

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale LM-4 in
Architettura per il Progetto Sostenibile



Tesi di Laurea Magistrale
Anno accademico 2021/2022

SDG 11 - Città e comunità sostenibili: fotobioreattori per le fermate del trasporto pubblico urbano torinese.

Relatori:

Valerio Roberto Maria Lo Verso
Simonetta Lucia Pagliolico

Correlatrice:

Angela Lacirignola

Candidata:

Marianna Russo
matr. 287612

*A mio fratello,
da sempre il mio porto sicuro.*

Abstract

L'SDG – Sustainable Development Goal – numero 11, uno dei 17 obiettivi di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite, punta alla trasformazione dei centri urbani in città sostenibili “attraverso l'accesso di tutta la popolazione ad alloggi, servizi basilari e mezzi di trasporto adeguati, economici e sicuri, soprattutto per le persone più vulnerabili”, ponendo particolare attenzione agli impatti negativi sull'ambiente e al potenziamento delle aree verdi.

A questo scopo è anche necessario incentivare la fruibilità della città da parte dei pedoni attraverso un trasporto pubblico collettivo agevole e che garantisca la necessaria frequenza e regolarità di servizio, un'adeguata localizzazione dei punti di sosta e un'attesa confortevole dell'utente.

Secondo le statistiche, circa 400 000 mila persone, cioè la metà della popolazione torinese, utilizza i mezzi di trasporto pubblico e le fermate sono luoghi dove il pedone inizia a usufruire delle prestazioni rese dal servizio pubblico di trasporto prima di diventare passeggero e sono un punto di connessione nodale tra la viabilità pedonale e quella su ruota. All'art. 157 del nuovo Codice della Strada “per fermata si intende la temporanea sospensione della marcia [...] per consentire la salita e la discesa delle persone” e all'art. 352 del Regolamento di esecuzione e attuazione vengono fornite indicazioni sulla segnaletica verticale e orizzontale, sulla posizione delle fermate in corrispondenza di intersezioni, di curve e di tranvie, ecc. La norma, le esigenze del servizio pubblico e il traffico stradale pongono stringenti vincoli al dimensionamento dei luoghi di sosta che possono trovare collocazione sul marciapiede o, se le fermate si trovano al centro della carreggiata, su apposite pedane. Tuttavia, il dimensionamento dell'ampiezza delle fermate deve considerare il flusso massimo di utenti per garantire uno spazio adeguato di attesa, la viabilità pedonale del marciapiedi e agevolare le operazioni di carico e scarico dei passeggeri.

Una progettazione attenta alla sostenibilità di questi spazi dovrebbe anche portare benefici ambientali e sociali, contribuendo ad aumentare le aree verdi della città e il benessere del futuro passeggero. Particolare attenzione

andrebbe dunque posta al sistema di copertura, alle attrezzature e agli arredi della fermata.

Il seguente studio di tesi è volto alla progettazione di un elemento destinato all'utilizzo da parte dei cittadini che si servono dei mezzi di trasporto pubblico, che offre la possibilità di trovarsi immersi, anche se per poco tempo, in una piccola oasi naturale all'interno della città.

Si tratta di una pensilina modulare che fa uso della tecnologia dei PBR – photobioreactor – e che può essere replicata e adattata in diverse condizioni spaziali e climatiche. Tale elemento architettonico-urbano, è attento all'ambiente sia in termini di costi, sia in termini di emissioni in quanto si basa su un approccio a filiera corta, sulla filosofia della “progettazione per la decostruzione”, sulla riduzione della CO₂ e sul rilascio di O₂, grazie al processo chimico della fotosintesi clorofilliana.

Abstract

The SDG - Sustainable Development Goal - number 11, one of the 17 sustainable development goals of the United Nations, aims at transforming urban centers into sustainable cities “through the access of the entire population to housing, basic services and adequate means of transport, economic and safe, especially for the most vulnerable people”, paying particular attention to negative impacts on the environment.

To this end, it is also necessary to encourage pedestrians to use the city through an easy collective public transport that guarantees the necessary frequency and regularity of service, an adequate location of the stopping points and a comfortable wait for the user.

According to statistics, about 400,000,000 people, that is half of the Turin population, use public transport and the stops are places where the pedestrian begins to take advantage of the services provided by the public transport service before becoming a passenger and are a point nodal connection between pedestrian and wheeled traffic. In art. 157 of the new Highway Code “by stop means the temporary suspension of travel [...] to allow people to get on and off” and in art. 352 of the Implementation and Implementation Regulation, information is provided on vertical and horizontal signs, on the position of stops at intersections, curves and tramways, etc. The law, the needs of the public service and road traffic place stringent constraints on the sizing of parking places that can be placed on the sidewalk or, if the stops are in the center of the carriageway, on special platforms. However, the sizing of the width of the stops must consider the maximum flow of users to ensure adequate waiting space, pedestrian traffic of the sidewalks and facilitate the loading and unloading of passengers.

A design that is attentive to the sustainability of these spaces should also bring environmental and social benefits, helping to increase the city’s green areas and the well-being of the future passenger. Particular attention should therefore be paid to the roofing system, equipment and furnishings of the stop.

The following thesis study is aimed at the design of an element intended for use by citizens who use public transport, which offers the possibility of being immersed, even if for a short time, in a small natural oasis in the interior of the city.

It is a modular shelter that makes use of PBR technology - photobioreactor - and that can be replicated and adapted in different spatial and climatic conditions. This architectural-urban element is attentive to the environment both in terms of costs and in terms of emissions as it is based on a short chain approach, on the philosophy of "design for deconstruction", on the reduction of CO₂ and on the release of O₂, thanks to the chemical process of chlorophyll photosynthesis.

INDICE

1. Introduzione	16
1.1 Necessità di nuove fonti di energia rinnovabili	16
1.2 Biomassa algale	16
1.3 Cosa sono i PBRs.	17
1.4 Limiti dell'applicazione in architettura	18
1.5 Scopo della tesi e risultati attesi	18
2. Stato dell'arte	19
2.1 Prime osservazioni	20
2.2 Tipologie di PBRs e PBSs	20
2.3 Materiali	24
2.4 Strumenti e funzionamento	25
2.5 Metodi	28
2.6 Parametri considerati	29
2.6.1 Ombreggiamento e prestazioni di illuminazione diurna	29
2.6.2 Potenziale di visibilità	30
2.6.3 Prestazioni termiche	30
2.6.4 Prestazioni acustiche	30
2.6.5 Sostenibilità ambientale	31
2.6.6 Costi	31
2.6.7 Estetica	31
2.7 Problematiche e sfide	31
3. Casi studio	33
3.1 The Algae Green Loop Tower	34
3.2 Process Zero Concept Building	35
3.3 BIQ building – Bio-Intelligent Quotient building	36
3.4 Shading system for an open terrace of the State Library of Queensland	38
3.5 Aula di un asilo nido a Saint-Marcel in Valle d'Aosta	40
3.6 Urban Algae Folly District Food EXPO 2015, Milan	42
3.7 BIT.BIO.BOT	43
3.8 The Bamboo Garden	44

3.9 Bamboo Pavillion	45
3.10 Padiglione in bambù ad alta tecnologia	46
3.11 Media-ICT	46
3.12 Greenhouse in the botanic garden, university of Aarhus	47
3.13 Suggestioni	47
4. Un nuovo modello	48
4.1 Tipologie di fermate esistenti	49
4.2 Primo caso	57
4.3 Secondo caso	58
4.4 Terzo caso	58
5. Criteri di sostenibilità	59
6. Progettazione	61
6.1 Struttura	70
6.1.1 Giunti	71
6.1.2 Irrigidimento della pensilina	81
6.2 Basamento	85
6.3 Ombreggiamento	91
6.4 Fotovoltaico integrato	91
6.5 Illuminazione pubblica	92
6.6 Aspetto sociale e arredo urbano	94
7. Materiali	98
7.1 Bambù	98
7.1.1 Trattamento del bambù per ambienti esterni	102
7.2 Acciaio	102
7.2.1 Acciaio C45	102
7.2.2 Acciaio S355	103
7.3 Calcestruzzo facciavista lavato	104
7.4 PVC riciclato	106
7.5 ETFE	106
7.5.1 Coating	109

7.5.2 Aspetti tecnologici	110
7.6 Neoprene	112
7.7 PTFE	112
7.8 Pellicole polimeriche antisolari	113
7.9 Materiale di recupero per arredo urbano	114
8. Energia primaria e impronta di carbonio	115
9. Strumenti e funzionamento	118
10. Simulazione e parametri di valutazione	119
10.1 Luce	120
10.2 Irraggiamento	120
10.3 Sky View Factor	127
10.4 Temperatura dell'aria esterna	128
11. Risultati e discussione	141
12. Conclusioni	143

1. Introduzione

1.1 Necessità di nuove fonti di energia rinnovabili

Dalla crisi degli anni '70 è emersa la necessità di nuove fonti di energia rinnovabile come conseguenza della sempre maggiore domanda di energia e dell'esaurimento delle risorse attualmente utilizzate. Queste ultime, infatti, sono costituite prevalentemente da combustibili fossili (gas, carbone e petrolio) responsabili, su larga scala, del cambiamento climatico in atto e del surriscaldamento globale ad esso connesso. Ciò ha acceso un campanello d'allarme che ha spinto i Paesi di tutto il mondo verso la produzione di energia da fonti rinnovabili, ma la transizione risulta essere molto lenta e difficoltosa a causa della vera e propria dipendenza da combustibili fossili. Ad oggi, solo circa il 20% dell'elettricità è prodotta a partire da fonti rinnovabili (vento, irraggiamento solare, maree, precipitazioni, biomasse, moto ondoso). Svariate, infatti, sono le tipologie di impianto (fotovoltaico, solare termico, eolico) che sono state incorporate negli edifici, ma l'utilizzo della biomassa algale a questo scopo è ancora poco diffuso.

1.2 Biomassa algale

Le alghe rappresentano una piccola percentuale (0,5%) della biomassa vegetale complessiva, ma producono fino al 70% dell'ossigeno necessario per l'uomo e gli animali. Crescono nei sistemi acquosi in cui ci sono nutrienti quali fosfati e nitrati. Si suddividono in macroalghe e microalghe, quest'ultime sono più adatte per l'utilizzo nel campo dei biocombustibili e dell'architettura grazie all'elevato contenuto di lipidi e tasso di crescita. Si è stimata una capacità di assorbimento del carbonio pari a 25,6 kg/m³ anno (Kurano et al., 1995 ^[1]), molto superiore a quello delle piante: circa 0,3 – 0,9 kg/m³ anno (Chelf et al., 1993 ^[2]). Le microalghe, infatti, sono organismi vegetali e, in quanto tali, la loro crescita si basa sulla fotosintesi, cioè sulla trasformazione del carbonio atmosferico in biomassa. Inoltre, sono in grado di depurare l'aria e l'acqua e rilasciare O₂ nell'atmosfera in quantità maggiori rispetto ad altre specie. Inoltre, il loro elevato tasso di crescita le rende una

[1] Kurano, N., Ikemoto, H., Miyashita, H., Hasegawa, I., Hata, H., Miyachi, S., Fixation and utilization of carbon dioxide by microalgal photosynthesis. *Energy Convers*, 1995, pp. 689–692.

[2] Chelf, P., Brown, L.M., Wyman, C.E., Aquatic biomass resources and carbon dioxide trapping. *Biomass Bioenergy*, 1993, pp. 175–183.

risorsa sostenibile, efficace e, in poche parole, illimitata.

1.3 Cosa sono i PBRs.

Le numerose potenzialità delle microalghe hanno portato alla messa a punto dei fotobioreattori, dove la biomassa algale viene coltivata in condizioni ottimali per lo svolgimento delle proprie reazioni biologiche.

I fotobioreattori si suddividono in tre tipologie principali:

- serbatoi di fermentazione utilizzati perlopiù in laboratorio;
- sistemi aperti, i quali sfruttano spazi di dimensioni relativamente grandi come vasche, stagni o canali. Questi sono i sistemi di coltivazione maggiormente utilizzati a causa dei minori costi di realizzazione e manutenzione;
- sistemi chiusi, nei quali la coltura avviene in fotobioreattori di forma variabile; essi consentono di avere una maggiore produttività a causa della maggiore superficie esposta alla radiazione solare diretta e un migliore controllo dei parametri di crescita della coltura.

Di seguito viene riportata una tabella che illustra le principali differenze tra sistemi aperti (bacini) e sistemi chiusi (fotobioreattori).

	Impianto con vasche raceway	Impianto con fotobioreattori
Produzione annua di biomassa (kg)	100.000	100.000
Produttività volumetrica (kg/m ³ /g)	~ 0,12	> 1,5
Produttività areale (kg/m ² /g)	0,035	0,048
Concentrazione della biomassa nel brodo di coltura (kg/m ³)	0,14	4
Superficie necessaria (ha)	> 0,75	> 0,55
Resa in olio (L/ha)	99.400* / 42.600°	136.900* / 58.700 °
Consumo annuo di CO ₂ (kg)	183.333	183.333
Tipologia di sistema	vasca: 978 m ² (12 m x 82 m) 0,30 m profondità	unità: 132 tubi paralleli, ciascuno di 80 m di lunghezza x 0,06 m di diametro
Numero di unità	8	6
Rapporto area/volume	Basso	Alto
Densità della popolazione algale	Bassa	Alta
Produttività	Bassa	Maggiore
Concentrazione della biomassa	Minore	Maggiore
Rischio di contaminazione	Alto	Ridotto
Controllo della contaminazione	Difficile	Facile
Controllo delle specie	Difficile	Facile
Controllo del processo	Difficile	Facile
Controllo della temperatura	Difficile	Più uniforme
Efficienza di utilizzazione della luce	Scarsa	Elevata
Perdita di acqua	Molto alta	Bassa
Perdita CO ₂	Alta	Bassa
Pulizia degli impianti	Non richiesta	Richiesta
Investimenti	0,5-2,5 x 10 ⁶ \$/ha	5-12 x 10 ⁶ \$/ha se tubi in polipropilene 12-25 x 10 ⁶ \$/ha se tubi in policarbonato
Costi operativi	Bassi	Elevati

* per biomassa con contenuto in olio del 70% - ° per biomassa con contenuto in olio del 30%

[3]

[3] Amicarelli V. et al, elaborazione dati provenienti da Chisti Y. 2007; Mata TM. et al. 2010; Thurmond W. 2011; Weyer KM. et al. 2010

1.4 Limiti dell'applicazione in architettura

I fotobioreattori (PBRs) utilizzati per il trattamento delle acque reflue risultano particolarmente efficaci *poiché si tratta perlopiù di ampi bacini che richiedono una minore manutenzione* (Slegers PM. Scenario studies for algae production. Wageningen University; 2014). Ma, nonostante siano note le potenzialità dei sistemi chiusi, l'integrazione di questi elementi negli edifici richiede ulteriore sperimentazione e sviluppo.

I limiti sono dettati da una serie di problemi:

- capire quale sia la tipologia di fotobioreattore più appropriato nei diversi casi;
- definire i requisiti tecnici e i criteri che guidano la progettazione degli stessi fotobioreattori;
- definire le effettive prestazioni ambientali ed energetiche richieste nei diversi casi;
- l'adattamento dei fotobioreattori alle condizioni in cui dovranno operare;
- le previsioni per la futura manutenzione e il funzionamento e dei risultati attesi dall'impiego di questa tecnologia.

1.5 Scopo della tesi e risultati attesi

Nonostante siano ancora molti gli ostacoli da superare, gli studi fino ad ora condotti hanno definito una serie di aspetti positivi legati all'impiego di fotobioreattori nelle "bio-facciate" e nell'architettura in generale. Tra questi troviamo: il risparmio energetico, la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra, il rilascio di ossigeno e idrogeno.

A partire dalle informazioni fornite da studi precedenti, i risultati attesi dallo studio di tesi sono quelli di mettere in risalto le potenzialità descritte e favorire una più rapida diffusione dei PBRs, attraverso soluzioni innovative che riguardano la sperimentazione e l'impiego di materiali differenti da quelli fino ad oggi utilizzati, nuove configurazioni e localizzazioni. Ciò potrebbe rappresentare un approccio innovativo alla sostenibilità, in quanto il settore delle costruzioni è responsabile del consumo di circa il 40% dell'energia totale e dell'emissione del 30% dei gas a effetto serra.

2. Stato dell'arte

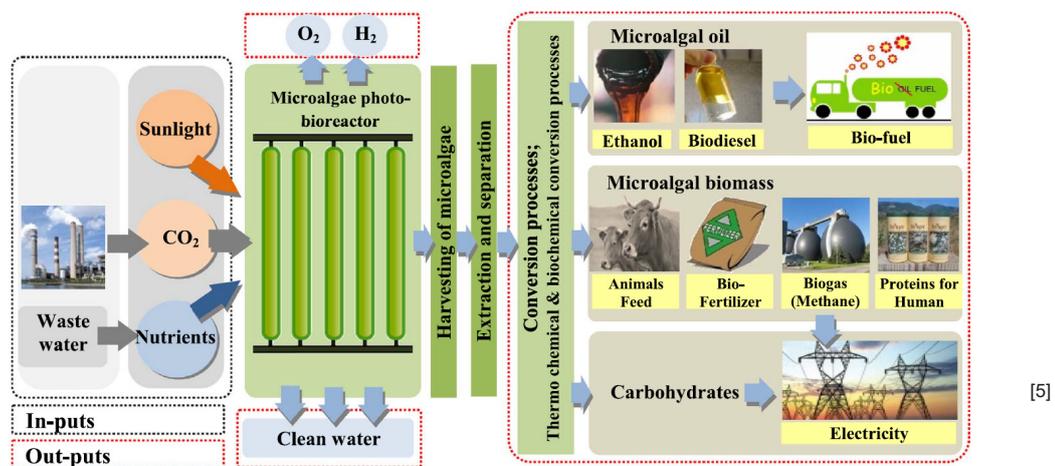
La continua crescita della popolazione che caratterizza la storia degli ultimi secoli ed alcuni eventi, come la crisi energetica degli anni '70, portano con sé la necessità di avere nuovi spazi da coltivare e di definire soluzioni nuove e sostenibili dal punto di vista economico, sociale e ambientale. A partire dal XXI secolo, queste sono le motivazioni che hanno portato i ricercatori di tutto il mondo ad interessarsi al tema della coltivazione microalgale e del loro successivo utilizzo. Numerosi, infatti, sono gli ambiti di sperimentazione: farmacia, cosmetica, settore alimentare, settore della mangimistica, settore tessile, settore dei carburanti e biomasse, plastiche biodegradabili.

Alcuni esempi ^[4]:

- bioplastica a base di alghe pensata per sostituire i packaging di cibi secchi come biscotti e pasta, messa a punto dalla designer cilena Margarita Talep;
- tessuti realizzati attraverso la lavorazione di alghe, ideati dal designer italiano Alberto Zanrè;
- isolante termoacustico realizzato attraverso microplastiche recuperate dagli oceani e biopolimeri derivanti dall'alga, messo a punto dal professore Marco Caniato dell'Università di Bolzano.

Tra le potenzialità vi è anche la capacità di trattare le acque reflue e di scarto derivanti dalle città, dalle industrie o da altri scenari, purchè non contengano sostanze nocive quali vernici o solventi. Le acque reflue, infatti, contengono nutrienti che favoriscono la crescita delle microalghe.

Di seguito una rappresentazione schematica di quanto descritto:



[4] EconomiaCircolare.com - <https://economiecircolare.com/alghe-economia-circolare-bioplastiche-isolanti-tessuti/>

[5] Ghada Mohammad Elrayies, Microalgae: Prospects for greener future buildings, Architecture and Urban Planning Department, Faculty of Engineering, Port Said University, Egypt, 2018.

L'architetto italiano Carlo Ratti ^[6] sostiene che l'integrazione delle microalghe nelle facciate possa essere una strategia più efficiente della piantumazione di foreste per contrastare il surriscaldamento globale. Inoltre, questo renderebbe gli edifici "passivi", ovvero autosufficienti sotto diversi aspetti. In sintesi, questi aspetti possono essere resi concreti attraverso i fotobioreattori, i quali rappresentano un modo per unire le potenzialità delle biomasse microalgali all'architettura.

2.1 Prime osservazioni

Già dalle prime ricerche sperimentali condotte a partire dai primi anni '90 è emerso che il design dei fotobioreattori ha una grande influenza sulle prestazioni, le quali dipendono anche dalle diverse specie di alghe utilizzate. Quelle con la maggiore capacità di assorbire CO₂ sono Cloro cocco, Clorella, Euglena e Scenedesmus ^[7]. Per questo motivo la maggior parte dei PBRs sono stati progettati per adattarsi a diversi ceppi di microalghe, la cui crescita avviene con tempistiche e modalità differenti. Alcune specie, per esempio, crescono a temperature inferiori rispetto ad altre e per questo motivo, all'interno del PBR può essere integrato un sistema di ombreggiamento che regola la temperatura stessa. La temperatura ottimale è compresa tra 20°C e 30°C ^[8]. Altri parametri da considerare sono il pH (non deve essere troppo basico, altrimenti si ha un'alterazione del processo cellulare), la quantità di ossigeno e di anidride carbonica presente in ambiente, l'esposizione alla radiazione solare, i cicli buio/luce, la densità della coltura, la presenza di acqua e la salinità della soluzione. Dal punto di vista più pratico, fondamentale durante la progettazione dei PBRs e dei PBSs è la pulibilità e la manutenzione dei componenti.

2.2 Tipologie di PBRs e PBSs

Gli studi fino ad oggi condotti, hanno definito il potenziale delle microalghe, che possono essere considerate come vere e proprie materie prime per la cosiddetta "economia circolare", poiché non necessitano di fertilizzanti,

[6] Charalampidou D Urban Algae Canopy, Carlo Ratti Associati with Cesare Griffa& EcoLogicStudio: ARCH20. <http://www.arch2o.com/urban-algaecanopy-carlo-ratti-associati-with-cesare-griffa-ecologicstudio/>.

[7] V. R. M. Lo Verso, M. H. S. Javadi, S. L. Pagliolico, C. Carbonaro, G. Sassi, Photobioreactors as a Dynamic Shading System Conceived for an Outdoor Workspace of the State Library of Queensland in Brisbane: Study of Daylighting Performances per Journal of Daylighting di SolarLits, 2019.

[8] P. Lavens, P. Sorgeloos, FAO fisheries technical paper, University of Ghent, 1996.

possono essere coltivate anche in terreni non fertili, hanno un elevato tasso di crescita ed un effetto positivo per l'ambiente attraverso la riduzione della concentrazione di CO₂ presente in atmosfera. Alla luce di questo, è stato coinvolto anche il settore edilizio e delle costruzioni: i fotobioreattori hanno appassionato i progettisti, che, soprattutto recentemente, si sono messi in gioco integrandoli in strutture di diverso genere, dalle più semplici alle più complesse.

L'invenzione del primo fotobioreattore risale agli anni '40 e da quel momento vari studi hanno permesso di approfondire la sperimentazione, portando da prototipi di piccole dimensioni a veri e propri impianti. Essi svolgono svariate attività tra cui la depurazione delle acque, la riduzione dello smog attraverso l'assorbimento di CO₂ e il rilascio di O₂. Tuttavia, si tratta di una fase preliminare, poiché ci sono ancora molti problemi legati soprattutto all'aspetto tecnologico e manutentivo di una facciata in vetro riempita d'acqua in cui possano essere coltivate le microalghe, oltre alle questioni socio-economiche.

Fondamentale è la miscelazione delle colture per prevenire la sedimentazione dei microrganismi, per facilitare il trasferimento del calore e per migliorare lo scambio gassoso, oltre che per garantire una certa trasmissione della luce. È anche necessario evitare la formazione di biofilm (patina opaca), che potrebbero impedire il passaggio delle radiazioni, garantendo gli aspetti di pulibilità e manutenzione dei componenti. Sono privilegiate le forme prive di pieghe e le superfici levigate.

I materiali di cui possono essere costituiti i PBRs sono vari: vetro, polietilene, policarbonato, plastica, gomma siliconica altamente trasparente, acciaio inossidabile. Se lo scopo è quello di sfruttare l'illuminazione naturale esterna si prediligono materiali trasparenti; se, invece, si utilizza l'illuminazione artificiale possono essere utilizzati materiali opachi. L'obiettivo è proprio quello di ampliare le possibili combinazioni di materiali per la realizzazione dei fotobioreattori, in modo da poterli applicare in ogni luogo.

Ad oggi, diverse sono le configurazioni di fotobioreattore realizzate ed osservate, di seguito brevemente descritte.

Tra quelle "convenzionali" e maggiormente studiate si trovano:

- i PBRs tubolari, i quali sono costituiti da una serie di tubi disposti in va-

rie configurazioni. Essi possono essere disposti verticalmente (soluzione meno efficiente), orizzontalmente o inclinati. La quantità di calore che si accumula in questi elementi tubolari potrebbe richiedere un impianto che mantenga la temperatura di crescita ottimale. In questa categoria rientrano quelli a spirale. I tubi presentano un diametro massimo di 10 cm (ma di solito è compreso tra 1 e 6 cm), per assicurare il giusto rapporto superficie/volume; anche la lunghezza è sottoposta a limitazioni, poiché una lunghezza eccessiva porterebbe ad un accumulo di ossigeno che impedirebbe la fotosintesi^[9]. Solitamente i sistemi costituiti da più strati di tubi permettono di raggiungere una maggiore produttività, grazie al gioco di ombre che si genera e che abbassa l'intensità della radiazione solare diretta. Una volta esauste, la raccolta delle microalghe avviene per centrifugazione, sedimentazione o attraverso tecniche di filtrazione. Uno dei vantaggi di questa tipologia è la versatilità, in quanto può essere adattato a diverse configurazioni.

- i PBRs rigidi a colonna sono cilindri di raggio massimo 20 cm e altezza fino a 4 m. Questa tipologia garantisce un'eccellente miscelazione delle microalghe ed agevola la manutenzione. Il diametro potrebbe provocare problemi per quanto riguarda la trasmissione della luce, fondamentale per la crescita della coltura. Per questo motivo, spesso, vengono integrati con illuminazione artificiale aggiuntiva: LED o fibre ottiche.

I PBRs a pannelli presentano uno spessore di 5 o 6 cm e vengono disposti secondo un orientamento studiato in base alla posizione geografica o verticalmente sulle facciate. Due professori dell'università di Lincoln, Elnokaly e Keeling^[10], hanno affermato che l'orientamento E-O è quello migliore per latitudini superiori a 35°N, mentre per latitudini inferiori a tale valore si privilegia l'orientamento N-S. Anche Slegers^[11], pochi anni prima, sosteneva questa teoria. Rispetto ai PBRs precedentemente citati, presentano un maggiore rapporto superficie/volume ed una distribuzione uniforme della luce. Gli svantaggi sono costituiti dai costi di realizzazione, dalle difficoltà legate alla pulizia e dalle limitazioni nel controllo della crescita.

- i PBRs a membrana rappresentano il sistema meno costoso e più antico,

[9] Ghada Mohammad Elrayies, *Microalgae: Prospects for greener future buildings*, Architecture and Urban Planning Department, Faculty of Engineering, Port Said University, Egypt, 2018.

[10] Elnokaly A, Keeling I. An empirical study investigating the impact of micro-algal technologies and their application within intelligent building fabrics. *Procedia- Social Behav Sci*, 2016.

[11] Slegers PM., *Scenario studies for algae production*. Wageningen: Wageningen University; 2014.

in quanto si tratta di sacchetti di plastica con capacità massima di 2000 litri. Possono essere integrati con sistemi di aerazione e gli aspetti negativi sono rappresentati dalla sostituzione periodica dei sacchetti e dal successivo smaltimento della plastica [12].

Tra i PBRs “non convenzionali” [13], invece, emergono:

- i PBRs piramidali sono realizzati in acrilico e non richiedono ampi spazi per l’installazione,
- i PBRs ispirati alla natura emulano le forme naturali (ad esempio i rami di un albero) e cercano di trovare un maggiore rapporto superficie illuminata/volume aumentando la scala dei PBRs convenzionali con conseguente aumento della radiazione solare ricevuta;
- i PBRs ibridi cercano di far coesistere diverse tipologie di PBR per unirne le potenzialità ed i vantaggi. Per esempio la combinazione di un sistema chiuso con un sistema aperto collegati tra loro che consentono di avere migliori condizioni di illuminazione e di alimentazione gassosa.

Tuttavia, tutti questi sistemi sono ancora in fase di sperimentazione.

I fotobioreattori utilizzati come schermature statiche verticali vengono anche chiamati fotobioschermi (PBS). Lo studio condotto da Pagliolico S. et al. [14] si occupa di PBS costituiti da sacchetti di plastica sottili, modulari e usa e getta, riempiti da microalghe e nutrienti utili alla loro crescita. Attraverso analisi di laboratorio sono stati messi a punto cinque differenti prototipi di PBS, successivamente applicati in una sala di circa 10 m² del Politecnico di Torino. Di seguito viene riportata una tabella riassuntiva dei prototipi.

Table 1. Characteristics of PBSs.

Code and description	Bag			Cubicles				
	Size (mm)	Culture volume (ml)	Wall thick. (mm)	Size (mm)	Culture volume (ml)	Max. thick. (mm)	Surface area/vol. (mm ⁻¹)	Aeration rate (vvm)
<i>SCC disposable ice bag: 9 circular cubicles with square packing</i>	150x150	120	0.05	Φ = 45	13	17.5	0.12x2	-
<i>ASCC aerated disposable ice bag: 9 circular cubicles with square packing</i>	150x150	120	0.05	Φ = 45	13	17.5	0.12x2	0.4
<i>SCR 3 rectangular cubicles arranged in three horizontal lines</i>	150x150	120	0.125	35x135	40	19.5	0.09x2	-
<i>SCCO 10 circular cubicles with hexagonal packing</i>	300x240	250	0.1	Φ = 65	25	18.5	0.13x2	-
<i>ASCCO 10 aerated circular cubicles with hexagonal packing</i>	300x240	250	0.1	Φ = 65	25	18.5	0.13x2	0.2

[15]

[12] V. R. M. Lo Verso, M. H. S. Javadi, S. L. Pagliolico, C. Carbonaro, G. Sassi, Photobioreactors as a Dynamic Shading System Conceived for an Outdoor Workspace of the State Library of Queensland in Brisbane: Study of Daylighting Performances per Journal of Daylighting di SolarLits, 2019.

[13] Santiago N. Chanquia, Guillem Vernet, Selin Kara, Photobioreactors for cultivation and synthesis: Specifications, challenges, and perspectives, Engineering in Life Sciences, 2021 - <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/elsc.202100070>

[14] Simonetta L. Pagliolico, Valerio R.M. Lo Verso, Francesca Bosco, Chiara Mollea, Cinzia La Forgia, A novel photo-bioreactor application for microalgae production as a shading system in buildings, Energy Procedia, 2017.

[15] ibid.

2.3 Materiali

Perché la maggior parte dei fotobioreattori studiati e/o commercializzati si basa sull'utilizzo dell'acciaio?

- L'acciaio è una lega Ferro-Carbonio che rappresenta uno dei materiali da costruzione più utilizzati, la % di C presente nella lega determina le caratteristiche dell'acciaio stesso: quelli con maggiore tenore di carbonio sono meno resilienti ma superficialmente più duri. In seguito ai processi di metallurgia primaria e secondaria, il materiale viene sottoposto a successivi trattamenti e lavorazioni, che conferiscono determinate forme e/o caratteristiche. Tra queste vi sono: la durezza nonostante sia un materiale deformabile, la resistenza a trazione e allo snervamento, buon rapporto resistenza/peso, la buona conducibilità termica e la possibilità di creare elementi prefabbricati e modulari. Aspetti negativi sono: la tendenza alla corrosione, a meno che non si tratti di acciaio inox (il quale contiene una percentuale di Cromo che inibisce la corrosione), costo elevato a causa del notevole consumo energetico, la manutenzione da eseguire costantemente. Altri materiali utilizzati sono, per esempio, il legno e l'etilene tetrafluoretilene.

- Il legno è un materiale da costruzione che è stato messo da parte per molto tempo a causa della messa a punto di prodotti ingegnerizzati, ma che negli ultimi anni è tornato in vigore tanto che esistono edifici completamente realizzati in legno. Questo materiale, infatti, presenta una buona resistenza a compressione e una più bassa resistenza a trazione (a volte comunque superiore rispetto a quella dell'acciaio), buona resistenza elettrica, buon isolamento termico e acustico, molto spesso è reperibile localmente, è leggero ed è più sostenibile rispetto all'acciaio. Il legno, però, è igroscopico e anisotropo e di conseguenza subisce variazioni dimensionali non uniformi e può essere soggetto a diverse forme di degrado: biologiche (muffa, batteri, insetti) e non (agenti atmosferici, fuoco). Per far fronte a questo problema esistono diversi trattamenti superficiali o per impregnazione che conferiscono al materiale una vita utile fino a 50 anni.

- Il polietilene a bassa densità (LDPE) appartiene alla categoria dei materiali polimerici, è trasparente nella sua forma amorfa e può essere applicato a temperature variabili tra -40°C e $+80^{\circ}\text{C}$. Le principali caratteristiche di questo materiale sono la leggerezza, il buon isolamento termico, la resistenza

all'acqua ed a soluzioni acide, la resistenza alla corrosione, l'atossicità e la buona resistenza all'urto e la resistenza ai raggi UV ^[16]. Gli impieghi principali riguardano il settore alimentare (packaging), il settore edile (barriere impermeabilizzanti) e dei giocattoli.

• Anche il polimero etilene tetrafluoroetilene (ETFE) è un materiale ampiamente utilizzato in diversi settori: agricoltura, per la realizzazione delle serre; elettronica, per il rivestimento di cavi; automobilistica, per la realizzazione di pneumatici; architettura, sia nelle stratigrafie delle coperture, sia nelle pareti verticali. Il vasto impiego di questo materiale interessa anche il settore dei fotobioreattori (come in alcuni esempi riportati successivamente) poiché si tratta di un materiale con elevata permeabilità alla luce, resistenza chimica e alle condizioni atmosferiche variabili (corrosione), è completamente riciclabile, resiste fino alla temperatura di circa 155 °C, è autopulente ed ha una buona resistenza al fuoco grazie alla presenza del fluoro. Se confrontato con il vetro, risulta essere più economico e con migliori caratteristiche di isolamento ^[17]. Tuttavia, essendo un materiale polimerico, è meno sostenibile di altri materiali (eccetto l'acciaio) a causa del processo produttivo di cui necessita e delle successive operazioni di smaltimento, recupero e riciclo. Al contrario, ci sono materiali, come il bambù, che non sono ancora stati utilizzati per la messa a punto di PBRs e PBSs: il tema sarà approfondito in seguito.

2.4 Strumenti e funzionamento

Per realizzare un fotobioreattore è necessario, quindi, avere a disposizione almeno una fase solida, una fase liquida e una fase gassosa:

- acqua (dolce o salata), in cui prolifereranno i microrganismi;
- microalghe, le più adatte alle condizioni ambientali del sito;
- radiazione solare, che avvia il processo chimico di fotosintesi clorofilliana (o impianto di illuminazione artificiale);
- superficie sufficientemente estesa, in grado di captare la radiazione solare

[16] Informazioni utili sul polietilene e le sue caratteristiche fondamentali, Celvil, 2017 - <https://www.celvil.it/info-utilities/polietilene-caratteristiche/#:~:text=Il%20polietilene%20%C3%A8%20una%20resina,%C2%B0C%20%2B80%C2%B0C>.

[17] Cristina Mazzola (a cura di), Membrane e scocche per l'architettura diffusa, Politecnico di Milano, Architettura tessile, 2005 - http://www.architetturatessile.polimi.it/membrane_scocche/prodotti_mem/2-1_monocomp_edile/2-2_ETFE_film/ETFE_film.html#:~:text=Caratteristiche%3A,adibiti%20a%20serre%20e%20zoo.&text=Inoltre%20i%20raggi%20UV%20permettono,per%20la%20realizzazione%20degli%20stadi.

incidente;

- nutrienti (nitrati, fosfati, oligoelementi, vitamine essenziali), per favorire l'accrescimento delle microalghe;
- fase gassosa (aria e CO₂), utilizzata per il processo fotosintetico e di solito dispersa attraverso tubi, membrane o i cosiddetti sparger.

Inoltre, si è valutato come stimolare la crescita delle microalghe:

- attraverso il gorgogliamento di aria e/o anidride carbonica;
- con l'apporto di sostanze nutritive, la cui concentrazione deve essere ottimizzata per evitare che la crescita microalgale venga inibita;
- attraverso illuminazione artificiale, fornendo solo le radiazioni di lunghezza d'onda opportuna;
- modificando la forma, come nel caso dei reattori a spirale, per garantire una buona esposizione alla radiazione solare durante tutta la giornata, indipendentemente dall'orientamento e dalla posizione geografica, come mostrato nella figura sottostante.

[18]



Solitamente i fotobioreattori vengono inoculati con colture effettuate in laboratorio. L'acqua può derivare dalle case o dagli impianti industriali. Queste risultano essere ricche di nutrienti, mentre nel caso in cui si tratti di "acqua pulita" i

nutrienti vengono forniti attraverso appositi condotti. La proliferazione delle microalghe è dovuta alla quantità di nutrienti e alla luce. Si predilige l'utilizzo della radiazione solare, anziché l'illuminazione artificiale, per sfruttare il più possibile fonti naturali e rinnovabili.

È preferibile collocare i PBRs in luoghi in cui è presente CO₂ in quantità sufficienti per avviare la fotosintesi (ad esempio zone industriali o urbane), per evitare di dover ricorrere a bombole di anidride carbonica^[19]. L'acqua esausta viene convogliata in serbatoi (sotterranei o superficiali) e filtrata in sito oppure trasportata in appositi impianti. Se necessario, il fotobioreattore vie-

[18] Matthes S, Matschke M, Cotta F, Grossmann J, Griehl C., Reliable production of microalgae biomass using a novel microalgae platform. J Appl Phycol, 2015.

[19] Barbato F., De Mei M., Cogliani E., Ferrari S., Petrazzuolo F., Sistemi per la produzione di microalghe da inserire a valle del processo di digestione anaerobica, Enea, 2014.

ne dotato di pompe che favoriscono il trasporto dell'acqua, la miscelazione della soluzione stessa per evitare il deposito delle microalghe ed il trasporto della massa. In particolare, questi fenomeni dipendono dalla velocità del fluido e dalla dimensione delle bolle che si vengono a creare (aerazione). Uno studio condotto a partire dal 2018 da Arif Rahman et al. [20] dimostra che la dimensione delle bolle nei fotobioreattori aumenta proporzionalmente alla portata e questo consente una maggiore produzione di biomassa algale, a causa della maggiore quantità di sostanze introdotte che ne stimolano la crescita. Per i PBSs, invece, la microalga utilizzata nello studio condotto tra 2016 e 2017 [21], è stata mantenuta alla temperatura di 4 °C, dopodiché incubata per 15 giorni a temperatura ambiente e sottoposta ai cicli naturali giorno/notte. Solo successivamente è stata messa in un sistema acquoso. Una serie è stata misurata per 21 giorni durante il periodo estivo ed un'altra per 21 giorni nel periodo autunnale. I parametri analizzati sono la densità delle microalghe, la trasmissione luminosa, illuminamento, luminanza, la quantità di luce diurna all'interno dell'ambiente e il fabbisogno energetico. I risultati mostrano che la forma più adatta per la funzione da svolgere è quella costituita dalle forme circolari, che sono state assunte per svolgere gli esperimenti successivi con differenti soluzioni liquide (es: tetrafenilborato NaB, che è una fonte di carbonio meno costosa). Inoltre, la forma di tali PBS, provoca effetti di rifrazione della luce, che portano a valori di trasmissione luminosa al di sopra della soglia limite pari a 1. Successivamente, l'esperimento attraverso il quale è stata iniettata aria all'interno dei PBSs per 10 giorni ha mostrato che, così facendo, viene ostacolata la crescita delle microalghe a causa dell'instaurarsi di forze idrodinamiche. Nel corso degli anni, in seguito alle sperimentazioni effettuate, sono emerse diverse modalità di controllo della temperatura, miscelazione e scambio gassoso che impiegano elementi tecnologici più o meno avanzati [22].

Per il controllo della temperatura sono stati perlopiù impiegati:

[20] Arif Rahman, Juno Dwi Putra, Nining Betawati Prihantini, T.M.I. Mahlia, M. Aziz, Deendarlianto, N. Nasruddin, Cultivation of *Synechococcus* HS-9 in a novel rectangular bubble column photobioreactor with horizontal baffle, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 27, October 2021 - <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X21004275#>

[21] Simonetta L. Pagliolico, Valerio R.M. Lo Verso, Francesca Bosco, Chiara Mollea, Cinzia La Forgia, A novel photo-bioreactor application for microalgae production as a shading system in buildings, *Energy Procedia*, 2017.

[22] Santiago N. Chanquia, Guillem Vernet, Selin Kara, Photobioreactors for cultivation and synthesis: Specifications, challenges, and perspectives, *Engineering in Life Sciences*, 2021 - <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/elsc.202100070>

- scambiatori di calore, che permettono di trasferire calore senza che ci sia scambio di fluidi o contatto tra essi;
- spruzzi d'acqua,
- ombreggiamento.

La miscelazione delle microalghe può avvenire attraverso:

- agitatore (o miscelatore) elettrico o magnetico;
- trasporto aereo, bolle;
- pompe.

Infine, lo scambio di gas può essere indotto mediante:

- iniezione di gas nella stessa unità che lo mette in circolo;
- iniezione di gas in un'altra unità connessa a quella principale.

2.5 Metodi

Il metodo più utilizzato e diffuso per la coltivazione delle microalghe è quello che sfrutta la foto-autotrofia per la crescita delle microalghe: la fonte che innesca il processo autotrofico è la radiazione solare e il carbonio necessario alla crescita è fornito dall'anidride carbonica presente in atmosfera. I vantaggi e i limiti che ne derivano sono quelli descritti nei capitoli precedenti. Un metodo alternativo è rappresentato dall'eterotrofia che, come dice il nome, non si serve dell'illuminazione per la crescita dei microrganismi e la fonte di carbonio è rappresentata da zuccheri o acidi organici (come l'acido carbosilico o l'acido acetico). In questo caso non viene, quindi, assorbita CO₂, ma rilasciata e si ha un consumo di O₂ che nel processo autotrofico rappresenta, al contrario, un prodotto. Ciò implica una minore sensibilità nei confronti del cambiamento climatico, sebbene i costi energetici per gli impianti di miscelazione delle microalghe siano inferiori. I due processi, autotrofo ed eterotrofo, sono stati utilizzati per definire il cosiddetto metodo mixotrofo, sviluppato dal ricercatore italiano Fabian Abiusi^[23]. L'innovazione consiste nell'utilizzo di due fonti energetiche contemporaneamente e il prodotto di un processo rappresenta la fonte dell'altro e viceversa. Per esempio, l'anidride carbonica generata dal processo eterotrofico non viene rilasciata

[23] F. Abiusi, R. H. Wijffels, M. Janssen, Doubling of microalgae productivity by oxygen balanced mixotrophy, ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020 - <https://www.microbiologiaitalia.it/batteriologia/da-un-ricercatore-italiano-un-innovativo-ed-efficiente-bioprocesso-di-coltivazione-delle-microalghe/>

in ambiente ma utilizzata dal processo autotrofico; è necessario che i due fenomeni si sviluppino alla stessa velocità. Il risultato della sperimentazione rivela un effettivo rilascio di anidride carbonica quasi nullo, ma questa tipologia di PBR non è ancora stato applicato su ampia scala per una serie di motivi: si è utilizzata un'illuminazione artificiale per tutto l'arco temporale della giornata, non tenendo conto dei cicli di luce e buio; permane il problema della contaminazione batterica che può, però, essere inibita da ceppi di microalghe con pH acido (>7).

2.6 Parametri considerati

Fino ad oggi, le considerazioni fatte in merito ai PBRs e PBSs ed i fattori analizzati sono molteplici.

2.6.1 Ombreggiamento e prestazioni di illuminazione diurna

Le microalghe, essendo di colore verde, assorbono le radiazioni di colore rosso. Per questo motivo i fotobioreattori possono essere utilizzati come dispositivi di schermatura solare, andando a modulare l'ingresso della radiazione solare all'interno degli ambienti, che non vengono completamente oscurati. La quantità di luce, però, come affermano Elnokaly e Keeling ^[24] in uno dei loro studi, è influenzata dalle fasi di crescita (più o meno intensa) delle microalghe, dalla forma del fotobioreattore e dall'angolo di inclinazione dello stesso. Ne deriva che l'orientamento a Sud è quello migliore sia per l'efficienza dell'ombreggiamento, sia per la crescita ottimale delle microalghe.

Altri studi, condotti dai professori del Politecnico di Torino, Pagliolico e Lo Verso ^[25], si sono occupati del fattore di luce diurna FLD che si ottiene in due località italiane con latitudini differenti: Torino, nel Nord del Paese e Palermo, a Sud. Per condurre questo esperimento, sono stati utilizzati come PBRs sacchetti di plastica trasparenti da ghiaccio disposti lungo un'apertura finestrata. In condizioni di cielo sereno, la trasmissione luminosa risulta essere del 55%, nonostante quella dei singoli componenti (vetro e microalghe) sia superiore al 70%. Questa "diminuzione" è sicuramente dovuta alla

[24] A. Elnokaly, I. Keeling, An empirical study investigating the impact of micro-algal technologies and their application within intelligent building fabrics. *Procedia-Social Behav Sci*, 2016.

[25] Simonetta L. Pagliolico, Valerio R.M. Lo Verso, Francesca Bosco, Chiara Mollea, Cinzia La Forgia, A novel photo-bioreactor application for microalgae production as a shading system in buildings, *Energy Procedia*, 2017.

forma del PBR applicato, che crea rifrazione della luce, e per questo si ha la necessità di approfondire maggiormente gli studi.

2.6.2 Potenziale di visibilità

Nonostante siano molti gli aspetti positivi legati alla realizzazione di facciate con PBRs, esistono anche limitazioni come la diminuzione della permeabilità visiva attraverso il fotobioreattore stesso. La colorazione verde può essere eliminata con l'utilizzo di pellicole colorate, ma vi è anche il problema legato alla stagionalità delle microalghe, delle bolle d'aria introdotte per evitare che gli organismi unicellulari si depositino (oltre che per fornire la CO₂ necessaria) e dell'eventuale abbagliamento che potrebbe provocare una condizione poco confortevole all'interno dell'ambiente.

2.6.3 Prestazioni termiche

La schermatura solare costituita da fotobioreattori sostituisce i tradizionali sistemi di schermatura e contribuisce a diminuire la temperatura interna durante la stagione calda. Inoltre, si ha anche un aumento dell'isolamento termico che favorisce il risparmio energetico. In accordo con quanto affermato da Elrayies nel suo articolo^[26], durante la stagione estiva, i PBRs sono in grado di smorzare i carichi termici, mentre durante l'inverno permettono di sfruttare il calore in eccesso (accumulato) per riscaldare l'edificio. È una caratteristica fondamentale da sfruttare per rendere concreti gli "edifici passivi" a base di microalghe. Il ritorno degli investimenti è stato stimato intorno a 6/10 anni. Altri studi ^[27], hanno dimostrato che la trasmittanza U delle facciate con microalghe è paragonabile a quella dei vetri con rivestimento basso-emissivo. Tale studio si basa su un prototipo realizzato con due strati di rivestimenti acrilici, che hanno permesso di ottenere buoni valori di isolamento termico.

2.6.4 Prestazioni acustiche

Per quanto riguarda l'isolamento acustico non sono stati condotti studi che possano dare un ordine di grandezza delle prestazioni in questo ambito.

[26] Ghada Mohammad Elrayies, *Microalgae: Prospects for greener future buildings*, Architecture and Urban Planning Department, Faculty of Engineering, Port Said University, Egypt, 2018.

[27] Kim K-H (ed.), *A feasibility study of an algae façade system*, in: *Proceedings of international conference on sustainable building Asia (SB13)*. Seoul, South Korea; 8-10 July 2013.

2.6.5 Sostenibilità ambientale

È stata dimostrata la migliore capacità delle microalghe di assorbire CO₂, rilasciare O₂ e purificare le acque reflue ma non esistono parametri standard. Essi dipendono dalla composizione dei PBRs e dalla specie algale utilizzata. Per esempio, il BIQ building può assorbire fino a 6 tonnellate/anno di CO₂.

2.6.6 Costi

I maggiori costi che distinguono i sistemi chiusi dai più economici sistemi aperti, sono dovuti all'energia necessaria per miscelare e mantenere in sospensione le microalghe all'interno dei PBR. Tuttavia, gli importi risultano essere di gran lunga superiori a quelli dei tradizionali sistemi, ma se si considerano i benefici a lungo termine, vale la pena investire. Uno degli obiettivi è sicuramente quello di rendere più accessibili i PBRs, per consentirne una più facile diffusione.

2.6.7 Estetica

L'integrazione di organismi viventi negli involucri edilizi viene considerato un valore estetico aggiuntivo, che permette di rendere ogni edificio unico nel suo essere grazie ai processi chimici e fisici dinamici. Per questo suscita molto interesse anche nel campo dell'architettura^[28], oltre che nei settori scientifici e industriali.

2.7 Problematiche e sfide

Sebbene siano molteplici i vantaggi derivanti dall'uso e dall'applicazione delle microalghe in architettura e in altri settori, altrettante sono le difficoltà che ne ostacolano la diffusione. Per esempio, le microalghe crescono molto velocemente, ma, attualmente, i sistemi di produzione messi a punto non bastano per fornire le quantità necessarie per soddisfare il fabbisogno di biocombustibile. Inoltre, vi è il rischio che una coltura funzionante in condizioni di laboratorio non funzioni in un altro sistema; vi sono dubbi su quali siano le migliori modalità di raccolta e di essiccazione della biomassa che si viene a creare; difficoltà nella prevenzione della contaminazione sebbene

[28] Öncel SŞ, Köse A, Öncel DŞ. Façade Integrated photobioreactors for building energy efficiency, in: Pacheco-Torgal F, Rasmussen ES, Granqvist CG, Ivanov V, Kaklauskas HA, editors. Start-up creation: the smart eco-efficient built environment, Woodhead Publishing; 2016. pp. 237–299.

sia molto ridotta nei sistemi chiusi rispetto a quelli aperti ^[29]. Un altro fattore fortemente limitante è il capitale (economico, fisico ed intellettuale) da investire nella ricerca di nuove tipologie di PBRs. In particolare, i sistemi chiusi sono molto più costosi di quelli aperti perché richiedono un maggiore impiego sia di materiali, sia di impianti per il funzionamento, ma offrono il vantaggio di produrre una quantità di biomassa algale maggiore e più omogenea^[30]. Sarebbe necessario ricercare alternative, che permettano di superare tali complessità, in grado di sviluppare fotobioreattori a partire da un approccio pratico ^[31]. Da un punto di vista più concreto, invece, nelle colture ad alta densità, come quelle dei PBR, anche l'ombreggiamento che le cellule microalgali si creano tra loro può rappresentare un limite. Ne deriva che mantenere la qualità della luce a livelli ottimali è piuttosto complicato, anche perché di tutto lo spettro elettromagnetico, solo la luce visibile (con lunghezza d'onda compresa tra 400 μm e 700 μm) è utile al processo fotosintetico. Per ottenere una luce artificiale il più simile possibile a quella naturale, vengono utilizzati i LED bianchi. Anche per quanto riguarda la temperatura possono esserci dei problemi, poiché il surriscaldamento inibirebbe la crescita dei microrganismi; per questo esistono dei sistemi di raffreddamento passivo (es: scambio di calore tra fluido caldo e fluido freddo), ma ci sono limitazioni per il loro impiego su ampia scala, poiché è richiesta un'attenta pianificazione ^[32]. Sembra quasi impossibile raggiungere le condizioni ideali, ma ciascuna sperimentazione di PBR chiuso utilizza tecniche che cercano di avvicinarsi il più possibile a queste ^[33]. Un modo per superare questi ostacoli potrebbe essere rappresentato dalla ripetizione di elementi modulari.

In sintesi, soprattutto per quanto riguarda l'applicazione in architettura, le

[29] D. P. Kiesenhofer, S. Fluch, The promises of microalgae—still a long way to go, *FEMS Microbiology Letters*, Volume 365, issue 1, January 2018 - <https://academic.oup.com/femsle/article/365/1/fnx257/4705893?login=true>

[30] Daniel Borowiak, Pawel Lenartowicz, Michal Grzebyk, Maciej Wisniewski, Jacek Lipok, Pawel Kafarski, Novel, automated, semi-industrial modular photobioreactor system for cultivation of demanding microalgae that produce fine chemicals—The next story of *H. pluvialis* and astaxanthin, *ScienceDirect*, 2021 - <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211926420310195>

[31] A. Alonso-Bastida, M. A. Franco-Nava, M. Adam-Medina, B. López-Zapata, J. García-Morales, Mathematical modeling of thermal interactions in a self-cooling pilot-scale photobioreactor, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 31, March 2022 - <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X22000715>

[32] Emeka G. Nwoba, David A. Parlevliet, Damian W. Laird, Kamal Alameh, Navid R. Moheimani, Light management technologies for increasing algal photobioreactor efficiency, *Algal Research*, Volume 39, 2019 - <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221192641830780X>

[33] Philipp Benner, Lisa Meier, Annika Pfeffer, Konstantin Krüger, José Enrique Oropeza Vargas & Dirk Weuster-Botz, Lab-scale photobioreactor systems: principles, applications, and scalability, *Bioprocess Biosyst En*, 2022 - <https://link.springer.com/article/10.1007/s00449-022-02711-1#citeas>

maggiori difficoltà e problematiche sono:

- gli elevati costi (sia di investimento, sia operativi);
- il carico che si va ad aggiungere al sistema strutturale;
- l'adeguamento alle condizioni metereologiche;
- la solidità del sistema;
- la disponibilità di spazi;
- la limitazione della vista attraverso i sistemi.

Attualmente la sfida maggiore per l'applicazione dei PBRs, è quella di realizzare una bioraffineria in loco da cui ricavare biogas ed evitare perdite di energia durante la fase di trasporto. È un progetto molto ambizioso, soprattutto per gli edifici residenziali nei quali si aspira ad integrare tutti i processi descritti precedentemente. Nel suo testo Öncel^[34], ha definito quelli che secondo lui sono gli aspetti su cui concentrarsi maggiormente per la progettazione di PBRs in un edificio: materiali leggeri con costi accessibili e durabilità tale da sopportare la pressione, giusto bilancio tra costo e profitto e facile manutenzione. Come emerge nei casi studio riportati in seguito, i PBRs messi a punto fino ad oggi non soddisfano completamente il fabbisogno energetico degli edifici, rendendo ancora necessaria la presenza di altri impianti quali fotovoltaico e/o solare termico. Un altro obiettivo sarebbe quello di fornire una visione nitida dall'esterno all'interno (e viceversa) dell'edificio, andando a regolare anche gli aspetti non legati semplicemente al colore delle microalghe, ma al comfort visivo come l'abbagliamento. Tra le prospettive di utilizzo delle microalghe come strumento per rendere le città più sostenibili e confortevoli dal punto di vista ambientale non rientrano solo gli edifici residenziali, commerciali e industriali ma anche installazioni di diverso tipo come tettoie urbane, parchi, microinstallazioni nelle zone destinate alla collettività, infrastrutture. Per fare questo è necessaria la collaborazione tra l'ingegneria (chimica, elettrica, meccanica, civile) e l'architettura.

3. Casi studio

Le linee di pensiero e le opinioni degli architetti e dei progettisti nel cam-

[34] Öncel SŞ, Köse A, Öncel DŞ. Façade Integrated photobioreactors for building energy efficiency, in: Pacheco-Torgal F, Rasmussen ES, Granqvist CG, Ivanov V, Kaklauskas HA, editors. Start-up creation: the smart eco-efficient built environment, Woodhead Publishing; 2016. pp. 237–299.

po dell'integrazione delle microalghe agli edifici sono di fondamentale importanza. Esse rappresentano il primo passo per la configurazione di un'idea che includa tutti i requisiti necessari per la realizzazione di un'opera di questo genere. Di seguito vengono riportati alcuni esempi di fotobioreattori (PBRs) e fotobioschermi (PBSs) sperimentati nel corso degli anni.

3.1 The Algae Green Loop Tower



[35]

Il progetto è stato il vincitore di un concorso bandito a Chicago nel 2011, in un'ottica di riduzione dell'impronta di carbonio della città. Il sistema di PBR, in questo progetto, si integra all'edificio esistente Marina City Towers e soddisfa parzialmente il fabbisogno dell'edificio legato al riscaldamento/raffrescamento e alla fornitura di acqua calda pulita. È costituito

da una serie di tubi che rivestono la parte superiore delle torri.

In questo caso l'impianto prevede:

- riduzione delle emissioni di CO₂;
- filtraggio dell'acqua;
- conversione della biomassa algale in energia elettrica;
- produrre cibo ^[36] .

[35] Archdaily <https://www.archdaily.com/191229/algae-green-loop-influx-studio>

[36] Ghada Mohammad Elrayies, Microalgae: Prospects for greener future buildings, Architecture and Urban Planning Department, Faculty of Engineering, Port Said University, Egypt, 2018.

Tipologia	PBR a spirale elicoidale	 <p>[37]</p>
Orientamento	E	
Lunghezza	120 m x 15 anelli	
Materiale	resina	
Processi	Conversione della luce in calore	
	Conversione della luce in biomassa (fotosintesi)	
Sistemi di tubazioni	Ad aria compressa	
	Ad acqua	
Output	Biomassa algale (usata per la produzione di biocarburante), O ₂ , acqua pulita, cibo	

3.2 Process Zero Concept Building



[38]

Il progetto, non realizzato, è il vincitore di un concorso bandito a Los Angeles nel 2011. Si tratta di un intervento sull'edificio degli uffici GSA. L'obiettivo era quello di ridurre le emissioni del 30% attraverso una rete modulare di PBR tubolari, con funzione aggiuntiva di frangisole per l'edificio.

sole per l'edificio.

In questo caso l'impianto prevede:

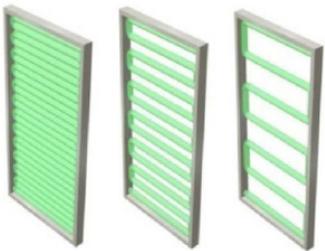
- riduzione delle emissioni di CO₂;
- filtraggio dell'acqua;
- rilascio O₂;
- conversione della biomassa algale in carburante.

La CO₂ che alimenta il sistema è fornita prevalentemente dalla strada ad

[37] Designboom - <https://www.designboom.com/architecture/influx-studio-algae-green-loop/>

[38] Progetto Process Zero Concept Building - Buildipedia.com - <http://buildipedia.com/aec-pros/featured-architecture/hok-vanderweil-process-zero-concept-building-as-green-asalgae>

alta percorrenza collocata nelle immediate vicinanze, l'acqua purificata viene reintrodotta nel circuito, i lipidi estratti per la produzione di sostanze alimentari e l'ossigeno rilasciato nell'ambiente ^[39].

Tipologia	PBR a pannelli tubolari	
Orientamento	N, S, E, O	
Lunghezza	ca. 2 300 m ²	
Materiale	Vetro stratificato e acciaio	
Processi	Conversione della luce in calore	
	Conversione della luce in biomassa (fotosintesi)	
Sistemi di tubazioni	Ad aria compressa	
	Ad acqua	
Output	Biomassa algale (usata per la produzione di biocarburante), O ₂ , elettricità	
Efficienza	9% della radiazione solare convertita in energia elettrica	

[40]

3.3 BIQ building - Bio-Intelligent Quotient Building



[41]

Il progetto è stato redatto in vista dell'Esposizione Internazionale dell'Edilizia ad Amburgo, in Germania, ed è stato realizzato nel 2013 dallo studio Arup Deutschland, SSC GmbH. Rappresenta il primo edificio al mondo in cui viene applicato il sistema di coltivazione delle microalghe. Si tratta di una struttura residenziale a cinque piani che integra la tipologia di PBR a pannelli piani di vetro riempiti da una miscela di microalghe, sfruttate

[39] Ghada Mohammad Elrayies, Microalgae: Prospects for greener future buildings, Architecture and Urban Planning Department, Faculty of Engineering, Port Said University, Egypt, 2018.

[40] Rete tubolare PBR - HOK-Network. HOK / Vanderweil Net-Zero Building. Flickr <https://www.flickr.com/photos/hoknetwork/sets/72157626580055933/with/5713420820/>

[41] Arup Unveils World's First Algae-Powered Building 2013 <http://www.dezeen.com/2013/04/15/arup-unveils-worldsfirst-algae-poweredbuilding/>

per la produzione di biocarburante e calore utili a soddisfare - in parte - il fabbisogno di riscaldamento dell'edificio.

L'impianto prevede:

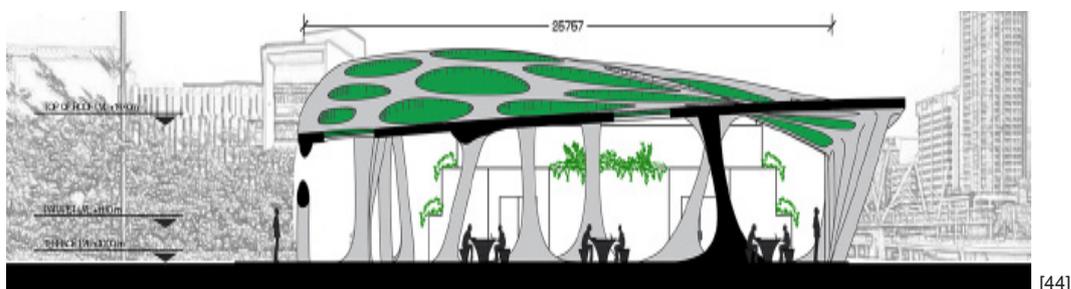
- fornitura di CO₂ e nutrienti
- filtraggio e raccolta della biomassa esausta;
- controllo della temperatura del liquido che circola nei pannelli;
- raccolta, immagazzinamento e distribuzione del calore. Il calore in eccesso viene immagazzinato in pozzi geotermici;
- conversione della biomassa algale in metano e, successivamente, in energia elettrica ^[42] .

Tipologia	PBR a pannelli piani (129 pannelli)	
Orientamento	S-E, S-O	
Lunghezza	250x70x8 cm	
Materiale	Vetro stratificato e acciaio	
Temperatura	> 5°C in inverno, < 40°C in estate	
Processi	Conversione della luce in calore	
	Conversione della luce in biomassa (fotosintesi)	
Sistemi di tubazioni	Ad aria compressa	
	Ad acqua	
Output	Biomassa algale (usata per la produzione di biocarburante), O ₂ , elettricità	
Efficienza	10% della radiazione solare convertita in biogas, 48% in calore	

[42] Ghada Mohammad Elrayies, Microalgae: Prospects for greener future buildings, Architecture and Urban Planning Department, Faculty of Engineering, Port Said University, Egypt, 2018.

[43] Luce e Design – Organismo di facciata <http://www.lucenews.it/organismo-di-facciata/>

3.4 Shading system for an open terrace of the State Library of Queensland



Un esempio di sistema di ombreggiamento dinamico esterno è il progetto realizzato dallo studio di Carlo Ratti^[45]: una copertura per uno spazio di lavoro polivalente collocato su una terrazza panoramica di circa 750 m² della biblioteca di Brisbane, in Australia. Esso è costituito da elementi di schermatura traslucidi (per creare illuminazione diffusa) disposti sia verticalmente, sia orizzontalmente in grado di creare uno spazio di lavoro all'aperto confortevole dal punto di vista visivo; inoltre contribuisce al benessere degli occupanti; la forma organica simboleggia il cuore dell'intero progetto: le microalghe. L'orientamento N-E e l'assenza di ostruzioni, infatti, renderebbe quell'area non sfruttabile come ambiente di lavoro. La densità della biomassa, infatti, può essere regolata con un apposito sistema di controllo basato su sensori. Ciò consente di avere un'ampia gamma di trasmittanze luminose τ per rispondere alle condizioni esterne altamente variabili. Basandosi su queste sono, successivamente, stati calcolati i valori illuminotecnici in diversi mesi dell'anno. Per rendere il sistema adatto anche ad altri contesti, sono state fatte le stesse verifiche facendo riferimento al clima di Torino e di Dubai. Dal confronto emerge che in condizioni di cielo coperto è necessaria una densità delle microalghe minore, con conseguente valore di τ più alto rispetto a quello necessario per condizioni di cielo sereno. L'innovazione di questo progetto è rappresentato dalla combinazione di PBR a pannelli e PBR tubolari.

Il contesto esistente è stato fondamentale durante lo sviluppo del progetto, in particolare sono stati considerati tre aspetti:

[44] Journal of Daylighting - <https://solarlits.com/>

[45] Carlorattiassociati, DIGITAL (SUB) TROPICAL Algaecture – project: ecoLogicStudio in collaboration with MIT Senseable City Lab, Carlo Ratti, Giovanni de Niederhausern (project leader) - <https://carloratti.com/project/digital-sub-tropical>

- sociale, attraverso l'analisi delle esigenze di chi vive quell'area,
- spaziali, analizzando il rapporto che avrebbe avuto la nuova installazione con l'esistente;
- ambientali e climatici, valutando la gestione delle risorse, l'impermeabilità, la raccolta dell'acqua piovana, l'irraggiamento solare, la ventilazione e l'inquinamento acustico [46].

Un altro parametro da considerare è la specie di microalga da utilizzare, individuata attraverso la capacità di assorbimento della luce, di trattamento delle acque reflue e alla tolleranza agli inquinanti.

La progettazione sostenibile di questo intervento ha coinvolto anche gli spazi immediatamente vicini che costituiscono il contesto, soprattutto per quanto riguarda:

- l'acqua, attraverso il recupero dell'acqua piovana e dell'acqua grigia con serbatoi posti sulle coperture degli edifici circostanti;
- l'elettricità, impianti fotovoltaici per ridurre ulteriormente il fabbisogno energetico dei PBR.

Le microalghe al termine del ciclo di vita vengono trasportate in stabilimenti per essere riutilizzate nella produzione di biocombustibile, che verrà restituito al sistema per la produzione di elettricità e calore.

Tipologia	PBR a pannelli piani e tubolari
Orientamento	N-E
Dimensione	Variabile
Materiale	CIs ad alte prestazioni, acciaio, plexiglas
Temperatura	15 °C < T < 25°C
Processi	Conversione della luce in calore
	Conversione della luce in biomassa (fotosintesi)
Sistemi di tubazioni	Ad aria
	Ad acqua
Output	O ₂ e biocarburante (fuori sede)

[46] Valerio R.M. Lo Verso, Matin H.S. Javadi, Simonetta Pagliolico, Corrado Carbonaro, Guido Sassi, Photobioreactors as a Dynamic Shading System Conceived for an Outdoor Workspace of the State Library of Queensland in Brisbane: Study of Daylighting Performances per Journal of Daylighting di SolarLits, 2019.

Le analisi condotte da V. R. M. Lo Verso et al. ^[47] in condizioni di luce diurna opposte attraverso appositi software hanno permesso di comprendere le prestazioni dei PBR e le densità di biomassa necessaria.

Gli studi sull'illuminazione diurna sono stati effettuati in diverse condizioni di illuminamento, assumendo come minimo 300 lx (valore minimo sul piano di lavoro secondo la normativa EN 12464) e come massimo 3000 lx (valore massimo sul piano di lavoro secondo la normativa EN 12464 per evitare abbagliamenti). Essendo che la struttura è collocata all'aperto, è stata assunta un'ulteriore soglia massima, quella di 6000 lx, per tenere conto che negli spazi esterni sono presenti livelli di illuminamento più alti. Per diversi mesi e orari dell'anno sono stati calcolati parametri quali la luminanza [cd/m^2] e l'irradianza [W/m^2]; inoltre sono stati elaborate cinque tipologie di vetrocamera per cinque differenti valori di trasmissione luminosa τ (10%, 20%, 40%, 60%, 80%). Il progetto, non essendo stato realizzato, si trova allo stato concettuale e potrebbero esserci problemi legati alla distribuzione delle microalghe: è stata ipotizzata omogenea, ma nella realtà c'è il rischio di sedimentazione nonostante gli sforzi nelle strategie di miscelazione delle colture.

3.5 Aula di un asilo nido a Saint-Marcel in Valle d'Aosta



[48]

Si tratta di un esperimento effettuato in Valle d'Aosta, attraverso l'effettiva realizzazione di un sistema di ombreggiamento di un edificio esistente. In questo caso si tratta di una coltivazione algale interna e sostenibile per il biosequestro di anidride carbonica e l'apporto di ossigeno, ma anche per il miglioramento delle condizioni ambientali interne dovuto ad una migliore qualità dell'aria. I PBS sono costituiti da tendine realizzate mediante sacchetti per il ghiaccio (tre SCC di forma circolare e due SCR

[47] Valerio R.M. Lo Verso, Matin H.S. Javadi, Simonetta Pagliolico, Corrado Carbonaro, Guido Sassi, Photo-bioreactors as a Dynamic Shading System Conceived for an Outdoor Workspace of the State Library of Queensland in Brisbane: Study of Daylighting Performances per Journal of Daylighting di SolarLits, 2019.

[48] Simonetta L. Pagliolico, Valerio R.M. Lo Verso, Manuela Zublena, Luigi Giovannini, Preliminary results on a novel photo-bio-screen as a shading system in a kindergarten: Visible transmittance, visual comfort and energy demand for lighting, Solar Energy, 2019.

di forma rettangolare). All'interno delle forme circolari del materiale plastico viene introdotta la biomassa e non è stato previsto alcun meccanismo di miscelazione. La manutenzione prevede la semplice sostituzione dei PBS. Il materiale è permeabile alla CO₂ e alla luce grazie allo spessore ridotto; al termine dello studio le microalghe vengono utilizzate in altri settori e i sacchetti riciclati. Per non ostacolare la vista verso l'esterno, i PBS sono stati disposti sulla fascia superiore e inferiore dell'apertura finestrata in direzione orizzontale. Le condizioni di illuminazione diurna sono state valutate nello spazio reale e nello stesso spazio privo di ostruzioni esterne, per rendere il caso studio versatile ed applicabile in altri contesti. Sono stati realizzati diversi prototipi, di forme e dimensioni diverse e sono state studiate le migliori condizioni per la coltura delle microalghe per avere una configurazione ottimale del dispositivo, che permettesse di ottenere buoni valori di trasmissione luminosa. Successivamente le caratteristiche della stanza sono state variate, ma anche il sistema di ombreggiatura (PBS o veneziane), la localizzazione (Aosta, Torino, Atene, Abu Dhabi), la temperatura, la quantità di radiazione solare incidente e l'orientamento del sito in cui si colloca, per avere un confronto con altre configurazioni.

Tipologia	PBS a fogli di polietilene a bassa densità
Orientamento	S, O
Dimensione	20x30 cm; spessore 0,05 mm
Materiale	PE a bassa densità, bicarbonato di sodio come fonte di Carbonio
Temperatura	20 °C < T < 35°C
Processi	Conversione della luce in calore
	Conversione della luce in biomassa (fotosintesi)
Sistemi di tubazioni	Ad aria
	Ad acqua
Output	O ₂ e biocarburante (fuori sede)

La quantità di luce diurna è stata misurata attraverso il FLD_m. L'illuminazione è stata misurata per 21 giorni, dal 14 Giugno al 4 Luglio 2016, ad intervalli temporali ristretti attraverso equazioni studiate. L'analisi ha messo

in evidenza che i risultati ottenuti statisticamente sono differenti da quelli ottenuti sperimentalmente. Tuttavia risulta essere soddisfatto l'illuminamento minimo (300 lx) per la metà delle ore di funzionamento. Il valore di trasmissione luminosa medio in assenza di schermature è pari a 0,75; in presenza di PBS è pari a 0,49 e le prestazioni ottenute con schermatura costituita da PBS posta a Sud sono migliori di quelle ottenute con l'utilizzo di un sistema schermante a veneziane. Le schermature in PBS a Nord, invece, forniscono risultati peggiori in termini di illuminazione diurna.

Le condizioni dell'ambiente interno sono direttamente correlate alla domanda di energia per l'illuminazione.

Fondamentale è risultata la capacità, da parte dei PBS, di evitare l'abbagliamento. Il fatto che siano state operate delle semplificazioni (sia per quanto riguarda la definizione dei dati medi, sia per la modalità di rilevamento dei dati stessi) rappresenta un limite, che potrebbe aver influito sul risultato finale, così come un limite è rappresentato dal fatto che i valori massimi e minimi delle normative facciano riferimento agli adulti e non ai bambini, i quali potrebbero percepire gli ambienti illuminati in modo diverso.

3.6 Urban Algae Folly District Food EXPO 2015, Milan



[49]

In occasione dell'esposizione universale EXPO, tenutasi a Milano nel 2015, gli architetti italiani Marco Poletto e Claudia Pasquero hanno presentato un padiglione interattivo che integra la coltura di microalghe ad

una copertura di uno spazio aperto, in cui è fondamentale l'interazione tra uomo e struttura. La radiazione solare permetteva alle microalghe di crescere ad una velocità maggiore e i visitatori, con la loro presenza, attivano il sistema di regolazione digitale (sensori) che fornisce l'ossigenazione necessaria alle microalghe. L'efficienza della pensilina dipende da tutti questi fattori, correlati tra loro. Attualmente la struttura si colloca nella città di Bra-

[49] ecoLogic Studio, 2015 - https://www.thenestliving.it/portfolio/expo-2015_urban-algae-folly/

ga, in Portogallo.

La coltura delle microalghe avviene in serbatoi sotterranei, dai quali il fluido viene pompato verso le componenti modulari dei fotobioreattori, disposti in modo da creare anche delle zone d'ombra e generare un microclima confortevole. In un giorno vengono prodotti 100g di microalghe da utilizzare a scopo alimentare, oltre agli all'impatto positivo che ha sull'ambiente ^[50].

Tipologia	PBR a pannelli modulari (9 per ogni circuito)
Forma	Triangolare
Materiale	Acciaio, ETFE
Temperatura	> 5 °C in inverno < 27 °C in estate
Processi	Conversione della luce in biomassa (fotosintesi)
Sistemi di tubazioni	Tre circuiti ad acqua indipendenti
Output	Biomassa algale (usata per la produzione di biocarburante), O ₂ , carburante, cibo
Efficienza	2 kg di O ₂ al giorno

3.7 BIT.BIO.BOT



[51]

Gli architetti italiani Claudia Pasquero e Marco Poletto, in occasione della mostra internazionale di Architettura svoltasi a Venezia nel 2021, hanno proposto un esperimento di architettura biotecnologica.

Si tratta di una sorta di laboratorio in cui si sperimenta la coltivazione di microalghe nell'ambito urbano. I fotobioreattori sono costituiti da (n.

10) tende di 3x1 m. Ciascun elemento presenta una capacità di 7 litri ed è

[50] Alghe, cibo e architettura, il connubio perfetto dello Urban Algae Folly, 2019 - <http://www.alghe.org/2016/01/22/alghe-cibo-e-architettura-il-connubio-perfetto-dello-urban-algae-folly/>

[51] Progetto di ecoLogic Studio, Biennale di Architettura di Venezia, 2021 - <https://www.ecologicstudio.com/projects/bitbiobot>

costituito dal sistema di rivestimento PhotoSynthetica ^[52].

Tipologia	PBR a tenda
Dimensione	h = 3 m, l = 1 m
Materiale	ETFE
Temperatura	15 °C < T < 25 °C
Processi	Conversione della luce in calore
	Conversione della luce in biomassa (fotosintesi)
Sistemi di tubazioni	Ad aria
	Ad acqua
Output	Biomassa algale (da utilizzare in altri settori), O ₂

Per quanto riguarda, invece, le costruzioni in bambù, differenti sono i casi studio individuati. Tutti mettono in evidenza la flessibilità del materiale e la resistenza ai carichi se le installazioni sono opportunamente progettate.

3.8 The Bamboo Garden



[53]

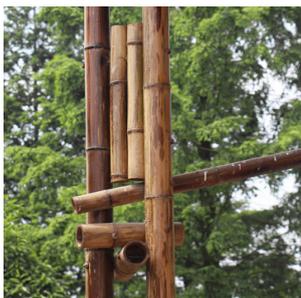
Si tratta di un progetto realizzato in Cina nel 2015 che ha l'obiettivo di inserire nuove funzioni e nuove installazioni all'interno della piazza di un'azienda casearia. Un'installazione (nell'immagine: a sinistra) riguarda la copertura

di un manufatto esistente, l'altra (nell'immagine: a destra) rappresenta un padiglione in cui si svolgono diverse attività. La forma di quest'ultimo rimanda a quella di un ombrello.

In entrambi i casi sono stati utilizzati giunti a secco, tra bambù ed altri materiali naturali o bambù e acciaio. Di seguito un'immagine di alcune fotografie di Baoxi Yang riguardanti le giunzioni a secco.

[52] Photo.Synthetica by ecologicStudio - <https://www.photosynthetica.co.uk/system>

[53] The Bamboo Garden - Atelier REP, Chengdu (Cina), 2015 - https://www.archdaily.com/788728/the-bamboo-garden-atelier-rep?ad_medium=widget&ad_name=navigation-prev



[54]

3.9 Bamboo Pavillion



[55]

Il progetto, risalente al 2015, verte sulla realizzazione di sei padiglioni a pianta quadrata e copertura a falde che richiamano il paesaggio alle spalle, caratterizzato da montagne, in Cina. Il diametro delle canne di bambù utilizzate varia

tra i 10 e i 12 cm. Anche in questo caso sono stati utilizzati giunti a secco, tra cui la giunzione a bocca di pesce. Questa prevede il taglio della canna di bambù in modo tale da consentire il perfetto appoggio di un ulteriore elemento in direzione ortogonale ad esso, al di sopra, come individuato nella figura seguente:



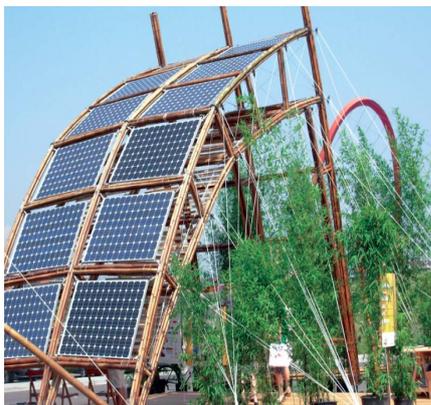
[56]

[54] The Bamboo Garden - Atelier REP, Chengdu (Cina), 2015 - https://www.archdaily.com/788728/the-bamboo-garden-atelier-rep?ad_medium=widget&ad_name=navigation-prev

[55] Bamboo Pavillion – Studio DnA, Lishui (Cina), 2015 - <https://www.archdaily.com/643476/bamboo-pavilion-dna-design-and-architecture>

[56] Scuola di progettazione architettonica - <https://ita.architecturaldesignschool.com/learning-basic-bamboo-joinery-with-indonesian-carpenters-63754>

3.10 Padiglione in bambù ad alta tecnologia



[57]

Il progetto è frutto di un workshop didattico in collaborazione con l'architetto fondatore dell'ATP Utopie Realizzabili: la forma del padiglione rimanda a quella di una vela, con un'altezza molto ampia (7 metri). L'innovazione più rilevante è rappresentata dall'integrazione con i pannelli fotovoltaici,

i quali sono in grado di soddisfare il fabbisogno del palazzo del Comune della città in cui si colloca, Olivetta San Michele.

Di seguito, alcuni esempi di edifici realizzati che fanno uso di elementi in ETFE.

3.11 Media-ICT



[58]

Lo studio Cloud 9, nel 2010 ha progettato questo edificio a Barcellona articolato in 8 piani fuori terra destinati a funzioni differenti. La facciata rivestita di cuscini in ETFE è utile al controllo del comfort interno dell'edificio ed è stato progettato per ridurre al minimo i consumi energetici.

[57] Alex Riolfo, Gruppo di riqualificazione ambientale, territoriale e sociale "Utopie realizzabili", Olivetta San Michele (IM), 2008 - <https://docplayer.it/47339438-Ingegneri-e-architetti.html>

[58] The plan, Media-ICT, Enric Ruiz Geli Cloud 9 - <https://www.theplan.it/magazine/2010/the-plan-044-09-2010/media-tic>

3.12 Greenhouse in the botanic garden, university of Aarhus (Denmark)



[59]

Nel 2013 gli architetti dello studio Møller hanno progettato una serra a forma di cupola che si adatta alla collina su cui si trova. Anche in questo caso, il rivestimento della struttura metallica è in cuscini di ETFE, che influiscono sull'apporto di luce e calore

all'interno delimitato dalla cupola.

3.13 Suggestioni



[60]

Nel 2017 la multinazionale svedese IKEA ha creato una sorta di cupola in legno attorno alla quale si sviluppano 320 metri di tubature in cui crescono e si sviluppano le microalghe. Si tratta di un'installazione che può essere posta ovunque si voglia e fornisce tutti i benefici precedentemente descritti. In questo caso, però, il sistema tubolare si "appoggia" alla struttura lignea, che

non lo ingloba.

[59] Divisare - <https://divisare.com/projects/271242-c-f-moller-architects-george-messaritakis-quintin-lake-a-sustainable-hothouse>

[60] Algae Dome by IKEA - <http://www.alghe.org/2017/10/25/algae-dome-da-ikea-per-produrre-spirulina/>



[61]

Anche il parco per bambini a Varsavia, denominato AirBubble, è costituito da una struttura in legno a cui è agganciato, mediante supporti in acciaio, il sistema di tubazioni in cui circola il fluido nel quale crescono le microalghe; il tutto avvolto da una membrana in ETFE come

se fosse una vera e propria serra.

4. Un nuovo modello

Dall'analisi dello stato dell'arte si comprende che non esiste un'unica soluzione valida, ma bisogna considerare, in particolare, quali sono gli obiettivi da perseguire, le prestazioni richieste e le condizioni in cui ci si trova ad operare. A partire dalle configurazioni di PBRs già operative e dalle installazioni in bambù già realizzate, si è cercato di elaborare una soluzione alternativa che fosse più sostenibile sotto ogni aspetto e ripetibile, in quanto modulare, per adattarsi alle diverse condizioni spaziali e climatiche.

Il nuovo modello di fotobioreattore che si propone in questo studio è una struttura leggera in bambù, concepita come una pensilina dal design moderno posizionata in corrispondenza delle fermate dei mezzi pubblici di una grande città italiana, Torino. Ovviamente, ciascuna porzione della città ha le proprie caratteristiche:

- tessuto urbano più o meno fitto: zone centrali o periferiche;
- presenza o assenza di vegetazione, di ampi spazi liberi;
- direzione di ventilazione e condizioni variabili anche a seconda della posizione e dell'altezza degli edifici;
- traffico più o meno intenso;
- "effetto canyon" dovuto allo scarso ricircolo dell'aria in vie particolarmente strette o fiancheggiate, su entrambi i lati, da edifici di altezza rilevante.

Ciò implica che ciascuna installazione dovrà essere studiata appositamente per la posizione in cui dovrà operare, in modo da rispondere alle specifiche

[61] Progetto di ecoLogic Studio, 2018 - <https://www.ad-italia.it/luoghi/architettura/2021/07/08/airbubble-il-primo-parco-giochi-biotecnologico-che-purifica-laria/>

esigenze di ogni porzione di territorio ed avere un effetto positivo sull'ambiente e sul cambiamento climatico in atto.

4.1 Tipologie di fermate esistenti

Percorrendo le strade della città con i mezzi pubblici, a piedi o attraverso Google Maps ^[62], risulta evidente che i diversi luoghi presentano esigenze, poiché non tutti i luoghi hanno la stessa disponibilità spaziale e/o la stessa importanza dal punto di vista della percorrenza: alcuni percorsi prevedono flussi maggiori di persone, altri sono meno affollati. Per questo motivo, la fase preliminare all'individuazione dei luoghi in cui effettivamente effettuare una verifica delle condizioni di illuminazione è molto importante. Essa, infatti, ha reso necessaria la percorrenza delle linee principali di trasporto pubblico (Nord-Sud/ Est-Ovest) e la successiva individuazione di diversi casi.

• La linea 2, da via Amilcare Ponchielli (Nord) a Via Corrado Corradino (Sud) presenta lungo tutto il percorso fermate spaziose di circa 3,20 m di profondità, le quali offrono la possibilità di essere ripensate ed ampliate, nel rispetto della vegetazione presente, come visibile dalle foto riportate di seguito.

In sequenza: Via Sandro Botticelli, Corso Lecce, Corso Trapani, Corso Siracusa, Corso Piero Maroncelli.



[62] Google Maps - <https://www.google.it/maps/preview>



• La linea 4, da Via delle Querce (Nord) a Corso Unione Sovietica (Sud): questo tratto presenta alcune banchine sufficientemente profonde (3,20 m) che presentano una copertura in corrispondenza delle fermate, mentre altre non in grado di ospitare tale installazione, senza intralciare il passaggio pedonale.

In sequenza: Corso Giulio Cesare, Via Accademia Albertina, Via Paolo Sacchi, Corso Turati, Corso Unione Sovietica.





• Linea 8: da Piazzale Monchino (Nord) a Via Ventimiglia (Sud). Il percorso presenta per la maggioranza fermate profonde 3,2 m con copertura, ma anche fermate meno profonde (1,5 m) con marciapiede salvavita senza copertura, ed altre in corrispondenza dei marciapiedi che circondano gli edifici, nei quali è assente la copertura per evitare che vada ad intaccare le vetrine dei negozi o le finestre delle abitazioni.

In sequenza: Strada San Mauro, Via Bologna, Corso XI Febbraio, via Gioacchino Rossini, Via Madama Cristina (profondità 1,50 m), Via Nizza.





- Linea 10: da Via Giuseppe Massari (Nord) a Corso Luigi Settembrini (Sud). Il tragitto presenta solo fermate con copertura e spazio flessibile. Alcuni esempi, in sequenza: Via Chiesa Della Salute, Via Francesco Cigna, Piazza XVIII Dicembre, Corso Duca degli Abruzzi, Corso Giovanni Agnelli.





• Linea 16 CD: da Corso Massimo D’Azeglio (Est) a Corso Peschiera (Ovest): anche in questo caso tutte le fermate presentano la copertura e ampi spazi a disposizione, variabili in profondità e larghezza.

Alcuni esempi, in sequenza: Via Massimo d’Azeglio, Via Valperga Caluso, Corso Germano Sommeiller, Corso Einaudi.



Successivamente, sono state prese in considerazione anche altre fermate, non necessariamente di grandi linee:

- Via Fréjus, in corrispondenza di Piazza Adriano.



In questo caso la fermata è priva di copertura, ma presenta una piccola seduta a servizio dei cittadini. La larghezza del marciapiede misurata è di 1,80 m.

- Via Goffredo Casalis, angolo via Giovanni Carlo Cavalli.



In questo caso la fermata presenta solo il cartello di indicazione della linea. La larghezza del marciapiede misurata è di 1,60 m, ma la posizione non consente di installare una pensilina poiché andrebbe ad oscurare le finestre delle abitazioni.

- Via Monginevro, angolo Via Reano.



La fermata non presenta alcuna copertura, ma solo una seduta e la profondità è di 2,50 m. Inoltre è rialzata rispetto al piano stradale.

- Corso Castelfidardo.



La fermata presenta la copertura, ma l'ampio spazio a disposizione permette di sostituirla o integrarla con il nuovo modulo pensato.

- Corso Vittorio Emanuele II, angolo Via Cesana.



Anche in questo caso la fermata è spaziosa e flessibile, collocata su un marciapiede dalla profondità maggiore di 3,20 m.

Dall'analisi effettuata emerge che la copertura delle fermate risulta avere lo stesso ingombro in ciascuna di essa, laddove possibile. Al contrario, se lo spazio risulta non sufficientemente ampio, non vi è alcuna protezione dalla pioggia, ma solo il cartello di indicazione della linea.

Tra le tipologie individuate, quelle più comuni sono due:

- tipologia A: fermata posizionata su un marciapiede rialzato rispetto al piano stradale, di dimensioni ampie (3,20 m o più) che presentano la copertura e la seduta;
- tipologia B: fermata posizionata su marciapiede rialzato rispetto al piano stradale, con profondità compresa tra 1,50 e 1,80 m, che solo in alcuni casi presenta la copertura.

Basandosi su queste due tipologie, A e B, vengono proposte due alternative che possano adattarsi allo spazio a disposizione e fornire una copertura, utile soprattutto nei giorni molto caldi o molto piovosi. Il prototipo sarà modulare, per garantire la flessibilità necessaria per adattarsi alle dimensioni dello spazio a disposizione e delle condizioni ambientali, di ombreggiamento e di ostruzione: infatti, per captare la radiazione solare necessaria i pan-

nelli saranno ruotati in modo opportuno. Inoltre, potrà disporre o meno di una seduta al suo interno a seconda dei casi. In particolare: per la prima tipologia il modello disporrà di sedute, vista la disponibilità spaziale; per la seconda tipologia, invece, verrà fornito uno spazio coperto e riparato privo di sedute, in modo da non impedire il passaggio.

Il presente studio si sofferma su tre differenti casi localizzati all'interno della città, dei quali si andranno a studiare le caratteristiche per poter definire le condizioni in cui si andrà a collocare il prototipo.

4.2 Primo caso

Il primo luogo scelto si colloca in una zona della periferia Sud-Ovest della città, Mirafiori Sud, che è uno dei più grandi quartieri della città. Qui negli anni Sessanta ci fu un aumento della popolazione a causa di migrazioni interne, con conseguente costruzione di nuove abitazioni. Si decise di migliorare la qualità di vita in questa zona e la rete dei trasporti pubblici. Per questo, pur essendo una zona periferica è molto trafficata, ma il tessuto urbano risulta essere meno denso di quello che caratterizza altri quartieri. Specificatamente, la zona scelta si trova nei pressi dello stabilimento FIAT, dove sono presenti ampi viali alberati ed in cui vi è il passaggio della linea del tram numero 10.



[63] Google Maps - <https://www.google.it/maps/preview>

4.3 Secondo caso

La seconda collocazione individuata riguarda il quartiere Cenisia, posto nella zona centro-occidentale della città. Il tessuto urbano è molto fitto, ben collegato con il centro cittadino e ricco di piste ciclabili, ma la vegetazione è praticamente assente ad eccezione dei viali alberati che delimitano il quartiere. In particolare, ci si colloca in via Fréjus, angolo Corso Racconigi, una via piuttosto stretta ed affiancata da edifici alti cinque piani, in cui passa la linea dell'autobus numero 68.

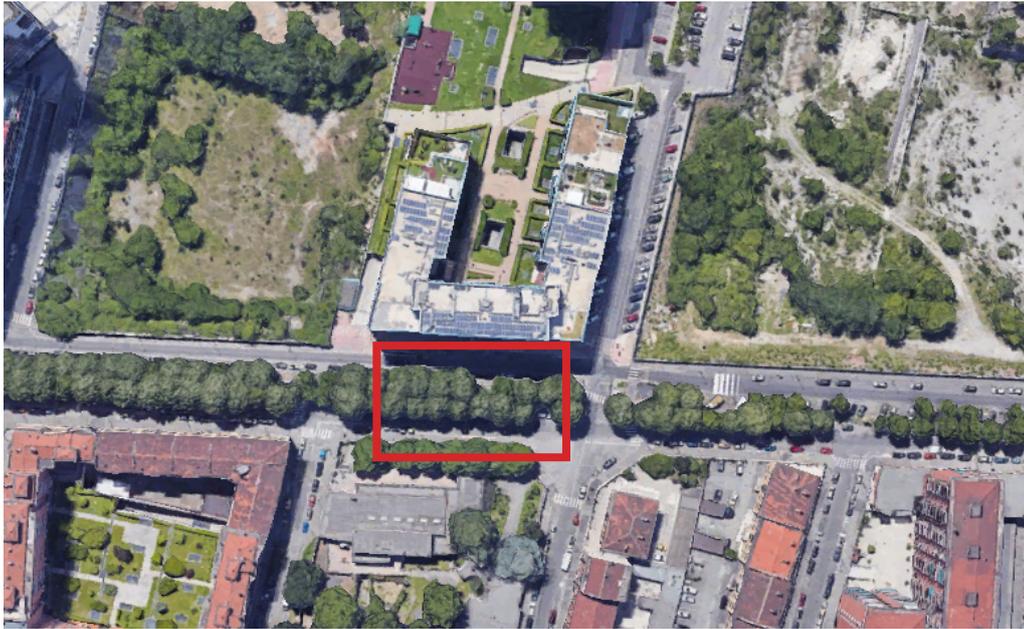


[64]

4.4 Terzo caso

Il terzo caso da analizzare si colloca al limite Sud del quartiere Madonna di Campagna, in via Verolengo, dove passa la linea dell'autobus numero 72. Qui il tessuto urbano non risulta essere particolarmente fitto, ma gli edifici esistenti hanno un'altezza piuttosto elevata.

[64] Google Maps - <https://www.google.it/maps/preview>



I tre luoghi offrono differenti scenari in cui effettuare le analisi, caratterizzati da una percentuale di ostruzione diversa:

- nel primo caso la fermata non presenta particolari impedimenti al passaggio della luce oltre agli alti alberi su entrambi i fronti, i quali però ombreggiano soprattutto nel periodo caldo, quando le chiome si riempiono di foglie;
- nel secondo ci si trova in un contesto urbano fitto quindi con edifici sia alle spalle, sia di fronte alla fermata dei mezzi pubblici;
- l'ultimo caso, invece, mette insieme i primi due in quanto presenta vegetazione da un lato ed edifici dall'altro.

5. Criteri di sostenibilità

La progettazione è volta a raggiungere un buon livello di sostenibilità e rispetto per l'ambiente. Per questo motivo vengono selezionati alcuni tra i 17 SDG^[66] – Sustainable Development Goals – che costituiscono il cuore dell'Agenda 2030. Tali obiettivi vengono rispettati e raggiunti in modo diverso durante le diverse fasi di progettazione.

[65] Google Maps - <https://www.google.it/maps/preview>

[66] L'Agenda 2030 per uno sviluppo sostenibile - <https://www.eda.admin.ch/agenda2030/it/home/agenda-2030/die-17-ziele-fuer-eine-nachhaltige-entwicklung.html>

Tra quelli selezionati troviamo:



• Salute e benessere (n. 3)



• Acqua pulita e igiene (n.6)



• Energia pulita e accessibile (n.7)



• Città e comunità sostenibili (n.11)



• Consumo e produzione responsabili (n.12)



• Agire per il clima (n.13)

Successivamente, vengono attribuiti gli stickers (riportati nella tabella sottostante) alle varie fasi della progettazione in base numero degli obiettivi rispettati, mentre la progettazione in generale li rispetta tutti.

	Livello di sostenibilità buono: rispetta uno o due degli obiettivi selezionati
	Livello di sostenibilità medio-alto: rispetta tre o quattro degli obiettivi selezionati
	Livello di sostenibilità alto: rispetta cinque o tutti gli obiettivi selezionati

6. Progettazione



Gli obiettivi selezionati sono tutti rispettati:

- n. 3: la nuova pensilina è pensata per garantire la salute e il comfort di chi la utilizza;
- n. 6: tra le varie potenzialità delle microalghe vi è quella di purificare l'acqua, inoltre viene posta grande attenzione anche allo smaltimento dell'acqua piovana;
- n. 7: la pensilina è pensata per essere autonoma dal punto di vista elettrico e, quindi, indipendente dalla rete pubblica grazie all'impianto fotovoltaico;
- n. 11: la struttura è sostenibile perchè, basandosi sul concetto di Design for Deconstruction, utilizza giunti reversibili ed elementi riutilizzabili;
- n. 12: la produzione di tutti gli elementi viene il più possibile standardizzata;
- n. 13: essendo tutti gli elementi riutilizzabili, si riduce la produzione futura.

Per la messa a punto del nuovo modello si predilige l'utilizzo di giunti a secco, facilmente smontabili e che offrono la possibilità di essere riutilizzati successivamente.

La tipologia di PBR selezionata è quella a cuscino, che permette di creare un modulo ripetibile, che segue la struttura portante in bambù. Il materiale di cui si compone il pannello è l'etilene tetrafluoroetilene (ETFE), che presenta le caratteristiche necessarie per resistere alle condizioni climatiche della città di Torino, inoltre questo materiale consente di realizzare forme curve, ondamentali per evitare che le microalghe si accumulino negli spigoli e per facilitarne la pulizia. In copertura alla pensilina pensata, si andranno ad alternare moduli di fotobioreattore e moduli di pannelli fotovoltaici, che avranno la stessa forma, ma colori diversi, in modo da creare un disegno piacevole alla vista, oltre che ad essere efficienti per il funzionamento del sistema stesso. La fase liquida è rappresentata dalle acque reflue, proveniente dall'industria, dagli allevamenti o dalla pioggia. È utile che venga effettuato un controllo per verificare quali e in quale quantità sono i nutrienti presenti, in modo da poter apportare delle modifiche qualora sia necessario. Per quanto riguarda, invece, il trasferimento di massa e la fornitura di CO₂, quest'ultima è necessaria durante il processo di fotosintesi e deve essere trasferita dalla fase gassosa a quella liquida: viene introdotta nel sistema

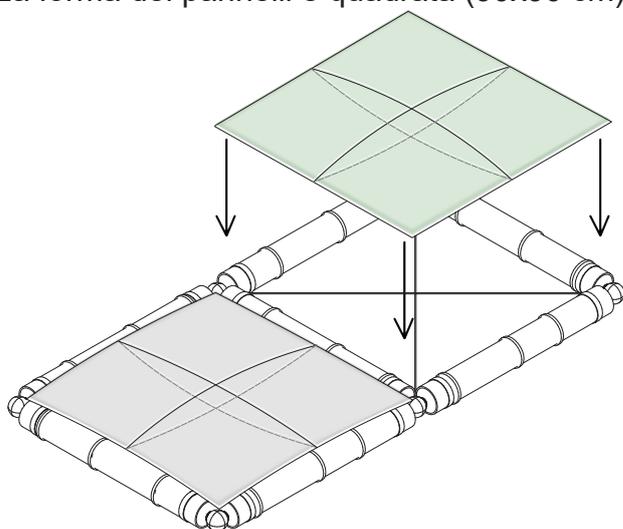
insieme all'afflusso d'aria che genera gorgogliamento e successivamente si miscela all'acqua. Da dove deriva, però, l'anidride carbonica? Ci sono diverse ipotesi:

- può essere prelevata dall'ambiente, in quanto l'atmosfera presenta una concentrazione di CO₂ sempre crescente negli ultimi anni;
- può derivare dai fumi di scarico di impianti industriali: per esempio, a Torino, la centrale termica Iride Energia "Politecnico" oppure la centrale termoelettrica di cogenerazione "Torino Nord".

Per fornire all'acqua le sostanze nutritive è necessaria una pompa per acquari, che permette alla fase liquida di circolare dal serbatoio agli elementi modulari integrati nella copertura della pensilina. L'energia elettrica necessaria per l'attivazione di tale pompa è fornita dall'impianto fotovoltaico. Quest'ultimo è un sistema "monodirezionale lato produzione" poiché presenta l'accumulo tra i pannelli fotovoltaici e l'inverter, che trasforma la corrente continua in corrente alternata. Tipicamente, la coltura arriva alla massima densità nel giro di due o tre mesi: trascorso questo tempo si rende necessaria la sostituzione della soluzione liquida. L'immissione e l'estrazione della fase liquida avviene dal serbatoio. Il serbatoio presenta conformazioni diverse a seconda dei luoghi in cui la copertura dovrà essere posizionata.

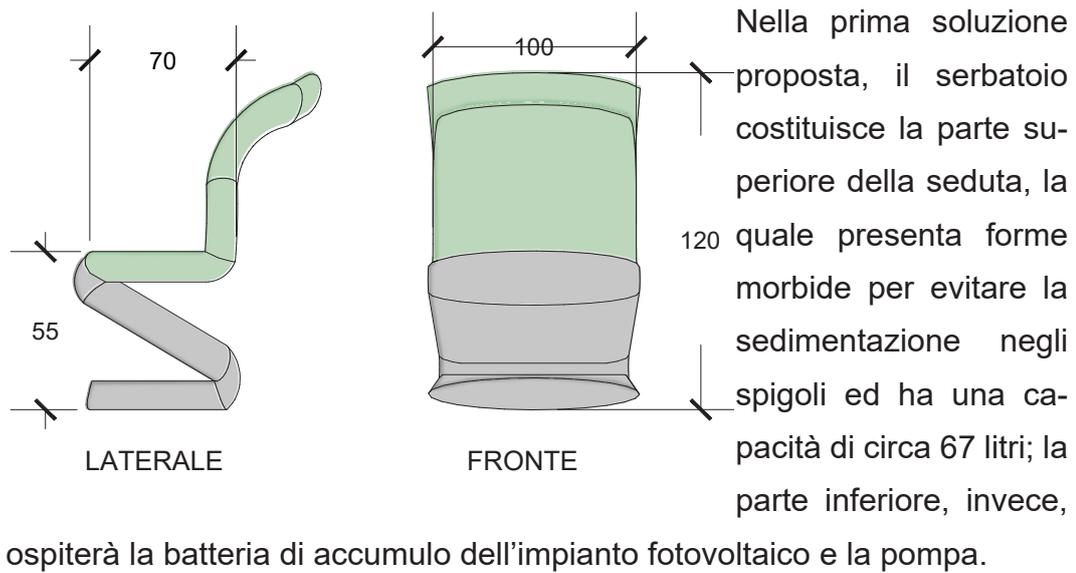
In entrambi i casi, da tali elementi avranno inizio i tubi che collegano il serbatoio ai fotobioreattori in copertura e quelli che, dall'accumulo, raggiungono i pannelli FV.

La forma dei pannelli è quadrata (90x90 cm).

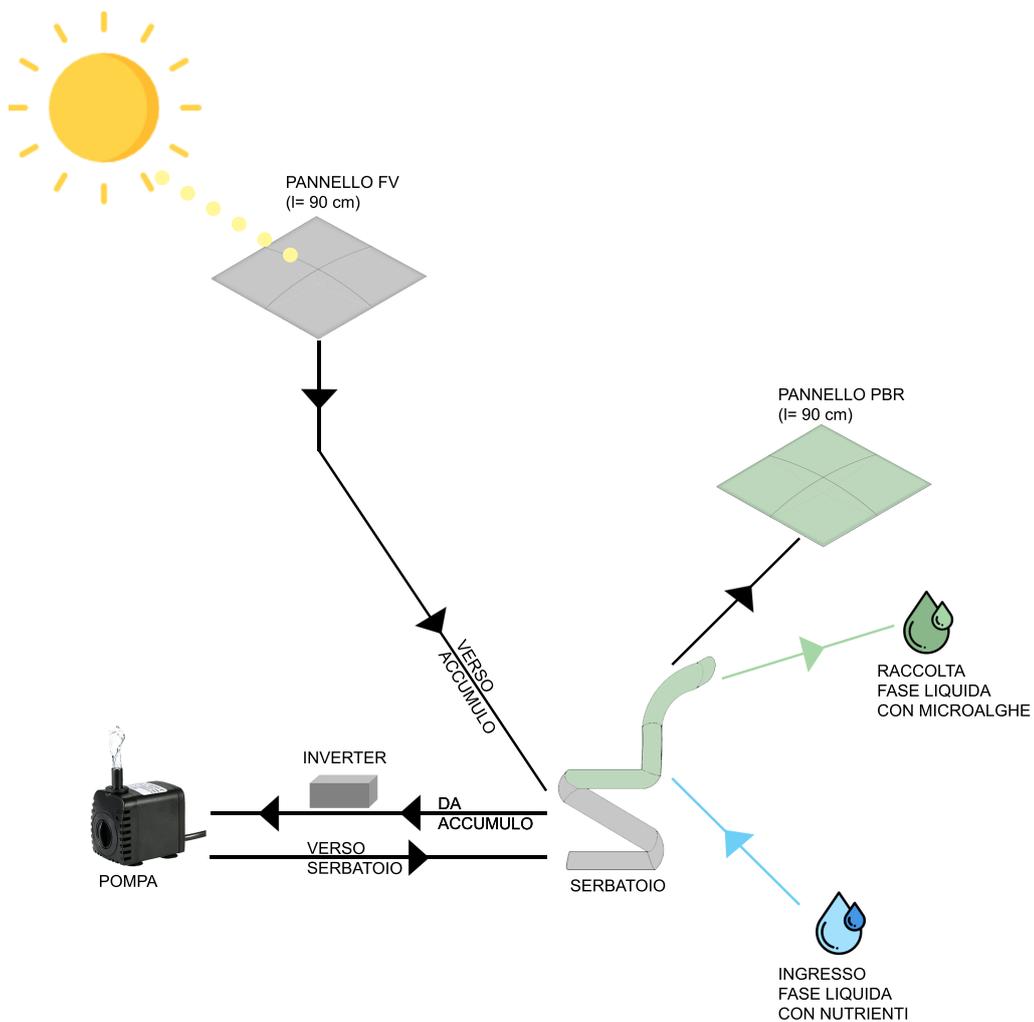


La forma dei cosiddetti cuscini è bombata, per evitare che le microalghe sedimentino e si accumulino.

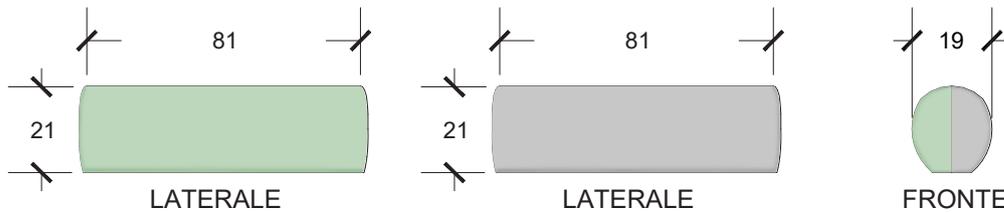
La forma dei cosiddetti cuscini è bombata, per evitare che le microalghe sedimentino e si accumulino.



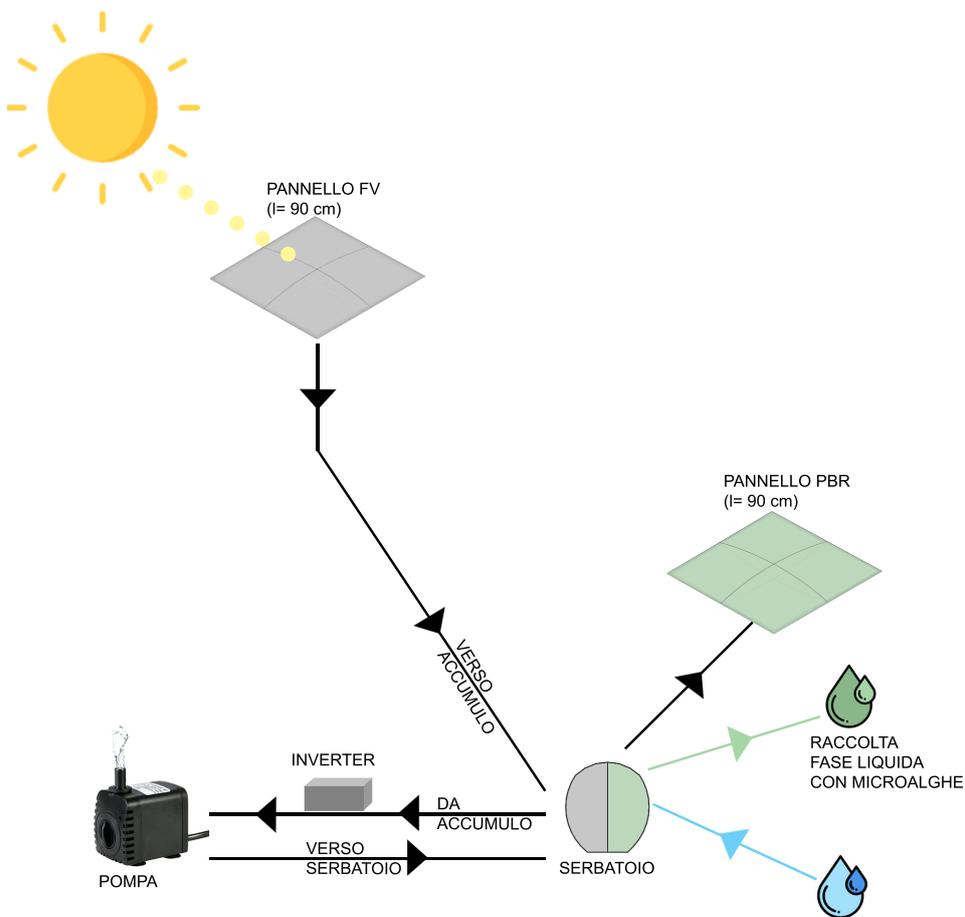
Di seguito viene riportato lo schema di funzionamento riguardante la prima soluzione, applicabile alle fermate più spaziose:



La seconda soluzione, invece, presenta un elemento di forma cilindrica che viene installato tra i due basamenti in cls su cui poggiano i montanti della struttura, per evitare di intralciare il passaggio. La sua capacità è di circa 28 litri ed anche in questo caso sarà diviso in due parti: una per la funzione di serbatoio (circa 14 l) e l'altra per ospitare al suo interno gli elementi necessari al funzionamento del fotovoltaico e della pompa.



Di seguito viene riportato lo schema di funzionamento riguardante la seconda soluzione, applicabile alle fermate meno spaziose:



Successivamente, in altra sede, la fase liquida può essere filtrata con i mezzi

opportuni (ad esempio membrane filtranti) e reintrodotta nel sistema oppure utilizzata per altri scopi come l'irrigazione; anche le microalghe, raccolte e separate dalla soluzione liquida, potranno essere utilizzate in altri settori.

Per quanto riguarda le altre componenti:



La pompa scelta è la stessa che si utilizza per gli acquari.

[67]

Dimensioni [cm]	6,5 x 12 x 9,5
Potenza [W]	16
Flusso massimo [l/h]	150



La batteria di accumulo, invece, è proporzionale alla potenza dei pannelli FV.

[68]

Dimensioni [cm]	48,3 x 17,0 x 23,85
Temperatura di immagazzinamento [°C]	- 15 °C < T < 40 °C
Capacità [Ah]	100/199
Tensione [V]	12

Di seguito vengono riportati alcune viste renderizzate che riprendono la pensilina nel complesso.

[67] Acquario in casa - <https://www.acquarioincasa.it/category/prodotti-per-acquario/>

[68] Solar Energy Point - <https://www.solarenergypoint.it/shop/kit-off-grid-300w-moduli-fotovoltaici-300w-polici-stallini-inverter-onda-pura-1kw-batterie-accumulo-300ah>



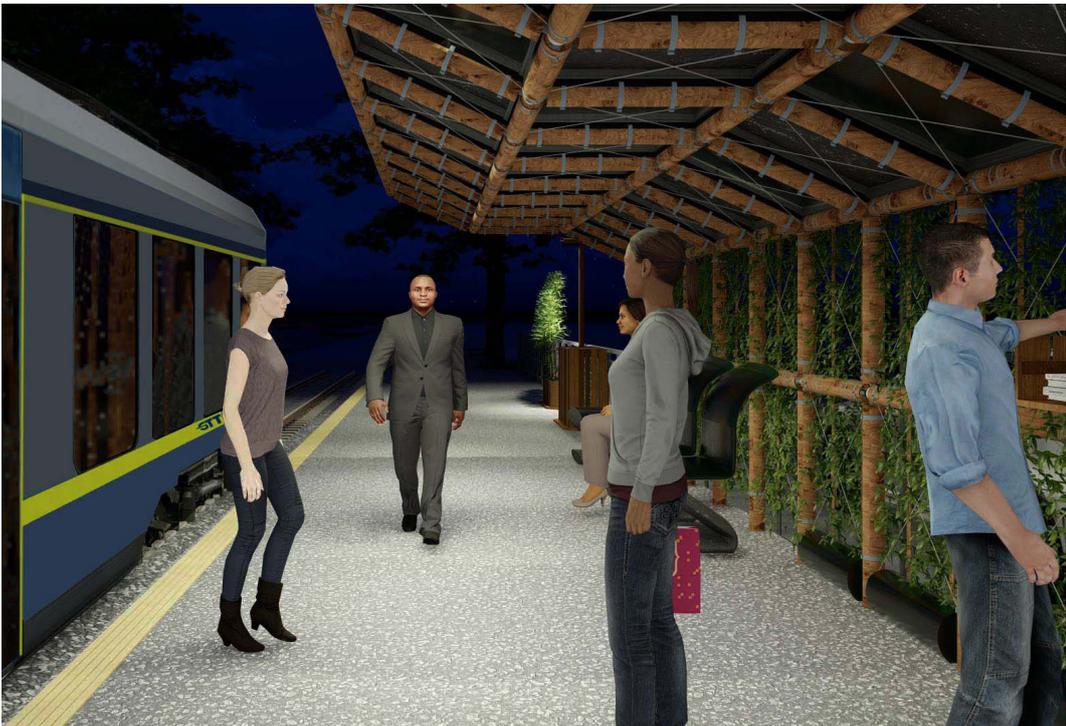
Tipologia A - vista diurna



Tipologia A - vista dalla strada



Tipologia A - vista dall'alto



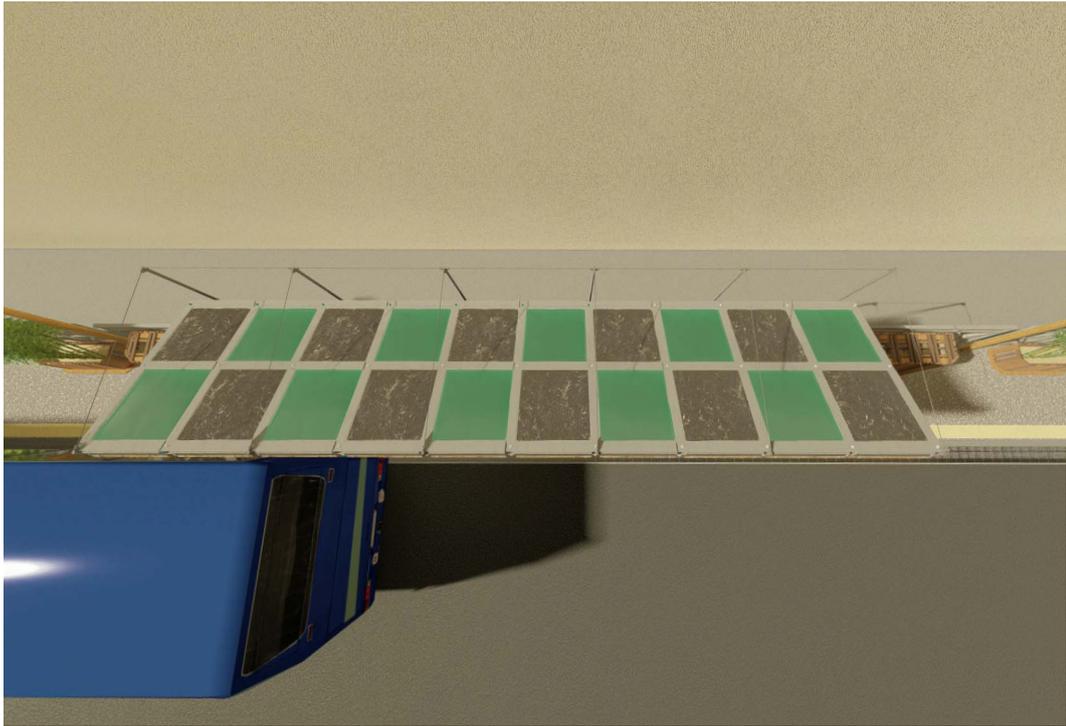
Tipologia A - vista notturna



Tipologia B - vista diurna



Tipologia B - vista dalla strada



Tipologia B - vista dall'alto



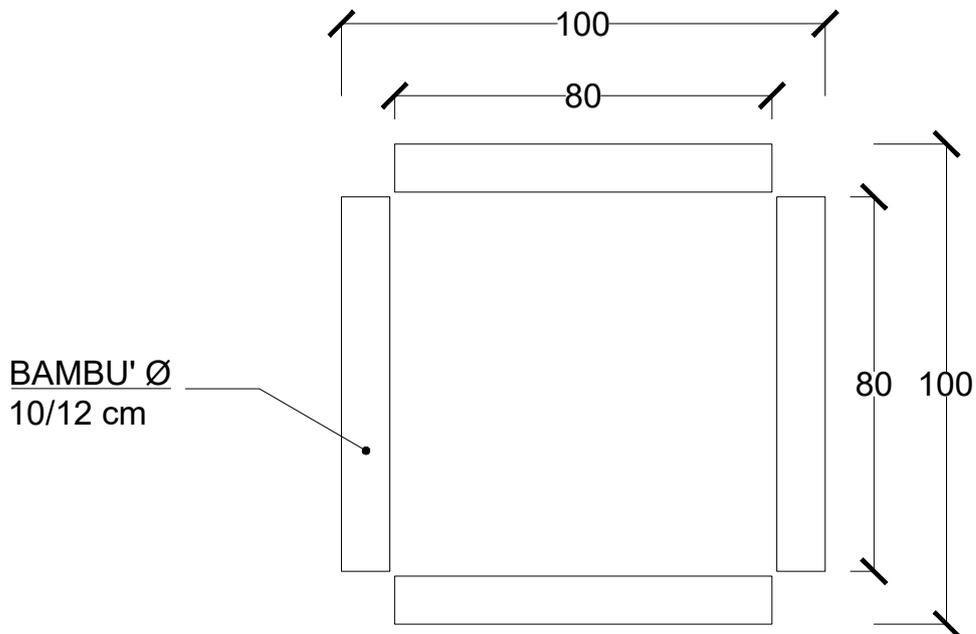
Tipologia B - vista notturna

Per quanto riguarda la costruzione della pensilina, è necessario considerare diversi aspetti:

- l'attacco a terra studiato per evitare la risalita capillare dell'acqua, che andrebbe a diminuire la durabilità del bambù;
- come saranno disposte le canne di bambù nella realizzazione del modulo ripetibile affinché risulti essere sufficientemente resistente.

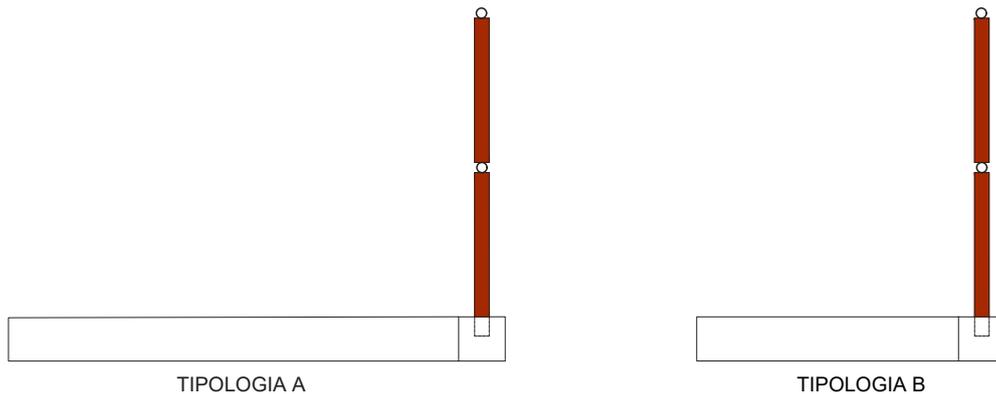
6.1 Struttura

Gli elementi della struttura portante della nuova pensilina sono canne di bambù del diametro di 10/12 cm, appositamente tagliate della lunghezza di 80 cm per la realizzazione dei moduli quadrati (100x100 cm, misura comprensiva di giunti).



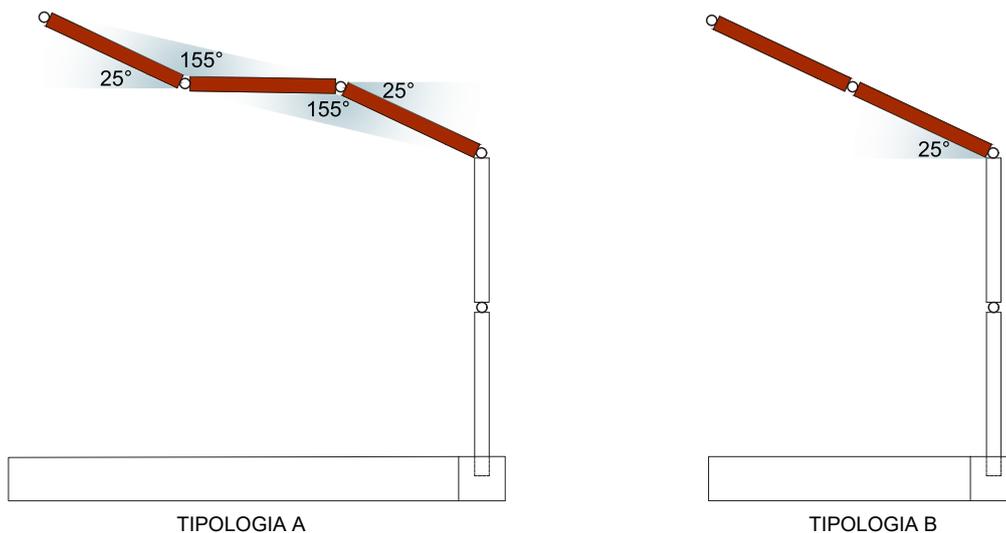
La pensilina deriva, quindi, dalla giunzione a secco di tali moduli sia in alzata, sia lateralmente.

In entrambe le tipologie individuate, i moduli a cui si appoggia la copertura sono due, disposti verticalmente.



Nel caso della fermata della tipologia A, posta su marciapiedi più ampi, la copertura della fermata è costituita da tre moduli: i due laterali sono speculari rispetto a quello centrale;

nel caso della fermata più ristretta, tipologia B, i moduli di copertura possono essere al massimo due, entrambi con lo stesso orientamento.



A questo punto, al primo modulo strutturale così creato, può esserne affiancato un altro e così via fino ad ottenere la pensilina dell'estensione desiderata, a seconda della disponibilità spaziale.

6.1.1 Giunti



Gli obiettivi rispettati sono tre:

- n. 11: la struttura è sostenibile perchè utilizza giunti reversibili e riutilizzabili;
- n. 12: la produzione dei giunti viene ridotta a quattro tipologie, quindi standardizzata;
- n. 13: essendo i giunti riutilizzabili, si riduce la produzione futura.

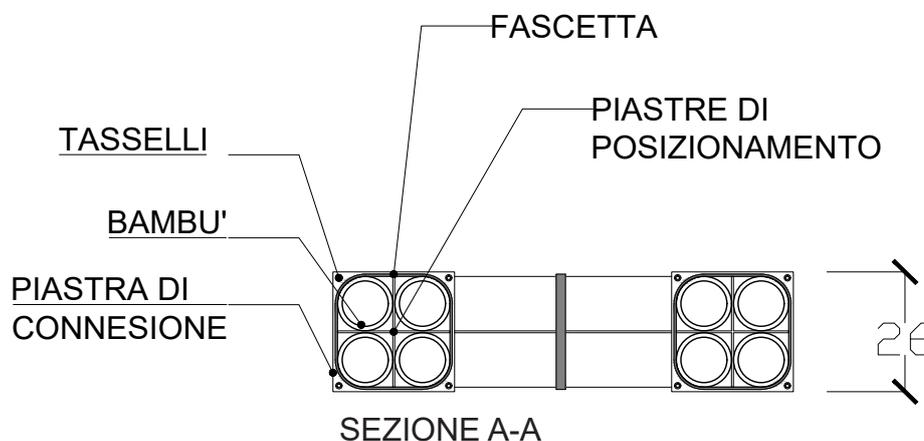
Come anticipato, l'assemblaggio della struttura avviene con l'utilizzo di ele-

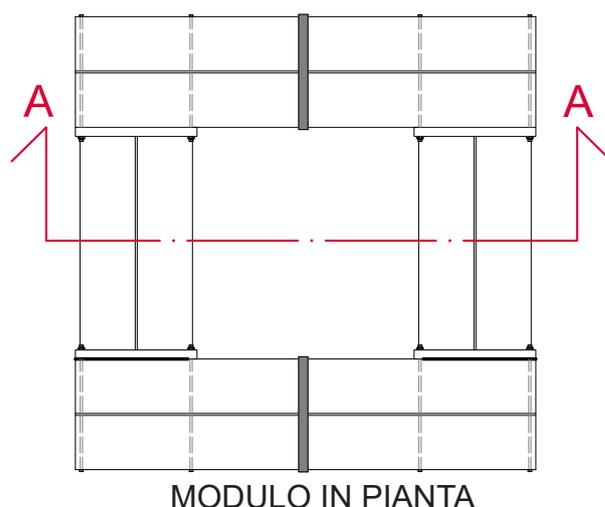
menti metallici, quindi a secco, che permettono di ottenere l'orientamento desiderato. In un'ottica di sostenibilità le connessioni realizzate in questo modo favoriscono il recupero ed il riciclo dei materiali e riducono i tempi di realizzazione.

Le tipologie di giunto possono essere varie, di seguito ne vengono illustrate alcune.

- Una prima tipologia consente di realizzare le strutture portanti attraverso fasci di quattro culmi di bambù, irrigiditi da una struttura interna costituita da due piastre di posizionamento in acciaio (della stessa lunghezza del culmo) disposte ortogonalmente tra loro. I culmi, poi, vengono fissati tra loro attraverso fascette metalliche disposte per tutta la lunghezza dell'elemento. Per realizzare il modulo di 100x100 cm, l'unione tra gli elementi in direzione ortogonale tra loro avviene attraverso l'utilizzo di piastre di connessione, disposte agli estremi di ciascun elemento, tassellate al bambù. A tale struttura dovranno, poi, essere agganciati i cuscini in ETFE con ulteriori connessioni metalliche.

PRO	CONTRO
<ul style="list-style-type: none"> • Resistenza maggiore ai carichi di punta 	<ul style="list-style-type: none"> • Impossibilità di realizzare una struttura visivamente leggera (a causa dell'ingombro) • Eccessivo peso da attribuire ai giunti (bambù + piastre ed elementi metallici) • Necessità di avere un ulteriore elemento per l'aggancio dei PBR • Difficoltà di giunzione tra moduli nelle varie direzioni



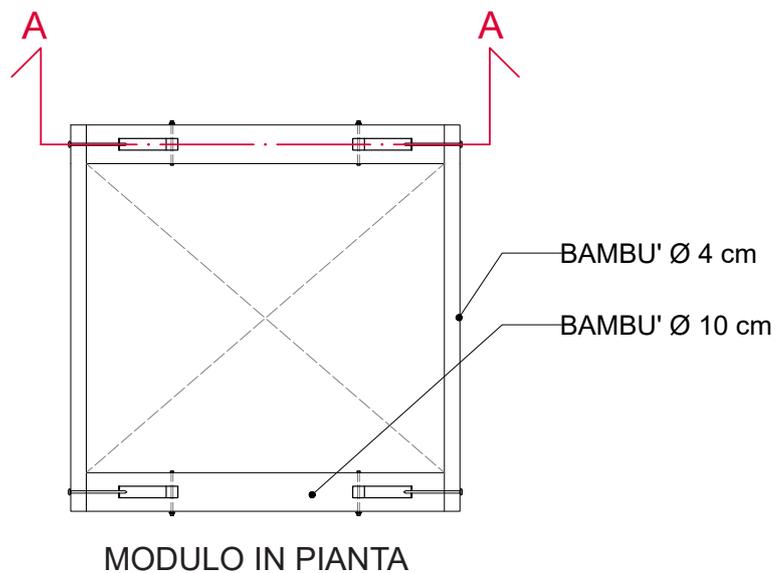
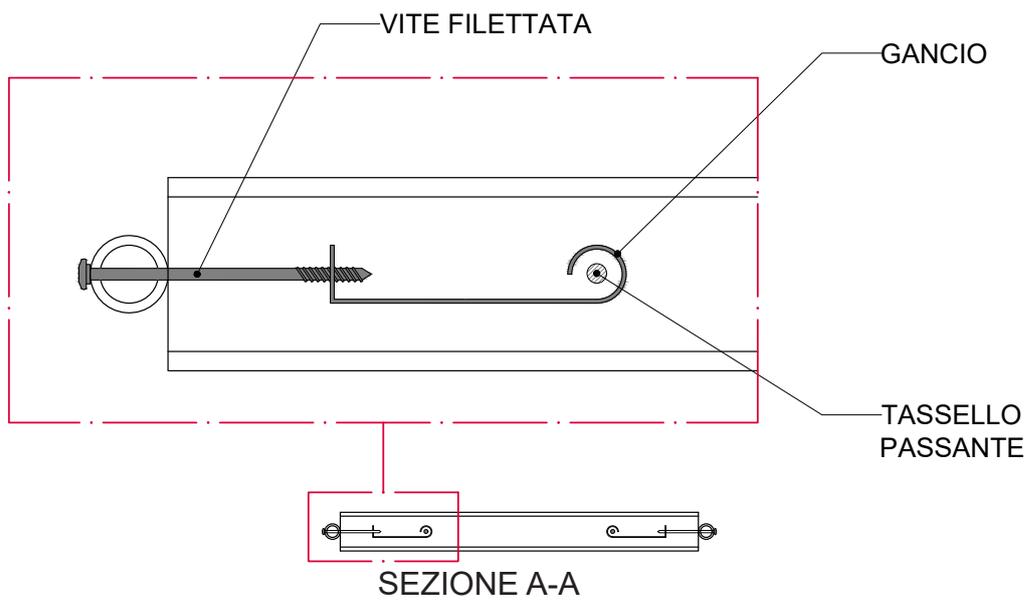


Questa tipologia non risulta essere adatta per la realizzazione della pensilina oggetto di questo studio, a causa del peso e delle dimensioni di ogni singolo modulo, che porterebbero ad avere giunti di grandi dimensioni.

- Una seconda tipologia prevede l'utilizzo di ganci, viti filettate e tasselli per l'assemblaggio del singolo modulo^[69].

PRO	CONTRO
<ul style="list-style-type: none"> • Elementi metallici per l'assemblaggio del modulo non particolarmente visibili dall'esterno • Spessore del modulo coincidente con il diametro del culmo 	<ul style="list-style-type: none"> • Foratura del bambù in molti punti • Maggiore rischio di frattura del materiale • Necessità di sottoporre i culmi a lavorazione per realizzare giunti a bocca di pesce • Difficoltà nel posizionamento dei tiranti ad X interni al modulo • Necessità di avere un ulteriore elemento per l'aggancio dei PBR, e quindi ulteriori forature • Problematiche legate all'infiltrazione dell'acqua • Non adatto a canne di bambù di diametro ridotto • Difficoltà di giunzione tra moduli nelle varie direzioni

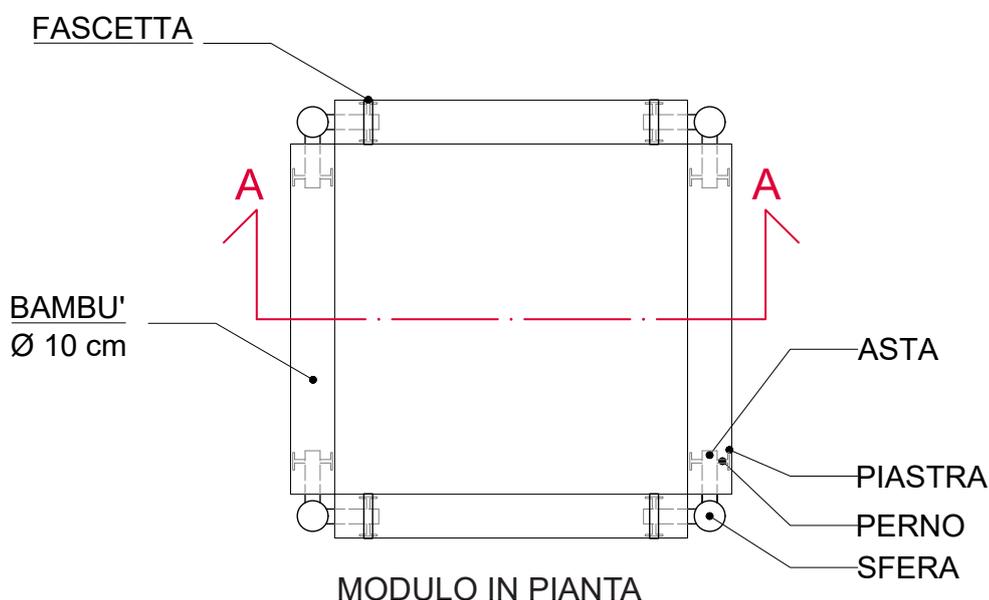
[69] Klaus Dunkelberg, IL 31, Bambus-Bamboo, 1985, Germania, p. 74



Quest'opzione non risulta essere ottimale a causa dei numerosi fori e della difficoltà di manutenzione e/o sostituzione di parti del modulo stesso.

- Una terza tipologia offre la possibilità di realizzare il modulo 100x100 cm attraverso nodi costituiti da sfera-asta-elementi filettati, detti giunti sferici.

PRO	CONTRO
<ul style="list-style-type: none"> • Possibilità di utilizzare un unico giunto per la struttura portante e per i PBR • Spessore del modulo coincidente con il diametro del culmo • Orientamento stabilito dal progettista • Bambù non forato • Impedimento di rotazioni e movimenti nel piano 	<ul style="list-style-type: none"> • Il giunto necessita di un irrigidimento opportuno



Nelle prime due opzioni si presentano problematiche legate all'unione dei vari moduli tra loro, poiché sarebbe necessario impiegare staffe che, però, presentano angolazioni predefinite. I giunti riportati nella terza ed ultima opzione, invece, permettono di utilizzare la stessa sfera per unire più moduli ed ottenere l'orientamento desiderato poiché sono elementi realizzati appositamente, ma alla stessa sfera possono essere connessi due moduli. Tuttavia, risulta essere la soluzione più adeguata a questo studio e, per questo, ulteriormente approfondita.

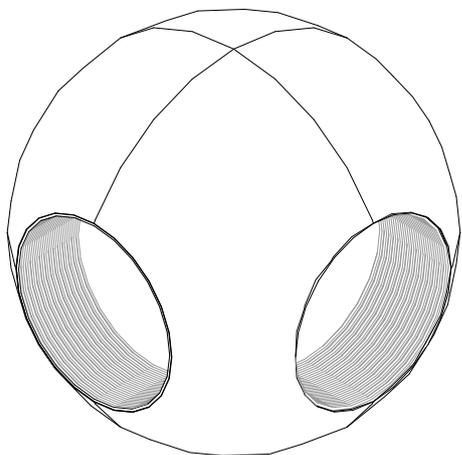
In riferimento ai prodotti dell'azienda Tetrasteel ^[70]:

- le sfere possono avere diametro compreso tra 70 e 418 mm e l'acciaio a

[70] Tetrasteel - <https://www.tetrasteel.com/il-sistema-a-nodi-sferici-tetrasteel/nodi-sferici/>

cui si fa riferimento presenta la sigla C45;

- le aste di collegamento tra sfera e bambù sono cave e a sezione circolare, in acciaio S235 o S355;
- le aste vengono fissate alla sfera in acciaio nei fori predisposti della sfera.

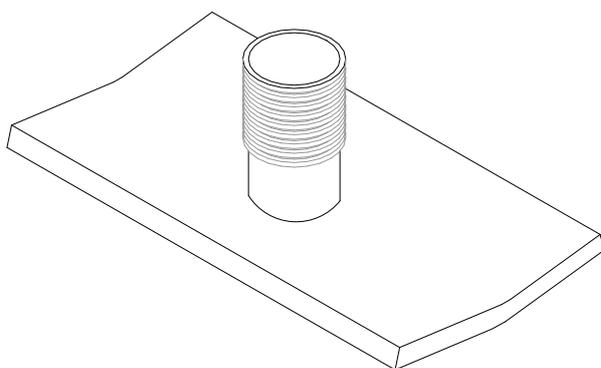
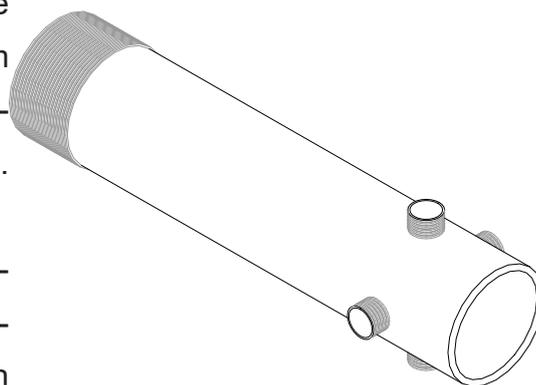


Le sfere presentano fori filettati nelle direzioni in cui si vogliono connettere le aste

Le aste avranno una lunghezza tale da entrare nel culmo per circa 10 cm (se fossero più in profondità, la manutenzione sarebbe più difficoltosa.

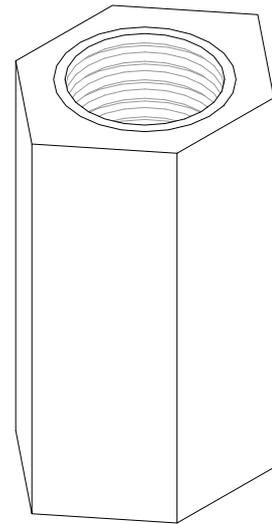
Ad un'estremità dell'asta è presente la filettatura che consente la connessione con la sfera, mentre all'estremità opposta (interna al culmo), in direzione ortogonale all'asta stessa,

sono presenti quattro barre filettate dal diametro di 8 mm pre saldate che consentono di connettere l'asta stessa con il bambù.

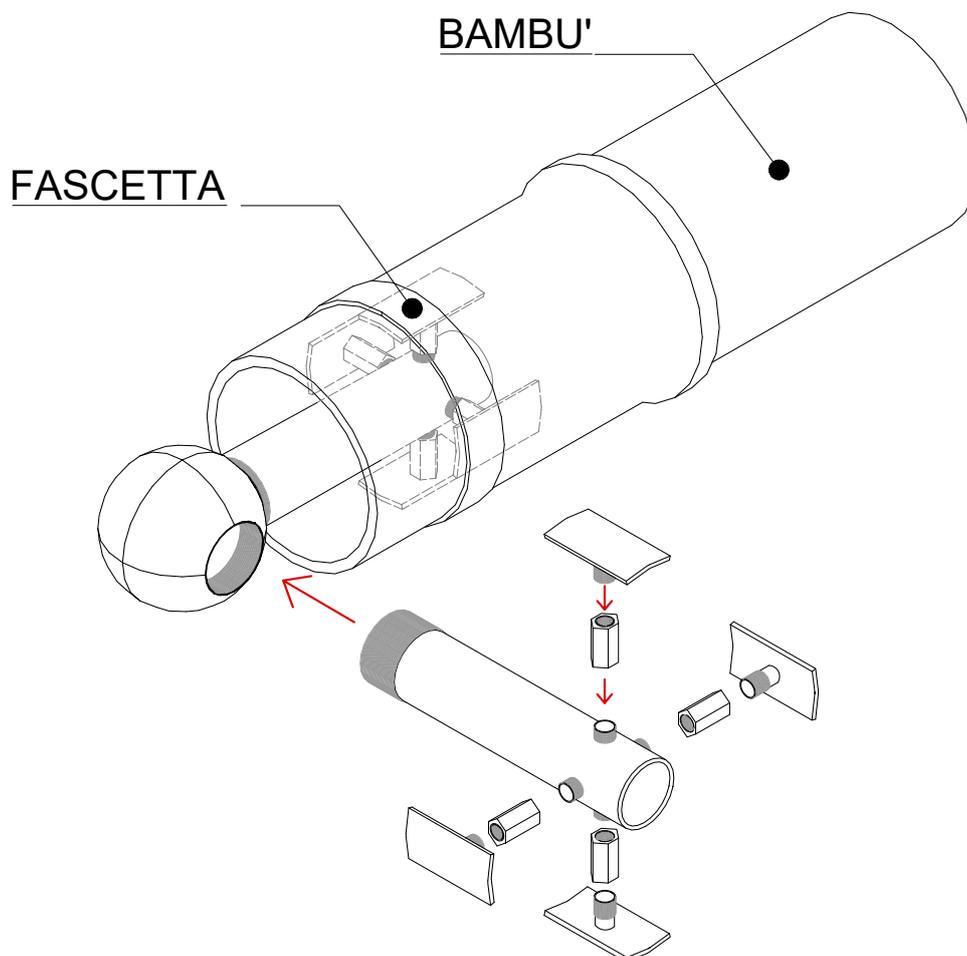


Per tale connessione è, però, necessario utilizzare ulteriori barre filettate dello stesso diametro (che chiameremo perni), i quali sono saldati a piastre di forma curva, per aumentare l'aderenza alle pareti del culmo.

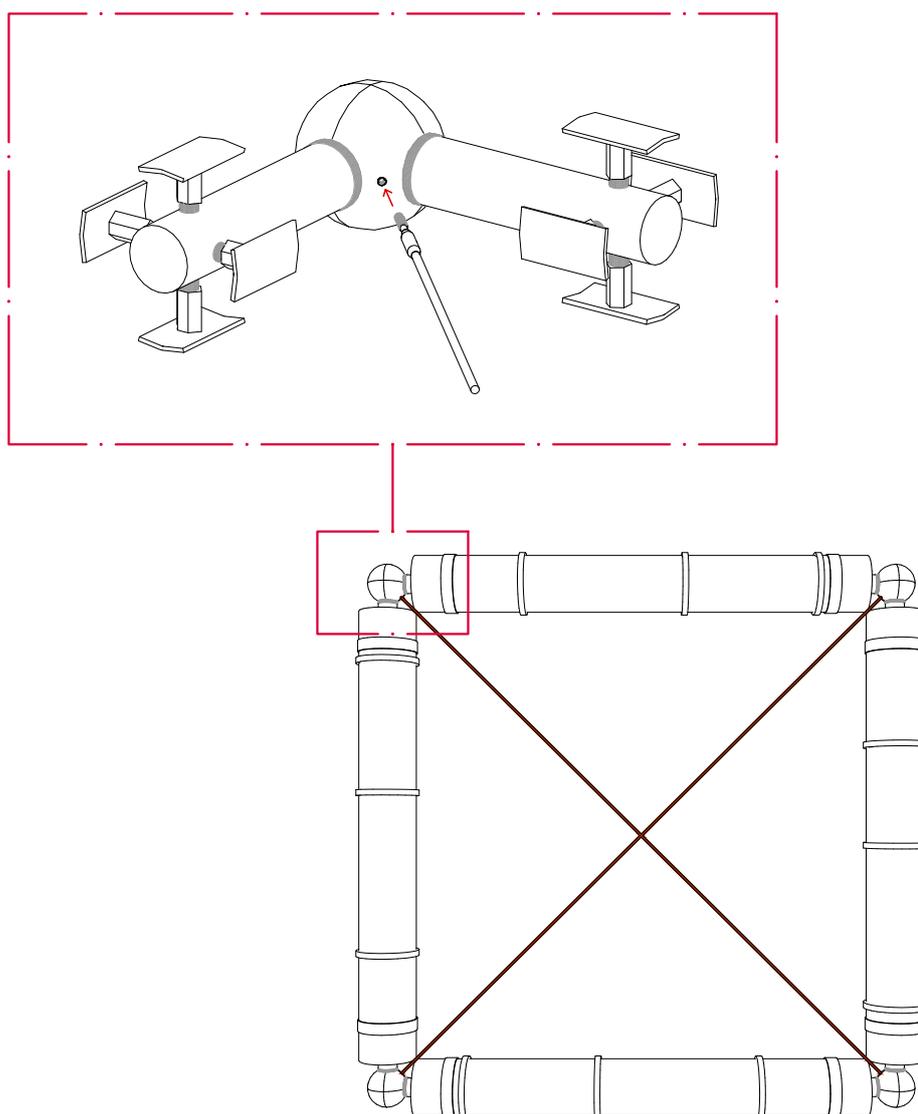
Quest'ultima, viene garantita grazie all'utilizzo di dadi che permettono di avvitare e svitare le barre filettate e i perni in base alla dimensione richiesta, in quanto i culmi di bambù non sono perfettamente regolari ed identici per tutto il loro sviluppo lineare.



Gli elementi costituiti da perni e piastre, però, spingono le pareti del culmo verso l'esterno, di conseguenza questa pressione viene contrastata da fascette stringitubo della larghezza di 2 cm disposte, esternamente, in corrispondenza delle piastre.



I giunti realizzati in questo modo riprendono lo studio di tesi realizzato nel 2007 da Simone Cantoni^[71], il quale utilizzava le piastre curve, i perni e i dadi, connessi ad ulteriori elementi metallici, a cui vengono aggiunti, in questo studio, gli elementi sferici. Inoltre, per motivi di stabilità e consolidamento, è necessaria la presenza di tiranti disposti ad X all'interno del modulo 100x100 cm. Tali tiranti sono costituiti da cavi in acciaio lucido e zincato ^[72] del diametro di 4 mm e portata di 320 kg; essi si connettono direttamente alla sfera mediante un terminale filettato.



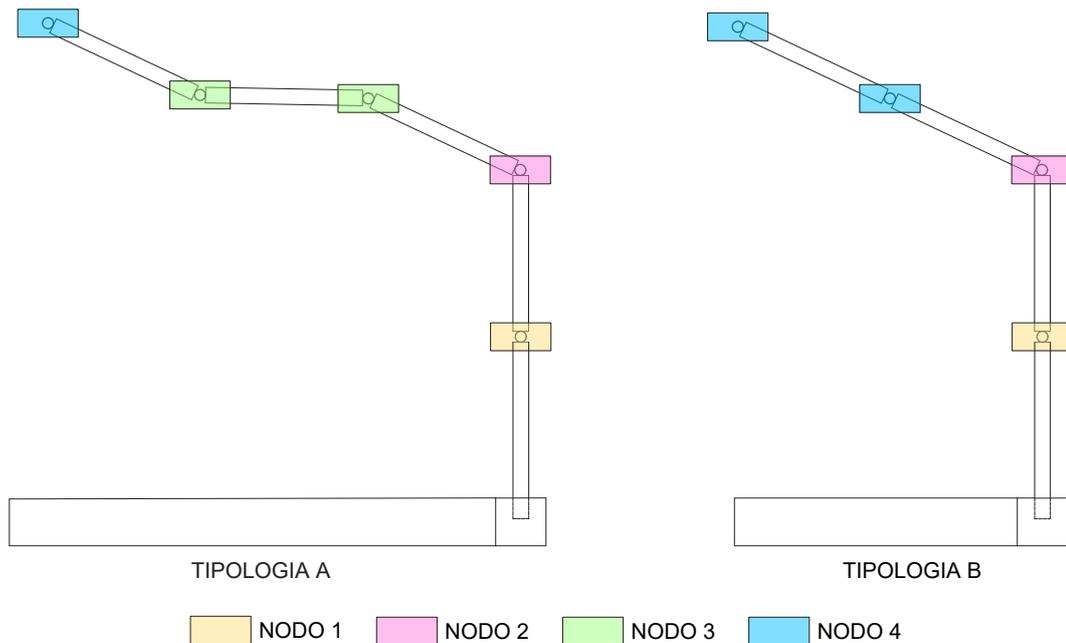
Lo stesso sistema di ancoraggio viene utilizzato per l'unione di più moduli

[71] S. Cantoni, *Il bambù nelle costruzioni: studio di un giunto reversibile per strutture reticolari in bambù*, Politecnico di Torino, Corso di laurea in Architettura, 2007.

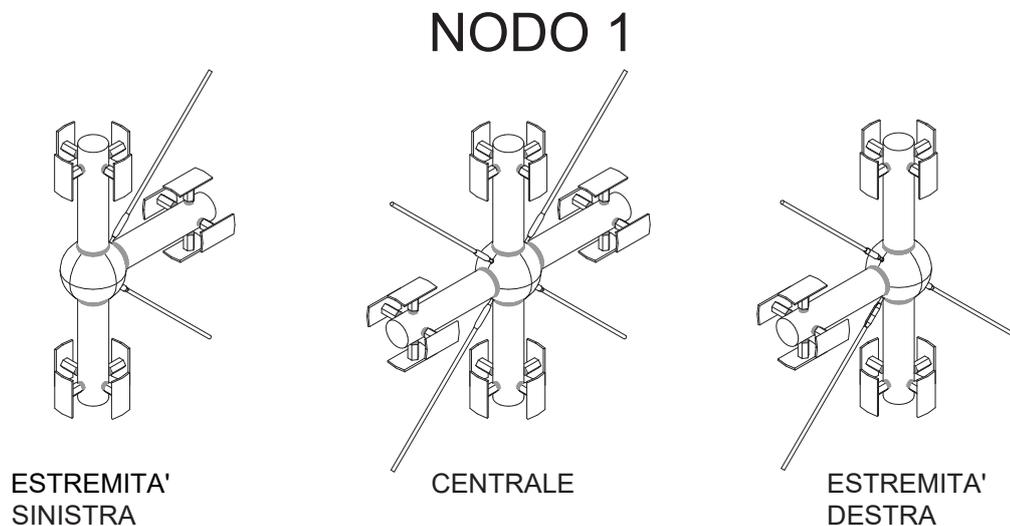
[72] Sirtef, catalogo funi in acciaio - <https://www.sirtef.it/sites/default/files/uploads/catalog/files/2955/catalogo-tiranti-e-accessori.pdf> p. 210

tra loro.

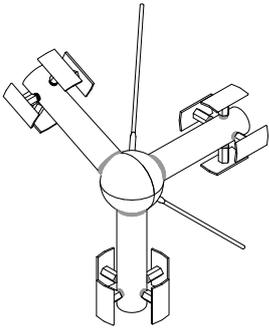
L'orientamento delle aste che si innestano nella sfera sarà dettato dall'andamento della pensilina, tuttavia si è cercato di razionalizzare la struttura per ridurre il numero di giunti da realizzare e favorire una sorta di "standardizzazione". Le tipologie di nodo individuate sono quattro, riportate nella figura sottostante.



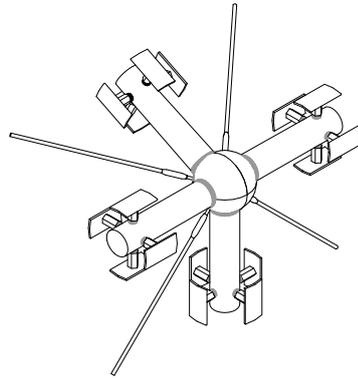
Per ciascuna tipologia di nodo vengono riportate tre rappresentazioni che raffigurano le tre configurazioni che uno stesso nodo può assumere a seconda della disposizione che ha all'interno della pensilina: all'estremità o centrale.



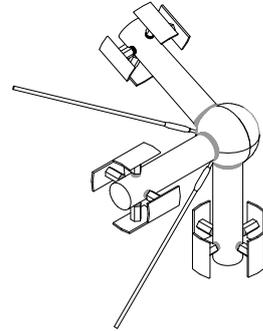
NODO 2



ESTREMITA'
SINISTRA

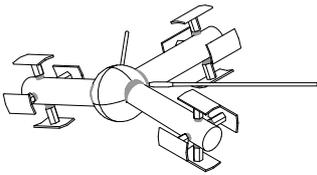


CENTRALE

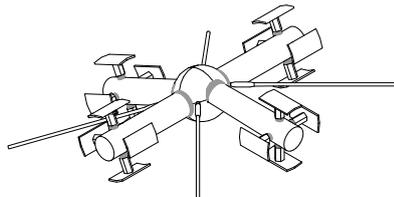


ESTREMITA'
DESTRA

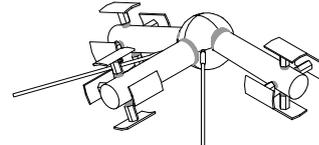
NODO 3



ESTREMITA'
SINISTRA



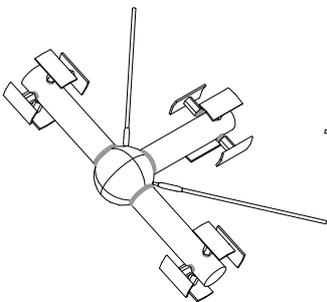
CENTRALE



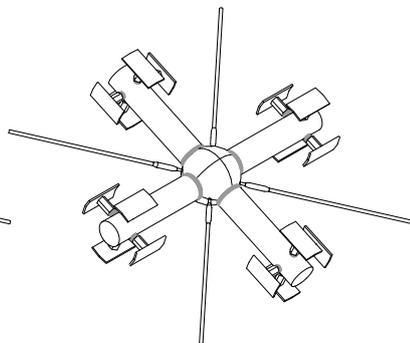
ESTREMITA'
DESTRA

Il nodo 3 viene utilizzato in due modi: così come è rappresentato e specchiato rispetto all'asse verticale.

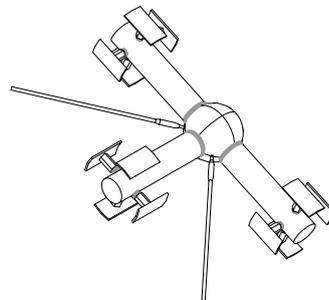
NODO 4



ESTREMITA'
SINISTRA



CENTRALE



ESTREMITA'
DESTRA

6.1.2 Irrigidimento della pensilina



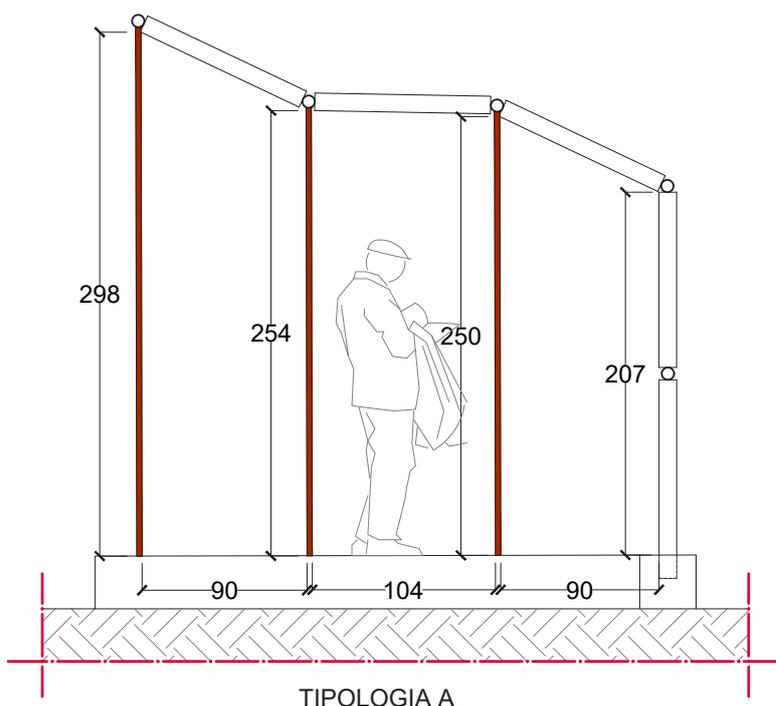
Gli obiettivi rispettati sono tre:

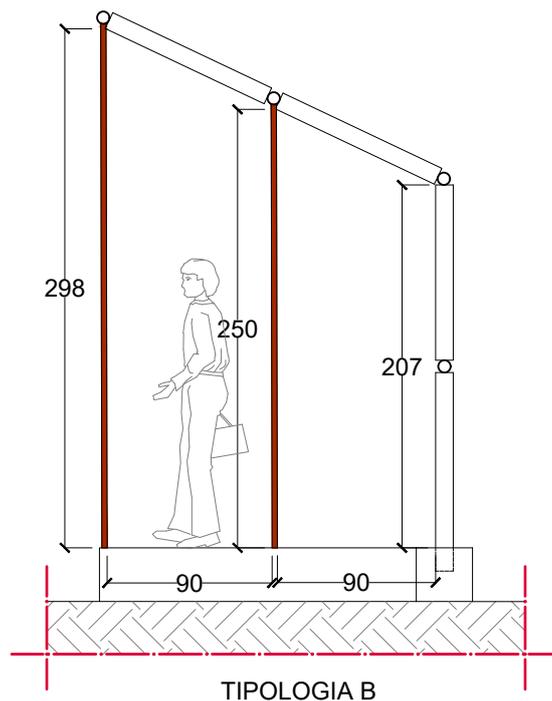
- n. 11: la struttura è sostenibile perchè gli elementi di irrigidimento possono essere smontati e riutilizzati;
- n. 12: la produzione degli elementi è standardizzata, in quanto sono tutti uguali;
- n. 13: essendo gli elementi riutilizzabili, si riduce la produzione futura.

Il progetto della pensilina prevede uno sbalzo di 3,20 m per la tipologia A ed uno sbalzo di 1,80 m per la tipologia B. Di conseguenza, si rende necessario, anche per motivi di sicurezza, un consolidamento della struttura portante che consenta di resistere alle sollecitazioni nelle tre direzioni dello spazio. Inoltre, si ricerca una soluzione non troppo pesante dal punto di vista visivo, poco invadente e che non sia di intralcio per la folla di persone che utilizza i mezzi pubblici.

Le possibilità di irrigidimento della pensilina sono due:

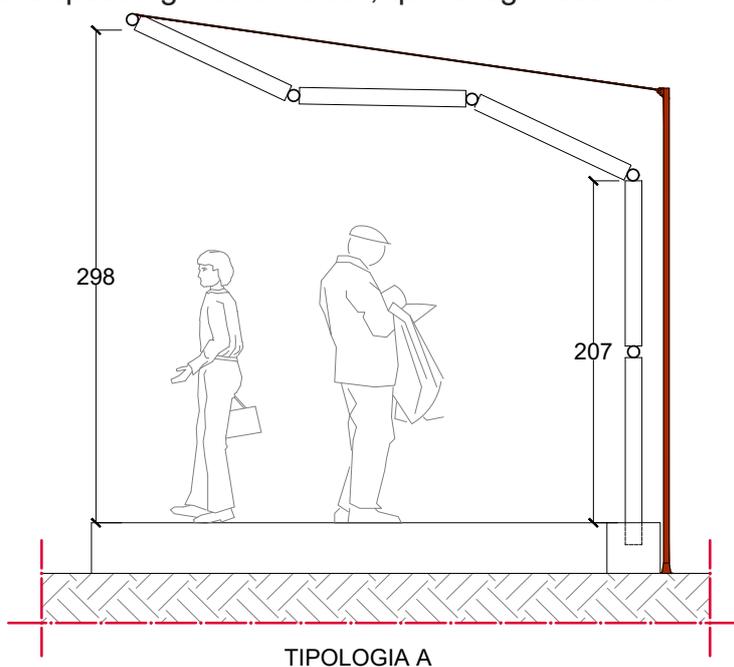
- utilizzo di puntoni disposti verticalmente al di sotto della copertura in corrispondenza di ogni giunto, che trasferiscono i carichi al terreno:

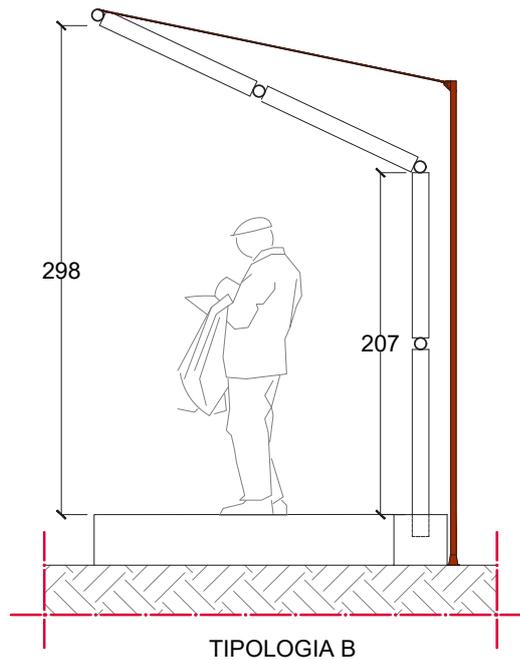




Tale soluzione non risulta essere ottimale poiché, sebbene lo spazio tra gli elementi metallici verticali sia ≥ 90 cm, essi costituirebbero un ostacolo per il passaggio delle persone che salgono/scendono dai mezzi pubblici.

- utilizzo di cavi metallici disposti esternamente alla copertura a formare un portale resistente alle sollecitazioni e che trasferisce i carichi al terreno. Tali tiranti saranno disposti ogni due moduli, quindi ogni due metri.





Il portale è costituito da un tubo in acciaio a sezione circolare del diametro di 33,7 mm e spessore di 2,6 mm e da un cavo in acciaio del diametro di 6 mm.

d x s mm	Peso kg/m	Sezione di passaggio cm ²	Sezione metallica cm ²	Momenti di inerzia	Moduli di resistenza	Raggi di inerzia
				Jx = Jy cm ⁴	Wx = Wy cm ³	ix = iy cm
33,7 x 2,6	2,010	6,380	2,540	3,090	1,840	1,100

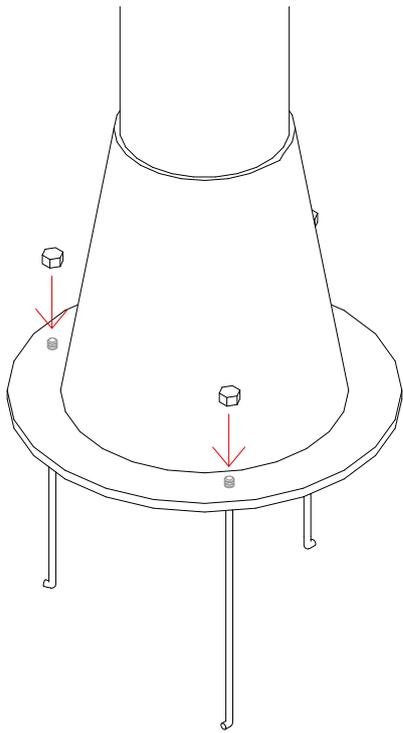
[73]

Diametro Diameter mm	Peso / 100 m Weight / 100 m [Kg]	Carico di rottura minimo garantito Minimum breaking load guaranteed			
		1770 N/mm ² kN	180 Kg/mm ² kg	1960 N/mm ² kN	200 Kg/mm ² Kg
3	3,4	4,9	500	-	-
4	5,3	9,07	925	-	-
5	8,9	13,7	1.400	17,6	1.800
6	11,4	22,1	2.250	25,5	2.600

[74]

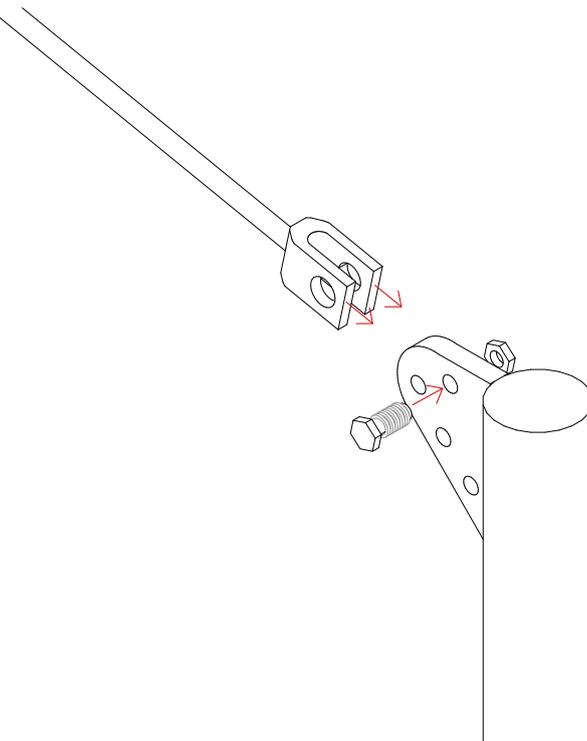
[73] Oppo - https://www.oppo.it/tabelle/a_elenco_tabelle.html

[74] Sirtef, Catalogo funi metalliche in acciaio - <https://www.sirtef.it/sites/default/files/uploads/catalog/files/2959/steel-wire-ropes-catalog.pdf>, pag. 6



Il profilato si connette ad un elemento a tronco di cono, che, a sua volta, si connette al terreno mediante tirafondi.

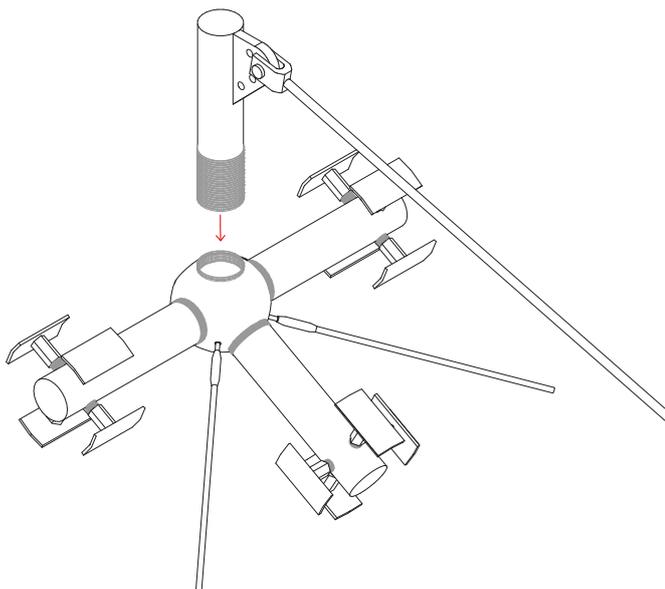
All'estremità superiore del tubo metallico è saldato un attacco per strallo^[75]. Esso consente di connettere un elemento a forcella^[76], dal quale partirà il cavo in acciaio.



La giunzione tra quest'ultimo e la pensilina avviene grazie ad un ulterio-

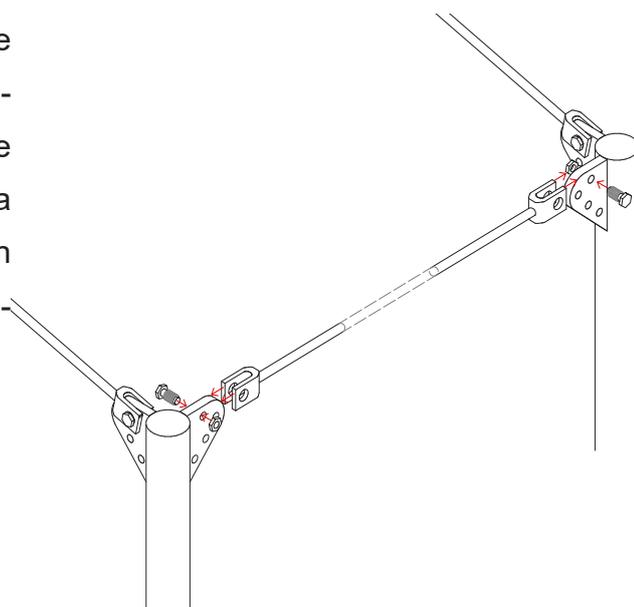
[75] Nautica Basile- <https://www.nauticabasile.it/ita/osculati/attacco-strallo-prua-in-acciaio>

[76] Sirtef, Catalogo funi metalliche in acciaio per applicaizoni strutturali - <https://www.sirtef.it/sites/default/files/uploads/catalog/files/2957/steel-wire-ropes-structural-applications-catalog.pdf>



re tubo metallico, filettato all'estremità inferiore e dotato di un attacco per strallo all'estremità superiore. La filettatura del tubo consente l'attacco alla sfera, sostenendo l'intera pensilina.

Come anticipato, i portali che sorreggono la pensilina dall'esterno sono disposti ogni due moduli e sono connessi tra loro mediante ulteriori cavi in acciaio delle stesse dimensioni.



6.2 Basamento



Gli obiettivi rispettati sono quattro:

- n. 3: indirizzando l'acqua piovana si garantisce la sicurezza degli utenti;
- n. 6: il basamento è pensato per evitare il più possibile gli allagamenti e favorire il drenaggio convogliando l'acqua piovana negli appositi sistemi;

- n. 12: per la realizzazione del basamento si utilizzano perlopiù materiali riciclati;
- n. 13: il rispetto dell'obiettivo precedente fa sì che venga ridotta la produzione di materiale da materie prime vergini, ottenendo un impatto positivo sull'ambiente.

I culmi di bambù sono molto resistenti agli attacchi biologici poiché le pareti contengono silice che funge da protezione, per questo motivo è più difficile che le sostanze penetrino trasversalmente in modo naturale; longitudinalmente, invece, essendo una struttura cava intervallata da nodi la penetrazione di sostanze dannose può avvenire più facilmente.

Di conseguenza, per evitare che l'umidità di risalita o, più in generale, la presenza di acqua vadano a danneggiare il bambù compromettendone la durabilità, è necessario che la struttura presenti dei basamenti puntuali su cui poggiarsi e che gli permettano di non essere direttamente a contatto con il terreno. Per questo motivo, si utilizzano i cosiddetti plinti a bicchiere. Quest'ultimi sono realizzati mediante un tubo in PVC dal diametro di 11 cm che contiene il culmo, il quale, essendo irregolare per natura, potrebbe non aderire perfettamente. Dove necessario, quindi, per far fronte a questa problematica sarà disposto uno strato di neoprene. Per determinare l'altezza (h) del tubo (cioè la profondità del bicchiere in cls) si fa riferimento alla UNI EN 1992-1-1 (EC2)^[77], la quale stabilisce che $h \geq 1,2 d'$, dove d' indica il diametro dell'elemento strutturale da contenere.

In questo caso, essendo $d' = 10$ cm, h dovrà corrispondere ad almeno 12 cm.

Il tutto sarà contenuto da un ulteriore tubo in PVC, dal diametro di 30 cm riempito da un getto in calcestruzzo.

La profondità (t) a cui disporre il plinto, viene determinata in funzione dello sforzo normale (N) e del momento flettente (M). La stessa norma fa una distinzione:

Se $M / (N \cdot d'') \leq 0,15$; $t \geq 1,2 \cdot d''$

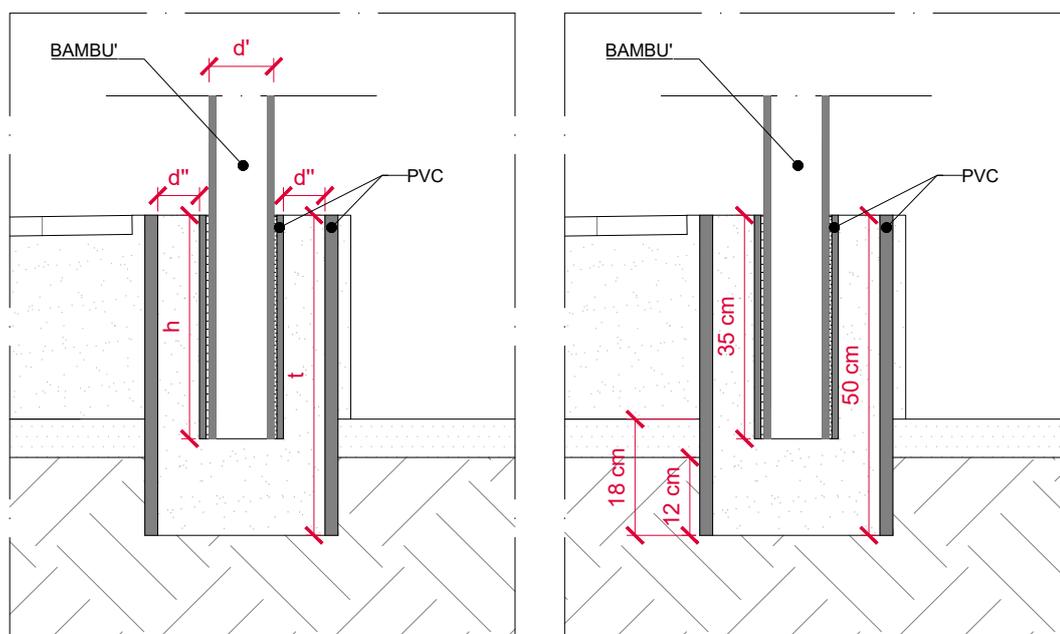
Se $M / (N \cdot d'') > 2$; $t \geq 2 \cdot d''$ dove d'' indica lo spessore dello strato di cls con-

[77] <https://www.architetturestrutturale.it/en/blog/item/31-hierarchy-of-resistances-in-precast-structures-pocket-foundations.html>

tenuto tra i due tubi in PVC (in questo caso = 6,5 cm).

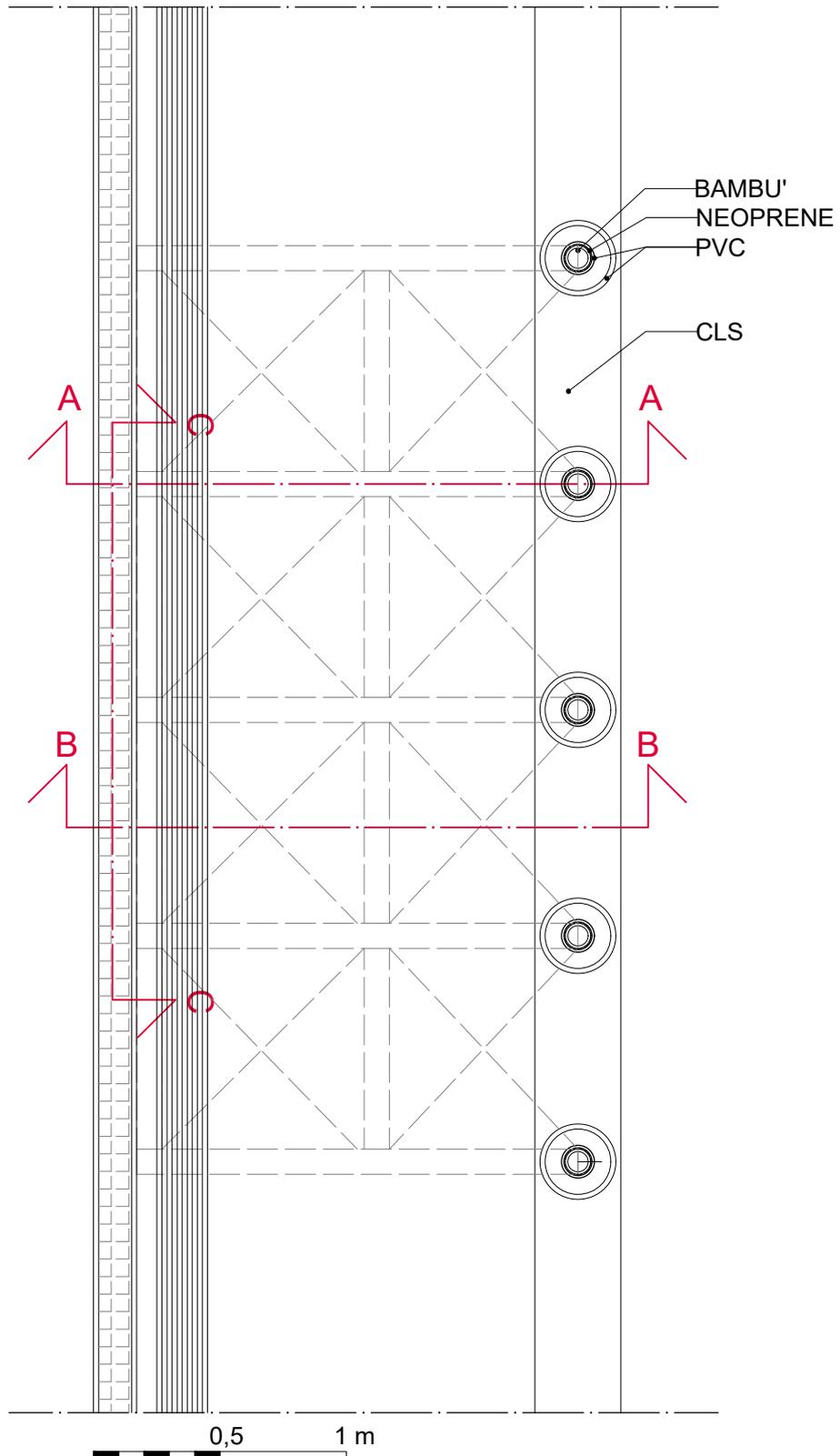
A titolo cautelativo, viene considerato il caso peggiore tra i due riportati sopra e di conseguenza la profondità minima del plinto corrisponde a $t = 1,2 * 6,5 = 7,8$ cm.

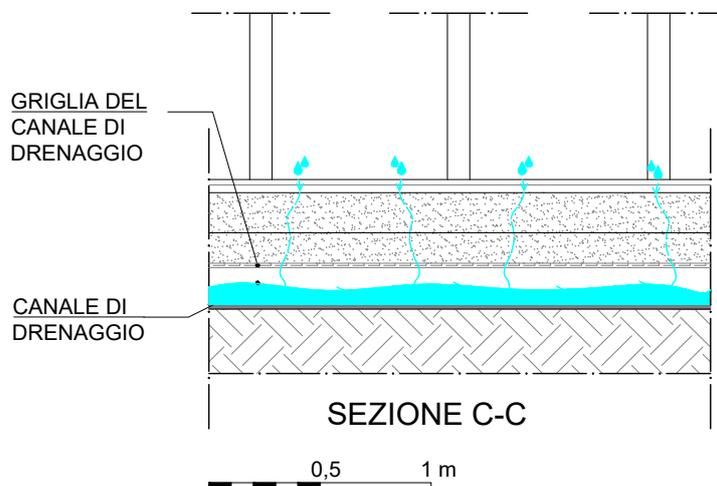
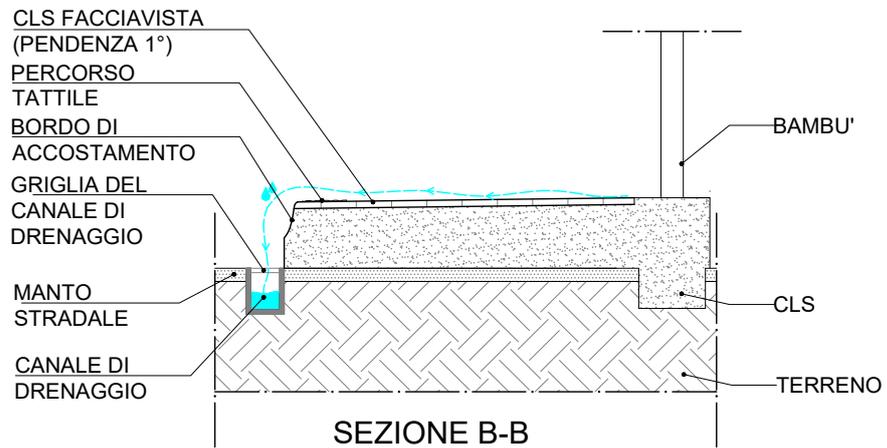
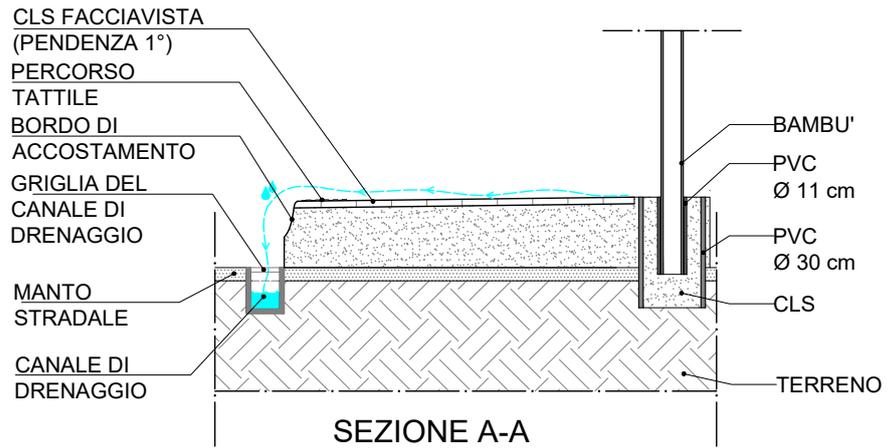
Le dimensioni di h e t calcolate vengono abbondantemente rispettate, come riportato nel disegno sottostante:



Utilizzando questa tipologia di basamento puntuale, il culmo risulta essere protetto dall'acqua piovana. Per allontanare ulteriormente l'acqua piovana dal bambù, la banchina su cui si posiziona la pensilina avrà una pendenza di 1° che indirizza l'acqua piovana dalla parte opposta, dove sarà presente la griglia con il corrispondente canale di drenaggio collegato agli scarichi delle acque grigie. La stessa tipologia di basamento drenante viene impiegato per i lampioni di illuminazione pubblica.

Di seguito vengono riportate la pianta e le sezioni segnalate in pianta, fuori scala.





In un'ottica di abbattimento delle barriere architettoniche, come descritto dalla Legge 13/1989, sono stati inseriti:



- i bordi di accostamento, che facilitano l'avvicinamento al marciapiede da parte dei mezzi di trasporto;



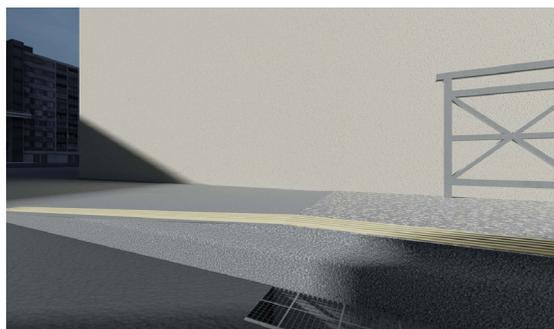
- i percorsi tattili, che segnalano la direzione da seguire e/o i limiti non valicabili;



- La zoccolatura di contrasto, che segnala la presenza di elementi aggettanti, i quali presentano angoli smussati.

Questo permette alle persone ipovedenti di essere maggiormente autonome nell'utilizzo dei mezzi pubblici.

Per quanto riguarda, invece, le barriere architettoniche per le persone con capacità motoria ridotta o impedita, sono previsti gli spazi di manovra e per il passaggio di almeno 80 cm e le rampe che agevolano la salita e la discesa dal marciapiede.



- Tali rampe rispettano la pendenza dell'8%.

6.3 Ombreggiamento



L'obiettivo rispettato è uno:

- n. 3: per migliorare il comfort al di sotto della pensilina ed evitare l'abbagliamento e/o il surriscaldamento viene adottato un sistema di ombreggiamento

Nella stagione estiva ed in quella invernale, i serbatoi contenenti le microalghe vengono svuotati a causa delle temperature troppo rigide e inadatte a questo tipo di coltura. In sostituzione alle microalghe, in questi periodi, si utilizzano delle pellicole che ne richiamano il colore. Tuttavia, anche nelle restanti stagioni la radiazione solare diretta potrebbe provocare l'inibizione della crescita delle microalghe, per questo si rende necessario un sistema di ombreggiamento, che si integri al meglio con la struttura pensata, senza prevaricare su di essa. Basandosi su queste necessità, si è deciso di utilizzare delle pellicole antisolari, che risultano efficienti e poco invasive. Esse infatti, permettono di bloccare le radiazioni ultraviolette, dannose per le microalghe, e di creare un ambiente confortevole dal punto di vista visivo (riducono il fenomeno dell'abbagliamento) e termico (riducono la temperatura, assorbendo il calore) al di sotto della pensilina stessa.

6.4 Fotovoltaico integrato



Gli obiettivi rispettati sono cinque:

- n. 3: il fotovoltaico è fondamentale per questioni di sicurezza per coloro che utilizzano le fermate dei mezzi pubblici, anche nelle ore buie della giornata;
- n. 7: il fotovoltaico sfrutta la radiazione solare per la produzione di energia elettrica;
- n. 11: responsabilizzazione della comunità alle fonti rinnovabili;
- n. 12: produzione responsabile di energia con l'utilizzo dell'energia solare;
- n. 13: riduzione del consumo di fonti di energia non rinnovabile e dannose per l'ambiente da sfruttare nella maniera più efficace possibile le risorse a disposizione.

Come anticipato al punto 4, per soddisfare il fabbisogno di energia necessario al funzionamento del sistema di fotobioreattori sono stati pensati dei

pannelli fotovoltaici posizionati nella copertura stessa, in alternanza ai moduli dei fotobioreattori. Per questo motivo, i pannelli fotovoltaici sono realizzati con un materiale in grado di essere modellato in forme anche non convenzionali, l'ETFE, per seguire l'andamento della struttura, che, seppur modulare, non si trova interamente sullo stesso piano. Ogni modulo, infatti, dovrà essere ruotato in base alle condizioni del sito in cui si colloca, in modo da sfruttare nella maniera più efficace possibile le risorse a disposizione.

6.5 Illuminazione pubblica



Gli obiettivi rispettati sono sei:

- n. 3: il fotovoltaico è fondamentale per questioni di sicurezza per coloro che utilizzano le fermate dei mezzi pubblici, poichè consente ai lampioni di illuminare anche i dintorni;
- n. 6: il basamento protegge il bambù dall'acqua piovana che viene correttamente indirizzata verso gli appositi scarichi;
- n. 7: il fotovoltaico integrato sfrutta la radiazione solare per la produzione di energia elettrica;
- n. 11: responsabilizzazione della comunità alle fonti rinnovabili;
- n. 12: produzione responsabile di energia con l'utilizzo dell'energia solare;
- n. 13: riduzione del consumo di fonti di energia non rinnovabile e dannose per l'ambiente.

Per ragioni di sicurezza e di fruibilità notturna, è fondamentale la presenza di illuminazione pubblica, sia in corrispondenza delle pensiline stesse, sia per tutto lo sviluppo della banchina.

Per questo aspetto si privilegia l'utilizzo di strisce LED diffondenti, che offrono una serie di vantaggi, tra cui l'elevata efficienza energetica connessa ad una riduzione le comuni, , il ciclo di vita è notevolmente superiore rispetto a quello delle comuni lampadine, richiedono una minore manutenzione ed utilizzano energia a bassa potenza, importante per la sicurezza ^[78].

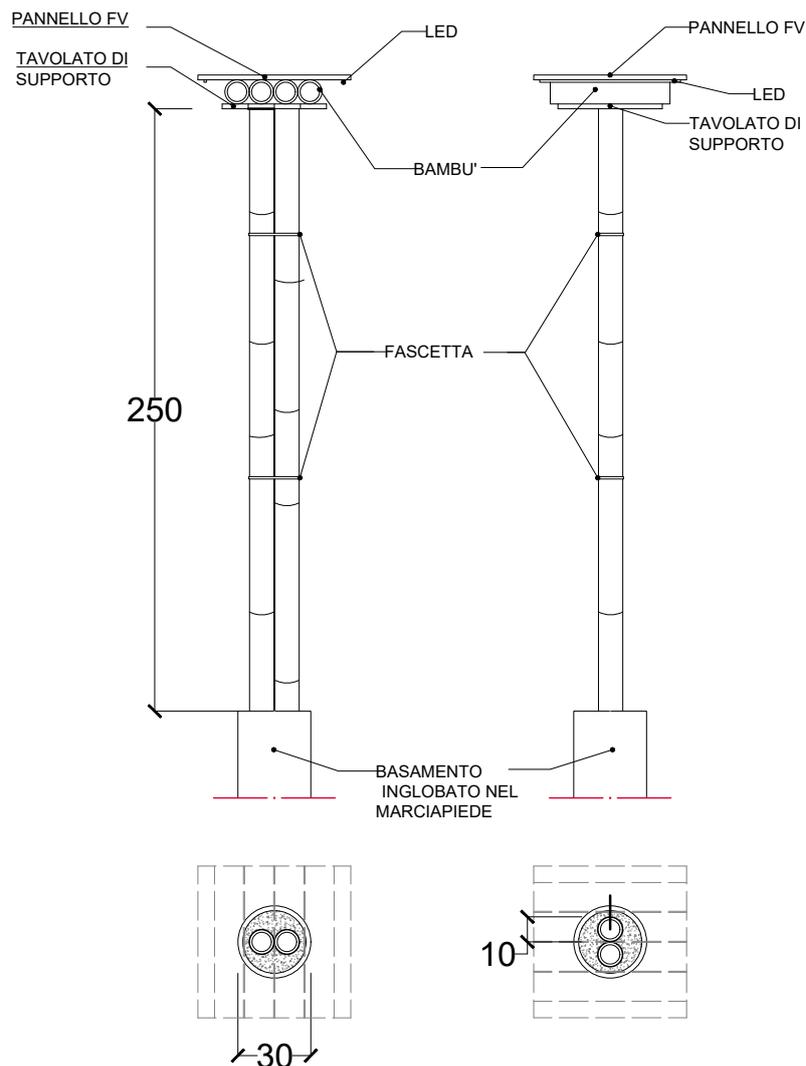
Per i lampioni, il basamento è realizzato ugualmente a quello della pensilina in modo da favorire il drenaggio dell'acqua piovana.

[78] Cittadini ecologisti - <https://www.cittadiniecologisti.it/tecnologia-sostenibile/lampadine-led/#:~:text=Migliore%20efficienza%20energetica%20e%20minori,energia%20elettrica%20fino%20al%2090%25>



I lampioni in questione, necessari per l'illuminazione del marciapiede, sono costituiti da fasci di due canne di bambù legati tra loro, al di sopra dei quali sono disposti fasci di quattro canne di bambù in direzione ortogonale, poggianti su un supporto costituito da un tavolato in legno. I fasci sono realizzati mediante l'utilizzo di fascette metalliche. Al di sopra, un pannello fotovoltaico utile ad alimentare il lampione

stesso. Questo fa sì che la struttura richiami la pensilina sotto ogni aspetto, pur essendo indipendente da essa. Per quanto riguarda le pensiline, i LED sono affissi alla copertura, seguendone l'andamento, ed alimentati dal sistema fotovoltaico della pensilina.



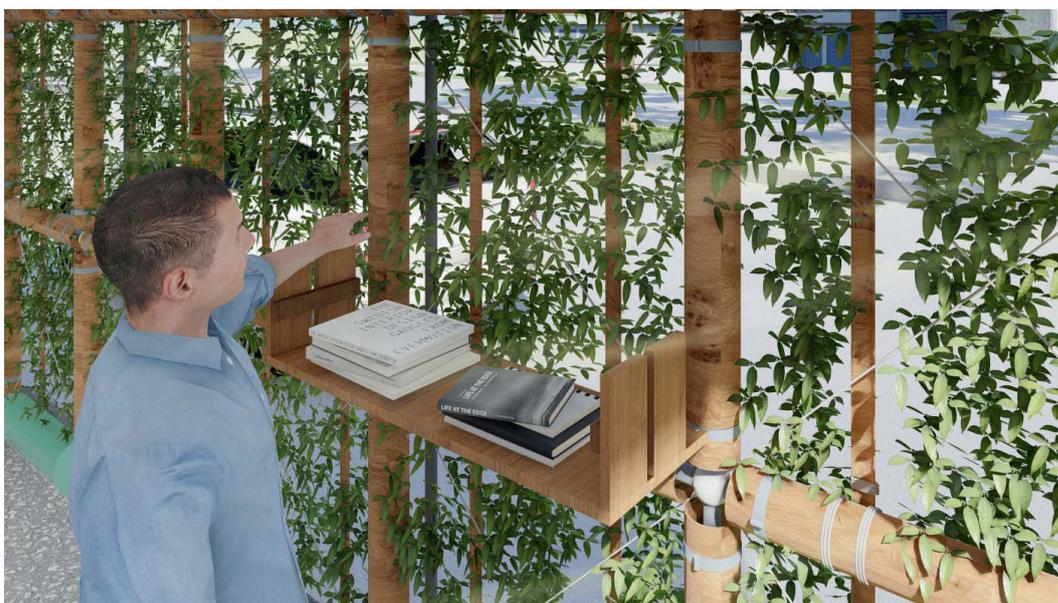
6.6 Aspetto sociale e arredo urbano



Gli obiettivi rispettati sono quattro:

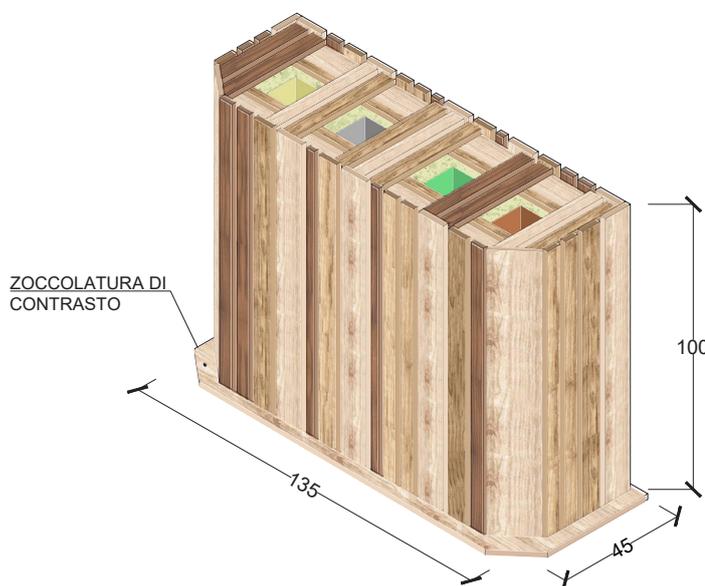
- n. 3: questo aspetto consente di favorire il benessere delle persone inducendo allo scambio non solo di libri e materiali, ma anche di relazioni sociali che si sono perse durante il periodo legato alla pandemia;
- n. 11: responsabilizzazione della comunità a non buttare ciò che non si utilizza più, ma a cederlo a chi ne ha, invece, bisogno;
- n. 12: utilizzo di materiali riciclati per la realizzazione degli elementi di arredo urbano;
- n. 13: viene ridotta la produzione di materiale da materie prime vergini sfruttando gli scarti derivanti da altri settori, ottenendo un impatto positivo sull'ambiente.

La nuova pensilina vuole essere importante anche dal punto di vista sociale ed educativo. Per questo motivo, si è pensato di alternare le zone in cui ci saranno le sedute, a zone in cui poter stare in piedi o svolgere altre attività, quali la lettura, per coloro che aspettano l'arrivo dei mezzi pubblici. A questo scopo saranno disponibili dei raccoglitori di libri o giornali a servizio delle persone: chiunque può lasciare libri, giornali o riviste che non utilizza più a disposizione di chi volesse prenderli o consultarli. Questo vuole anche essere un modo per favorire i rapporti umani, il dialogo e lo scambio di materiali tra individui.



Gli elementi di arredo urbano saranno anch'essi sostenibili in quanto realizzati in materiale riciclato e/o riciclabile e/o di recupero.

In corrispondenza della pensilina saranno disposti anche dei contenitori per



la raccolta differenziata (carta, plastica, vetro, organico) realizzati con doghe in legno recuperate e rivestiti internamente con pannelli truciolari.



Inoltre, saranno disposte delle fioriere, in cui vengono coltivate specie di bambù che non raggiungono altezze eccessive. Tali elementi saranno realizzati con doghe di legno e rivestiti internamente da una membrana per evitare che la terra di

disperda.

Essendo l'obiettivo quello di avere un impatto positivo sulla città e sulla salute dei cittadini, si cerca di conferire un aspetto il più possibile naturale alla pensilina. Soprattutto negli ultimi anni, con l'aggravarsi del cambiamento climatico, risulta essere sempre più importante la presenza di spazi verdi all'interno delle aree urbanizzate. È come se, con la nuova pensilina si andassero ad inserire dei parchi urbani di piccole dimensioni all'interno

della città, che portano con sé una serie di vantaggi ambientali e sociali, di seguito brevemente elencati.

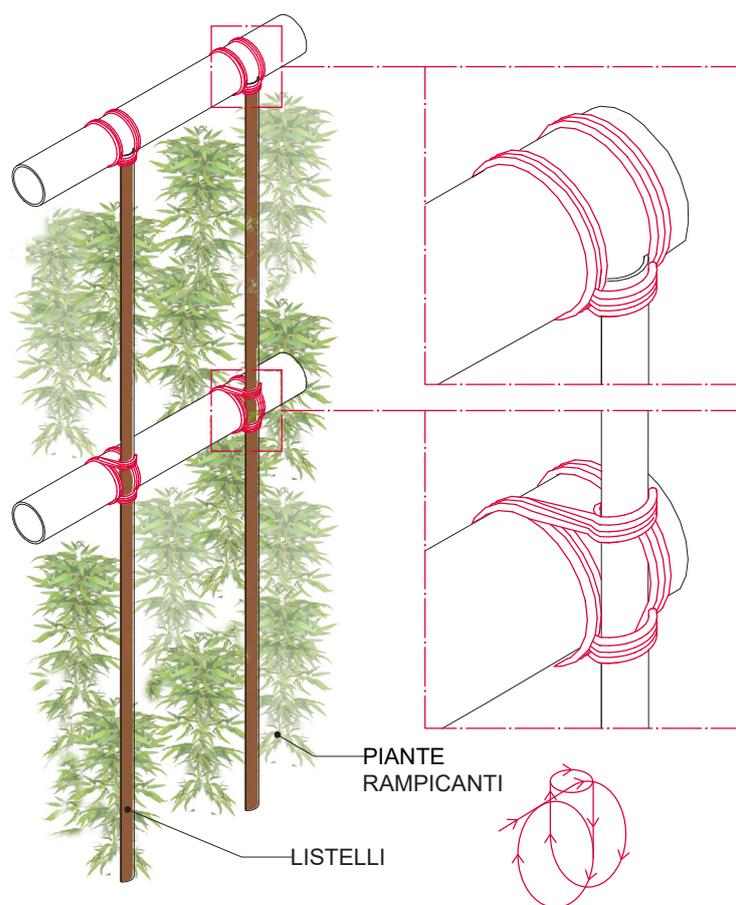
I vantaggi sull'ambiente:

- i "micro parchi urbani" combattono, nel loro piccolo, l'inquinamento atmosferico grazie all'assorbimento della CO₂ da parte della vegetazione;
- rilascio di O₂ con conseguente miglioramento della qualità dell'aria;
- combattono l'effetto isola di calore nell'area in cui si trovano, importante soprattutto nei mesi estivi.

I vantaggi per l'uomo:

- favoriscono il benessere mentale e fisico dei cittadini che, anche se per pochi minuti, usufruiscono di tali spazi;
- offrono una percezione diversa della città, in quanto rappresentano un valore aggiuntivo.

Per fare questo, i moduli della struttura portante disposti verticalmente, saranno sfruttati per



ranno sfruttati per fare in modo che, l'individuo che si trova al di sotto della pensilina, abbia la sensazione di trovarsi immerso nella natura. Infatti, tali elementi verticali, costituiscono anche la struttura portante per i listelli ottenuti mediante splittatura (figura riportata nella pagina successiva) dei culmi. I listelli saranno connessi agli elementi portanti disposti orizzontalmente

mediante legatura e saranno disposti verticalmente. La combina-

zione tra tali elementi e le piante rampicanti permette di ottenere un effetto particolare, come se ci si trovasse in una foresta di bambù. Da un punto di vista più pratico, invece, tali elementi permettono di chiudere lo spazio della pensilina, offrendo una buona permeabilità: soprattutto nel periodo estivo, il passaggio di aria permette di avere maggiore comfort.



Tipologia A - effetto luce diffusa nelle ore diurne



Tipologia B - effetto luce diffusa nelle ore notturne



[79]

Splittatura mediante lo strumento “splitter” costituito da un elemento circolare che possiede elementi affilati disposti a raggiera.

7. Materiali

La scelta dei materiali è una fase importante della progettazione, poiché implica la valutazione di tutte le condizioni al contorno del progetto stesso. Al giorno d’oggi si cerca di privilegiare la realizzazione di strutture a secco; quindi, più sostenibili sia per il fatto che non utilizzano acqua, sia perché favoriscono la disassemblabilità al termine della vita utile delle costruzioni. Questo aspetto sta diventando sempre più fondamentale nella progettazione, per favorire il riuso ed il riciclo dei componenti.

In questo capitolo saranno analizzati e caratterizzati più nel dettaglio l’insieme di materiali individuati per la modellazione e realizzazione del nuovo modello di fotobioreattore.

7.1 Bambù



In seguito alle considerazioni elaborate nel corso del presente studio, il materiale selezionato per la realizzazione della struttura portante modulare è il bambù. Si tratta di una pianta sempreverde denominata “acciaio vegetale”^[80], grazie alle sue caratteristiche di forza e resistenza, nonostante sia flessibile e molto leggero rispetto ad altri materiali. L’elevato tasso di

crescita lo rende, ad oggi, il materiale più sostenibile utilizzato nel campo

[79] bambusetto - <https://www.bambusetto.it/canne-di-bambu/strisce-italiane/>

[80] Progettare con il bambù: alla scoperta dell’acciaio vegetale, InfoBuild, 2021 - <https://www.infobuild.it/approfondimenti/progettare-con-il-bambu-alla-scoperta-dellacciaio-vegetale/#:~:text=Il%20bamb%C3%B9%20ha%20guadagnato%20il,per%20la%20costruzione%20di%20edifici>

della bioarchitettura. È un biosequestratore di CO₂: consuma molta più anidride carbonica rispetto alle altre specie di piante. Inoltre, presenta un'elevata resistenza a compressione e una buona resistenza a trazione, che rendono questa pianta adatta per la realizzazione di elementi verticali di sostegno (colonne e pilastri).

Tuttavia, è ancora poco utilizzato nei paesi occidentali perché ritenuto un materiale inferiore rispetto agli altri; anche la cultura incide su questo, così come la distanza tra i Paesi che coltivano il bambù (fortemente diffuso in Asia) ed i Paesi che lo utilizzerebbero nel settore delle costruzioni. Ciò implica grandi spese per il trasporto e, probabilmente, la scarsa capacità di lavorazione del materiale stesso, in Europa, è un altro fattore fortemente limitante. La scetticità nei confronti del bambù è, inoltre, attribuibile alla variabilità dimensionale dei culmi: ne esistono circa 1200 specie differenti tra loro per l'altezza, il diametro (minore è il diametro, maggiore è la resistenza del culmo e viceversa), la distanza tra i nodi all'interno dei culmi, lo spessore, l'assottigliamento alle estremità e le proprietà meccaniche e fisiche; tutte caratteristiche fortemente influenzate anche dal luogo in cui avviene la crescita. Di conseguenza, se si intende utilizzare il bambù trattato, anche detto ingegnerizzato, si possono utilizzare tutte le specie indifferentemente, ma se si vuole realizzare una struttura utilizzando le canne di bambù così come sono, le specie di bambù adatte sono in numero nettamente inferiore^[81].

Inoltre, l'utilizzo di questo materiale può contribuire in modo positivo all'economia locale e nazionale, poiché offrirebbe lavoro a molte persone. Esistono, però, trattamenti di preservazione dall'attacco di insetti e funghi che non si basano sull'uso di prodotti chimici; tra i più efficaci si trovano l'incalcinatura, che consiste nella stesura di calce sui culmi per aumentarne la resistenza agli agenti biologici oppure la cosiddetta "protezione da progetto" che prevede di appoggiare gli elementi in bambù su un basamento in pietra o calcestruzzo per evitare il contatto con il terreno; ancora il trattamento con il fango che permette di ridurre la quantità di amido, sostanza di cui si nutrono gli agenti biologici, attraverso un'immersione della durata variabile da sette giorni a due mesi nel fango^[82].

[81] I. Caltabiano, A. Lacirignola (a cura di), *Bambù per ideare sperimentare e costruire*, Aracne, Roma, 2012.

[82] M. Cárdenas Laverde, *Il bambù come materiale da costruzione: caratteristiche fisiche e meccaniche, tecnologie costruttive*, Sistemi Editoriali, Napoli, 2008, pp. 25-32.

Tuttavia, essendo il bambù un materiale naturale con un minore impatto sull'ambiente, esso è maggiormente soggetto a degrado se esposto a determinate condizioni di luce e acqua, mentre le caratteristiche dell'acciaio rimangono pressoché inalterate per un arco temporale lungo. Probabilmente, i PBRs più studiati e sperimentati si basano su strutture in acciaio per questo motivo. Dal punto di vista economico, Càrdenas Laverde^[83] ha messo in evidenza il risparmio che si avrebbe se venisse utilizzato il bambù in sostituzione al legno d'abete o all'acciaio per l'intero progetto di una struttura (incluse le finiture di pavimentazione e rivestimento, gli impianti, ecc...): circa il 10%. Se, invece, si considera il singolo materiale (escluse le finiture) il risparmio è di circa il 30%.

Come si è detto in precedenza, le strutture in bambù possono avere una buona durabilità se realizzate nel modo opportuno. Ciò implica che le zone direttamente esposte all'aria aperta e quindi ai fenomeni atmosferici e/o patogeni debbano essere trattate, per garantire le prestazioni e le caratteristiche richieste. Sempre in un'ottica di sostenibilità, gli elementi modulari definiti possono essere giuntati tra loro a secco, anziché incollati poiché gli adesivi (es: la resina) vengono formulati, solitamente, a partire da formaldeide che può liberarsi nell'ambiente e provocare effetti nocivi. Tra le giunzioni vi sono quelle a bocca di pesce o la legatura con materiali naturali o fili metallici, o ancora giunti metallici adattabili in acciaio. Tutte queste soluzioni risultano essere reversibili, cioè smontabili e riutilizzabili al termine della vita utile della struttura che compongono.

Di seguito vengono riportate le principali caratteristiche del bambù Guadua^[84].

[83] M. Càrdenas Laverde, Il bambù come materiale da costruzione: caratteristiche fisiche e meccaniche, tecnologie costruttive, Sistemi Editoriali, Napoli, 2008, pp. 100-103.

[84] Le proprietà meccaniche di bambù - <https://bambooimport.com/it/blog-post/de-mechanische-eigenschap-pen-van-bamboe/>

Dimensioni canne di bambù [m]	Altezza: $0,1 < h < 40$ Diametro: $0,06 < d < 0,3$
Densità [kg/m ³]	$\rho = 817,26$
Resistenze meccaniche [N/mm ²]	A compressione: $40 < R < 80$ A trazione: $R = 160$ A taglio: $R = 8$ A flessione: $50 < R < 150$
Temperatura di esercizio [°C]	$-20^{\circ}\text{C} < T < 50^{\circ}\text{C}$
Permeabilità ai raggi UV	No
Riflessione della luce [%]	$R_{\text{vis}} = 34,5\%$ (luce diretta e diffusa)
Riciclabilità	sì (al 100%, se non trattato o adeguatamente pulito)

Le canne di bambù selezionate per la struttura portante presentano diametro di 10. L'altezza di tali culmi può raggiungere un'altezza di 3 o 4 m. Essi derivano dal bambuseto^[85] situato nel comune di Piobesi Torinese, in provincia di Torino. Tale terreno è di proprietà del vivaio Purpurea, ubicato nello stesso comune, che ha messo a disposizione del team di PuntaVerde^[86] il suo spazio.

Le canne di bambù che vengono vendute sono allo stato naturale e grezzo, completamente biodegradabili, per questo necessitano di trattamento superficiale.

Presso la materioteca del laSTIn in Corso Massimo d'Azeglio a Torino, è stato possibile toccare con mano il materiale



Segmento di canna di bambù Ø 10 cm.

[85] Purpurea Vivai - <https://www.purpurea.it/canne-di-bamb%C3%B9-e-tutori/78-canna-di-bambu-diametro-10-12-cm.html>

[86] PuntaVerde - <http://www.puntaverde.it/>



Segmento di canna di bambù Ø 8 cm.

7.1.1 Trattamento del bambù per ambienti esterni

Sebbene il bambù sia un materiale che presenta, naturalmente, uno strato esterno di silice che lo rende impermeabile, se si vuole utilizzare questo materiale per applicazioni esterne, è necessario sottoporlo a trattamenti che lo proteggano dall'attacco di agenti biologici quali insetti, parassiti, muffe e funghi. A causa della presenza di silice di cui sopra, i trattamenti a spruzzo o a pennello non sono efficienti, è necessario che il trattamento avvenga dall'interno per assorbimento da parte delle fibre di una soluzione acquosa a base di acido borico e sali di borace in rapporto 1:1. Il trattamento a pressione prevede l'iniezione della soluzione in direzione longitudinale alle fibre a partire dalle estremità delle canne di bambù, mantenendo i nodi interni integri^[87].

7.2 Acciaio

Per la realizzazione della struttura della pensilina viene utilizzato un sistema ibrido bambù-acciaio. Quest'ultimo, essendo impiegato in elementi differenti della costruzione, deve possedere caratteristiche opportune per ciascun impiego.

7.2.1 Acciaio C45

L'acciaio che presenta tale nomenclatura è appositamente studiato per essere impiegato nella realizzazione di meccanismi duri e tenaci a supporto

[87] Trattamenti, come preservare il bambù, Poliedra - <http://poliedra.xyz/trattamenti/>

delle strutture. Di seguito vengono riportate le caratteristiche ^[88].

Elemento di impiego	Sfera
Densità [kg/m ³]	$\rho = 7870$
Diametro [mm]	70 (min)
Carico a rottura [MPa]*	580-770
Limite di snervamento [MPa]*	305
Allungamento [%]	16
Resilienza [J]	20

* 1 MPa = 100 kN/m²

Questi elementi sferici vengono realizzati appositamente per ogni singolo intervento, di conseguenza la fermata della tipologia A e quella della tipologia B, presentano ciascuna i propri nodi. Nei punti in cui le pensiline dispongono di scaffalatura per il deposito dei libri, il giunto si presenta con un maggiore numero di fori, per garantirne l'aggancio.

7.2.2 Acciaio S355

Questa tipologia di acciaio è adatto all'impiego anche in condizioni di temperature esterna rigide (fino a -20°C), inoltre può essere saldato per la realizzazione di strutture come le pensiline.

Di seguito vengono riportate le caratteristiche^{[89] [90]}

Elemento di impiego	Asta per giunti
Densità [kg/m ³]	$\rho = 7870$
Diametro [mm]	34
Resistenza a trazione [MPa]*	$470 < R < 630$
Limite di snervamento [MPa]*	335
Allungamento [%]	21
Resilienza [J]	27

* 1 MPa = 100 kN/m²

[88] EUROsiderScalo - [https://eurosiderscalo.com/c45-e-r/\[2\]](https://eurosiderscalo.com/c45-e-r/[2]) Trattamenti, come preservare il bambù, Poliedra - <http://poliedra.xyz/trattamenti/>

[89] EUROsiderScalo - [https://eurosiderscalo.com/s355\[2\]/\[2\]](https://eurosiderscalo.com/s355[2]/[2]) Engineerplant - <https://www.engineerplant.it/dtec/proprietà-metalli.php>

[90] Engineerplant - <https://www.engineerplant.it/dtec/proprietà-metalli.php>

7.3 Calcestruzzo facciavista lavato



È previsto l'utilizzo del calcestruzzo facciavista lavato per la pavimentazione e per alcuni rivestimento degli arredi urbani, come le fioriere. L'obiettivo è quello di conferire un aspetto più naturale rispetto a quello che fornisce un più comune calcestruzzo e utilizzare aggregato recuperato dagli scarti derivanti dai cantieri. Per fare

questo si fa riferimento all'impianto di recupero e riciclaggio Cavit s.p.a.^[91] situato in località La Loggia, nei pressi di Moncalieri in provincia di Torino. Tale azienda si occupa non solo del recupero dei materiali edilizi, ma anche della rivendita. Questo consente di utilizzare materiali che possono essere considerati km 0, ridurre i costi del materiale stesso, ridurre le emissioni (quindi l'impronta di carbonio) e ridurre la quantità di rifiuti destinati al definitivo smaltimento. Alcune analisi effettuate affermano che le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo realizzato con aggregato convenzionale e quello realizzato con aggregati riciclati rimangono pressappoco invariate^[92].

Il calcestruzzo è costituito da:

- cemento con funzione di legante;
- aggregati a granulometria più fine (sabbia) e a granulometria più grossa (ghiaia, frammenti recuperati);
- acqua, che idrata l'impasto rendendolo lavorabile e consentendogli di fare presa in seguito all'evaporazione;
- eventuali additivi, a seconda delle necessità specifiche del caso.

Il calcestruzzo facciavista lavato è un materiale di design nel quale gli aggregati emergono dalla pasta cementizia, grazie alla tecnica del lavaggio da cui deriva il nome. Tale risultato può essere ottenuto in due modi:

- viene utilizzato un getto d'acqua ad alta pressione quando il cls ha già fatto presa nella parte più in profondità, ma è ancora deformabile in superficie;
- si utilizzano additivi ritardanti di presa solo in superficie, per consentire,

[91] Cavit s.p.a. - <https://www.cavitspa.it/rivendita-prodotti/>

[92] Ingegneri.cc - <https://www.ingegneri.cc/riciclo-del-calcestruzzo-vantaggi-e-usi.html/>

solo successivamente, il lavaggio della stessa.

Per motivi legati alla sostenibilità si preferisce la prima tecnica, in modo da non utilizzare additivi che potrebbero essere dannosi per l'ambiente e per l'uomo.

Il calcestruzzo impiegato in questo caso appartiene alla classe di esposizione XF1, poiché il marciapiede si trova in un ambiente esterno e, a causa dei fenomeni atmosferici, può essere sottoposto a cicli asciutto-bagnato e gelo-disgelo. Ne deriva che la classe minima di resistenza è C32/40, per questo tra i suoi componenti troviamo:



CEM III/B 32,5 R, cioè un cemento d'altoforno in cui vi è una concentrazione di loppa basica d'altoforno compresa tra il 66 e l'80%^[93]. Sviluppa una resistenza a compressione > 17 MPa dopo 2 giorni ed una

resistenza a compressione > 37 MPa una volta conclusa la stagionatura di 28 giorni. Questa tipologia di cemento risulta essere maggiormente ecosostenibile rispetto ad un più comune cemento Portland, in quanto utilizza scarti di lavorazioni industriali;



aggregato riciclato (\varnothing 5/15 mm), cioè un aggregato ottenuto dal recupero di materiali precedentemente utilizzati in altre costruzioni: questa tipologia di aggregato contiene frammenti di calcestruzzo, di

asfalto, di materiali lapidei e laterizi. Per questo motivo i frammenti possono avere colorazioni e dimensioni differenti, in modo da creare, in base alle proprie scelte, l'effetto desiderato.

L'utilizzo di questo materiale, inoltre, consente di avere una pavimentazione di colore chiaro che, soprattutto nel periodo estivo, contribuisce a ridurre la quota di calore assorbita dal materiale stesso. Questo perché buona parte delle lunghezze d'onda della luce vengono riflesse e, di conseguenza, anche l'energia termica da esse trasportata. Ciò rappresenta un contributo per l'abbassamento della temperatura in corrispondenza delle fermate.

[93] Cemitaly - <https://www.cemitaly.it/it/cemento-daltoforno>

7.4 PVC riciclato



Come anticipato, per la realizzazione del basamento che sostiene l'intero blocco modulare della pensilina vengono utilizzati degli elementi tubolari in PVC riciclato, del diametro di 300 mm, rivenduti dall'azienda Recuplast^[94] a Poirino (TO).

L'utilizzo di tale materiale permette di risparmiare sull'energia che servirebbe, invece, per la produzione di PVC vergine e di ridurre le emissioni di CO₂. Al termine della vita utile, l'elemento in PVC potrà a sua volta essere riutilizzato o riciclato. Di seguito vengono riportate le caratteristiche^[95].

Dimensioni tubo [m]	Lunghezza: fino a 3 m Diametro: $0,02 < d < 0,5$
Densità [g/cm ³]	$\rho = 1,42$
Resistenze meccaniche [MPa]	A compressione: $R \leq 40$ A trazione: $R \geq 50$ A flessione: $R \geq 70$
Temperatura di esercizio [°C]	$-10 < T < 60$
Permeabilità ai raggi UV	Sì
Riflessione della luce [%]	Rvis = 5 % (PVC bianco) Rvis < 5 % (PVC colorato)
Riciclabilità	Sì (al 100%)

7.5 ETFE



L'etilene tetrafluoroetilene è definito "vetro del futuro"^[96] poiché presenta caratteristiche di trasparenza assimilabili a quelle del vetro, ma ha una densità decisamente inferiore. La manutenzione richiesta dai pannelli realizzati con questo materiale è piuttosto irrilevante, in quanto si tratta di un

[94] recu plast, recupero e rigenerazione plastica - <https://www.recuplast.it/>

[95] MAR-GOM SRL - http://www.mar-gom.com/index.php?option=com_content&view=article&id=4371&Itemid=7167&lang=it

[96] Arsen Raza, ETFE: il materiale innovativo che sta rivoluzionando il mondo, The Different Group, 2018 - <https://www.thedifferentgroup.com/2018/02/05/etfe/>

materiale autopulente, se esposto all'ambiente esterno: la superficie liscia non trattiene l'acqua piovana, ma la lascia scivolare portando con se polvere e sporczia. Ciò consente di mantenere la trasparenza del materiale nel tempo. Inoltre, è un materiale molto versatile in quanto può essere plasmato in molte forme differenti ed adattato alle esigenze, questo, però, implica una leggera distorsione delle immagini, quando il pannello viene curvato. Solitamente l'impiego dell'ETFE in copertura prevede la sovrapposizione di più strati, da 2 a 5 ^[97].

L'azienda più vicina alla città di Torino che produce questa tipologia di materiali è Maco Technology^[98] a Provaglio d'Iseo (BS). Di seguito vengono riportate le caratteristiche^[99].

Dimensioni pannelli [m] Spessori [mm]	Variabili $0,1 < s < 0,3$
Densità [g/cm ³]	$\rho = 1,8$
Peso [g/m ²]	$90 < p < 530$
Rusogità [µm]	Da 0,1 a 0,5
Modulo elastico [GPa]	1,5
Carico ammissibile [kg/m ³]	75
Resistenze [MPa]	(allungamento a rottura 230 %) A Trazione: 46
Temp. di esercizio "ottimale" [°C] Temperatura max di esercizio [°C]	- 80 < T < 155 400
Permeabilità ai raggi UV	Sì
Riflessione della luce [%]	$R_{vis} = 12\%$ (luce diffusa) $R_{vis} = 88\%$ (luce diretta)
Riciclabilità	Sì (al %)

Nel momento in cui la funzione dei cuscini in ETFE è terminata per un determinato tipo di costruzione, essi possono essere riutilizzati per lo stesso scopo o in applicazioni di altro genere. Nel caso in cui non si prenda in considerazione l'ipotesi del riutilizzo, essi possono essere riciclati.

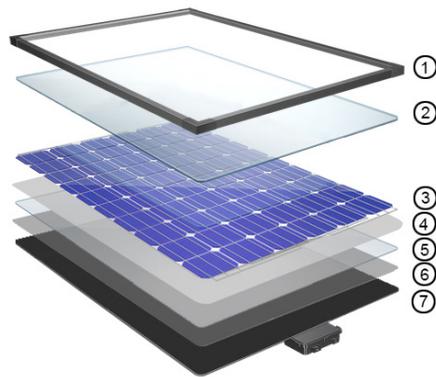
I pannelli fotovoltaici a cui si fa riferimento in questo studio sono costituiti da

[97] Tensaform - <https://pdf.archiexpo.it/pdf/tensaform-59245.html>

[98] maco technology, tensostrutture e tendostrutture speciali - <https://www.macotechnology.com/>

[99] MakeltFrom.com, ETFE vs EVA - <https://www.makeitfrom.com/compare/Ethylene-Tetrafluoroethylene-ETFE/Ethylene-Vinyl-Acetate-EVA>

sette strati, come rappresentato dalla figura seguente:



[100]

1. ETFE: fluoropolimero utilizzato come strato più esterno per le caratteristiche precedentemente descritte;
2. EVA: strato superiore di protezione delle celle fotovoltaiche da polveri, liquidi e gas;
3. Celle fotovoltaiche
4. EVA: strato intermedio di protezione delle celle fotovoltaiche da polveri, liquidi e gas;
5. PET: polimero usato come rivestimento per le sue caratteristiche di malleabilità e flessibilità;
6. EVA: strato inferiore di protezione delle celle fotovoltaiche da polveri, liquidi e gas
7. fibra di vetro: conferisce rigidità.

Di seguito vengono riportate le caratteristiche del modello SGM-FLY-50W^[101].

Tipologia di cella	Silicio policristallino
n° celle	35
Spessore [mm]	2
Potenza di picco [Wp]	50
Peso [kg]	1,35
Cavi [mm]	Ø 2,5

[100] Francesca Vecchio architetto - <http://www.francescavecchia.it/index.php/test/72-tesi-di-laurea-2>

[101] Fly Solartech ETFE Semi Flexibile Solar Panel Model SGM-FLY-50W - <https://www.flysolartechsolutions.com/wp-content/uploads/2017/03/fly-solartech-SGM-FLY-50W-drawing.pdf>

Ciascun pannello presenta una potenza di picco di 50 W_p, per ogni modulo di pensilina i pannelli sono 2 o 3 per una potenza totale di 100/150 W.

L'ETFE viene utilizzato anche come materiale per la realizzazione dei fotobioreattori, il cui involucro sarà, appunto, costituito da ETFE a cuscino, molto diffusi soprattutto per le coperture in quanto consentono di coprire spazi anche molto ampi con un peso notevolmente ridotto. Inoltre, la loro forma presenta gli angoli smussati, fondamentali per questo studio. La capacità dei PBRs a "cuscino" quadrato sarà di circa:

$$0,90 \text{ m} * 0,90 \text{ m} * 0,03 \text{ m} = 0,0243 \text{ m}^3 * 1000 = 24,3 \text{ l}$$

L'involucro in ETFE, dunque, conterrà la fase liquida (acqua) in cui saranno disperse le microalghe in quantità variabili, poiché la loro crescita dipende dai fattori elencati nei capitoli precedenti.

7.5.1 Coating

Per agevolare la manutenzione dei cuscini, essi vengono rivestiti con rivestimenti appositi:

- internamente viene utilizzato un coating antifouling (rivestimento antivegetativo) ^[102] dello spessore di 1 mm, utile ad impedire il deposito delle microalghe sulla superficie. Tale rivestimento è a base di acqua e non tossico ^[103], per evitare di contaminare le microalghe che, una volta concluso il loro ciclo vitale (circa tre mesi), potrebbero essere utilizzate anche nel settore alimentare;
- esternamente si impiega un trattamento autopulente, ovvero un rivestimento in biossido di titanio ^[104] che, combinato alla superficie in ETFE già autopulente, garantisce la pulizia delle superfici, evitando il deposito di sostanze quali minerali, polveri o contaminanti.

Entrambi i coating vengono applicati attraverso spray o verniciatura.

Inoltre, nel caso in cui le pellicole antisolari descritte precedentemente non dovessero essere sufficienti a schermare i cuscini in ETFE per mantenere la temperatura tra i 20 e i 30 °C, si utilizza un rivestimento (vernice) termocromico. Quest'ultimo, nel momento in cui viene raggiunta una determinata temperatura, diventa opaco e/o cambia colore per evitare che la radiazione

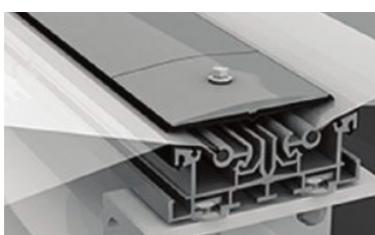
[102] Fischer - <https://www.helmut-fischer.com/it/rivestimenti-antivegetativi-su-strutture-marine>

[103] QinHo Group - <http://it.chinafishingnet.net/news/current-situation-and-development-trend-of-ant-12976947.html>

[104] Cleanic- <https://www.trattamenti-pulizie.it/trattamento-autopulente>

incidente provochi un ulteriore aumento della temperatura, che risulterebbe dannoso per la coltura all'interno dei cuscini. Una vernice di questo tipo è costituita da tre componenti e la temperatura di transizione dipende dal solvente utilizzato^[105]. Solitamente, nei casi in cui la temperatura massima raggiungibile è di 30 °C, come in questo caso, si utilizza una vernice termocromica che prevede il passaggio da una colorazione neutra (trasparente), alla colorazione blu quando si raggiunge il valore limite di temperatura^[106].

7.5.2 Aspetti tecnologici



[107]

Per l'aggancio dei cuscini in ETFE alla struttura portante sottostante vengono impiegati profili in alluminio a C. Quest'ultimi, internamente, sono sagomati appositamente per creare una sorta di morsa che incastrerà i cuscini in ETFE; nelle parti terminali, invece, il profilo a C diventa cavo per consentire la connessione con la sfera sottostante. Per fare questo vengono utilizzati viti filettate della lunghezza di 115 mm^[108] in corrispondenza dei quattro angoli del quadrato che costituisce il modulo in bambù.



[109]

Lo spazio di risulta tra il profilo e il bambù viene riempito da neoprene e, poiché il diametro delle canne di bambù è variabile, essendo un prodotto naturale, per il fissaggio del cuscinetto in neoprene alla struttura in bambù si utilizzano fascette stringitubo in acciaio inox, la cui larghezza è di 9 mm^[110].

La combinazione di profilati e cuscini in ETFE ,

[105] Sciencecue - <https://sciencecue.it/combattere-surriscaldamento-urbano-sfruttando-colore/30032/>

[106] Vernice termocromica - <http://special-coating.com/Italian/vernice-termocromica.html>

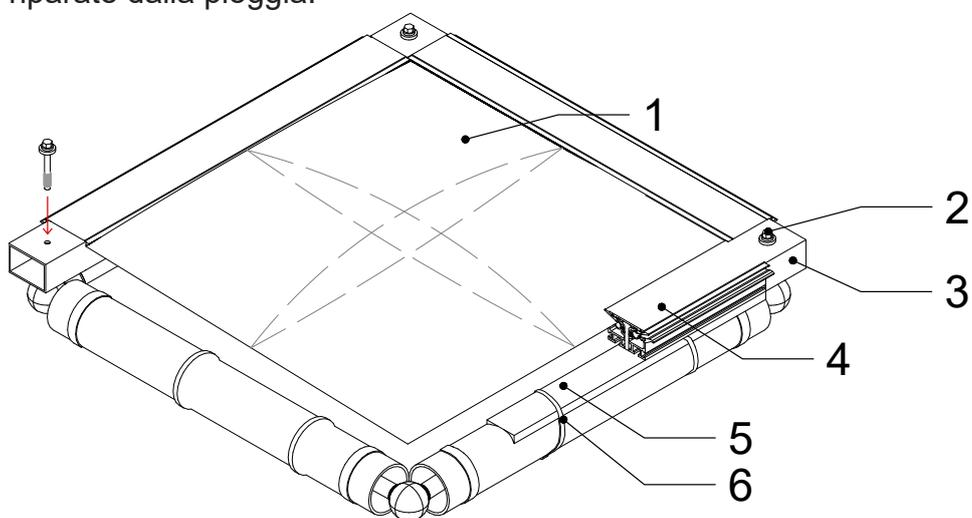
[107] Maco technology - <https://www.macotechnology.com/prodotti/etfe-materiale/>

[108] Leggio ferramenta e colori - <https://www.leggioferramenta.com/fissaggi-prolungati/879-tup4-tassello-prolungato-in-nylon-ad-elevata-espansione-vite-te.html>

[109] Würth - <https://eshop.wuerth.it/Categorie-di-prodotti/Fascetta-stringitubo/31146505040101.cyid/3114.cgid/it/IT/EUR/?CampaignName=SR007>

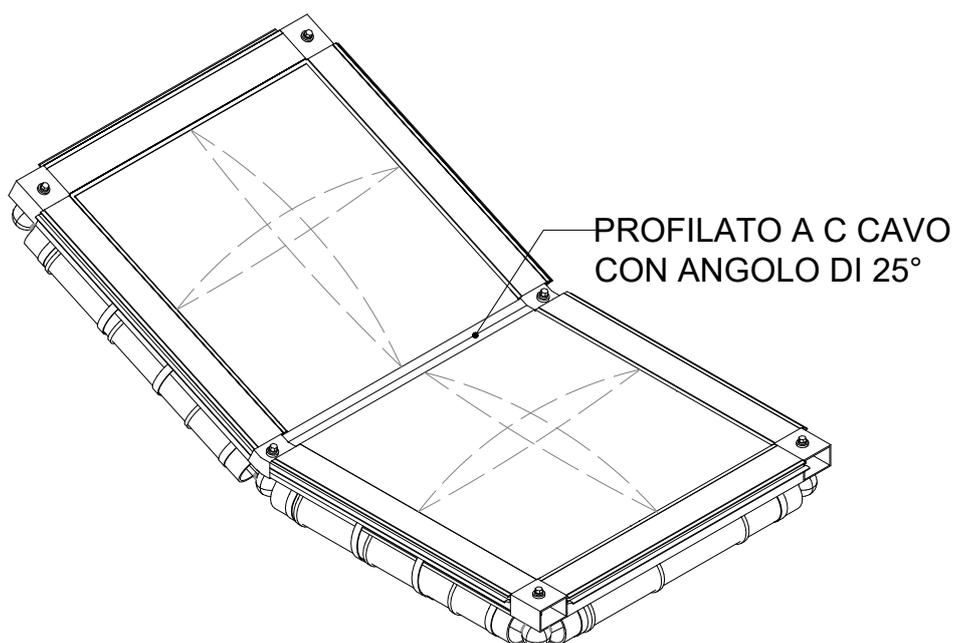
[110] Würth - <https://eshop.wuerth.it/Categorie-di-prodotti/Fascetta-stringitubo/31146505040101.cyid/3114.cgid/it/IT/EUR/?CampaignName=SR007>

disposti al di sopra della
struttura portante in bambù, fa sì che sia la struttura, sia le persone siano
riparate dalla pioggia.



1. Cuscino in ETFE
2. Vite filettata
3. Profilato a C cavo
4. Profilato a C sagomato internamente
5. Neoprene
6. Fascette

In corrispondenza del cambiamento di direzione dei moduli che costituiscono la pensilina, il profilato a C cavo (situato nei pressi del giunto sferico) viene sagomato seguendo l'angolazione necessaria.



Il profilato a C in alluminio individuato appartiene all'azienda Buitink Technology^[111] ed è stato studiato appositamente l'utilizzo in copertura dei cuscini in ETFE. Il peso è di 1 kg per ogni metro lineare di sviluppo e ha le seguenti dimensioni in mm:

L'utilizzo di queste tecnologie garantisce la disassemblabilità e facilita la manutenzione.

L'alimentazione dei singoli cuscini avviene attraverso un sistema di tubazioni del diametro massimo di 10 cm che, appunto, si dirama per ciascun cuscino a partire dal serbatoio sottostante. Per evitare che ci siano perdite d'acqua vengono utilizzate guarnizioni in corrispondenza del punto in cui il pannello in ETFE viene interrotto dalla tubazione.

7.6 Neoprene

Il neoprene è una sottocategoria delle gomme sintetiche sintetizzata a partire dal policloroprene. Presenta una buona resistenza agli agenti atmosferici ed elevata elasticità. Di seguito vengono riportate le caratteristiche^[112]

Dimensione dei pannelli [m]	Variabile
Spessore [mm]	Fino a 50
Densità [g/cm ³]	$\rho = 1,40$
Carico di rottura [kg/cm ²]	50
Allungamento [%]	250
Temperatura di esercizio [°C]	$-20 < T < 100$

Per la realizzazione della chiusura tra profilato e bambù (copertura) e tra bambù e PVC (basamento), viene utilizzato neoprene sottoforma di pannelli, sagomato nel modo opportuno.

Questo materiale consente di evitare l'infiltrazione d'acqua in copertura e di ottenere l'impermeabilizzazione del bambù nel caso del basamento.

7.7 PTFE

Il politetrafluoroetilene fa parte della categoria dei fluoropolimeri ed è co-

[111] Buitink Technology, Lid profile ETFE air cushion roofs - <https://www.buitink-technology.com/uk/materials/detailpage.php?id=85>

[112]MAR-GOM SRL - http://www.mar-gom.it/index.php?option=com_content&view=article&id=3919&Itemid=6600&lang=it

nosciuto per le sue qualità di stabilità termica, resistenza meccanica e per il suo basso coefficiente di attrito. Tali caratteristiche lo rendono adatto ad impieghi in diversi settori. Di seguito vengono riportate le caratteristiche^[113].

Dimensione / forma	Plasmabile in varie forme
Densità [g/cm ³]	$\rho = 1,80$
Peso [g/cm ²]	2,18
Rugosità	0,5
Carico di rottura [N/mm ²]	4,5
Allungamento a rottura [%]	300
Resist. a compressione [N/mm ²]	4,5
Temperatura di esercizio [°C]	$-20 < T < 260$
Coefficiente di dilatazione termica lineare [1/°C]	$16 * 10^{-5}$
Permeabilità ai raggi UV	Sì
Riciclabilità	Sì

Il PTFE è impiegato come materiale per la realizzazione dei serbatoi, la cui capacità varia a seconda dei due casi

$(0,7 \text{ m} * 1 \text{ m} * 0,05 \text{ m}) + (0,65 \text{ m} * 1 \text{ m} * 0,05 \text{ m}) = (0,035 + 0,0325) \text{ m}^3 * 1000 = 67,5 \text{ l}$ nel caso in cui il serbatoio è collocato nella parte superiore della seduta (tipologia A);

$(0,105 \text{ m})^2 * \pi * 0,81 \text{ m} = 0,028 \text{ m}^3 * 1000 = 28 \text{ l}$ nel caso in cui il serbatoio è cilindrico (tipologia B, di cui solo metà destinata a tale funzione).

7.8 Pellicole polimeriche antisolari



[114]

Per quanto riguarda il sistema di ombreggiamento si è deciso di utilizzare delle pellicole antisolari adatte a superfici non vetrate e che possano essere configurate in una forma leggermente curva. Con l'utilizzo di questo film adesivo, la trasparenza

[113] Materie plastiche - <https://www.materieplastiche.eu/ptfe.html>

[114] Ventotto.net - <https://www.ventotto.net/prodotto/pellicole-antisolari-per-policarbonato/>

del materiale non viene alterata ma il calore al di sotto della pensilina viene notevolmente ridotto, così come la temperatura (più bassa di circa 7 °C). Si evita anche il fenomeno dell'abbagliamento. La differenza tra questa tipologia di pellicola e quella per i vetri tradizionali consiste nella tipologia di collante utilizzato. Il materiale di cui sono costituite le pellicole è il poliestere: flessibile e leggero. L'azienda fornitrice più vicina è Ventotto^[115], situata a Venezia (VE). Di seguito vengono riportate le caratteristiche.

Dimensioni [m] Spessore [mm]	Variabili 100 < s < 500
Densità [kg/m ³]	$\rho = 1,80$
Temperatura di esercizio [°C]	$T_{\max} = 130$
Permeabilità ai raggi UV	no (al 99%)
Riflessione della luce [%]	$R_{\text{vis}} = 81\%$ (luce diretta)
Riciclabilità	sì (al 100%), se separato dal collante*
Resist. a compressione [N/mm ²]	4,5

* Il collante solitamente utilizzato per queste applicazioni è il vinile adesivo in pvc.

7.9 Materiale di recupero

Per la realizzazione degli elementi di arredo urbano quali pattumiere e raccoglitori per libri, che completano la pensilina di copertura delle fermate, si utilizzano doghe in legno di recupero per il rivestimento esterno e pannelli truciolari per la realizzazione della struttura (nel caso dei contenitori per



la differenziata). Si tratta, quindi, di materiale derivante da altri oggetti o da altre costruzioni giunte al termine della loro vita utile.

Per esempio, le doghe in legno possono essere recuperate dalle bobine utilizzate per avvolgere i cavi elettrici. Non dovendo supportare carichi particolarmente elevati, non ci

[115] Ventotto.net - <https://www.ventotto.net/prodotto/pellicole-antisolari-per-policarbonato/>



sono specifiche necessità in termini di resistenza. Inoltre, tali materiali di recupero, non avendo tutti la stessa provenienza, possono presentare colorazioni e dimensioni differenti, creando elementi piacevoli alla vista. Nei pressi della città di Torino vi è un centro di recupero di materiali di questo tipo^[116], al quale si può fare riferimento. Tuttavia, tali materiali saranno assemblati mediante giunzioni a secco quali elementi metallici per favorire la smontabilità e il riutilizzo successivo. In questo modo, vengono maggiormente sottolineati i valori del recupero e della sostenibilità che si vogliono trasmettere.

8. Energia primaria e impronta di carbonio

Dati interessanti, dal punto di vista della sostenibilità, sono l'energia primaria necessaria per la realizzazione delle pensiline e l'impronta di carbonio determinata dal trasporto di tutti i materiali.

L'energia primaria, anche detta incorporata, si misura in Mega Joule e rappresenta la sommatoria di tutta l'energia necessaria per la realizzazione di un bene: ogni materiale presenta un proprio valore espresso in MJ/kg o in MJ/m³. Di seguito una tabella riassuntiva dei valori di energia primaria^[117] per i principali materiali utilizzati per la realizzazione della pensilina.

Materiale	Energia incorporata [MJ/kg]
Bambù	2,99
Acciaio	20,1
Aggregato	0,083
PVC, ETFE, Pellicole antisolari	77,2 (materie polimeriche)
Doghe in legno	14

[116] Ecolegno Airasca S.r.l. - <https://www.legnoriciato.com/#!/ecologia>

[117] Energievitali.it - <https://www.energievitali.it/2021/04/27/lenergia-incarnata-dei-materiali-da-costruzione/>

Di seguito i risultati ottenuti per quanto riguarda i singoli materiali e la pensilina nel complesso.

Per la fermata di tipologia A costituita da 8 moduli affiancati:

Calcoli eseguiti per pensilina tipologia A costituita da 8 moduli (per eccesso)										
Materiale	Elemento	Densità [kg/m ³]	Volume [m ³]	Peso materiale [kg]	n° pezzi [-]	Peso per pensilina A [kg]	elementi contenuti in un imballo	n° imballi [-]	Energia incorporata [MJ/kg]	Energia primaria [MJ]
Bambù	Struttura portante	817,26	0,0123	10,05	85	854,45	5	4	2,99	2554,79
	sfere	7870	0,08	629,60	45	28332,00	100	0,5		
Acciaio	aste	7870	0,00005	0,3935	161	63,35	100	1,6	20,10	570981,91
	tiranti	7870	0,0000175	0,14	85	11,71	100	0,9		
Cemento	pavimentazione	2900	9,6	27840	/	27840	/	/	1,80	50112,00
Aggregato *	pavimentazione	1360	7,68	13056	522	10444,8	/	522	0,08	835,58
PVC	basamento	1420	0,005277	7,49334	8	59,94672	1	1	77,20	4627,89
ETFE	PBR	1800	0,0002	0,36	24	8,64	/	/	77,20	667,01
Pellicole antisolari	schermatura	20	0,00025	0,005	24	0,12	/	/	77,20	9,26
Bobine (cad.)	arredo			25	15	375	1	/	14,00	5250,00
										635038,44

Per la fermata di tipologia B costituita da 8 moduli affiancati:

Calcoli eseguiti per pensilina tipologia B costituita da 8 moduli (per eccesso)										
Materiale	Elemento	Densità [kg/m ³]	Volume [m ³]	Peso materiale [kg]	n° pezzi	Peso per pensilina B [kg]	elementi contenuti in un imballo	n° imballi [-]	Energia incorporata [MJ/kg]	Energia primaria [MJ]
Bambù	Struttura portante	817,26	0,0123	10,05	68	683,56		13,6	2,99	2043,83
	sfere	7870	0,08	629,60	36	22665,6	100	0,4		
Acciaio	aste	7870	0,00005	0,3935	127	50,0	100	1,3	20,10	456774,06
	tiranti	7870	0,0000175	0,14	69	9,5	100	0,7		
Cemento	pavimentazione	2900	5,4	15660	/	15660	/	/	1,80	28188,00
Aggregato *	pavimentazione	1360	4,32	5875,2	235	5875,2	/	235	0,08	470,02
PVC	basamento	1420	0,005277	7,49334	8	59,94672	1	1	77,20	4627,89
ETFE	PBR	1800	0,0002	0,36	16	5,76	/	/	77,20	444,67
Pellicole antisolari	schermatura	20	0,00025	0,005	16	0,08	/	/	77,20	6,18
Bobine (cad.)	arredo			25	15	375	1	/	14,00	5250,00
										497804,64

* per 1 m³ di cls occorrono 0,8 m³ di aggregato

Inoltre, viene calcolata l'energia primaria legata al trasporto, i cui risultati sono riportati successivamente con la CO₂ incorporata relativa all'intera pensilina.

L'impronta di carbonio, invece, rappresenta la sommatoria delle emissioni di gas a effetto serra determinata dal trasporto dei materiali ed ottenuta grazie al valore di Global Warming Potential (GWP). Quest'ultimo rappresenta il contributo che una sostanza ha sull'effetto serra, in riferimento al GWP della CO₂ che è pari a 1. Per il gasolio, carburante utilizzato dai mezzi di trasporto in questo studio, la quantità di CO₂ equivalente emessa da 1 l di sostanza è pari a 2,65 g ^[118]. Per ridurre al minimo l'impatto sull'ambiente, si è cercato di realizzare un approffio a filiera corta utilizzando materiali provenienti, il più possibile, da luoghi vicini al sito di progetto.

I mezzi di trasporto ^[119] che sono stati considerati sono essenzialmente di tre tipologie:

[118] Quattroruote - https://www.quattroruote.it/news/eco_news/2010/01/15/consumi_ed_emissioni_per_capirne_di_pi%C3%B9.html

[119] Barny Spare Parts - <https://barnyspareparts.it/guide/come-scegliere-tra-le-principali-tipologie-di-camion/>

- Van, portata massima 8 quintali;
- Furgone centinato, portata massima 10 quintali;
- Motrice, portata massima 100 quintali.

La scelta tra questi è avvenuta in base alla necessità e, quindi, al peso del materiale. Il consumo ^[120] è rispettivamente di 0,11 l/km; 0,25 l/km e 0,35 l/km. Nel caso in cui per uno stesso materiale servano più tipologie di mezzo di trasporto, il consumo è espresso come la media dei singoli.

Inoltre, ogni materiale prevede imballi differenti, riassunti nella tabella che segue.

Materiale	Tipologia imballi
Bambù	Fasci di 5 canne di lunghezza 4 m
Acciaio	Imballi da 100 pezzi
Aggregato	Sacchi da 25 kg
PVC	Tubi venduti anche singolarmente
ETFE	In base alla richiesta
Pellicole antisolari	In base alla richiesta
Doghe in legno	Bobine vendute anche singolarmente

Di seguito, invece, le tabelle di sintesi riguardanti i calcoli eseguiti.

Per la fermata di tipologia A costituita da 8 moduli affiancati:

Calcoli eseguiti per pensilina tipologia A costituita da 8 moduli (per eccesso)									
Materiale	Elemento	Densità [kg/m ³]	Volume [m ³]	Peso materiale [kg]	n° pezzi [-]	Peso per pensilina A [kg]	elementi contenuti in un imballo	n° imballi [-]	Tipologia mezzo
Bambù	Struttura portante	817,26	0,0123	10,05	85	854,45	5	4	Furgone centinato
Acciaio	sfere	7870	0,08	629,60	45	28332,00	100	0,5	Motrice
	aste	7870	0,00005	0,3935	161	63,35	100	1,6	
	tiranti	7870	0,0000175	0,14	85	11,71	100	0,9	
Cemento	pavimentazione	2900	9,6	27840	/	27840	/	/	Motrice
Aggregato*	pavimentazione	1360	7,68	13056	522	10444,8	/	522	Motrice
PVC	basamento	1420	0,005277	7,49334	8	59,94672	1	1	Van
ETFE	PBR	1800	0,0002	0,36	24	8,64	/	/	Van
Pellicole antisolari	schermatura	20	0,00025	0,005	24	0,12	/	/	Van
Bobine (cad.)	arredo			25	15	375	1	/	Van

* per 1 m³ di cls occorrono 0,8 m³ di aggregato

Calcoli eseguiti per pensilina tipologia A costituita da 8 moduli (per eccesso)												
Van necessari [-] capienza 800 kg	Furgoni centinati necessari [-] capienza 1000 kg	Motrici necessarie [-] capienza 10000 kg	Carburante	Consumo medio carburante [l/km]	Distanza [km]	Consumo effettivo [l]	Consumo effettivo [kg]	GWP _{gasolio} [g/l]	CO ₂ incorporata [g]	Energia incorporata gasolio [MJ/kg]	Energia primaria [MJ]	
/	1	/	Gasolio	0,25	25	6,25	5,22	2,65	16,56	0,043	0,22	
/	/	3		0,35	295	103,25	86,21	2,65	273,61		3,71	
/	/	/		0,35	295	103,25	86,21	2,65	273,61		3,71	
/	/	3		0,35	295	103,25	86,21	2,65	273,61		3,71	
/	/	1		0,35	15	5,25	4,38	2,65	41,74		0,19	
/	/	/		0,35	15	5,25	4,38	2,65	13,91		0,19	
1	/	/		0,11	29	3,19	2,66365	2,65	8,45		0,11	
1	/	/		0,11	225	24,75	20,67	2,65	65,59		0,89	
1	/	/		0,11	400	44	36,74	2,65	116,60		1,58	
1	/	/		0,11	25	2,75	2,30	2,65	7,29		0,10	
									1090,98			14,40

[120] Maurelli.it - <https://maurelli.it/camion-quanto-consuma/#:~:text=In%20genere%20il%20consumo%20medio,40%20litri%20ogni%20100%20km>

Per la fermata di tipologia B costituita da 8 moduli affiancati

Calcoli eseguiti per pensilina tipologia B costituita da 8 moduli (per eccesso)									
Materiale	Elemento	Densità [kg/m ³]	Volume [m ³]	Peso materiale [kg]	n° pezzi	Peso per pensilina B [kg]	elementi contenuti in un imballo	n° imballi [-]	Tipologia mezzo
Bambù	Struttura portante	817,26	0,0123	10,05	68	683,56		13,6	Van
Acciaio	sfere	7870	0,08	629,60	36	22665,6	100	0,4	Van, furgone centinato, motrice
	aste	7870	0,00005	0,3935	127	50,0	100	1,3	
	tiranti	7870	0,0000175	0,14	69	9,5	100	0,7	
Cemento	pavimentazione	2900	5,4	15660	/	15660	/	626	Motrice
Aggregato*	pavimentazione	1360	4,32	5875,2	235	5875,2	/	235	Motrice
PVC	basamento	1420	0,005277	7,49334	8	59,94672	1	1	Van
ETFE	PBR	1800	0,0002	0,36	16	5,76	/	/	Van
Pellicole antisolari	schermatura	20	0,00025	0,005	16	0,08	/	/	Van
Bobine (cad.)	arredo			25	15	375	1	/	Van

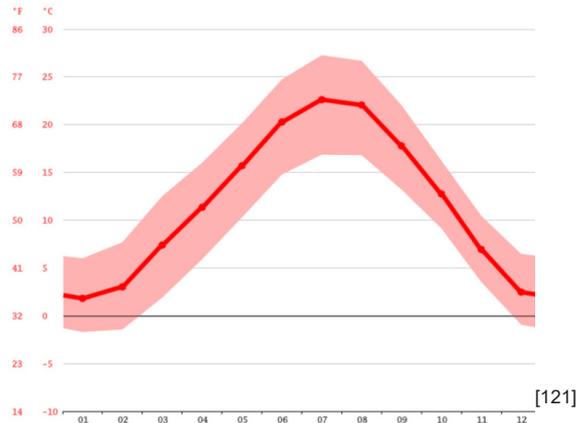
* per 1 m³ di cls occorrono 0,8 m³ di aggregato

Calcoli eseguiti per pensilina tipologia B costituita da 8 moduli (per eccesso)												
Van necessari [-] capienza 800 kg	Furgoni centinati necessari [-] capienza 1000 kg	Motrici necessarie [-] capienza 10000 kg	Carburante	Consumo medio carburante [l/km]	Distanza [km]	Consumo effettivo [l]	Consumo effettivo [kg]	GWP _{gasolio} [g/l]	CO ₂ incorporata [g]	Energia incorporata gasolio [MJ/kg]	Energia primaria [MJ]	
1	/	/	Gasolio	0,11	25	2,75	2,30	2,65	7,29	0,043	0,10	
/	/	/		0,262	295	77,29	64,54	2,65	204,82		2,78	
1	2	2		0,262	295	77,29	64,54	2,65	409,64		2,78	
/	/	2		0,262	295	77,29	64,54	2,65	409,64		2,78	
/	/	/		0,35	15	5,25	4,38	2,65	27,83		0,19	
/	/	1		0,35	15	5,25	4,38	2,65	13,91		4,38	
1	/	/		0,11	29	3,19	2,66365	2,65	8,45		0,11	
1	/	/		0,11	225	24,75	20,67	2,65	65,59		0,89	
1	/	/		0,11	400	44	36,74	2,65	116,60		1,58	
1	/	/		0,11	25	2,75	2,30	2,65	7,29		0,10	
									1271,05		15,68	

9. Strumenti e funzionamento

In linea di massima il Piemonte presenta un clima temperato caratterizzato da inverni freddi e asciutti ed estati calde e afose. Ciò implica che la temperatura subisce importanti variazioni con il susseguirsi delle stagioni. Come si è detto in precedenza gli sbalzi di temperatura eccessivi influiscono sul rendimento della coltura e la temperatura ottimale per la crescita delle microalghe è compresa tra i 20°C e i 30°C: al di sotto di tale soglia la crescita è fortemente ridotta, mentre al di sopra è completamente impedita. Alle latitudini del caso studio, dunque, si rendono necessari sistemi di controllo (ad esempio l'ombreggiatura, raffrescamento). Di seguito viene riportato un grafico della temperatura media nei vari mesi dell'anno a Torino, che riporta in ascisse i vari mesi ed in ordinate la temperatura media mensile:

La temperatura maggiore si verifica nel mese di Luglio con 22,6°C e quella minore a Gennaio con 1,8°C. La zona climatica in cui ricade la città è la E con 2617 GG (Gradi Giorno).



[121]

La planimetria e la restituzione tridimensionale sono state ricavate attraverso l'unione di informazioni ricavate dal Geoportale GIS^[122], da Google Earth^[123] e da alcune misurazioni personali.

Per effettuare le verifiche ambientali nei diversi luoghi individuati all'interno della città, è stato utilizzato il software Climate Studio, che consente di ottenere informazioni più precise per quanto riguarda le condizioni di illuminazione diurna e fornisce un'analisi termica concettuale. Dopo aver modellato tridimensionalmente i casi studio, si è passati all'analisi attraverso il Software Climate Studio, il quale consente di inserire le coordinate geografiche del luogo in cui ci si trova, l'orientamento specifico e tiene anche in considerazione l'ambiente circostante con tutte le caratteristiche dei materiali (per esempio la riflessione) da cui è costituito.

10. Simulazione e parametri di valutazione

Per lo studio e la valutazione del fotobioreattore descritto nello studio di tesi, è necessario considerare diversi parametri sia per quanto riguarda le componenti strutturali, sia in merito alle condizioni illuminotecniche e di temperatura in cui il fotobioreattore opererà. Per semplificazione, i fotobioreattori che operano sullo stesso piano, quindi alla stessa inclinazione, saranno considerati come piani.

[121] Climate-data.org - <https://it.climate-data.org/europa/italia/piemonte/torino-1108/>

[122] <https://www.geoportale.piemonte.it/cms/>

[123] <https://earth.google.com/web/>

10.1 Luce

La fonte di luce che si è deciso di utilizzare è la radiazione solare naturale, poiché disponibile abbondantemente in natura. Di tutte le lunghezze d'onda emesse dal Sole (radiazioni elettromagnetiche), però, il processo di fotosintesi delle microalghe utilizza solo quelle comprese tra 400 µm e 700 µm, cioè lo spettro visibile, mentre la radiazione con lunghezza d'onda inferiore (radiazione ultravioletta) può essere dannosa per le microalghe, in quanto interrompe il processo di crescita. È importante che le condizioni di illuminazione siano ottimali, per evitare che la crescita sia limitata nel caso in cui la luce non abbia sufficiente intensità. Nelle ore notturne, invece, la luce è fornita dai sistemi di illuminamento necessari non sono alla crescita delle microalghe – anche se non colpisce direttamente la superficie dei PBR - ma anche alla vivibilità e fruibilità notturna dello spazio.

10.2 Irraggiamento

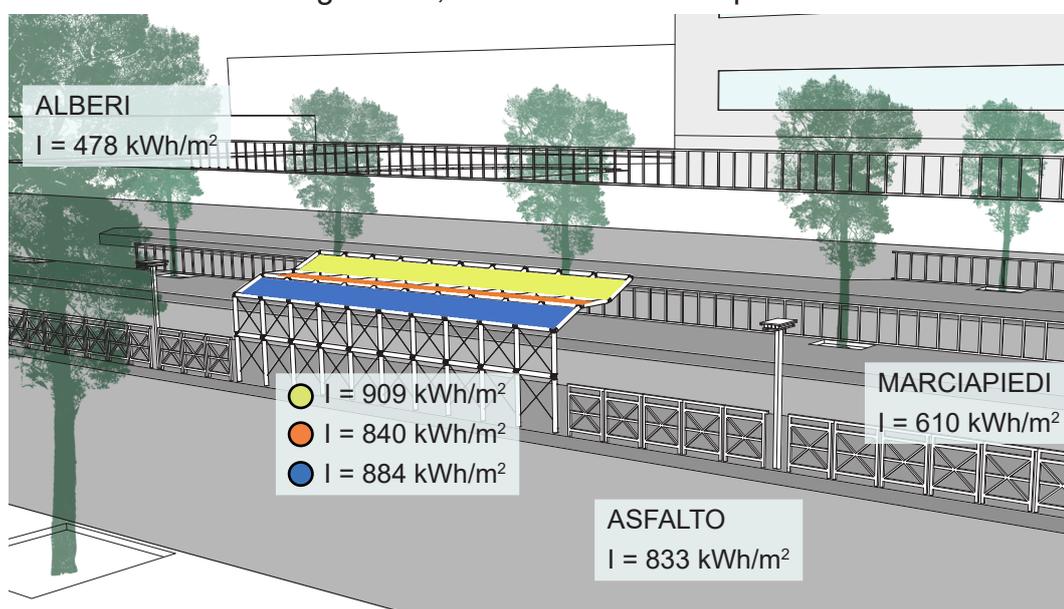
Rappresenta l'energia per unità di area proveniente dal Sole e varia a seconda delle località e del tessuto urbano che la caratterizza. Per questo motivo, con il software ClimateStudio, ad ogni elemento del contesto è stato associato il materiale corrispondente in modo da utilizzare i valori di riflessione effettiva. Ad ogni superficie è stata assegnata una griglia di punti, per ognuno dei quali viene calcolata l'esposizione alla radiazione solare e quindi l'irraggiamento. I risultati ottenuti hanno il seguente aspetto:

Surface ID	Description	Sensor Ind	Sensor Area	Px	Py	Pz	Nx	Ny	Nz	Annual Direct Exposure High Temp (DBT > 25 degC)
1	asfalto	0	3,616272	227,9604	-115,343	-1,85E-13	0	0	1	209,4395599
1	asfalto	1	3,616272	229,9127	-115,343	-1,85E-13	0	0	1	215,4125366
1	asfalto	2	3,616272	231,8649	-115,343	-1,85E-13	0	0	1	191,509079
1	asfalto	3	3,616272	233,8172	-115,343	-1,85E-13	0	0	1	184,325592
1	asfalto	4	3,616272	235,7694	-115,343	-1,85E-13	0	0	1	196,3394775
1	asfalto	5	3,616272	237,7217	-115,343	-1,85E-13	0	0	1	176,3283081
1	asfalto	6	3,616272	239,6739	-115,343	-1,85E-13	0	0	1	163,8781128

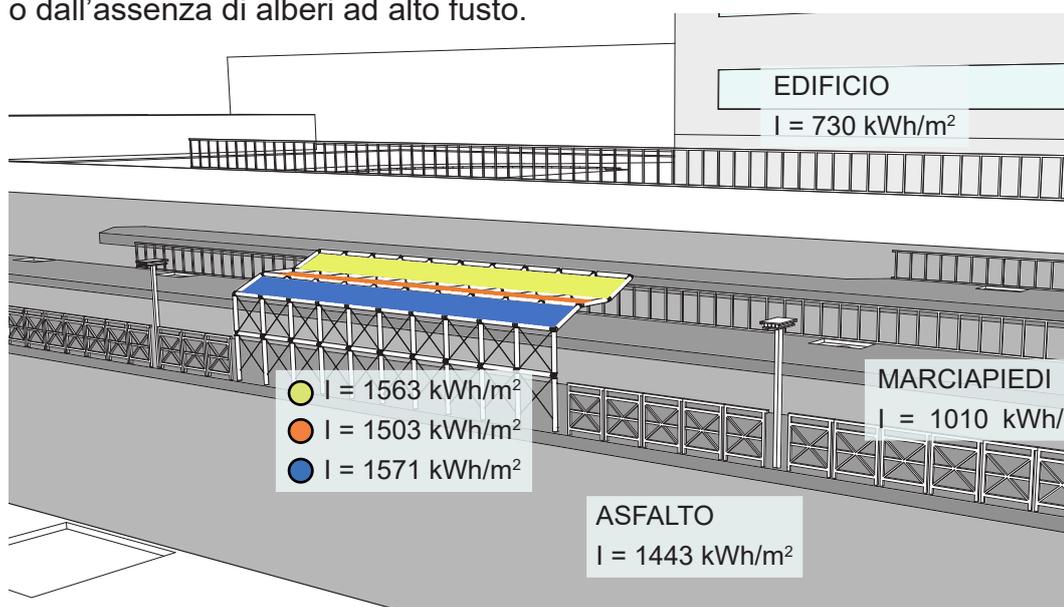
Tali risultati vengono aggregati e riportati in maniera semplificata per offrire una lettura più immediata e facilitarne la comprensione da parte del lettore.

Inoltre, come si è detto, vegetazione è un fattore importante che condiziona l'irraggiamento e per questo motivo si è deciso di unire gli output provenienti da due analisi differenti, laddove vi è la presenza di vegetazione): per i mesi di Aprile, Maggio, Giugno, Luglio, Agosto, Settembre e Ottobre è stata considerata la presenza degli alberi; per i mesi di Gennaio, Febbraio, Marzo, Novembre e Dicembre viene, invece, trascurata la presenza degli alberi poiché in questi mesi si presuppone che le chiome non presentino foglie.

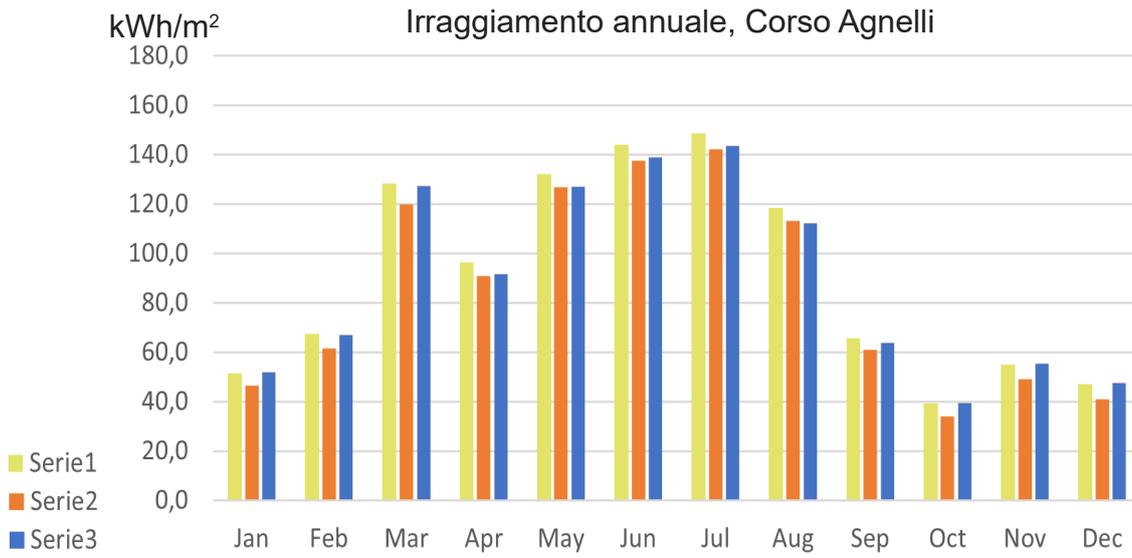
Il primo caso in Corso Agnelli è stato analizzato in due modi differenti, per tenere conto della stagionalità, caratterizzata dalla presenza di alberi



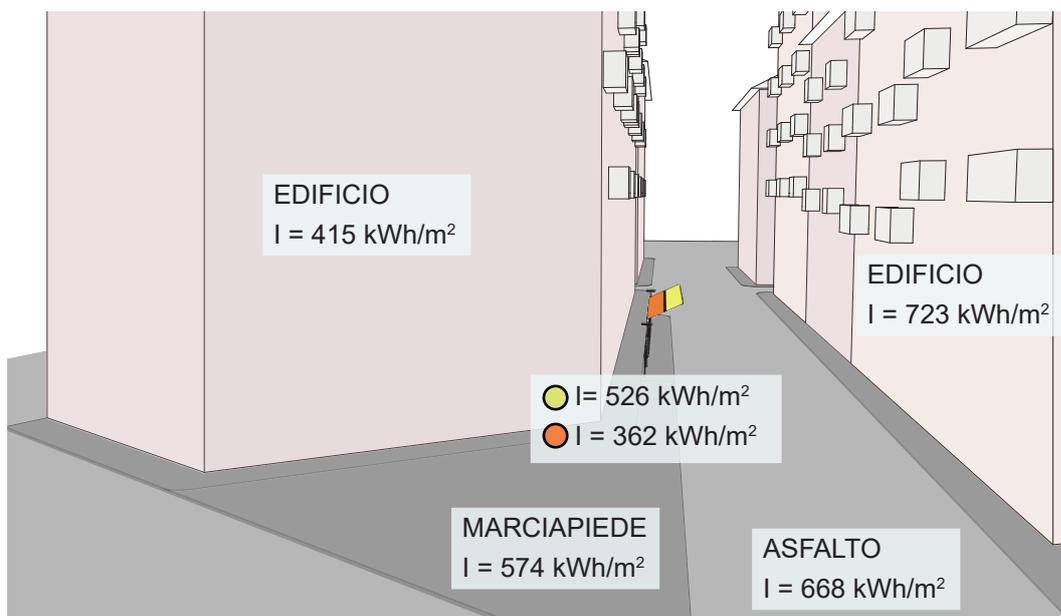
o dall'assenza di alberi ad alto fusto.



Di seguito viene riportato un grafico dell'irraggiamento annuale, che integra la stagione calda (con alberi) e quella fredda (senza alberi). Sull'asse delle ordinate viene riportato l'irraggiamento [kWh/m²] e su quello delle ascisse i mesi dell'anno. Sono presenti tre serie perché i piani colpiti dalla radiazione solare sono tre, con inclinazioni differenti tra loro.

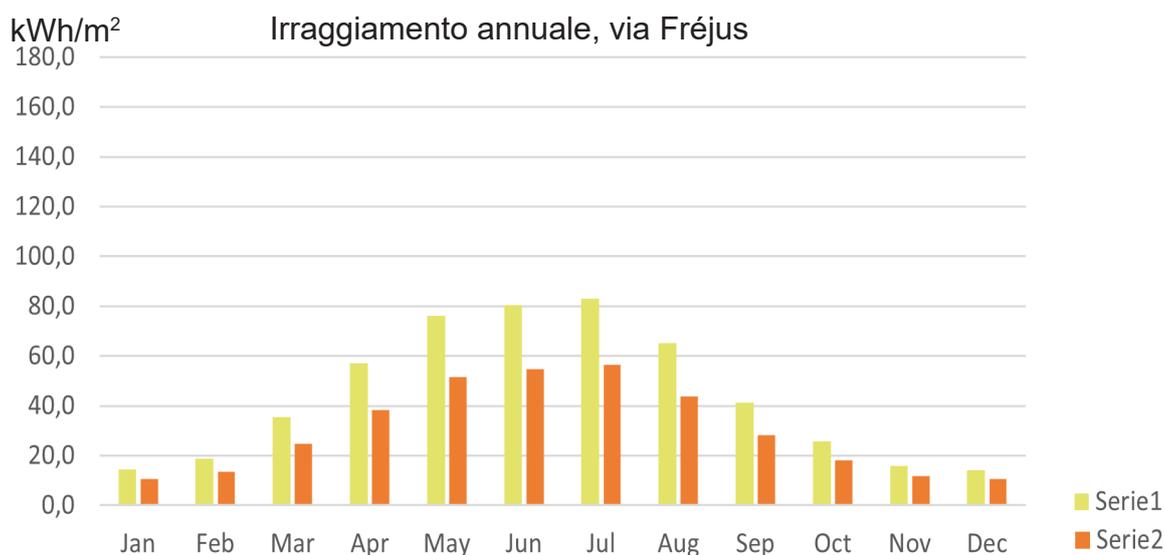


Nel secondo caso in Via Fréjus è stata effettuata un'unica analisi poiché non è presente vegetazione che influisce sulle condizioni ambientali e di irraggiamento.

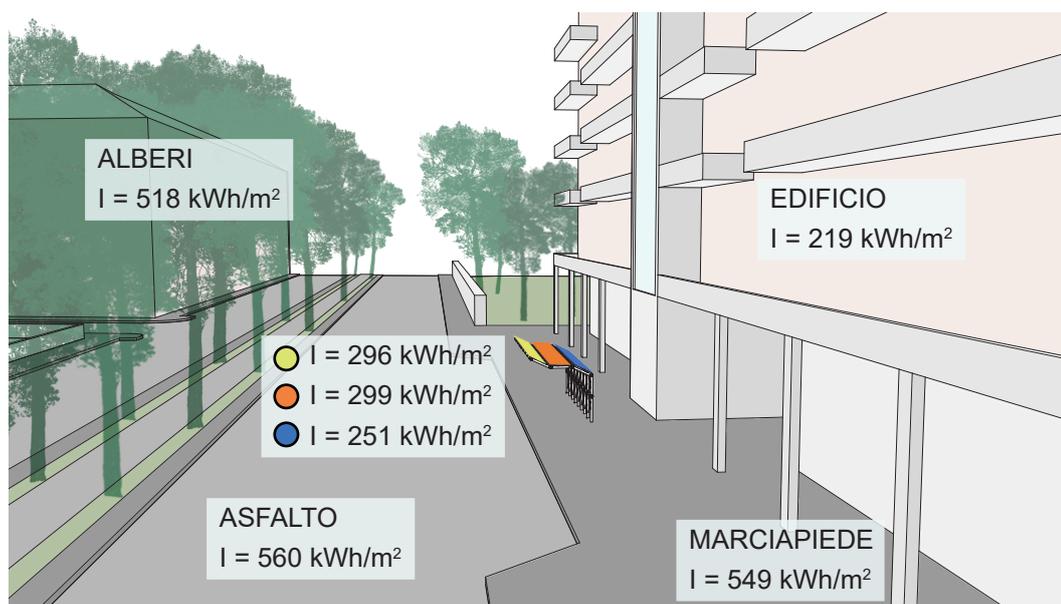


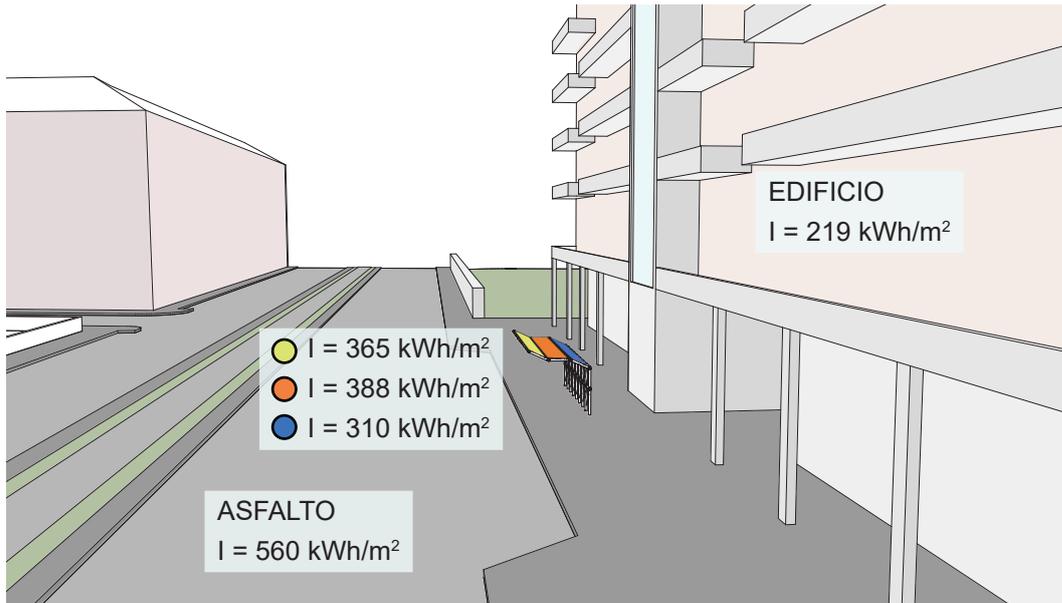
Di seguito viene riportato un grafico dell'irraggiamento annuale. Sull'asse delle ordinate viene riportato l'irraggiamento [kWh/m²] e su quello delle ascisse i mesi dell'anno.

Sono presenti due serie perché i piani colpiti dalla radiazione solare sono due, con inclinazioni decisamente differenti tra loro.

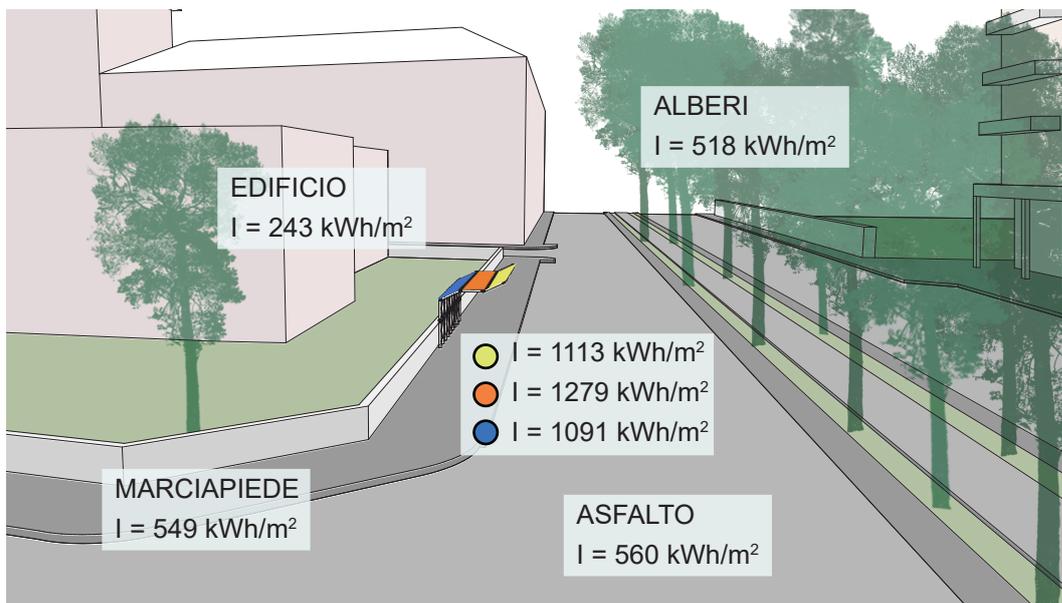


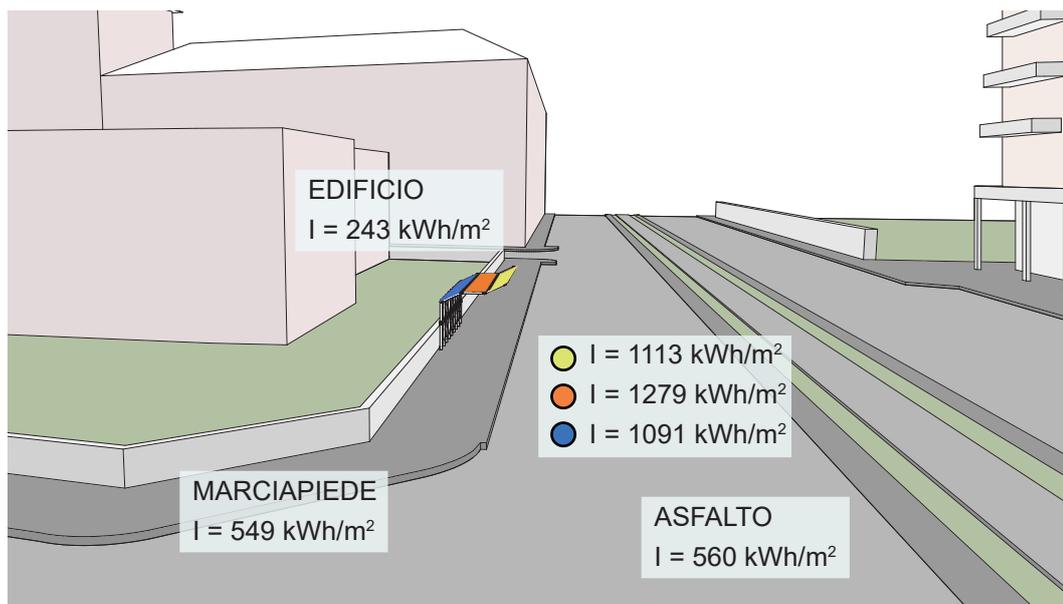
Nel terzo caso in via Verolengo, invece, sono state analizzate le fermate su entrambi i lati della strada poiché presentano un contesto differente. Una presenta un edificio molto alto alle spalle.





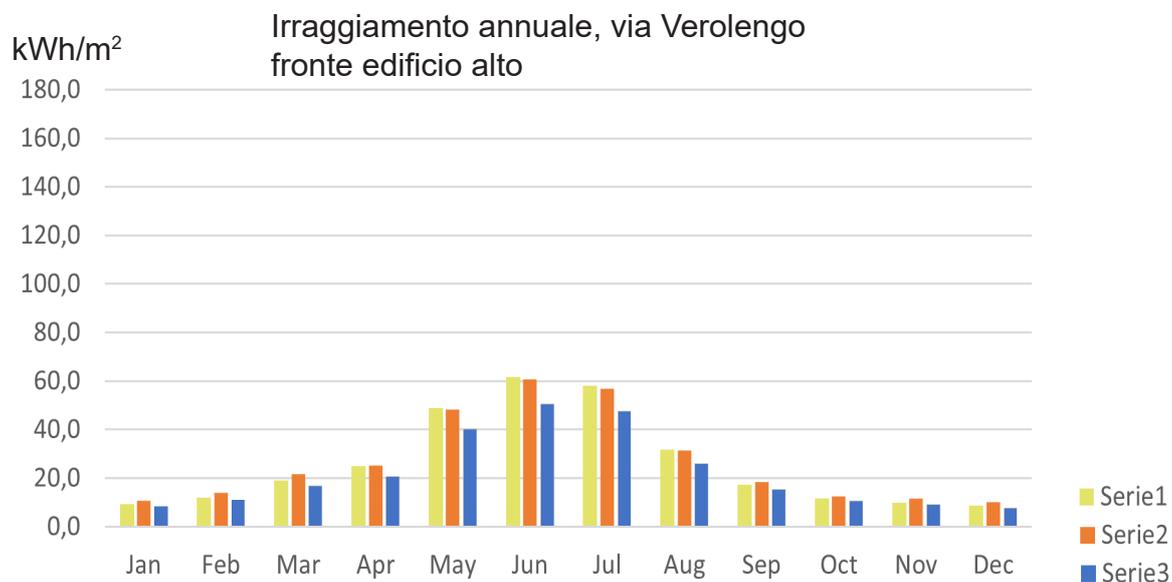
La fermata sul lato opposto della strada, invece, alle spalle presenta un edificio più basso.



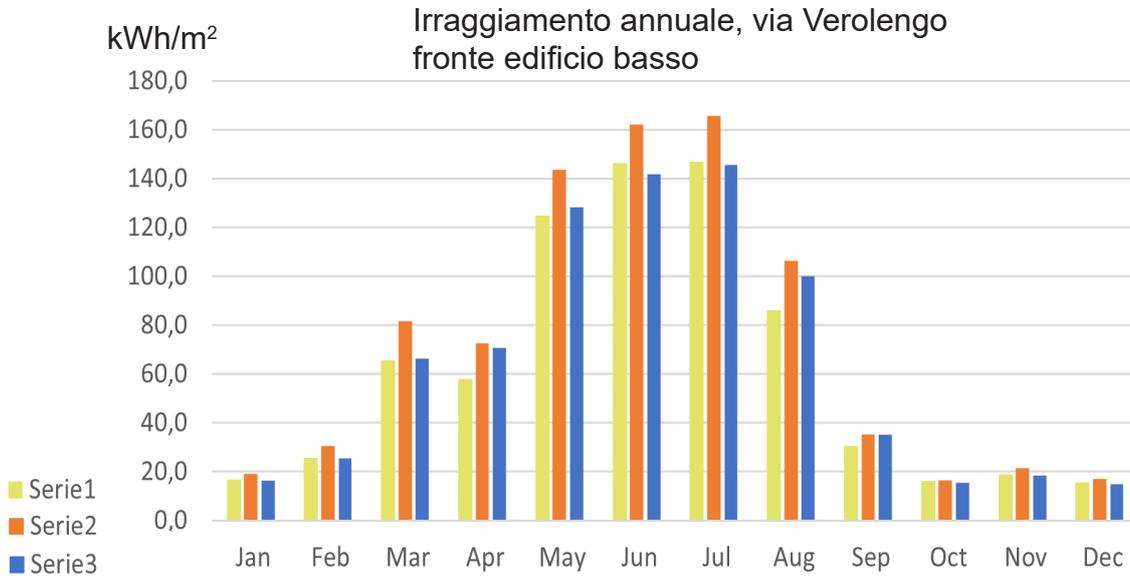


Di seguito vengono riportati i grafici dell'irraggiamento annuale, che integra la stagione calda (con alberi) e quella fredda (senza alberi), riguardanti la fermata posta sul fronte più ostruito e la fermata posta sul fronte più libero. Sull'asse delle ordinate viene riportato l'irraggiamento [kWh/m²] e su quello delle ascisse i mesi dell'anno. Sono presenti tre serie perché i piani colpiti dalla radiazione solare sono tre, con inclinazioni leggermente differenti tra loro.

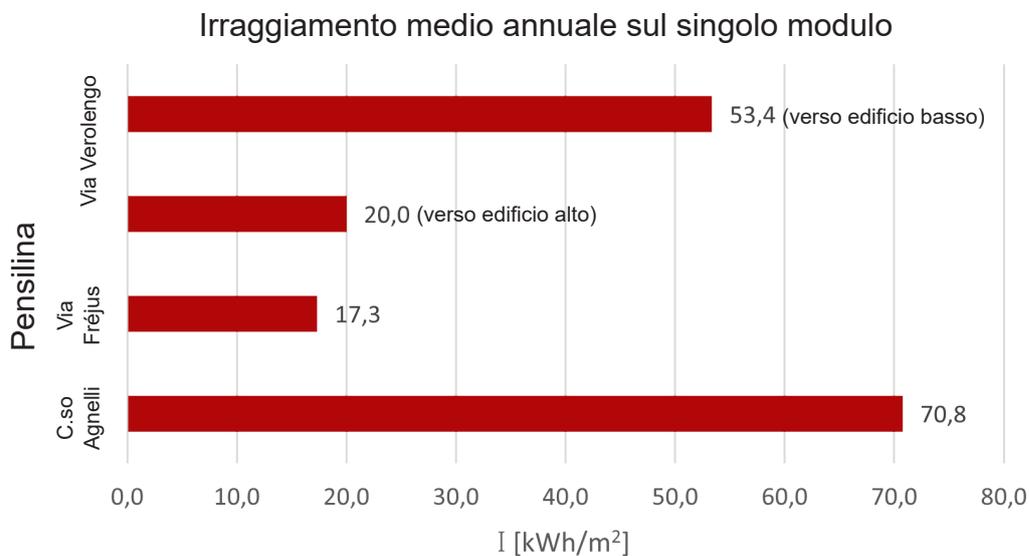
In corrispondenza dell'edificio più alto, i risultati sono i seguenti:



In corrispondenza dell'edificio più basso, i risultati sono i seguenti:



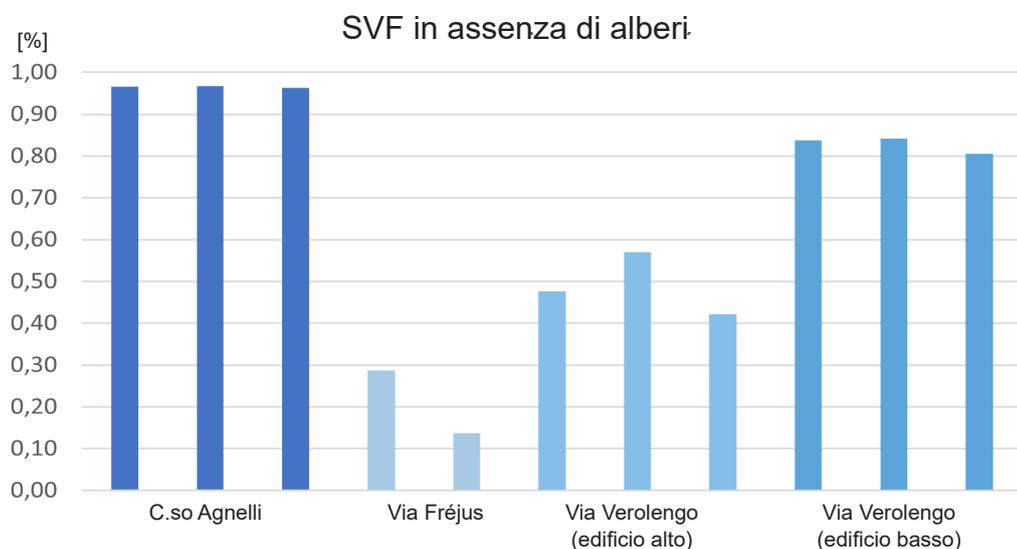
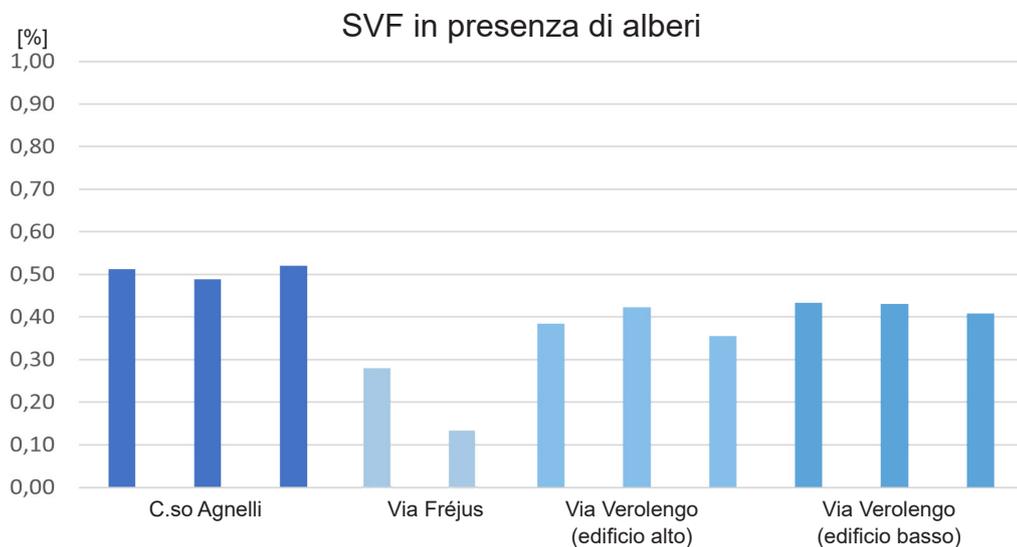
Di seguito viene, invece, riportato un grafico complessivo che mette a confronto l'irraggiamento sui singoli moduli che costituiscono i diversi piani della pensilina nei tre casi analizzati, quindi nei tre differenti luoghi all'interno della città. I risultati derivano dalla media aritmetica dell'irraggiamento incidente sui due (tipologia B) o tre (tipologia A) piani che costituiscono la pensilina.



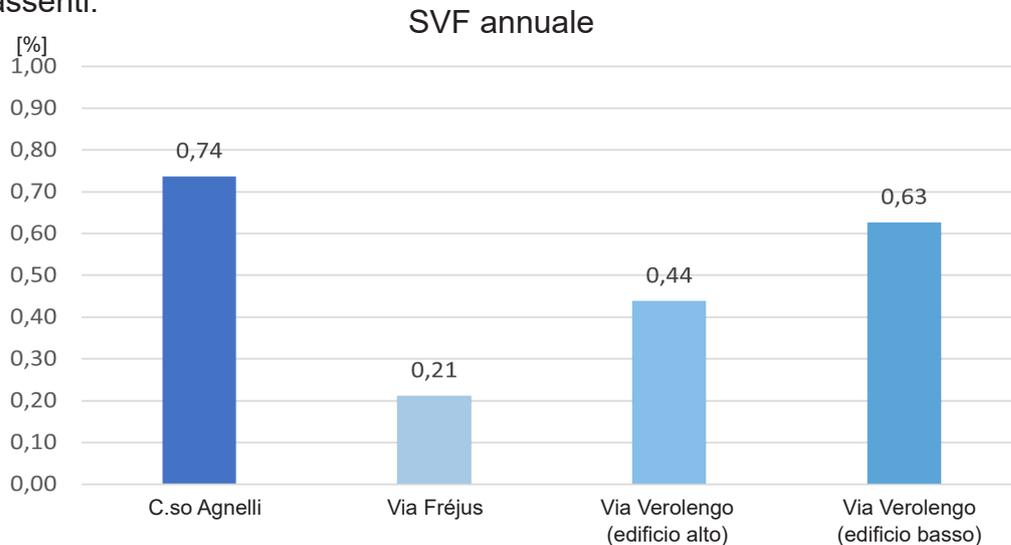
10.3 Sky View Factor

Lo Sky View Factor è il fattore che indica la porzione di cielo visibile da un determinato punto scelto, in questo caso la pensilina. Anche questo fattore è stato analizzato sia in presenza, sia in assenza di alberi. Più questo valore si avvicina all'1 (limite massimo), maggiore sarà la perdita di calore in atmosfera, poiché esso non viene "intrappolato" dalle ostruzioni in quanto, se il valore è pari a 1, il cielo risulta essere completamente libero. Di seguito vengono riportati i risultati dei tre casi in un unico grafico, in modo da poter fare velocemente un confronto.

Il valore di SVF relativo a via Fréjus, risulta essere uguale nei due casi a causa dell'assenza di alberi.



Di seguito viene riportato l'istogramma relativo al fattore di SVF annuale, che integra la stagione in cui sono presenti gli alberi e quella in cui sono assenti.



10.4 Temperatura dell'aria esterna

Per la determinazione della temperatura dell'aria esterna T_{sa} , che si verifica nel corso dell'anno nei tre casi considerati, è stato necessario ricavare una serie di dati utili:

- la temperatura dell'ambiente esterno T_{ae} è stata estrapolata dal file climatico relativo alla città di Torino^[124]: per tenere conto sia delle condizioni di cielo sereno, sia quelle di cielo coperto è stata calcolata la temperatura media oraria facendo, appunto, la media della temperatura corrispondente alla stessa ora per tutti i giorni del mese;

- il coefficiente di assorbimento α utilizzato è quello dell'acqua (pari a 0,16), poiché la stratigrafia del pannello PBR è costituita da: uno strato superiore ed uno inferiore di ETFE il cui spessore è trascurabile, alge la cui presenza varia poiché sono in movimento e l'acqua, che rappresenta lo strato più significativo; tale coefficiente deriva dalla formula $\alpha = (2 \pi k) / \lambda 100$

Dove k è un fattore che dipende dalla trasparenza dell'acqua (in biologia marina è assunto pari a 1,45 W/mK^[125] e λ la conducibilità termica dell'acqua pari a 0,56 W/mK;

- l'irradianza I [W/m²] è stata calcolata per tutti i giorni dell'anno e per tutte

[124] EnergyPlus - https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/ITA/ITA_Torino-Caselle.160590_IGDG

[125] Biologia Marina - https://www.unisalento.it/documents/20152/218139/13_2014_Assorbimento+e+trasmissione.pdf/9cac6e7a-46a5-c6a7-5854-4515c9c102fb?version=1.0

le ore del giorno, per un totale di 8760 valori, grazie al software Climate Studio;

- la resistenza R è stata assunta pari a 0,04 m²K/W poiché il coefficiente di scambio termico liminare (convezione + irraggiamento) con l'ambiente esterno he è pari a 25 W/m²K (R=1/h_e)

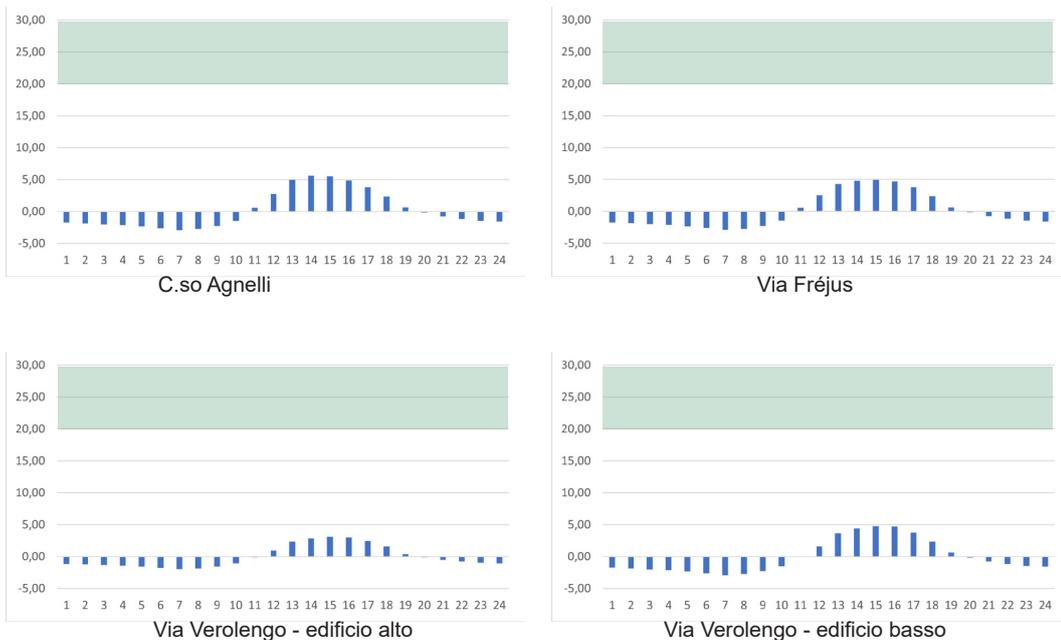
Di conseguenza, è stata applicata la seguente formula:

$$T_{sa} = T_{ae} + \alpha * I * R$$

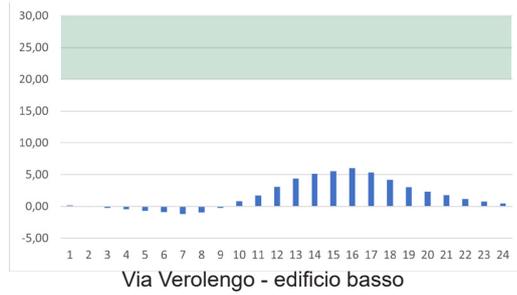
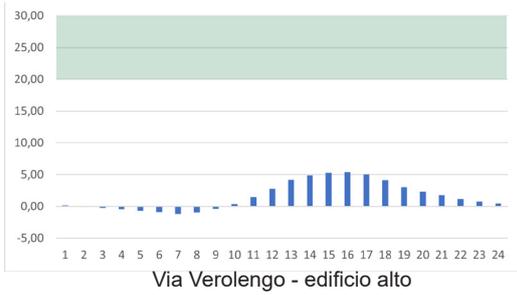
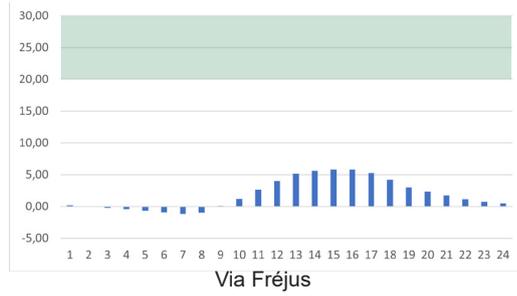
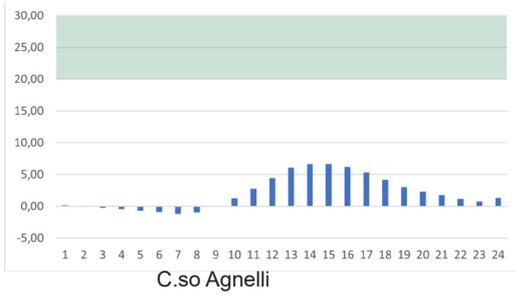
I risultati vengono riportati sottoforma di istogramma in cui sono riportati i °C sull'asse delle ordinate e le ore del giorno sull'asse delle ascisse.

L'intervallo di temperatura ottimale per la crescita delle microalghe viene segnalato in colore verde.

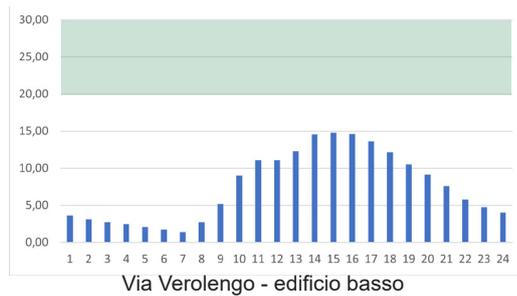
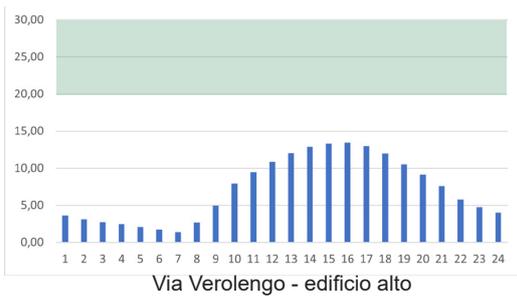
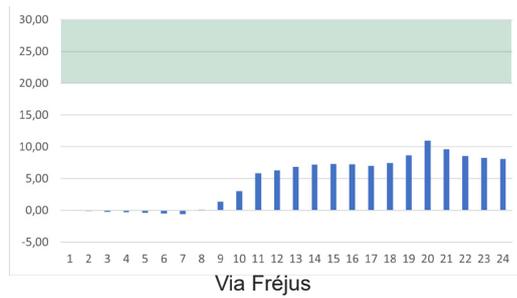
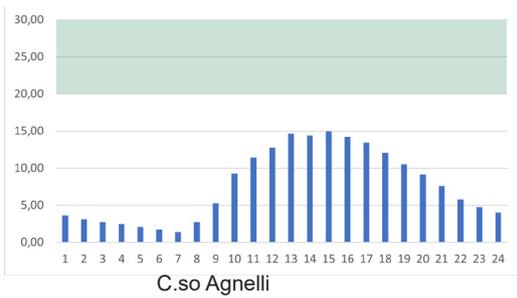
Gennaio



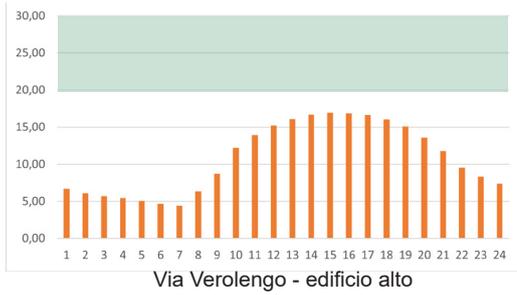
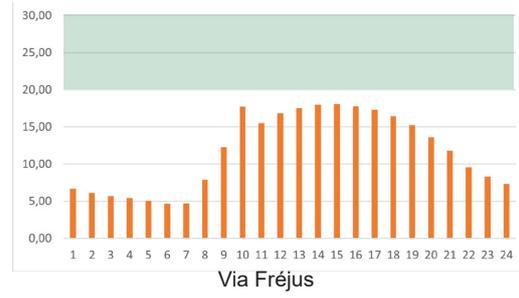
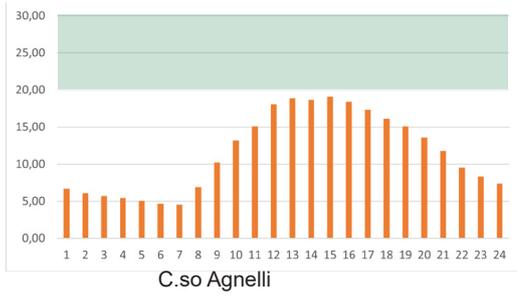
Febbraio



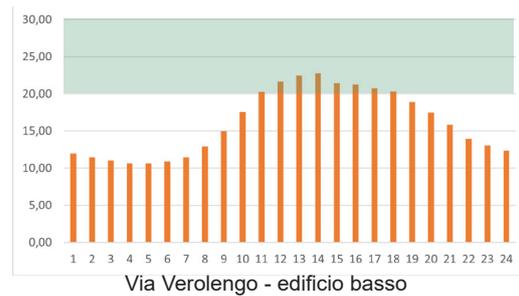
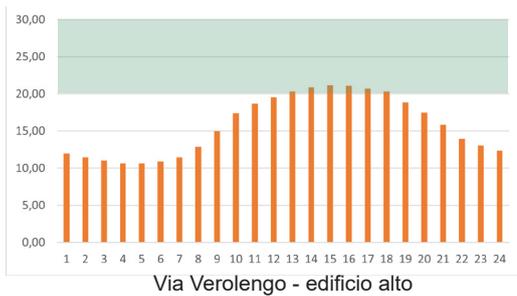
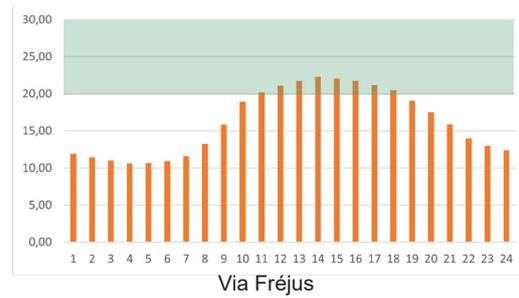
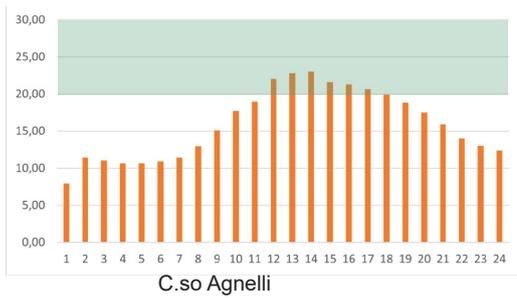
Marzo



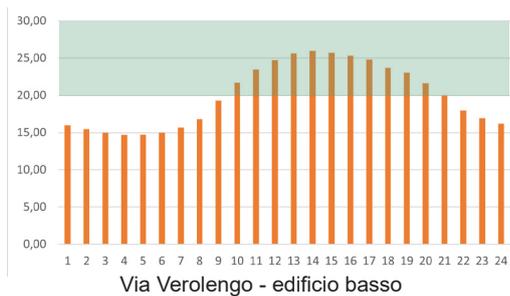
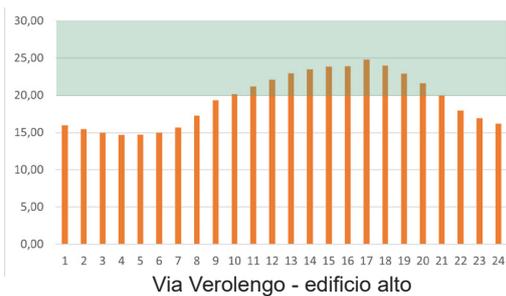
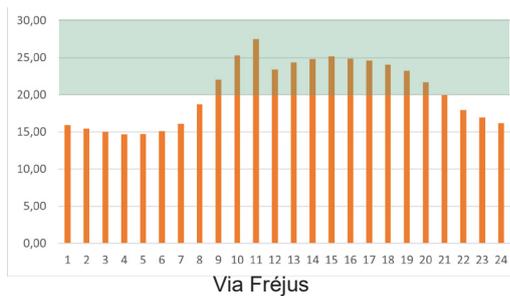
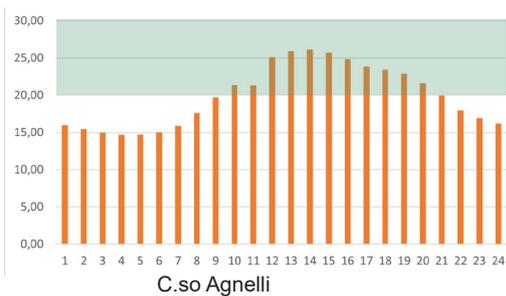
Aprile



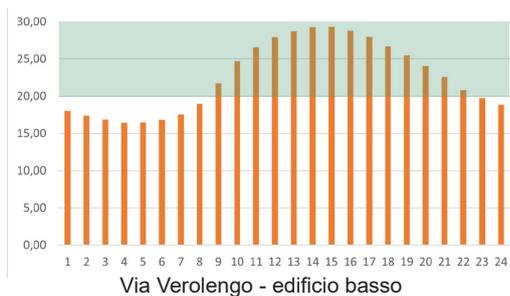
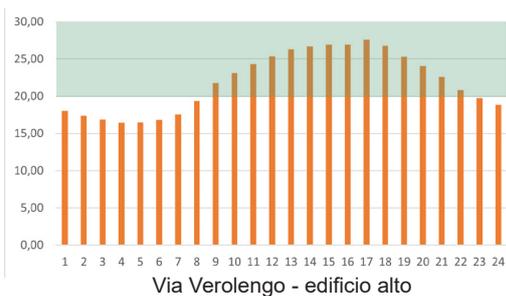
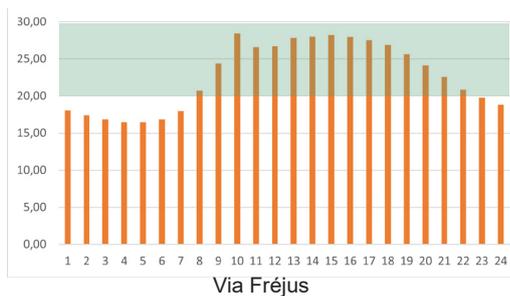
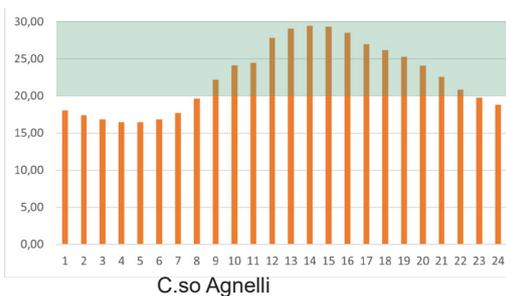
Maggio



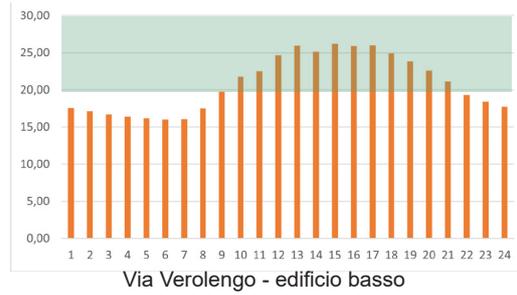
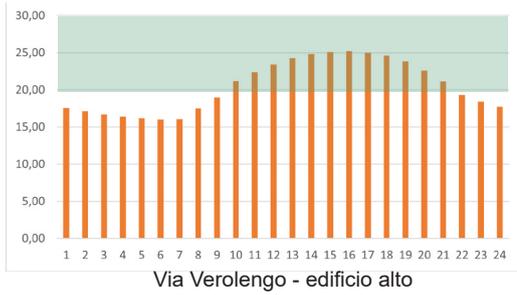
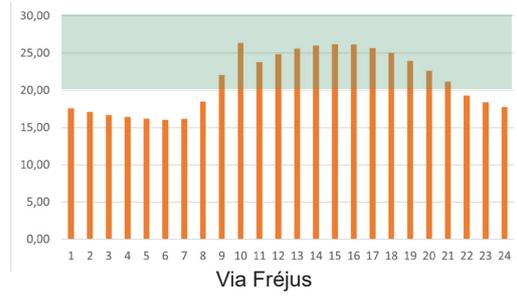
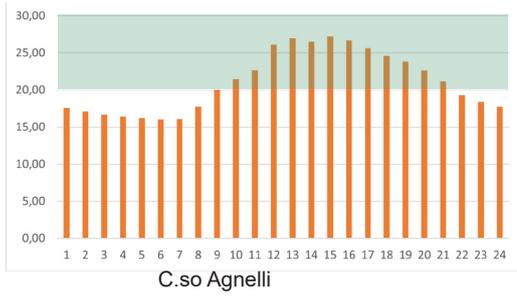
Giugno



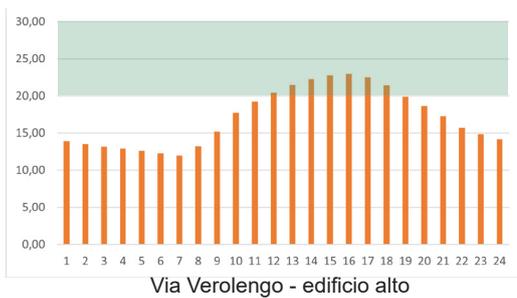
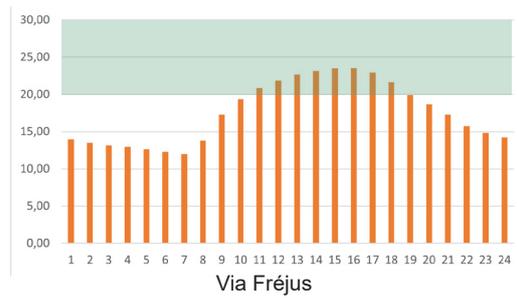
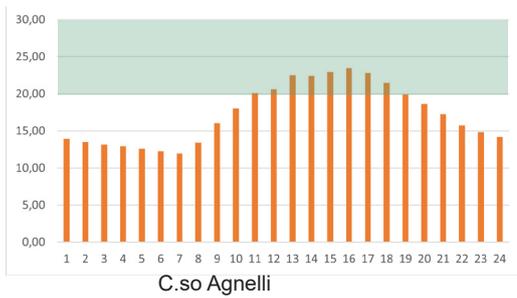
Luglio



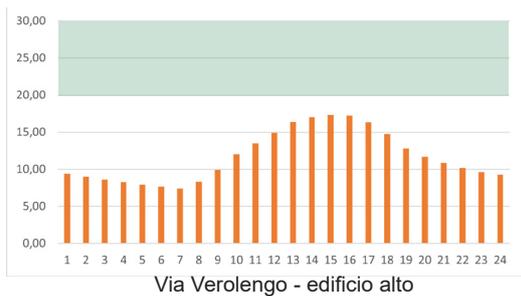
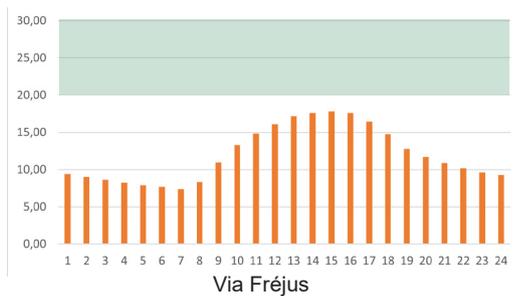
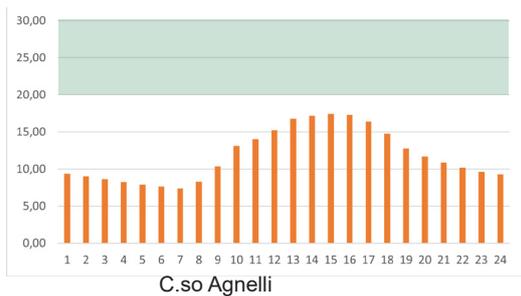
Agosto



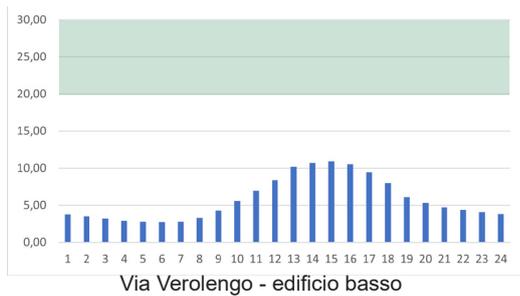
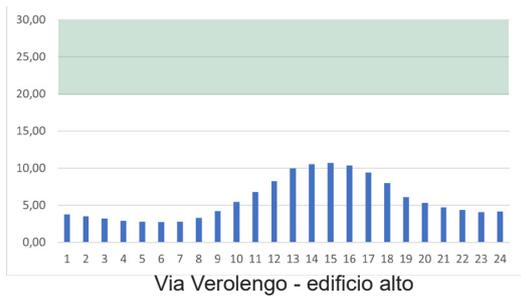
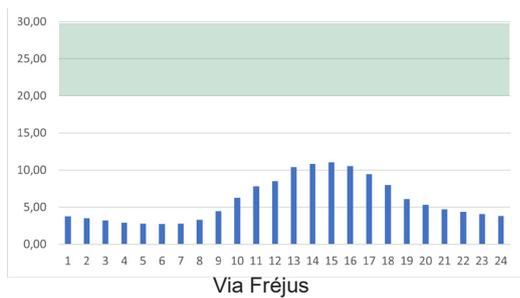
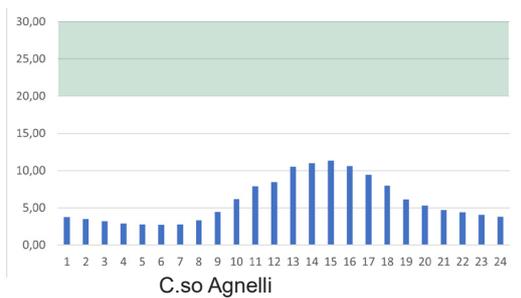
Settembre



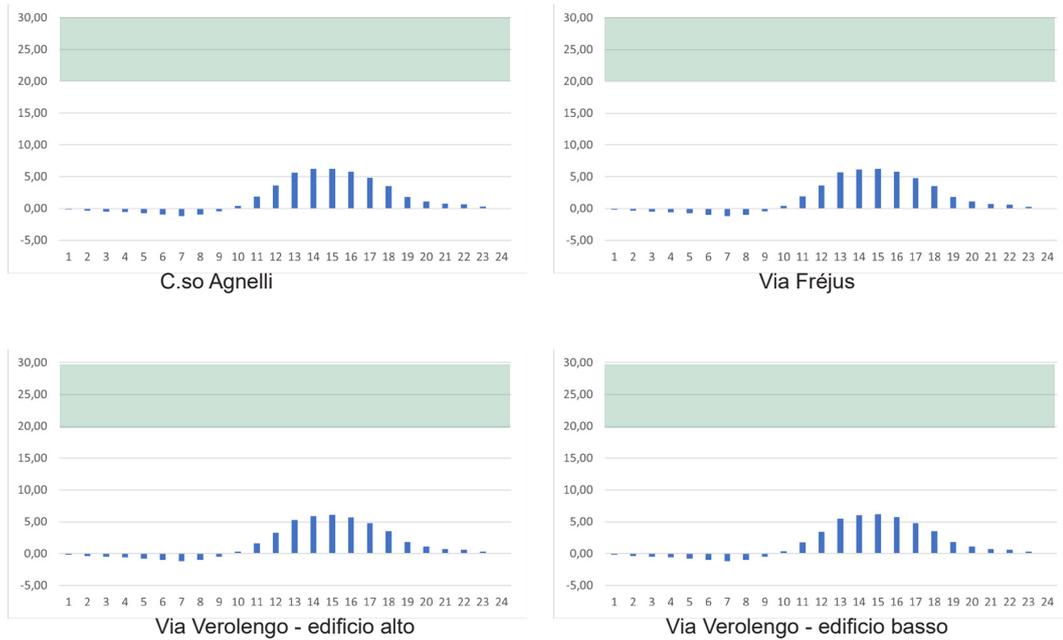
Ottobre



Novembre

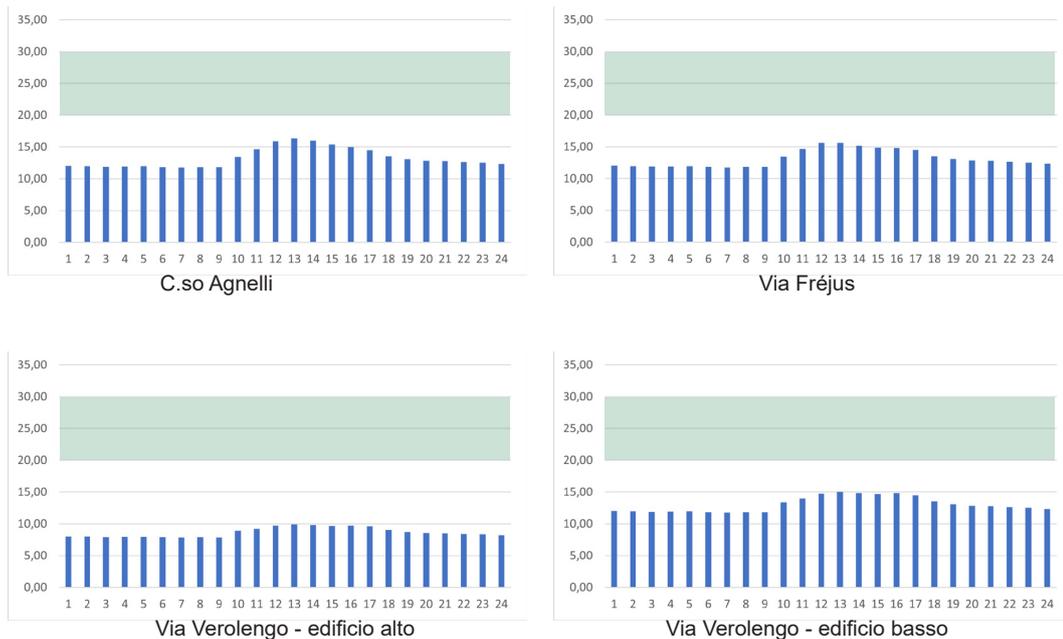


Dicembre

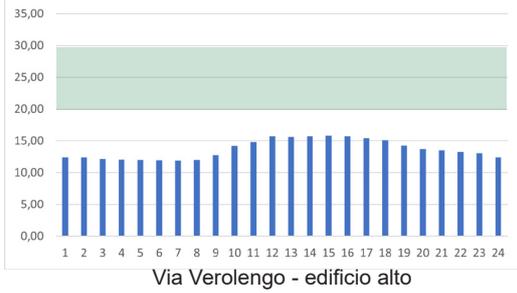
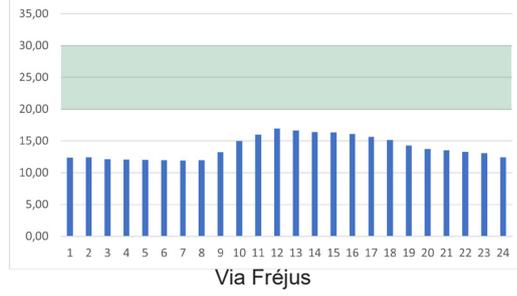
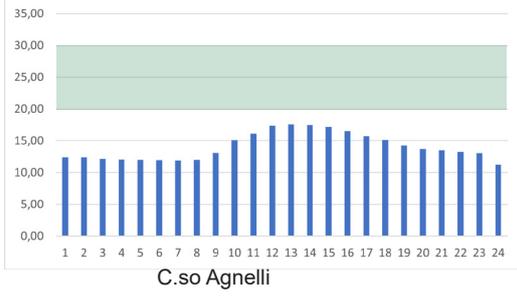


Successivamente, la stessa analisi è stata condotta con la temperatura di un'altra città italiana, per capire come varia, al variare della temperatura, l'applicabilità e l'efficienza del prototipo di pensilina oggetto di studio. La città scelta è Palermo, la quale, nel corso degli anni, è stata definita come una delle più calde d'Italia.

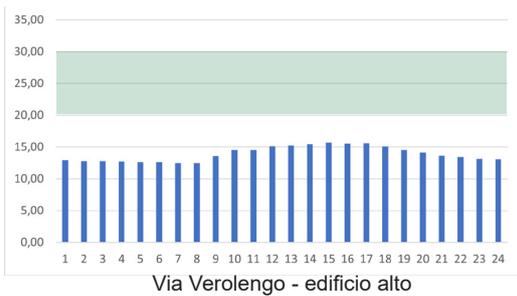
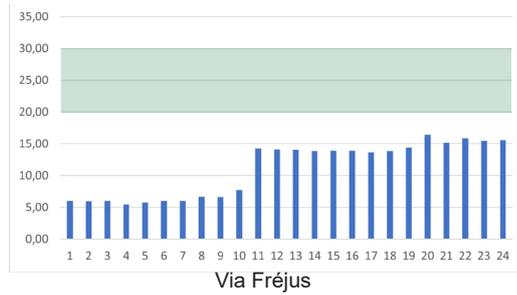
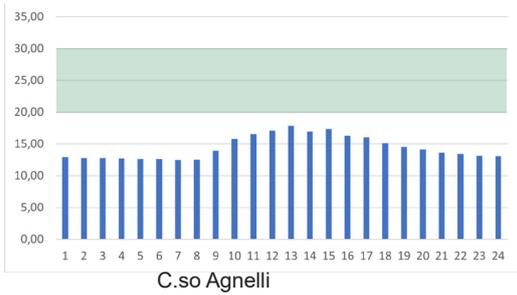
Gennaio



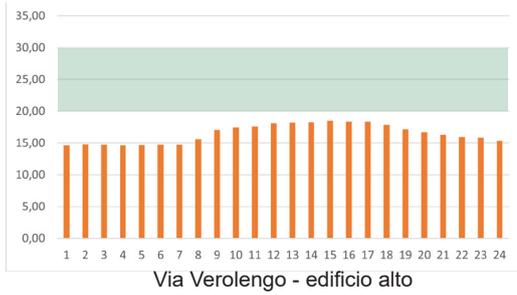
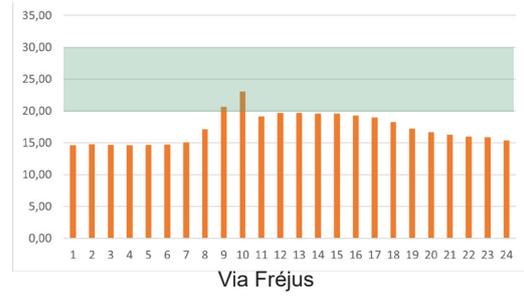
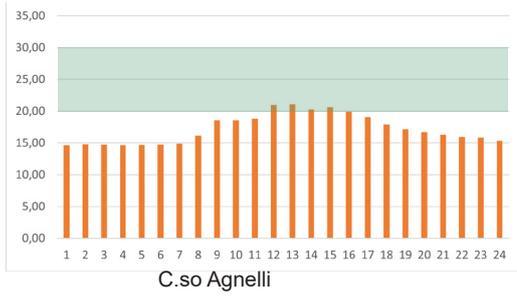
Febbraio



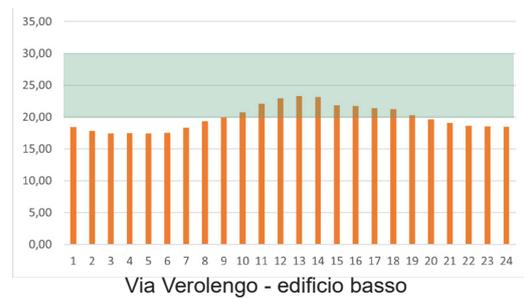
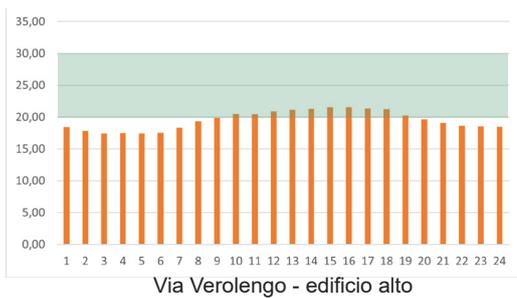
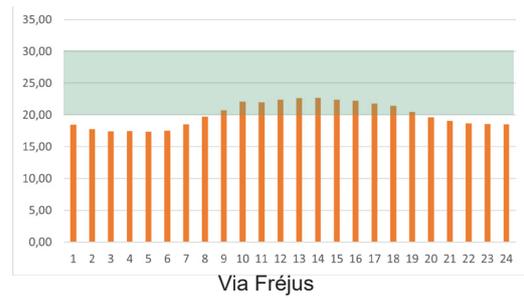
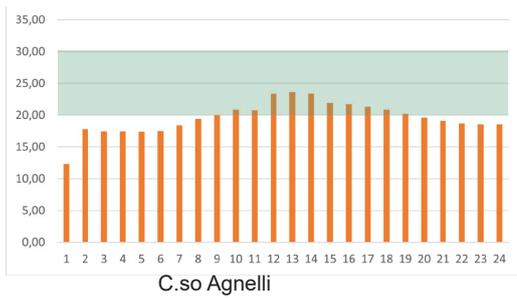
Marzo



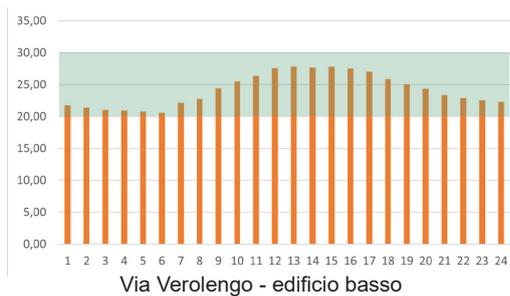
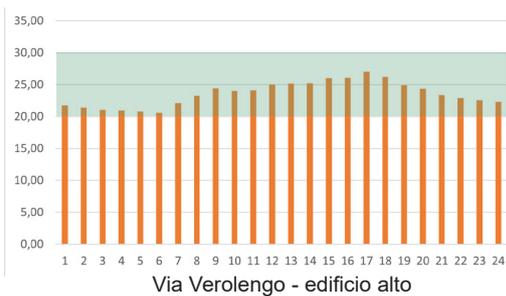
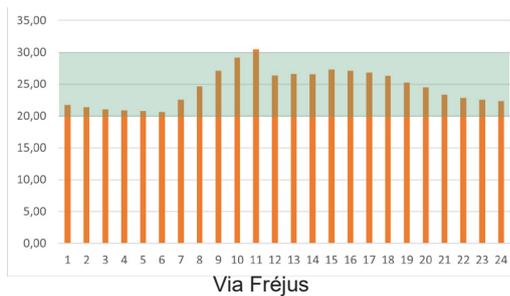
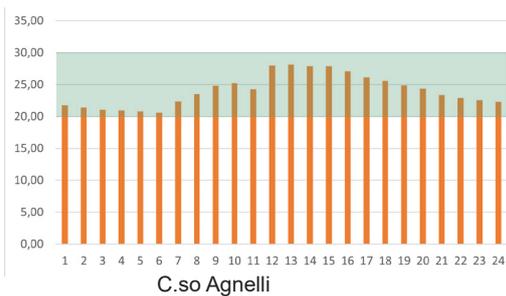
Aprile



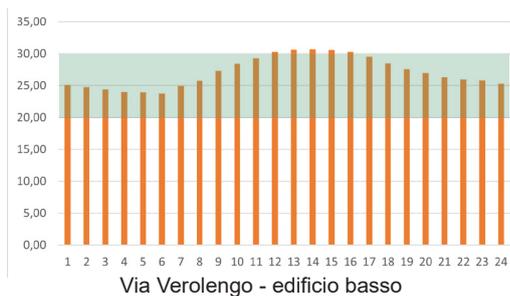
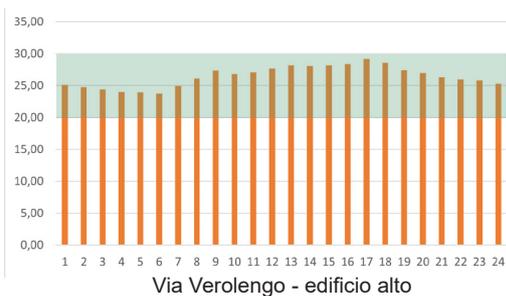
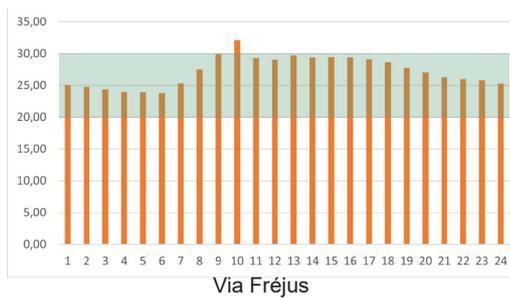
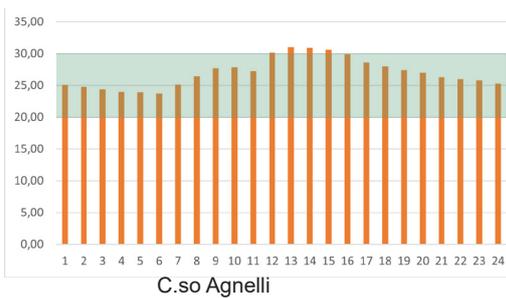
Maggio



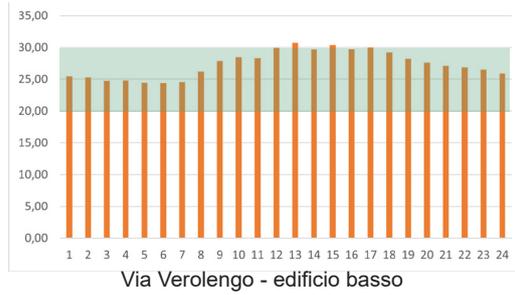
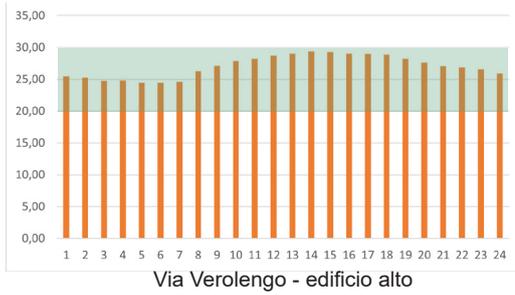
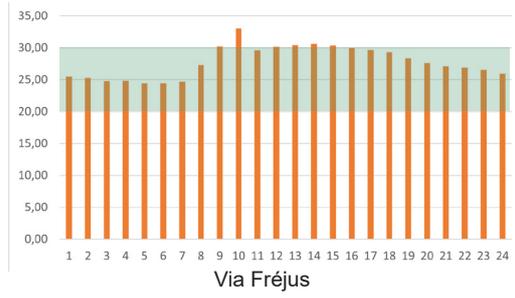
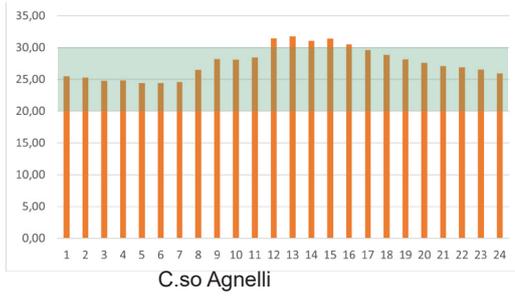
Giugno



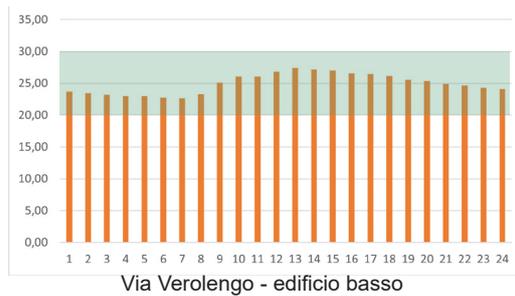
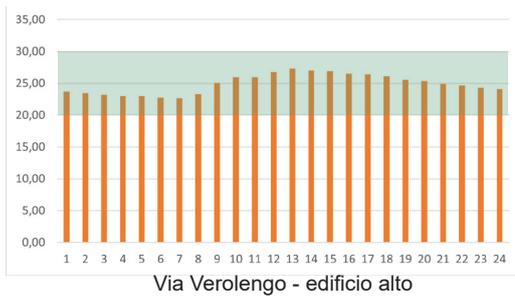
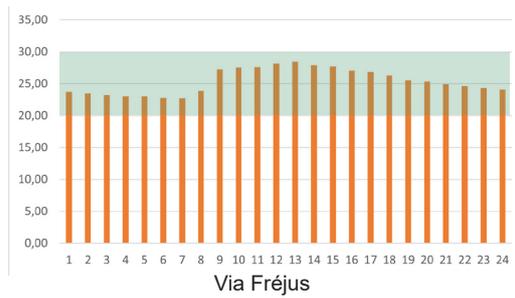
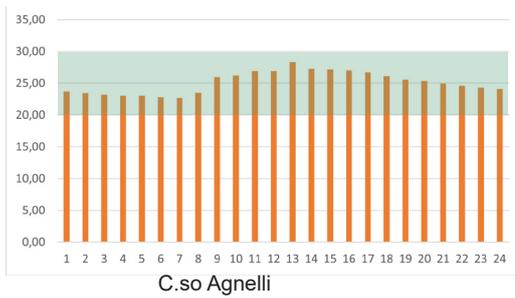
Luglio



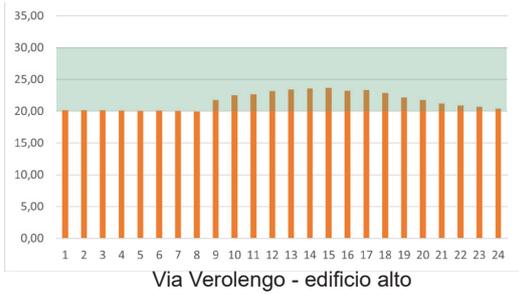
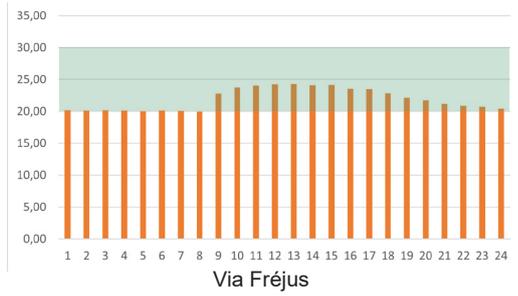
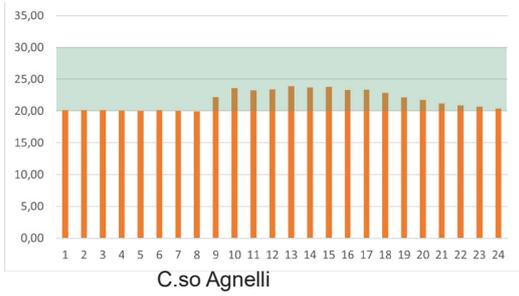
Agosto



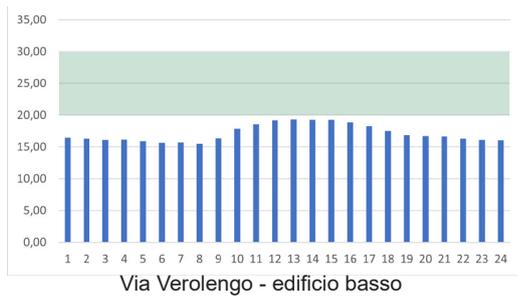
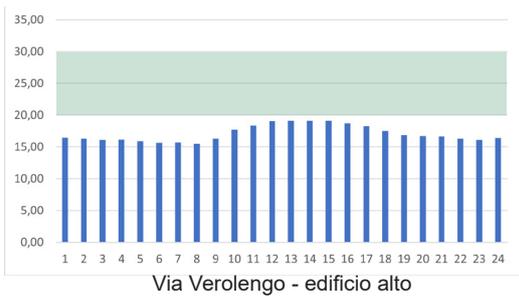
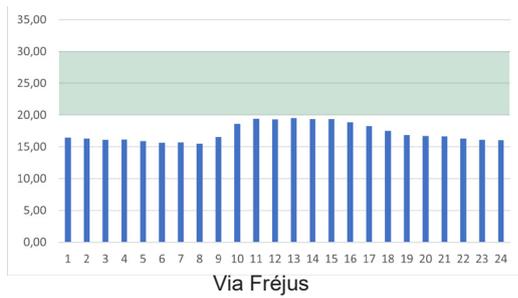
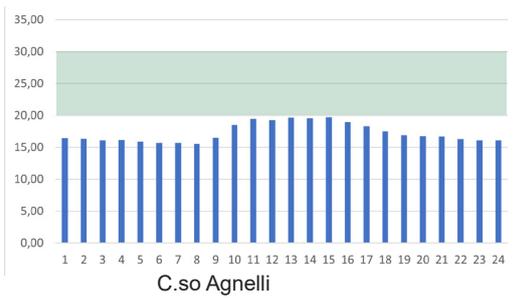
Settembre



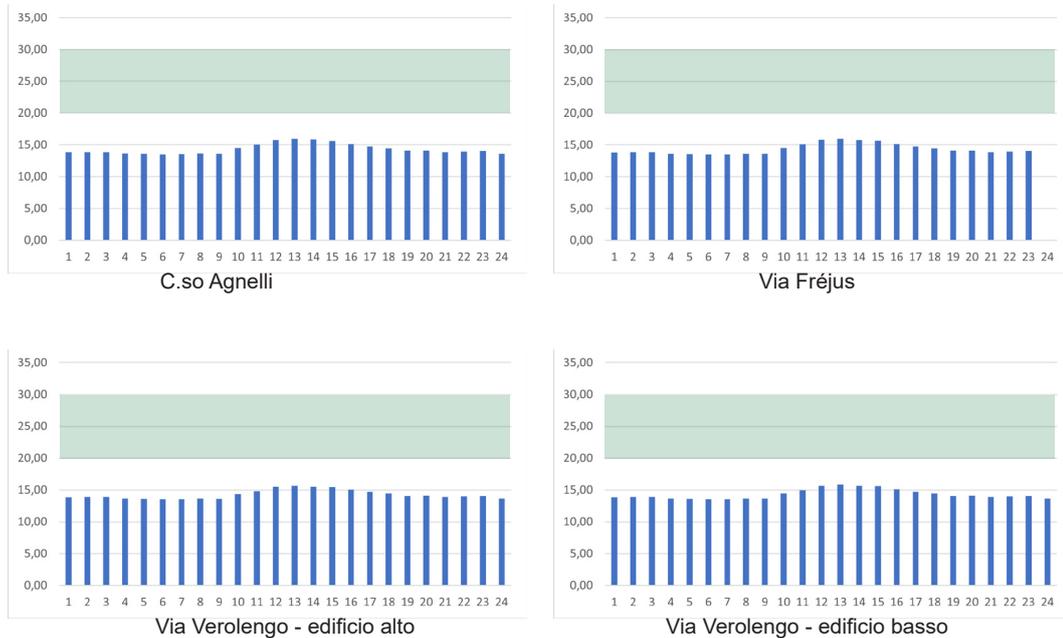
Ottobre



Novembre



Dicembre



11. Risultati e discussione

Il presente studio di tesi è volto alla progettazione di una pensilina modulare, replicabile e adattabile a diverse condizioni spaziali e climatiche, per le fermate del trasporto pubblico urbano su strada, che utilizza come sistema di schermatura e protezione la tecnologia del fotobioreattore per la coltura di biomassa microalgale. Il progetto si basa su principi di eco-design adottando un approccio a filiera corta, la filosofia della “progettazione per la decostruzione”, l’impiego di materiali riciclati e/o riciclabili e soluzioni di illuminazione per il risparmio energetico. Ha inoltre come obiettivo l’incremento della superficie verde cittadina, favorendo la cattura della CO₂ di origine antropica e il rilascio di O₂ tramite i processi di fotosintesi clorofilliana delle microalghe. Sebbene gli aspetti positivi sull’uomo e sull’ambiente siano molteplici, non si può considerare tale pensilina come un elemento che contribuisce a diminuire le isole di calore urbane, poichè di piccole dimensioni rispetto al contesto cittadino. Per questo motivo ci si sofferma sul miglioramento delle condizioni ambientali in una zona di piccole dimensioni. Diversi sono gli scopi per cui tale elemento di copertura viene concepito:

- garantire una buona circolazione pedonale e agevolare la salita e la discesa dai mezzi pubblici;
- offrire uno spazio di attesa confortevole per coloro che lo utilizzano;

- realizzare un elemento versatile, che si adatti alle varie condizioni spaziali;
- essere inclusivo, mediante semplici accorgimenti che ne favoriscono l'utilizzo anche da parte delle persone disabili;
- favorire la socialità e la condivisione;
- sensibilizzare la popolazione ad uno sviluppo sostenibile delle città, ma anche alla raccolta differenziata;
- mettere in evidenza l'importanza che un'area verde, seppur di piccole dimensioni, può avere all'interno di una città, sia dal punto di vista ambientale, sia dal punto di vista psicologico;
- favorire un approccio a filiera corta.

Anche la tipologia di giunti utilizzati è un aspetto che riprende la sostenibilità, in quanto essi possono essere smontati in modo relativamente semplice e, se necessario, riutilizzati per lo stesso scopo o in altri ambiti.

Tali giunti sono costituiti da pezzi presenti in commercio e ciò ha influito sulla scelta del diametro del bambù.

Dalle analisi condotte con l'utilizzo del software ClimateStudio emerge che la presenza/ assenza di alberi rappresenta un fattore di grande importanza per quanto riguarda l'irradianza sulle superfici. Nel caso in cui la pensilina si colloca in una posizione fronteggiata su entrambi i lati da alberi, come in Corso Agnelli, la presenza della vegetazione riduce di quasi la metà l'irradianza. Se la vegetazione, invece, è presente su un solo fronte, come in Via Verolengo, l'irradianza diminuisce, ma in modo meno rilevante. Nel caso in cui la vegetazione sia completamente assente, come in via Fréjus, l'adiazione solare che colpisce le superfici diminuisce ancora.

Anche l'orientamento della pensilina gioca un ruolo fondamentale, poichè da esso dipende la quantità di radiazione solare che incide sulla copertura. La tipologia A presenta tre piani, con orientamenti che differiscono tra loro di pochi gradi: i due più esterni, che ricevono irradianza simile, sono specchiati rispetto a quello centrale (con pendenza di 1° per evitare che si depositi la sporcizia e la neve), che ne riceve meno.

La tipologia B, per motivi spaziali presenta due piani con la stessa inclinazione e per questo motivo la quantità di energia che colpisce tali superfici è molto differente a causa dell'altezza a cui sono collocati, come mostrano i grafici riportati precedentemente. Tuttavia, si tratta di indicazioni di massi-

ma, in quanto i risultati variano caso per caso, a causa del contesto che li circonda.

I valori di SVF presentano lo stesso andamento dell'irradianza, in quanto influenzato dalle ostruzioni e dalla loro entità: le zone maggiormente libere da ostruzioni presentano un fattore più alto, tendente all'1, mentre quelle ostruite sono caratterizzate da SVF tendente allo 0.

Per quanto riguarda la temperatura, invece, dal confronto emergono chiaramente quali siano i mesi in cui le microalghe possono essere coltivate in condizioni di temperatura ottimali (intervallo 20-30 °C segnalato con una banda di colore verde) o poco al di sotto di essa, anche se tali condizioni non si ritrovano ugualmente nei tre siti di riferimento e, quindi, nelle quattro fermate individuate. Complessivamente, le condizioni più problematiche per l'utilizzo dei fotobioreattori si verificano nei mesi più freddi, poiché in quelli caldi il limite superiore della temperatura ottimale (cioè 30°C) non viene superato, grazie anche alla presenza della vegetazione in questo periodo.

A Torino il periodo in cui è possibile coltivare le microalghe è quello compreso tra il mese di Maggio e il mese di Settembre; il ciclo di vita di tale coltura è di 2 o 3 mesi e di conseguenza, è necessaria la sostituzione della coltura almeno una volta durante questo periodo.

Diversamente, a Palermo, i mesi in cui la temperatura raggiunge l'intervallo richiesto sono in numero maggiore rispetto a quanto accade a Torino: da Maggio ad Ottobre. Ne consegue che la coltura, in questo caso, necessita più di una sostituzione durante il periodo appena descritto.

Nei mesi in cui la coltura non può essere messa in atto, essa viene sostituita da film sottili che ne richiamano il colore, ma la funzione legata alla produzione e all'accumulo di energia elettrica resta funzionante.

12. Conclusioni

La pensilina proposta presenta una serie di effetti positivi sia sull'ambiente, sia sulla salute dell'uomo, che al giorno d'oggi non dovrebbero essere sottovalutati. Inoltre, il fatto che sia una struttura modulare la rende versatile ed adattabile al sito in cui viene collocata in modo piuttosto semplice.

Le due configurazioni proposte nel presente studio sono solo alcune delle tante, in quanto è possibile utilizzare questa pensilina anche in altre città,

dove le disponibilità spaziali delle fermate “standardizzate” possono essere differenti da quelle di Torino. La potenzialità dei giunti sta proprio in questo: i moduli possono essere ruotati in base alla necessità e ciò rappresenta un valore aggiuntivo.

Anche il riguardo ad altri aspetti sono fondamentali, come quello sociale soprattutto in un’epoca post pandemica come quella che stiamo vivendo, in cui si è molto perso il contatto con gli altri; la sensibilizzazione alla raccolta differenziata, ma anche la responsabilizzazione delle persone nei confronti di quanto sta accadendo e la volontà di contribuire, ognuno nelle proprie possibilità, a contrastare il cambiamento climatico.

I singoli moduli quadrati, inoltre, possono essere riutilizzati per la realizzazione di un’ulteriore pensilina o per la realizzazione di altri elementi ed assumere configurazioni differenti, quali per esempio gazebo da utilizzare anche in ambiente domestico, coperture per i parcheggi e così via.

Un ulteriore sviluppo futuro potrebbe essere quello di realizzare la stessa pensilina, ma più leggera (anche dal punto di vista percettivo), tenendo in considerazione che i giunti dovranno essere realizzati appositamente, su misura.

Il progetto, quindi, favorisce e sfrutta il modello della cosiddetta “economia circolare”, basata sul riutilizzo, sulla condivisione e su altri aspetti che ne determinano l’eco-sostenibilità.

Ringraziamenti

Grazie ai miei relatori: la Professoressa Simonetta Lucia Pagliolico, che con la sua passione è sempre stata d'ispirazione e mi ha guidata in questo percorso, insegnandomi a divertirmi lavorando e grazie al Professore Valerio Roberto Maria Lo Verso, che sin da subito mi ha accolta con entusiasmo e mi ha insegnato a vedere il mondo a colori, incoraggiandomi.

Grazie alla mia correlatrice, la Professoressa Angela Lacirignola, per le preziose indicazioni fornitemi in questo percorso.

Mi avete guidata in questo percorso ed insegnato a non accontentarmi mai. Vi sono profondamente riconoscente.

Grazie ai miei genitori, per essere le persone che siete.

Grazie Mamma, perchè sai tutto ancora prima che te lo dica ed hai sempre le parole giuste per me.

Grazie Papà, perchè hai sempre un riguardo in più per me.

Avete sempre supportato la vostra piccola di casa, non facendomi mai mancare nulla. Vi prometto che mi prenderò cura di voi.

Grazie a mio fratello Giulio, il regalo migliore che la vita potesse farmi.

Chissà cosa ci riserverà ancora la vita, ma so che saremo insieme, sempre.

Grazie a Virginia, ormai una sorella per me, che sa ascoltare senza giudicare mai. Non scambierei i tuoi abbracci con quelli di nessun altro al mondo.

Grazie a Giulia, l'amica di sempre, alla quale basta uno sguardo per capirmi. Ad altre mille avventure insieme.

Grazie a Bubu, sei entrata nella mia vita in punta di piedi e non ho potuto che volerti bene da subito.

Grazie ad Elisa, per essere sempre stata presente e per i nostri momenti di spensieratezza.

Grazie ad Alessia, l'amica ritrovata. In fondo non è mai cambiato nulla.

Grazie alle mie compagne in questo percorso: Ilaria, Marta e Isabella.
Senza di voi non sarebbe stata la stessa cosa.

Grazie a tutti voi, perchè avete creduto in me, sempre, e avete saputo regalarmi la serenità di cui ho bisogno.