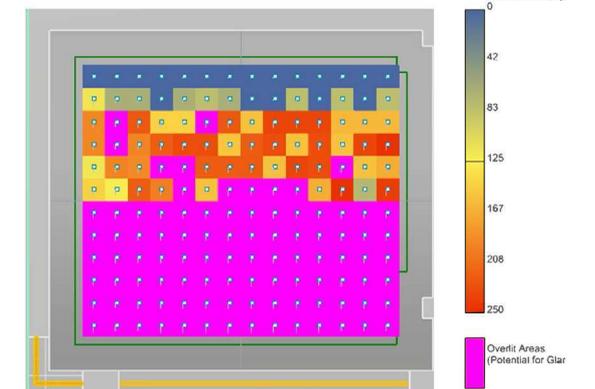
UDlexceed 2000 lx
26 %



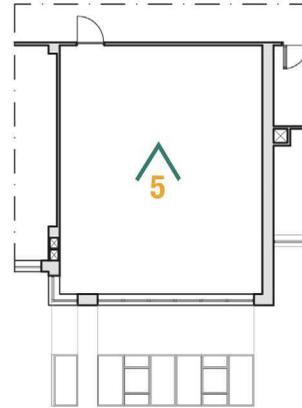
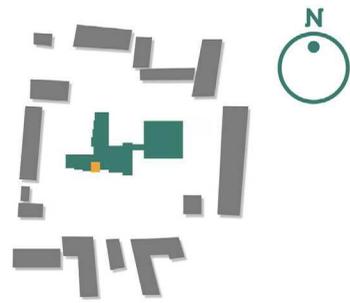
UDI100-2000 lx
68 %



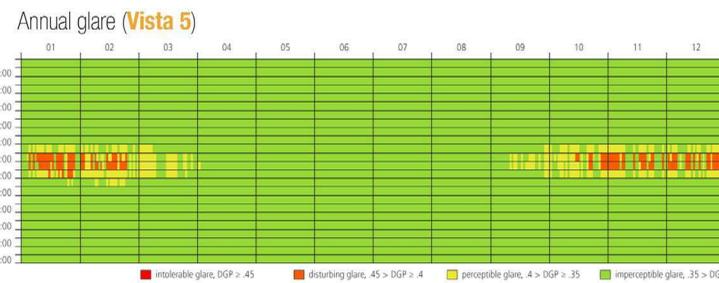
ASE1000 lx, 250 h
56 %



AULA 5Sud (primo piano)

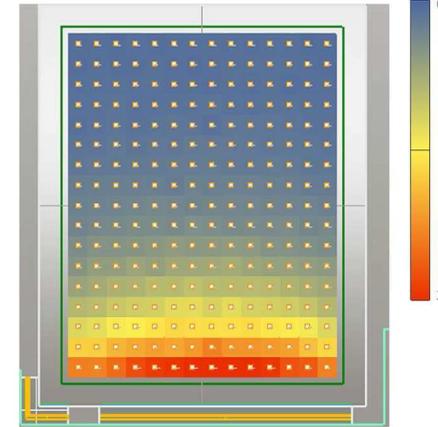


DGP=34% (Vista 5)
02/02 ore 14:00

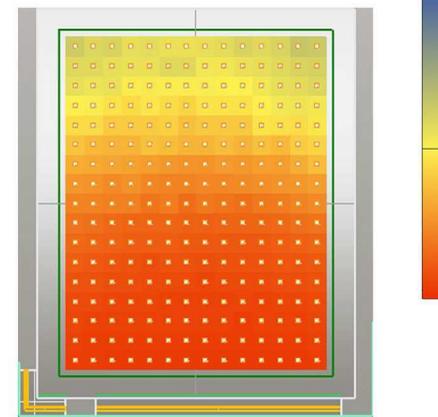


FLDm = 2,5 % < 3 % (NON VERIFICATO)
sDA300, 50% = 72 % > 55 % (VERIFICATO)
ASE1000, 250h = 41 % > 7 % (NON VERIFICATO)

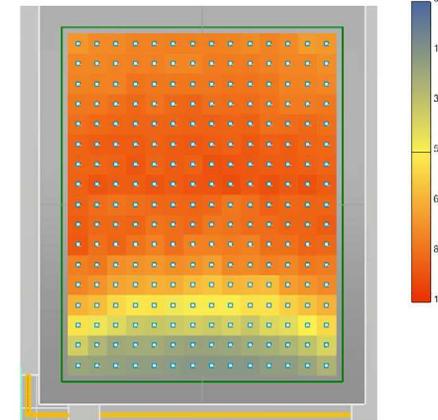
FLDm
2,5 %



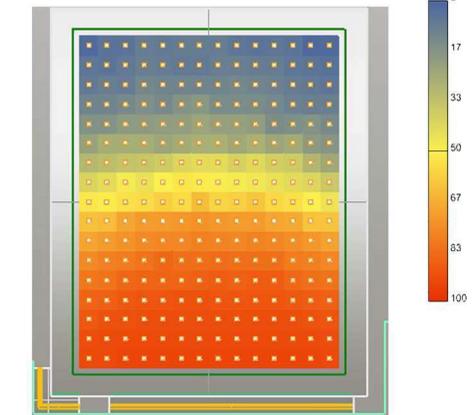
DAcon 500 lx_ Continuous daylight autonomy
74 %



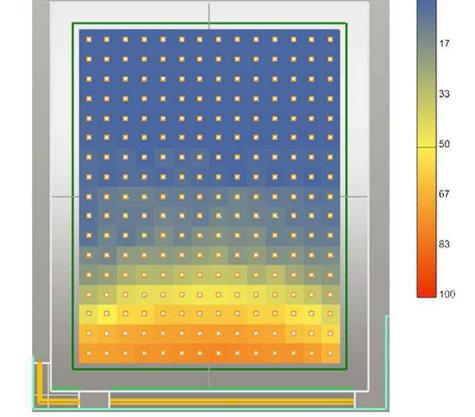
UDI100-2000 lx
71 %



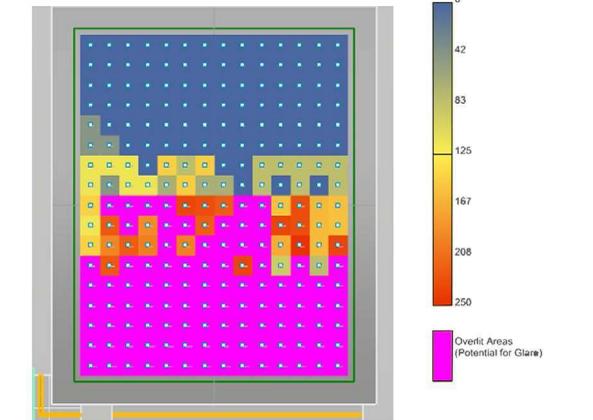
DA500 lx_ Daylight autonomy
52 %



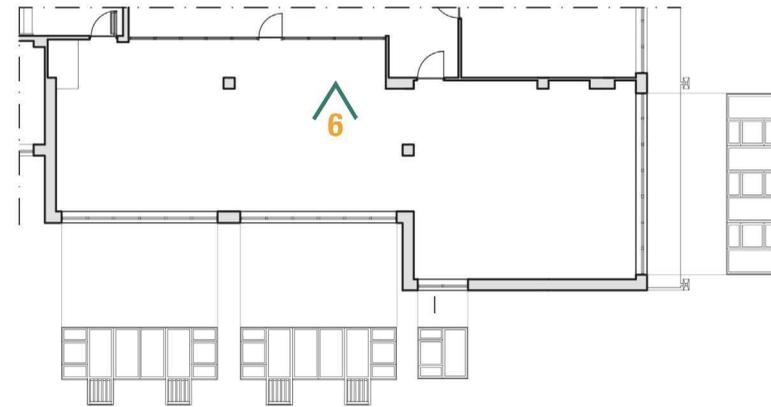
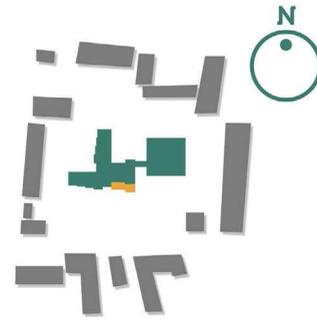
UDlexceed 2000 lx
19 %



ASE1000 lx, 250 h
41 %



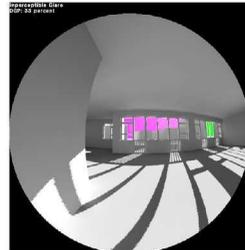
AULA 6SudEst (primo piano)



Rendering

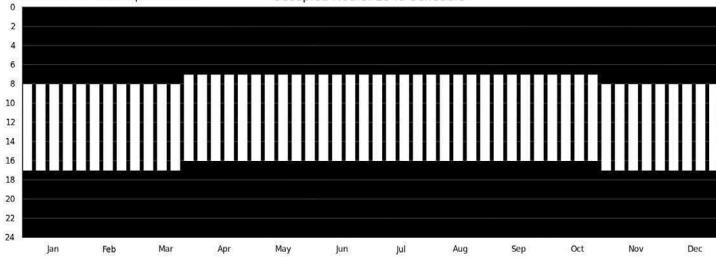


DGP=34% (Vista 6)
02/02 ore 14:00



Profilo di occupazione

Occupied Hours: 2349 Schedule



(1) occupied
(0) unoccupied

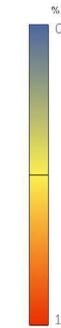
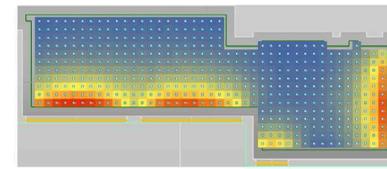


Annual glare

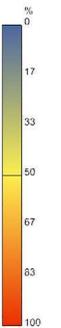
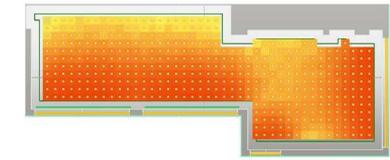


FLDm = 3,6 % > 3 % (VERIFICATO)
sDA300, 50% = 100 % > 55 % (VERIFICATO)
ASE1000, 250h = 57 % > 7 % (NON VERIFICATO)

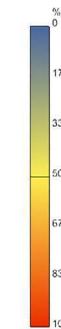
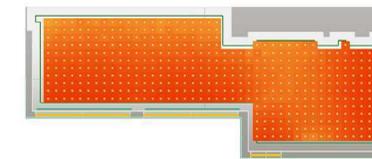
FLDm
3,6 %



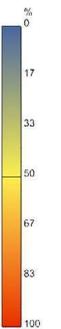
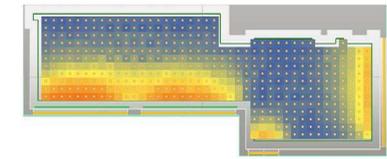
DA500 lx_ Daylight autonomy
77 %



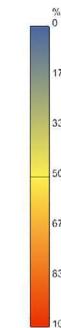
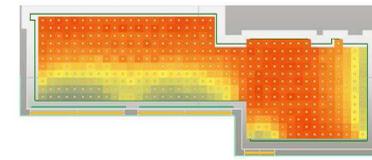
DAcon 500 lx_ Continuous daylight autonomy
88 %



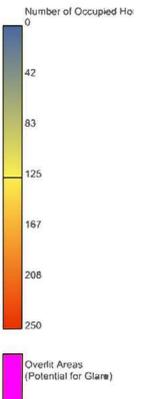
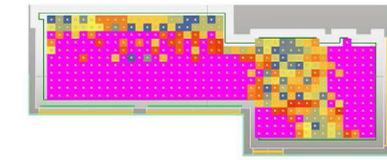
UDlexceed 2000 lx
24 %



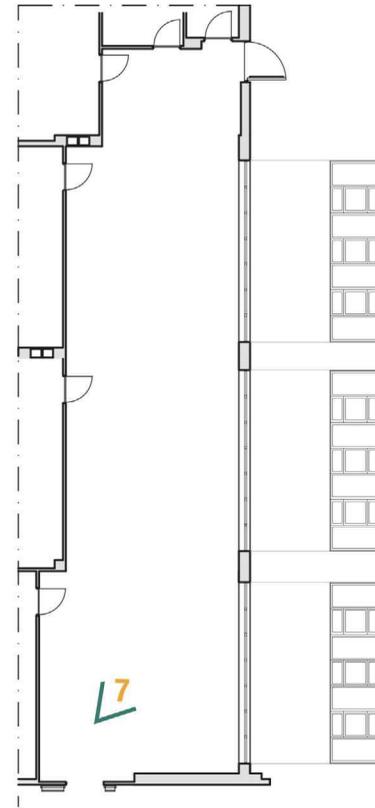
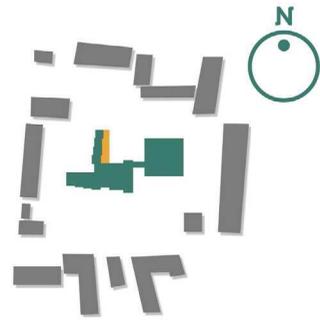
UDI100-2000 lx
70 %



ASE1000 lx, 250 h
57 %



CORRIDOIO 7Est (primo piano)



Rendering

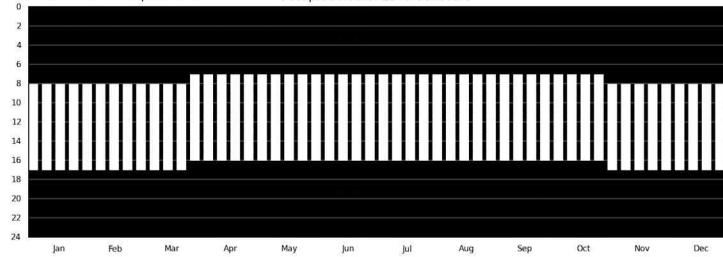


DGP=27% (Vista 7)
02/08 ore 7:00



Profilo di occupazione

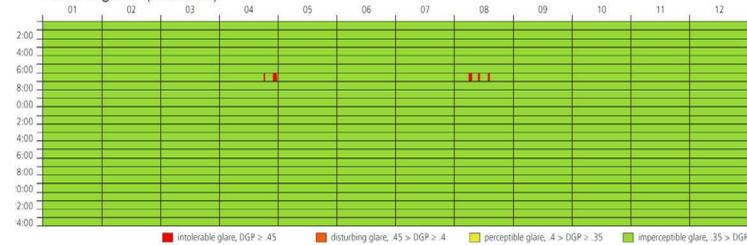
Occupied Hours: 2349 Schedule



(1) occupied
(0) unoccupied

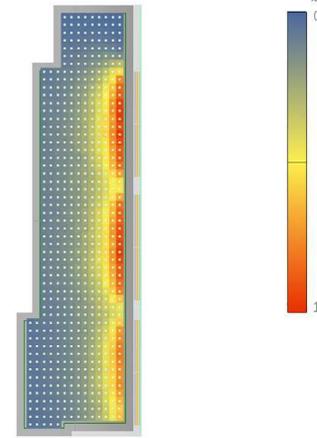


Annual glare (Vista 7)

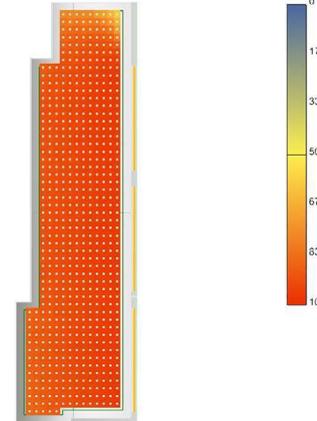


FLDm = 2,8 % < 3 % (NON VERIFICATO)
sDA300, 50% = 79 % > 55 % (VERIFICATO)
ASE1000, 250h = 28 % > 7 % (NON VERIFICATO)

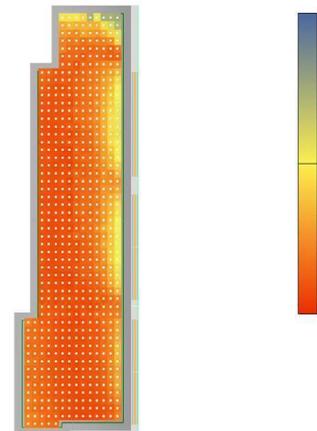
FLDm
2,8 %



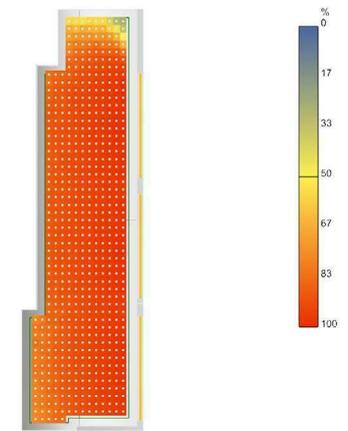
DAcon 100 lx_ Continuous daylight autonomy
96 %



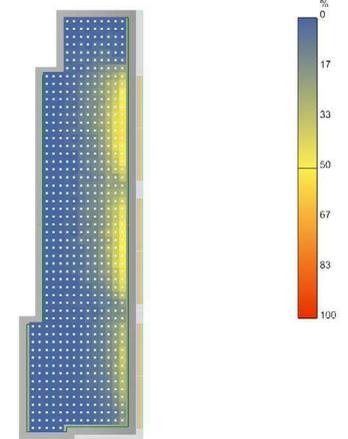
UDI100-2000 lx
82 %



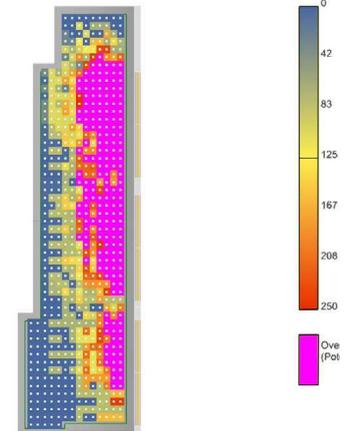
DA100 lx_ Daylight autonomy
91 %



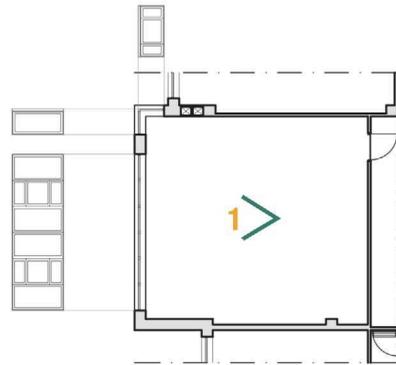
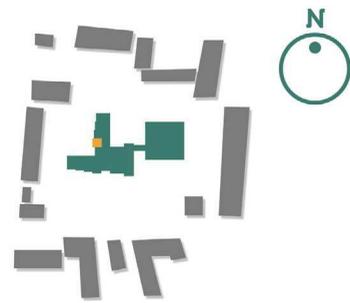
UDlexceed 2000 lx
9 %



ASE1000 lx, 250 h
28 %



AULA 10vest (secondo piano)



Rendering



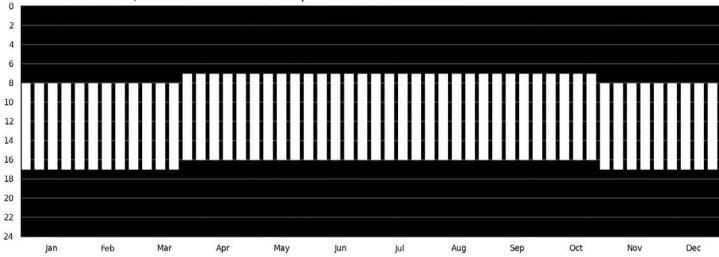
DGP=31% (Vista 1)

02/05 ore 17:00



Profilo di occupazione

Occupied Hours: 2349 Schedule



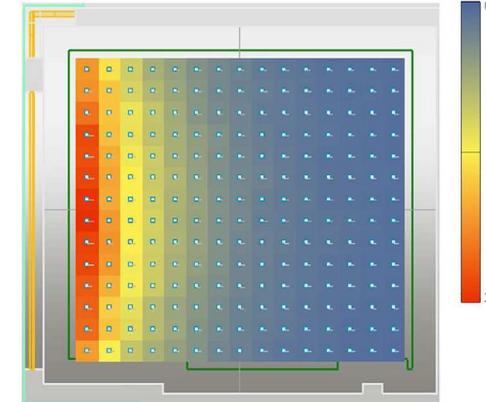
(1) occupied
(0) unoccupied

Annual glare (Vista 1)

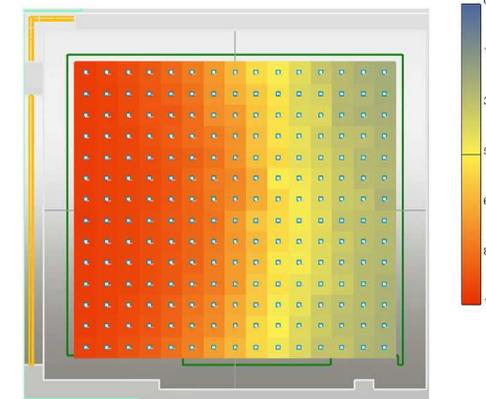


FLDm = 2,5 % < 3 % (NON VERIFICATO)
 sDA300, 50% = 55 % = 55 % (VERIFICATO)
 ASE1000, 250h = 21 % > 7 % (NON VERIFICATO)

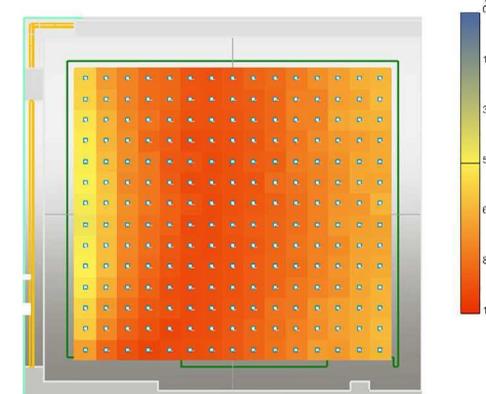
FLDm
2,5 %



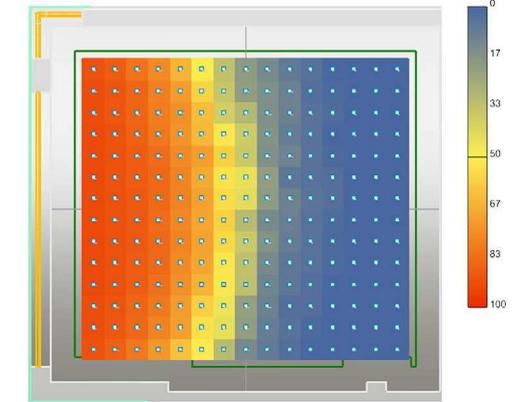
DAcon 500 lx_ Continuous daylight autonomy
66 %



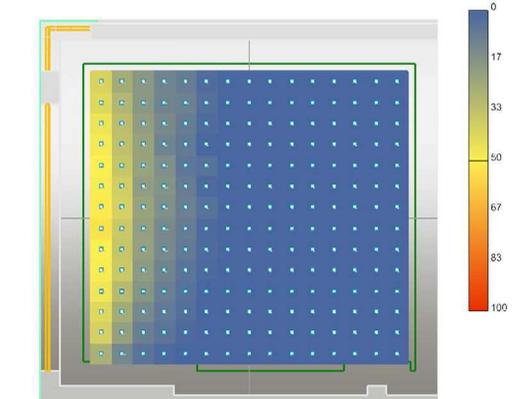
UDI100-2000 lx
79 %



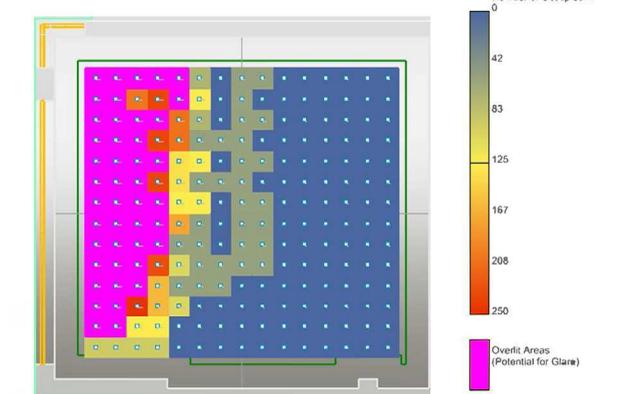
DA500 lx_ Daylight autonomy
39 %



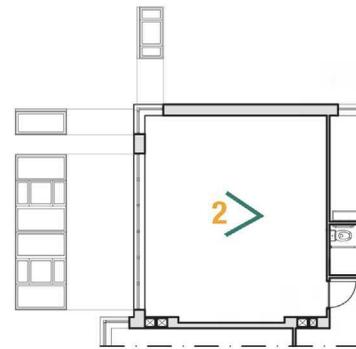
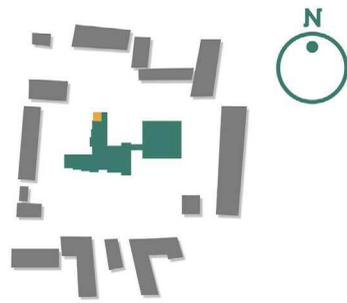
UDlexceed 2000 lx
8 %



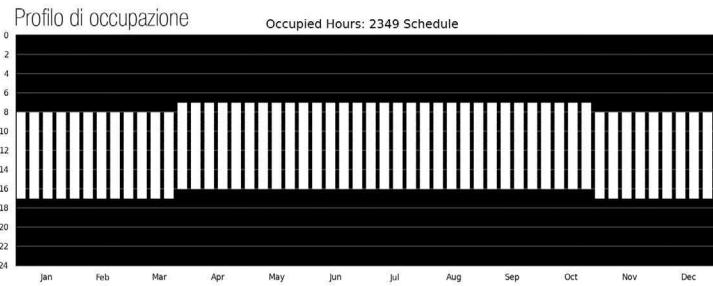
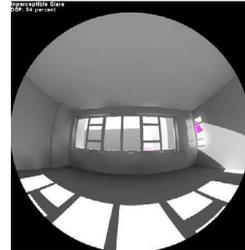
ASE1000 lx, 250 h
21 %



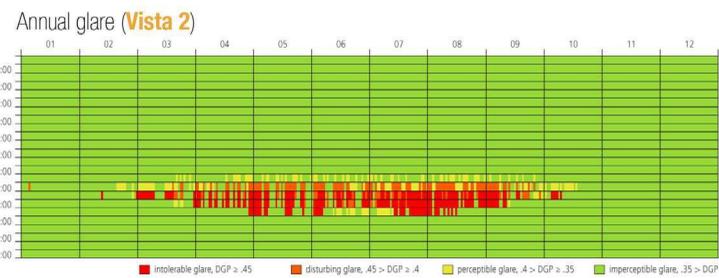
AULA 20vest (secondo piano)



DGP=34% (Vista 2)
02/05 ore 17:00



(1) occupied
(0) unoccupied

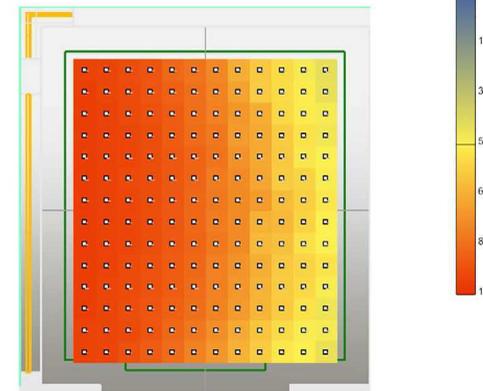


FLDm = 2,9 % < 3 % (QUASI ACCETTABILE)
 sDA300, 50% = 82 % > 55 % (VERIFICATO)
 ASE1000, 250h = 23 % > 7 % (NON VERIFICATO)

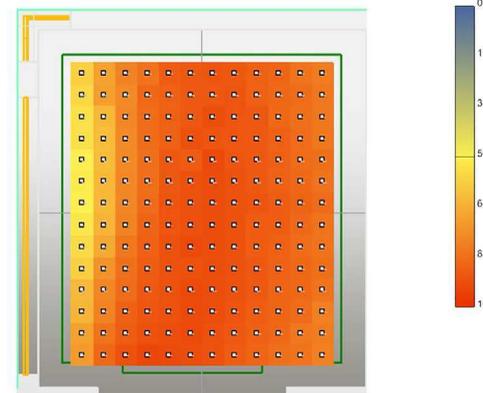
FLDm
2,9 %



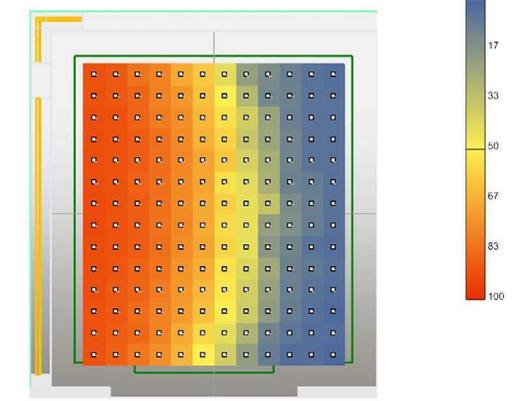
DAcon 500 lx_ Continuous daylight autonomy
77 %



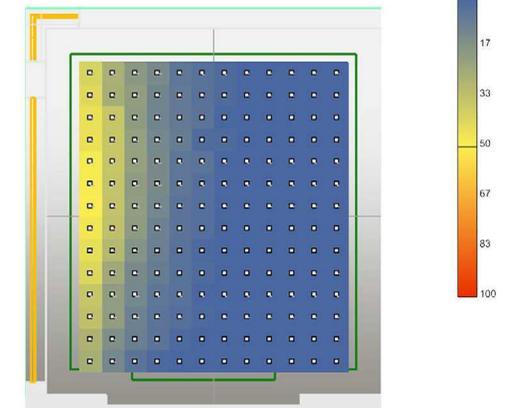
UDI100-2000 lx
83 %



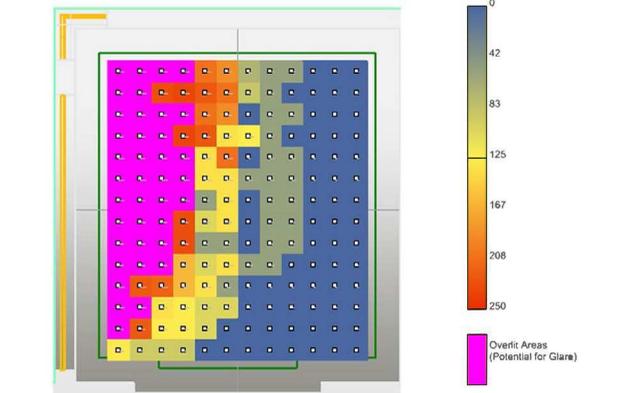
DA500 lx_ Daylight autonomy
51 %



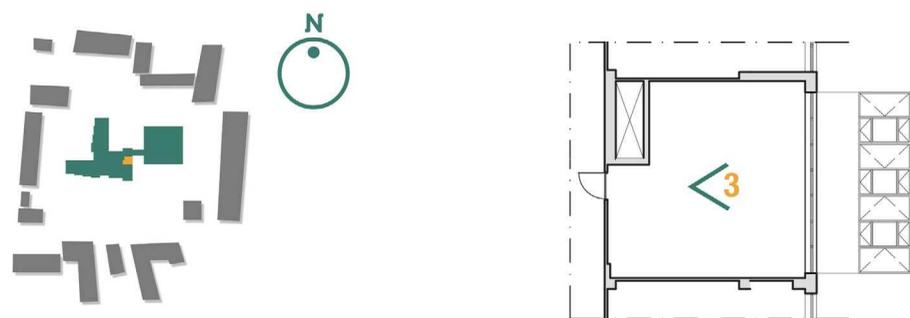
UDlexceed 2000 lx
10 %



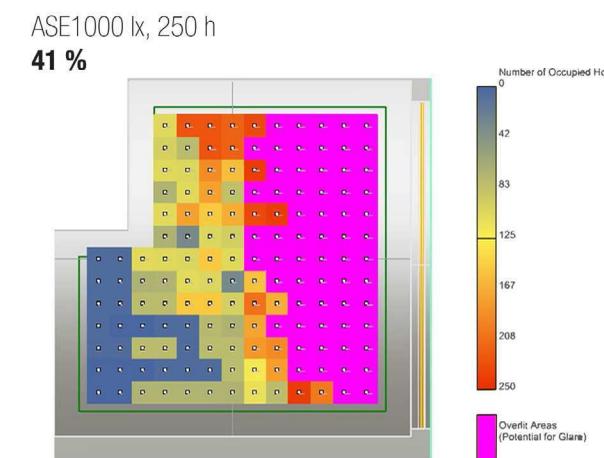
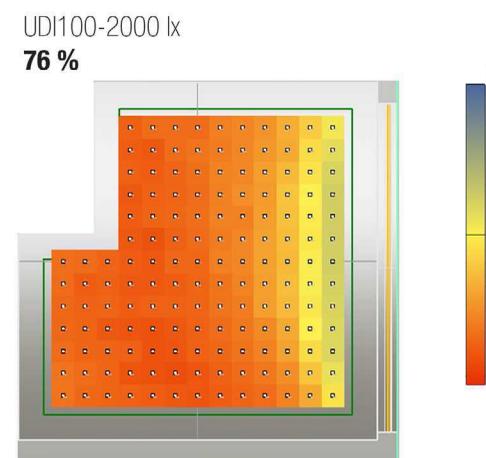
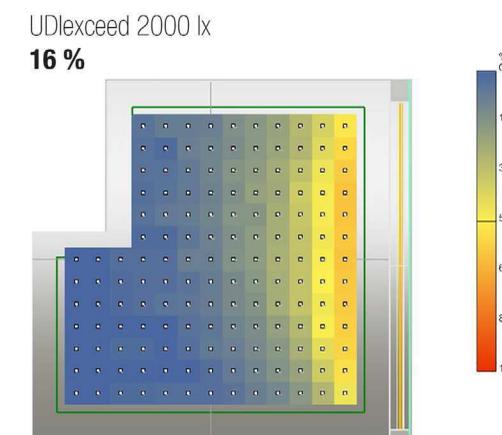
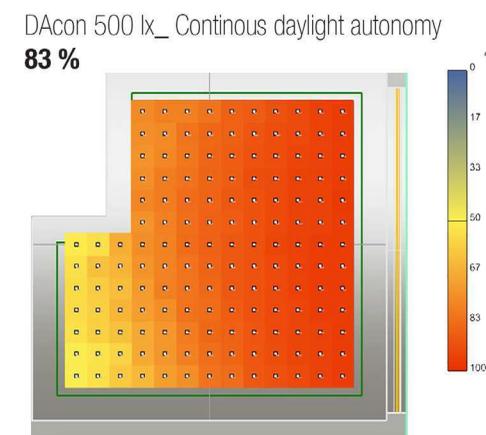
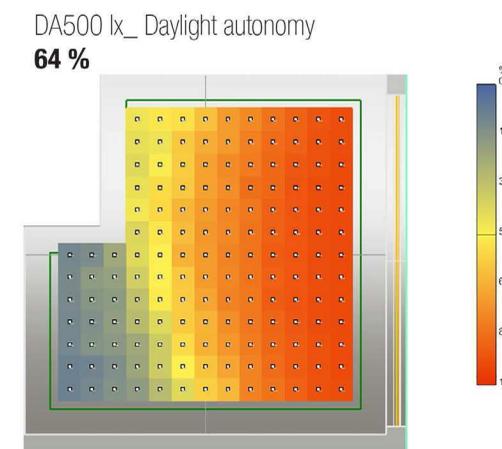
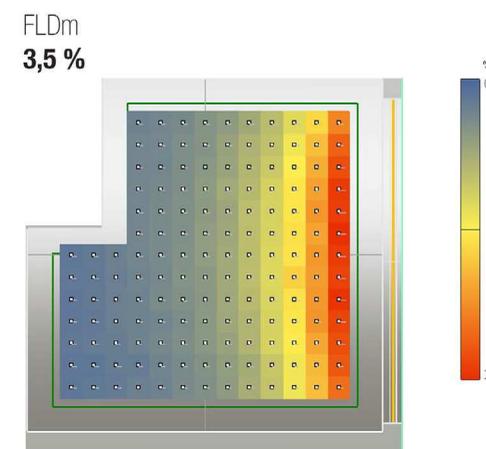
ASE1000 lx, 250 h
23 %



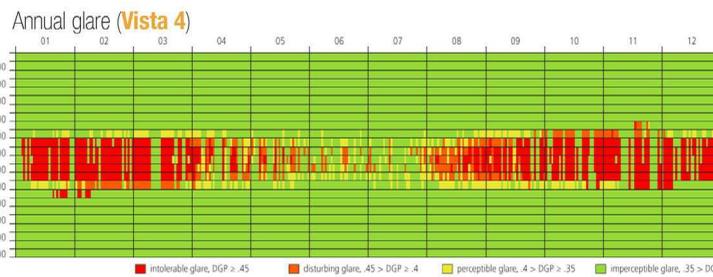
AULA 3Est (secondo piano)



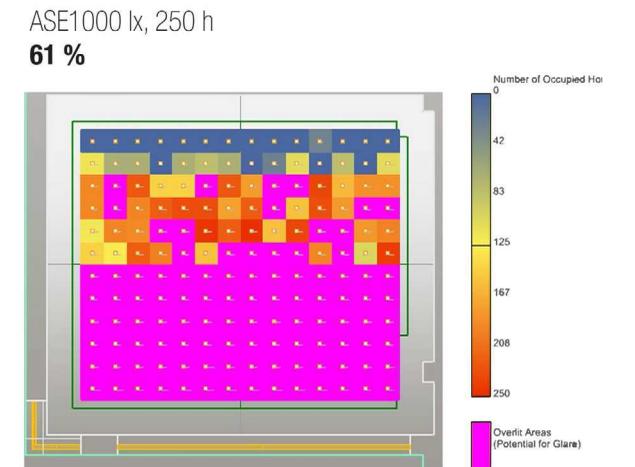
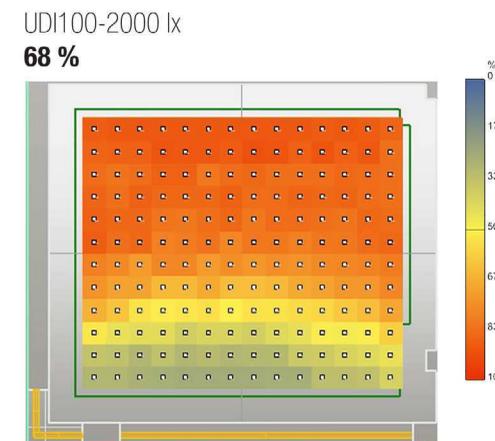
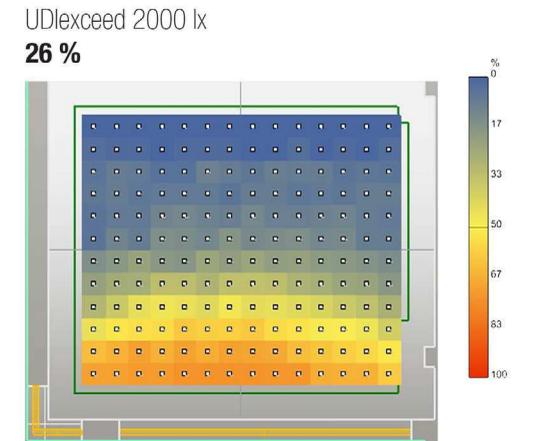
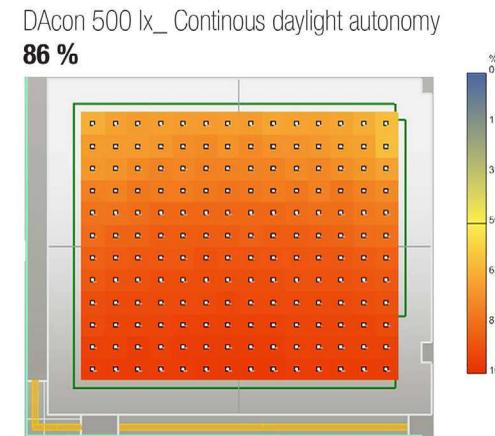
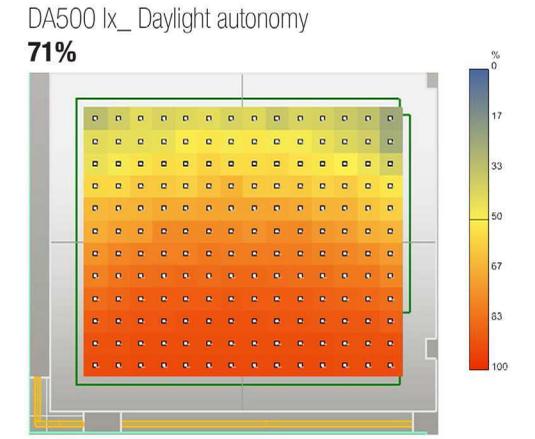
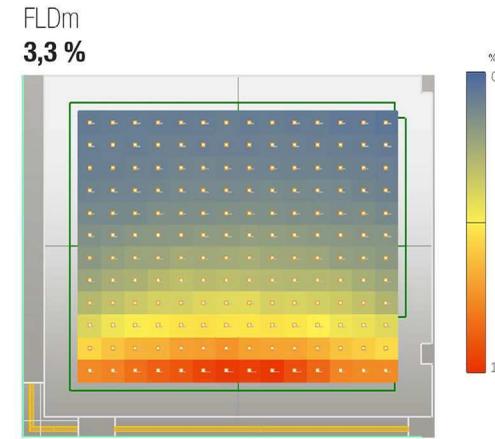
FLDm = 3,5 % > 3 % (VERIFICATO)
 sDA500, 50% = 91 % > 55 % (VERIFICATO)
 ASE1000, 250h = 41 % > 7 % (NON VERIFICATO)



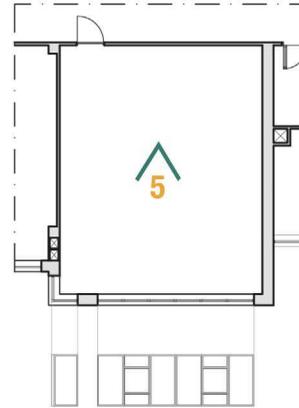
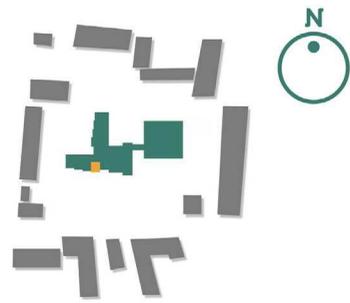
AULA 4Sud (secondo piano)



FLDm = 3,3 % > 3 % (VERIFICATO)
 sDA300, 50% = 100 % > 55 % (VERIFICATO)
 ASE1000, 250h = 61 % > 7 % (NON VERIFICATO)



AULA 5Sud (secondo piano)

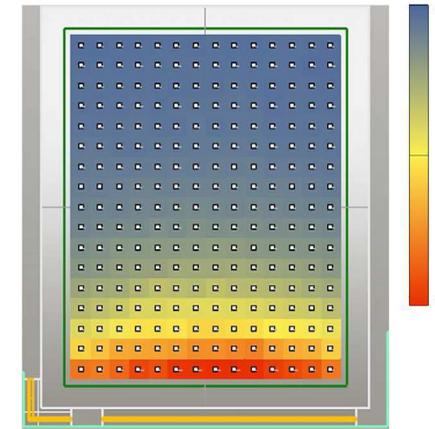


DGP=37% (Vista 5)
02/02 ore 14:00

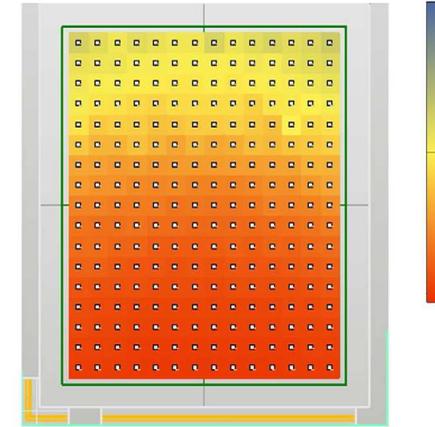


FLDm = 2,5 % < 3 % (NON VERIFICATO)
sDA300, 50% = 74 % > 55 % (VERIFICATO)
ASE1000, 250h = 42 % > 7 % (NON VERIFICATO)

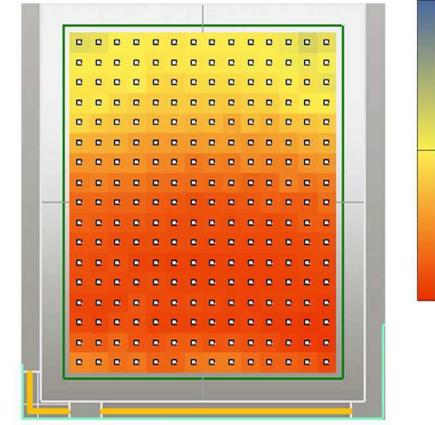
FLDm
2,5 %



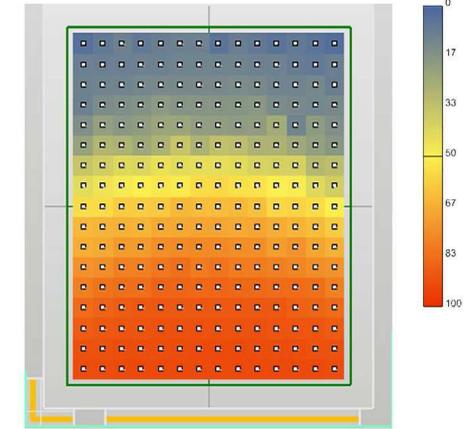
DAcon 500 lx_ Continuous daylight autonomy
75 %



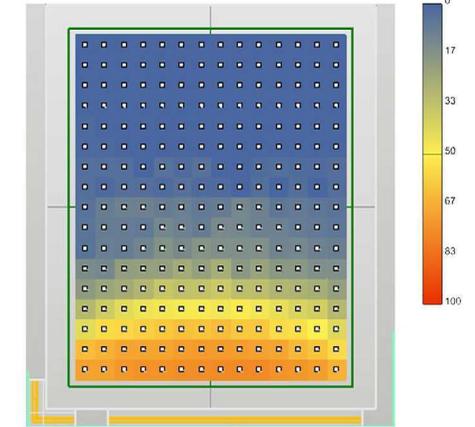
UDI100-2000 lx
71 %



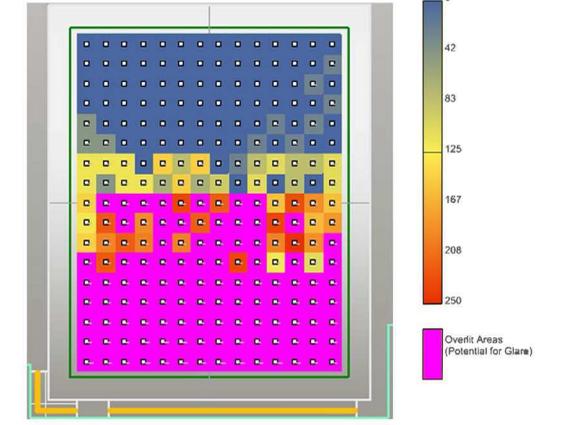
DA500 lx_ Daylight autonomy
53 %



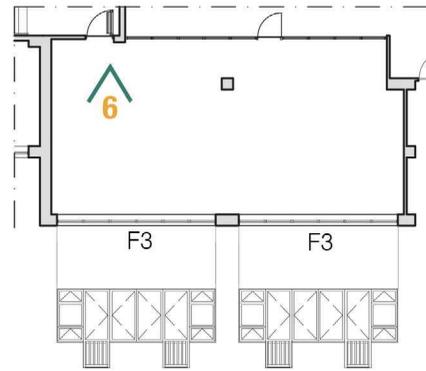
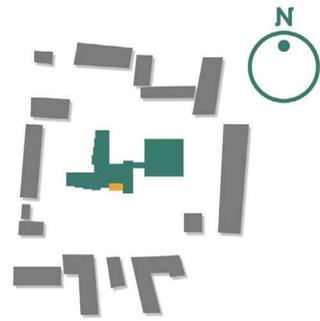
UDIexceed 2000 lx
19 %



ASE1000 lx, 250 h
42 %



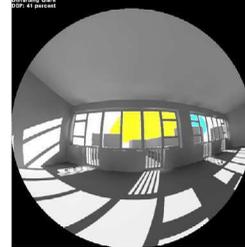
AULA 6Sud (secondo piano)



Rendering con schermature

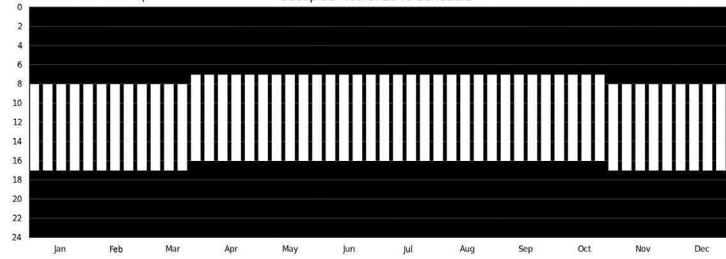


DGP=41% (Vista 6)
02/02 ore 14:00



Profilo di occupazione

Occupied Hours: 2349 Schedule

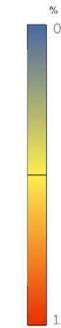
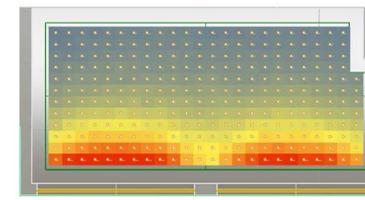


Annual glare

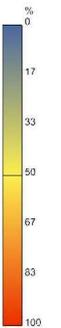
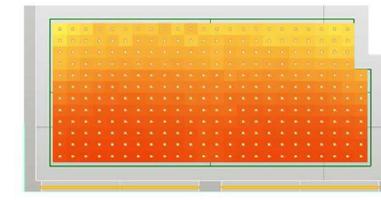


FLDm = 3,8 % > 3 % (VERIFICATO)
 sDA300, 50% = 100 % > 55 % (VERIFICATO)
 ASE1000, 250h = 64 % > 7 % (NON VERIFICATO)

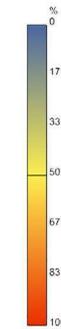
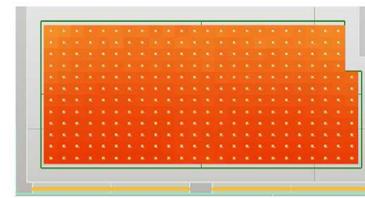
FLDm
3,8 %



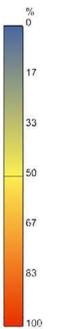
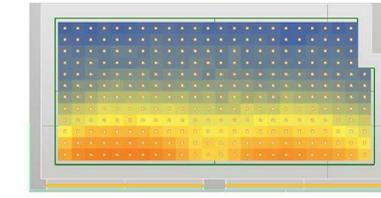
DA500 lx_ Daylight autonomy
78 %



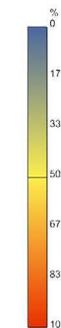
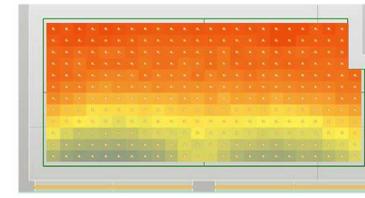
DAcon 500 lx_ Continuous daylight autonomy
89 %



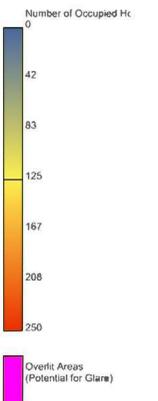
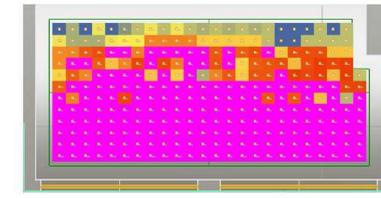
UDlexceed 2000 lx
30 %



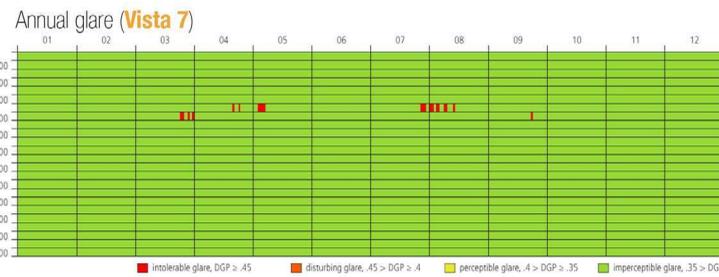
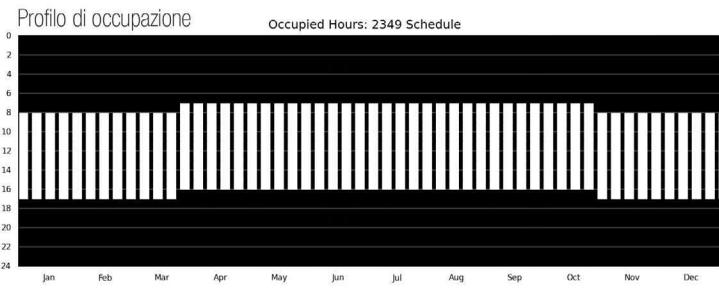
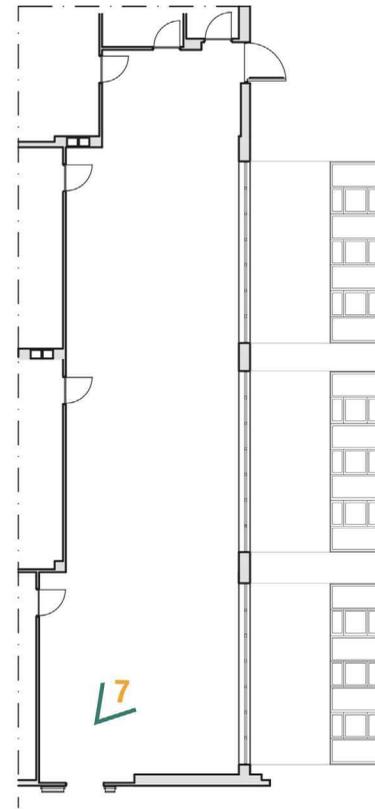
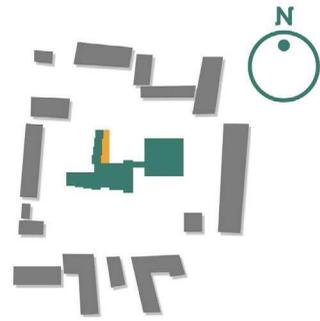
UDI100-2000 lx
65 %



ASE1000 lx, 250 h
64 %

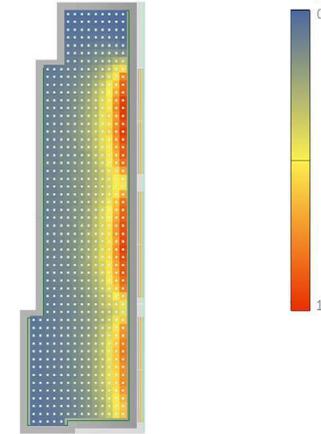


CORRIDOIO 7Est (secondo piano)

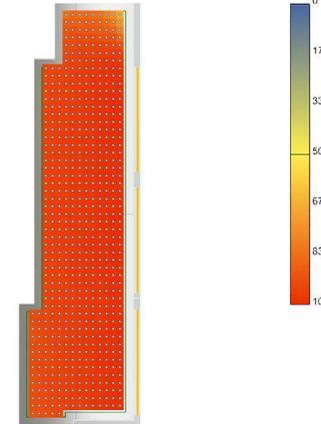


FLDm = 3 % = 3 % (VERIFICATO)
 sDA300, 50% = 88 % > 55 % (VERIFICATO)
 ASE1000, 250h = 35 % > 7 % (NON VERIFICATO)

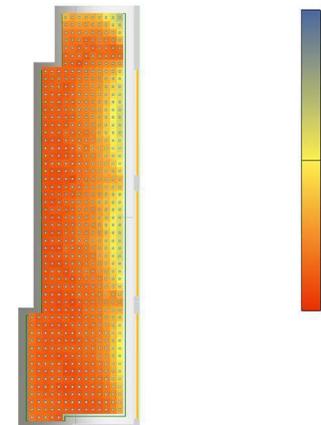
FLDm
3 %



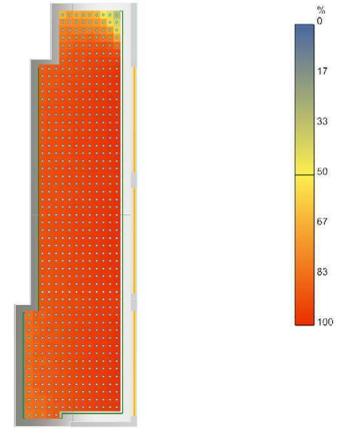
DAcon 100 lx_ Continuous daylight autonomy
96 %



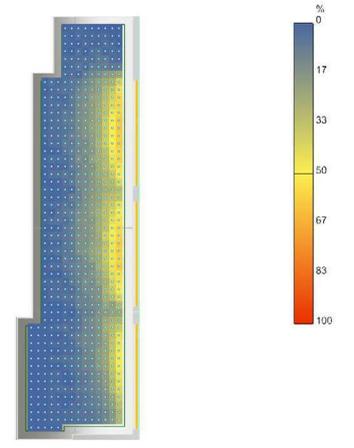
UDI100-2000 lx
79 %



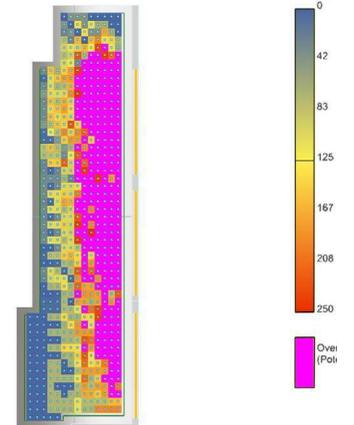
DA100 lx_ Davlight autonomy
92 %



UDlexceed 2000 lx
14 %



ASE1000 lx, 250 h
35 %



7.3.3. ANALISI CRITICA DEI RISULTATI

A valle delle simulazioni finora riportate, si è ritenuto opportuno effettuare delle analisi più dettagliate su un singolo ambiente (*Aula 5Sud*) [Figura 7.11], che è stato preso come riferimento in quanto presenta alcune criticità riconducibili a gran parte degli ambienti studiati. In primo luogo, dato che l'aula risulta essere molto profonda e presenta delle aperture solo da un lato, risulta evidente che la luce naturale si distribuisce in modo poco uniforme all'interno dell'ambiente. Si registrano infatti valori molto alti del Fattore medio di luce diurna in prossimità della finestra e valori sempre più bassi man mano che ci si allontana dall'apertura, con conseguenti valori di uniformità insoddisfacenti [Figura 7.12].

Inoltre, dato che il Fattore di luce diurna non tiene conto della presenza di schermature dinamiche, sono state fatte ulteriori verifiche al fine di valutare in quale modo le schermature attualmente presenti (veneziane interne con lamelle regolabili) influenzano le condizioni di illuminazione naturale dell'aula. A tale scopo, un parametro molto utile per valutare la distribuzione della luce in ambiente è la Spatial Daylight Autonomy ($sDA_{300lx, 50\%}$), che rappresenta la percentuale di spazio in cui viene garantito un livello minimo di illuminamento (300 lx) per una frazione specifica di tempo (50% delle ore totali di utilizzo dell'ambiente). Sono stati dunque valutati i valori di sDA senza schermature e con schermature dinamiche attive: come si può evincere dalle piante, si riscontrano valori insoddisfacenti ($sDA < 55\%$)

nel caso in cui le veneziane interne vengono utilizzate [Figura 7.13]. Ciò accade in quanto le schermature risultano essere attive per la quasi totalità delle ore di utilizzo dell'ambiente, con conseguenti effetti negativi e peggiorativi sulle condizioni di illuminazione naturale dell'aula [Figura 7.14].

Figura 7.11

Modello 3D schematico dell'aula 5S
© Elaborazione grafica dell'autore

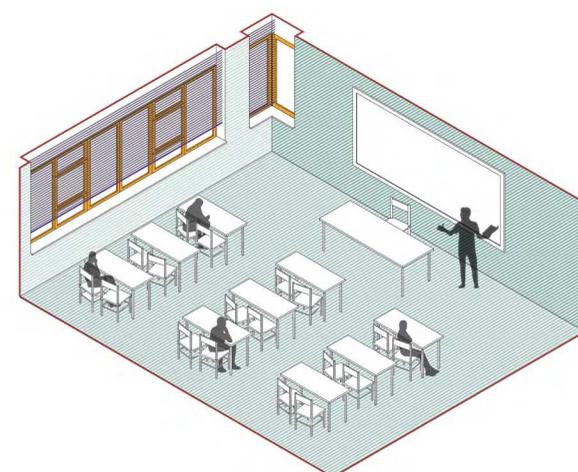


Figura 7.12

Variazione del Fattore medio di luce diurna al variare della distanza dall'apertura
© Elaborazione grafica dell'autore

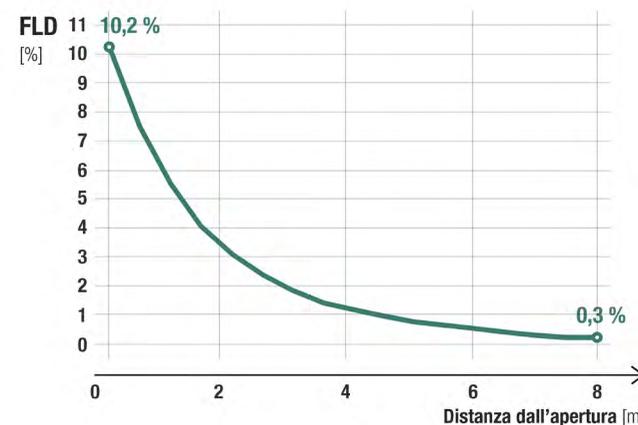


Figura 7.13

Rappresentazione della sDA (Spatial Daylight Autonomy): confronto tra i valori ottenuti senza schermature (a sinistra) e con schermature attive (a destra)
© Elaborazione grafica dell'autore

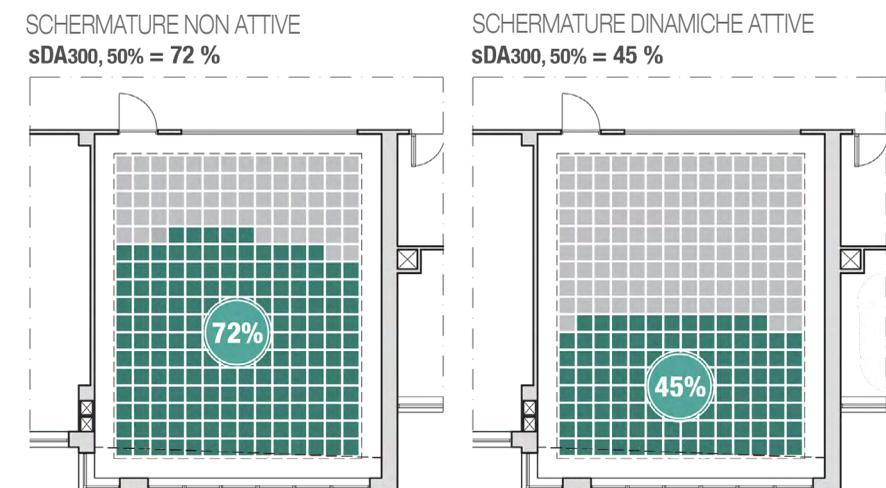
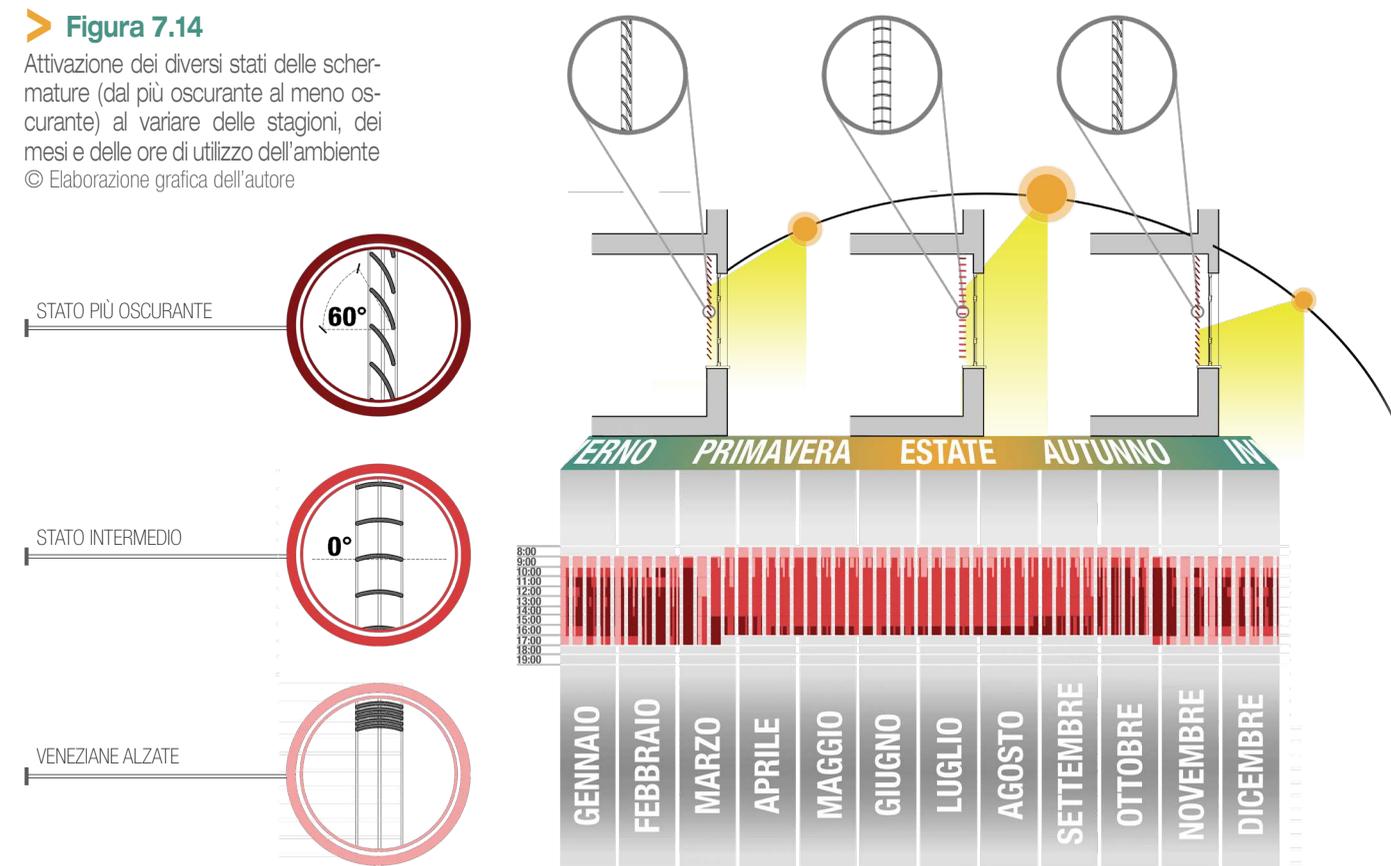
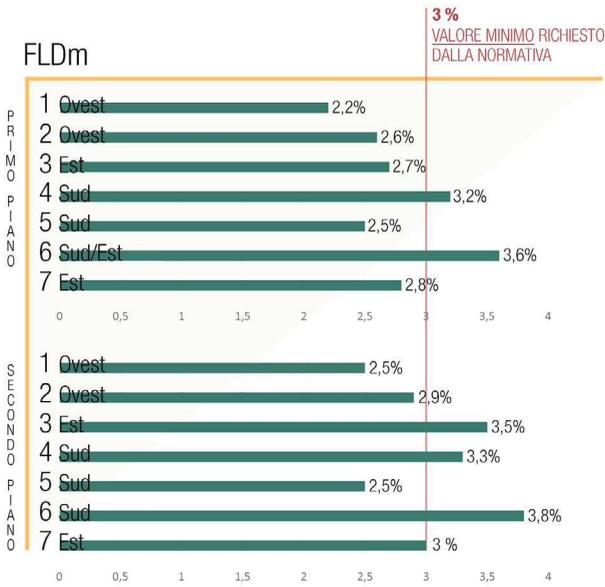
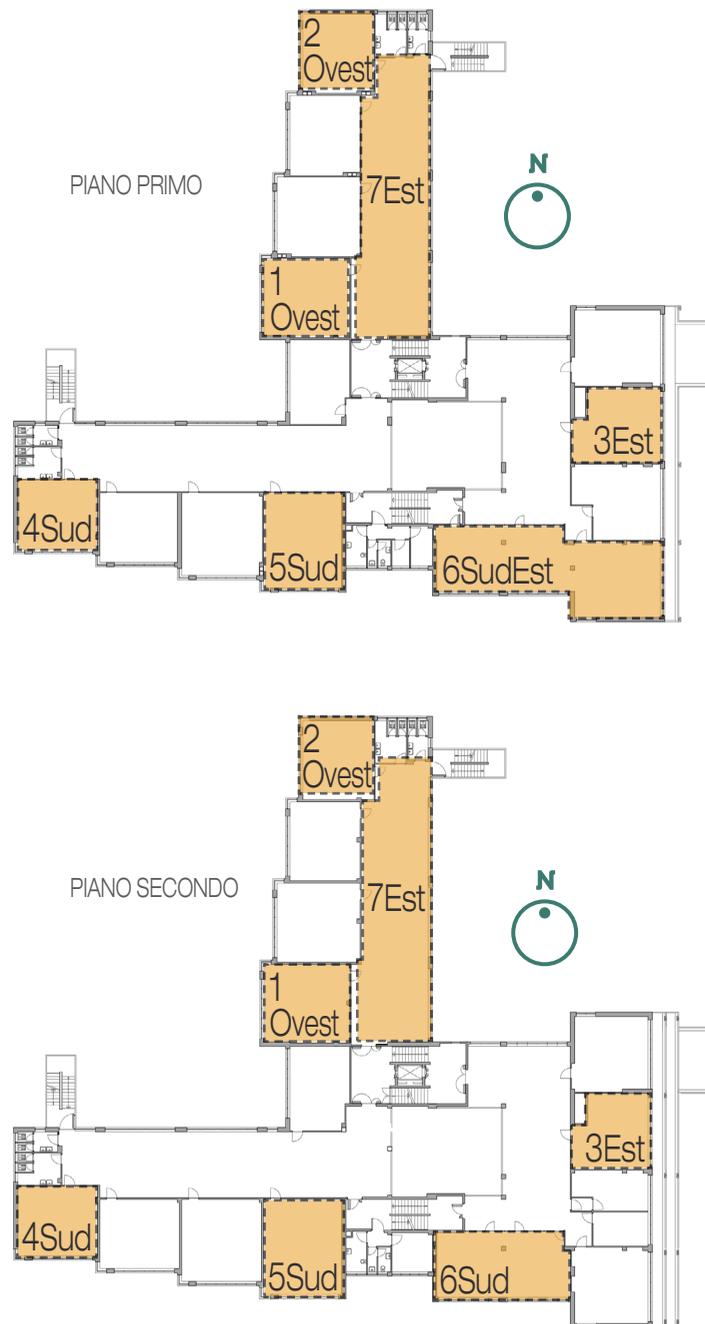


Figura 7.14

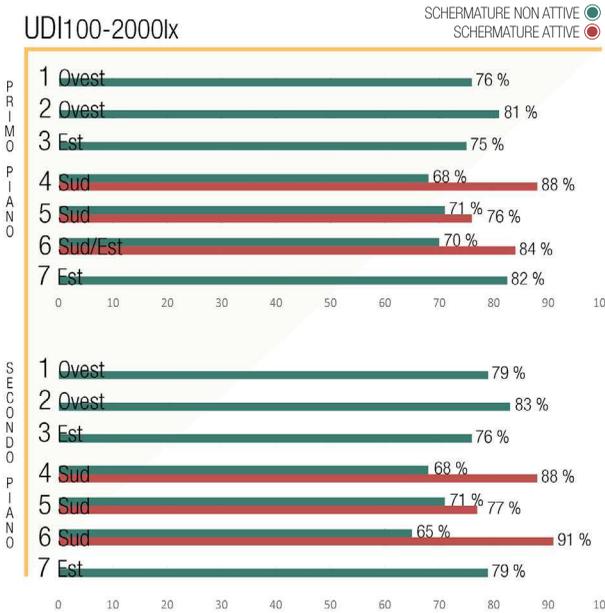
Attivazione dei diversi stati delle schermature (dal più oscurante al meno oscurante) al variare delle stagioni, dei mesi e delle ore di utilizzo dell'ambiente
© Elaborazione grafica dell'autore



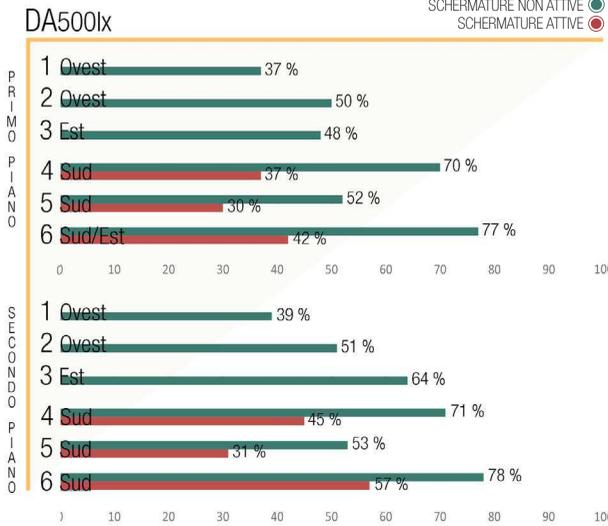
CONFRONTO TRA I TUTTI I PARAMETRI ANALIZZATI PER CIASCUN AMBIENTE



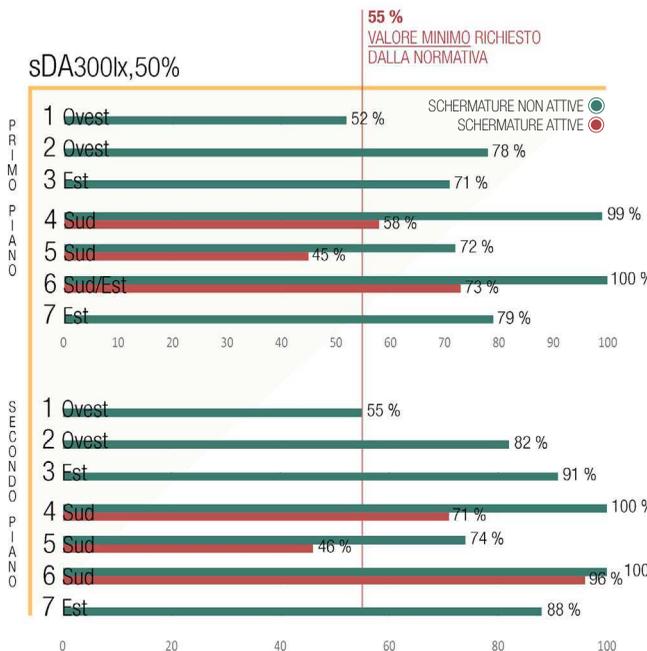
Si riscontrano valori superiori al 3% (valore minimo richiesto dalla normativa vigente) solo per alcune aule esposte a sud. Le aule al secondo piano presentano valori leggermente più alti rispetto agli ambienti corrispondenti del primo piano.



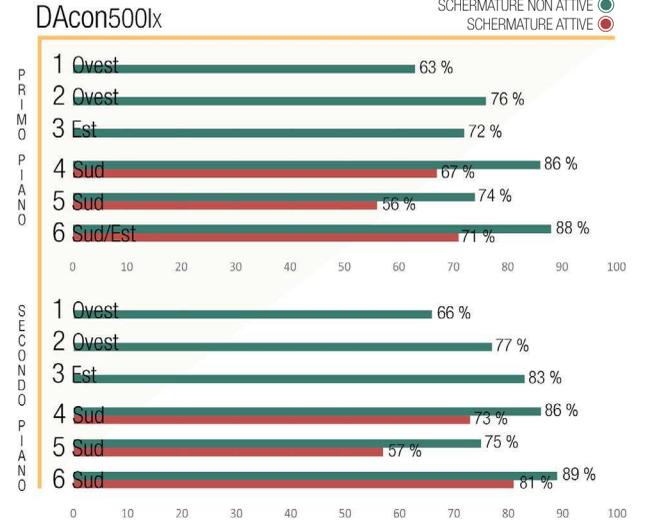
Definisce la percentuale di tempo nell'arco di un anno in cui la disponibilità di luce naturale risulta "utile" allo svolgimento del compito visivo, mantenendosi entro valori di illuminamento né troppo bassi (<100 lx) né troppo alti (>2500 lx). In generale si riscontrano valori quasi accettabili per la maggior parte degli ambienti (UDI ≈ 80%); i valori aumentano significativamente se si considerano attive le schermature dinamiche.



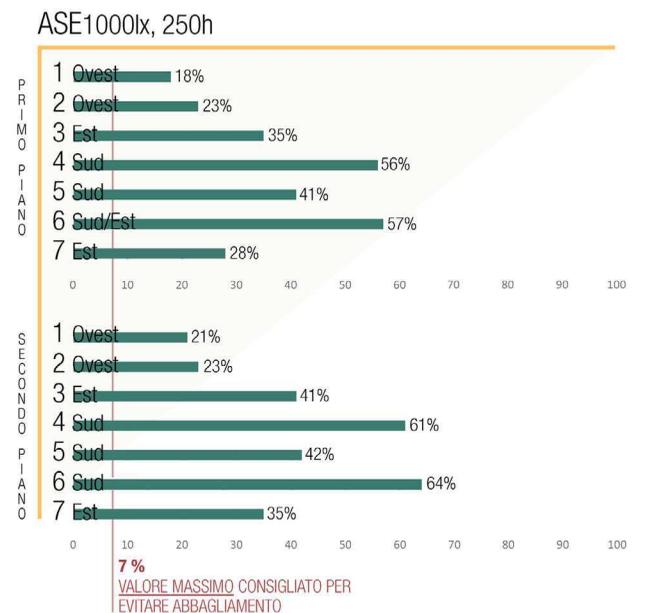
Definisce la percentuale di tempo nell'arco di un anno in cui la sola luce naturale è in grado di garantire il livello minimo di illuminamento definito secondo normativa (500 lx). Si riscontrano valori accettabili per buona parte degli ambienti ad eccezione delle aule ad ovest. I valori peggiorano considerevolmente se si considerano attive le schermature dinamiche.



Definisce la percentuale di spazio in cui viene garantito un livello minimo di illuminamento (300 lx) per una frazione specifica di tempo (50% delle ore totali di utilizzo dell'ambiente). Si riscontrano valori superiori o uguali al 55% (valore minimo consigliato per garantire adeguate condizioni di illuminazione naturale) per tutti gli ambienti, fa eccezione una sola aula esposta ad ovest.



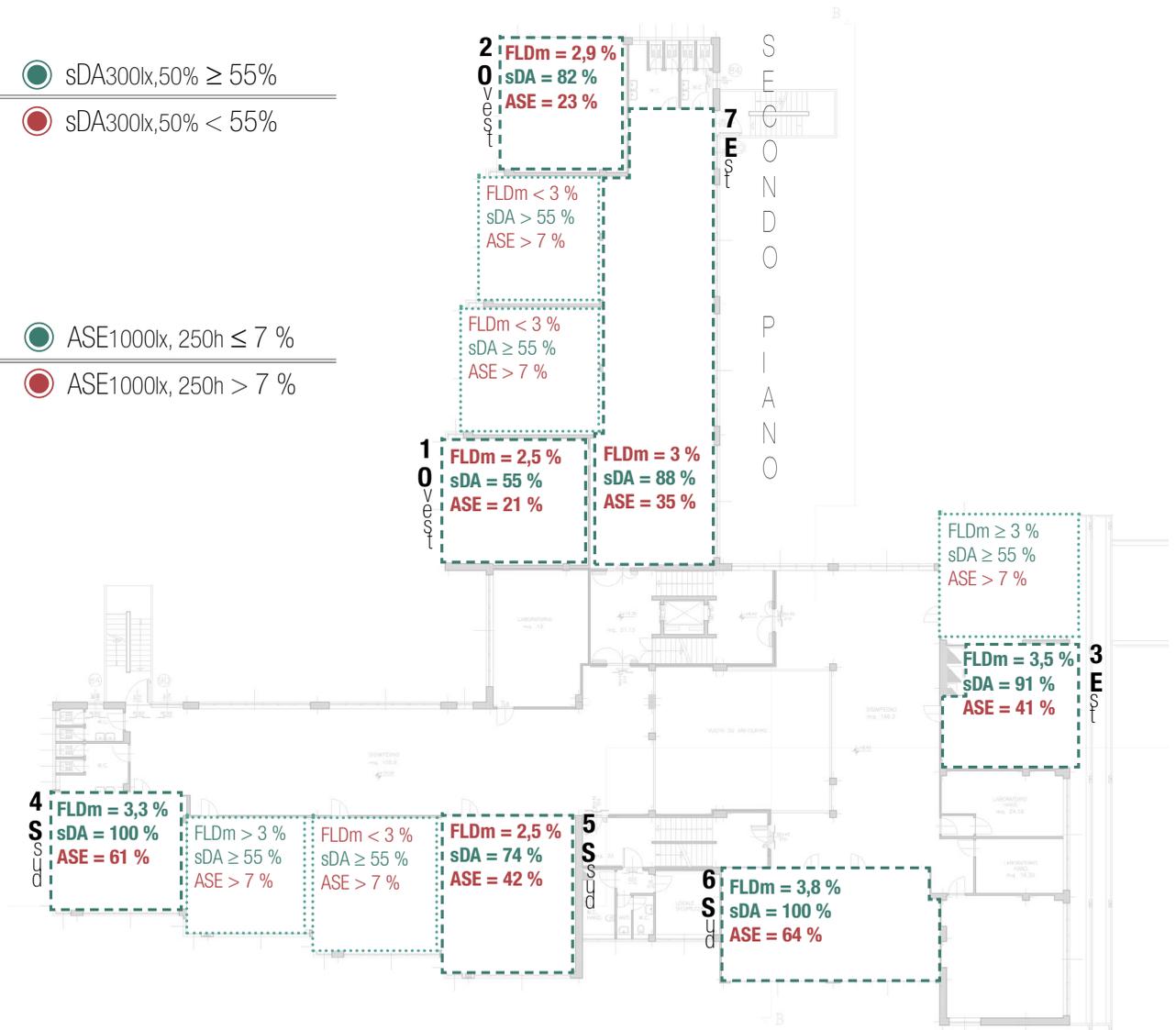
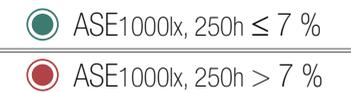
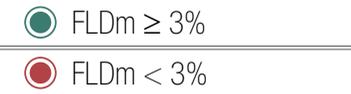
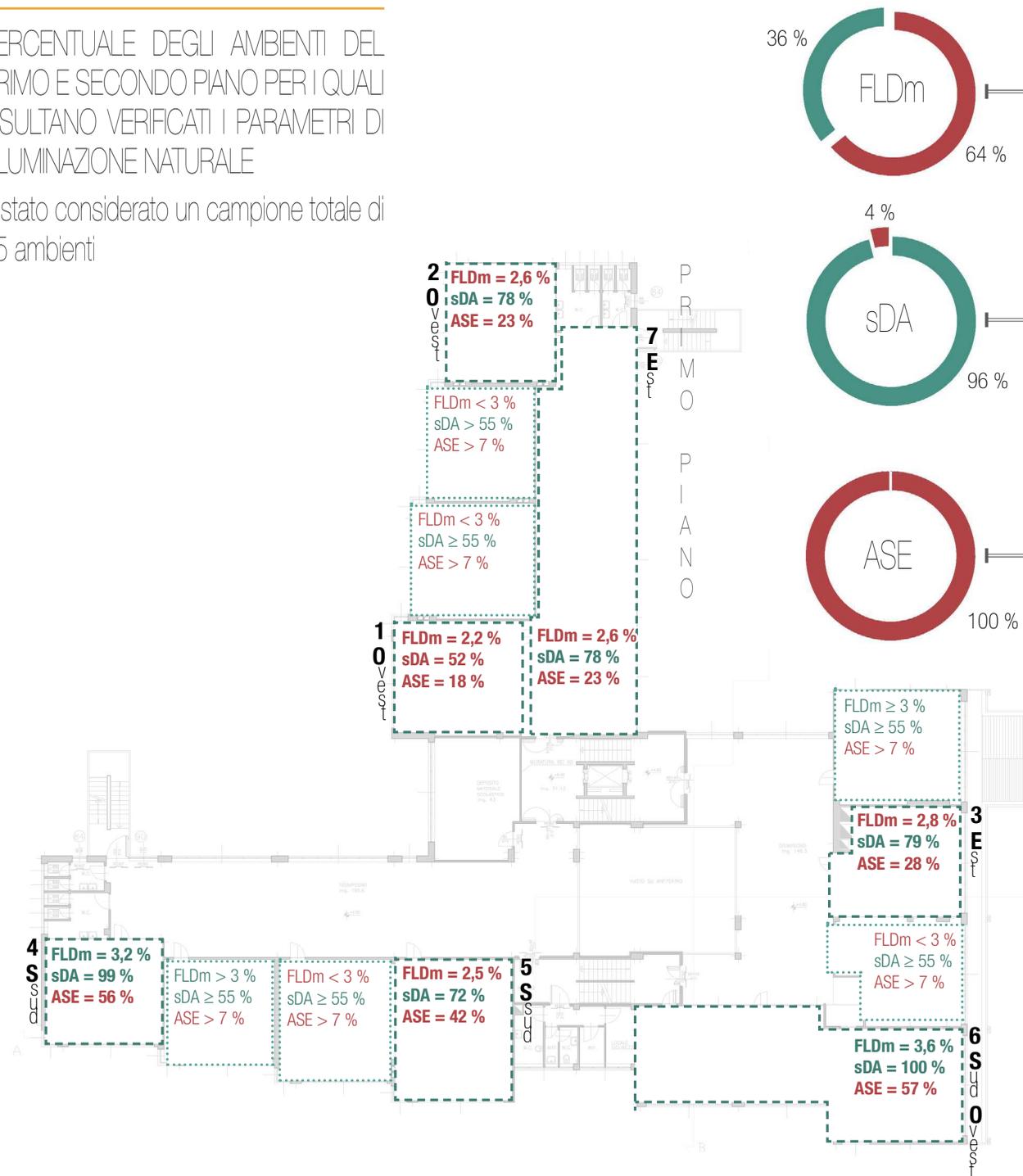
Rappresenta il contributo percentuale che la sola luce naturale è in grado di fornire al fine di garantire il raggiungimento del valore minimo di illuminamento richiesto dalla normativa (500lx). Si riscontrano valori accettabili per buona parte degli ambienti, i valori peggiorano sensibilmente se si considerano attive le schermature dinamiche.



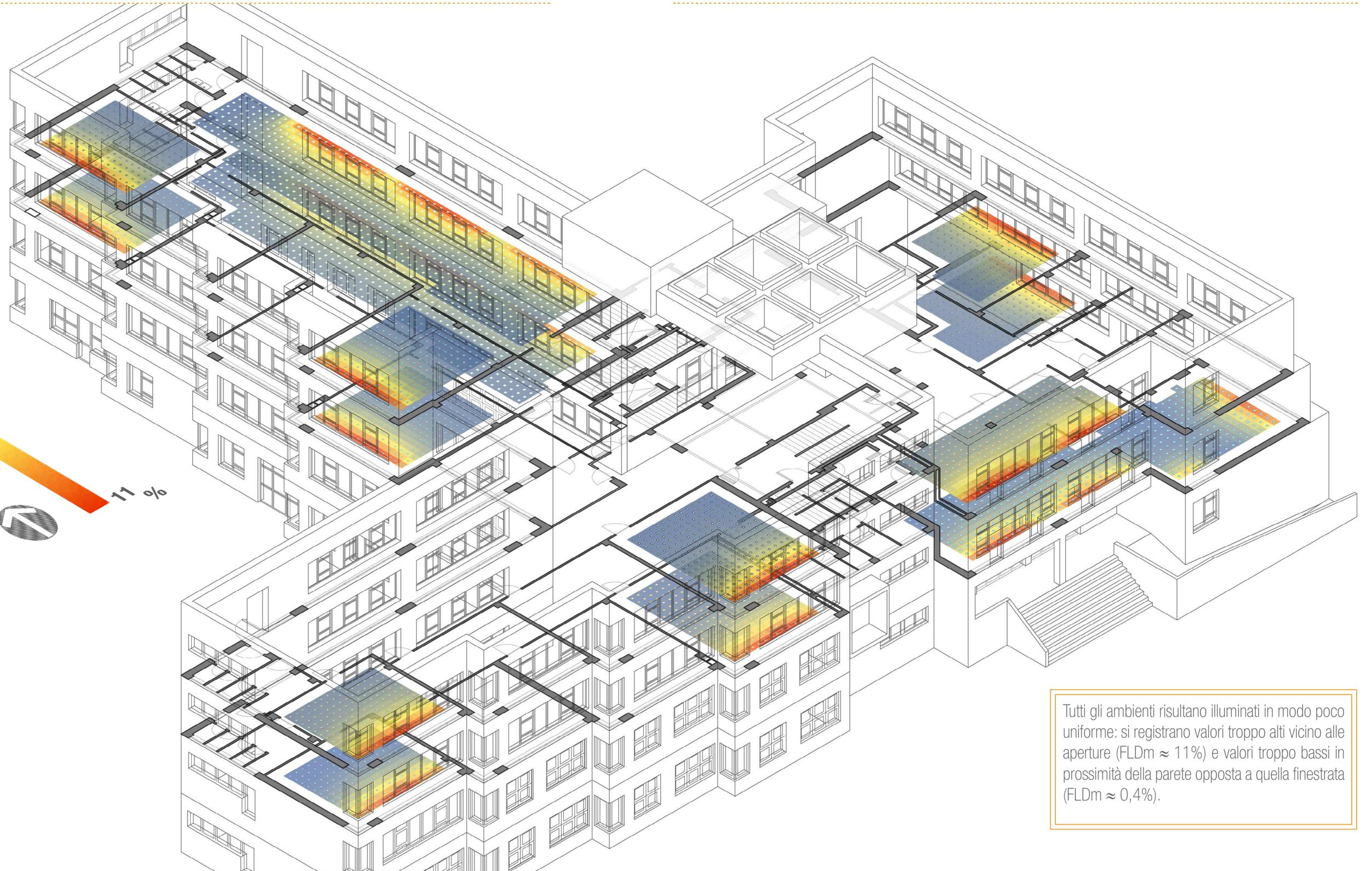
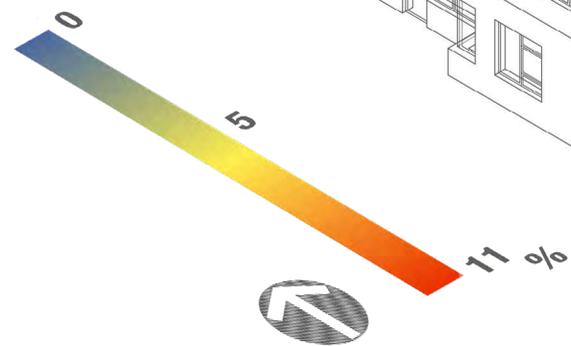
Definisce la percentuale di spazio in cui viene superato un determinato valore di illuminamento (1000 lx) considerando una frazione specifica delle ore di utilizzo dell'ambiente (250h). Si registrano valori del tutto insoddisfacenti per tutti gli ambienti (ASE > 7%), in modo particolare per le aule esposte in cui si hanno valori di ASE superiori al 50% (potenziale condizione di abbagliamento).

PERCENTUALE DEGLI AMBIENTI DEL PRIMO E SECONDO PIANO PER I QUALI RISULTANO VERIFICATI I PARAMETRI DI ILLUMINAZIONE NATURALE

È stato considerato un campione totale di 25 ambienti

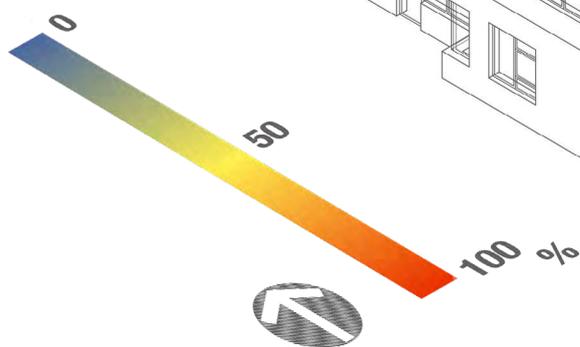


FLDm

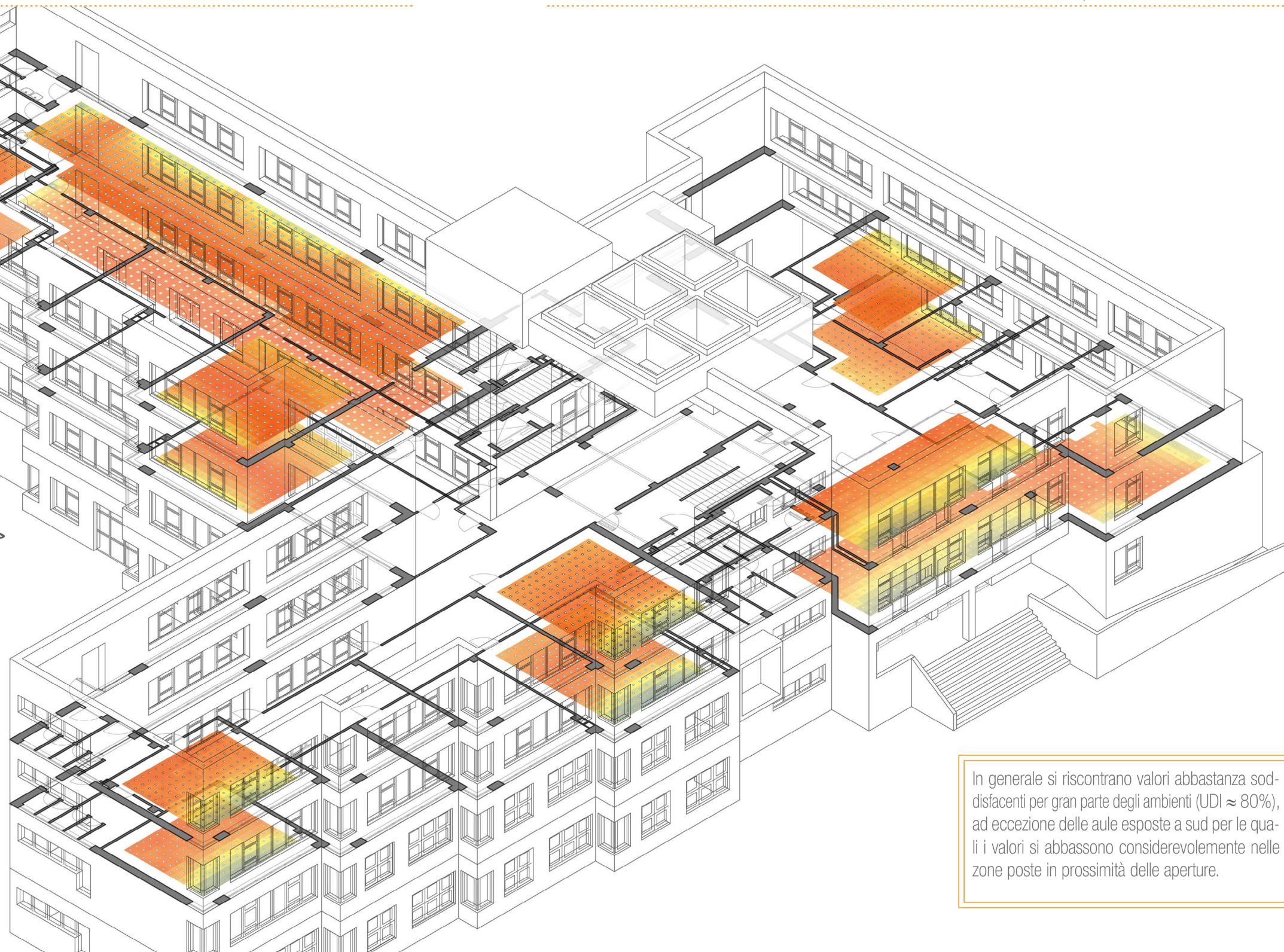
FATTORE MEDIO DI
LUCE DIURNA

Tutti gli ambienti risultano illuminati in modo poco uniforme: si registrano valori troppo alti vicino alle aperture (FLDm \approx 11%) e valori troppo bassi in prossimità della parete opposta a quella finestrata (FLDm \approx 0,4%).

UDI
USEFUL DAYLIGHT
ILLUMINANCE

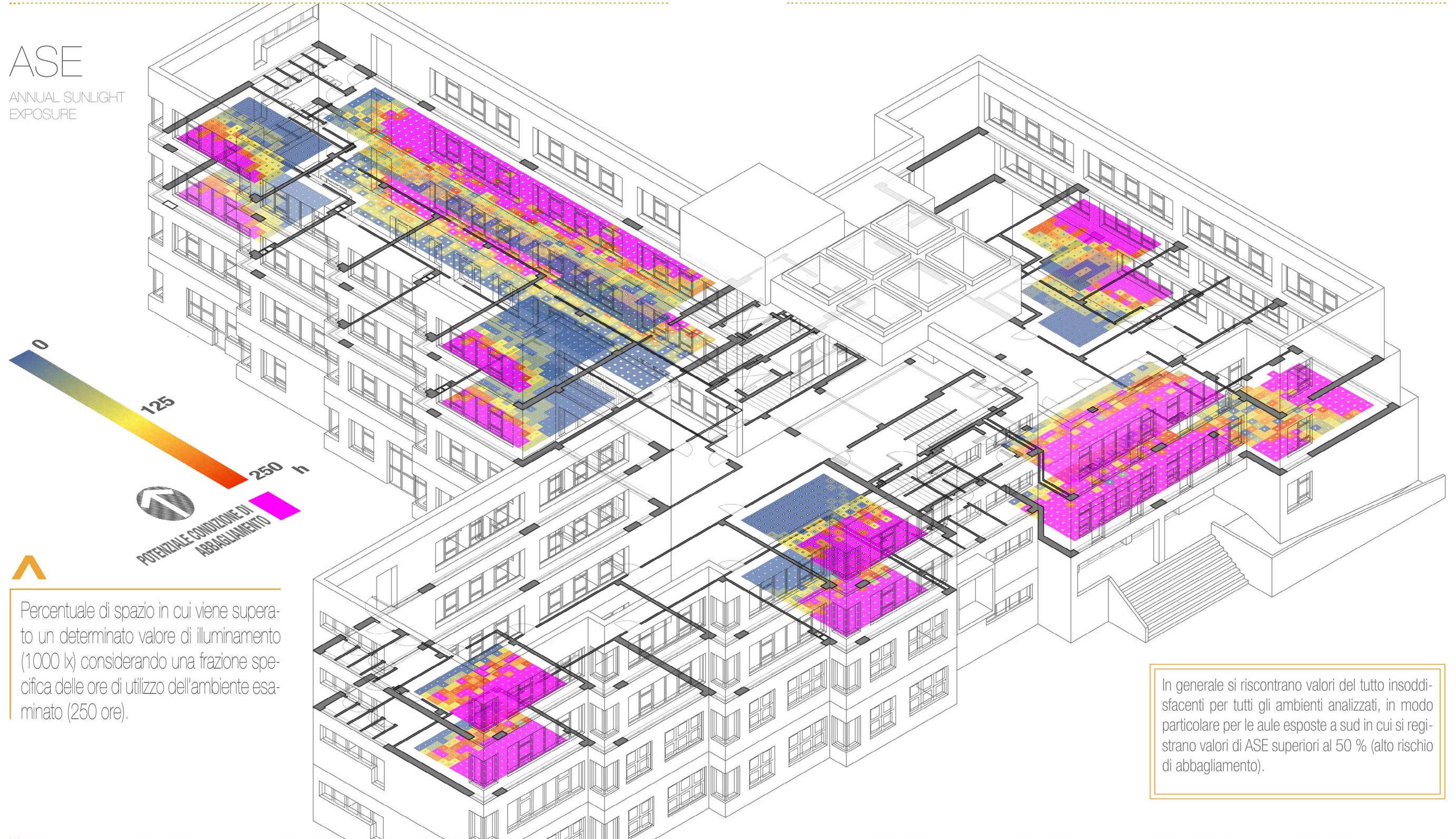


Percentuale di tempo in cui la disponibilità di luce naturale risulta "utile" allo svolgimento del compito visivo, mantenendosi entro valori di illuminamento né troppo bassi (<100 lx) né troppo alti (>2500 lx).



In generale si riscontrano valori abbastanza soddisfacenti per gran parte degli ambienti (UDI ≈ 80%), ad eccezione delle aule esposte a sud per le quali i valori si abbassano considerevolmente nelle zone poste in prossimità delle aperture.

ASE

ANNUAL SUNLIGHT
EXPOSURE

Percentuale di spazio in cui viene superato un determinato valore di illuminamento (1000 lx) considerando una frazione specifica delle ore di utilizzo dell'ambiente esaminato (250 ore).

In generale si riscontrano valori del tutto insoddisfacenti per tutti gli ambienti analizzati, in modo particolare per le aule esposte a sud in cui si registrano valori di ASE superiori al 50 % (alto rischio di abbagliamento).

Considerate le molteplici criticità riscontrate nell'analisi dello stato di fatto, il seguente capitolo mira a presentare una nuova proposta progettuale per l'Istituto Drovetti di Torino, col fine ultimo di garantire un miglioramento delle prestazioni energetiche e delle condizioni di illuminazione naturale negli ambienti indoor.

Oltre al soddisfacimento di tali requisiti, il progetto si propone di vivacizzare e rinnovare l'aspetto della scuola attraverso un nuovo disegno di facciata che ne esalta le forme e le peculiarità, contribuendo a creare un ambiente stimolante, colorato e decisamente più congeniale per gli studenti.

8 Proposta di progetto: un nuovo volto per la scuola Drovetti

8.1. ANALISI DELLE CRITICITÀ E DELLE ESIGENZE

A valle delle considerazioni e delle simulazioni finora effettuate in merito allo stato di fatto, sono emerse alcune evidenti criticità per quanto concerne gli aspetti legati all'efficienza energetica dell'involucro trasparente e all'illuminazione naturale degli ambienti interni.

Relativamente agli aspetti energetici, si riscontrano in primo luogo delle bassissime prestazioni termiche per gran parte dei serramenti della scuola, caratterizzati da valori di trasmittanza termica U_w di gran lunga superiori rispetto ai valori limite richiesti dal *D.M. 11/01/2017* ($U_w \leq 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$). Inoltre, tenendo conto che gran parte delle aule sono esposte a sud, non sono presenti dei sistemi di protezione solare e ombreggiamento utili a ridurre i carichi termici nei mesi più caldi, indispensabili per poter garantire adeguate condizioni di confort termico negli ambienti indoor. Al fine di ridurre l'in-

gresso della radiazione termica e minimizzare gli apporti termici in estate, risulta necessario inoltre adoperare dei vetri caratterizzati da un fattore solare più basso (valori compresi tra il 20% e il 40%), premurandosi di garantire al tempo stesso elevati valori di trasmissione luminosa ($TL > 70\%$).

Per quanto riguarda le condizioni di illuminazione naturale degli ambienti interni, in ragione del fatto che quasi tutte le aule sono illuminate unilateralmente, si riscontrano bassi valori di uniformità per gran parte degli ambienti interni, caratterizzati da elevati valori di illuminamento in prossimità delle aperture (provocando potenziali condizioni di abbagliamento) e valori molto bassi in prossimità della parete opposta a quella finestrata. Risulta dunque necessario prevedere dei sistemi di ridirezionamento e conduzione della luce naturale volti a ridistribuire l'illuminazione in ambiente in modo più uniforme, con il fine ultimo di garantire prestazioni visive adeguate anche nelle zone poste

più lontane rispetto alle aperture. È necessario inoltre prevedere dei sistemi di schermatura solare che, oltre a minimizzare gli apporti termici in estate, consentano allo stesso tempo un'adeguata protezione dall'abbagliamento: bisogna garantire che per ogni punto dell'ambiente non si abbia un valore di DGP superiore al 45% per oltre il 5% delle ore di utilizzo dell'ambiente ($DGP_{e<5\%} < 0,45$), in modo particolare per le aule esposte a sud in cui si registrano valori di ASE molto elevati. In ultima istanza, al fine di garantire una condizione di benessere psicofisico degli utenti (studenti e insegnanti), la norma *CEN EN 17037:2018* prevede che vengano soddisfatti altri due re-

quisiti in aggiunta a quello sopraelencati: garantire un'adeguata vista verso l'esterno, verificando che la vista dalla finestra contenga almeno una delle tre fasce che generalmente la compongono (cielo, orizzonte, paesaggio naturale/urbano); garantire la penetrazione della radiazione solare diretta in ambiente per almeno un'ora e mezza, considerando un arco temporale compreso tra il primo febbraio e il 21 marzo.

Nelle pagine seguenti vengono riportate le principali esigenze e i requisiti in riferimento alle aule scolastiche e agli spazi distributivi, tenendo conto dei diversi utenti coinvolti in relazione alle differenti destinazioni d'uso.

AULE SCOLASTICHE

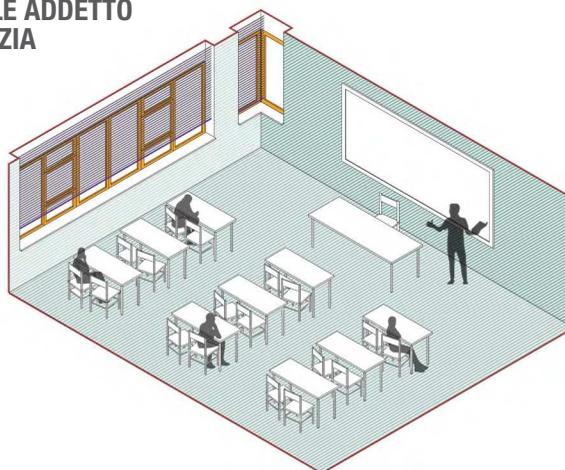
> UTENZA

**STUDENTI
INSEGNANTI**

PERSONALE DELLA SCUOLA

**PERSONALE ADDETTO
ALLA PULIZIA**

ENTI ESTERNI



ATTIVITA' ✓

**LEGGERE
SCRIVERE**

DISEGNARE

LEGGERE DALLA LAVAGNA

ATTIVITA' DI LABORATORIO

ATTIVITA' MUSICALI

**PROIEZIONE DI MATERIALE DI
SUPPORTO ALLA DIDATTICA**

ATTIVITA' EXTRACURRICULARI

PULIZIA DELLE FINESTRE E DEI COMPONENTI SCHERMANTI

ESIGENZE

CONFORT VISIVO

- Garantire un livello di illuminamento adeguato sulla superficie dei banchi per lo svolgimento delle attività previste
- Garantire un illuminamento adeguato sulla superficie della lavagna per consentire la corretta visione dagli studenti
- Garantire un illuminamento adeguato per lo svolgimento di eventuali attività di laboratorio che richiedono una maggiore quantità di luce
- Evitare fenomeni di abbagliamento che possono rendere difficoltoso lo svolgimento delle attività previste
- Possibilità di oscurare parzialmente o totalmente l'ambiente al fine di rendere possibile la proiezione di materiale didattico
- Garantire un adeguato livello di illuminamento anche nelle ore pomeridiane in occasione di eventuali attività extracurricolari
- Rendere possibile la corretta pulizia delle finestre e delle componenti schermanti

BENESSERE TERMOIGROMETRICO E RISPARMIO ENERGETICO

- Garantire un adeguato livello di isolamento termico di tutte le componenti del serramento al fine di minimizzare le dispersioni termiche nei mesi invernali
- Consentire l'ingresso della radiazione solare diretta durante le stagioni fredde, al fine di ottenere degli apporti energetici gratuiti
- Possibilità di schermare la radiazione solare diretta durante le stagioni calde, al fine di evitare un surriscaldamento eccessivo degli ambienti
- Garantire un'adeguata ventilazione naturale degli ambienti

GESTIONE E MANUTENZIONE

- Rendere possibile la corretta pulizia delle finestre e delle componenti schermanti, rendendoli accessibili anche dall'esterno
- Rendere possibile la riparazione o la sostituzione di alcune parti del serramento o delle componenti schermanti

SOSTENIBILITA' ECONOMICA

- Trovare il giusto compromesso finalizzato al soddisfacimento delle esigenze minimizzando i costi
- Attribuire ad un unico elemento il soddisfacimento di più esigenze al fine di minimizzare i costi

REQUISITI

REQUISITI ILLUMINOTECNICI

UNI 10840:2007
CEN EN 17037:2018

FLDm ≥ 3%
Em ≥ 500 lx
DGP_{e<5%} < 0,45 [-]
Ra ≥ 80 [-]

PARAMETRI DINAMICI

(Valori consigliati)

sDA_{300 lx, 50%} ≥ 55%
ASE_{1000 lx, 250h} ≤ 7%
UDI_{100-2000 lx} ≈ 80%

REQUISITI DI PRESTAZIONE ENERGETICA

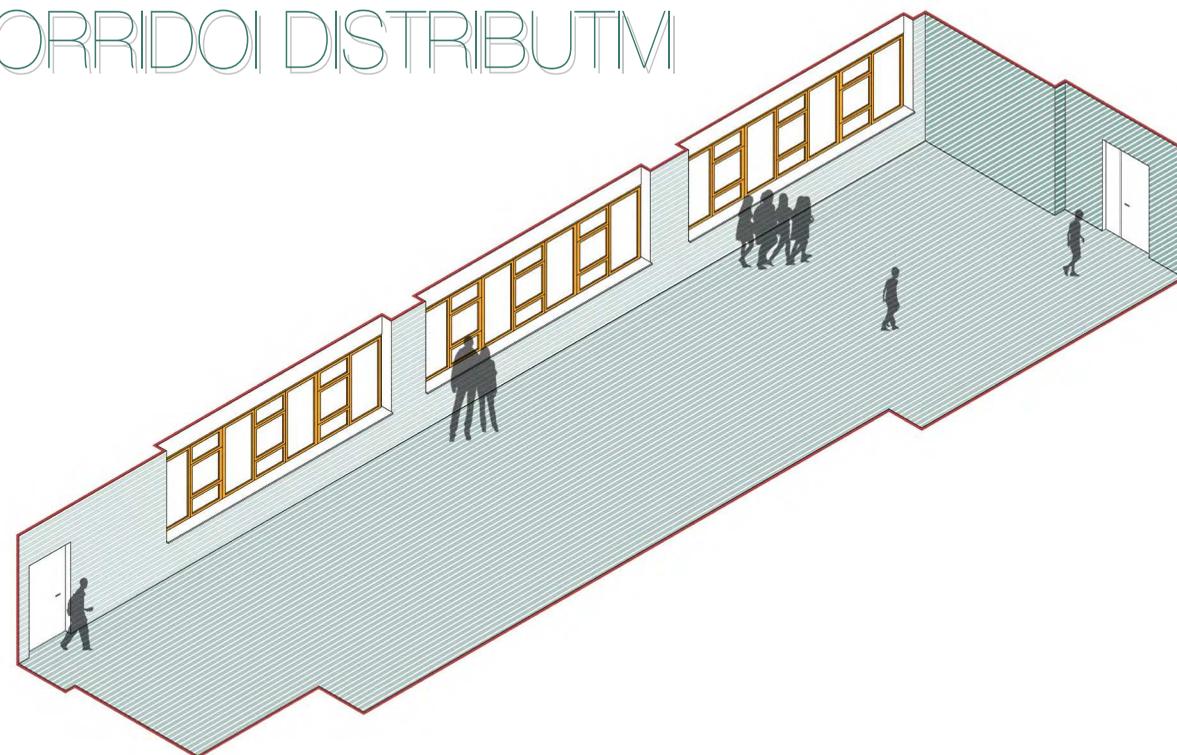
D.M. 11/01/2017

Uw ≤ 1,4 W/m²K

g_{gl+sh} < 0,35 [-]

(Zona climatica E)

CORRIDOI DISTRIBUTIVI



UTENZA

STUDENTI
INSEGNANTI
 PERSONALE DELLA SCUOLA
 PERSONALE ADDETTO
 ALLA PULIZIA
 ENTI ESTERNI

ATTIVITA'

**PASSAGGIO E
 SPOSTAMENTO
 DA UN'AULA ALL'ALTRA**

ALLESTIMENTO DI EVENTUALI MOSTRE O ATTIVITA' COLLETTIVE

PROIEZIONE DI MATERIALE DI
 SUPPORTO ALLA DIDATTICA

ATTIVITA' EXTRACURRICULARI

PULIZIA DEI LOCALI, DELLE FINESTRE E DEI COMPONENTI
 SCHERMANTI

ESIGENZE

CONFORT VISIVO

- Garantire un livello di illuminamento adeguato sulla superficie del pavimento per lo svolgimento delle attività previste
- Evitare fenomeni di abbagliamento che possono rendere difficoltoso lo svolgimento delle attività previste
- Possibilità di oscurare parzialmente o totalmente l'ambiente al fine di rendere possibile la proiezione di materiale didattico o di altro tipo
- Rendere possibile la corretta pulizia delle finestre e delle componenti schermanti

BENESSERE TERMOIGROMETRICO E RISPARMIO ENERGETICO

- Garantire un adeguato livello di isolamento termico di tutte le componenti del serramento al fine di minimizzare le dispersioni termiche nei mesi invernali
- Consentire l'ingresso della radiazione solare diretta durante le stagioni fredde, al fine di ottenere degli apporti energetici gratuiti
- Possibilità di schermare la radiazione solare diretta durante le stagioni calde, al fine di evitare un surriscaldamento eccessivo degli ambienti
- Garantire un'adeguata ventilazione naturale degli ambienti

GESTIONE E MANUTENZIONE

- Rendere possibile la corretta pulizia delle finestre e delle componenti schermanti, rendendoli accessibili anche dall'esterno
- Rendere possibile la riparazione o la sostituzione di alcune parti del serramento o delle componenti schermanti

SOSTENIBILITA' ECONOMICA

- Trovare il giusto compromesso finalizzato al soddisfacimento delle esigenze minimizzando i costi
- Attribuire ad un unico elemento il soddisfacimento di più esigenze al fine di minimizzare i costi

REQUISITI

REQUISITI ILLUMINOTECNICI

UNI 10840:2007
 CEN EN 17037:2018

FLDm ≥ 1%
Em ≥ 100 lx
DGP_{e<5%} < 0,45 [-]
Ra ≥ 80 [-]

PARAMETRI DINAMICI

(Valori consigliati)

sDA_{300 lx, 50%} ≥ 55%
ASE_{1000 lx, 250h} ≤ 7%
UDI_{100-2000 lx} ≈ 80%

REQUISITI DI PRESTAZIONE ENERGETICA

D.M. 11/01/2017

Uw ≤ 1,4 W/m²K
g_{gl+sh} < 0,35 [-]
 (Zona climatica E)

8.2. LIGHT SHELVES E LA STRUTTURA ESTERNA

Sulla base delle molteplici criticità riscontrate nella lettura dello stato di fatto e in risposta ai requisiti illuminotecnici e di prestazione energetica finora elencati, è stata elaborata una proposta progettuale che mira a soddisfare il maggior numero possibile di requisiti, cercando di trovare il giusto compromesso tra il comfort visivo e il risparmio energetico. Oltre a questi aspetti, si è tenuto ovviamente conto anche delle caratteristiche architettoniche dell'edificio cercando di valorizzarne al massimo le forme e le peculiarità, con un nuovo disegno di facciata che fosse il più pos-

sibile coerente e rispettoso della preesistenza. Trattandosi inoltre di un edificio scolastico, comprendente sia la sezione dell'infanzia sia la scuola secondaria di primo grado, si è cercato di integrare la fredda facciata in calcestruzzo con colori vivaci che rievocassero l'ambiente naturale, con il fine di favorire e stimolare l'armonia psicofisica dei bambini. Tutti questi concetti convergono e si fondono in una nuova struttura esterna - realizzata in acciaio e direttamente ancorata alla facciata - costituita da un sistema di light shelves di lunghezze variabili che si ripetono per tutta la lunghezza della scuola [Figura 8.1-8.2]. La forma degli oggetti segue ed imita l'articolata pianta dell'edificio, con una dimensione dello sporto che va gradualmente aumentando man mano che si sale in altezza, contribuendo a movimenta-

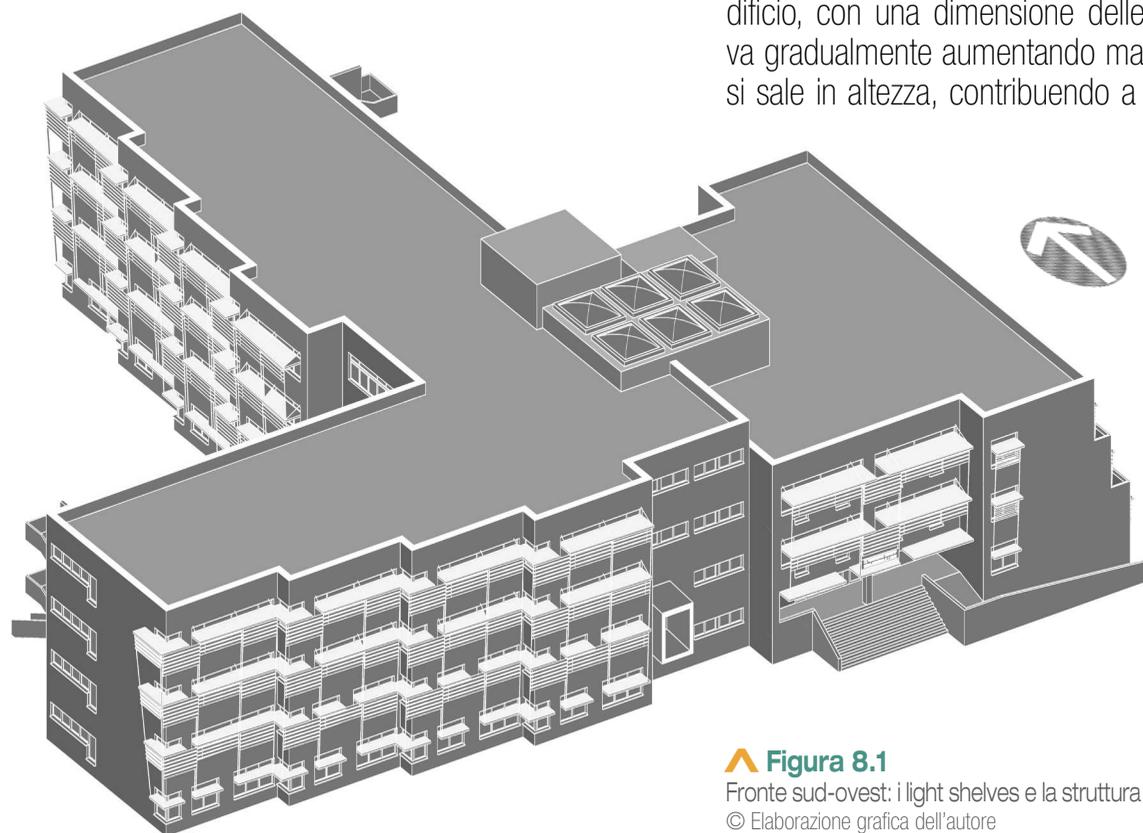


Figura 8.1
Fronte sud-ovest: i light shelves e la struttura esterna
© Elaborazione grafica dell'autore

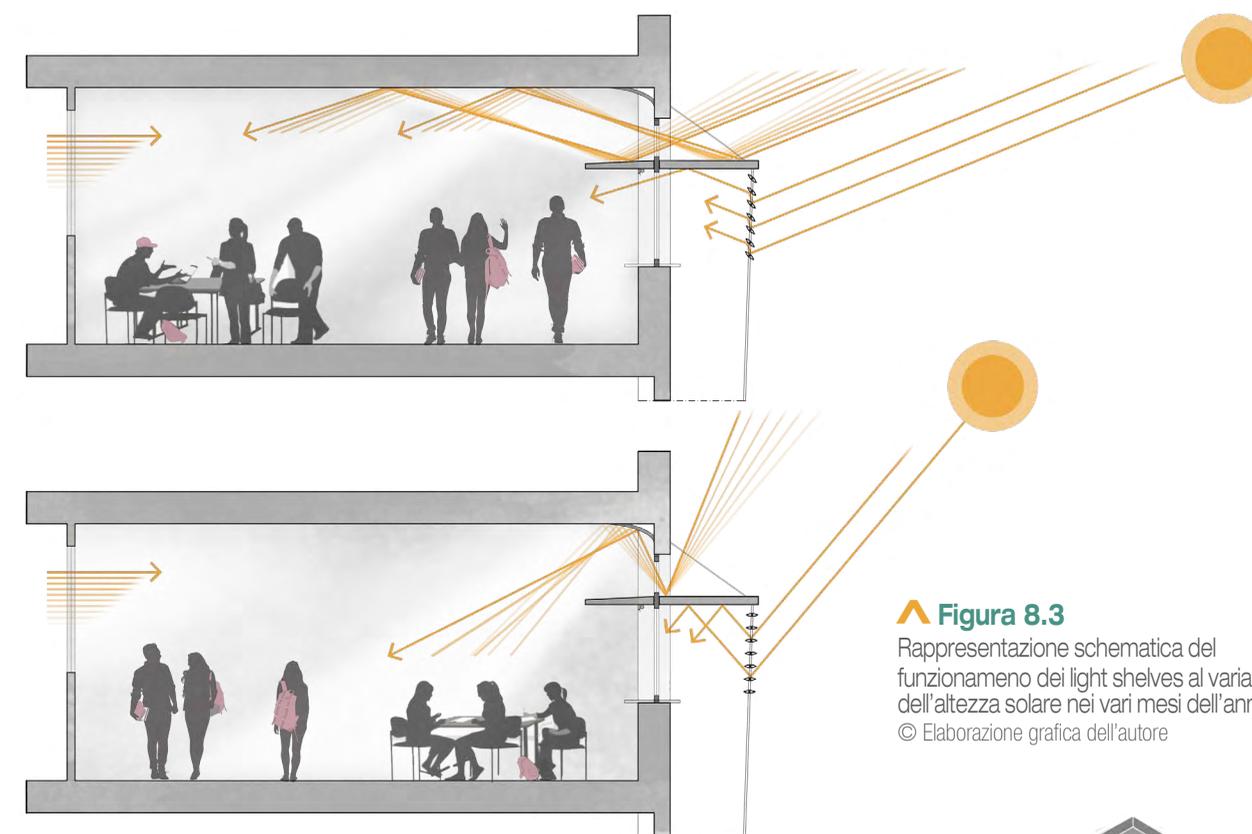


Figura 8.3
Rappresentazione schematica del funzionamento dei light shelves al variare dell'altezza solare nei vari mesi dell'anno
© Elaborazione grafica dell'autore

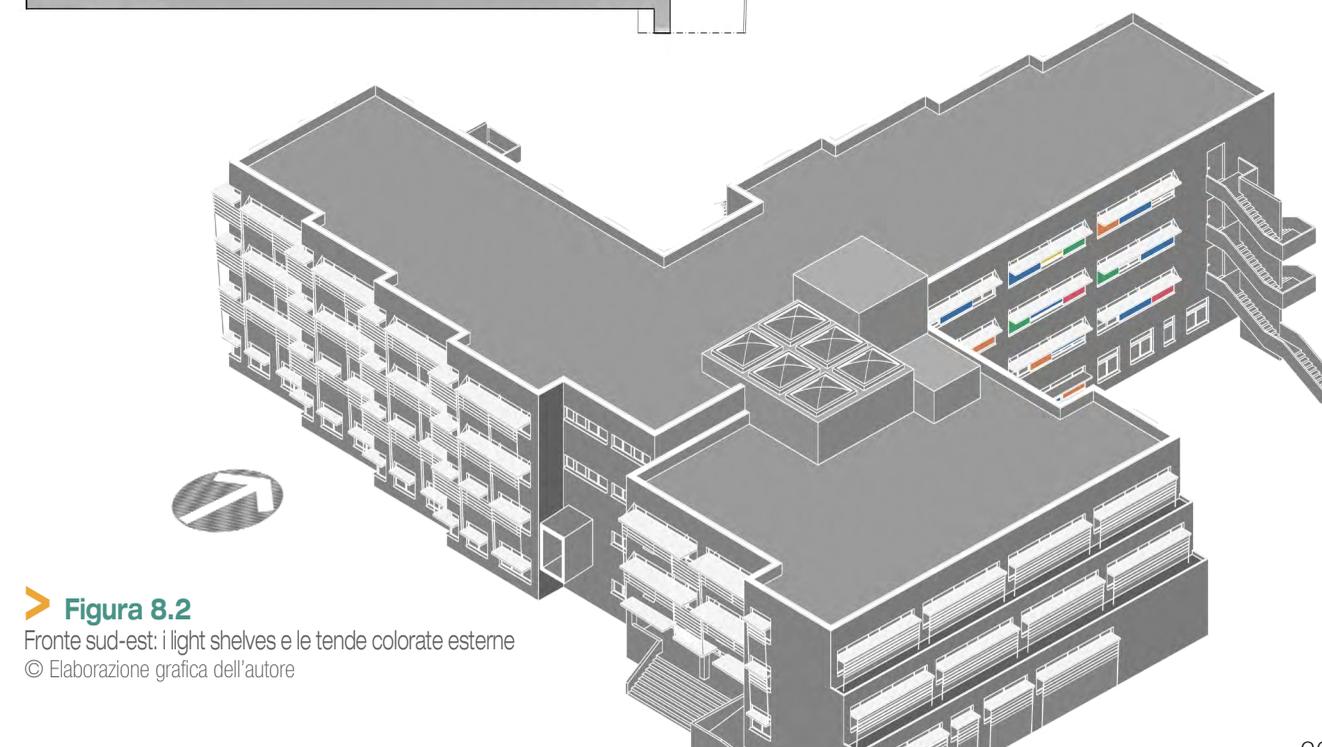


Figura 8.2
Fronte sud-est: i light shelves e le tende colorate esterne
© Elaborazione grafica dell'autore

re ulteriormente la facciata e a garantire una migliore protezione dall'abbagliamento ai piani superiori. A completare il nuovo disegno di facciata, viene inserito un sistema di lamelle orientabili e controllabili da remoto, sorrette da elementi verticali in acciaio (leggermente inclinati) direttamente ancorati ai light shelves. I Light shelves altro non sono che delle "mensole riflettenti" che assolvono l'importante funzione di reindirizzare i fasci luminosi verso le zone più profonde dell'aula, così da rendere più uniforme l'illuminazione naturale degli ambienti. La parte superiore delle mensole è infatti rivestita di un materiale ad elevatissima riflettanza ($\rho = 95\%$) che consente la riflessione della luce naturale al soffitto di colore bianco ($\rho = 80\%$), il quale riflette a sua volta la luce nelle

zone più lontane dall'apertura. Ciò consente di avere delle condizioni di illuminazione naturale accettabili anche per quelle parti dell'ambiente che normalmente si presentano più buie e inadeguate al compito visivo che si deve svolgere [Figura 8.3].

Oltre a garantire una migliore uniformità dell'illuminazione, l'ampio sporto esterno garantisce un'adeguata protezione dall'abbagliamento nei mesi estivi (cui corrispondono altezze solari maggiori); l'aggetto contribuisce inoltre a ridurre l'ingresso della radiazione termica in ambiente, abbattendo considerevolmente i carichi termici nei mesi più caldi e gli eventuali dispendi energetici per la climatizzazione estiva.

Al fine di scongiurare eventuali fenomeni di abbagliamento nei mesi invernali (cui corrispondono altezze solari minori), il sistema di lamelle orientabili garantisce un controllo ottimale della radiazione solare incidente, consentendo di monitorarne l'ingresso in ambiente a seconda delle esigenze degli utenti e delle attività che devono svolgersi [Figura 8.3-8.4]. Per gli ambienti esposti a nord, al contrario, vengono solamente adoperate delle tende interne a rullo per la regolazione della luce, in quanto l'impiego dei light shelves risulterebbe inutile data l'assenza di radiazione solare diretta. Non meno importanza si è data a tutti quei fattori (elencati nel paragrafo precedente) che

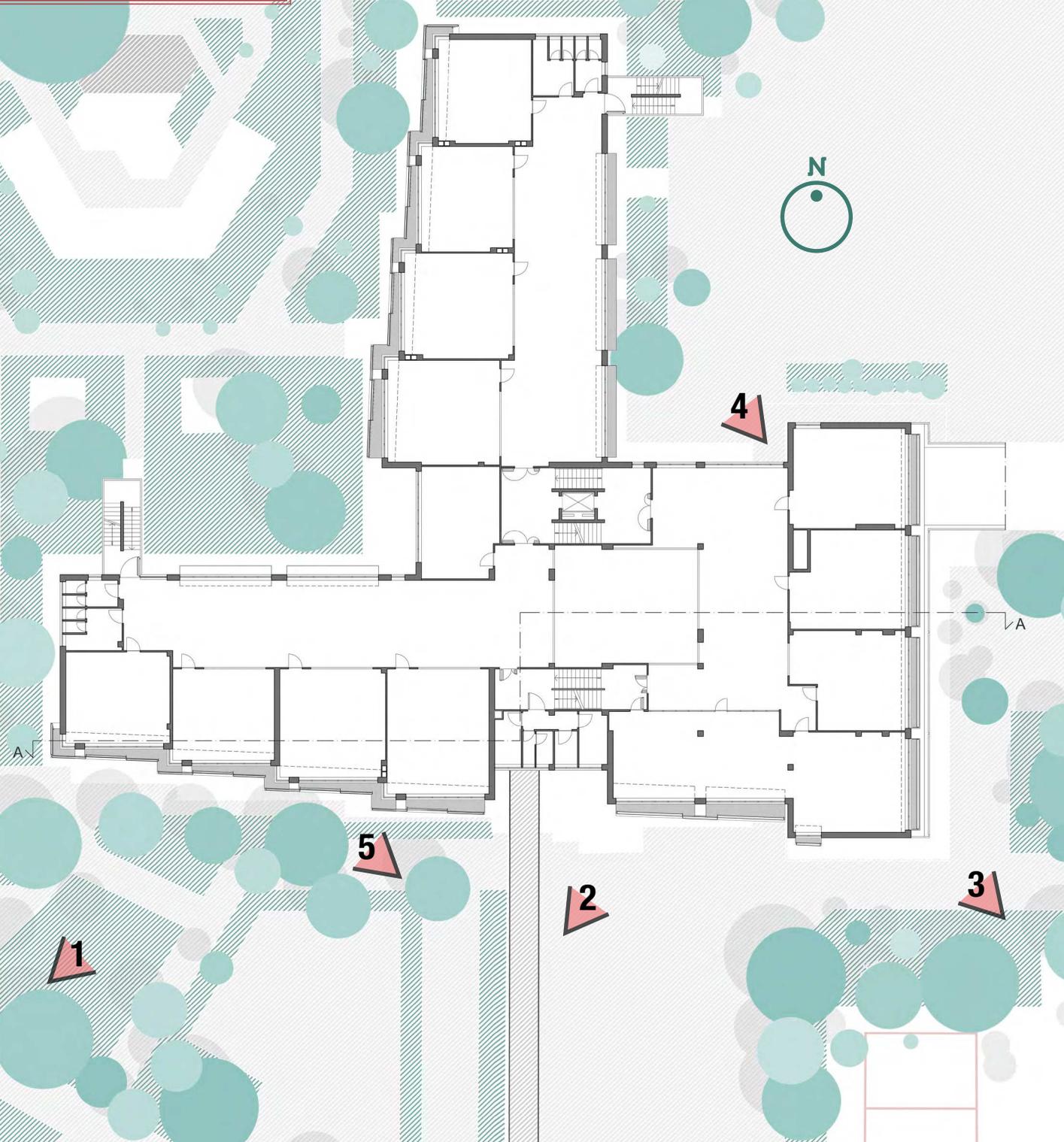
contribuiscono a stimolare la produttività degli utenti (studenti e insegnanti) e a garantirne il mantenimento di una condizione psicofisica ottimale: la dimensione e la distanza tra le lamelle, infatti, sono state opportunamente studiate in modo da assicurare per ogni angolo di inclinazione un'adeguata vista verso l'esterno, garantendo al tempo stesso l'ingresso della radiazione solare diretta nei mesi cui corrispondono altezze solari minori. Ciò consente oltremodo di assicurare degli apporti energetici gratuiti (seppur minimi) grazie alla penetrazione della radiazione termica in ambiente nei mesi più freddi, generando una condizione di comfort e contribuendo in parte ad abbattere i costi e il dispendio di energia per la climatizzazione invernale [Figura 8.4].

Figura 8.4

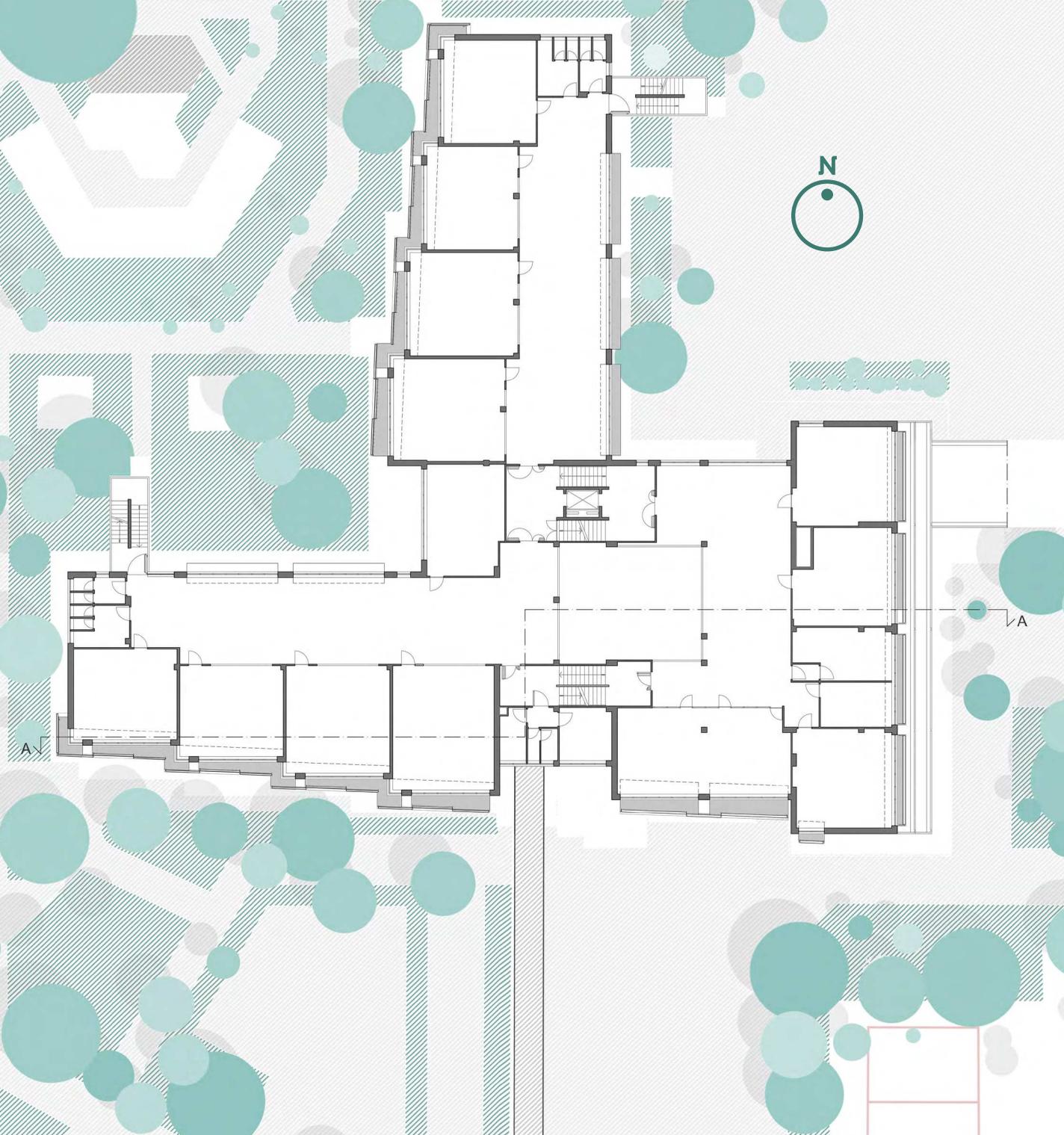
Sezione longitudinale: l'illuminazione naturale degli ambienti
© Elaborazione grafica dell'autore



STATO DI PROGETTO
PIANTA PIANO PRIMO



STATO DI PROGETTO
PIANTA PIANO SECONDO





PROSPETTO
SUD



PROSPETTO
OVEST



PROSPETTO
EST

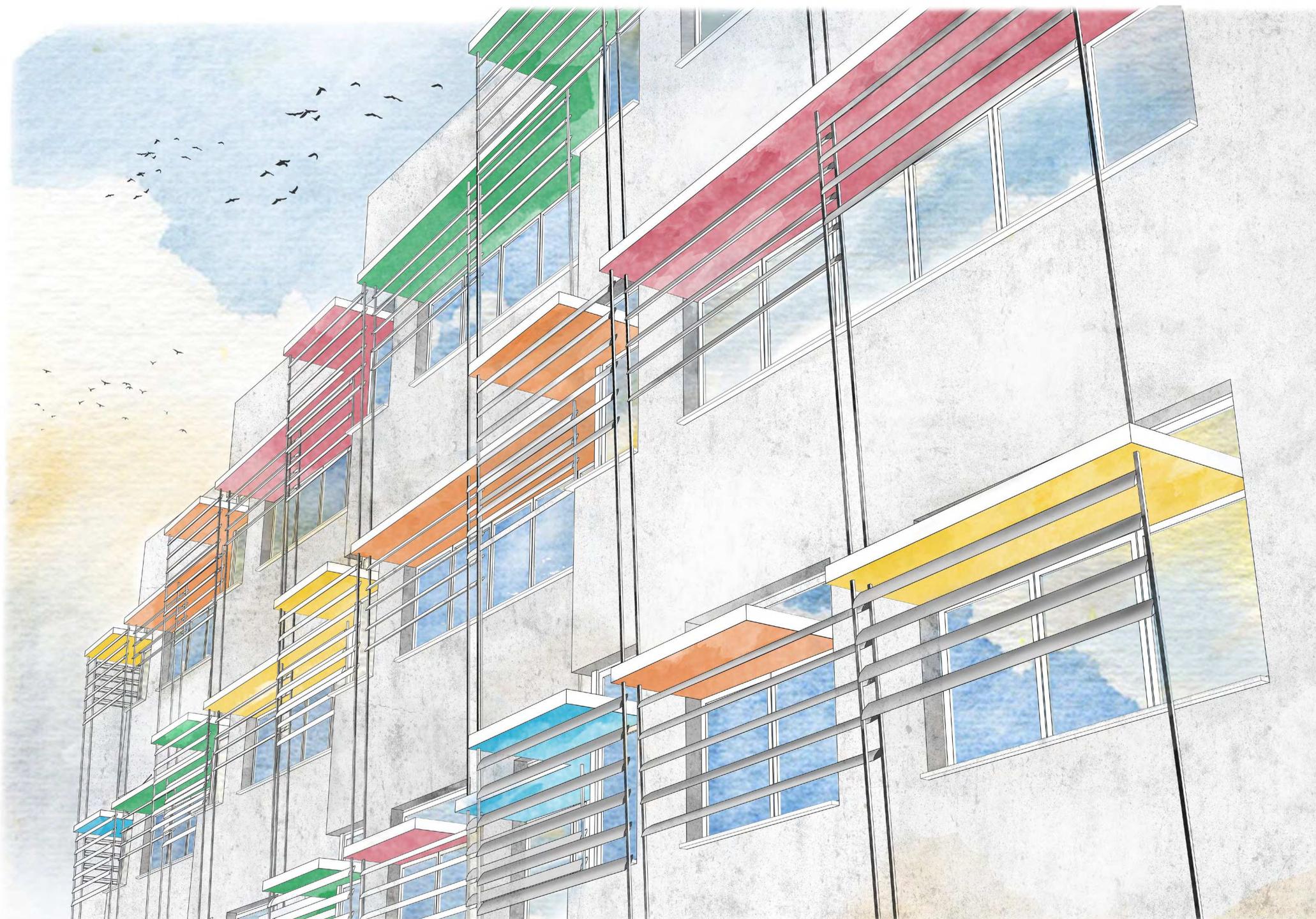
8.2.1. IL COLORE COME FILO CONDUTTORE DEL PROGETTO

Oltre al soddisfacimento dei requisiti volti all'efficientamento energetico e al comfort visivo, si è pensato inoltre di sfruttare le superfici degli aggetti orizzontali per vivacizzare l'aspetto della scuola, cercando di creare un ambiente il più possibile congeniale per gli studenti e, in modo particolare, per i bambini della scuola dell'infanzia. Gli intradossi dei light shelves si colorano e prendono vita in un'esplosione di sfumature di rosa, arancio, giallo, azzurro e verde; che si alternano in un gioco cromatico divertente e accattivante [Figure 8.5-8.6]. Numerosi studi sugli aspetti psicologici dei bambini hanno dimostrato infatti che un corretto uso del colore può avere influenze positive sull'apprendimento e sullo stato emozionale degli alunni, rievocando emozioni e sensazioni che ne stimolano la produttività e l'intelligenza emotiva. I colori sono stati selezionati tenendo conto delle diverse sensazioni che possono suscitare nei bambini, al fine di influenzare in modi diversi il loro sentire e le loro emozioni: i colori caldi (giallo e arancio) generano produttività, eccitazione, serenità, vivacità e gioia di vivere; i colori freddi (azzurro, rosa e verde) stimolano al contrario la concentrazione, l'introspezione e la riflessione.

L'uso del colore viene riportato anche nelle tende esterne dei corridoi, che forniscono una protezione dall'abbagliamento e impreziosiscono ulteriormente la facciata [Figura 8.7].

> Figura 8.5

Vista del fronte sud: l'alternarsi dei colori lungo la facciata
© Elaborazione grafica dell'autore



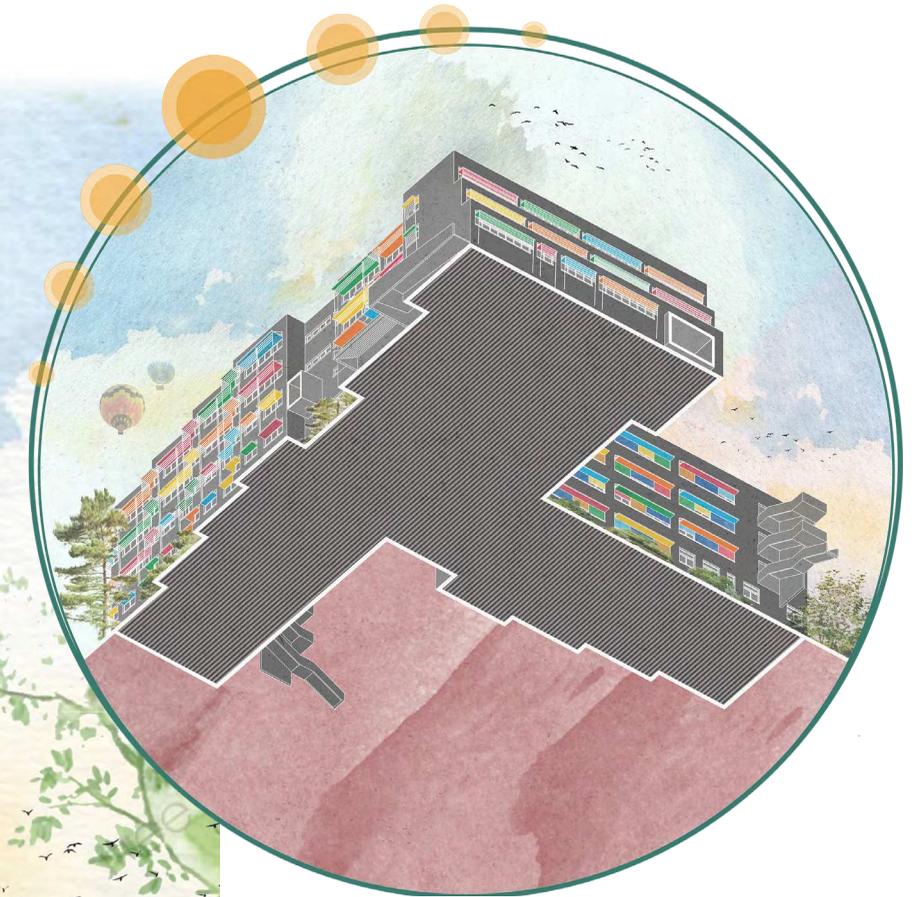
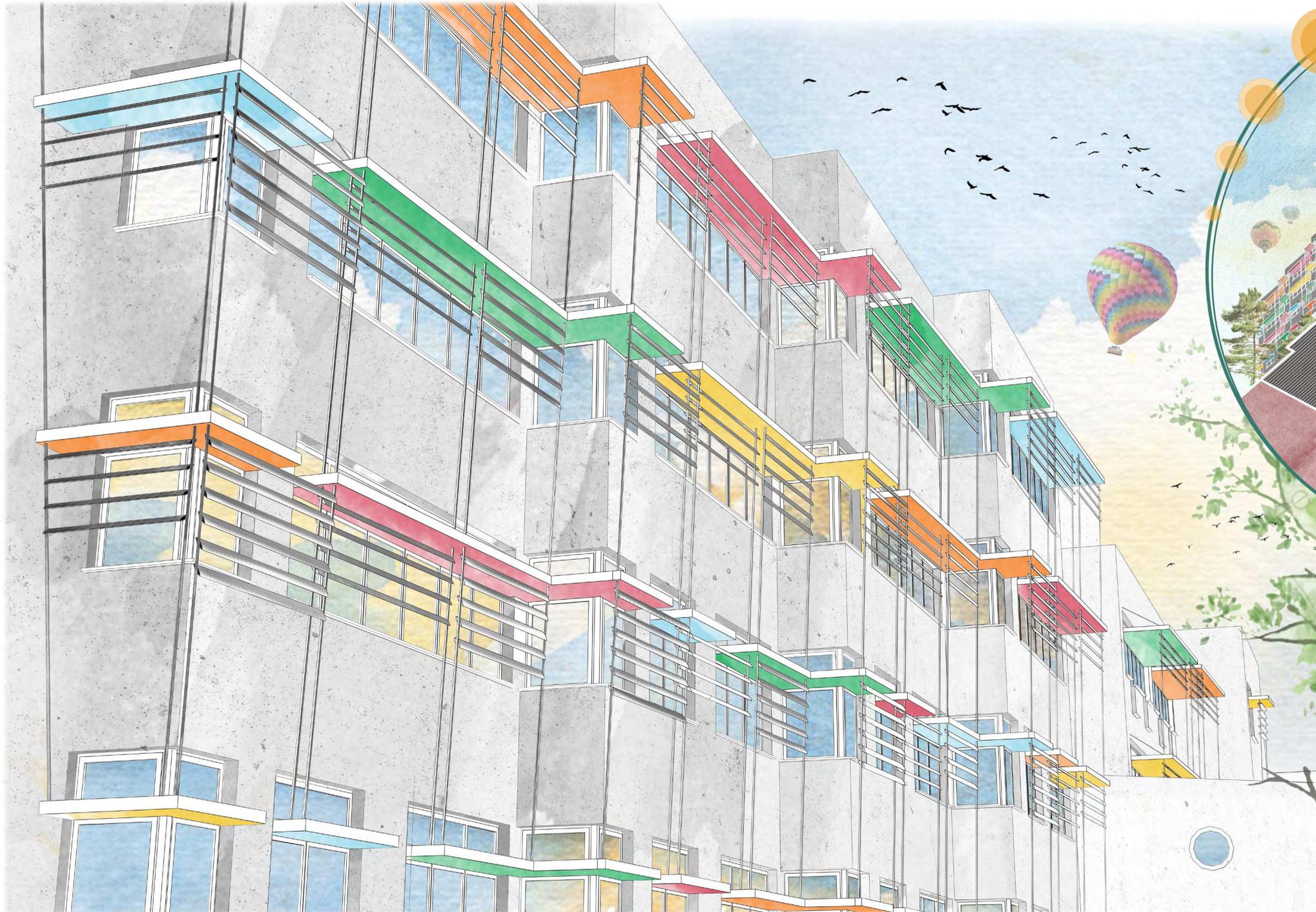


Figura 8.7

Vista assonometrica della scuola dal basso
© Elaborazione grafica dell'autore

Figura 8.6

Vista del fronte sud: i light shelves e la struttura esterna
© Elaborazione grafica dell'autore

1_Vista del fronte sud:
il nuovo volto della scuola





2_ Vista dall'ingresso principale della scuola
I light shelves e la struttura esterna denunciano e connotano l'ingresso principale della scuola, fungendo inoltre da supporto per la nuova insegna che si integra perfettamente con il nuovo disegno di facciata.

3_ Vista dal cortile esterno delle aule esposte ad est



4_ Vista dall'esterno dei corridoi: le tende colorate



5_Vista d'insieme dei light shelves colorati



8.3. DESCRIZIONE DETTAGLIATA DEI NUOVI SERRAMENTI E DEI SISTEMI DI ILLUMINAZIONE NATURALE ADOPERATI

I nuovi serramenti, riportati nell'abaco, sono stati pensati e progettati col fine ultimo di migliorare le prestazioni energetiche dell'involucro trasparente e garantire adeguate condizioni di comfort visivo negli ambienti interni. In merito al telaio, si è optato per dei serramenti in alluminio con taglio termico in quanto presentano caratteristiche che ben si prestano al soddisfacimento dei requisiti e alla destinazione d'uso dell'edificio: consentono di ridurre considerevolmente lo spessore del telaio grazie alle migliori prestazioni meccaniche, aumentando la superficie delle componenti vetrate con una maggiore penetrazione della luce naturale in ambiente; presentano valori contenuti di trasmittanza termica grazie alla presenza del taglio termico ($U_f = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$); sono caratterizzati, al contrario degli infissi in PVC, da una maggiore sicurezza e durabilità, che rappresentano due condizioni indispensabili e necessarie trattandosi un edificio pubblico adibito ad uso scolastico; consentono infine di avere un design sottile e poco invasivo garantendo una migliore visibilità verso l'esterno [Figura 8.8]. Al fine di favorire ulteriormente l'ingresso della luce naturale, si è deciso di adoperare degli infissi con anta a scomparsa (*WICONA WICLINE 65 evo*) che presentano uno speciale fermavetro direttamente ancorato nella zona del taglio termico, riducendo considerevolmente lo spessore del telaio⁷⁷⁻⁷⁸ [Figura 8.9]. Per quanto concerne le tipologie di apertura, tutti

[76] <https://www.agc-younglass.com/configurator/app/request>

i serramenti si aprono verso l'interno alternando le aperture "a battente" e "a vasistas", con modalità leggermente diverse a seconda delle diverse caratteristiche geometriche dei singoli serramenti. L'apertura "a vasistas" presenta notevoli vantaggi in determinate situazioni particolari (ambienti interni molto affollati, pioggia forte e radente, utilizzo delle schermature interne), rendendo possibile i ricambi d'aria con il minimo ingombro e senza entrare in conflitto con le tende interne [Figura 8.8].

In merito alle componenti trasparenti, si è optato per un vetrocamera con bassissima trasmittanza termica ($U_g = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$) ed elevata selettività ($IS = 1,95$), caratterizzato da un vetro stratificato nel lato interno (in ottemperanza alle prescrizioni di sicurezza della norma *UNI 7697:2015*) e riempimento con Argon in intercapedine. La scelta dei vetri selettivi consente di avere valori ridotti del fattore solare ($FS = 37\%$) riducendo considerevolmente i carichi termici in estate, pur garantendo al tempo stesso valori medio alti di trasmissione luminosa ($TL = 73\%$)⁷⁶⁻⁷⁹ [Figura 8.10].

I light shelves esterni sono realizzati mediante una struttura in acciaio controventata, direttamente ancorata all'imbotte della finestra e al serramento; inoltre, unicamente per gli sporti più pronunciati, si è ritenuto opportuno inserire dei tiranti in acciaio per bloccare gli eventuali meccanismi di rotazione della struttura verso l'esterno. Gli sporti vengono successivamente rivestiti con lastre di lamiera zincata, opportunamente verniciati alternando le diverse colorazioni (giallo, arancio, rosa, verde e azzurro). La parte superiore, invece, viene rivestita con

[77] *Wicona*, Schede descrittive sistemi, Brochure online 2018.

[78] *Wicona*, Sistemi finestra e ferramenta, Brochure online 2018.

un materiale ad elevatissima riflettanza, al fine di consentire la corretta riflessione della luce sul soffitto. Gli elementi verticali in acciaio, a sezione tubolare, sorreggono infine il sistema di lamelle orizzontali di forma ellittica, orientabili e controllabili da remoto⁸⁰ [Figura 8.11]. I light shelves interni sono anch'essi in acciaio con profilati fatti su misura, i quali presentano una lieve inclinazione al fine di ottimizzarne il funzionamento. Nel caso in cui si presentassero condizioni di eccessivo abbagliamento e per consentire l'oscuramento degli ambienti per la proiezione di materiale didattico, è previsto inoltre l'inserimento di tende interne a rullo.

Figura 8.10
Caratteristiche del vetrocamera selezionato
© <https://www.agc-yourglass.com/configurator/it>

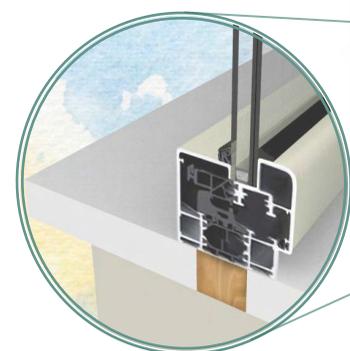
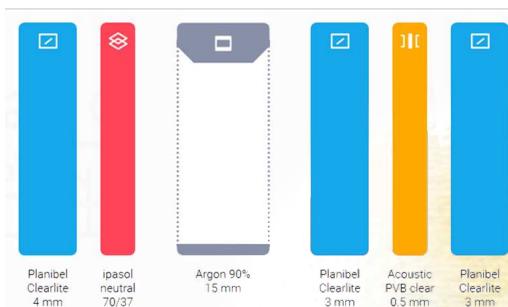


Figura 8.9
Dettaglio serramento WICONA con anta a scomparsa
© <https://www.wicona.com/it/it/>

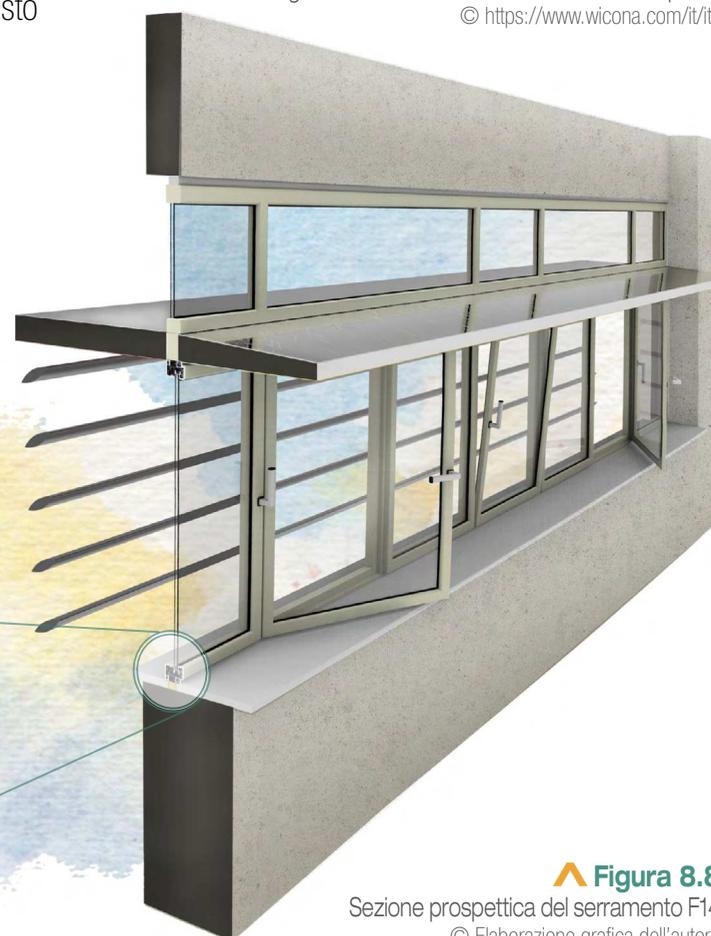
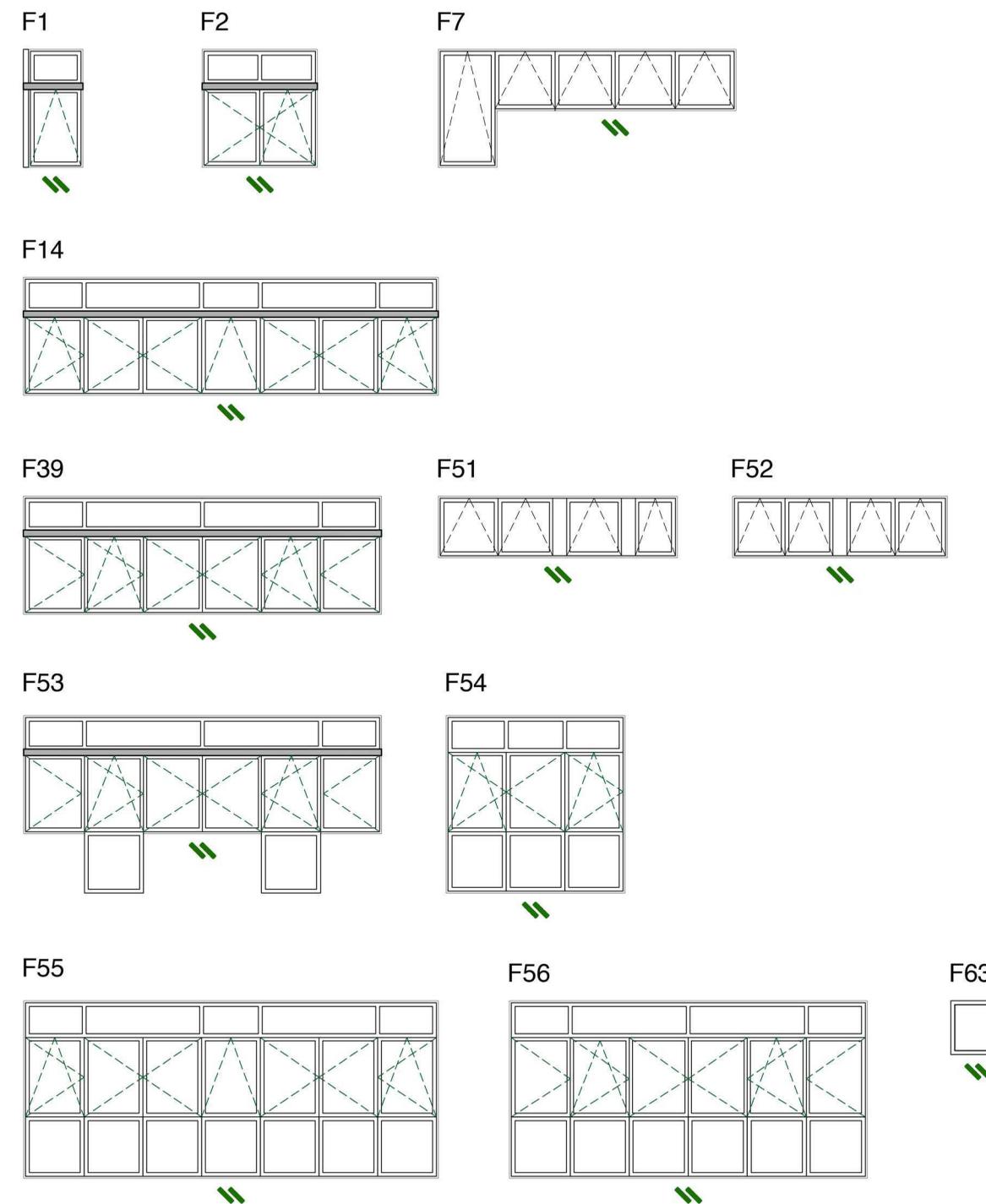


Figura 8.8
Sezione prospettica del serramento F14
© Elaborazione grafica dell'autore

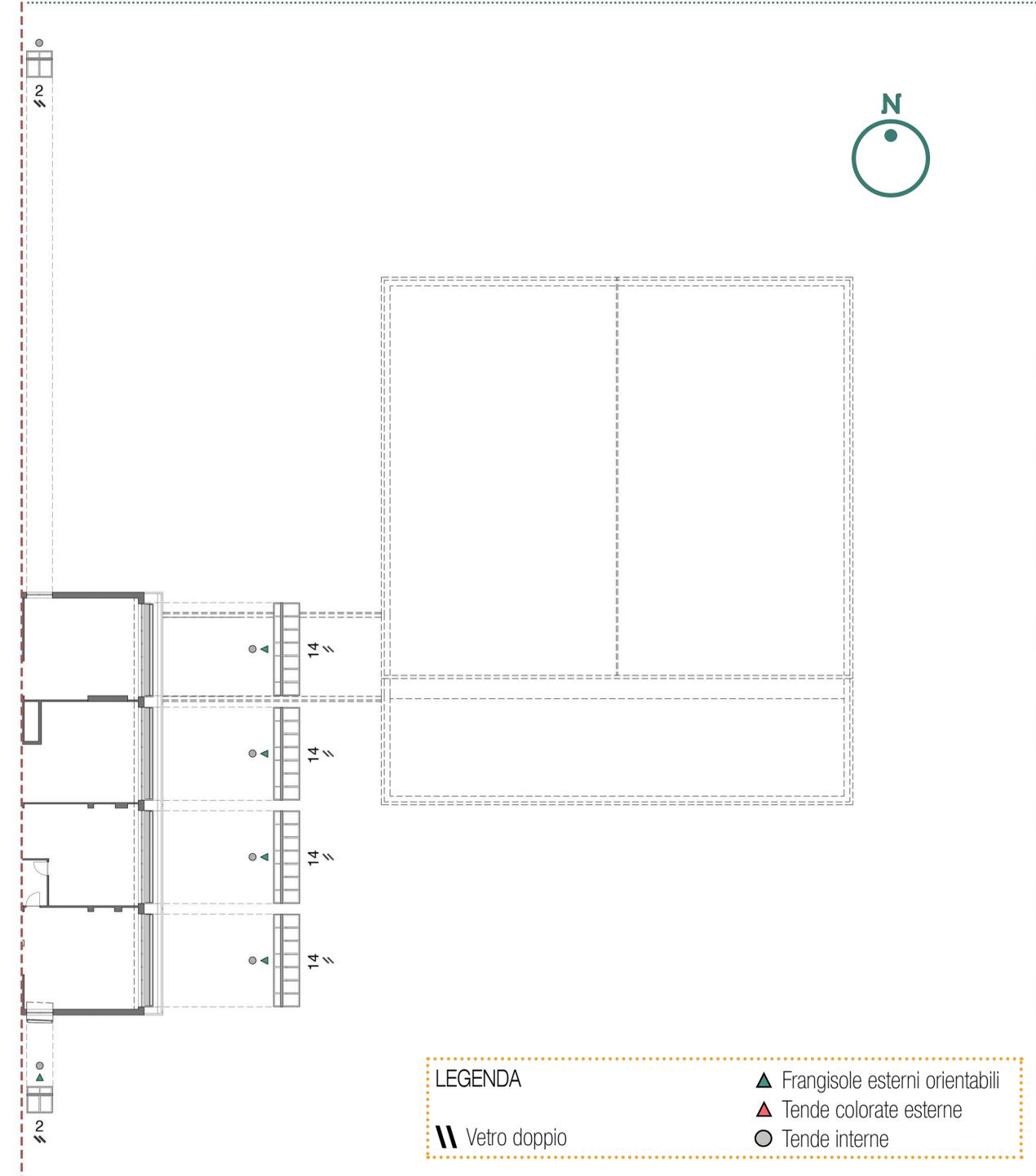
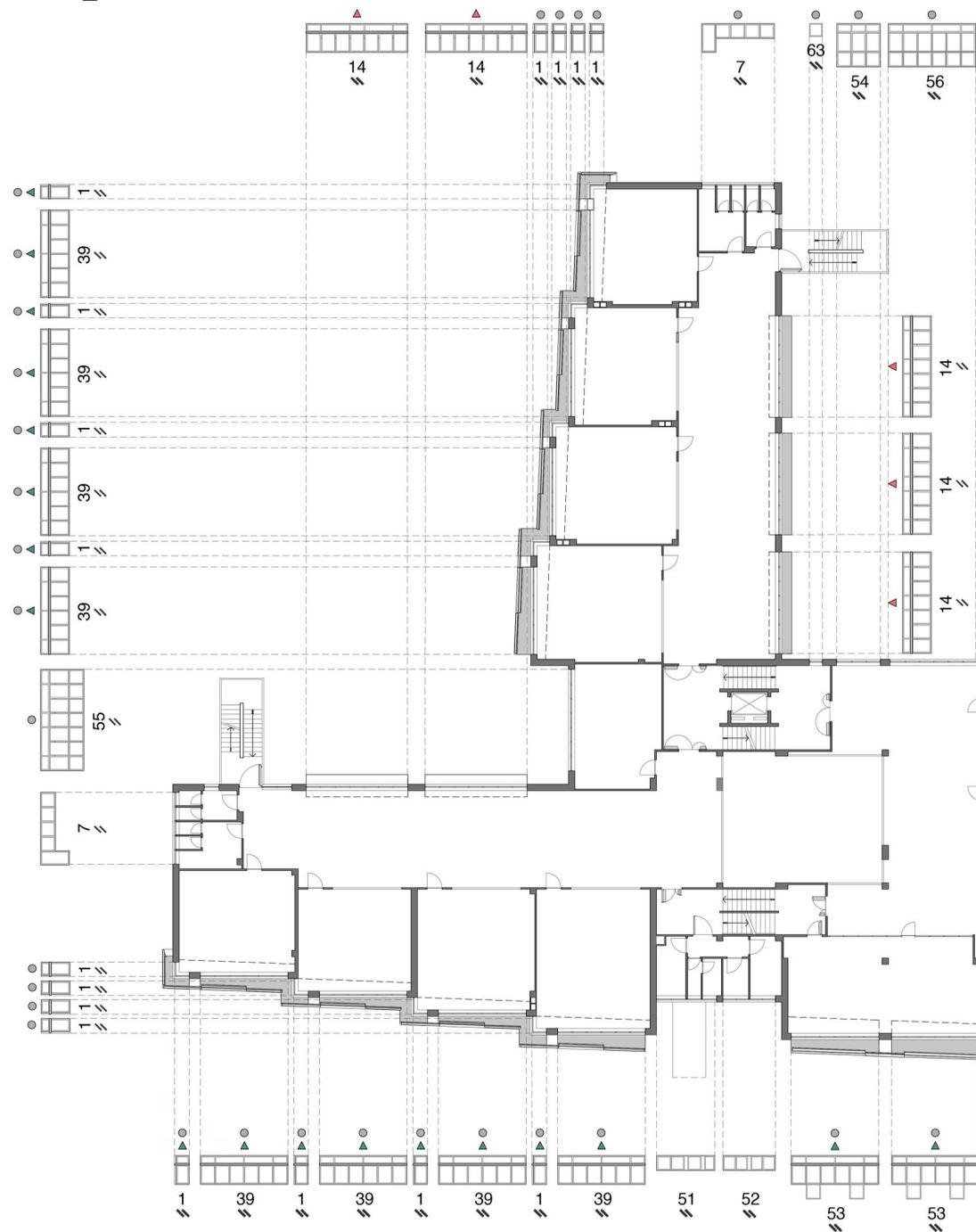
[79] AGC Yourglass, Stopray – Ipasol, Sunergy – Stopsol. High-performance solar control glazing, Brochure online 2019.

[80] Reynaers aluminium, BS 100/30/20: sistemi frangisole in alluminio, Brochure online 2017.

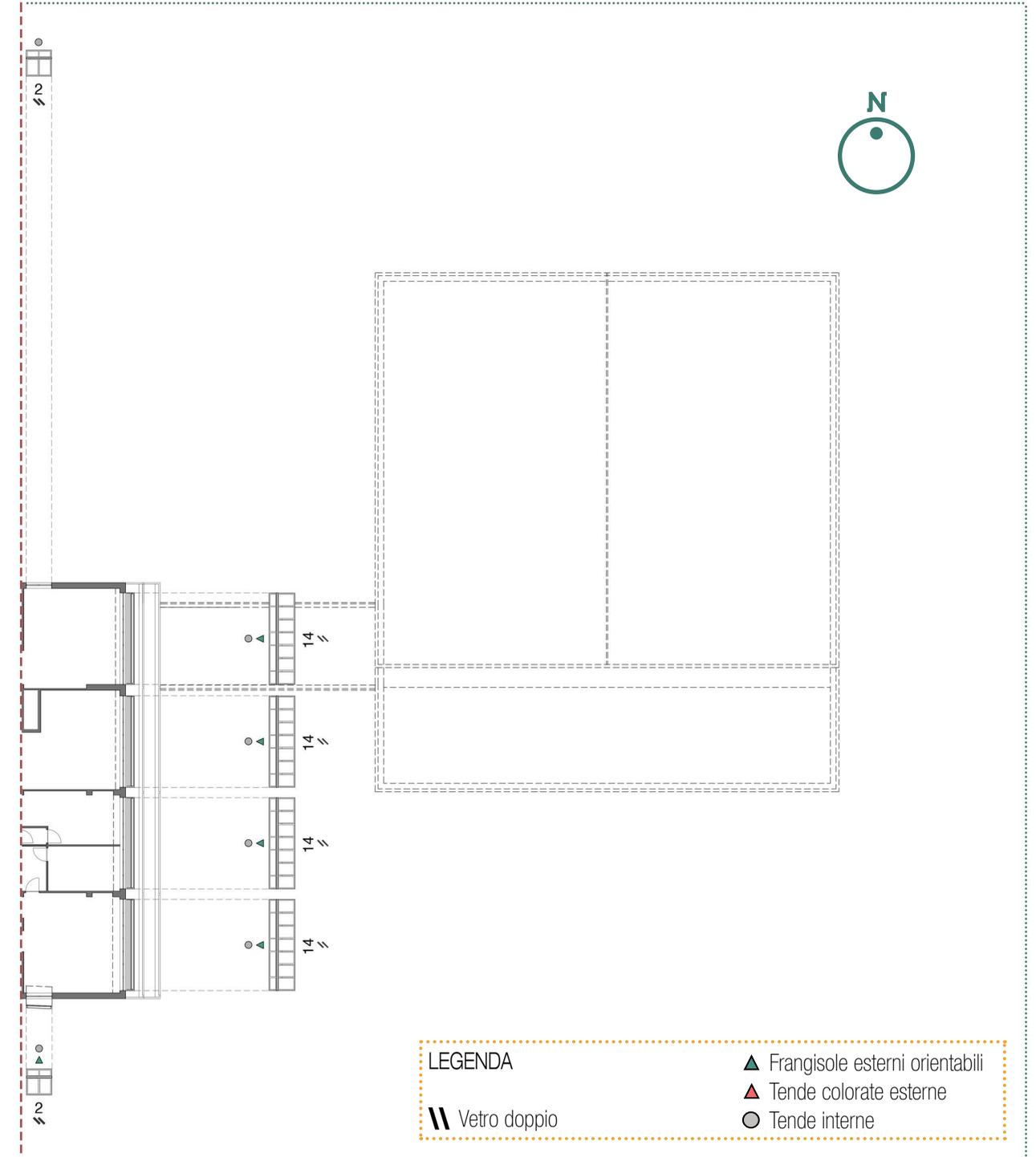
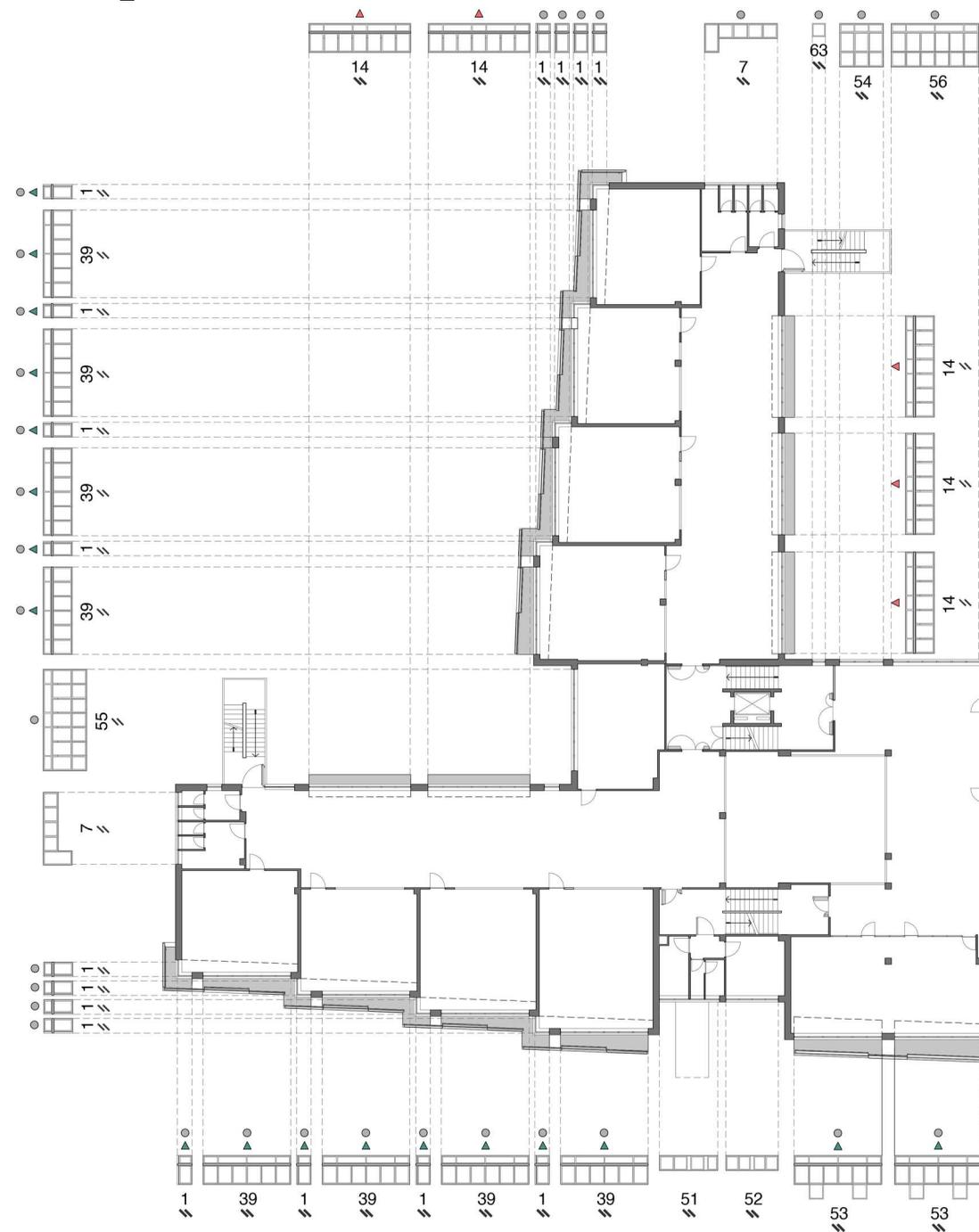
ABACO DEI NUOVI SERRAMENTI (PRIMO E SECONDO PIANO)



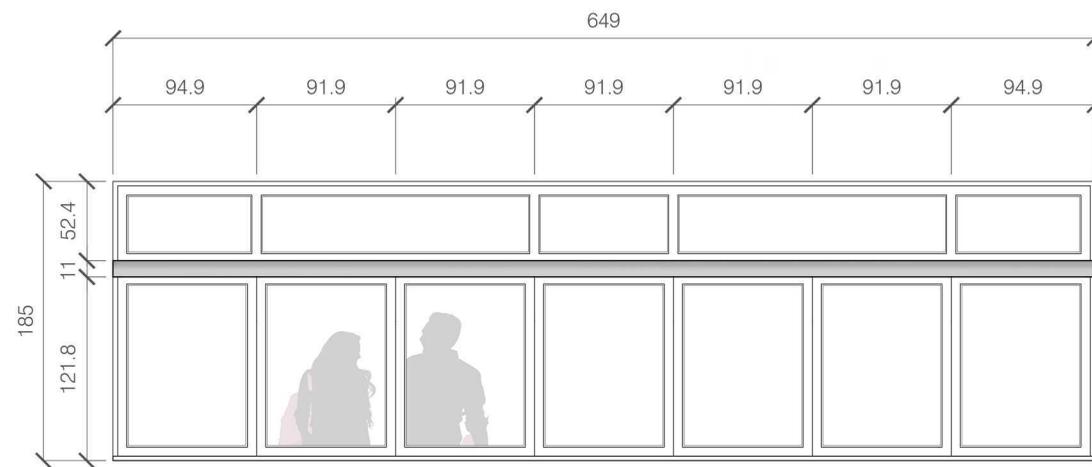
PIANTA PIANO PRIMO_ INDIVIDUAZIONE DEI NUOVI SERRAMENTI E DEI SISTEMI DI SCHERMATURA ADOPERATI



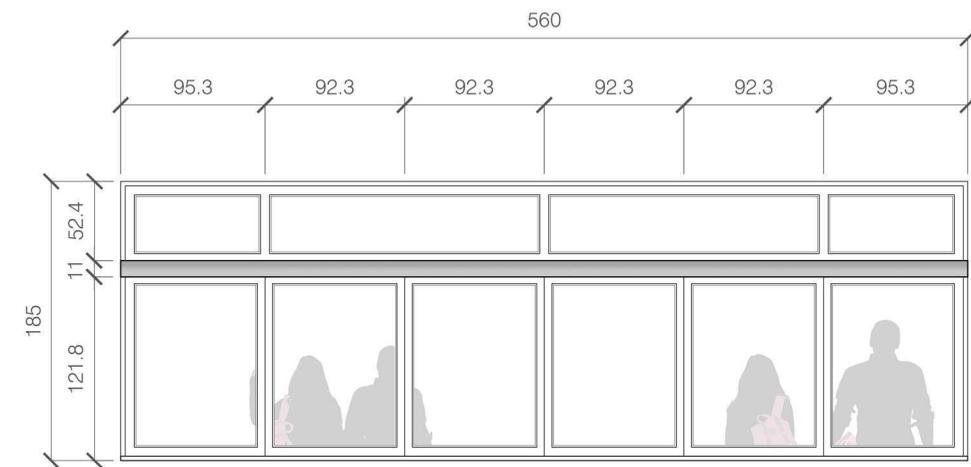
PIANTA PIANO SECONDO_ INDIVIDUAZIONE DEI NUOVI SERRAMENTI E DEI SISTEMI DI SCHERMATURA ADOPERATI



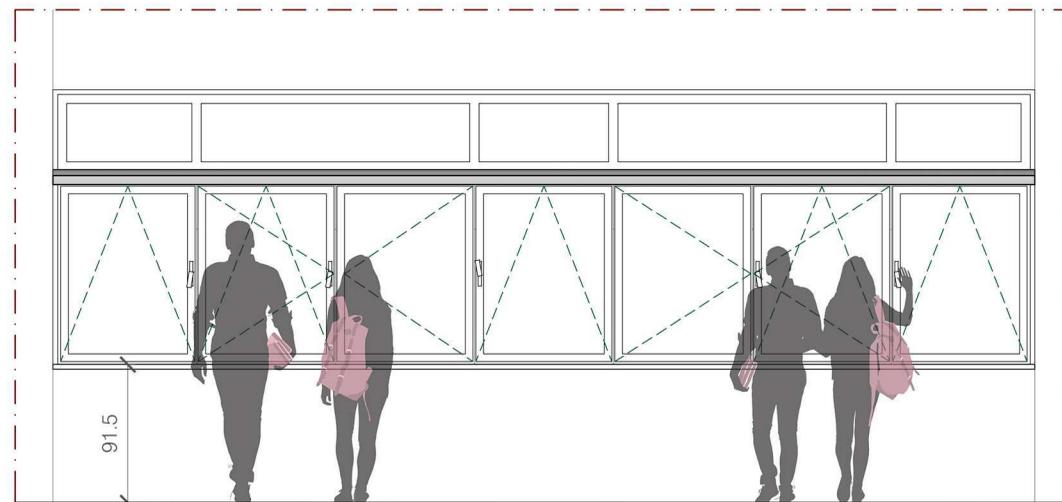
DETTAGLI DEI NUOVI SERRAMENTI



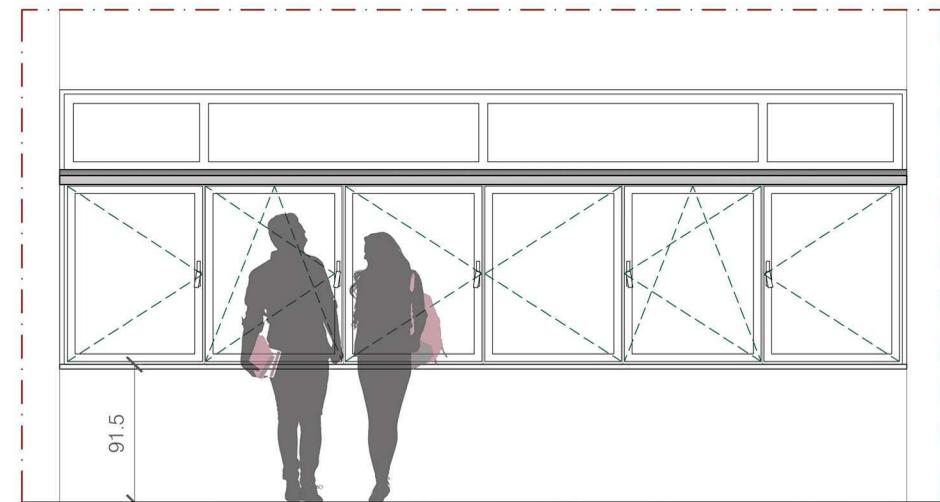
DETTAGLIO FINESTRA 14: VISTA DALL'ESTERNO_Scala 1:50



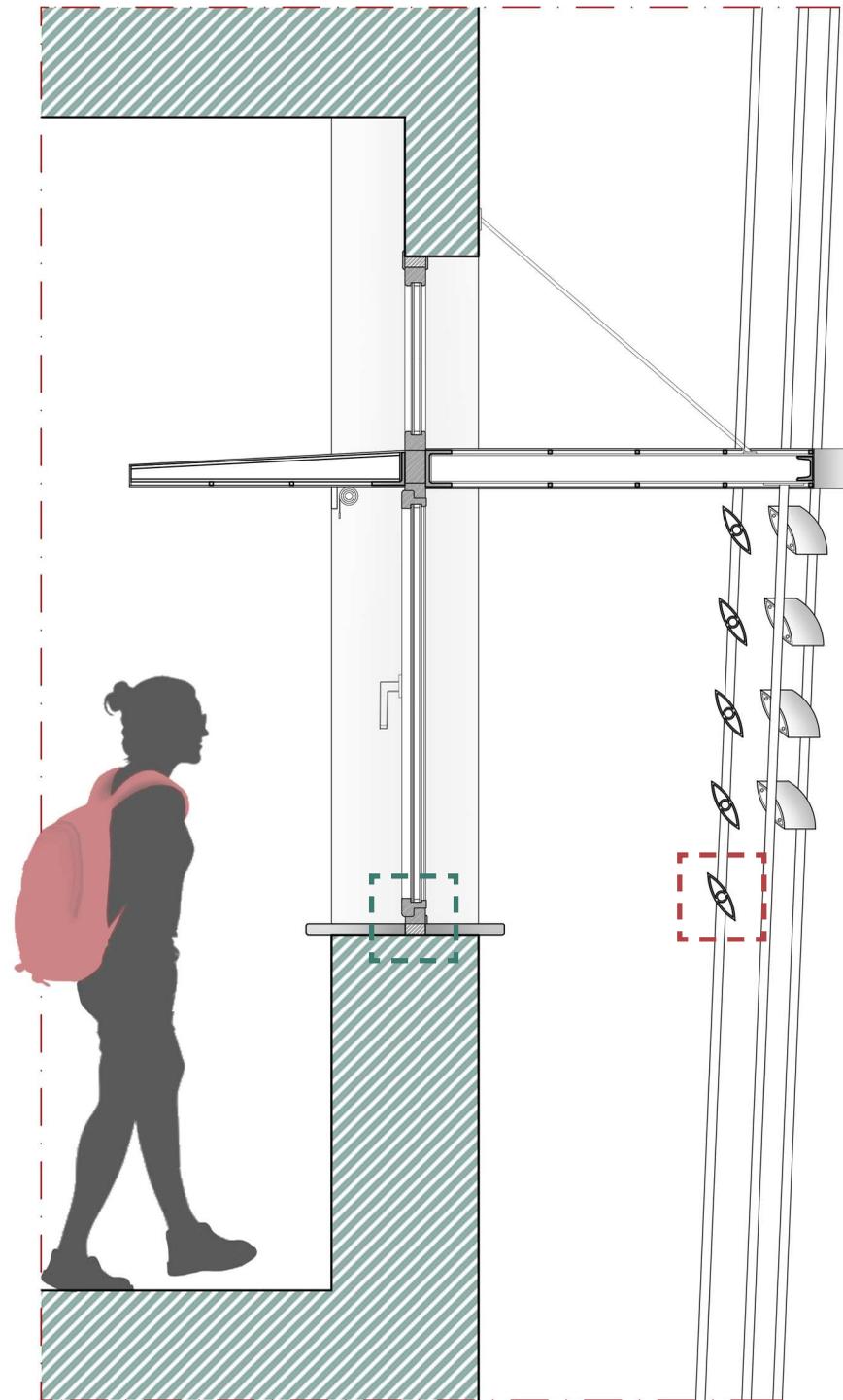
DETTAGLIO FINESTRA 39: VISTA DALL'ESTERNO_Scala 1:50



DETTAGLIO FINESTRA 14: VISTA DALL'INTERNO_Scala 1:50



DETTAGLIO FINESTRA 39: VISTA DALL'INTERNO_Scala 1:50

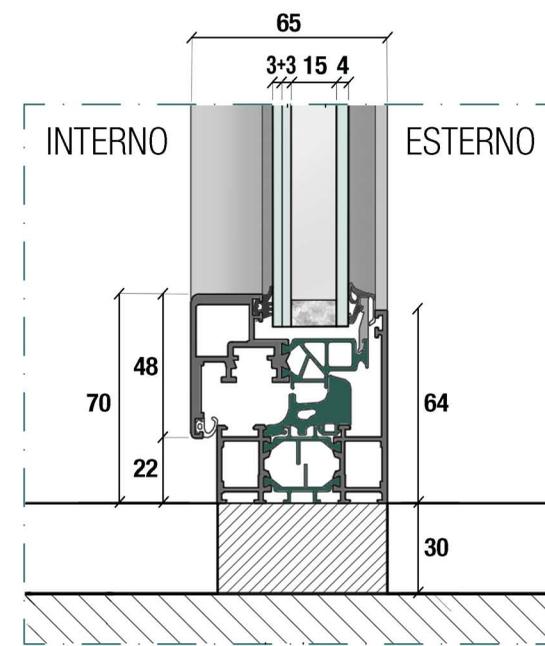


STRALCIO DI SEZIONE_Scala 1:20

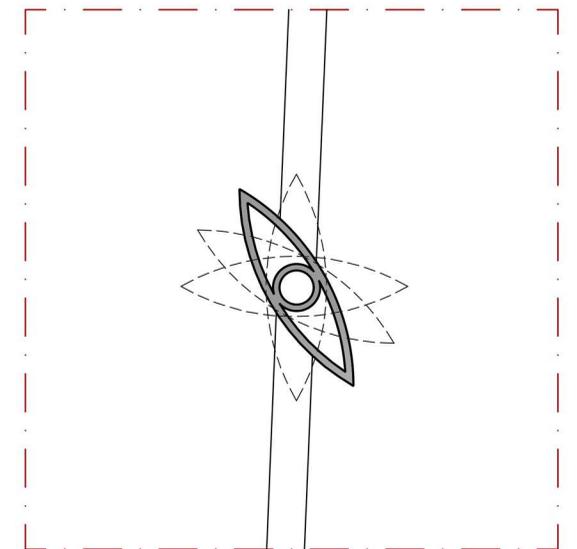


Figura 8.11

Schema tridimensionale della struttura esterna in acciaio
© Elaborazione grafica dell'autore



DETAGLIO NODO SERRAMENTO-DAVANZALE_Scala 1:2



DETAGLIO LAMELLE ORIENTABILI_Scala 1:5

8.4. GLI AMBIENTI INTERNI: NUOVA LUCE E SPAZI COLORATI

Gli ambienti interni assumono un aspetto arioso, luminoso e accattivante; colorandosi di sfumature e caratteristiche del tutto nuove. La luce naturale, riflettendosi sui light shelves e sul soffitto, permea tutto lo spazio interno in modo avvolgente e uniforme; garantendo una piacevole condizione di benessere visivo e psicofisico nei bambini.

La presenza dei light shelves, oltre a garantire un'adeguata protezione dall'abbagliamento e dalla radiazione termica, connota ulteriormente gli spazi spezzandone la monotonia. Il bianco è il colore dominante, che allarga visivamente gli spazi e favorisce la riflessione della luce, intervallato da fasce di colore che, richiamando le stesse tonalità usate per l'esterno, creano un dialogo visivo e cromatico tra dentro e fuori [Figura 8.12].

8.4.1. LE AULE

Per quanto concerne le aule scolastiche, al fine di migliorare ulteriormente le prestazioni visive e a rendere oltremodo più uniforme la distribuzione della luce in ambiente, si è pensato di aprire la parete divisoria tra il corridoio e le aule per sfruttare la luce indiretta proveniente dagli spazi distributivi, creando al tempo stesso una maggiore integrazione e interconnessione tra i vari ambienti della scuola [Figura 8.12].

L'uso del grigio nelle pareti contribuisce a smorzare la vivacità dei colori, cercando di trovare il giusto equilibrio per stimolare la natura ludica dei bambini senza intaccarne la concen-

trazione e la produttività. In ogni punto dell'aula, grazie al corretto distanziamento tra le lamelle, viene assicurata un'adeguata visibilità verso l'esterno, mantenendo la percezione del passare del tempo e garantendo un contatto diretto ed immediato con la natura; l'apertura sul corridoio contribuisce anch'essa ad allargare visivamente lo spazio e a mantenere un costante dialogo con lo spazio esterno all'aula [Figure 8.13-8.14].

8.4.2. I CORRIDOI DISTRIBUTIVI

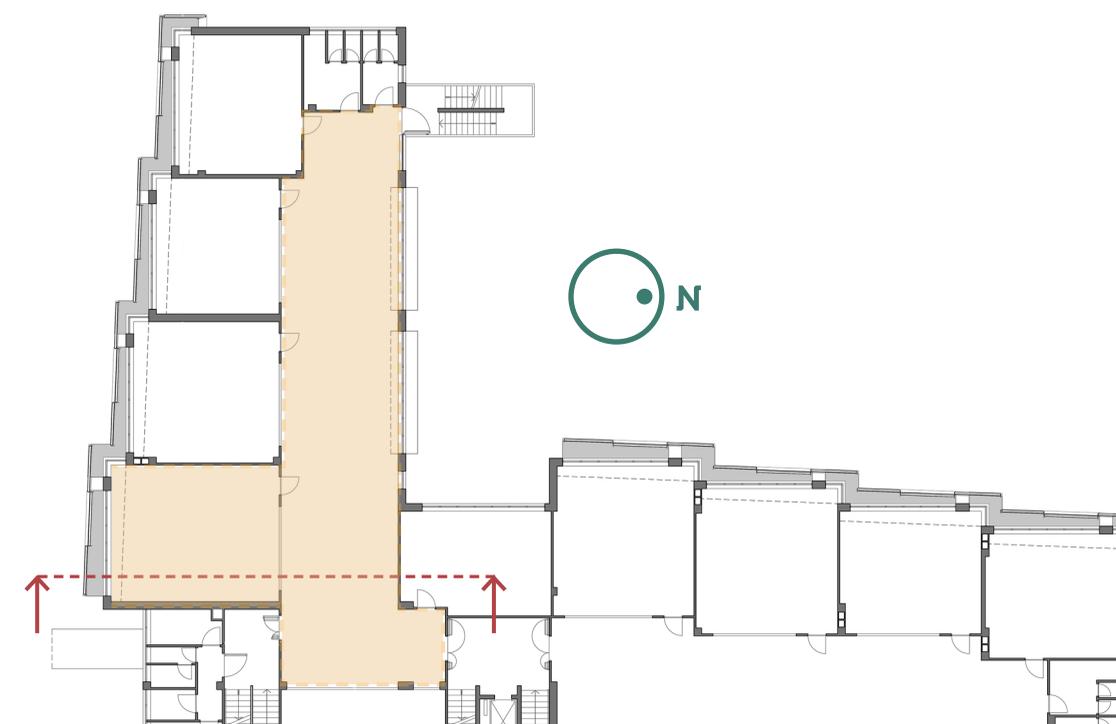
Gli ambienti distributivi divengono ampi spazi dinamici e colorati, appositamente progettati e pensati per favorire la condivisione e l'integrazione sociale. I light shelves, trattati con colorazioni diverse che si alternano per tutta la lunghezza del corridoio, spezzano l'accentuato sviluppo longitudinale dell'ambiente connotando fortemente lo spazio.

Le tende colorate esterne, oltre a garantire un'adeguata protezione dall'abbagliamento nelle prime ore del mattino, contribuiscono ad impreziosire ulteriormente gli spazi attraverso un suggestivo gioco di luci e colori [Figura 8.15].



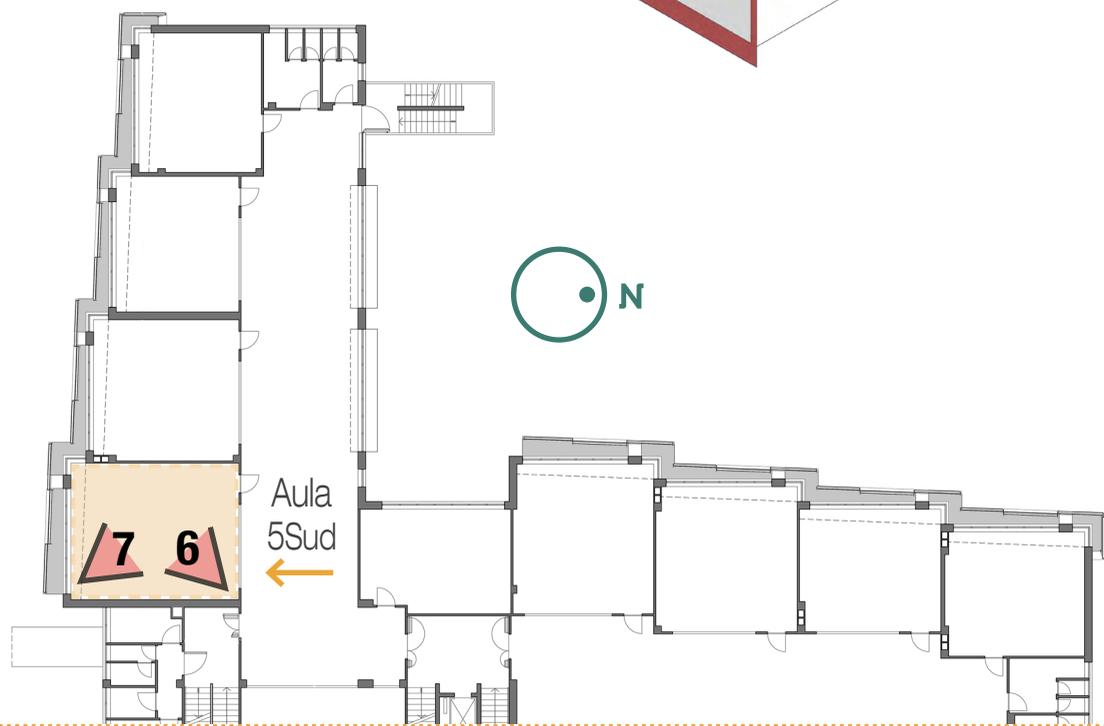
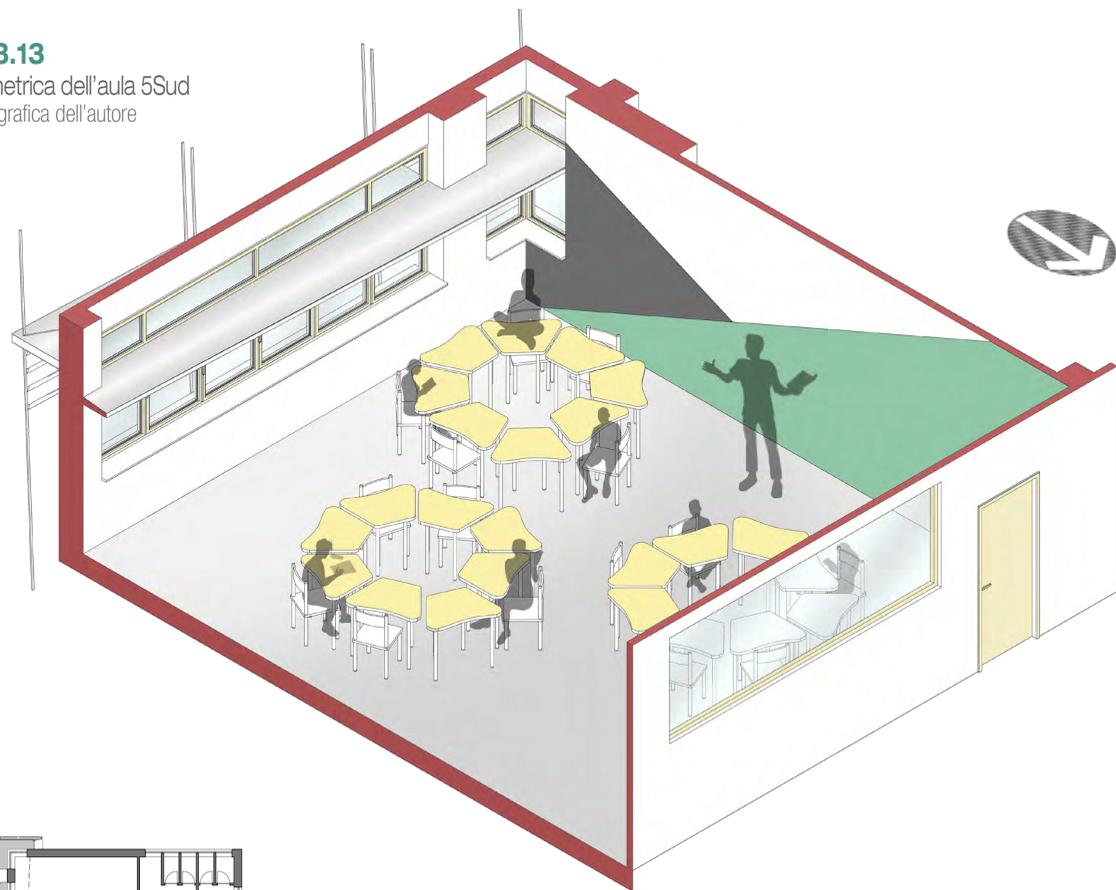
Figura 8.12

Spaccato prospettico: strategie adottate per il comfort visivo
© Elaborazione grafica dell'autore



> **Figura 8.13**

Vista assonometrica dell'aula 5Sud
© Elaborazione grafica dell'autore



6_Aula 5Sud
Vista d'insieme



7_Aula 5Sud
L'apertura sul corridoio



> **Figura 8.14**

Vista assonometrica dell'aula 6SudEst
© Elaborazione grafica dell'autore



8_Aula 6SudEst
Vista d'insieme

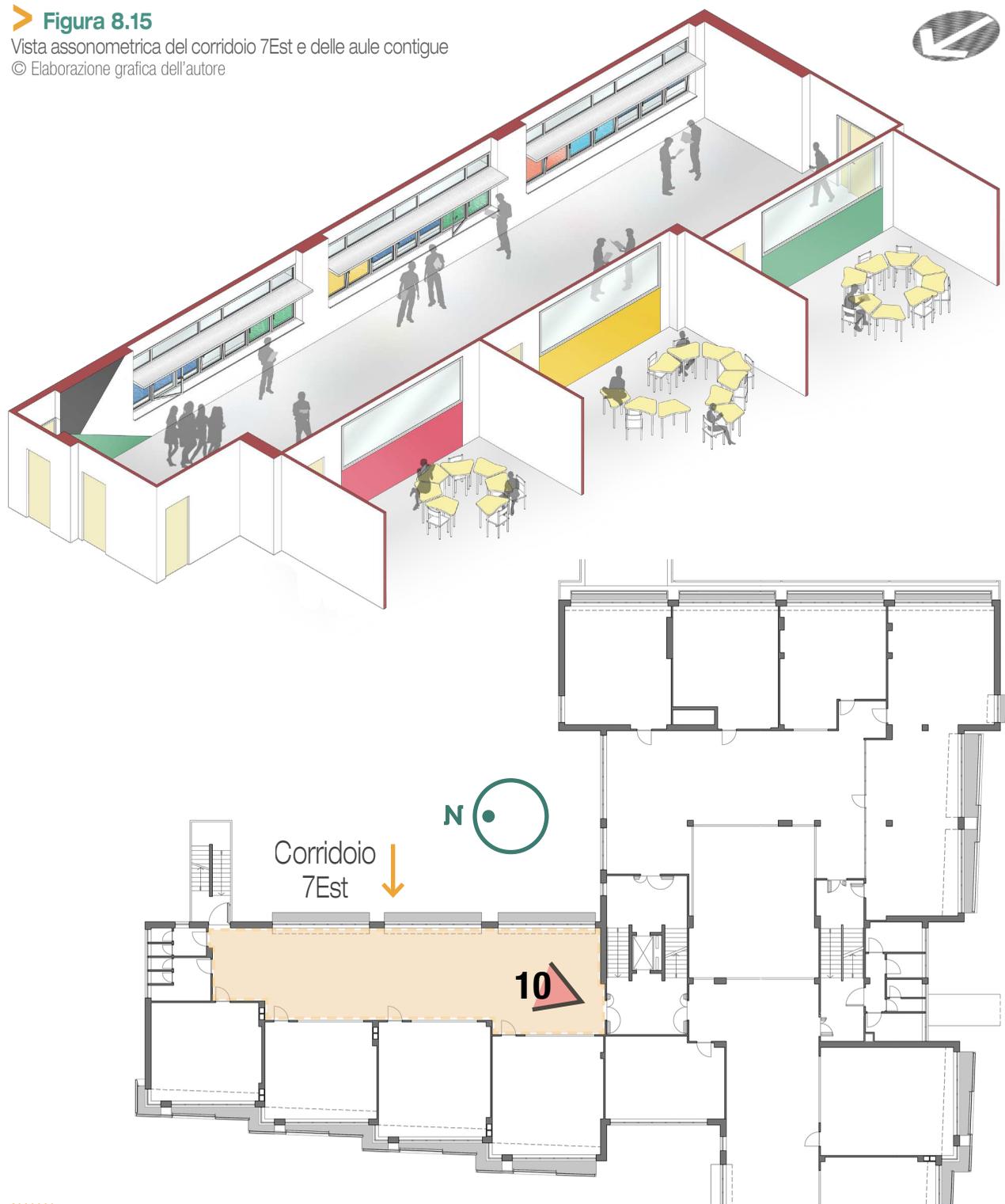


9_Aula 6SudEst
Vista d'insieme



> **Figura 8.15**

Vista assonometrica del corridoio 7Est e delle aule contigue
© Elaborazione grafica dell'autore



10_Corridoio distributivo
Vista d'insieme



8.5. ANALISI DELLE PRESTAZIONI ENERGETICHE DELL'INVOLUCRO TRASPARENTE E CONFRONTO CON LO STATO DI FATTO

Tutte le scelte operate in fase di progetto, relative all'involucro trasparente e ai sistemi di controllo per l'illuminazione naturale, sono finalizzate a garantire un miglioramento delle prestazioni energetiche dell'edificio, servendosi di materiali e tecnologie innovative mirati a ridurre le dispersioni energetiche per trasmissione e a minimizzare i carichi termici durante le stagioni più calde, tenendo conto che la scuola non dispone attualmente di un impianto di climatizzazione estiva. In ragione di questi obiettivi, sono state adoperate delle componenti caratterizzate da una bassa trasmittanza termica, sia per quanto concerne il telaio ($U_f = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$) sia per le tipologie di vetri selezionate ($U_g = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$), per le quali si è cercato inoltre di garantire un quanto più elevato indice di selettività ($IS = 1,95$) con un basso fattore solare ($g_{gl} = 0,37$) e un'adeguata trasmissione luminosa ($TL = 73\%$) [Figura 8.16].

Per ogni serramento riportato nell'abaco, limitatamente al primo e al secondo piano, sono stati dunque calcolati i rispettivi valori di trasmittanza termica, che vengono successivamente confrontati con quelli relativi allo stato di fatto.

Tramite il software Parasol, è stata inoltre valutata la variazione del fattore solare ($g_{gl+sh} = 0,25$) tenendo conto della presenza dei sistemi di schermatura esterni (aggetti orizzontali e frangisole in alluminio).

Per la quasi totalità delle finestre si registrano

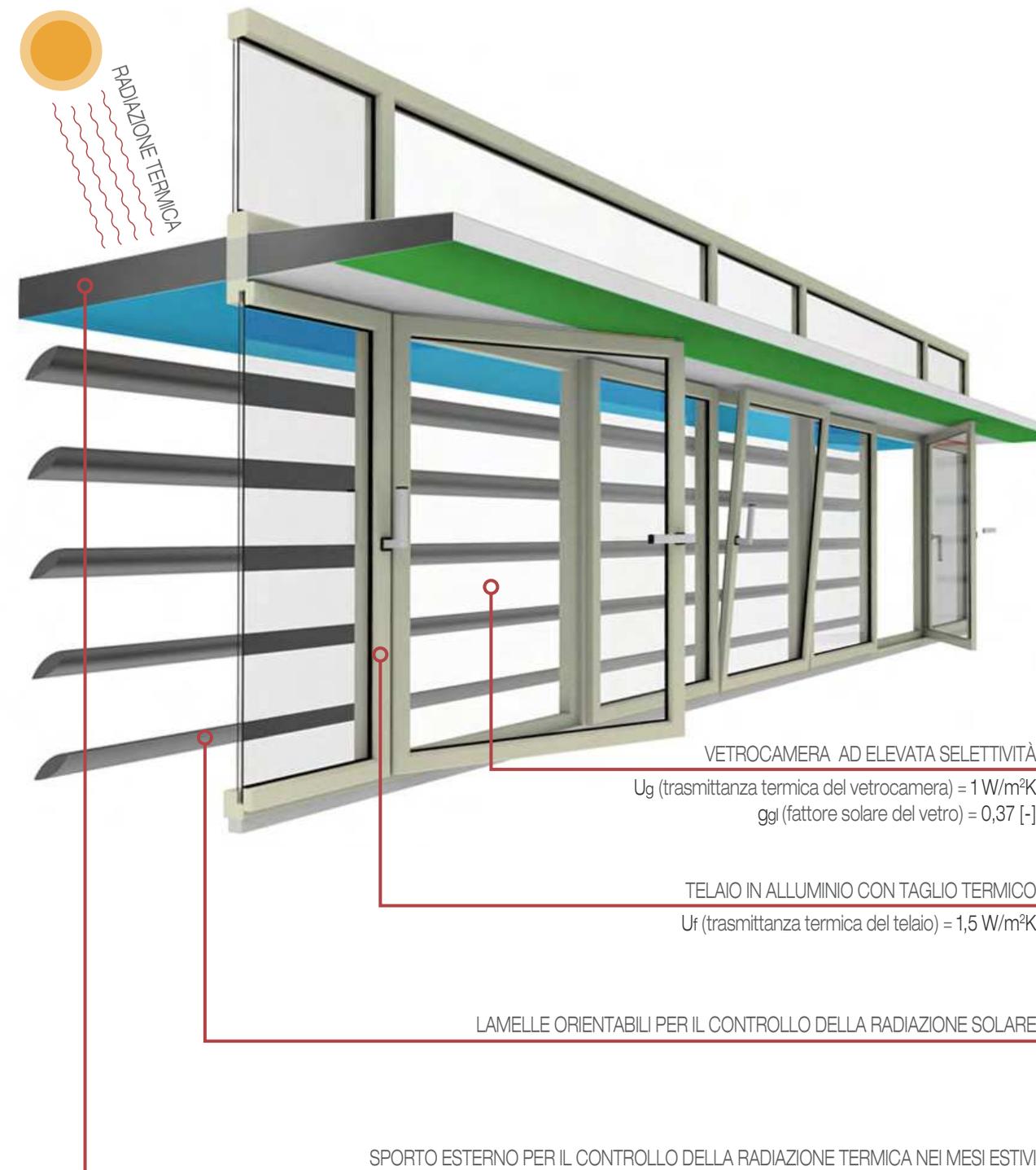
valori di trasmittanza termica U_w (evidenziati in tabella) inferiori o al più uguali a $1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$, che coincide con il valore limite raccomandato dal D.M. 11/01/2017 ($U_w \leq 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$) in relazione al luogo in cui sorge l'edificio (zona climatica E). Se si confrontano tali valori con quelli ottenuti per lo stato di fatto, è possibile riscontrare un netto ed evidente miglioramento dei valori di trasmittanza termica, con una riduzione in percentuale dei valori compresa tra il 54 % e il 77 % [Tabelle 8.1-8.2].

Al fine di valutare l'effettivo risparmio energetico generato dal progetto, sono stati infine calcolati e confrontati i coefficienti di dispersione termica per trasmissione dell'involucro trasparente H_t (espressi in W/K)⁸¹ per lo stato di fatto e lo stato di progetto, evidenziando una riduzione in percentuale delle dispersioni fino al 68% [Figura 8.17].

Le considerazioni finora riportate evidenziano dunque un netto miglioramento delle prestazioni energetiche dell'involucro trasparente, abbattendo considerevolmente le dispersioni termiche e apportando notevoli migliorie in termini di isolamento termico e risparmio energetico.

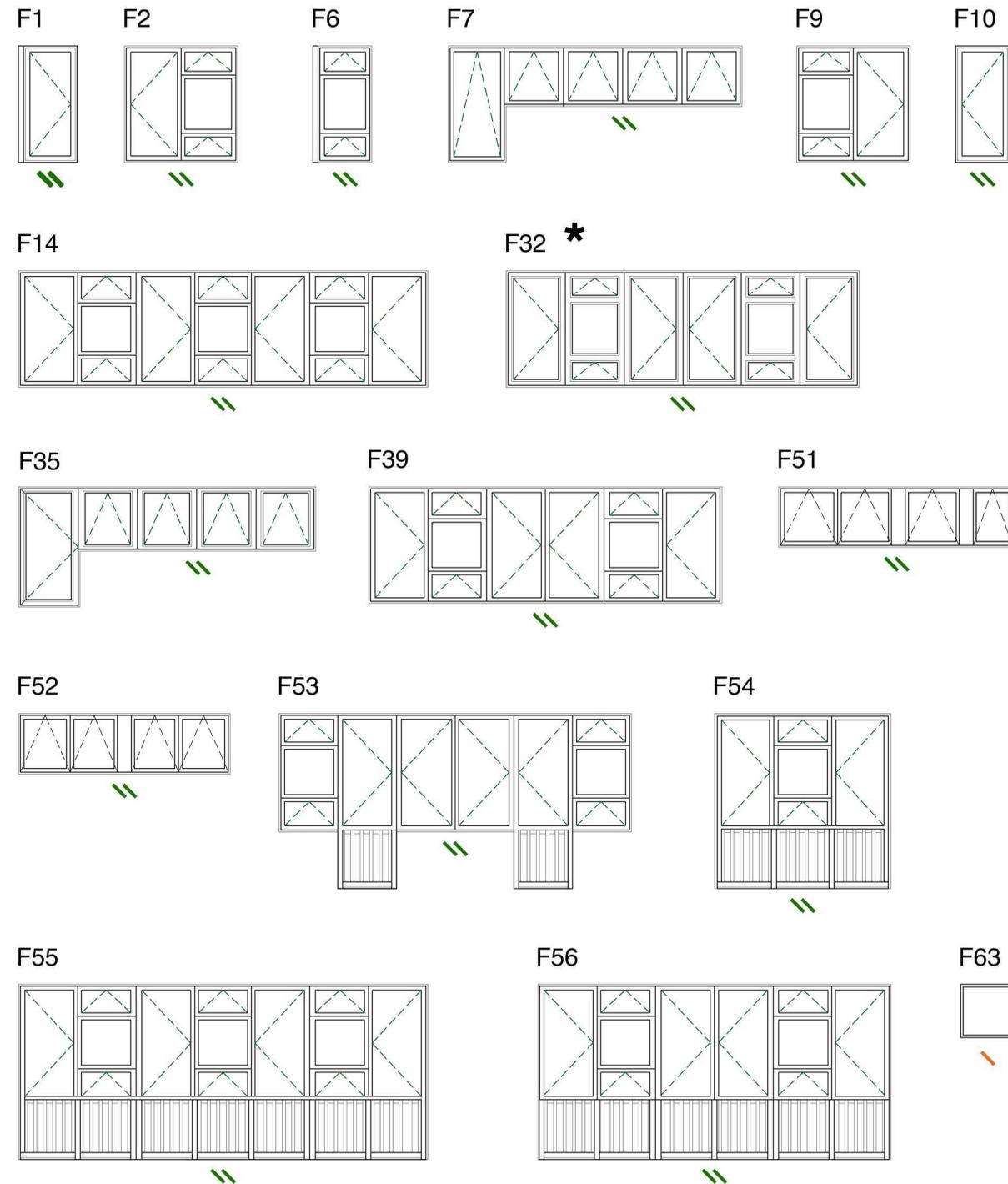
> Figura 8.16

Caratteristiche termofisiche dei nuovi serramenti e sistemi per il controllo della radiazione solare adoperati
© Elaborazione grafica dell'autore

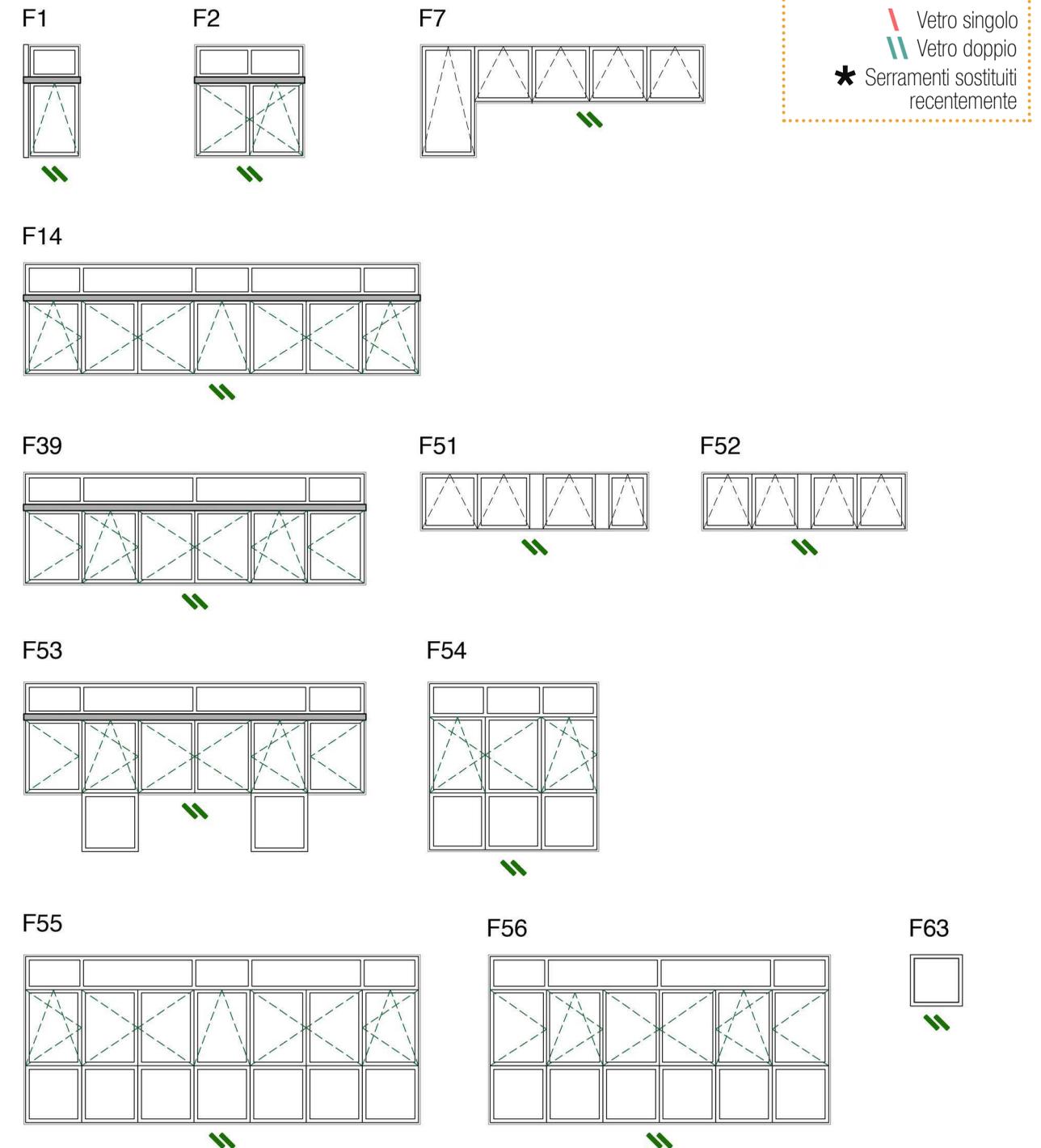


[81] Materiale didattico: ALFONSO CAPOZZOLI, "Il carico termico invernale di progetto", Atelier finale di progettazione, a.a. 2017/2018, Politecnico di Torino.

STATO DI FATTO_ABACO DEI SERRAMENTI



STATO DI PROGETTO_ABACO DEI SERRAMENTI



LEGENDA

- / Vetro singolo
- // Vetro doppio
- * Serramenti sostituiti recentemente

PRESTAZIONI ENERGETICHE: CONFRONTO TRA STATO DI FATTO E DI PROGETTO

- Aw,p [m²]
- Area proiettata totale della finestra
- Ag [m²]
- Area del componente vetrato
- Af [m²]
- Area del telaio
- Fr [-]
- Rapporto tra l'area del telaio (Af) e l'area del vano finestra (Aw,p)
- lg [m]
- Lunghezza del perimetro del componente vetrato
- Uw [W/m²K]
- Trasmittanza termica della finestra
- Uw+shut [W/m²K]
- Trasmittanza termica della finestra e chiusura oscurante insieme (se non sono presenti schermature esterne il valore coincide con Uw).
- ggl [-]
- Fattore solare del componente vetrato.
- ggl+sh [-]
- Fattore solare del componente vetrato quando la schermatura solare è utilizzata (calcolato tramite il software *Parasol*).
- ε [-]
- Emissività della finestra sul lato esterno
- Ug [W/m²K]
- Trasmittanza termica del componente vetrato
- Uf [W/m²K]
- Trasmittanza termica del telaio
- Ψ [W/mK]
- Trasmittanza termica lineare del giunto tra telaio e vetrata (UNI EN ISO 10077)
- ht [W/K]
- Coefficiente di dispersione termica per trasmissione attraverso l'involucro trasparente

Descrizione	Proprietà geometriche						Proprietà termofisiche					ht				
	Tipologie	Numero finestre	Aw,p [m ²]	Ag [m ²]	Af [m ²]	Ff [-]	lg [m]	Uw [W/m ² K]	Uw+shut [W/m ² K]	ggl [-]	ggl+sh [-]		ε [-]	Ug [W/m ² K]	Uf [W/m ² K]	Ψ [W/m ² K]
// F1		8	1,72	1,07	0,65	0,38	4,60	4,53	4,53	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01	62,40
// F2		2	3,33	2,26	1,07	0,32	12,04	4,32	3,11	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01	28,75
// F6		16	1,72	0,92	0,80	0,47	6,72	4,91	4,91	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01	135,12
// F7		2	5,29	3,67	1,62	0,31	17,31	4,26	4,26	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01	45,06
// F9		2	3,33	2,26	1,07	0,32	12,04	4,32	3,11	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01	28,75
// F10		8	1,72	1,07	0,65	0,38	4,60	4,53	4,53	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01	62,40
// F14		18	12,01	8,58	3,42	0,28	42,29	4,18	3,03	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01	902,33
// F32*		2	10,36	6,48	3,88	0,37	32,42	2,96	2,96	0,80	0,63	0,89	3	2,4	0,06	61,39
// F35		2	5,68	3,58	2,11	0,37	17,14	4,51	4,51	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01	51,28
// F39		14	10,36	7,46	2,90	0,28	34,73	4,15	4,15	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01	602,38
// F51		2	3,59	2,18	1,41	0,39	11,84	4,60	4,60	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01	33,04
// F52		2	3,23	2,04	1,18	0,37	11,48	4,50	4,50	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01	29,05
// F53		4	12,19	8,81	3,38	0,28	41,32	4,14	4,14	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01	201,96
// F54		2	7,77	5,70	2,07	0,27	24,74	4,10	4,10	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01	63,71
// F55		2	18,05	13,37	4,69	0,26	65,45	4,07	4,07	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01	147,11
// F56		2	15,58	11,57	4,01	0,26	54,61	4,06	4,06	0,80	0,63	0,89	3	7	0,01	126,62
/ F63		2	0,72	0,59	0,13	0,18	3,07	6,02	6,02	0,88	0,73	0,89	5,8	7	0,01	8,66
TOTALE		90														2590,00

TABELLA 8.1 STATO DI FATTO Caratteristiche geometriche e termofisiche dei serramenti

Descrizione	Proprietà geometriche						Proprietà termofisiche					ht				
	Tipologie	Numero finestre	Aw,p [m ²]	Ag [m ²]	Af [m ²]	Ff [-]	lg [m]	Uw [W/m ² K]	Uw+shut [W/m ² K]	ggl [-]	ggl+sh [-]		ε [-]	Ug [W/m ² K]	Uf [W/m ² K]	Ψ [W/m ² K]
// F1		32	1,72	0,99	0,73	0,43	5,61	1,41	1,41	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	77,55
// F2		4	3,33	2,23	1,10	0,33	11,60	1,37	1,37	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	18,31
// F7		4	5,29	3,79	1,50	0,28	17,62	1,34	1,34	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	28,38
// F14		18	12,00	8,40	3,60	0,30	42,29	1,36	1,36	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	294,04
// F39		16	10,36	7,36	3,00	0,29	36,40	1,36	1,36	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	224,74
// F51		2	3,59	2,18	1,41	0,39	11,84	1,39	1,39	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	10,01
// F52		2	3,23	2,04	1,18	0,37	11,48	1,40	1,40	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	9,01
// F53		4	12,19	8,71	3,48	0,29	42,98	1,35	1,35	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	66,04
// F54		2	7,77	5,68	2,09	0,27	28,71	1,36	1,36	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	21,09
// F55		2	18,05	13,45	4,60	0,25	65,93	1,35	1,35	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	48,62
// F56		2	15,58	11,68	3,90	0,25	56,70	1,34	1,34	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	41,86
// F63		2	0,72	0,53	0,19	0,26	2,91	1,37	1,37	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	1,98
TOTALE		90														841,61

TABELLA 8.2 STATO DI PROGETTO Caratteristiche geometriche e termofisiche dei serramenti

Descrizione	Proprietà geometriche						Proprietà termofisiche					ht				
	Tipologie	Numero finestre	Aw,p [m ²]	Ag [m ²]	Af [m ²]	Ff [-]	lg [m]	Uw [W/m ² K]	Uw+shut [W/m ² K]	ggl [-]	ggl+sh [-]		ε [-]	Ug [W/m ² K]	Uf [W/m ² K]	Ψ [W/m ² K]
// F1		32	1,72	0,99	0,73	0,43	5,61	1,41	1,41	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	77,55
// F2		4	3,33	2,23	1,10	0,33	11,60	1,37	1,37	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	18,31
// F7		4	5,29	3,79	1,50	0,28	17,62	1,34	1,34	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	28,38
// F14		18	12,00	8,40	3,60	0,30	42,29	1,36	1,36	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	294,04
// F39		16	10,36	7,36	3,00	0,29	36,40	1,36	1,36	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	224,74
// F51		2	3,59	2,18	1,41	0,39	11,84	1,39	1,39	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	10,01
// F52		2	3,23	2,04	1,18	0,37	11,48	1,40	1,40	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	9,01
// F53		4	12,19	8,71	3,48	0,29	42,98	1,35	1,35	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	66,04
// F54		2	7,77	5,68	2,09	0,27	28,71	1,36	1,36	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	21,09
// F55		2	18,05	13,45	4,60	0,25	65,93	1,35	1,35	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	48,62
// F56		2	15,58	11,68	3,90	0,25	56,70	1,34	1,34	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	41,86
// F63		2	0,72	0,53	0,19	0,26	2,91	1,37	1,37	0,37	0,25	0,20	1	1,5	0,06	1,98
TOTALE		90														841,61

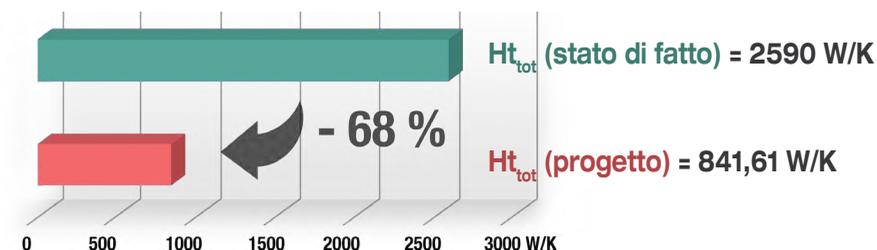


Figura 8.17

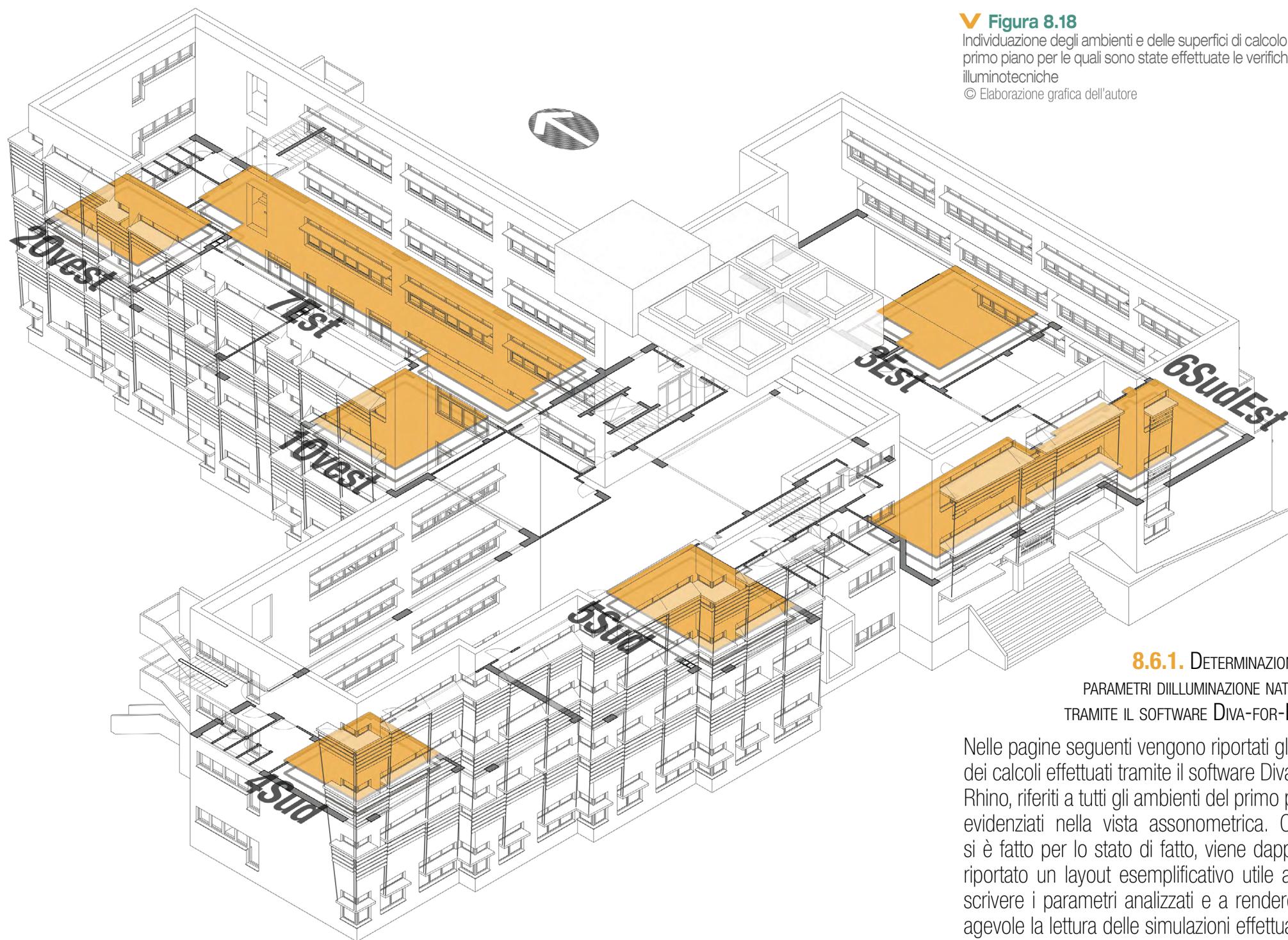
Riduzione delle dispersioni termiche per trasmissione attraverso l'involucro trasparente dopo l'intervento
 © Elaborazione grafica dell'autore

8.6. ANALISI DELLE PRESTAZIONI VISIVE

Ai fini di verificare il corretto funzionamento dei light shelves e l'effettivo miglioramento delle condizioni di illuminazione degli ambienti interni, si è proceduto con il calcolo tramite il software *Diva-for-Rhino* dei principali parametri di illuminazione naturale, prendendo in esame gli stessi ambienti che sono stati precedentemente analizzati per lo stato di fatto. Le verifiche sono state effettuate limitatamente per il primo piano, su un campione totale di 7 ambienti comprendenti aule, laboratori e il corridoio distributivo esposto ad est [Figura 8.18]. In maniera del tutto analoga allo stato di fatto, sono stati calcolati per ogni ambiente il *Fattore medio di luce diurna* e i principali parametri dinamici per l'illuminazione naturale: *Daylight Autonomy (DA)*, *Continuous Daylight Autonomy (DAcon)*, *Useful Daylight illuminance (UDI)*, *spatial Daylight Autonomy (sDA)*, *Annual Sunlight Exposure (ASE)*.

È stata inoltre valutata la presenza di potenziali fenomeni di abbagliamento tramite il calcolo del *DGP (Daylight glare probability)*, considerando il punto di osservazione (posto ad un'altezza di 120 cm rispetto al piano di calpestio) in cui la probabilità che si verifichino condizioni di abbagliamento risulta maggiore. A seguito delle variazioni apportate negli ambienti interni, sono stati inoltre modificati i coefficienti di riflessione dei materiali:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{light shelves}} &= 95\% \\ \rho_{\text{soffitto}} &= 80\% \\ \rho_{\text{pareti interne}} &= 50\% \\ \rho_{\text{pavimento}} &= 20\%. \end{aligned}$$



▼ Figura 8.18

Individuazione degli ambienti e delle superfici di calcolo del primo piano per le quali sono state effettuate le verifiche illuminotecniche

© Elaborazione grafica dell'autore

8.6.1. DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DI ILLUMINAZIONE NATURALE TRAMITE IL SOFTWARE DIVA-FOR-RHINO

Nelle pagine seguenti vengono riportati gli esiti dei calcoli effettuati tramite il software *Diva-for-Rhino*, riferiti a tutti gli ambienti del primo piano evidenziati nella vista assonometrica. Come si è fatto per lo stato di fatto, viene dapprima riportato un layout esemplificativo utile a descrivere i parametri analizzati e a rendere più agevole la lettura delle simulazioni effettuate.

LAYOUT ESEMPLIFICATIVO DI RIFERIMENTO PER LE PAGINE SEGUENTI

Pianta
dell'ambiente
analizzato

▼ Profilo di occupazione

Il profilo di occupazione rappresenta il numero di ore nell'arco di un anno in cui gli ambienti sono effettivamente utilizzati. Considerato che la scuola risulta occupata anche nelle ore pomeridiane, sono state considerate 9 ore al giorno (dalle ore 8:00 alle ore 17:00) per tutti i giorni feriali (da lunedì a sabato), per un totale di 2349 ore all'anno.

▼ Detailed dynamic shading

Il grafico rappresenta l'attivazione dei diversi stati delle schermature dinamiche (dal più oscurante al meno oscurante) nelle ore di utilizzo dell'ambiente. Ai fini del calcolo sono stati considerati tre diversi stati cui corrisponde una specifica inclinazione delle lamelle:
Stato più oscurante (in bianco) > lamelle inclinate di 60°
Stato intermedio (in azzurro) > lamelle inclinate di 30°
Stato meno oscurante (in blu) > lamelle in posizione orizzontale

▼ Annual Glare (Abbagliamento calcolato su base annuale)

L'Annual Glare rappresenta la probabilità che si verifichino fenomeni di abbagliamento per uno specifico punto di osservazione, considerando tutte le ore di utilizzo dell'ambiente nell'arco di un anno.

Rendering
dell'ambiente
analizzato

▼ DGP

Il DGP rappresenta la probabilità che si verifichino fenomeni di abbagliamento per uno specifico punto di osservazione.
 $DGP \leq 0,35$

Confronto con i
valori
normativi

▼ FLDm (Fattore medio di luce diurna)

La normativa vigente definisce dei valori minimi del Fattore medio di luce diurna a seconda della destinazione d'uso.

Per le aule scolastiche: $FLDm \geq 3 \%$
Per i corridoi: $FLDm \geq 1 \%$

▼ DAcon (Continuous Daylight Autonomy)

Rappresenta il contributo percentuale che la sola luce naturale è in grado di fornire al fine di garantire il raggiungimento del valore minimo di illuminamento richiesto dalla normativa.

Per le aule scolastiche: $Em = 500 \text{ lx}$
Per i corridoi: $Em = 100 \text{ lx}$

▼ UDI (Useful Daylight illuminance)

Definisce la percentuale di tempo in cui la disponibilità di luce naturale risulta "utile" allo svolgimento del compito visivo, mantenendosi entro valori di illuminamento né troppo bassi (<100 lx) né troppo alti (>2500 lx).

▼ DA (Daylight Autonomy)

Definisce la percentuale di tempo nell'arco di un anno in cui la sola luce naturale è in grado di garantire il livello minimo di illuminamento definito secondo normativa, che varia a seconda della destinazione d'uso.

Per le aule scolastiche: $Em = 500 \text{ lx}$
Per i corridoi: $Em = 100 \text{ lx}$

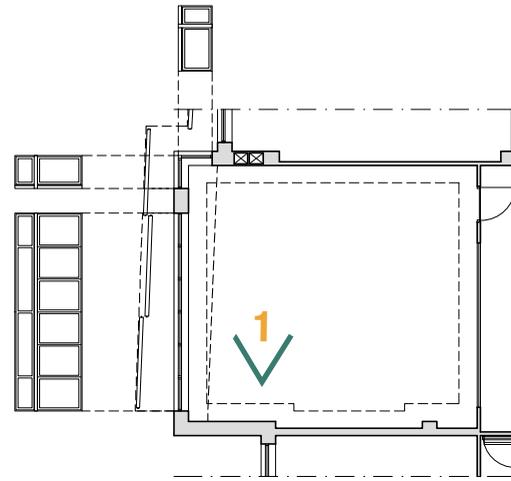
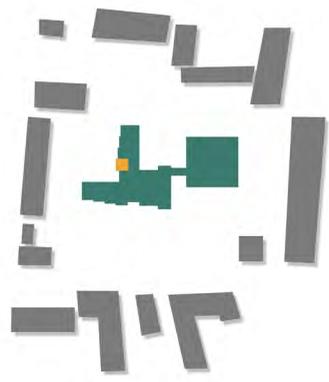
▼ UDIexceeded (Useful Daylight illuminance)

Rappresenta la percentuale di tempo in cui i valori di illuminamento risultano maggiori di 2500 lx (potenziale condizione di abbagliamento)

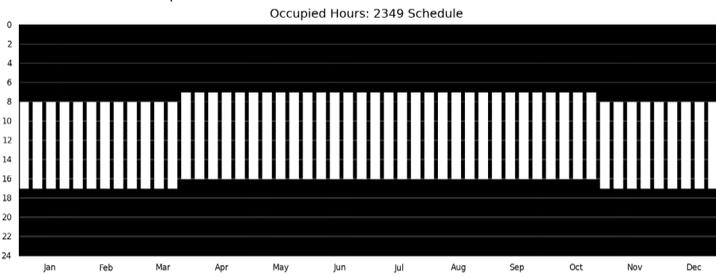
▼ ASE (Annual Sunlight Exposure)

Definisce la percentuale di spazio in cui viene superato un determinato valore di illuminamento considerando una frazione specifica delle ore di utilizzo dell'ambiente esaminato. Nello specifico, si fa riferimento a un illuminamento di 1000 lx e una frazione di tempo pari a 250 ore ($ASE_{1000 \text{ lx}, 250 \text{ h}}$)

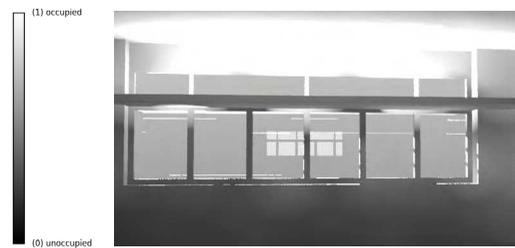
AULA 10VEST



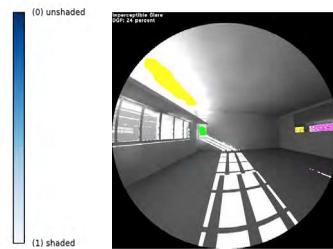
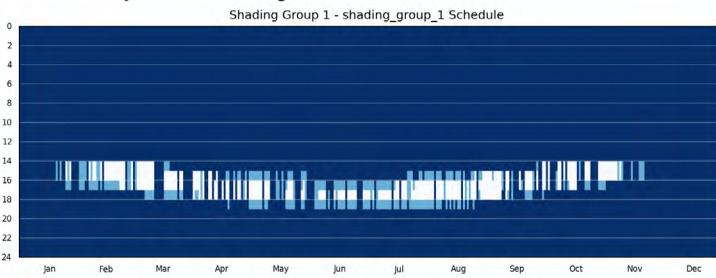
Profilo di occupazione



Rendering

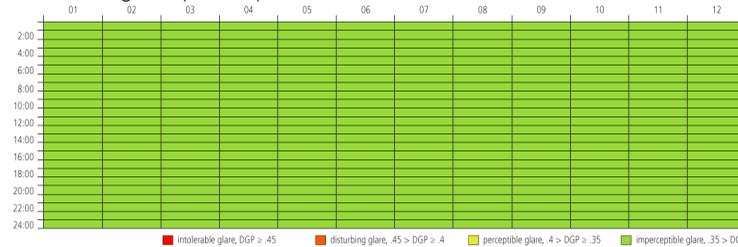


Detailed dynamic shading



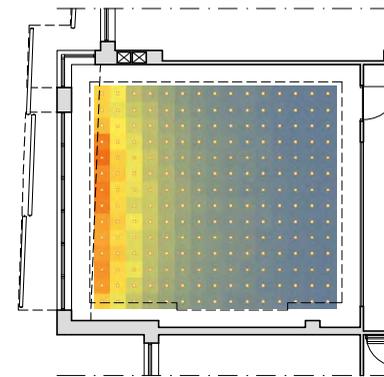
DGP=24% (Vista 1)
02/05 ore 17:00

Annual glare (Vista 1)

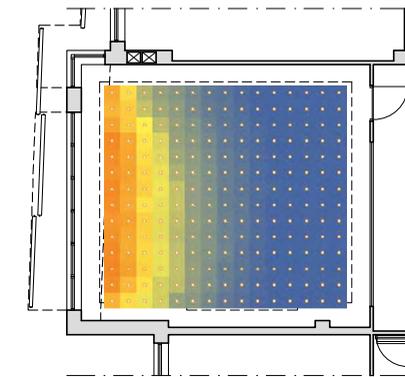


FLDm = 1 % → < 3 %
 sDA_{300, 50%} = 36 % → < 55 %
 ASE_{1000, 250h} = 0 % → < 7 %
 UDI_{100-2000 lx} = 78 % → ~ 80 %

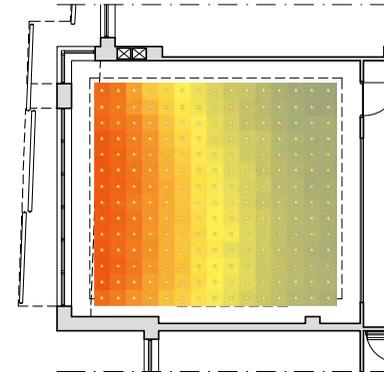
FLDm
1 %



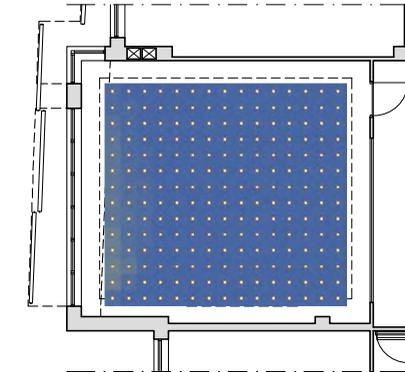
DA500 lx_ Daylight autonomy
20 %



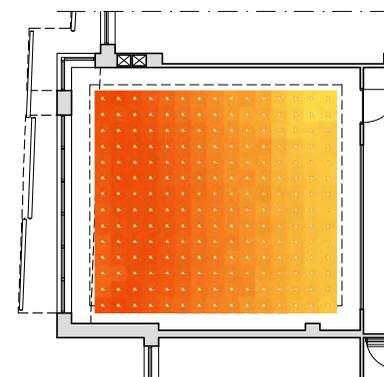
DAcon 500 lx_ Continuous daylight autonomy
52 %



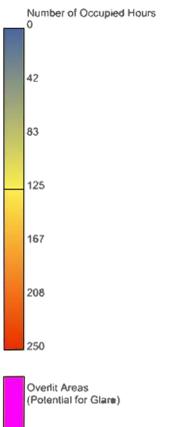
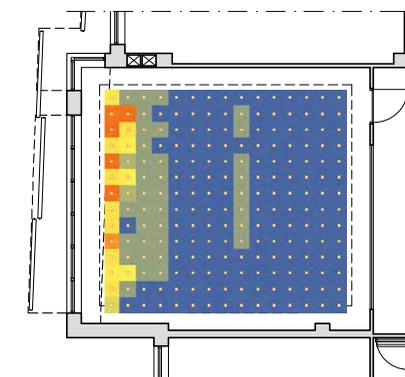
UDI_{exceed 2000 lx}
1 %



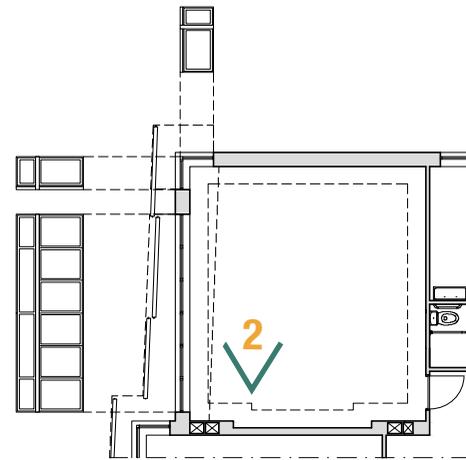
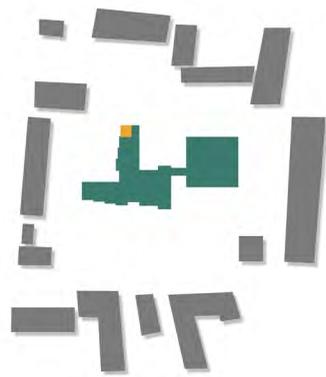
UDI_{100-2000 lx}
78 %



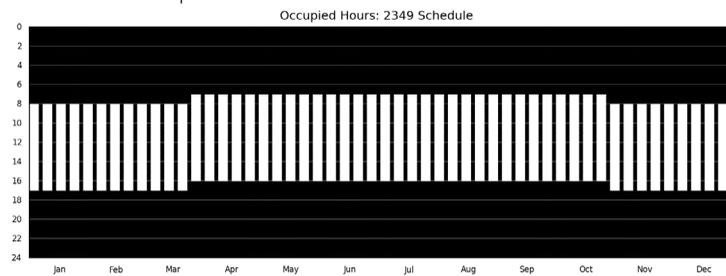
ASE_{1000 lx, 250 h}
0 %



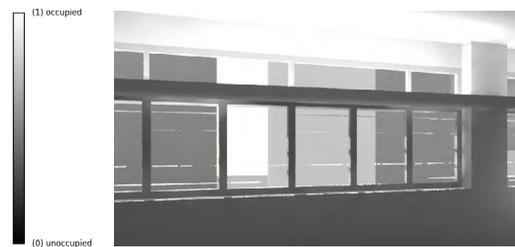
AULA 20VEST



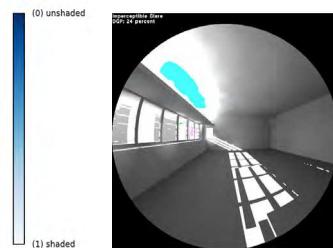
Profilo di occupazione



Rendering

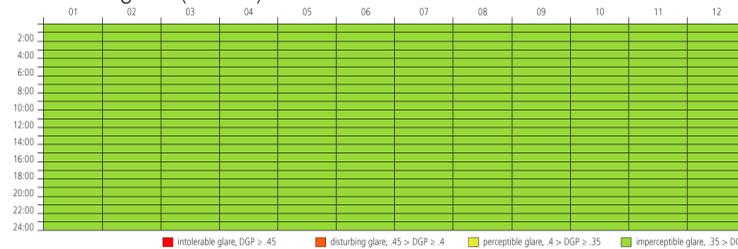


Detailed dynamic shading



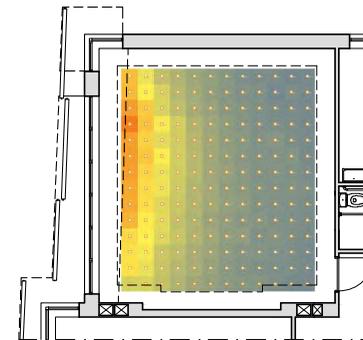
DGP=24% (Vista 2)
02/05 ore 17:00

Annual glare (Vista 2)

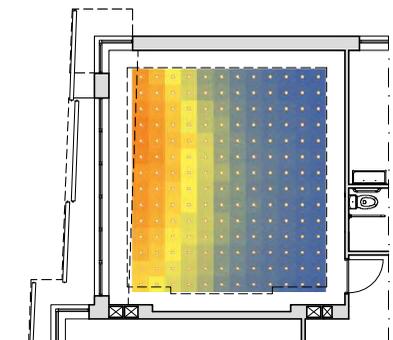


FLDm = 1,2 % → < 3 %
 sDA_{300,50%} = 53 % → ~ 55 %
 ASE_{1000,250h} = 1 % → < 7 %
 UDI_{100-2000 lx} = 84 % → > 80 %

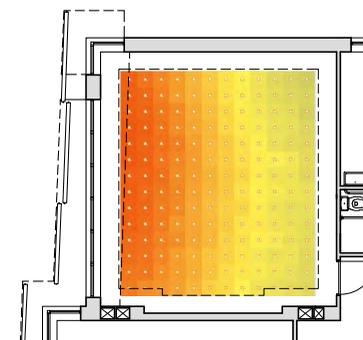
FLDm
1,2 %



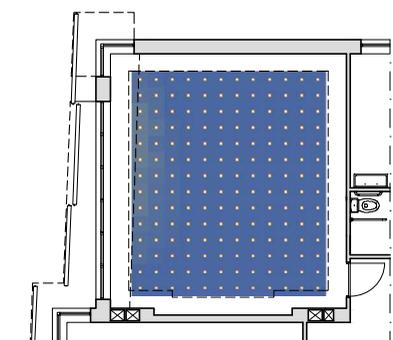
DA500 lx Daylight autonomy
27 %



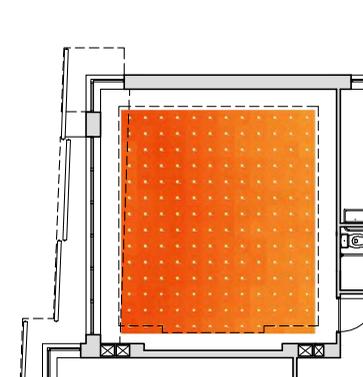
DAcon 500 lx Continuous daylight autonomy
62 %



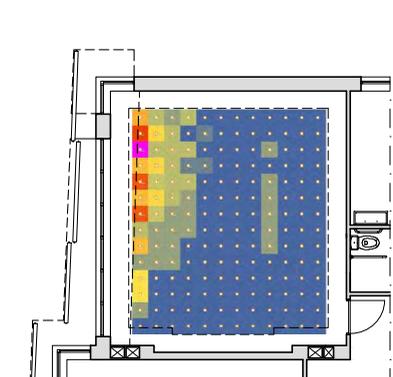
UDIexceed 2000 lx
1 %



UDI100-2000 lx
84 %

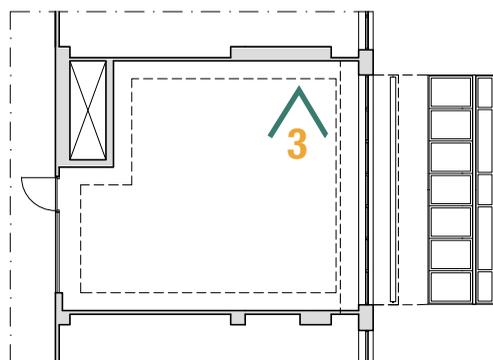
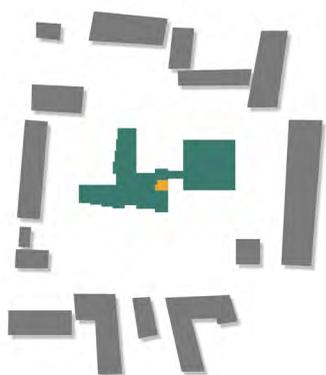


ASE1000 lx, 250 h
1 %

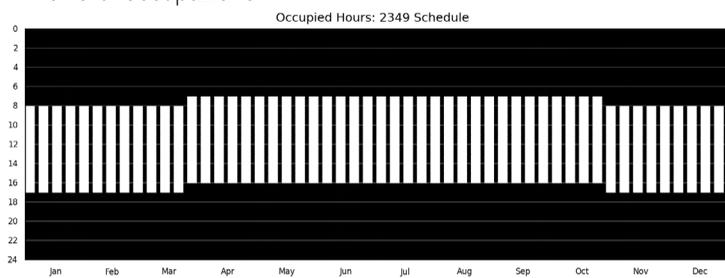


Number of Occupied Hours
0, 42, 83, 125, 167, 208, 250
Overlit Areas (Potential for Glare)

AULA 3EST



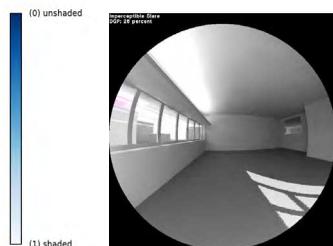
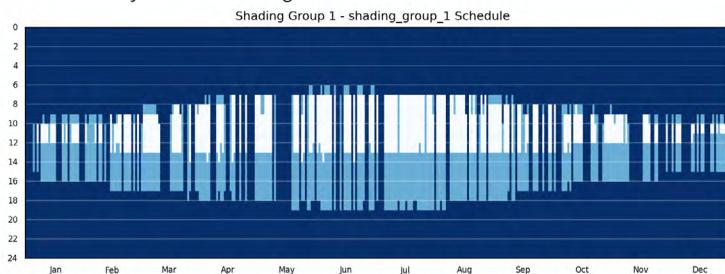
Profilo di occupazione



Rendering

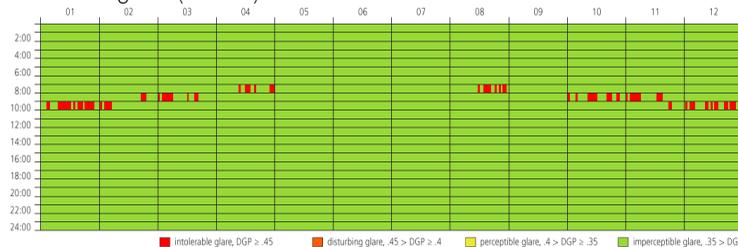


Detailed dynamic shading



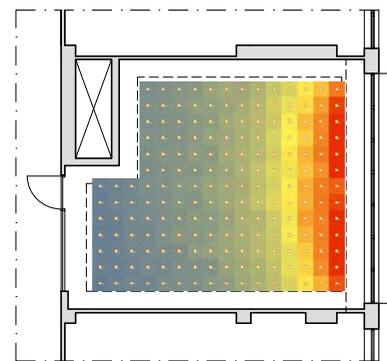
DGP=26% (Vista 3)
02/01 ore 10:00

Annual glare (Vista 3)

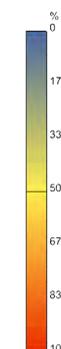
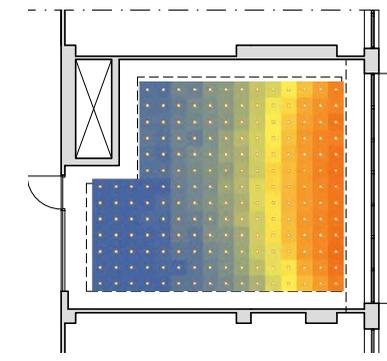


FLDm = 1,4 % → < 3 %
 sDA_{300, 50%} = 54 % → ~ 55 %
 ASE_{1000, 250h} = 19 % → > 7 %
 UDI_{100-2000 lx} = 82 % → > 80 %

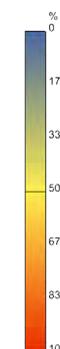
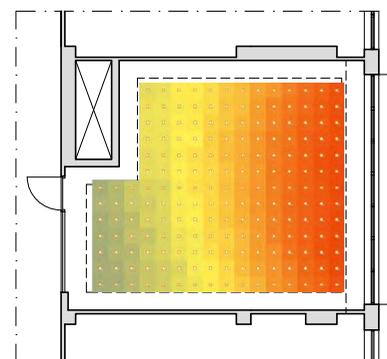
FLDm
1,4 %



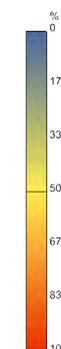
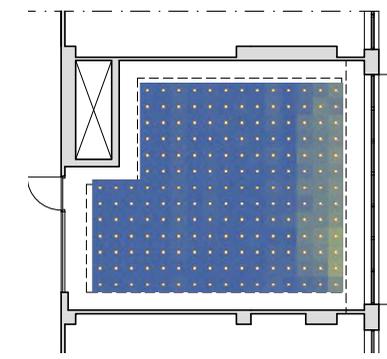
DA500 lx_ Daylight autonomy
31 %



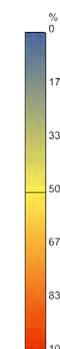
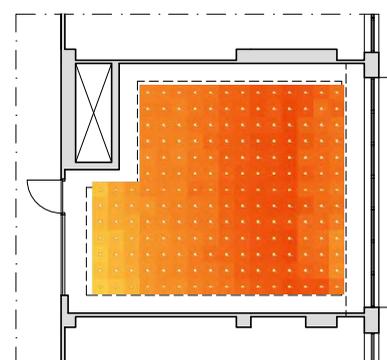
DAcon 500 lx_ Continuous daylight autonomy
62 %



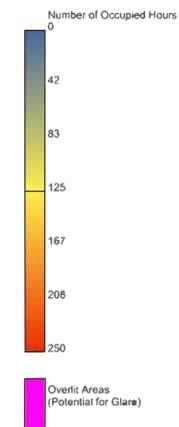
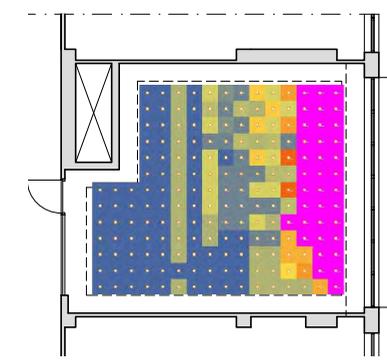
UDI_{exceed 2000 lx}
3 %



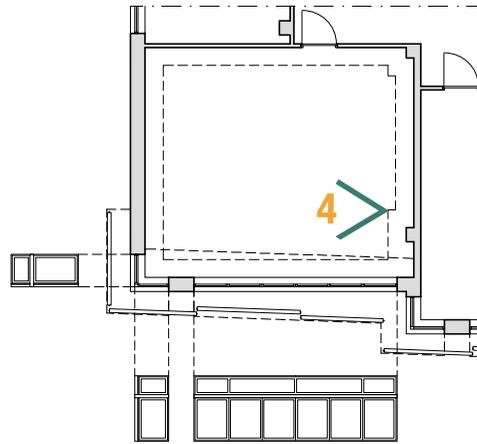
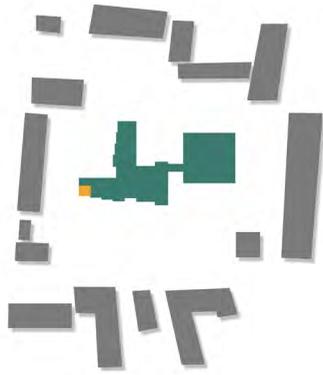
UDI_{100-2000 lx}
82 %



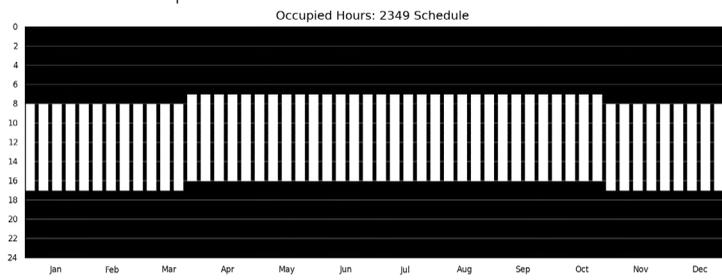
ASE_{1000 lx, 250 h}
19 %



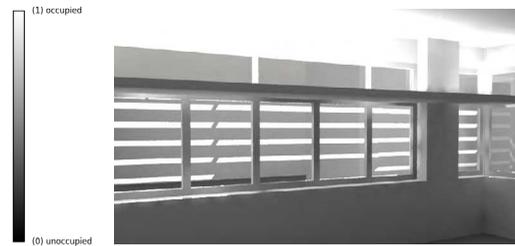
AULA 4SUD



Profilo di occupazione



Rendering

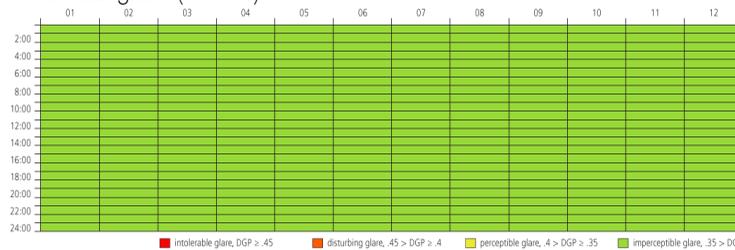


Detailed dynamic shading



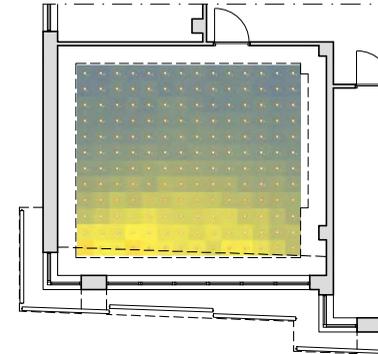
DGP=23% (Vista 4)
02/02 ore 14:00

Annual glare (Vista 4)

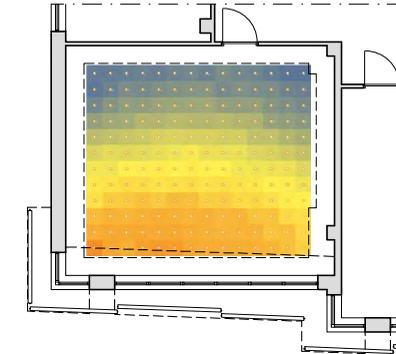


FLDm = 1 % → < 3 %
 sDA_{300,50%} = 72 % → > 55 %
 ASE_{1000,250h} = 6 % → < 7 %
 UDI_{100-2000 lx} = 82 % → > 80 %

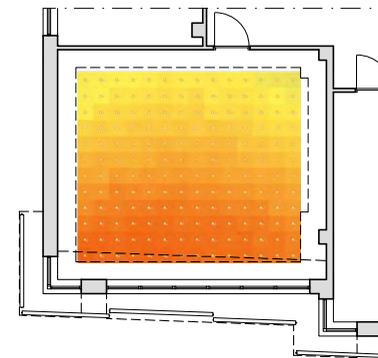
FLDm
1 %



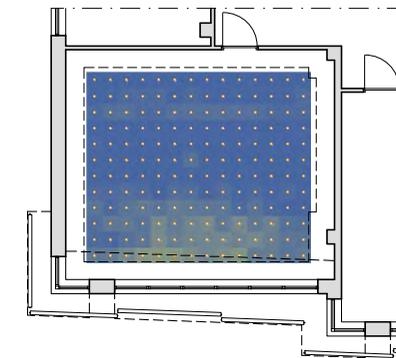
DA500 lx_ Daylight autonomy
42 %



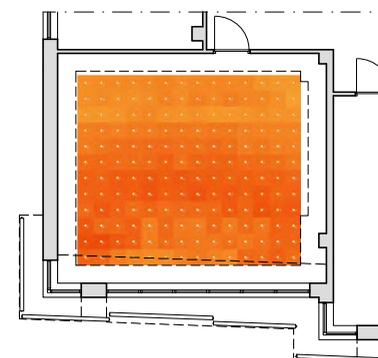
DAcon 500 lx_ Continuous daylight autonomy
68 %



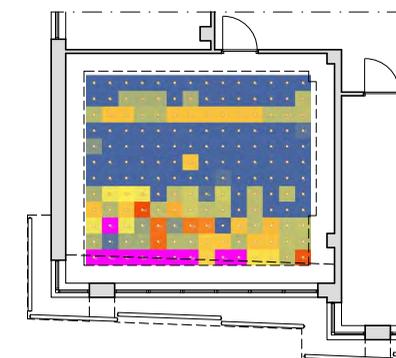
UDI_{exceed 2000 lx}
3 %



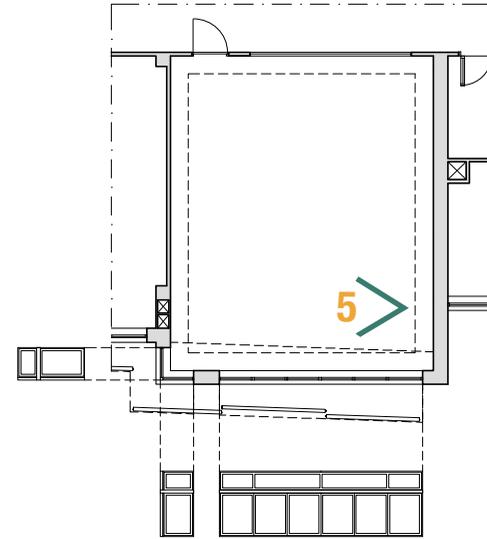
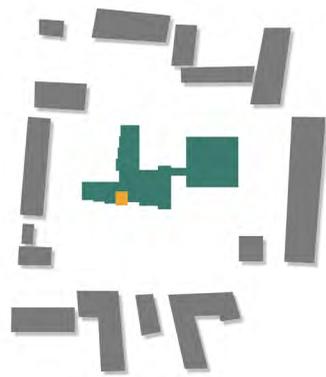
UDI_{100-2000 lx}
82 %



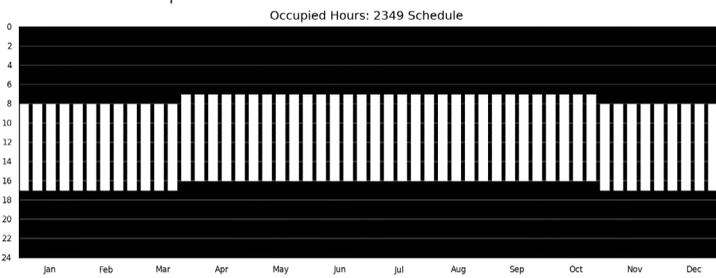
ASE_{1000 lx, 250 h}
6 %



AULA 5SUD



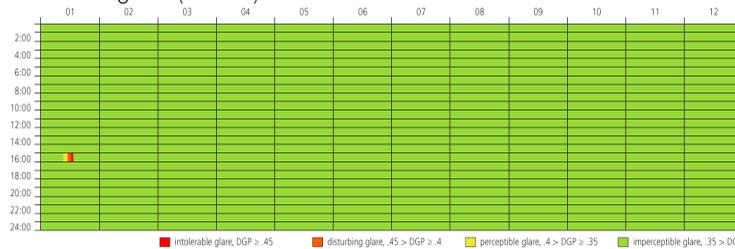
Profilo di occupazione



Detailed dynamic shading

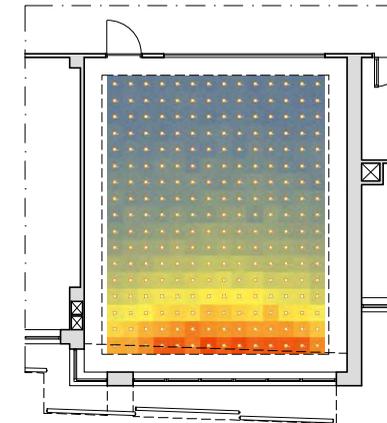


Annual glare (Vista 5)

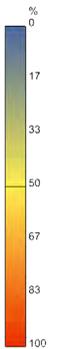
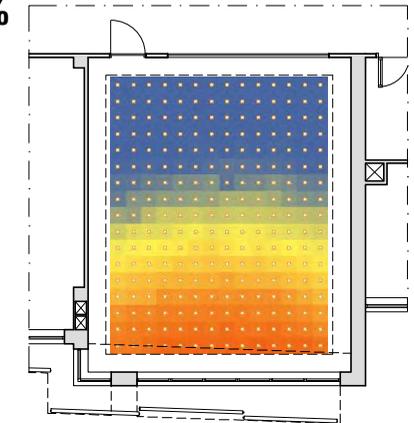


FLDm = 1,2 % → **< 3 %**
sDA_{300,50%} = 58 % → **> 55 %**
ASE_{1000,250h} = 19 % → **< 7 %**
UDI_{100-2000 lx} = 79 % → **~ 80 %**

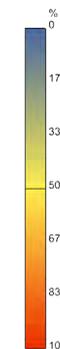
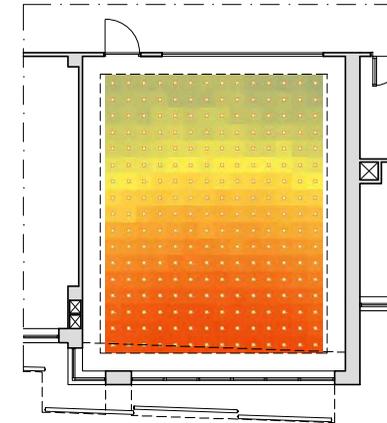
FLDm
1,2 %



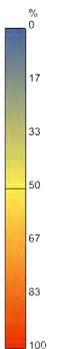
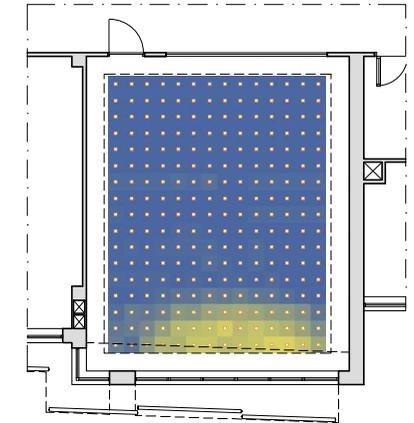
DA500 lx_ Daylight autonomy
35 %



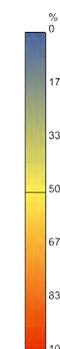
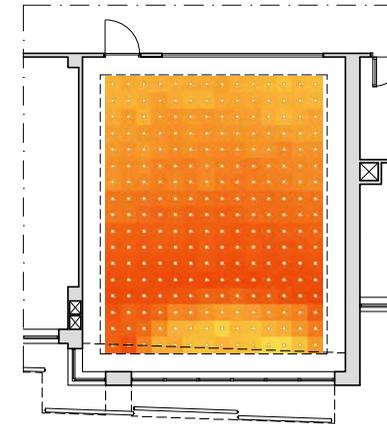
DAcon 500 lx_ Continuous daylight autonomy
62 %



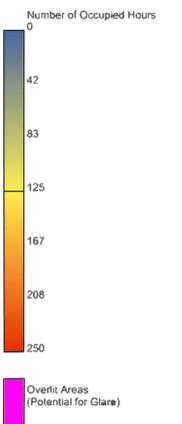
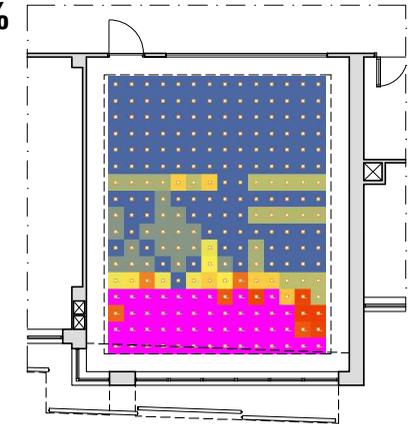
UDI_{exceed 2000 lx}
4 %



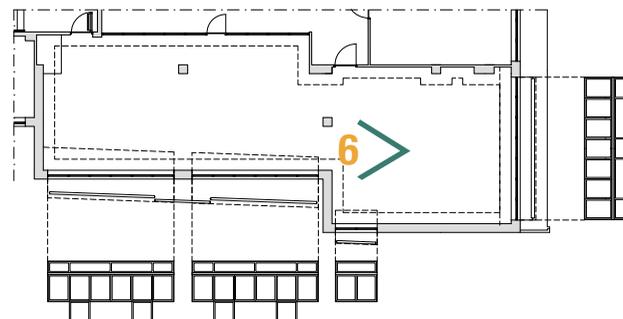
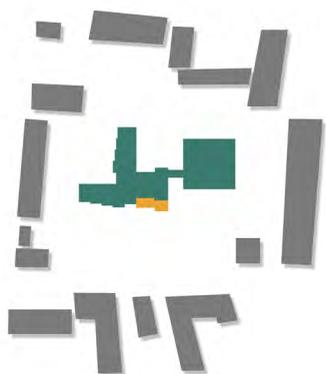
UDI_{100-2000 lx}
79 %



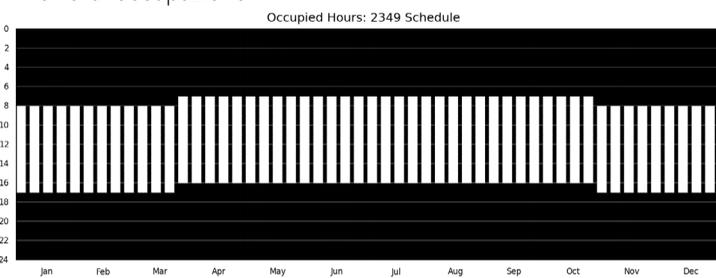
ASE_{1000 lx, 250 h}
19 %



AULA 6 SudEst



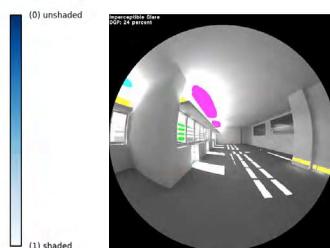
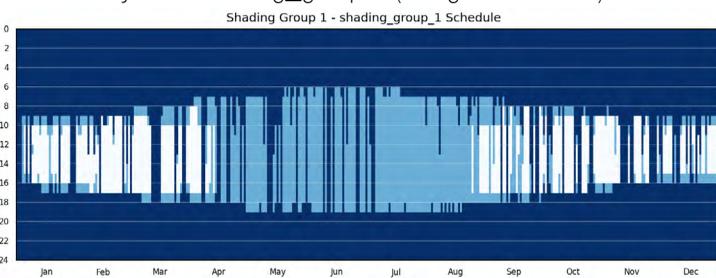
Profilo di occupazione



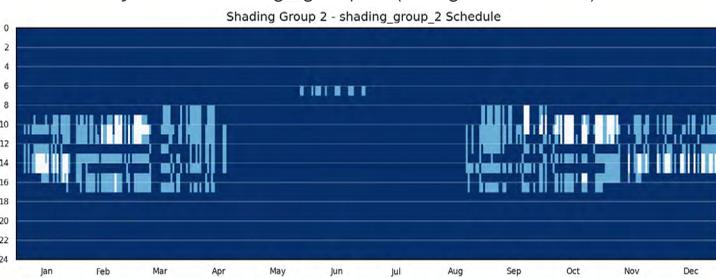
Rendering



Detailed dynamic shading_group 1 (Frangisole lato sud)

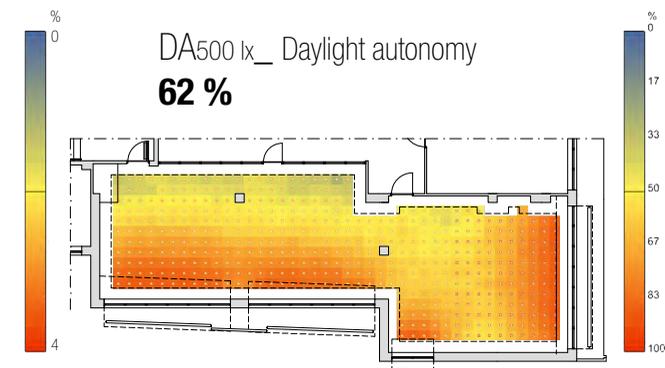
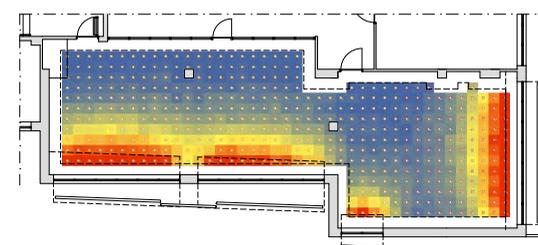


Detailed dynamic shading_group 2 (Frangisole lato est)

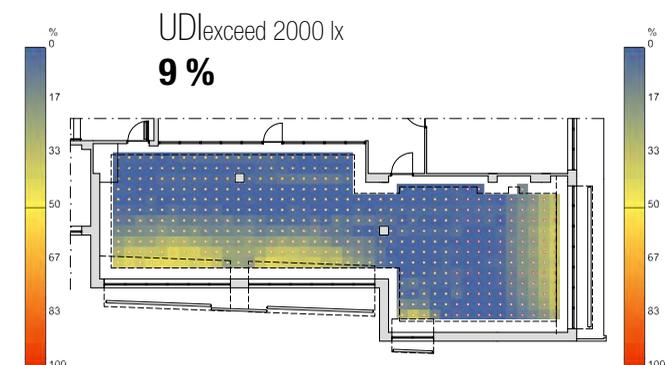
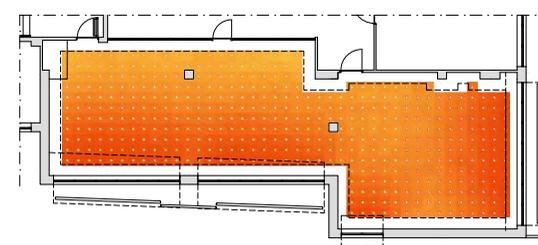


FLDm = 1,9 % → **< 3 %**
sDA_{300, 50%} = 100 % → **> 55 %**
ASE_{1000, 250h} = 5 % → **< 7 %**
UDI_{100-2000 lx} = 83 % → **> 80 %**

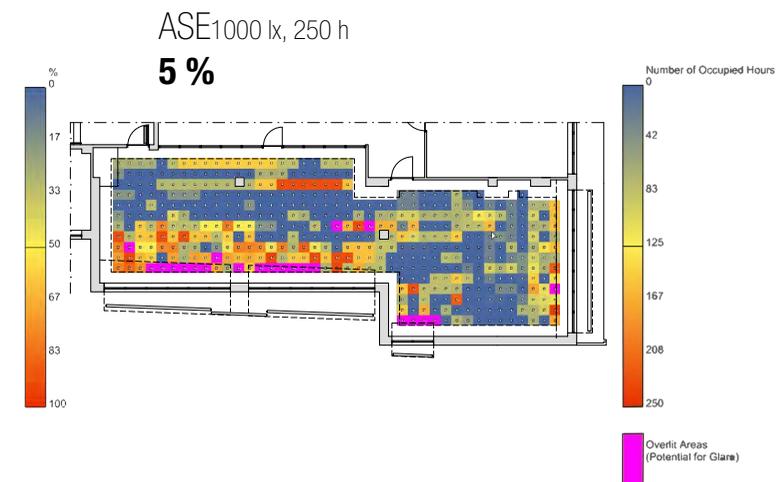
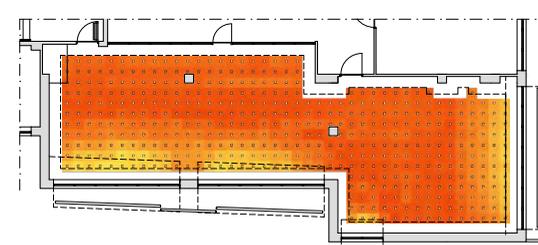
FLDm
1,9 %



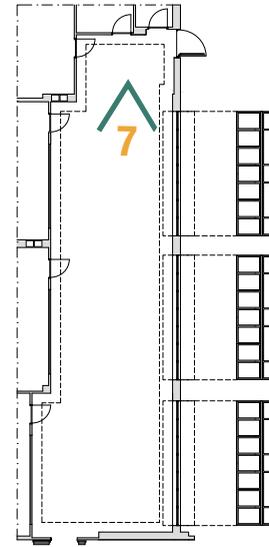
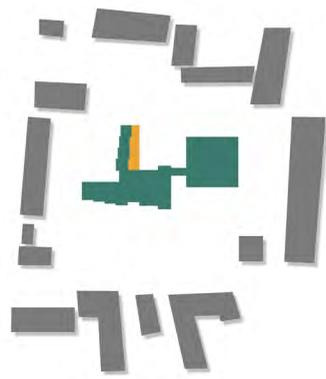
DAcon 500 lx_ Continuous daylight autonomy
81 %



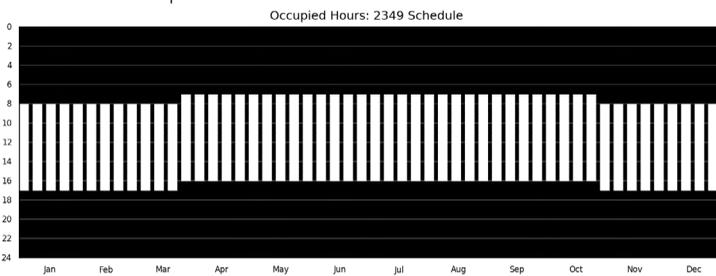
UDI_{100-2000 lx}
83 %



CORRIDOIO 7EST



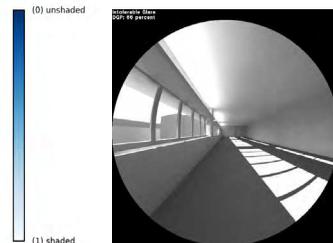
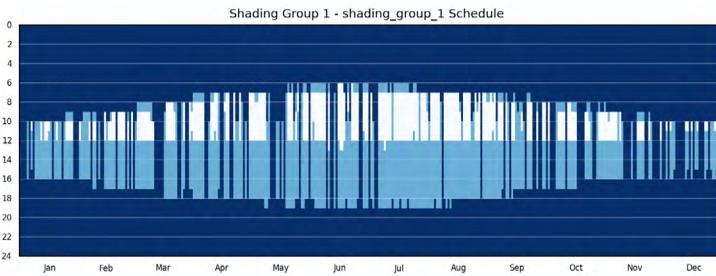
Profilo di occupazione



Rendering

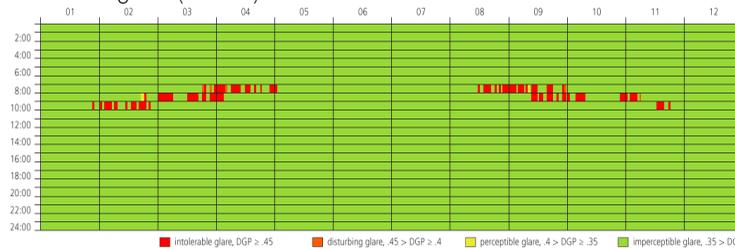


Detailed dynamic shading (tende esterne colorate)



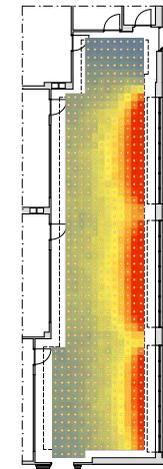
DGP=66% (Vista 7)
15/08 ore 8:00

Annual glare (Vista 5)

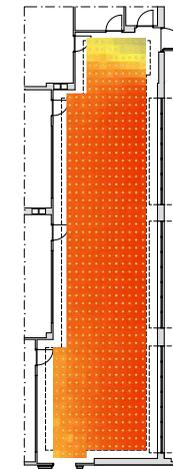


FLDm = 1,8 % → > 1 %
 sDA_{300, 50%} = 49 % → < 55 %
 ASE_{1000, 250h} = 9 % → ~ 7 %
 UDI_{100-2000 lx} = 86 % → > 80 %

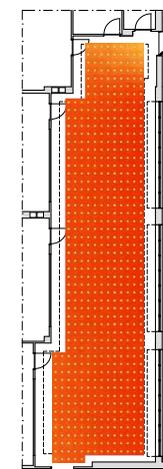
FLDm
1,8 %



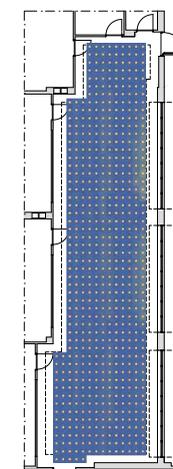
DA500 lx
87 %



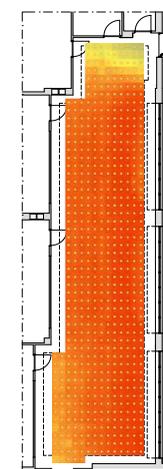
DAcon 500 lx
94 %



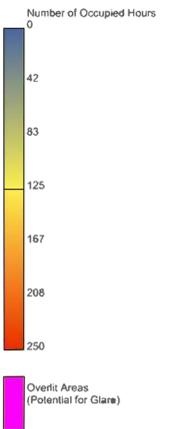
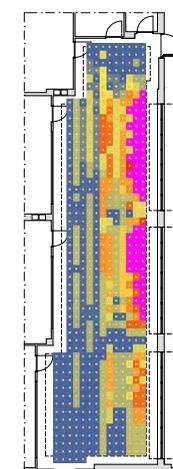
UDI_{exceed 2000 lx}
1 %



UDI_{100-2000 lx}
86 %



ASE_{1000 lx, 250 h}
9 %

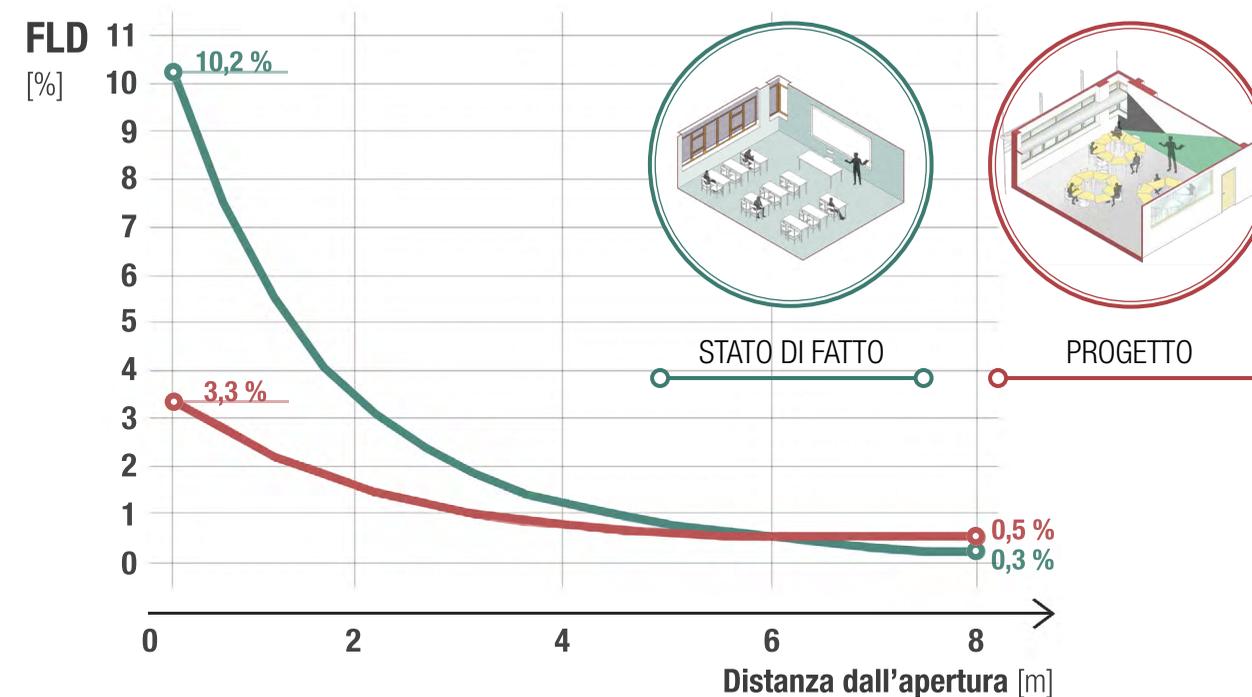
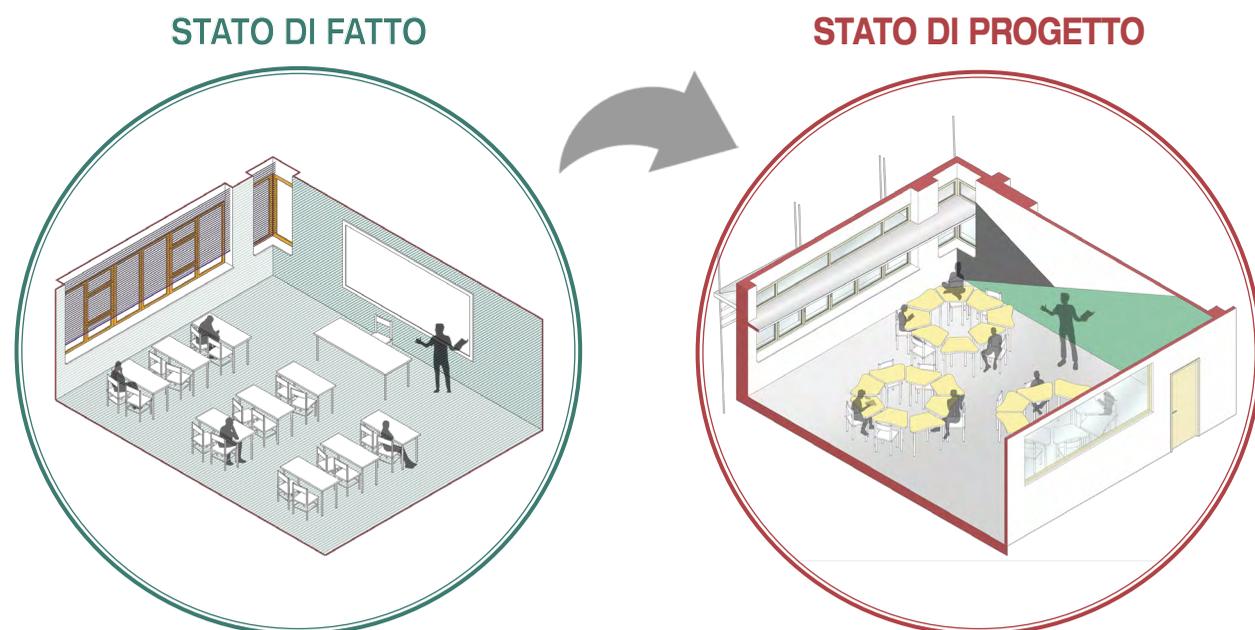


8.6.2. ANALISI CRITICA DEI RISULTATI E CONFRONTO CON LO STATO DI FATTO

Dopo aver effettuato le verifiche illuminotecniche per ciascun ambiente, si è proceduto con delle analisi più dettagliate sull'aula che è stata già precedentemente studiata nel capitolo 7 (Aula 5Sud), ai fini di dimostrare l'effettivo miglioramento delle condizioni di illuminazione naturale rispetto allo stato di fatto [Figura 8.19]. Grazie alla presenza dei light shelves, che consentono di reindirizzare la luce anche nelle zone più profonde dell'aula, si riscontra innanzitutto un netto miglioramento in termini di uniformità. Come si può notare dal grafico, in cui vengono messe a confronto le due curve relative alla variazione del fattore medio di luce diurna per lo stato di fatto e lo stato di progetto, si evince una distribuzione molto più uniforme dei valori, con una netta riduzione dei

picchi in prossimità della parete finestrata (riducendo il rischio di abbagliamento) e un lieve innalzamento dei valori nelle zone più lontane dalle aperture [Figure 8.20-8.21].

Considerato che il fattore di luce diurna non tiene conto della presenza di eventuali sistemi di schermatura dinamici, è stata inoltre valutata la variazione della spatial Daylight Autonomy (sDA) prima e dopo il progetto, al fine di valutare in quale modo i differenti sistemi di illuminazione naturale - impiegati per lo stato di fatto e lo stato di progetto - influenzano la distribuzione della luce naturale in ambiente. La spatial Daylight Autonomy (sDA_{300lx,50%}) definisce la percentuale di spazio in cui viene garantito un livello minimo di illuminamento (300 lx) per una frazione specifica di tempo (50% delle ore di utilizzo dell'ambiente); rappresentando dunque un parametro molto utile



▲ Figura 8.20

Variatione del fattore medio di luce diurna al variare della distanza dall'apertura: confronto tra stato di fatto e stato di progetto
© Elaborazione grafica dell'autore

➤ Figura 8.21

Rappresentazione tridimensionale del fattore medio di luce diurna e variazione dell'uniformità prima e dopo il progetto
© Elaborazione grafica dell'autore

STATO DI FATTO (il calcolo non tiene conto delle schermature dinamiche)

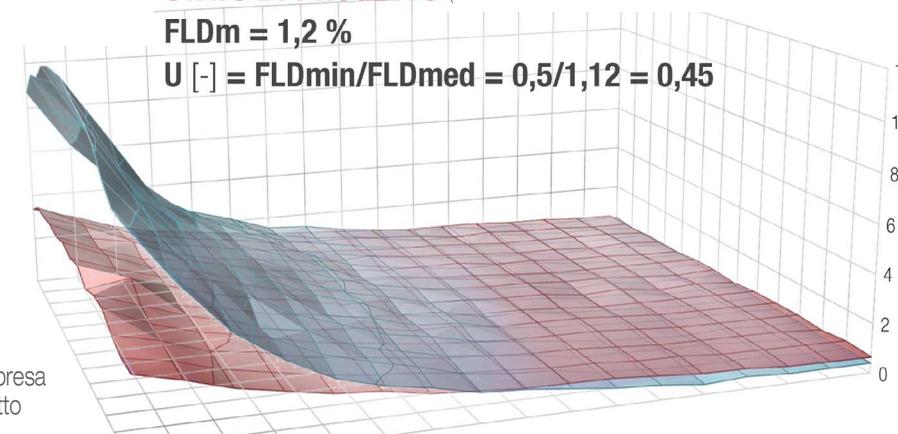
FLD_m = 2,5 %

U [-] = FLD_{min}/FLD_{med} = 0,3/2,47 = 0,12

STATO DI PROGETTO (il calcolo non tiene conto delle schermature dinamiche)

FLD_m = 1,2 %

U [-] = FLD_{min}/FLD_{med} = 0,5/1,12 = 0,45



◀ Figura 8.19

Viste assometriche dell'aula presa in esame prima e dopo il progetto
© Elaborazione grafica dell'autore

per verificare che vengano garantite condizioni di illuminazione accettabili per tutta la superficie dell'ambiente analizzato, tenendo conto inoltre dell'azione delle schermature dinamiche. Al fine di garantire sufficienti livelli di illuminazione naturale, bisogna assicurare valori di sDA superiori al 55%: come si può evincere dal confronto tra lo stato di fatto e lo stato di progetto, si riscontra un netto miglioramento della distribuzione delle luce naturale in ambiente dopo l'intervento, passando da valori troppo bassi per lo stato di fatto (sDA = 45%) a valori più che soddisfacenti per lo stato di progetto (sDA = 58%) [Figura 8.22]. Tale miglioramento è reso possibile grazie all'azione combinata dei light shelves (che riflettono la luce verso le zone più profonde dell'aula) e dei frangisole orientabili esterni, che garantiscono un'adeguata protezione dall'abbagliamento e dalla radiazione termica senza compromettere

troppo l'ingresso della luce naturale in ambiente. La presenza dello sporto esterno, infatti, assicura da solo una corretta protezione dall'abbagliamento nelle mezze stagioni e nei mesi estivi (cui corrispondono altezze solari maggiori) riducendo drasticamente la percentuale di tempo in cui viene utilizzato lo stato più oscurante dei frangisole esterni (lamelle inclinate di 60°) a favore di quello meno oscurante (lamelle in posizione orizzontale), massimizzando dunque l'ingresso della luce naturale in ambiente rispetto allo stato di fatto [Figura 8.23].

> Figura 8.23

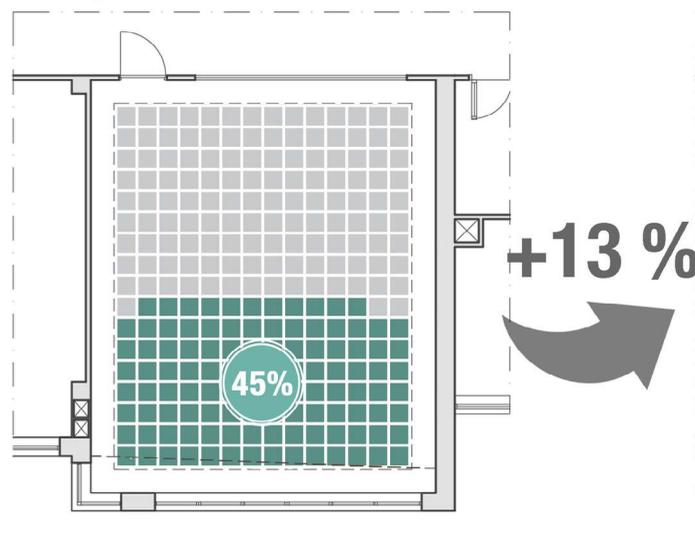
Attivazione dei diversi stati delle schermature (dal più oscurante al meno oscurante) al variare delle stagioni, dei mesi e delle ore di utilizzo dell'ambiente: confronto tra stato di fatto e progetto
© Elaborazione grafica dell'autore

✓ Figura 8.22

Rappresentazione della sDA (spatial Daylight Autonomy): confronto tra i valori ottenuti per lo stato di fatto (a sinistra) e lo stato di progetto (a destra)
© Elaborazione grafica dell'autore

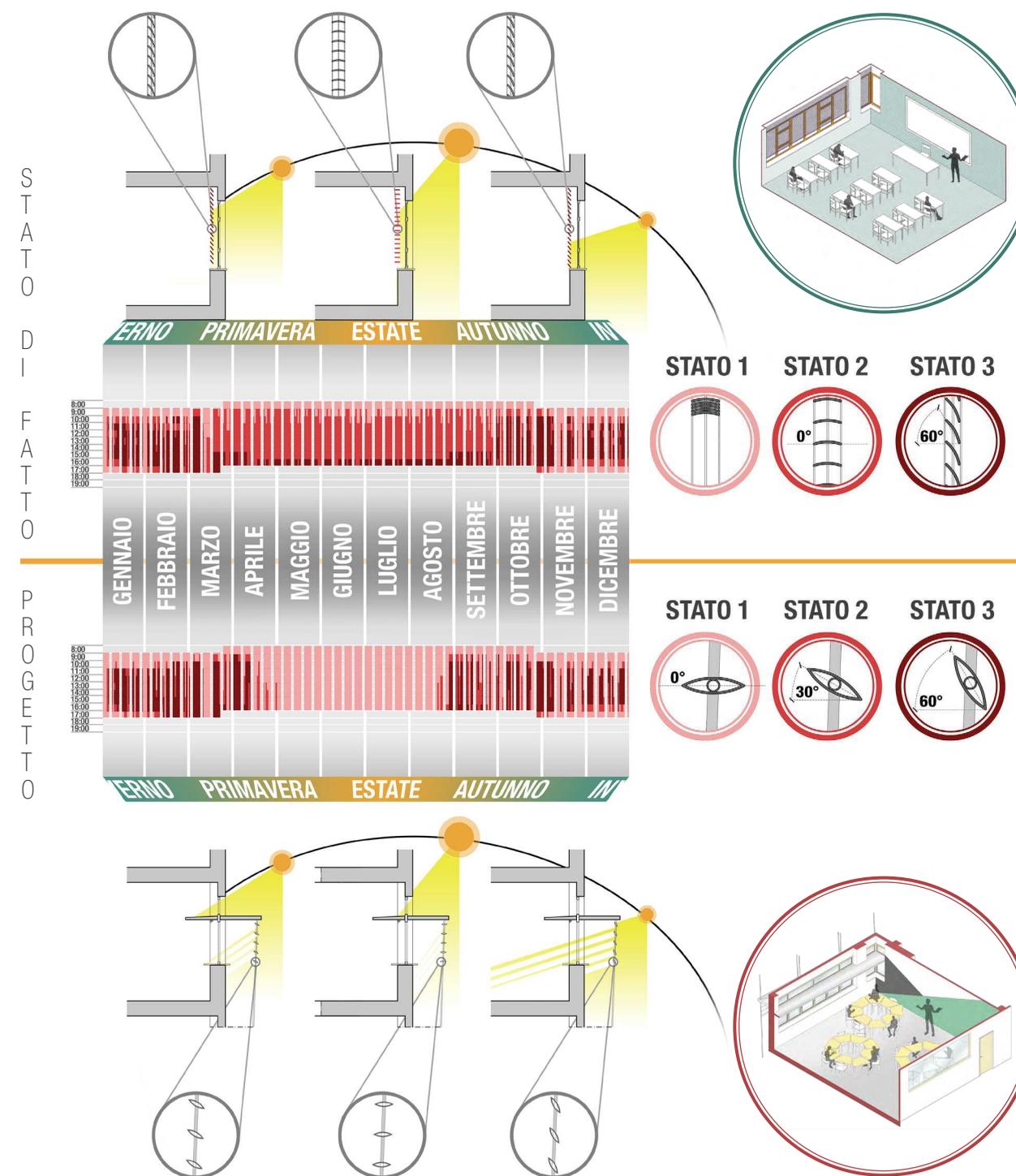
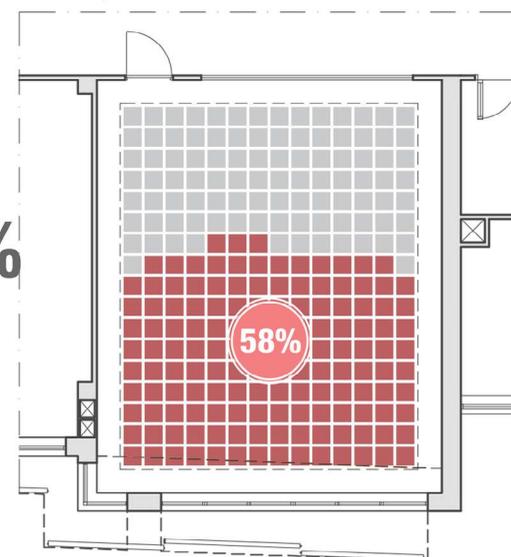
STATO DI FATTO (dynamic shading)

sDA_{300, 50%} = 45 %

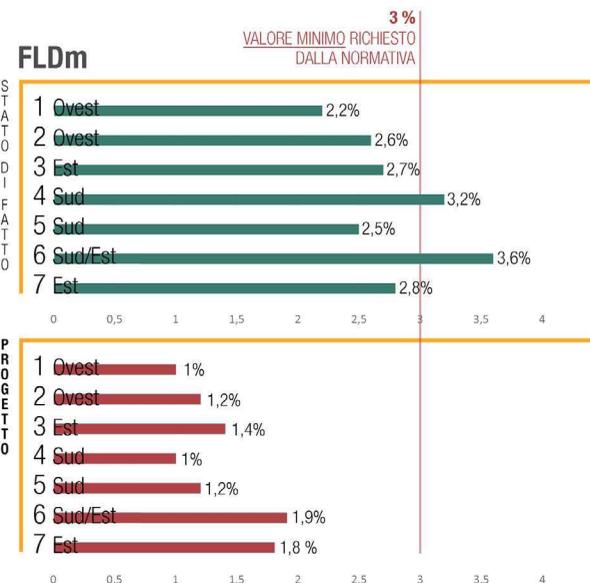
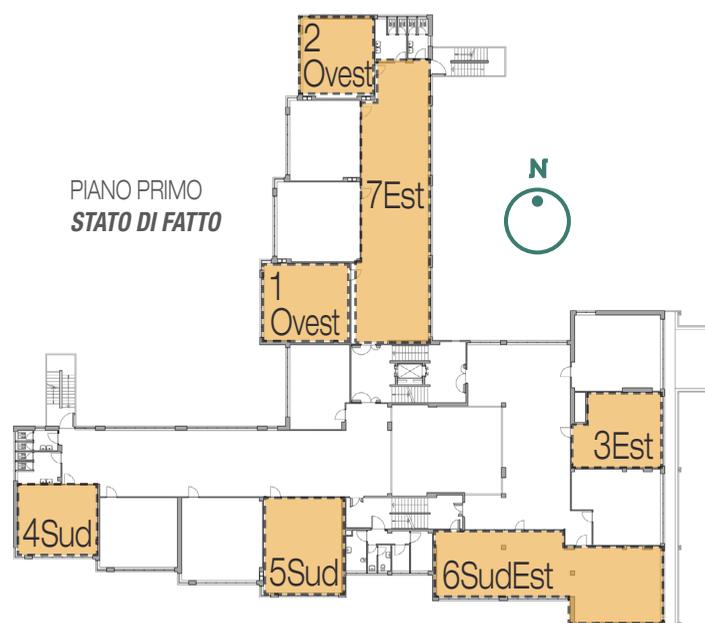


STATO DI PROGETTO (dynamic shading)

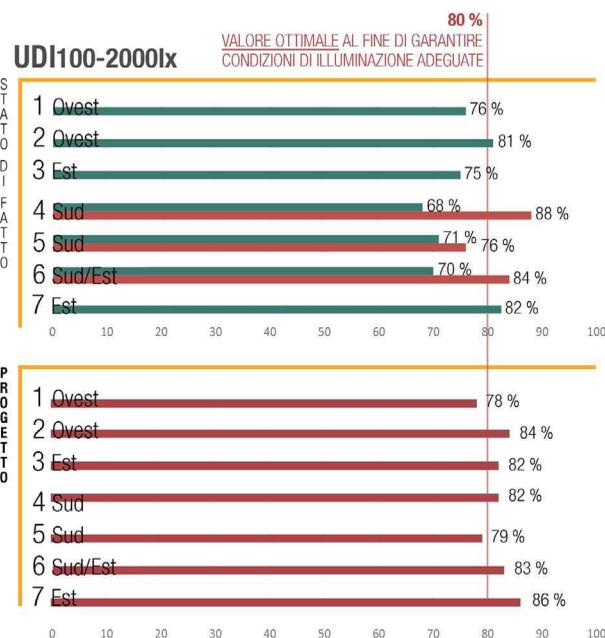
sDA_{300, 50%} = 58 %



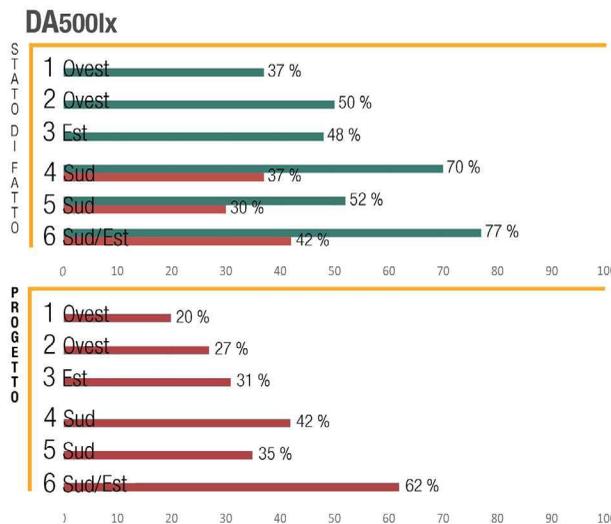
STATO DI FATTO E STATO DI PROGETTO: CONFRONTO TRA TUTTI I PARAMETRI ANALIZZATI PER CIASCUN AMBIENTE



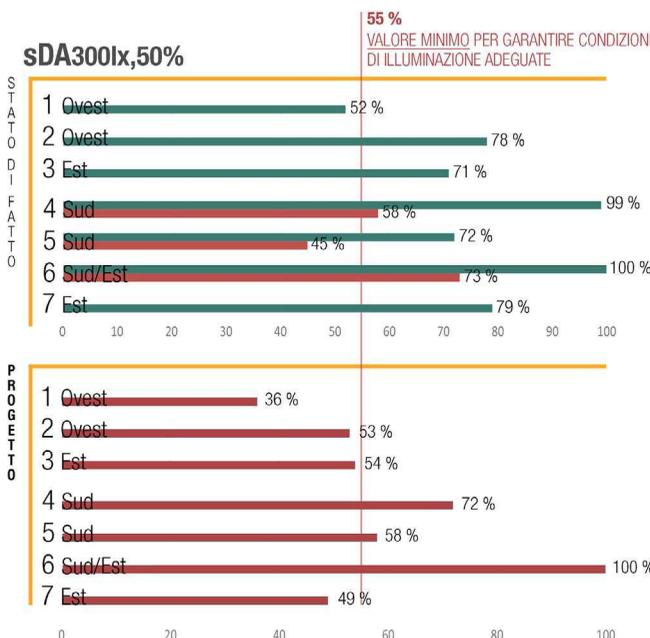
Rispetto allo stato di fatto si riscontrano valori decisamente più bassi e inferiori al 3%, ne consegue tuttavia una migliore uniformità di illuminazione con una netta riduzione dei picchi in prossimità della parete finestrata (riducendo il rischio di abbagliamento) e un lieve innalzamento dei valori nelle zone più lontane dalle aperture.



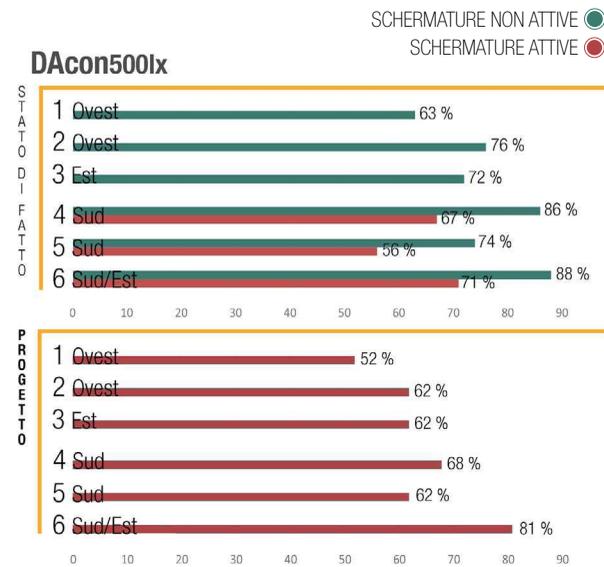
Definisce la percentuale di tempo nell'arco di un anno in cui la disponibilità di luce naturale risulta "utile" allo svolgimento del compito visivo, mantenendosi entro valori di illuminamento né troppo bassi (<100 lx) né troppo alti (>2500 lx). In generale si riscontrano valori decisamente più soddisfacenti per lo stato di progetto (UDI ≈ 80%); in ragione della migliore uniformità di illuminazione e della riduzione dei picchi di illuminamento in prossimità della finestra.



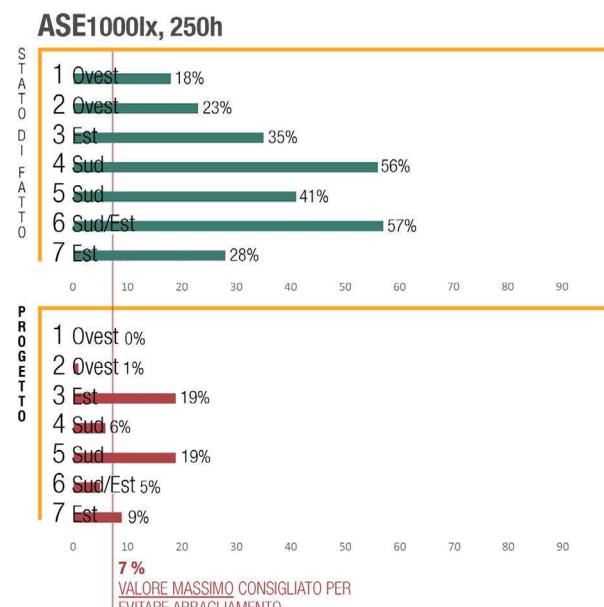
Definisce la percentuale di tempo nell'arco di un anno in cui la sola luce naturale è in grado di garantire il livello minimo di illuminamento definito secondo normativa (500 lx). Si riscontrano valori accettabili per buona parte degli ambienti ad eccezione delle aule ad ovest, in cui light shelves non funzionano a pieno regime per via dell'esposizione poco favorevole. Per le aule esposte a sud si vince al contrario un considerevole innalzamento dei valori (schermature attive)



Definisce la percentuale di spazio in cui viene garantito un livello minimo di illuminamento (300 lx) per una frazione specifica di tempo (50% delle ore totali di utilizzo dell'ambiente). Si riscontrano valori superiori o uguali al 55% (valore minimo consigliato per garantire adeguate condizioni di illuminazione naturale) per tutti gli ambienti, fanno eccezione solo due aule esposte ad est e ad ovest. Per quanto concerne le aule esposte a sud, si riscontra un netto innalzamento dei valori quando le schermature sono utilizzate, che denota una migliore uniformità di illuminamento rispetto allo stato di fatto.

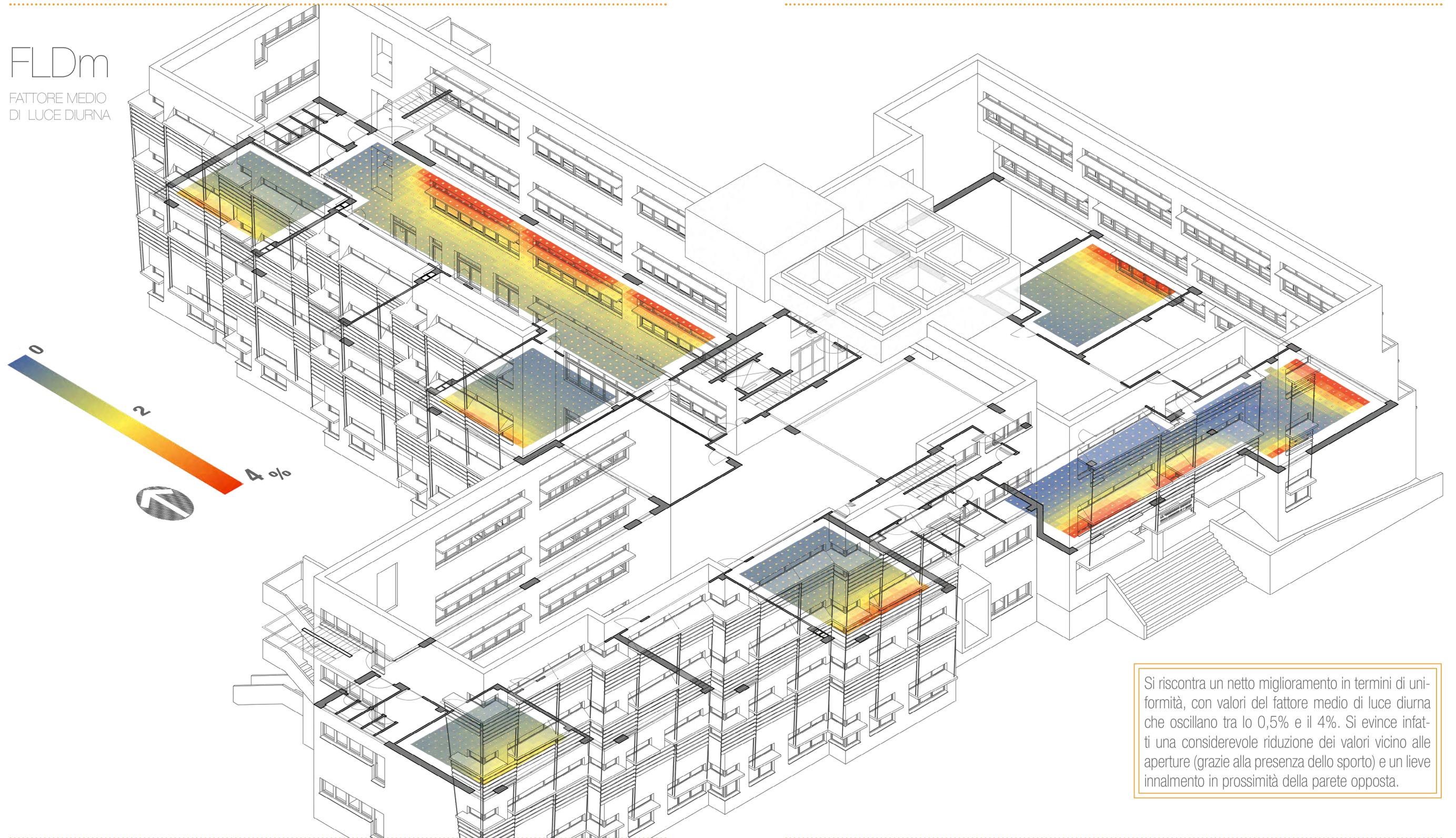


Rappresenta il contributo percentuale che la sola luce naturale è in grado di fornire al fine di garantire il raggiungimento del valore minimo di illuminamento richiesto dalla normativa (500lx). Si riscontrano valori accettabili per buona parte degli ambienti e valori decisamente soddisfacenti per le aule esposte a sud, nelle quali si ha un funzionamento ottimale dei light shelves grazie all'esposizione favorevole.



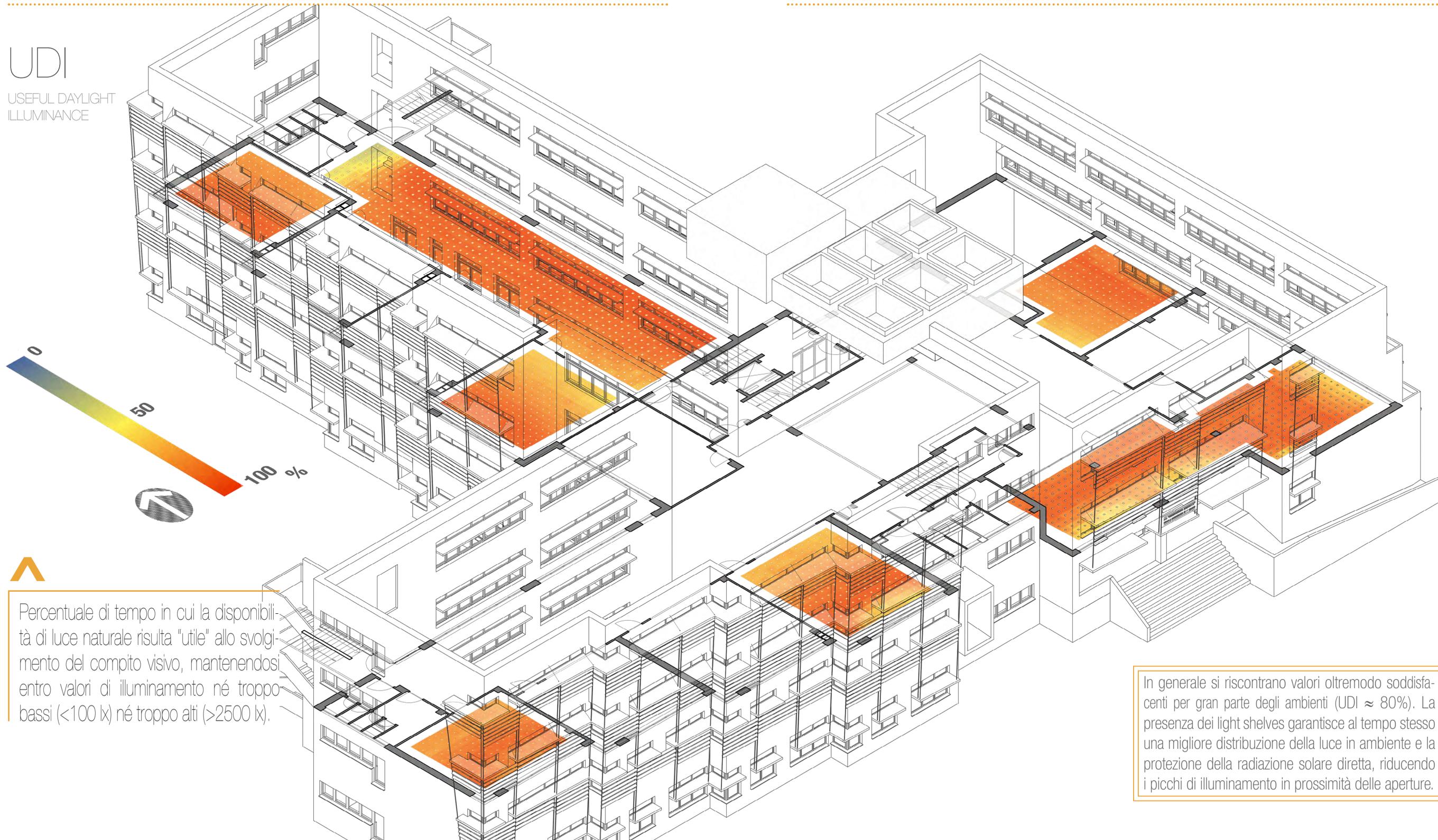
Definisce la percentuale di spazio in cui viene superato un determinato valore di illuminamento (1000 lx) considerando una frazione specifica delle ore di utilizzo dell'ambiente (250h). Si registrano valori nettamente più bassi rispetto allo stato di fatto, mantenendosi entro la soglia minima (ASE < 7%) per buona parte degli ambienti. Ciò consente di ridurre in modo considerevole il rischio di fenomeni di abbagliamento.

FLDm
FATTORE MEDIO
DI LUCE DIURNA



Si riscontra un netto miglioramento in termini di uniformità, con valori del fattore medio di luce diurna che oscillano tra lo 0,5% e il 4%. Si evince infatti una considerevole riduzione dei valori vicino alle aperture (grazie alla presenza dello sporto) e un lieve innalzamento in prossimità della parete opposta.

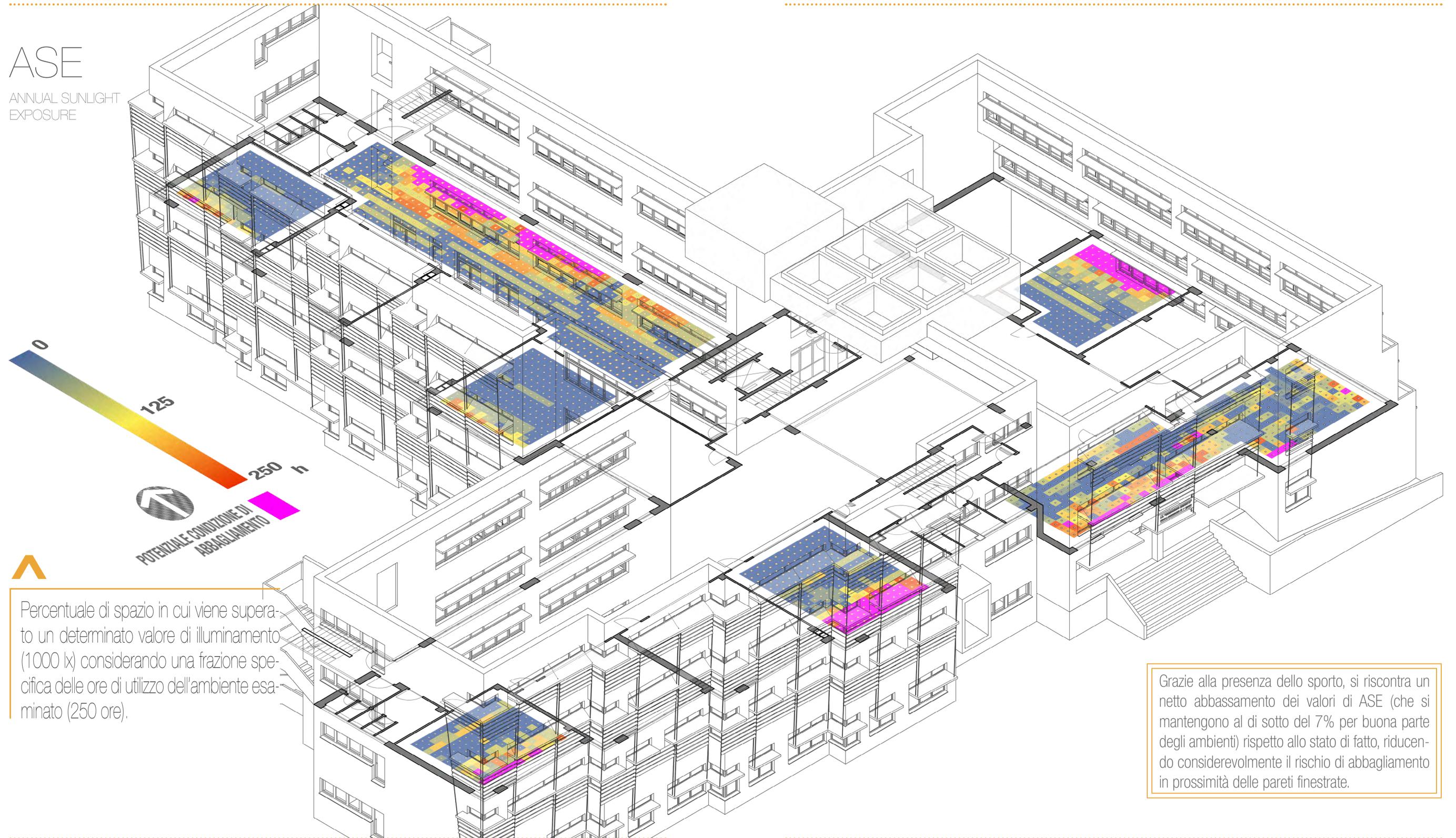
UDI

USEFUL DAYLIGHT
ILLUMINANCE

Percentuale di tempo in cui la disponibilità di luce naturale risulta "utile" allo svolgimento del compito visivo, mantenendosi entro valori di illuminamento né troppo bassi (<100 lx) né troppo alti (>2500 lx).

In generale si riscontrano valori oltremodo soddisfacenti per gran parte degli ambienti (UDI \approx 80%). La presenza dei light shelves garantisce al tempo stesso una migliore distribuzione della luce in ambiente e la protezione della radiazione solare diretta, riducendo i picchi di illuminamento in prossimità delle aperture.

ASE

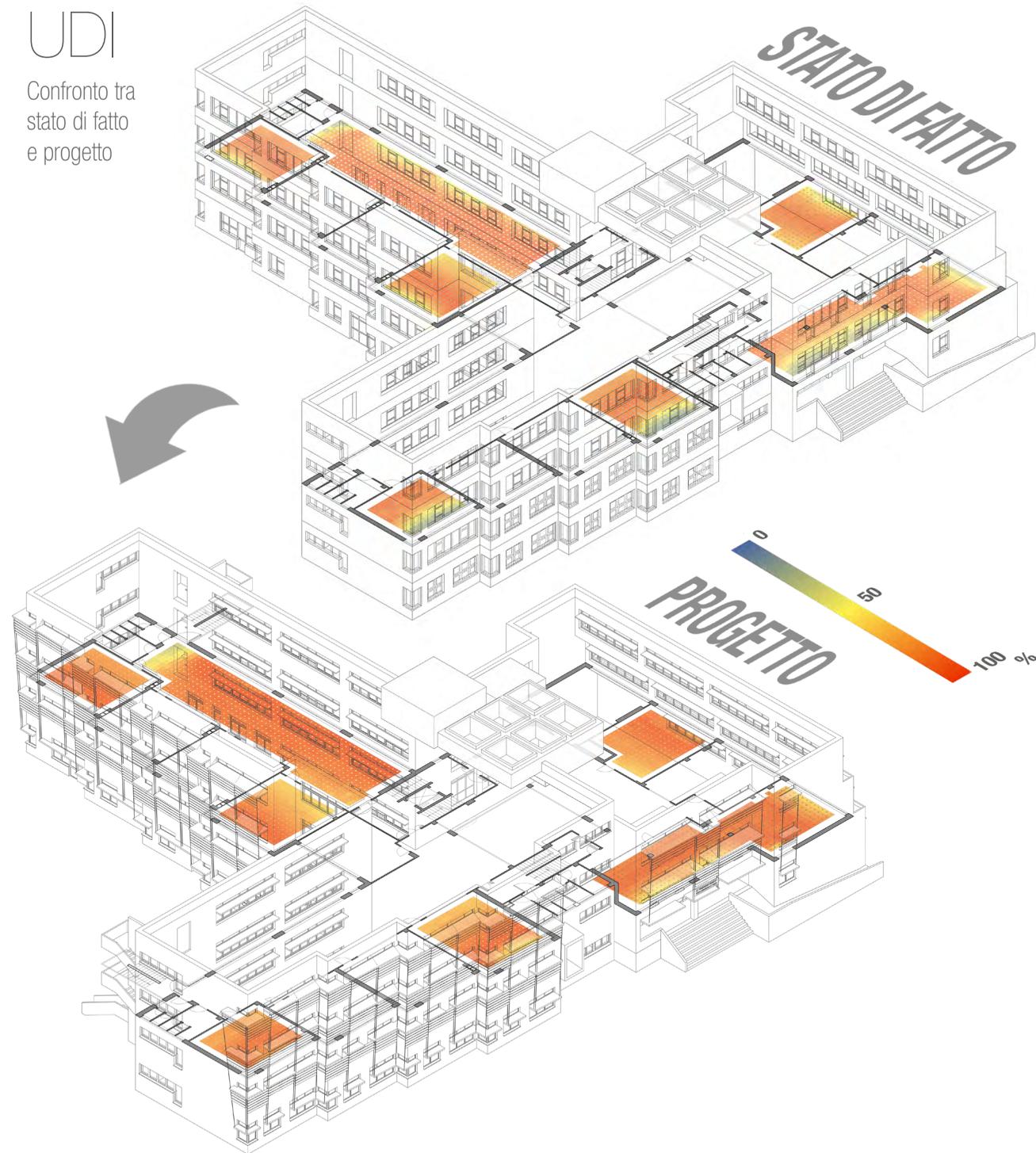
ANNUAL SUNLIGHT
EXPOSURE

Percentuale di spazio in cui viene superato un determinato valore di illuminamento (1000 lx) considerando una frazione specifica delle ore di utilizzo dell'ambiente esaminato (250 ore).

Grazie alla presenza dello sporto, si riscontra un netto abbassamento dei valori di ASE (che si mantengono al di sotto del 7% per buona parte degli ambienti) rispetto allo stato di fatto, riducendo considerevolmente il rischio di abbagliamento in prossimità delle pareti finestrate.

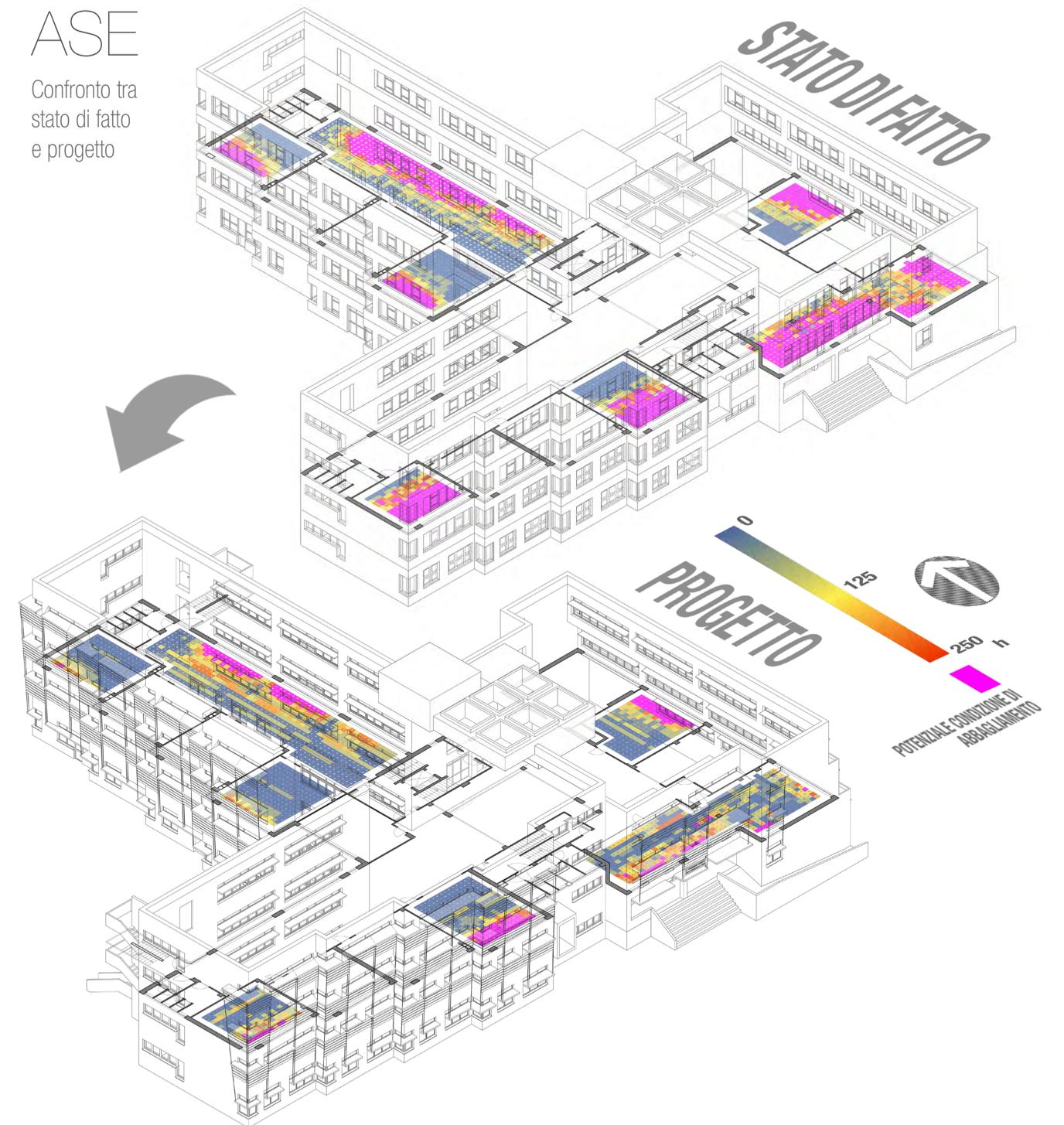
UDI

Confronto tra stato di fatto e progetto



ASE

Confronto tra stato di fatto e progetto



CONCLUSIONI

Il fine ultimo di questo lavoro di tesi è quello di proporre un intervento di riqualificazione dell'involucro trasparente per l'Istituto Bernardino Drovetti di Torino, con l'intento di migliorarne le prestazioni energetiche e di garantire adeguati livelli di comfort visivo negli ambienti indoor.

Trattandosi di una scuola, i cui principali fruitori sono i bambini, la proposta progettuale qui presentata si propone inoltre di rinnovare e vivacizzare l'aspetto dell'edificio, con un nuovo disegno di facciata che integra l'uso del colore ai nuovi sistemi di illuminazione naturale adoperati.

Al fine di perseguire tali obiettivi, la fase di progettazione è stata preceduta da un'accurata fase di ricerca sugli aspetti teorici e sulla recente evoluzione del sistema scolastico italiano, analizzandone le nuove frontiere della didattica innovativa e le principali strategie adottate

per il risparmio energetico e il comfort visivo. Tale fase ha assunto un importante ruolo per la costruzione di un personale pensiero critico sui temi trattati, fondamentale per poter elaborare una proposta progettuale coerente ed adeguata. In concomitanza con gli approfondimenti teorici, si è proceduto a definire nel dettaglio le attuali prestazioni energetiche dell'involucro trasparente e le condizioni di illuminazione naturale degli ambienti più rappresentativi della scuola, grazie all'ausilio e al supporto di software di calcolo computerizzati.

L'analisi dello stato di fatto è stata fondamentale ai fini dell'elaborazione della proposta progettuale, in quanto ha messo in evidenza le principali criticità sulle quali intervenire.

Sulla base della lettura dello stato di fatto e delle criticità riscontrate, è stato redatto un quadro esigenziale in cui vengono riportati i requisiti

minimi e gli obiettivi generali da perseguire in un'ottica di comfort visivo e risparmio energetico. Sulla scia di tali obiettivi, viene dunque presentata una proposta di riqualificazione dell'involucro trasparente e la progettazione di una nuova struttura esterna direttamente ancorata alla facciata. Tale struttura, realizzata in acciaio e rivestita con lastre di lamiera zincata, è costituita da un sistema di light shelves e frangisole orientabili motorizzati; che contribuiscono a rendere più uniforme la distribuzione della luce negli ambienti, al controllo dei fenomeni di abbagliamento e a fornire un'opportuna protezione dalla radiazione termica nei mesi estivi, garantendo al tempo stesso un'adeguata visione verso l'esterno.

Dalle simulazioni di calcolo effettuate, sebbene si riscontri un considerevole abbassamento dei valori del fattore di luce diurna rispetto allo stato di fatto, si evince un netto miglioramento in termini di uniformità e protezione dall'abbagliamento: i valori di UDI, sDA, ASE e DGP rientrano infatti entro i limiti consigliati per quasi tutti gli ambienti analizzati. I risultati ottenuti danno prova dei molteplici limiti del fattore di luce diurna e di come tale parametro non sia da solo sufficiente per determinare la qualità dell'abbagliamento luminoso, in quanto non tiene conto della radiazione solare diretta, dell'orientamento dell'ambiente, dell'alternarsi delle stagioni e della presenza di eventuali schermature mobili. Per quanto concerne le prestazioni energetiche del nuovo involucro trasparente, vengono rispettati per tutti i serramenti i valori limite di trasmittanza termica ($U_w \leq 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$) e del fattore di trasmissione totale di energia solare

($g_{gl+sh} \leq 0,35$), definiti dal *D.M. 11/01/2017* in relazione alla zona climatica di appartenenza dell'edificio, stimando una riduzione delle dispersioni termiche attraverso l'involucro trasparente fino al 68% rispetto allo stato di fatto. In accordo con le finalità e gli obiettivi preposti, tutte le scelte progettuali operate mirano ad ottenere elevate prestazioni in termini di comfort visivo e risparmio energetico. Tuttavia, dal punto di vista della fattibilità economica del progetto, la scelta di impiegare serramenti in alluminio ad alto contenuto tecnologico e di vetri selettivi ad elevate prestazioni potrebbe far lievitare considerevolmente il costo complessivo dell'intervento, scoraggiandone la realizzazione da parte della municipalità. In tal caso, è possibile indirizzare le scelte verso tipologie di componenti meno performanti ma con costi decisamente più contenuti e accessibili.

BIBLIOGRAFIA

TESTI

- [4] LEONARDO TOSI (a cura di), *Fare didattica in spazi flessibili. Progettare, allestire e utilizzare ambienti di apprendimento*, Firenze, Giunti Scuola, 2018.
- [5] SAMUELE BORRI (a cura di), *L'aula si è rotta: un libro su come cambia l'edilizia scolastica in Europa e nel mondo*, Firenze, Ediguida, 2018.
- [6] GIOVANNI BIONDI, SAMUELE BORRI, LEONARDO TOSI, *Dall'aula all'ambiente di apprendimento*, Firenze, Altra-linea Edizioni, 2016.
- [15] DOMENICO PEPE, *Scuole ecocompatibili: dal nido per l'infanzia all'Istituto superiore*, Roma, Dei editore, 2009.
- [25] LISA GELFAND, *Sustainable school architecture*, Hoboken, Wiley, 2010.
- [26] ELEONORA OLEOTTO, *Edifici scolastici ecocompatibili – progetti per una scuola sostenibile*, EdicomEdizioni, Monfalcone (GO), 2006.
- [27] MAURIZIO SOLE, MANUELA CRESPI, *Edilizia scolastica*, Roma, Dei editore, 2014.
- [28] RENATO IOVINO, FLAVIA FASCIA, GIAN PIERO LIGNOLA, *Edilizia scolastica: riqualificazione funzionale ed energetica: messa in sicurezza, adeguamento antisismico*, Palermo, Dario Flaccovio, 2014.
- [29] GIORGIO PONTI, *La scuola intelligente: dall'edilizia scolastica all'architettura educativa: strumenti ed esempi per la programmazione, la progettazione e la realizzazione di interventi di ristrutturazione, di riqualificazione ed ex-novo*, Palermo, Grafill, 2014.
- [30] CHIARA AGHEMO, VALERIO LO VERSO, *Guida alla progettazione dell'illuminazione naturale*, AIDI, 2003.
- [31] NICK BAKER, KOEN STEEMERS, *Daylight design of buildings*, New York, Earthscan, 2017.
- [32] PETER TREGENZA, MICHAEL WILSON, *DAYLIGHTING Architecture and lighting design*, Abingdon, Routledge, 2011.
- [35] GIUSEPPINA ALCAMO, MARCO SALA, *Illuminazione naturale e simulazioni energetiche*, Firenze, Alinea editrice, 2007.
- [36] BARBARA GHERRI, *Assessment of daylight performance in buildings: methods and design strategies*, Southampton, Wit Press, 2015.
- [43] GIOVANNA MOTTURA, ALESSANDRA PENNISI, *Serramenti e schermature solari*, Santarcangelo di Romagna (RM), Maggioli editore, 2014.
- [44] GIANFRANCO CELLAI, *Serramenti e schermature per la riqualificazione energetica ed ambientale: criteri per la riqualificazione energetica ed ambientale*, Roma, EPC editore, 2013.

- [45] STEFANO AGNOLI, MICHELE ZINZI, *Involucro trasparente*, Palermo, Dario Flaccovio, 2013.
- [46] GIOVANNI TISI, *Serramenti e sistemi oscuranti*, Palermo, Flaccovio, 2011.
- [48] MONICA CANNAVIELLO, *Prestazioni dell'involucro in regime estivo. Criteri per la riqualificazione energetica*, Firenze, Alinea Editrice, 2011.
- [50] RENATO SUZZANI, *Manuale del serramentista in alluminio*, Milano, Tecniche Nuove, 2008.
- [51] GIOVANNA MOTTURA, ALESSANDRA PENNISI, *Progettare sistemi di protezione solare degli edifici: controllo del soleggiamento e microclima; sistemi di oscuramento esterni ed interni; schermature trasparenti*, Rimini, Maggioli editore, 2006.
- [52] MARCO SALA, *Schermature solari*, Firenze, Alinea editrice, 2000.
- [57] FABIO FANTOZZI, GIANPAOLO SCATIZZI, FRANCESCA VENTURELLI, *La certificazione energetica e ambientale Leed. Guida ai principi*, Milano, Hoepli, 2017.

ARTICOLI

- [11] ANNA PELLEGRINO, SILVIA CAMMARANO, VALERIA SAVIO, *Daylighting for Green Schools: A resource for indoor quality and energy efficiency in educational environments*, Energy Procedia, Elsevier, 2015.
- [34] SHOUB MA'BDEH, BARAA AL-KHATATBEH, *Daylighting retrofit methods as a tool for enhancing daylight provision in existing educational spaces - A Case Study*, Buildings 2019, Volume 9 (7).
- [37] LUIGI GIOVANNINI, FABIO FAVOINO, VALERIO L.M. LO VERSO, ANNA PELLEGRINO, VALENTINA SERRA, *A simplified approach for the annual and spatial evaluation of the comfort classes of daylight glare using vertical illuminances*, Buildings 2018, Volume 8 (171).
- [38] SIAN KLEINDIENST, MARILYNE ANDERSEN, *The adaptation of Daylight Glare Probability to dynamic metrics in a computational setting*, paper presented at 11th European Lighting Conference, Istanbul, September 2009.
- [39] YASHA J. GROBMAN, GUY AUSTERN, YANIV HATIEL, ISAAC GUEDI CAPELUTO, *Evaluating the influence of varied external shading elements on internal daylight illuminances*, Buildings 2020, Volume 10 (22).
- [40] MARIA BEATRIZ PIDERIT MORENO, CONSTANZA YAÑEZ LABARCA, *Methodology for assessing daylighting design strategies in classroom with a Climate-Based method*, Sustainability 2015, Volume 7, pp. 880-897.
- [42] VINCENZO COSTANZO, GIANPIERO EVOLA, LUIGI MARLETTA, *A review of daylighting strategies in schools: state of the art and expected future trends*, Buildings 2017, Volume 7 (41).
- [53] AHMAD ELTAWEEL, YUEHONG SU, *Evaluation of suitability of a parametrically controlled louvers for various orientations throughout a year comparing to an existing case*, Buildings 2017, Volume 7 (4).
- [55] ANTONIS KONTADAKIS, ARIS TSANGRASSOULIS, LAMBROS DOULOS, STELIOS ZEREFOS, *A review of light shelf designs for daylight environments*, Sustainability 2018, Volume 10 (71).

[56] MOHAMMAD HOSSEIN MOAZZENI, ZAHRA GHIABAKLOU, *Investigating the influence of light shelf geometry parameters on daylight performance and visual comfort, a case study of educational space in tehran, iran*, Buildings 2016, Volume 6 (26).

[69] CLOTILDE PIERSON, JAN WIENOLD, MAGALI BODART, *Daylight discomfort glare evaluation with evalglare: influence of parameters and methods on the accuracy of discomfort glare prediction*, Buildings 2018, Volume 8 (94).

TESI DI LAUREA

/ IRIS BALDIN, *Efficienza energetica degli edifici e serramenti in alluminio: analisi delle criticità prestazionali e individuazione di soluzioni coerenti per la riduzione del ponte termico serramento-parete*, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, a.a. 2009/2010, rel. Valentina Serra, Gabriella Peretti.

/ VANESSA BENEDETTO, *Comunicare la sostenibilità: Smart School, la scuola nella città del futuro*, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, a.a. 2013/2014, rel. Orio De Paoli, Danila Voghera, Anna Pellegrino.

/ SHAHROM FARABI, *Progetto Green School: valutazione del comfort visivo negli edifici scolastici attraverso un'analisi oggettiva e soggettiva*, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, a.a. 2014/2015, rel. Anna Pellegrino, Silvia Cammarano.

/ FLORIANA IMPERIALE, *Luce e spazio nei nuovi ambienti di apprendimento. Una proposta progettuale per l'Istituto Drovetti di Torino*, Politecnico di Torino, a.a. 2017/2018, rel. Anna Pellegrino, Valeria Minucciani.

/ ILVA PINNA, *Illuminazione e sostenibilità ambientale degli edifici scolastici: potenzialità e limiti di un approccio BIM*, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, a.a. 2014/2015, rel. Anna Pellegrino, Anna Osello, Silvia Cammarano.

/ VALERIA SAVIO, *Progetto Green School: la luce naturale come risorsa per il comfort visivo e l'efficienza energetica: Istituto Maxwell*, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, a.a. 2013/2014, rel. Anna Pellegrino, Silvia Cammarano.

/ ELISA SIROMBO, *La ventilazione naturale nel progetto di architettura: il caso dell'edilizia scolastica*, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, a.a. 2009/2010, rel. Marco Filippi.

/ ELENA ADINA CARLOTTA SUOZZI, *I serramenti, occhi della casa e volto della città: ipotesi di rifunionalizzazione in un edificio per cohousing e coworking*, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, a.a. 2011/2012, rel. Orio De Paoli, Elena Montacchini, Danila Voghera.

/ CHIARA TAMBURINI, *Il quartiere si incontra in biblioteca: progetto di una biblioteca pubblica a Torino basato su criteri di accessibilità e sullo studio dell'illuminazione naturale*, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, a.a. 2009/2010, rel. Michele Bonino, Anna Pellegrino, Valerio Lo Verso.

DISPENSE

[33] Materiale didattico: ANNA PELLEGRINO, *Il progetto della luce naturale*, Laboratorio disciplinare di progettazione fisico tecnica dell'edificio, a.a. 2018/2019, Politecnico di Torino.

[41] Materiale didattico: ANNA PELLEGRINO (lezione di E. Fabrizio), *Il clima esterno: bilanci e variabili meteorologiche*, Atelier il progetto sostenibile di architettura, a.a. 2016/2017, Politecnico di Torino.

[47] Materiale didattico: VALENTINA SERRA, *L'elemento di involucro trasparente*, corso di Fisica Tecnica Ambientale, a.a. 2014/2015, Politecnico di Torino.

[49] Materiale didattico: ANNA PELLEGRINO (presentazione a cura di Lorenza Bianco), *Prestazioni fisico tecniche dell'involucro trasparente: soluzioni tradizionali e innovative*, Atelier il progetto sostenibile di architettura, a.a. 2016/2017, Politecnico di Torino.

[54] Materiale didattico: ANNA PELLEGRINO, *Sistemi di illuminazione naturale*, Laboratorio disciplinare di progettazione fisico tecnica dell'edificio, a.a. 2018/2019, Politecnico di Torino.

[67] Materiale didattico: ANNA PELLEGRINO, *La normativa tecnica UNI EN 12464-1: 2011*, Laboratorio disciplinare di progettazione fisico tecnica dell'edificio, a.a. 2018/2019, Politecnico di Torino.

[81] Materiale didattico: ALFONSO CAPOZZOLI, *Il carico termico invernale di progetto*, Atelier finale di progettazione, a.a. 2017/2018, Politecnico di Torino.

NORME TECNICHE

[61] UNI EN ISO 10077-1: 2018_Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti - Calcolo della trasmittanza termica - Parte 1.

[62] UNI TS 11300-1:2014_Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.

[65] UNI 10840: 2007_Luce e illuminazione - Locali scolastici - Criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale.

[66] UNI 12464: 2011_Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1

[68] CEN EN 17037: 2018_Daylight in buildings.

LEGISLAZIONE

[1] Decreto Ministeriale 11/04/2013_linee guida del Miur per progettare l'edilizia scolastica

[63] Decreto Ministeriale 26/06/2015_appendice B: requisiti minimi di trasmittanza per i serramenti esterni

[64] Decreto Ministeriale 11/01/2017_ adozione dei criteri ambientali minimi per l'edilizia

PROTOCOLLI DI CERTIFICAZIONE AMBIENTALE

- [58] *LEED 2016 v4 for building design and construction*
- [59] *LEED 2009 Italia per Nuove Costruzioni e Ristrutturazioni*
- [60] *LEED for School 2009*

CATALOGHI

- [77] *Wicona*, Schede descrittive sistemi, Brochure online 2018.
- [78] *Wicona*, Sistemi finestra e ferramenta, Brochure online 2018.
- [79] *AGC Yourglass*, Stopray – Ipasol, Sunergy – Stopsol. High performance solar control glazing, Brochure online 2019.
- [80] *Reynaers aluminium*, BS 100/30/20: sistemi frangisole in alluminio, Brochure online 2017.

SITOGRAFIA

- [2] <http://www.indire.it/progetto/architetture-scolastiche/> (ultima consultazione 12/07/2020)
- [3] <http://www.indire.it/progetto/architetture-scolastiche/norme-tecniche/> (ultima consultazione 12/07/2020)
- [7] <http://www.indire.it/quandospazioinsegna/scuole/vitra/> (ultima consultazione 12/07/2020)
- [8] <http://www.indire.it/quandospazioinsegna/scuole/4het-gymnasium/> (ultima consultazione 12/07/2020)
- [9] <http://www.indire.it/quandospazioinsegna/scuole/4het-gymnasium/> (ultima consultazione 12/07/2020)
- [10] <https://www.ingenio-web.it/27050-gli-edifici-scolastici-piu-green-di-italia-ambienti-per-il-futuro-delleducazione> (ultima consultazione 12/07/2020)
- [12] <https://www.ediliziascolastica.it/eventi/scuola-innova-secondo-forum-sulledilizia-scolastica/> (ultima consultazione 12/07/2020)
- [13] https://www.archiportale.com/news/2014/10/architettura/agibile-e-bella-architetture-di-qualita-per-la-qualita-delle-scuole_42063_3.html (ultima consultazione 12/07/2020)

- [14] <https://www.torinofascuola.it/> (ultima consultazione 12/07/2020)
- [16] <https://www.ediliziascolastica.it/progetti/scuola-dellinfanzia-pietro-nenni-bagnolo-bs/> (ultima consultazione 12/07/2020)
- [17] <https://www.impresedilnews.it/10-scuole-da-copiare-esempi-virtuosi-di-edilizia-sostenibile-e-antisismica/> (ultima consultazione 12/07/2020)
- [18] <http://www.colucciandpartners.it/portfolio/scuola-dinfanzia-di-cascina-pisa/> (ultima consultazione 12/07/2020)
- [19] <http://www.nicolaguglielmi.it/index.php> (ultima consultazione 12/07/2020)
- [20] <https://www.agenziacasaclima.it/it/scuola-media-avivenza--16-6416.html> (ultima consultazione 12/07/2020)
- [21] https://www.edilportale.com/aziende/mars-architetti_117723.html (ultima consultazione 12/07/2020)
- [22] <https://www.ediliziascolastica.it/progetti/scuola-materna-sandro-pertini-bisceglie/> (ultima consultazione 12/07/2020)
- [23] <https://andria.news24.city/2017/10/14/scuola-innova-lasilo-nido-gabelli-gli-istituti-ecosostenibili-ditalia/> (ultima consultazione 12/07/2020)
- [24] https://www.verderosa.it/portfolio_page/scuola-dellinfanzia-a-faiano/ (ultima consultazione 12/07/2020)
- [70] <https://www.lastampa.it/torino/quartieri/cenisia/2016/02/12/news/troppo-bullismo-e-pochi-iscritti-chiude-la-drovetti-1.36563538> (ultima consultazione 12/07/2020)
- [71] <https://www.lastampa.it/torino/2014/10/31/news/in-fuga-dalla-drovetti-e-nelle-mani-dei-bulli-1.35608318> (ultima consultazione 12/07/2020)
- [72] <http://www.torinotoday.it/scuola/nuovo-progetto-drovetti.html> (ultima consultazione 12/07/2020)
- [73] http://www.comune.torino.it/iter/servizi/laboratorio_citta_sostenibile/index.shtml (ultima consultazione 12/07/2020)
- [74] <https://www.torinocitylab.it/it/experiment-to/edulab> (ultima consultazione 12/07/2020)
- [75] <https://www.torinocitylab.it/it/submit-to/challenge/educational-lab> (ultima consultazione 12/07/2020)
- [76] <https://www.agc-yourglass.com/configurator/app/request> (ultima consultazione 12/07/2020)

ALLEGATO 1 STATO DI FATTO: caratteristiche del vetro singolo

© <https://www.agc-yourglass.com/configurator/app/request>

AGC Your Glass

La tua composizione:

4 mm Planibel Clearlite

Note personali:

\$propertyEntry.value 15-04-2019

LUCE

Trasmissione	90
Riflessione	8

ENERGIA

Fattore solare	88
Riflessione	8

CARATTERISTICHE LUMINOSE EN 410

Trasmissione luminosa - tv (%)	90
Riflessione luminosa - pv (%)	8
Riflessione interna - pvi (%)	8
Indice di resa dei colori - RD65 - Ra (%)	99

CARATTERISTICHE ENERGETICHE EN 410 ISO 9050

valore g - g (%)	88	88
Riflessione energetica - pe (%)	8	8
Trasmissione energetica diretta - te (%)	87	86
Assorbimento energetico - ae (%)	5	6
Coefficiente di shading - SC	1.01	1.01
Trasmissione dei raggi ultravioletti - UV (%)	70	
Selettività	1.02	1.02

ALTRE CARATTERISTICHE

Resistenza al fuoco - EN 13501-2	NPD
Reazione al fuoco - EN 13501-1	A1
Resistenza ai proiettili - EN 1063	NPD
Resistenza all'effrazione - EN 356	NPD
Resistenza all'impatto del pendolo - EN 12600	NPD

RIDUZIONE ACUSTICA

Isolamento al rumore aereo diretto (Rw (C;Ctr) - EN 12758) - dB	30 (-2; -4) ⁽¹⁾
---	----------------------------

SPESSORE E PESO

Spessore nominale (mm)	4
Peso (kg/m ²)	10

PROPRIETÀ TERMICHE EN 673

Valore Ug [W/(m ² .K)] - Vertical	5.8
--	-----

I dati sono calcolati sulla base delle misure spettrali conformi alle norme EN 410, ISO 9050 (1990). Il coefficiente Ug (in precedenza detto valore k) è calcolato in base alla norma EN 673. La misura dell'emissività è conforme alle norme EN 673 (allegato A) e EN 12898. Il presente documento non valuta il rischio di rottura causato da shock termico. Per i vetri temprati AGC Glass Europe non risponde delle eventuali rotture spontanee causate da inclusioni di Solfuro di Nickel. Heat Soak Test disponibile a richiesta. Le specifiche tecniche ed altri dati sono basati al momento dell'elaborazione del presente documento e sono soggette a cambiamenti - variazioni senza preavviso. AGC Glass Europe non può essere considerata responsabile di eventuali differenze tra i dati inseriti e le reali condizioni del luogo dove verrà installata la vetrata. Il presente documento è solo informativo ed in nessun caso implica l'accettazione d'ordine da parte di AGC Glass Europe. Cfr. anche le condizioni di utilizzo. (1) L'indice acustico fornito, è riferito ad una vetrata avente dimensione 1230 x 1480 mm. (EN ISO 10140-3) installata in particolari condizioni e testata presso uno specifico laboratorio. Le effettive prestazioni in opera possono variare in funzione delle reali dimensioni della vetrata e della stanza, delle sorgenti di rumore etc. La tolleranza sul dato sarà di +/- 1 dB. (2) Valore stimato. L'indice acustico fornito, è riferito ad una vetrata avente dimensione 1.23m x 1.48m, installata in particolari condizioni, presso uno specifico laboratorio. Le effettive prestazioni in opera possono variare in funzione delle reali dimensioni della vetrata e della stanza, delle sorgenti di rumore etc. Quando il valore fornito è stimato, ossia non deriva da un certificato ufficiale rilasciato da un laboratorio specializzato, la tolleranza sul dato sarà di +/- 2 dB.

ALLEGATO 2 STATO DI FATTO: caratteristiche del vetrocamera

© <https://www.agc-yourglass.com/configurator/app/request>

AGC Your Glass

La tua composizione:

4 mm Planibel Clearlite - 10 mm Air 100% - 4 mm Planibel Clearlite

Note personali:

\$propertyEntry.value 15-04-2019

LUCE

Trasmissione	82
Riflessione	15

ENERGIA

Fattore solare	80
Riflessione	14

CARATTERISTICHE LUMINOSE EN 410

Trasmissione luminosa - tv (%)	82
Riflessione luminosa - pv (%)	15
Riflessione interna - pvi (%)	15
Indice di resa dei colori - RD65 - Ra (%)	99

CARATTERISTICHE ENERGETICHE EN 410 ISO 9050

valore g - g (%)	80	79
Riflessione energetica - pe (%)	14	13
Trasmissione energetica diretta - te (%)	76	76
Assorb. energetico vetro 1 - ae (%)	6	6
Assorb. energetico vetro 2 - ae (%)	4	5
Assorbimento energetico - ae (%)	10	11
Coefficiente di shading - SC	0.92	0.91
Trasmissione dei raggi ultravioletti - UV (%)	55	
Selettività	1.03	1.04

ALTRE CARATTERISTICHE

Resistenza al fuoco - EN 13501-2	NPD
Reazione al fuoco - EN 13501-1	NPD
Resistenza ai proiettili - EN 1063	NPD
Resistenza all'effrazione - EN 356	NPD
Resistenza all'impatto del pendolo - EN 12600	NPD / NPD

RIDUZIONE ACUSTICA

Isolamento al rumore aereo diretto (Rw (C;Ctr) - STIMA) - dB	28 (-1; -3) ⁽²⁾
--	----------------------------

SPESSORE E PESO

Spessore nominale (mm)	18
Peso (kg/m ²)	20

PROPRIETÀ TERMICHE EN 673

Valore Ug [W/(m ² .K)] - Vertical	3.0
--	-----

I dati sono calcolati sulla base delle misure spettrali conformi alle norme EN 410, ISO 9050 (1990). Il coefficiente Ug (in precedenza detto valore k) è calcolato in base alla norma EN 673. La misura dell'emissività è conforme alle norme EN 673 (allegato A) e EN 12898. Il presente documento non valuta il rischio di rottura causato da shock termico. Per i vetri temprati AGC Glass Europe non risponde delle eventuali rotture spontanee causate da inclusioni di Solfuro di Nickel. Heat Soak Test disponibile a richiesta. Le specifiche tecniche ed altri dati sono basati al momento dell'elaborazione del presente documento e sono soggette a cambiamenti - variazioni senza preavviso. AGC Glass Europe non può essere considerata responsabile di eventuali differenze tra i dati inseriti e le reali condizioni del luogo dove verrà installata la vetrata. Il presente documento è solo informativo ed in nessun caso implica l'accettazione d'ordine da parte di AGC Glass Europe. Cfr. anche le condizioni di utilizzo. (1) L'indice acustico fornito, è riferito ad una vetrata avente dimensione 1230 x 1480 mm. (EN ISO 10140-3) installata in particolari condizioni e testata presso uno specifico laboratorio. Le effettive prestazioni in opera possono variare in funzione delle reali dimensioni della vetrata e della stanza, delle sorgenti di rumore etc. La tolleranza sul dato sarà di +/- 1 dB. (2) Valore stimato. L'indice acustico fornito, è riferito ad una vetrata avente dimensione 1.23m x 1.48m, installata in particolari condizioni, presso uno specifico laboratorio. Le effettive prestazioni in opera possono variare in funzione delle reali dimensioni della vetrata e della stanza, delle sorgenti di rumore etc. Quando il valore fornito è stimato, ossia non deriva da un certificato ufficiale rilasciato da un laboratorio specializzato, la tolleranza sul dato sarà di +/- 2 dB.



Calcolato da **Mario Giompapa** Calcolato su **10/2/2020** Paese **Italy**
 Nota personale **Vetro stratificato**

① Stratophone 33.1 (3 mm Planibel Clearvision + 0.5 mm Acoustic PVB clear + 3 mm ipasol neutral 70/37 on Clearvision pos.2) Ricotto ② 15 mm Argon 90% ③ 4 mm Planibel Clearvision Ricotto

Simulazione di dati sulle prestazioni in opera del vetro

☀️ Caratteristiche luminose - EN 410

Trasmissione luminosa : τ_v [%]	73
Riflessione luminosa : ρ_v [%]	13
Riflessione luminosa interna : ρ_{vi} [%]	15
Indice di resa dei colori : R_a [%]	97

🔥 Caratteristiche energetiche - EN 410

Fattore solare : g [%]	37
Riflessione energetica esterna : pe [%]	36
Riflessione energetica interna : pei [%]	47
Trasmissione diretta dell'energia : τ_e [%]	36
Assorbimento energetico vetro 1 : ae_1 [%]	28
Assorbimento energetico vetro 2 : ae_2 [%]	0
Assorbimento energetico totale : ae [%]	28
Coefficiente di shading : SC	0.43
Trasmissione dei raggi ultravioletti : τ_{uv} [%]	0
Selettività	1.95

🌡️ Proprietà termiche - EN 673

Trasmittanza termica (verticale) : U_g [W/(m ² .K)]	1.0
--	------------

🔊 Riduzione acustica

Isolamento al rumore aereo diretto - STIMA : R_w (C;Ctr) [dB] ¹	37 (-1;-4)
--	-------------------

🛡️ Caratteristiche di sicurezza

Resistenza al fuoco - EN 13501-2	NPD
Reazione al fuoco - EN 13501-1	NPD
Resistenza ai proiettili - EN 1063	NPD
Resistenza alle effrazioni - EN 356	NPD
Resistenza agli urti (Prova del pendolo) - EN 12600	1B1 / NPD
Resistenza all'esplosione - EN 13541	NPD

📏 Spessore e peso

Spessore nominale : [mm]	25.5
Peso : [kg/m ²]	26

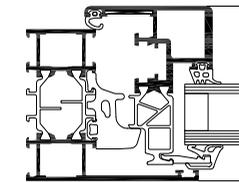
1. Gli indici acustici sono stimati e non testati o calcolati. Si riferiscono a una vetrata avente dimensione 1230 x 1480 mm secondo la norma EN ISO 10140-3. Le effettive prestazioni in opera possono variare in funzione delle reali dimensioni della vetrata e della stanza, del sistema di supporto, del tipo di installazione, dell'ambiente, delle sorgenti di rumore ecc. L'accuratezza degli indici riportati è di +/- 2 dB.

WICONA

WICLINE 65 evo/ WICLINE 75 evo Anta a scomparsa



L'opzione "Anta a scomparsa" nel sistema di finestre in alluminio WICLINE evo presenta uno speciale fermavetro fissato direttamente nella zona del taglio termico. Così facendo, il sistema ottiene una larghezza in vista dei profili estremamente sottile, eccellenti valori di isolamento termico ed un aspetto esteriore privo di fughe in vista. Il rapporto ottimizzato fra telaio e vetro determina ottimi valori di U_w , un'elevata trasmissione luminosa ed una visibilità maggiore.



Risultati dei test / CE product pass conforme ad UNI EN 14351-1:2006+A1:2010

Permeabilità all'aria:	classe 4
Tenuta all'acqua:	E1200
Resistenza al carico di vento:	classe C5 / B5
Isolamento acustico:	R_w (C; C _{tr}) = 47 (-1; -4) dB
Forze di apertura:	classe 1
Capacità di carico dei dispositivi di sicurezza:	conforme
Resistenza meccanica:	classe 4
Cicli di apertura / chiusura:	classe 2 (10.000 cicli)
Resistenza all'impatto:	classe 3
Resistenza alla corrosione della ferramenta:	classe 5
Resistenza all'effrazione:	RC1N, RC2N, RC2, RC3
Assicurazione di qualità:	Certificata secondo ISO 9001:2008
Gestione ambientale:	Certificata secondo ISO 14001



» www.wicona.com

Caratteristiche tecniche:

Tecnologia:

- Sistema a camera multipla ad elevato isolamento termico con design simmetrico e qualità dell'assemblaggio garantita
- Sistema per connessioni d'angolo brevettato, per garantire la stabilità dei telai e delle ante
- Spessore dei tamponamenti fino a 42 mm
- Opzione con telaio per integrazione in facciata montanti e traversi

Isolamento termico:

- Valori U_i fino a 1,5 W/(m²K)
- Valore U_w fino al 0,94 W/(m²K) con vetro triplo

Concetto di tenuta:

- Speciale guarnizione centrale con tre opzioni:
 - guarnizione perimetrale continua, senza giunti negli angoli
 - angoli preformati senza necessità di incollaggio
 - telai vulcanizzati

Ferramenta:

- Sistema ad elevata portata con cerniere nascoste, con frizione di fine corsa integrata, angolo di apertura max. 105°
- Peso dell'anta:
 - con cerniere nascoste: fino a 130 Kg
- Dimensioni dell'anta (l x h): fino a 1400 mm x 2250 mm
- Limitatore di apertura opzionale con varie configurazioni

Opzioni aggiuntive:

- telaio integrabile per facciate montanti e traversi
- lucernario
- Resistenza all'effrazione (vedi prove sul sistema)

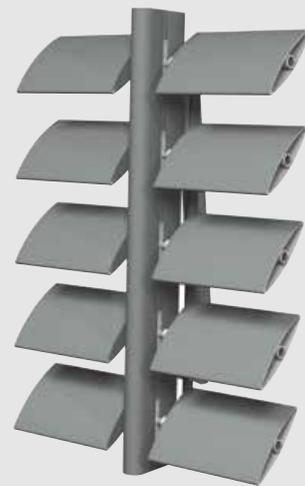
16
17

1B4 - B

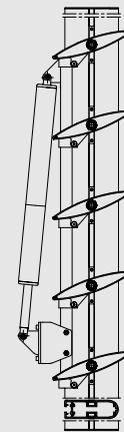


BS 100/30/20

Sistemi frangisole in alluminio



BS 100 con lamelle mobili

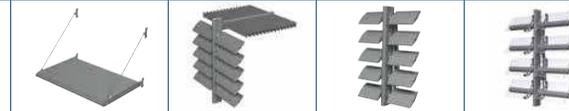


Brise Soleil è il termine utilizzato per indicare sistemi a lamelle da fissare ai muri perimetrali per la protezione dal riscaldamento e dall'abbagliamento solare.

I sistemi Reynaers per frangisole Brise Soleil® 100/30/20 forniscono una soluzione pratica e dal design moderno e sono progettati per essere integrati nelle facciate di edifici esistenti o di nuova costruzione.

I sistemi BS 100/30/20 sono disponibili con lamelle in alluminio o vetro, mobili o fisse, ognuna adattabile a qualsiasi soluzione sia standard, sia su misura.

BS 100/30/20

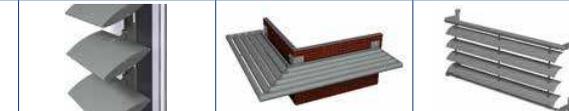


CARATTERISTICHE TECNICHE

Varianti	BS 100 TELAIO PRE-ASSEMBLATO	BS 100 LAMELLE FISSE	BS 100 LAMELLE ORIENTABILI	BS 100 LAMELLE IN VETRO
Forma lamelle	Ellittica	Ellittica	Ellittica	Vetro temperato
Dimensioni lamelle	140 mm / 180 mm	da 120 a 400 mm	da 120 a 400 mm	366 x 10/12/14/17 mm
Angolazione (fissa)	45°	0°/ 15°/ 30°/ 45°/ 60°/ 75°/ 90°	variabile	0°/15°/30°/45°/60°/ 75°/90° e variabile
Applicazione passerella	sì	sì	sì	sì
Dimensioni max	largh. 1000 o 1500 mm	in base al progetto	in base al progetto	in base al progetto
Possibilità di automazione	no	no	sì	sì

Sono disponibili lamelle da 500 mm e 700 mm per soluzioni a progetto

BS 100/30/20



CARATTERISTICHE TECNICHE

Varianti	BS 100 LAMELLE CON STAFFE	BS 30 FRAME SYSTEM	BS 20 FRAME SYSTEM
Forma lamelle	Ellittica	a Z	Curvata
Dimensioni lamelle	200 mm / 250 mm / 300 mm	90 mm largh. x 60 mm altezza	80 mm / 140 mm largh.
Angolazione (fissa)	0°/ 15° / 30°/ 45°	sì	30°
Applicazione passerella	no	sì	no
Dimensioni max	continue	3000 x 1000 mm	3000 x 1250 mm
Possibilità di automazione	no	no	no

REYNAERS ALUMINIUM SRL
 www.reynaers.it • info.italia@reynaers.com
 Edizione 06/2016





RINGRAZIAMENTI

Giunto alla fine di questo percorso, ci terrei a spendere alcune parole per tutte quelle persone che, in forme e modi diversi, hanno contribuito al raggiungimento di questo importante traguardo.

/ Un sentito grazie innanzitutto alla mia relatrice, la prof.ssa Anna Pellegrino, che con il suo rigore e la sua intransigenza mi ha portato a pretendere sempre più da me stesso.

/ Ringrazio inoltre gli architetti Pier Giorgio Turi e Raffaella Leonforte Bruno del laboratorio città sostenibile, per la loro gentilezza durante i sopralluoghi alla scuola, per i preziosi consigli e il materiale fornitomi.

/ Allo stesso modo ci tengo a ringraziare il laboratorio LAMSA del Politecnico di Torino, per la disponibilità alla consultazione dei testi e delle normative tecniche.

Un grazie di cuore:

/Ai miei genitori, senza i quali tutto questo non sarebbe stato possibile, per aver sempre creduto in me e per avermi dato la possibilità di coltivare le mie più grandi passioni: la Musica, l'Arte e l'Architettura.

Un grazie infinito va alla mia Mamma, che con i suoi modi diretti e a volte un po' (troppo) pungenti, mi spinge a non arrendermi mai e a credere nelle mie capacità: grazie per essere da sempre la mia guida, la mia ancora e la mia più grande fonte di ispirazione.

Un grande grazie anche al mio papà, i cui frequenti silenzi nascondono infiniti insegnamenti.

/Ai miei fratelli e ad Helèna, per tutti i momenti indimenticabili condivisi insieme e per il prezioso supporto durante questi ultimi mesi.

/Ad Antonella, per essere stata da sempre come una sorella. Grazie per essere come sei; così smisuratamente buona, generosa e insostituibile, ti voglio un bene immenso.

/A Seba, per essermi stato sempre vicino in quest'ultimo anno, nonostante il mio carattere non sempre facile. Grazie per accettarmi ed apprezzarmi per come sono realmente, non lo dimenticherò mai.

/Alla mia coll e sassofonista preferita Dorotea, per la fiducia che ripone in me e per essere stata da sempre un grande esempio di tenacia e determinazione. Grazie per tutti i preziosi consigli e per i bellissimi momenti condivisi in compagnia della Musica.

/Ad Alessandra, per essere stata la mia ancora a Torino, sempre pronta ad aiutarmi e ad ascoltarmi quando ne sentivo il bisogno; al mio coinquilino *Stefano*, per le infinite chiacchierate e per avermi supportato e sopportato ogni giorno; al mio compagno di viaggio *Luca*, per aver scelto di condividere con me gran parte di questo percorso, tra interminabili nottate al pc e serate indimenticabili.

/A mio padrino Salvo, Daniela, Giuseppe e Federico; che, sebbene ci siamo allontanati, conserveranno sempre un posto speciale nel mio cuore.

Infine, vorrei ringraziare più di chiunque altro me stesso, per non essermi mai arreso alle difficoltà e per aver trovato sempre la forza di rialzarmi più forte di prima.

