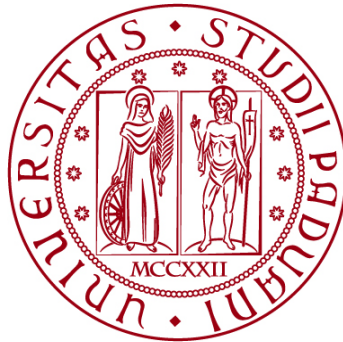


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile - Architettura



TESI DI LAUREA

**Tecnologie adattive per l'edilizia industriale.
Analisi delle strutture industriali esistenti
e progetto di un caso studio.**

Relatore:

Prof. Arch. Umberto Turrini

Correlatori:

Prof.ssa Ing. Flora Faleschini

Prof. Ing. Angelo Bertolazzi

Laureando:

Rezzadore Luca

1141994

Anno Accademico 2021 / 2022

Abstract

Il presente elaborato è rivolto all'applicazione di soluzioni adattive su fabbricati esistenti ed ex novo di carattere industriale. È suddiviso in cinque principali sezioni:

Il primo capitolo si concentra sulla definizione della tipologia costruttiva degli stabilimenti industriali tramite la ricerca storica, statistica e su casi realizzati. Questa è finalizzata a delineare i più diffusi sistemi costruttivi in ambito edilizio industriale, nonché le relative caratteristiche dimensionali prevalenti.

La seconda parte analizza lo stato dell'arte delle soluzioni di edilizia adattiva. In particolare, si approfondiscono le strutture a volumetria variabile e si valuta, per le soluzioni individuate, l'applicabilità alla tipologia edilizia industriale, evidenziandone vantaggi e svantaggi rispetto alle tecniche costruttive tradizionali.

A conclusione della ricerca, si delineano dei criteri generali per il progettista, come limiti dimensionali o esigenze costruttive, che favoriscano lo sviluppo di interventi con un'ampia applicabilità su edifici esistenti, rimanendo adeguati agli standard moderni per il settore industriale.

L'ultima parte dell'elaborato si suddivide nell'applicazione delle linee guida definite, attraverso la progettazione architettonica e strutturale di una soluzione adattiva per un caso studio reale. Si procede alla progettazione di massima e alla modellazione digitale architettonica dello stabilimento, verificandone la rispondenza alle normative vigenti per gli standard architettonici, urbanistici e di sicurezza strutturale con il dimensionamento della porzione adattiva dell'edificio.

Infine, si eseguono le verifiche strutturali statiche e una valutazione della risposta sismica della struttura adattiva in relazione ai diversi gradi di apertura che essa può assumere. I risultati dell'analisi sono sfruttati per rilevare come varia il comportamento degli elementi mobili nel tempo, durante il movimento della struttura.

Indice

Abstract.....	i
1 Tipologia costruttiva degli stabilimenti industriali	1
1.1 Sviluppo storico dell'industria	1
1.1.1 Dal mulino inglese alla fabbrica in laterizio.....	1
1.1.2 Strutture in acciaio e catena di montaggio	3
1.1.3 Nascita della prefabbricazione e del calcestruzzo armato	4
1.1.4 Prefabbricati industriali e layout d'impianto	6
1.2 Industria in Italia e in Veneto	8
1.2.1 Storia dell'industrializzazione italiana.....	8
1.2.2 Industrializzazione veneta.....	10
1.2.3 Crisi e deindustrializzazione	13
1.2.4 Conclusioni dell'analisi storica sull'industrializzazione.....	14
1.2.3 Analisi delle attività industriali in Veneto	14
1.3 Sistemi costruttivi prefabbricati.....	18
1.3.1 Sviluppo dei prefabbricati industriali in Italia.....	18
1.3.1 Classificazione di sistemi ed elementi prefabbricati	21
1.3.2 Analisi dimensionale di sistemi ed elementi costruttivi prefabbricati.....	27
1.4 Analisi delle attività rappresentative	30
1.4.1 Generalità sull'organizzazione dei cicli produttivi	30
1.4.2 Definizione delle caratteristiche da rilevare.....	32
1.4.3 Stabilimento industriale Grassi Pietre S.r.l. (Nanto, VI).....	33
1.4.4 Rivendita e stoccaggio Rossato Legnami (Noventa Vicentina, VI).....	37
1.4.5 Stabilimento industriale Bozza legnami (Vigonza, PD).....	39
1.4.6 Stabilimento industriale Aster s.r.l. (Santo Stefano, VR)	42
1.4.7 Stabilimento industriale PLASTIME s.r.l. (Castegnero, VI)	43
1.4.8 Calzaturificio Lazzari, dismesso (Saonara, PD)	45
1.4.9 Fabbricato industriale Tommasin Gomme (Padova, PD)	48
1.4.10 Stabilimento industriale KSE (Alonte, VI).....	49
1.4.11 Stabilimento industriale Kerakoll (Zimella, VR).....	51

1.4.12 Stabilimento industriale Ovodry (Alonte, VI)	53
1.4.13 Stabilimento industriale Grejo (Lonigo, VI)	54
1.4.14 Stabilimento per la produzione di mangimi (Cologna Veneta, VI)	56
1.4.15 Conclusioni dell'analisi su casi esistenti	59
2 Architettura adattiva	61
2.1 Definizione e strategie adattive	61
2.2 Edifici adattivi a volumetria variabile	65
2.2.1 Materiale e movimento	66
2.2.2 Architettura pneumatica	68
2.2.3 Sistemi di tenuta e impianti di parti mobili.....	70
2.3 Efficienza dei meccanismi adattivi.....	72
3 Linee guida per la progettazione	75
3.1 Meccanismi adattivi applicati all'industria.....	75
3.1.1 Considerazioni tecniche ed economiche	75
3.2 Definizione delle linee guida.....	76
4 Progettazione architettonica dell'intervento.....	78
4.1 Metodologia operativa.....	78
4.2 Individuazione del caso studio.....	79
4.3 Analisi funzionale	80
4.4 Normative tecniche di riferimento	81
4.5 Analisi dimensionale	88
4.6 Scelta dei materiali.....	91
4.6.1 Il legno	93
4.6.2 Struttura del legno	94
4.6.3 Caratteristiche meccaniche	96
4.6.3 Legno lamellare.....	97
4.6.3 Normativa di riferimento per il legno da costruzione.....	98
4.7 Individuazione delle soluzioni adattive	99
4.8 Individuazione dell'area	102
4.8.1 Riferimenti normativi urbanistici	104

4.9 Stesura del progetto architettonico di massima.....	106
4.9.1 Riferimenti progettuali.....	107
4.9.2 Spazi adattivi e copertura.....	108
4.9.3 Soluzione adattiva alternativa con chiusure perimetrali.....	110
4.9.4 Elaborati grafici architettonici.....	113
5 Progettazione strutturale del sistema adattivo	133
5.1 Definizione dello schema statico	134
5.2 Dimensionamento strutturale	136
5.3 Definizione dei carichi	137
5.3.1 Sovraccarico	138
5.3.2 Azione del vento.....	139
5.3.3 Azione della neve	144
5.3.4 Pesi propri strutturali e non strutturali.....	146
5.4 Combinazioni di carico agli stati limite ultimi e di esercizio	147
5.5 Verifiche degli elementi lignei	149
5.6 Verifiche dei travetti di falda	151
5.6.1 Verifica a trazione parallela alla fibratura (SLU)	151
5.6.2 Verifica a compressione parallela alla fibratura (SLU).....	152
5.6.3 Verifica a compressione perpendicolare alla fibratura (SLU)	152
5.6.4 Verifica a flessione (SLU)	153
5.6.5 Verifica a tenso-flessione (SLU).....	154
5.6.6 Verifica a presso-flessione (SLU)	155
5.6.7 Verifica a taglio (SLU).....	155
5.6.8 Verifica di stabilità presso-torsionale (SLU)	156
5.6.9 Verifica di spostamento verticale (SLE)	157
5.7 Verifiche delle travi di campata	158
5.7.1 Verifica compressione perpendicolare alla fibratura (SLU).....	159
5.7.2 Verifica a flessione (SLU)	159
5.7.3 Verifica a taglio (SLU).....	160
5.7.4 Verifica a torsione (SLU)	161

5.7.5	Verifica a taglio-torsione (SLU)	162
5.7.6	Verifica di stabilità flesso-torsionale (SLU)	163
5.7.7	Verifica di spostamento verticale (SLE)	164
5.7.8	Verifica di spostamento orizzontale (SLE).....	165
5.8	Verifiche dei pilastri	166
5.8.1	Verifica a trazione parallela alla fibratura (SLU)	166
5.8.2	Verifica a compressione parallela alla fibratura (SLU).....	167
5.8.3	Verifica a flessione (SLU)	168
5.8.4	Verifica a tenso-flessione (SLU).....	169
5.8.5	Verifica a presso-flessione (SLU)	170
5.8.6	Verifica a taglio rispetto l'asse forte (SLU).....	170
5.8.7	Verifica a taglio rispetto l'asse debole (SLU)	171
5.8.8	Verifica di stabilità di colonna a presso-flessione (SLU).....	172
5.8.9	Verifica di spostamento orizzontale lungo asse x (SLE)	173
5.8.10	Verifica di spostamento orizzontale lungo asse z (SLE).....	174
5.9	Valutazione della reazione al sisma	175
5.9.1	Modellazione sismica in Midas Gen.....	178
5.9.2	Analisi lineare dinamica con modi di vibrare.....	180
5.9.3	Risultati delle analisi sismiche	182
5.10	Risultati dell'analisi strutturale.....	189
6	Conclusioni e sviluppi futuri	195
6.1	Riepilogo dell'elaborato	195
6.2	Conclusioni.....	201
6.3	Sviluppi futuri:.....	201
Allegato 1	202
	Deformazioni ottenute dalle combinazioni sismiche	202
	Principali modi di vibrare per l'analisi dinamica	203
Bibliografia	206
	Monografie, articoli e sitografia	206
	Fonti iconografiche:	208

1 Tipologia costruttiva degli stabilimenti industriali

1.1 Sviluppo storico dell'industria

Per comprendere i motivi e l'evoluzione che nel tempo portano all'industria che conosciamo oggi, risulta opportuno inquadrarne i principali sviluppi storici.

Il termine "industria" in latino indica attività, operosità e diligenza, a significare qualsiasi attività produttiva umana, sia essa volta all'erogazione di un servizio, sia alla realizzazione di beni materiali. La concezione moderna del termine è spesso associata alla "produzione industriale" di prodotti finiti o semilavorati tramite processi tecnologici, a partire dalle materie prime. In tal senso è possibile individuare l'origine dell'industria nella lavorazione preistorica della pietra e del legno, ma lo sviluppo di un complesso sistema organizzativo del lavoro si ha soltanto a partire dal rinascimento europeo, quando l'attività manifatturiera artigianale svolta nelle botteghe e regolamentata dalle corporazioni viene affiancata dall'industria "a domicilio", nella quale l'imprenditore in possesso delle materie prime ne affida la trasformazione ai dipendenti (spesso contadini con minime competenze tessili). Queste attività extra-agricole costituiscono il settore più dinamico della società europea del tempo, definito come protoindustria.¹

1.1.1 Dal mulino inglese alla fabbrica in laterizio

Il declino del sopracitato sistema organizzativo e l'avvento dell'industria moderna hanno inizio alla fondazione da parte di John Lombe, nel 1713, del primo stabilimento dotato di una macchina per la lavorazione della seta alimentata tramite un mulino, dove erano impiegati 300 operai.

Le manifatture che sorgono in questo periodo si insediano all'interno di tradizioni produttive preesistenti, assumendo come prototipo per lo stabilimento i mulini a vento e ad acqua. Tali strutture, dall'inglese denominate "mills" poiché comprendono una macchina messa in movimento da energia naturale tramite un albero di trasmissione, risultano simili nel funzionamento, ma diversificate negli aspetti costruttivi, espressione delle tradizioni e dei materiali locali (figura 1.1.1.1). Infatti l'uso di pietra originaria da cave o corsi d'acqua vicini al sito di costruzione, di laterizi nelle pianure argillose e di coperture in legno e paglia, permette ai mulini di mimetizzarsi nella cultura locale senza generare alcun contrasto.²

1. Ciriaco Salvatore, *Protoindustria, lavoro a domicilio e sviluppo economico nelle campagne venete in epoca moderna*, in Quaderni Storici, XVIII (1983): 57-80

2. Borsi Franco, *Introduzione alla archeologia industriale*, Roma, Officina, 1978.



Figura 1.1.1.1: A sinistra, fotografia del mulino di Heage, Inghilterra, 1961;

Figura 1.1.1.2: A destra, fotografia della fabbrica Middleport Pottery di Burslem, Inghilterra, 2016.

Dalla seconda metà del '700 in avanti, la forte spinta dell'innovazione tecnologica e l'introduzione di nuove fonti di energia portano ad un cambiamento radicale nella concezione dell'industria, con l'introduzione di macchine azionate meccanicamente, inizialmente dal vapore prodotto bruciando il carbone di legna.

Le conseguenze di tale rivoluzione industriale toccano ogni aspetto della società a partire dall'Inghilterra fino a diffondersi in Europa; viene introdotta una più efficiente organizzazione della produzione, attraverso la divisione e lo spostamento delle lavorazioni all'interno di fabbriche appositamente costruite per poter contenere delle macchine di dimensioni sempre maggiori. In particolare la produzione tessile è la prima a dover adattarsi a questo sistema industriale moderno, seguita dalla siderurgia. Le costruzioni industriali di grandi dimensioni vengono quindi realizzate fuori dalle mura cittadine, per evitare limitazioni spaziali per futuri ampliamenti, mentre la necessità di spazio dei macchinari preclude l'uso di tecniche costruttive locali comportando ad un primo strappo nella continuità del paesaggio.

Grazie all'energia del vapore, la collocazione territoriale delle fabbriche non rimane più vincolata dalla presenza di corsi d'acqua, pertanto gli insediamenti produttivi si dispongono lungo le principali vie commerciali, anche se l'impiego del laterizio o della pietra impedisce ancora di ottenere grandi aperture vetrate e ampie campate libere; in questo periodo gli edifici vengono sviluppati in altezza, per essere sufficientemente stretti affinché l'illuminazione naturale riesca a permeare l'interno (figura 1.1.1.2). Soltanto le strutture più innovative fanno anche uso di colonne in ghisa o ferro, a sostegno di volte lapidee, per raggiungere altezze complessive maggiori.³

3. Cerato Silvia, *Il progetto urbano secondo un approccio multidisciplinare: analisi e rifunzionalizzazione dell'area di un manufatto industriale lungo la Riviera del Brenta*, tesi di laurea magistrale, Padova, 2014-2015, Andrea Giordano relatore

1.1.2 Strutture in acciaio e catena di montaggio

Nonostante la grande depressione economica del 1873, l'espansione della fabbrica in Europa e in altri continenti prosegue nei due secoli successivi grazie allo stretto rapporto tra scienza, tecnologia e industria, che permettono l'implementazione di nuove fonti di energia quali il petrolio e l'elettricità, oltre all'innovazione dei sistemi di comunicazione e trasporto. Agli inizi del '900 la crescita economica riprende impetuosa, pertanto la società e le aziende, di dimensioni sempre crescenti, sono soggette a profondi processi di trasformazione. Tra le numerose invenzioni come il motore a scoppio e lampadina, a mutare maggiormente le tecniche costruttive è il rinnovamento del processo produttivo dell'acciaio con l'introduzione delle tecniche Bessemer e Gilchrist-Thomas.

La produzione ad un prezzo competitivo dell'acciaio rende possibile la sua applicazione in numerosi campi, dai trasporti alle macchine industriali, e alle costruzioni, che raggiungono dimensioni senza precedenti. Il ruolo centrale nell'industria passa dal tessile alla siderurgia, e ai nuovi settori di chimica ed elettromeccanica, i quali sono però caratterizzati da una maggiore intensità tecnologica e di capitale, che rendono difficoltosi gli investimenti da parte di imprese familiari. Questo porta alla formazione delle nuove società per azioni e alla concentrazione di diversi rami specializzati in singole industrie, riducendo la libera concorrenza e rendendo necessari stabilimenti più estesi o collegati dai nuovi ed efficienti sistemi di trasporto.

All'interno delle stesse fabbriche si implementano nastri trasportatori, elevatori, montacarichi e sistemi di tubature e valvole per facilitare il flusso della produzione e aumentare la produttività tramite una "organizzazione scientifica del lavoro" secondo i principi di F. W. Taylor, che prevedono la scomposizione del ciclo produttivo in operazioni il più possibile elementari. Il primo esempio di applicazione del "taylorismo" avviene nel 1913, con l'industria automobilistica di Henry Ford, che riorganizza l'intero stabilimento attorno alla catena di montaggio per il primo modello prodotto in serie (figura 1.1.2.1).⁴



Figura 1.1.2.1: Produzione automobilistica in serie nello stabilimento Ford Motor Company, Michigan, 1903.

4. <https://www.treccani.it/enciclopedia/industria#lediliziaindustriale-1>

Le tecniche costruttive con acciaio strutturale vedono un'ampia applicazione in fino all'avvento del calcestruzzo armato, e risultano tutt'ora utilizzate anche per stabilimenti industriali, con interassi tra le maglie strutturali quadrate o rettangolari tra gli 8 e i 24 metri e travi standardizzate o reticolari. L'uso di questo materiale, rispetto alle tecniche precedenti, presenta una eccezionale rapidità di costruzione e un basso impiego di mano d'opera, permettendo di raggiungere grandi luci e sovraccarichi, con un ingombro dei pilastri ridotto anche rispetto alle strutture prefabbricate in cemento. Inoltre, consente di effettuare ampliamenti e demolizioni con facilità, ma, oltre a presentare maggiori costi di manutenzione, la sua bassa capacità termica e resistenza al fuoco lo rendono un materiale inadatto ad attività industriali soggette ad un elevato rischio di incendio.⁵

1.1.3 Nascita della prefabbricazione e del calcestruzzo armato

L'industrializzazione dei processi produttivi dopo il 1800 si riflette anche nelle tecniche costruttive utilizzate, infatti, sfruttando la meccanizzazione dell'industria ed i macchinari per il sollevamento, diventa possibile produrre elementi standardizzati negli stabilimenti per assemblarli direttamente in sito in tempi ridotti. Tale pratica si definisce come prefabbricazione, ossia la preparazione fuori opera degli elementi costruttivi di una struttura, nonché il loro trasporto e successivo montaggio in opera, operando per scomposizione dell'edificio nelle sue parti componenti, da realizzarsi nelle sedi più idonee per il successivo assemblaggio in cantiere.⁶

Attenendosi a questa definizione i cantieri medievali potrebbero essere considerati come i primi esempi di prefabbricazione in quanto le pietre da posare in opera arrivano in cantiere già tagliate, sbazzate e numerate; ma in questi casi il processo costruttivo rimane fortemente legato alla concezione tradizionale, pertanto si inizia a parlare di strutture prefabbricate soltanto con il colonialismo inglese. Infatti, per facilitare la realizzazione degli insediamenti coloniali, nel 1837, H. John Manning progetta una struttura a telaio e con pannelli di legno chiamata Portable Colonial Cottage for Immigrants, la quale poteva essere trasportata via nave e montata in terra straniera, senza la necessità di conoscere le tecniche costruttive locali (figura 1.1.3.1).

5. Nigro E., Pustorino S., Cefarelli G., Princi P., *Progettazione di strutture in acciaio e composte acciaio-calcestruzzo in caso di incendio secondo gli Eurocodici e le norme tecniche per le costruzioni*, Milano, Hoepli Editore, 2009.

6. <https://www.treccani.it/enciclopedia/prefabbricazione>

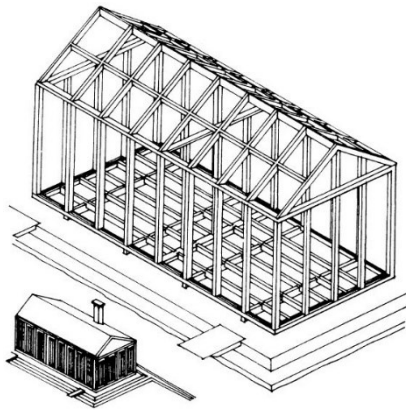


Figura 1.1.3.1: A sinistra, il Manning Portable Colonial Cottage for Immigrants, 1837.

Figura 1.1.3.2: A destra, montaggio della copertura del Crystal Palace di Londra, 1851.

I principi alla base della prefabbricazione rimangono applicati soltanto in casi marginali fino alla realizzazione del Crystal Palace di Joseph Paxton nel 1851, la cui struttura in ghisa e lastre di vetro viene eretta in soli quattro mesi, dimostrando le potenzialità del sistema produttivo (figura 1.1.3.2). La diffusione di questi concetti coinvolge anche architetti di fama internazionale quali Le Corbusier e Walter Gropius nei primi decenni del secolo successivo, ma l'impiego massiccio di elementi prefabbricati nell'edilizia comincia a seguito del secondo conflitto mondiale per far fronte alle necessità di ricostruzione.

Il periodo dello sviluppo dei sistemi prefabbricati corrisponde temporalmente a quello della tecnica costruttiva in calcestruzzo armato, la quale nel 1867, a seguito primo brevetto da parte di Joseph Monier per la realizzazione di vasi con la tecnica dell'armatura, viene approfondita da Francois Hennebique. L'ingegnere francese, grazie all'intuizione di Monier, perfeziona l'utilizzo del calcestruzzo nelle costruzioni (già impiegato fin dai tempi della Roma antica come "opus cementicium"), attraverso l'inserimento all'interno del conglomerato di barre in acciaio, che ne compensano la scarsa resistenza a trazione. Il nuovo materiale riscuote un successo internazionale e viene applicato per diverse tipologie edilizie, dall'abitazione alle industrie.

Anche se i brevetti di Hennebique riguardano soltanto strutture gettate in opera, il calcestruzzo armato diviene un materiale di eccellenza nell'industria della prefabbricazione cosiddetta "pesante", che comprende nel tempo una vasta gamma di elementi tipologici anche strutturali, a seguito dello sviluppo di tecnologie per la precompressione.

La precedente denominazione è utilizzata per discernere i sistemi prefabbricati in cemento, costituenti la più grande porzione del panorama edilizio prefabbricato, dalla prefabbricazione "leggera" riferita invece ad elementi in acciaio, alluminio, legno e altre materie plastiche o sintetiche ad alta resistenza.

1.1.4 Prefabbricati industriali e layout d'impianto

Lo sviluppo storico dell'industria porta nel corso del Novecento alla necessità di costruire (o ricostruire dopo le due guerre che hanno tristemente segnato tale secolo) numerosi stabilimenti basati sui principi dell'efficienza della catena produttiva, favorendo inoltre fabbricati dai costi il più possibile ridotti. Questi inoltre devono rispondere alle esigenze dimensionali delle macchine impiegate, e del magazzino di numerosi prodotti finiti realizzati sempre più spesso in serie. Ad eccezione di casi particolari, l'estetica di queste costruzioni passa in secondo piano rispetto alle caratteristiche sopraelencate, pertanto la ricerca progettuale sul tema delle strutture conosciute come capannoni industriali si è naturalmente concentrata su soluzioni semplici, economiche e rapide nella cantierizzazione a causa del crescente costo della mano d'opera.

Nonostante le attività industriali presentino necessità spaziali diversificate per ogni specifico settore della produzione, l'esigenza di ampliamento degli stabilimenti in funzione dell'andamento del mercato, nonché la possibilità di adattare i fabbricati a diverse funzioni o produzioni, diventa un punto chiave dell'architettura industriale che vede una soluzione nella standardizzazione funzionale e morfologica.⁷

La razionalizzazione porta anche allo sviluppo nella progettazione, di una branca specializzata nel plant layout, definito dall'Organizzazione internazionale del lavoro B.I.T. come:

«Dislocazione dei reparti o delle officine nell'ambito della fabbrica, oltre che delle macchine, dei posti di lavoro e dei depositi nelle aree lavorative, inclusi gli uffici ed i servizi aziendali relativi»

Secondo questa disciplina le caratteristiche dimensionali e statiche della maglia strutturale, nonché le condizioni ambientali interne allo stabilimento, devono essere definite dal layout di impianto, che a sua volta deriva dallo schema produttivo (lineare, misto o chiuso). In altre parole, per l'attività produttiva e di immagazzinamento il dimensionamento delle unità dipende da:⁸

- Attrezzature produttive
- Aree di lavoro necessarie
- Flussi di materie prime e prodotti finiti
- Disposizione dei depositi in ingresso e in uscita
- Servizi e accessori
- Ipotesi di crescita e ampliamento futuri
- Relazione alle aree esterne di stoccaggio, carico e scarico

7. James M. Moore, *Progettazione e layout degli impianti*, Milano, Franco Angeli, 1995.

8. Simonetto Marco, *Relayout di una cella di lavoro. Il caso Caminetti Montegrappa*, tesi di laurea magistrale, Padova, 2016-2017, Fabio Sgarbossa relatore.

Inoltre, devono essere considerati i requisiti ambientali di sicurezza al fuoco, sicurezza d'uso, benessere termoisolometrico, acustico e visivo dei lavoratori, in quanto possono comportare vincoli di dipendenza tra diversi reparti date le necessità impiantistiche o dell'involucro. Questi vincoli possono limitare l'obiettivo di ottimizzare spazi e trasferimenti di materiali all'interno, e di garantire la vicinanza tra reparti con relazioni importanti.

Le soluzioni ottenute basandosi su queste linee guida possono contemplare edifici multipiano, tuttavia, data la disponibilità di terreno e le prospettive di ampliamento degli impianti industriali, questi sono molto frequentemente estesi lungo un solo piano, salvo necessità di lavorazioni con sviluppo verticale che sfruttano la gravità. Oltretutto, lavorare su un unico livello consente flussi interni più agevoli, la collocazione di macchinari pesanti su un piano fondazionale resistente, la possibilità di sfruttare al meglio l'illuminazione naturale tramite coperture illuminanti con shed o lucernari, e la maggiore sicurezza in caso di esplosioni o incendi.⁹

L'elevato grado di standardizzazione che ne deriva e la semplicità geometrica di piante modulari facilmente ampliabili, portano istintivamente verso l'utilizzo di componenti prefabbricati per la realizzazione di queste strutture; in quanto tali componenti possono essere prodotti in serie abbattendone i costi. Un'ulteriore incentivo all'uso di queste tecniche costruttive deriva dalle innovazioni nei sistemi di trasporto su rotaia e su ruota che si susseguono nel Novecento.

Sul piano dei materiali utilizzati per le componenti strutturali di questi edifici la scelta ricade nella quasi totalità dei casi sul calcestruzzo armato, perché il costo dell'acciaio diventa proibitivo a causa della produzione in grande quantità di armamentari bellici. Soltanto la necessità di luci libere particolarmente elevate giustifica l'uso di strutture metalliche con travi reticolari, almeno all'inizio del secolo, fintanto che la tecnica per la realizzazione di elementi strutturali in calcestruzzo armato prefabbricati non si sviluppa a raggiunge simili livelli prestazionali.

Degli ulteriori motivi per cui il calcestruzzo prevale sull'acciaio e sul legno sono la sua notevole durezza e resistenza agli agenti corrosivi (fondamentali soprattutto nell'industria zootecnica e chimica), nonché la resistenza al fuoco ottenuta riparando le barre metalliche altrimenti esposte. In aggiunta, la sua considerevole massa fornisce una discreta capacità termica e di riduzione alla trasmissione di vibrazioni e rumori.¹⁰

9. Pareschi Arrigo, *Impianti industriali*, Bologna, Esculapio, 2007.

10. Zambelli E., Pignataro M., *Le costruzioni prefabbricate: Guida alle progettazioni: Le guide di Modulo*, Milano, BE-MA editrice, 1986.

Ad incrementare ulteriormente le prestazioni strutturali del calcestruzzo armato è il perfezionamento, dopo anni di sperimentazioni, dei concetti alla base della moderna precompressione, con il brevetto nel 1928 della ditta Freyssinet. Tramite il pretensionamento delle barre di armatura all'interno del calcestruzzo, diventa infatti possibile realizzare campate tra gli 8 e i 20 metri (da 6 a 10 metri per strutture multipiano), con elementi lineari prefabbricati, raggiungendo quindi luci libere prima accessibili soltanto a strutture in acciaio.

Questo porta, nella ripresa economica dopo le due guerre, alla costruzione di numerosissimi capannoni industriali prefabbricati in calcestruzzo armato, che in Italia arrivano, negli anni novanta, a costituire l'85% della totalità degli edifici industriali presenti sulla penisola.

1.2 Industria in Italia e in Veneto

1.2.1 Storia dell'industrializzazione italiana

Lo sviluppo industriale italiano parte con qualche anno di ritardo rispetto le grandi potenze coloniali di Inghilterra e Francia, ma, già nei primi anni del Novecento, le riforme sociali del governo Giolitti permettono la crescita economica ed industriale del paese; in particolare, grazie alla nazionalizzazione della rete ferroviaria e una politica protezionista che indirizzava i consumatori italiani verso prodotti realizzati in territorio nazionale essendo meno tassati e costosi. Il decollo dell'industria italiana parte dai settori tessile, automobilistico, chimico e cinematografico, con una concentrazione geografica nel cosiddetto "triangolo industriale" tra Milano, Torino e Genova, che porta al successivo divario tra le regioni del nord e quelle del mezzogiorno rimaste arretrate.

A seguito delle guerre l'apparato industriale dell'Italia non rimane estremamente danneggiato come accade in altri paesi europei, ma la gestione degli impianti presenta molteplici problemi di sovradimensionamento ed eccesso di mano d'opera, il cui basso costo permette una certa competitività con le imprese estere più avanzate. La ripresa viene inoltre favorita dal flusso sui mercati degli aiuti americani per lo European Recovery Plan (detto Piano Marshall), dai finanziamenti alle imprese alimentati dalla politica monetaria di inflazione, e dalla nascita di società statali controllate dall'Istituto di Ricostruzione Industriale IRI che arrivano nei successivi anni a dominare il panorama produttivo italiano.¹¹

11. Bianco Magda, *L'industria italiana*, Bologna, Il Mulino, 2003.

Grazie a queste premesse si assiste a partire dagli anni sessanta ad un sostenuto incremento produttivo e industriale con la nascita di nuove imprese, che vengono però integrate in un modello organizzativo verticale e pertanto rimanendo limitate geograficamente alle aree più sviluppate del nord Italia. Tale modello, caratterizzato da politiche di fusione in grandi gruppi guidati da imprese statali come Finmeccanica, Finelettrica, Fincantieri ed Eni, oppure private quali Fiat, Pirelli, Olivetti e Montedison, porta ad un elevato grado di interdipendenza e a comportamenti collusivi tra le famiglie ai vertici che controllano le società Holding. Di conseguenza il contesto privilegiato dalla mancanza di concorrenza e le posizioni di oligopolio o monopolio portano nel tempo alla mancanza di investimenti sull'innovazione e sul miglioramento dell'efficienza.

Successivamente le grandi imprese statali amministrare in una complessa burocratizzazione, tra cui Eni ed IRI, iniziano ad indebitarsi e, negli anni ottanta, viene avviato un programma di ristrutturazione sfruttando il sostegno statale, che viene però impedito dalla Comunità Economica Europea. Questo porta nel decennio successivo alla privatizzazione o commissariamento e liquidazione di questi enti, mentre il restante quadro industriale italiano rimane peculiarmente diviso in un numero molto limitato di grandi imprese e in una moltitudine di piccole e medie imprese più agili e flessibili, legate spesso all'artigianato e alle tradizioni locali.

Nonostante la loro diffusione sul territorio, a definire l'assetto industriale italiano non sono le piccole imprese, bensì pesano le decisioni delle poche grandi imprese, che portano ad una specializzazione nei settori tradizionali data l'assenza di investimenti verso settori tecnologici, di ricerca e sviluppo più avanzati. Inoltre, il divario territoriale rimane persistente tra le regioni più industrializzate, inizialmente Lombardia e Piemonte, seguite da Veneto ed Emilia-Romagna, e le regioni meridionali meno avanzate.^{12, 13, 14}

12. Pinto Rosario, *Il Paesaggio industriale*, Nocera Superiore, Print Art Edizioni, 2016.

13. Roberto Parisi, *Italia industriale 1861-2011. Vuoti e conflitti di un centocinquantesimo*, in *Patrimonio Industriale*, 08 (2011): p. 4

14. Amatori Franco, *L'impresa pubblica in Italia*, in *Patrimonio Industriale*, 08 (2011): pp. 30-34

1.2.2 Industrializzazione veneta

Analogamente a quanto avviene negli altri paesi testimoni della rivoluzione industriale, anche in Italia il primo settore soggetto ad una notevole crescita già dall'Ottocento è quello tessile. In particolare la prima inchiesta ministeriale che interessa l'industria in Veneto, tra il 1870 e il 1874, evidenzia un totale di 146 imprese attive nella regione, a fronte delle 1087 risposte a livello nazionale. Di queste, ben 24 risultano specializzate nel settore laniero e concentrate nell'alto vicentino, andando a costituire uno dei più importanti poli di lavorazione della lana nella penisola. Tale peculiarità territoriale è presumibilmente originata dall'antica consuetudine di produzione tessile per l'autoconsumo domestico, di carattere protoindustriale, volta al sostentamento economico nei momenti di pausa dalle attività agricole; ma i questionari distribuiti dall'inchiesta evidenziano la stagnazione economica e la povertà tecnologica delle imprese venete, che rimangono confinate a mercati prevalentemente locali.¹⁵

Tali industrie restano di dimensioni piccole o medie, con poche decine di addetti, e si insediano a macchia di leopardo sul territorio, adeguandosi al policentrismo urbano tipico della regione e alla disponibilità di energia che risulta prevalentemente provenire dai numerosi corsi d'acqua in discesa dalle fasce montane. Agli albori del 1900 è proprio l'industria idroelettrica ad assumere un ruolo centrale per lo sviluppo della regione, le cui aziende iniziano a sfruttare motori azionati elettricamente incrementando le produzioni, soprattutto in ambito meccanico e successivamente nell'alimentare con l'industria molitoria e saccarifera.¹⁶

Gli eventi bellici di inizio secolo affliggono duramente il patrimonio industriale della regione, soprattutto quando la linea del fronte raggiunge il Piave, ma la ricostruzione negli anni venti è repentina a tal punto da segnare un incremento negli occupanti del settore industriale del 60% rispetto all'anteguerra. In quegli anni, inoltre, si dispone la creazione di un polo industriale nel porto di Venezia-Marghera per far fronte alle necessità cantieristiche e siderurgiche regionali; anche se l'importanza di tali stabilimenti accresce assieme allo sviluppo in altri settori, legati alla chimica e alla lavorazione del petrolio.¹⁷

A stroncare la ripresa è però la seconda guerra mondiale che colpisce direttamente il tessuto produttivo tra cui il polo di Marghera, oltre alle infrastrutture di collegamento, portando infine alla penuria di materie prime. Al termine delle ostilità anche le imprese devono affrontare numerose difficoltà, tra cui l'assenza di riserve di valuta pregiata per gli scambi con l'estero, risolta tramite l'implementazione di metodi di pagamento alternativi: tramite credito e successivamente lo scambio di prodotti finiti.

15. Catterin Giuseppe, *La storia del lavoro in Veneto: le origini*, in *Storia del lavoro in Veneto* (2018): p. 1

16. Catterin Giuseppe, *La storia del lavoro in Veneto: lo sviluppo*, in *Storia del lavoro in Veneto* (2018): p. 2

17. Foscara Porchia, *Porto Marghera tra pubblico e privato*, in *Patrimonio Industriale*, 08 (2011): pp. 22-29

L'adattamento a queste condizioni di lanifici e altre aziende, permette l'avviamento degli ingranaggi dell'economia ed il superamento della crisi postbellica in Veneto, anche se il fattore trainante della ripresa rimane la ricostruzione e la riconversione produttiva degli impianti, come accade per gli stabilimenti di Marghera, i quali vedono la nascita di numerose nuove attività, come la lavorazione dell'alluminio e l'apertura di due fonderie.¹⁸

A partire dal 1950, la dinamicità del settore porta all'espansione capillare su tutto il territorio di piccole e medie imprese, caratterizzate da una crescente meccanizzazione e modernizzazione dei processi produttivi, le quali rimangono fino ad oggi alla base del tessuto industriale veneto. Questo passaggio da produzioni a basso tenore tecnologico con l'assemblaggio di pezzi realizzati da produzioni esterne, alla realizzazione di manufatti ingegnerizzati in proprio, è alla base di un nuovo concetto di imprenditoria per l'industria veneta minore, dalla profonda cultura artigianale, che sorge dall'ombra dei grandi poli industriali rimasti comunque operativi nonostante le difficoltà dei settori.¹⁹

Proprio a questi anni di crescita economica a livello nazionale, corrispondono i censimenti delle attività economiche realizzati dall'Istat con cadenza decennale a partire dal 1951, dai quali si può evincere, come evidenzia la successiva analisi, che oltre all'aumento generalizzato della gran parte dei settori, vi è un particolare sviluppo della manifattura leggera, la quale arriva a competere con l'industria chimica e tessile già instaurate sul territorio.

Lo studio dell'ente di ricerca statistico Isrev sui dati di questi censimenti, riferiti ai comuni veneti, evidenzia inoltre come le imprese di ridotte dimensioni, in relazione alla loro diffusione insediativa, caratterizzano maggiormente il tessuto industriale regionale raccordando le zone con insediamenti più concentrati e le aziende agricole più estese. Questo fenomeno determina un decentramento industriale dai poli maggiori, in quanto *«risulta presente fin dagli anni '60 [...] lo sviluppo di piccoli comuni non urbani di pianura a un tasso superiore perfino a quello dei comuni di cintura metropolitana»*²⁰, che porta ad una industrializzazione diffusa e a molteplici forme produttive, tipiche di un'economia periferica avanzata.

Tale formula economica vede come protagoniste delle imprese diversificate sul territorio, ma specializzate settorialmente nelle "aree tipiche" dei poli urbani e dei comuni centrali, dove si riscontrano i maggiori incrementi occupazionali nelle industrie di meccanica leggera e nei settori tradizionali di alimentari, legno e mobilio, tessili, della calzatura e della moda.

18. Barbieri F., Negri A., *Archeologia industriale – Indagini sul territorio in Lombardia e in Veneto*, Milano, Unicopli, 1989.

19. Catterin Giuseppe, *La storia del lavoro in Veneto: il recupero post bellico e lo sviluppo del "modello Veneto"*, in *Storia del lavoro in Veneto* (2018): p. 3

20. De Angelini Anna, *L'industrializzazione diffusa nel veneto*, Milano, Franco Angeli libri, 1986, p. 37

Questo panorama industriale, così dinamico e vario, è caratterizzato dalla coesistenza tra attività avanzate nella tecnologia e nel mercato e altre arretrate che sfruttano il basso costo del lavoro e rimangono legate alla subfornitura, risultando meno stabili.²¹

Pertanto, durante l'impennata produttiva conosciuta come "miracolo economico" dell'impresa veneta, vengono costruiti un numero sempre crescente di stabilimenti su tutto il territorio, infatti i dati dei censimenti sull'attività edilizia mostrano un volume dei fabbricati industriali per abitante con tassi di crescita superiori all'80% già a partire dagli anni sessanta, non solo in prossimità dei grandi centri urbani, ma con valori addirittura superiori per i comuni minori di pianura.

La realizzazione dei capannoni industriali in un territorio dall'urbanizzazione diffusa a formare la "campagna urbanizzata", permette di contenere i costi, seppur a spese del territorio, e di ridurre la necessità di strutture pubbliche di servizio grazie alla persistenza della famiglia allargata rurale. Inoltre, all'interno delle piccole imprese si ricorre spesso al lavoro familiare non pagato o all'auto-lavoro, e il reddito dei dipendenti è mantenuto basso dalla possibilità di integrazione tramite produzioni agricole di sussistenza.

Questo permette alle imprese di accumulare capitale da reinvestire nella crescita tecnico-organizzativa e nei sistemi produttivi locali, instaurando così un circuito virtuoso di lunga durata, destinato ad incrinarsi soltanto con la più recente crisi economica. Date le dimensioni e il numero delle attività che commissionano la costruzione di stabilimenti ex-novo in questo periodo, senza pretese estetiche, ma soltanto economiche e funzionali, il paesaggio della regione si ricopre di capannoni industriali realizzati con le tecniche costruttive meno costose in termini monetari e di tempo, ossia prefabbricati in calcestruzzo armato.^{22, 23}

21. Roverato Giorgio, *L'industrializzazione diffusa. Storia dell'economia padovana 1923-2003*, Padova, Esedra, 2005.

22. Roverato Giorgio, *Il modello veneto fra storia e futuro*, Padova, Il Poligrafo, 2008.

23. De Angelini Anna, *L'industrializzazione diffusa nel veneto*, Milano, Franco Angeli libri, 1986.

1.2.3 Crisi e deindustrializzazione

L'andamento del mercato determina per molte imprese sorte negli anni della crescita economica, un periodo negativo a partire dalla crisi finanziaria e conseguentemente economica del 2008. Anche in Veneto, infatti, si assiste ad una generalizzata deindustrializzazione con il fallimento di numerose attività, i cui stabilimenti rimangono in uno stato di disuso o abbandono. Data l'obsolescenza di tali strutture dal punto di vista tecnologico o funzionale-spaziale, mancano per molti anni iniziative di riuso o recupero, e questo porta al naturale deterioramento dei fabbricati inutilizzati e non mantenuti.

Soltanto in tempi recenti, questi temi architettonici ed urbanistici sono diventati centrali per la limitazione del consumo di suolo che, a partire dal 2006, diventa obiettivo fondamentale della Comunità Europea. Il raggiungimento di un'occupazione di terreno netta pari a zero entro il 2050 rimane un punto centrale per la Commissione, nonostante la decisione nel 2013 di ritirare la proposta di direttiva quadro in materia, comprendente la stesura di norme vincolanti per gli stati membri sul tema della protezione del suolo.

La direzione dell'Italia resta fermamente allineata agli obiettivi europei, portando alle prime disposizioni normative e ad iniziative volte al recupero del patrimonio industriale, il quale in Veneto occupa il 18,4% della superficie regionale con oltre 92'000 capannoni, dei quali oltre il 12% risulta dismesso (più di 10'000 edifici). Secondo quanto rilevato da una ricerca di Regione Veneto in collaborazione con IUAV, Confartigianato Imprese Veneto e la società di ricerca Smart Land, oltre il 57% di queste strutture inutilizzate hanno potenziale di riutilizzo.²⁴

Tra le nuove destinazioni industriali, quella con la maggiore domanda è la logistica, con la necessità di strutture di stoccaggio per attività produttive diversificate. Per far fronte al problema la regione offre incentivi quali agevolazioni per la demolizione e la concessione d'uso temporanea da 3 a 5 anni dei capannoni, per destinazioni diverse da quella primaria senza l'obbligo di varianti urbanistiche (favorendo la formazione di centri ricreativi, spazi di co-working, iniziative di start-up o altre attività) con la Legge Regionale n.14 (2017): "Contenimento dell'uso del suolo e rigenerazione urbana". Attualmente sono in discussione o avviamento altre iniziative e progetti per l'avvicinamento della domanda e dell'offerta, tramite un inventario pubblico e la costruzione di una banca telematica in costante aggiornamento, che individui singoli edifici e lotti per ogni area produttiva veneta dismessa, al fine di determinarne l'abbattimento o il riutilizzo.²⁵

24. Guerretta Danilo, *Nell'industria veneta devastata dalla crisi un capannone su dieci è abbandonato*, in La Stampa, 09/03 (2019)

25. Ferri V., Gastaldi F., *Le dismissioni degli immobili produttivi in Veneto. Gli equilibri instabili dell'economia, della finanza locale, della tassazione e il governo del territorio*, in Archivio di Studi Urbani e Regionali, (2021)

1.2.4 Conclusioni dell'analisi storica sull'industrializzazione

A conclusione della ricerca storica, appare evidente come gli anni di maggiore sviluppo industriale in Italia ed in particolare per il Veneto, corrispondano al secondo dopoguerra. La costruzione della maggior parte degli stabilimenti industriali, che in tempi più recenti sono caduti in stato di abbandono o disuso, risale infatti agli anni tra il 1960 ed il 1990, con la massima espansione economica del paese.

Pertanto, nelle successive analisi si mira ad individuare quali attività economiche e quali sistemi costruttivi siano maggiormente diffusi nella realizzazione di fabbricati industriali, durante l'arco temporale indicato.

Inoltre, la comprensione degli sviluppi storici relativi alle innovazioni e alle tecnologie costruttive, permette di restringere i successivi approfondimenti, concernenti le tecniche realizzative impiegate per la tipologia edilizia del capannone industriale, a quella del calcestruzzo armato con elementi costituenti prefabbricati, in quanto questa rappresenta la percentuale predominante nel panorama industriale del Veneto.

1.2.3 Analisi delle attività industriali in Veneto

Al fine di individuare la tipologia di fabbricato industriale più diffusa nella regione, per massimizzare l'applicabilità del successivo progetto, si procede al vaglio dei censimenti delle attività economiche condotti dall'Istat negli anni 1961, 1971 e 1981.

L'analisi si propone di distinguere inferenzialmente dal totale, quelle attività economiche che frequentemente fanno uso di stabilimenti di carattere industriale, per la produzione o lo stoccaggio di merci, escludendo nella stima le imprese di carattere artigianale che non richiedono sedi industriali, oppure che esigono fabbricati specifici per le lavorazioni, di dimensioni straordinarie rispetto alle tecniche di prefabbricazione.

Pertanto, ogni attività economica del censimento viene classificata tramite una lettera:

- A) Per l'attività è previsto l'utilizzo di fabbricati industriali di tipo prefabbricato per la produzione e/o lo stoccaggio di merci o materie prime;
- B) Per l'attività non è previsto l'uso di stabilimenti di dimensioni o caratteristiche che giustificano l'uso della prefabbricazione come tecnica costruttiva.

I dati di interesse disponibili, per l'ambito regionale del Veneto, comprendono il numero di unità locali attive all'anno del censimento e la classificazione ramificata dell'attività corrispondente.

Per un agevole confronto tra i censimenti risulta però necessaria l'unificazione della classificazione Istat, la quale varia nel corso degli anni. Si abbinano quindi le attività tra loro corrispondenti e se ne considera il massimo numero complessivo raggiunto durante il periodo di crescita economica individuato. In particolare, la suddivisione in rami, classi,

sottoclassi e categorie di attività economiche, presenta un totale di 294 voci per il primo censimento arrivando a dimezzarsi nel 1981, pertanto i grafici riportati a seguire sono riferiti alla nomenclatura più recente, non essendo più disponibili dati numerici incorporati direttamente associabili ai censimenti precedenti.

Complessivamente si nota come, rispetto al primo censimento analizzato, il numero di attività è soggetto ad una crescita in ogni classe economica. Di conseguenza, il massimo valore assoluto di unità locali si registra nel censimento del 1981, del quale si riporta la distribuzione percentuale per classe delle attività manifatturiere considerate rilevanti, in quanto ospitabili da stabilimenti prefabbricati in calcestruzzo (figura 1.2.3.1).

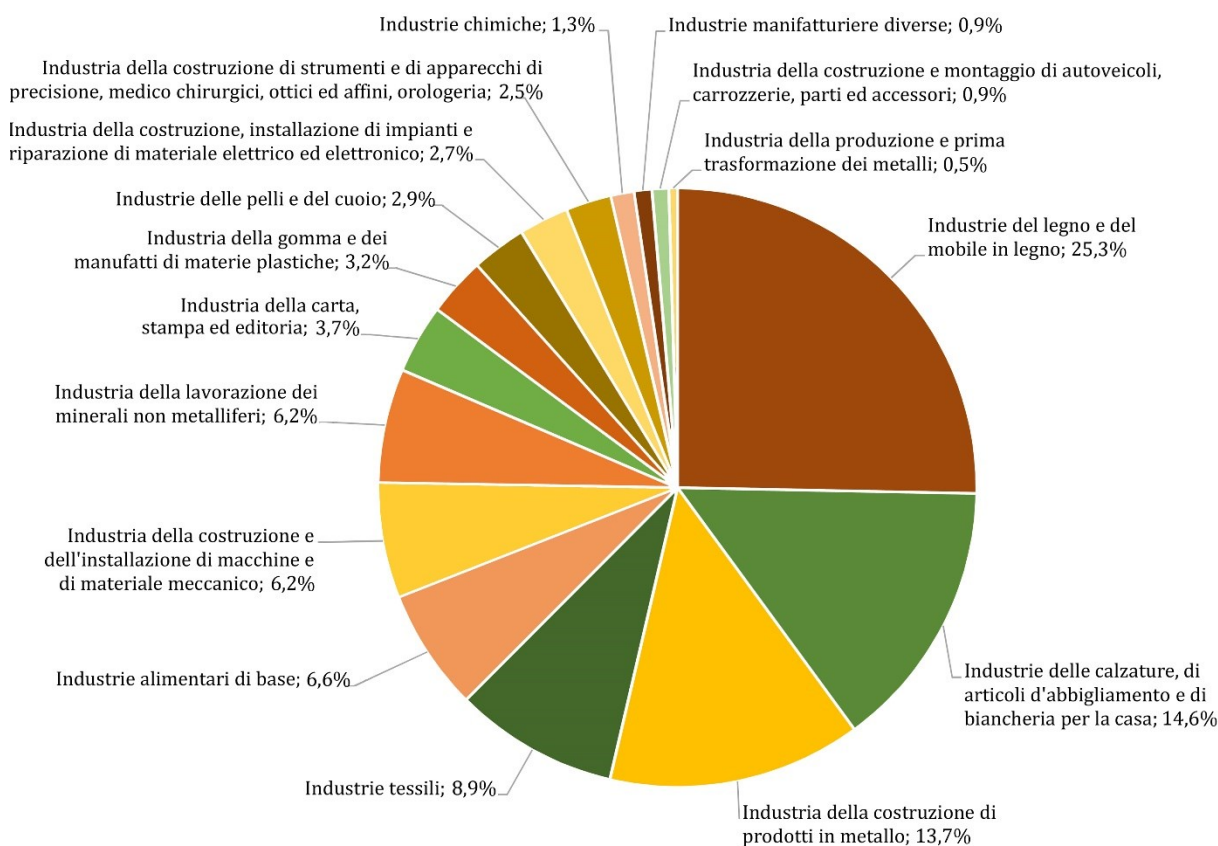


Figura 1.2.3.1: Distribuzione percentuale per classi di attività manifatturiere venete, escluse quelle per cui non è previsto un frequente utilizzo di stabilimenti prefabbricati in calcestruzzo, nel 1981.

Un'ulteriore attività che prevede l'uso di prefabbricati analoghi a quelli industriali è il commercio all'ingrosso, che nel 1981 conta 13'000 unità locali, pari a circa un quarto delle 55'000 attività manifatturiere. Il dato viene trattato separatamente, in quanto non risulta reperibile, al momento dell'analisi, un valore corrispondente al censimento più datato, rendendone pertanto impossibile una stima della crescita come segue.

Confrontando infatti il numero di attività attive nel corso degli anni, è possibile determinare quali siano i settori soggetti ad una maggiore espansione in termini assoluti.

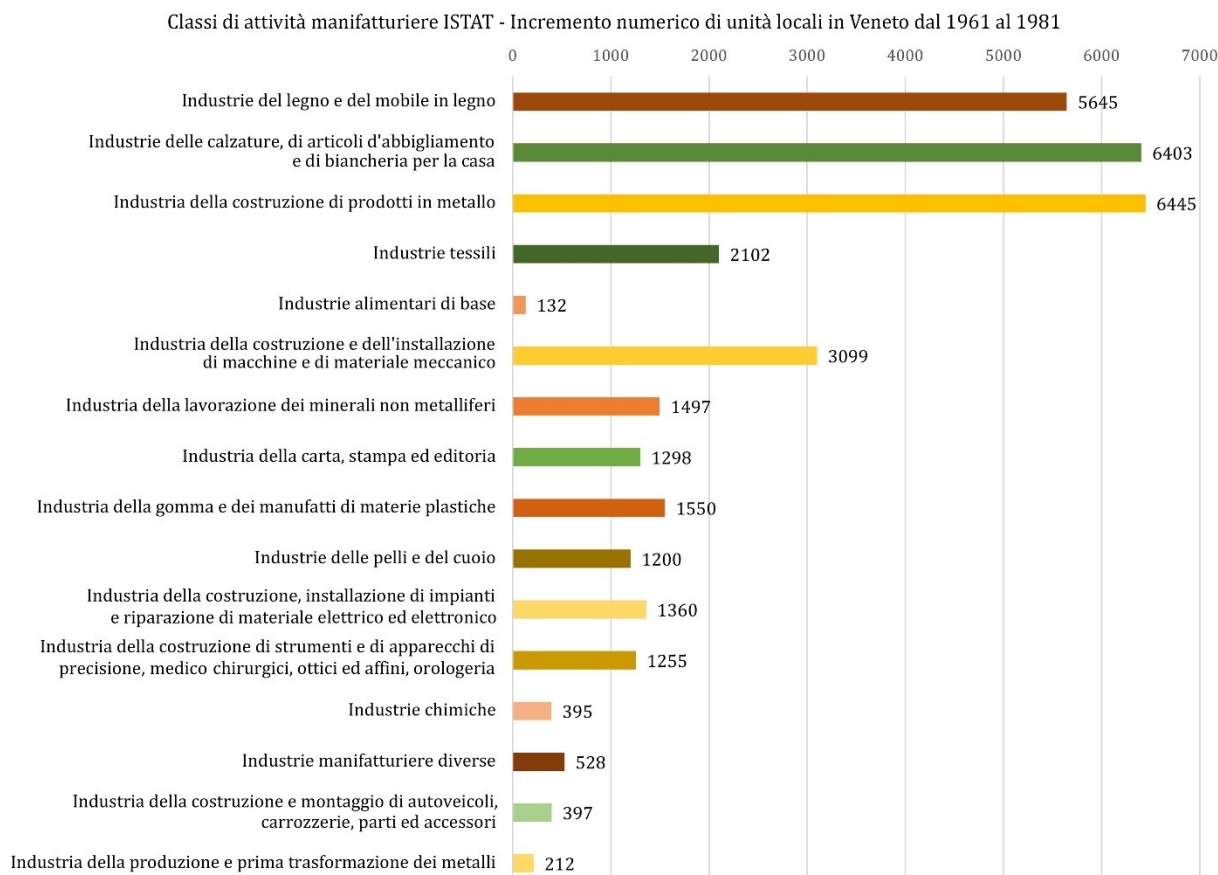


Figura 1.2.3.2: Incremento numerico delle unità locali per le classi di attività manifatturiere in Veneto tra il 1961 ed il 1981, raggruppate secondo la classificazione ISTAT delle attività economiche.

Mentre la distribuzione percentuale fornisce un'indicazione sulle attività che, più probabilmente, vanno ad insediarsi all'interno dei nuovi fabbricati industriali a causa di necessità di ampliamento o trasferimento, il valore di incremento numerico assoluto delle unità locali attive mostra invece per quali settori economici vi sia la maggiore necessità di stabilimenti costruiti ex-novo (figura 1.2.3.2).

Riprendendo i risultati dell'analisi storica, è verosimile considerare la maggioranza delle strutture industriali costruite tra il 1961 ed il 1981, come costruzioni prefabbricate in calcestruzzo armato, ed è possibile estrapolare che la maggior parte di tali edifici viene inizialmente destinata alle attività economiche più diffuse sul territorio, o con la maggiore crescita in termini di unità locali nel periodo temporale individuato.

Tali classi di attività economiche sono principalmente industrie della costruzione di prodotti in metallo (meccanica leggera), industrie delle calzature, di articoli di abbigliamento e di biancheria per la casa, industrie del legno e del mobile in legno, a cui si aggiungono gli esercizi commerciali all'ingrosso, dato il loro numero rilevante, anche in assenza dei dati necessari per valutarne la crescita.

Così determinate le attività prevalentemente diffuse durante gli anni di massima edificazione riguardante stabilimenti industriali in Veneto, si delineano gli sviluppi più attuali dell'industria regionale. Attraverso i rapporti e i bollettini statistici pubblicati dalla stessa regione²⁶, emerge una situazione di grave calo produttivo, che si riflette sul numero di imprese attive in ogni settore. In particolare, rispetto ai dati di quattro decenni prima, si può notare come il settore della produzione di abbigliamento e calzature in serie sia da tempo soggetto ad un costante declino, mentre gli altri settori abbiano subito una battuta di arresto con la più recente crisi.

Tra le attività relative all'ambito industriale, meno influenzate dall'instabilità economica degli ultimi anni compaiono le attività agricole e di lavorazione di prodotti agricoli, lo stoccaggio merci in magazzini e l'intero settore terziario (in particolare i servizi alle imprese). Pertanto, come citato in precedenza, la gran parte delle iniziative di recupero degli stabilimenti industriali dismessi, a causa del declino produttivo degli ultimi anni, si concentrano sull'inserimento di funzioni differenti da quella produttiva industriale, come nuovi magazzini logistici data la loro notevole affinità dal punto di vista strutturale, con grandi campate e altezze utili considerevoli, rispetto la tipologia degli stabilimenti produttivi.

26. Rapporti e bollettini statistici per gli anni 2018-20 disponibili nel sito della regione Veneto al link:
https://statistica.regione.veneto.it/banche_dati_economia_impresa.jsp?scheda=b2

1.3 Sistemi costruttivi prefabbricati

L'applicazione della logica industriale ai sistemi edilizi porta alla nascita della prefabbricazione degli elementi costruttivi, realizzati in fabbrica tramite processi produttivi razionalizzati, e assemblati in sito. Nonostante gli iniziali risultati dalle scarse prestazioni, la ricerca nel campo della prefabbricazione porta nel tempo a soluzioni efficienti e di qualità, grazie allo sviluppo di componenti strutturali o non, e soprattutto di elementi di connessione con una precisione sempre più elevata. La precisione e la modularità della tipologia conducono le aziende del settore a sviluppare sistemi di elementi e giunti proprietari, dalle dimensioni definite, per la costruzione di interi edifici, specialmente per l'ambito industriale.

1.3.1 Sviluppo dei prefabbricati industriali in Italia

Nonostante la presenza in Italia, già dalla fine dell'Ottocento, di alcune aziende produttrici di elementi classificabili come prefabbricati, quali i blocchi in calcestruzzo per opere in muratura, lo sviluppo delle tecniche costruttive fondate sulla prefabbricazione inizia a partire dal primo dopoguerra. Risale proprio agli anni venti l'origine della tecnologia tedesca Scac per il palo centrifugato, e al decennio successivo la produzione di travetti prefabbricati per solai, tra cui i travetti tipo Varese di ampio successo, favorito dal regime di autarchia rispetto alle strutture interamente in metallo.

Successivamente, la ricostruzione del patrimonio edilizio distrutto dalla seconda guerra mondiale diventa occasione per nuovi operatori nella realizzazione di strutture con elementi prefabbricati, fino a questo punto ancora dimensionalmente limitati e completamente oscurati dalle costruzioni in calcestruzzo gettato in opera. Le prime ricerche svolte, puntano sulla componentistica per solai che non richiedano particolari attrezzature, come pannelli e travetti con getti integrativi in opera, che permettano di risparmiare su casseri e impalcati. Alcuni di questi prodotti che acquistano popolarità sono i pannelli SAP (Senza Armatura Provvisoria), i travetti in laterocemento a T rovescia e le volte in laterocemento con catene metalliche, usate in edifici industriali con grandi luci prima dell'arrivo delle travi in cemento armato precompresso. Queste volte, leggere ed economiche, consentono anche la realizzazione di coperture a shed di un certo pregio formale (figura 1.3.1.1).

In questo periodo pionieristico per la prefabbricazione, sono protagonisti i giovani ingegneri formati nelle università sulle teorie più aggiornate del cemento armato, che progettano soluzioni innovative come casseforme modulari e travi in precompresso a fili aderenti. La successione di innovazioni vede la genesi della pista di precompressione con ancoraggi, oltre che di elementi prefabbricati quali pannelli di tamponamento, solai, pilastri, plinti, arrivando a fornire interi sistemi costruttivi prefabbricati pronti alla posa.



Figura 1.3.1.1: Copertura con volte a shed in laterocemento per uno stabilimento industriale piemontese.

Le prime sperimentazioni con archi e travi alveolari, volte al risparmio sul materiale impiegato, vedono una discreta diffusione soltanto fintato che rimane limitato il costo della mano d'opera. Mentre, con l'esperienza nella produzione di calcestruzzi sempre più resistenti e nella progettazione, gli elementi pieni in calcestruzzo armato e quelli precompressi raggiungono campate estese quanto le strutture metalliche, oltre ad un discreto pregio estetico. Tali fattori, sommati ad un prezzo molto economico, ottenuto da processi produttivi razionalizzati e dalla concorrenza tra imprese produttrici, comportano una diffusione esponenziale della prefabbricazione in ambito industriale.

Alcuni degli elementi che trovano una maggiore applicazione dopo questi sviluppi sono il tegolo a pi-greca (figura 1.3.1.2) e la trave a doppia pendenza (figura 1.3.1.3), realizzabile anche in due conci da assemblare in opera mediante la post-tensione dei cavi. La seconda viene largamente impiegata assieme a numerosi altri elementi prefabbricati in calcestruzzo, come pannelli di copertura e di tamponamento, silos, serbatoi e recinzioni, anche nell'ambito zootecnico.²⁷



Figura 1.3.1.2: A sinistra, posa di un sistema di copertura con tegoli a pi-greca.



Figura 1.3.1.3: A destra, scheletro di una struttura prefabbricata con travi a doppia pendenza.

27. Toniolo Giandomenico, *Cent'anni di prefabbricazione in calcestruzzo*, Collegio CTE, 2004.



Figura 1.3.1.4: A sinistra, copertura con voltine alari e pannelli interposti di grande luce.

Figura 1.3.1.5: A destra, costruzione dello stabilimento Campagnolo a Vicenza, con travi Ω e voltine a shed.

L'industria della prefabbricazione italiana si afferma soprattutto tramite le soluzioni per grandi coperture, studiate già prima degli anni sessanta con le voltine iperboloidiche di piccolo spessore siberkul, precomprese attraverso i trefoli incrociati sulle direttrici della superficie curva, che permettono di coprire luci superiori alla media dell'epoca. Queste lasciano spazio tra il 1960 e il 1980 a coperture più economiche, realizzate con elementi ad Y appoggiati, come travi distanziate, e chiusi da lastre ondulate interposte (figura 1.3.1.4). In seguito, a partire dagli anni ottanta, si diffondono diversi tipi di voltine di piccolo spessore ad ali larghe 2.5 metri, che permettono di coprire luci fino a 25 metri grazie ad analisi strutturali e tecnologie più avanzate, che permettono di raggiungere un discreto pregio formale anche se risultano più costose (figura 1.3.1.5).

L'evoluzione tipologica e delle tecniche di prefabbricazione non si arresta dopo gli anni di maggiore espansione economica, ma origina nuovi prodotti destinati ad affermarsi sul mercato come le lastre Predalle e i pannelli alveolari per solai. Questi elementi diventano fondamentali per la quasi totalità degli edifici civili, ma parallelamente ad essi si sviluppano anche sistemi strutturali per edifici pluripiano, composti da ampi cataloghi di elementi compatibili, e la prefabbricazione trova fortuna anche in ambiti specifici con le traversine ferroviarie in precompresso e le cabine elettriche monoblocco.

Un ulteriore elemento prefabbricato che vede una notevole applicazione ed evoluzione in Italia è il pannello di tamponamento, sia per strutture prefabbricate che realizzate in opera. Inizialmente grezzo ed esteticamente scontato, alla fine del Novecento assume un valore formale, in quanto elemento esteriore estetico che caratterizza l'immagine dell'azienda.²⁸

28. Frateili Enzo, *Storia breve della prefabbricazione*, Trieste, Istituto di Architettura e Urbanistica, 1966.

1.3.1 Classificazione di sistemi ed elementi prefabbricati

La costruzione tramite elementi prefabbricati ha come prerequisito la compatibilità tra questi, pertanto la prefabbricazione si organizza in sistemi costruttivi autonomamente concepiti per risolvere specifiche tipologie edilizie. Tali sistemi, intesi come insiemi strutturati di componenti in grado di definire compiutamente una tipologia, possono essere di tipo chiuso o aperto. I primi presentano collegamenti o caratteristiche degli elementi che li rendono compatibili soltanto con altri specifici prodotti della medesima azienda e costituiscono la porzione più consistente del mercato; viceversa, i secondi vedono poche applicazioni e di carattere maggiormente rivolto alla ricerca.

Restringendo la classificazione alle strutture con elementi in calcestruzzo armato e calcestruzzo armato precompresso, i sistemi prefabbricati possono essere distinti per il grado di prefabbricazione in:





- Sistemi totalmente prefabbricati, con eventuali getti di completamento
- Sistemi misti, con consistenti parti di struttura gettata in opera
- Sistemi ibridi, dove agli elementi prefabbricati si affiancano strutture in diversi materiali come acciaio o legno.

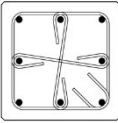
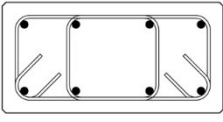

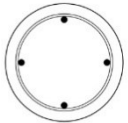
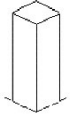
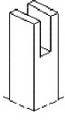
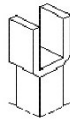
Considerata tale distinzione è possibile escludere le categorie non totalmente prefabbricate, in quanto la prima tipologia costruttiva rappresenta la quasi totalità dei fabbricati destinati all'edilizia industriale, commerciale e agricola alla quale è mirata la ricerca. Di conseguenza la classificazione dei sistemi può essere basata su diversi fattori:

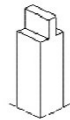

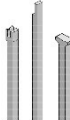
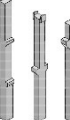
- In base all'elevazione:
 - Sistemi monopiano
 - Sistemi pluripiano
- In base alla natura delle strutture portanti
 - Sistemi continui (pannelli portanti)
 - Sistemi misti (pannelli e pilastri portanti)
 - Sistemi puntuali (pilastri portanti)
- In base all'andamento della copertura
 - Doppia pendenza
 - Piana continua
 - Piana discontinua
 - Shed








Focalizzandosi sugli elementi costruttivi che compongono questi sistemi più frequentemente impiegati nell'edilizia industriale, si può organizzare una classificazione basata sulla loro funzione strutturale e sulle caratteristiche distintive per ogni tipo di elemento. Tale classificazione è riportata nelle tabelle successive, assieme alle principali caratteristiche dimensionali di impiego attuali e delle immagini rappresentative.²⁹


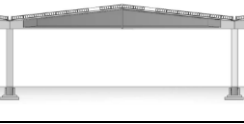

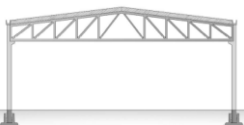
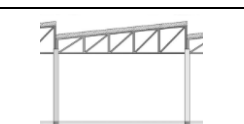
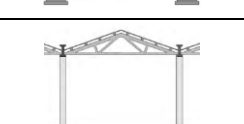
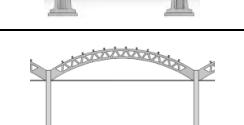




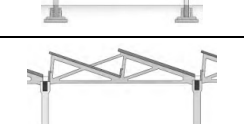
29. Bonfanti C., Toniolo G., *Strutture prefabbricate: catalogo delle tipologie esistenti*, Assbeton, 2007.











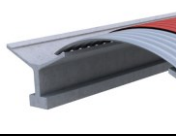

Elementi di fondazione			
Tipo	Elemento	Dimensioni [m]	Immagine
Plinti	Plinti tradizionali gettati in opera	Variabili	
	Bicchieri per plinti parzialmente prefabbricati	Base 1.0 - 2.2 m Altezza 0.9 - 1.2 m	
	Plinti interamente prefabbricati	Base 1.5 - 2.5 m Altezza 1.0 - 1.4 m	
Travi	Travi portapannello	ND	



Pilastrì			
Tipo	Elemento	Dimensioni [m]	Immagine
Sezioni trasversali	Pilastrì a sezione quadrata	Lato 0.2 - 1.2 m	
	Pilastrì a sezione rettangolare	Lati 0.2 - 1.2 m	
	Pilastrì con sezione ad H per l'inserimento di tamponamenti verticali	ND	
	Pilastrì con sezione circolare	ND	
Testa	Pilastrì a testa piatta	-	
	Pilastrì a forcella	-	
	Pilastrì a forcella con allargamento	-	


Testa	Pilastrini a baionetta	-	
	Pilastrini ad Y	-	
Appoggi laterali	Pilastrini lisci per strutture monopiano	Altezza fino 12 - 14 m	
	Pilastrini con appoggi laterali per solai intermedi o carroponti	Altezza fino 12 - 14 m (raramente 26 m)	






Travi e capriate			
Tipo	Elemento	Dimensioni [m]	Immagine
Piane	Trave a T rovescio	Lunghezza 8 - 20 m Altezza 0.4 - 1.2 m Interasse 8 - 25 m	
	Trave a I	Lunghezza 8 - 30 m Altezza 0.8 - 1.4 m Interasse 6 - 30 m	
	Trave ad H	Lunghezza 8 - 16 m Altezza 0.8 - 1.4 m	
	Trave ad L	Lunghezza 8 - 16 m Altezza 0.4 - 1.2 m	
	Trave ad Y	Lunghezza 8 - 25 m Altezza 0.6 - 1.0 m	
	Trave rettangolare con staffe sporgenti	Lunghezza 8 - 16 m Altezza variabile	
	Trave reticolare piana	Lunghezza 12 - 30 m Interasse 4 - 10 m	

Pendenzate	Trave a doppia pendenza	Lunghezza 10 - 40 m Altezza 1.3 - 2.9 m Interasse 6 - 12 m	
	Trave a doppia pendenza in conci per grandi campate	Lunghezza 30 - 40 m	
	Trave boomerang	Lunghezza 12 - 20 m Altezza 1.3 - 1.6 m	
	Trave reticolare a doppia pendenza	Lunghezza oltre 30 m Altezza 2.0 - 2.5 m	
	Trave reticolare a singola pendenza	Lunghezza 12 - 30 m Interasse 4 - 10 m	
	Capriata reticolare	Lunghezza 6 - 16 m Interasse 3 - 6 m	
	Archi reticolari o pieni, con o senza tiranti	Lunghezza 12 - 20 m Interasse 2 - 5 m	
Per coperture a shed	Volte a raggio variabile per shed arcuati, con o senza tiranti	Luce 12 - 20 m Interasse 6 - 12 m	
	Travi a ginocchio	Luce fino 20 m Interasse 6 - 7.5 m	
	Travi inclinate	Lunghezza 12 - 16 m Interasse 6 - 15 m	
	Travi Vierendeel o reticolari in corrispondenza delle aperture	Luce 16 - 20 m Interasse 8 - 12 m	
	Travi reticolari per shed ortogonali alle aperture	Lunghezza 12 m Interasse 12 m	

Orizzontamenti			
Tipo	Elemento	Dimensioni [m]	Immagine
Solai interamente prefabbricati	Lastra alveolare	Lunghezza 6 – 24 m Base 1.20 m Altezza 0.12 – 0.80 m	
	Tegolo π binervato	Lunghezza 8 – 24 m Base 2.50 m Altezza 0.30 – 1.20 m	
	Tegolo Ω	Lunghezza 10 – 20 m Base 2.25 m Altezza 0.40 – 1.00 m	
Solai parzialmente prefabbricati	Lastra nervata rovescia	Lunghezza oltre 10 m Base 1.20 m Altezza 0.20 – 0.30 m	
	Travetti in calcestruzzo armato precompresso e laterizio	Lunghezza 4 – 10 m Base 0.12 m Altezza 0.16 – 0.24 m	
	Lastra prefabbricata con elementi di alleggerimento tipo Predalle	Lunghezza 3.5 – 8 m Base 1.20 – 2.50 m Altezza 0.15 – 0.60 m	
	Tegolo ad intradosso piano	Lunghezza 10– 24 m Base 1.20 m Altezza 0.50 – 1.00 m	
Coperture illuminanti	Pannelli di chiusura per copertura a shed	ND	
	Tegoli alari e lucernari	Lunghezza 16 -32 m Base 2.5 m Altezza 1.00 – 1.10 m	
	Tegoli o voltine per copertura a microshed	Lunghezza 12 – 30 m	
	Tegolo γ	Lunghezza 12 – 20 m Base 2.40 m Altezza 1.00 m	
	Tegolo V	Lunghezza 10 – 20 m Base 0.80 m Altezza 0.65 m	

Elementi di chiusura per coperture	Coppelle curve prefabbricate	ND	
	Coppelle piane prefabbricate	ND	

Altri elementi strutturali			
Tipo	Elemento	Dimensioni [m]	Immagine
Portali	Portali interamente prefabbricati	Luce 16 - 24 m Interasse 5 - 8 m	

Pannelli di tamponamento			
Tipo	Elemento	Dimensioni [m]	Immagine
Per direzione	Pannelli verticali	ND	
	Pannelli orizzontali	ND	
Per stratigrafia	Pannelli monolitici	ND	
	Pannelli a travetti	ND	
	Pannelli a strati sandwich	ND	

1.3.2 Analisi dimensionale di sistemi ed elementi costruttivi prefabbricati

Mentre le dimensioni riportate per i singoli componenti al paragrafo precedente si riferiscono a dati di produzione odierni, le caratteristiche geometriche degli edifici industriali esistenti sono da riferirsi ai prodotti risalenti al loro periodo di costruzione. Pertanto, si esegue un'analisi dimensionale dei sistemi chiusi, aperti, dei singoli elementi costruttivi strutturali, per solai di copertura e di tamponamento perimetrale contenuti nei cataloghi, riviste di settore e repertori di prodotti prefabbricati in cemento armato tra gli anni sessanta e novanta del Novecento.^{30 - 41}

Si vogliono ottenere le più frequenti luci ed altezze utili della maglia strutturale per i prefabbricati industriali in cemento armato. Pertanto sono considerati esclusivamente i prodotti destinati alla tipologia per cui sono riportate delle caratteristiche dimensionali di impiego. Per gli elementi che non presentano una luce o un'altezza minima di produzione, si assume che questi siano fabbricabili in misure tali da coprire qualsiasi valore inferiore rispetto al massimo riportato; ma si escludono dalla tabulazione le luci e le altezze inferiori a 3 metri in quanto non rilevanti per la tipologia.

-
30. *Associazione italiana prefabbricazione, Catalogo dei materiali e dei sistemi nuovi per l'edilizia e da prefabbricazione: 1961, Abbiati, Milano, 1961.*
 31. *Associazione italiana prefabbricazione, Catalogo dei materiali e dei sistemi nuovi per l'edilizia e da prefabbricazione: 1962, AIP, Milano, 1962.*
 32. *Associazione italiana prefabbricazione, Catalogo dei materiali e dei sistemi nuovi per l'edilizia e per la prefabbricazione: 1965, AIP, Milano, 1965.*
 33. *Associazione italiana prefabbricazione per l'edilizia industrializzata, Catalogo dei materiali e dei sistemi per l'edilizia industrializzata: 1971, AIP, Milano, 1971.*
 34. *Associazione italiana prefabbricazione per l'edilizia industrializzata, Catalogo dei prodotti per l'edilizia industrializzata, AIP, Milano, 1976.*
 35. *Associazione italiana prefabbricazione per l'edilizia industrializzata, Catalogo dei prodotti per l'edilizia industrializzata e delle normative italiane ed estere, AIP, Milano, 1978.*
 36. *Associazione italiana prefabbricazione per l'edilizia industrializzata, Repertorio 1980, AIP, Milano, 1980.*
 37. *Associazione italiana prefabbricazione per l'edilizia industrializzata, Repertorio dei prodotti per l'edilizia industrializzata, dei prodotti e delle imprese operanti nel campo dell'industrializzazione edilizia, AIP, Milano, 1982.*
 38. *Associazione italiana prefabbricazione per l'edilizia industrializzata, Repertorio 1984: prodotti per l'edilizia industrializzata; enti nazionali ed internazionali di ricerca, normazione, controllo, promozione e documentazione per l'edilizia, AIP, Milano, 1984.*
 39. *Mulitsch Sergio, Prefabbricare, Tipografia Bertieri, Milano, 1958-1971.*
 40. *Collegio dei tecnici della industrializzazione edilizia, La Prefabbricazione, Itec, Milano, 1965-1986.*
 41. *L'industria italiana del cemento, Siac, Roma, 1929-1997.*

Il campione analizzato risulta quindi ridotto ad un totale di 311 prodotti, sistemi costruttivi o aggiornamenti degli stessi negli anni con nuove disponibilità dimensionali. Tale quantitativo comprende ogni elemento contenuto nei cataloghi che riporti almeno una delle caratteristiche dimensionali oggetto di studio, mentre il numero di prodotti contenuti nei sottoinsiemi corrispondenti a queste dimensioni risulta:

- Prodotti che riportano la luce maggiore della maglia strutturale: n° 276;
- Prodotti che riportano la luce minore della maglia strutturale: n° 172;
- Prodotti che riportano l'altezza utile interna: n° 80.

Analizzando la frequenza (in percentuale sul totale dei prodotti di ogni sottoinsieme, per una lettura più immediata rispetto quella assoluta), dei sistemi o elementi che sono in grado di coprire una determinata luce o altezza utile, ad intervalli di 1 metro, è possibile individuarne le distribuzioni gaussiane (figure 1.3.2.1; 1.3.2.2; 1.3.2.3).

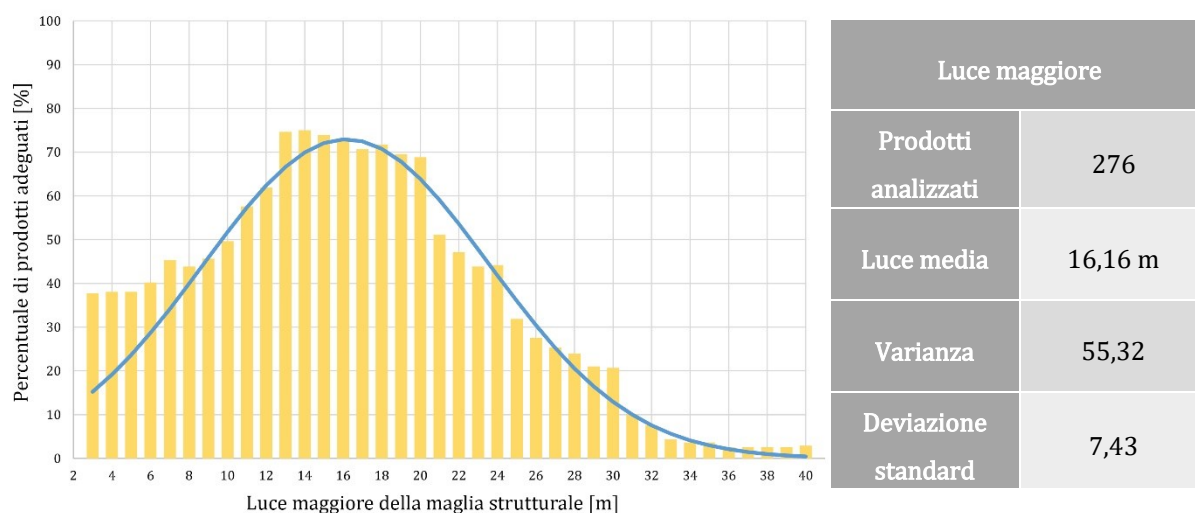


Figura 1.3.2.1: Percentuale di prodotti adatti per le specifiche luci della campata maggiore.

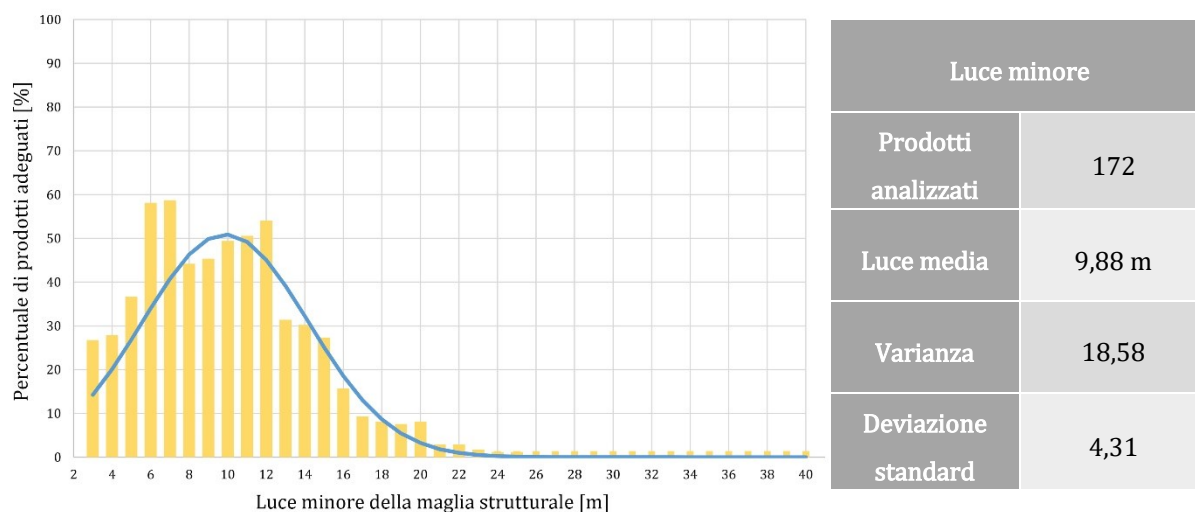


Figura 1.3.2.2: Percentuale di prodotti adatti per le specifiche luci della campata minore.

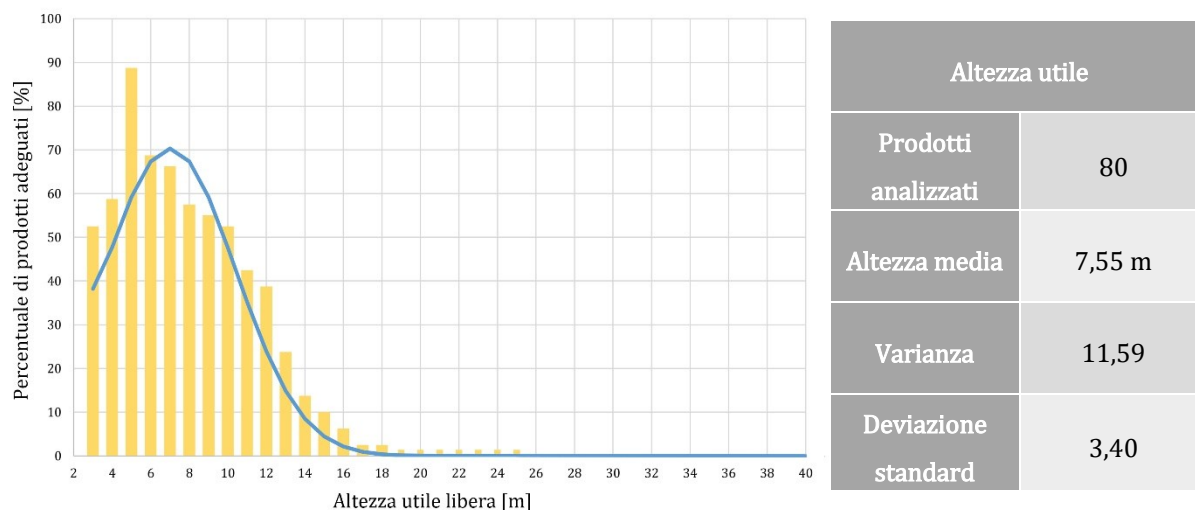


Figura 1.3.2.3: Percentuale di prodotti adatti per le specifiche altezze utili.

Dall'analisi risulta una luce maggiore di campata media di circa 16 metri, mentre il massimo numero assoluto di prodotti adatti si registra per la luce di 14 metri. Infatti la percentuale di sistemi, o elementi, che prevedono la produzione di misure contenute nell'intervallo della gaussiana tra 14 e 18 metri, supera l'80% del totale analizzato.

Similmente, la luce minore media corrisponde a circa 10 metri, con un massimo assoluto per la luce di 7 metri. In questo caso la dispersione dei dati rispetto alla gaussiana rende necessario adottare un intervallo più ampio per raggiungere la stessa percentuale di 80% dei prodotti analizzati, ottenuta espandendolo da 7 a 13 metri.

Nel caso infine dell'altezza utile, si ha una media di circa 7,5 metri, con un picco massimo ai 5 metri. Nonostante il ridotto numero di dati disponibili la concentrazione in una curva più stretta riscontrata risulta ragionevole, in quanto la gran parte dei sistemi e degli elementi strutturali sono concepiti per edifici monopiano che di rado raggiungono dimensioni elevate in altezza. Infatti, il percentile corrispondente all'intervallo tra 5 e 8 metri supera il 90% dei casi studiati.

Di conseguenza l'analisi dimensionale dei prodotti da costruzione, per edifici di carattere industriale prefabbricati in cemento, individua come misure più frequenti per gli stabilimenti realizzati tra gli anni sessanta e ottanta:

- Maglie strutturali con campate maggiori compresa tra 14 e 18 m;
- Sviluppo trasversale con campate minori comprese tra 7 e 13 m;
- Altezze utili comprese tra 5 e 8 m.

1.4 Analisi delle attività rappresentative

Al fine di estendere l'analisi geometrica sui prodotti per edilizia industriale da catalogo, a casi realmente costruiti, si individuano dei possibili casi studio appartenenti alle categorie di attività produttive più diffuse nella regione, individuate al paragrafo 1.2.3. In particolare, si eseguono sopralluoghi per il rilievo delle principali caratteristiche geometriche, e per ricavare altre informazioni inerenti ai processi produttivi per vari settori, nei seguenti stabilimenti:

- Stabilimento industriale di Grassi Pietre, per la lavorazione di elementi lapidei;
- Centro rivendita e magazzino Rossato Legnami, di carattere commerciale;
- Stabilimento industriale di Bozza legnami, per la lavorazione del legno;
- Stabilimento industriale Aster s.r.l. per lavorazioni di TNT e di film plastici;
- Stabilimento industriale PLASTIME s.r.l. per produzione di articoli in plastica;
- Ex-stabilimento industriale Lazzari, per la produzione di calzature, dismesso;
- Fabbricato di tipologia industriale Tommasin Gomme, gommista;
- Stabilimento industriale KSE, per la produzione di macchine utensili;
- Stabilimento industriale Kerakoll, per la produzione di miscele per l'edilizia;
- Stabilimento industriale Ovodry, per l'essiccazione di prodotti alimentari;
- Stabilimento industriale Grejo, per la produzione di polveri alimentari essiccate;
- Stabilimento industriale per produzione alimentare zootecnica, mangimificio.

Al fine di individuare le caratteristiche che possono influire maggiormente sulle soluzioni adattive, per la realizzazione di ambienti a volumetria variabile (trattate al capitolo 2), si procede dapprima alla definizione delle generalità organizzative dei processi produttivi.

1.4.1 Generalità sull'organizzazione dei cicli produttivi

Per la definizione del plant layout adatto al ciclo produttivo di qualsiasi attività industriale di carattere non eccezionale, tralasciando quindi raffinerie, grande siderurgia e simili, si deve prendere in considerazione:

- **Materiali:** quantità, volume e peso distintamente di materie prime, semilavorati e prodotti finiti ordinariamente trattenuti in stabilimento, la loro pericolosità, tempo di permanenza, esigenze di immagazzinamento e andamenti stagionali;
 - **Macchinari:** tramite elenco delle macchine che riporti peso, ingombro, numero, livello di automazione, spazio per gli addetti, sequenza e collocazione secondo il ciclo di lavorazione e i servomezzi richiesti;
 - **Magazzini:** estensione, collocazione nella sequenza produttiva, quantitativi da immagazzinare in peso e volume, esigenze di climatizzazione, di resistenza al fuoco e la loro classificazione per materie prime in arrivo, aree polmone tra i reparti per semilavorati o per prodotti finiti;
-

- **Trasporti interni:** flow chart per l'ottimizzazione dei percorsi, mezzi utilizzati come nastri o carrelli, apparati di sollevamento e la relativa potenza, carico massimo, peso e ingombro;
- **Numero di addetti:** influisce sullo spazio fra le macchine e i percorsi interni, nonché sui servizi generali e ausiliari per la sicurezza;
- **Servomezzi richiesti:** come ad esempio energia elettrica, forza motrice, acqua potabile o industriale, gas, aria compressa o vapore e altri, il loro quantitativo e le necessità di portata per le tubature, cavi o condutture di cui occorre conoscere anche i punti di ancoraggio;
- **Servizi generali ed ausiliari:** presenza di uffici, laboratori, mense, spogliatoi, centrali termiche ed elettriche, autorimesse e parcheggi, allacciamenti telefonici, illuminazione e riscaldamento e loro caratteristiche.

Tra queste caratteristiche, data la confidenzialità dei dati ed il tempo a disposizione del personale all'interno di realtà movimentate come le industrie, la ricerca iniziale si focalizza su quelle che maggiormente potrebbero influenzare l'applicabilità di soluzioni adattive con componenti mobili.

In prima istanza, dunque, si cerca di ricostruire per quanto possibile lo schema di procedimento che racchiude le operazioni o lavorazioni eseguite nello stabilimento, oltre che le fasi di attesa, trasporto e deposito anche intermedio dei materiali, dove possibile. Questo schema è generalmente legato alla disposizione planimetrica di reparti, posti di lavoro, magazzini e percorsi interni dello stabilimento.⁴²

Al fine di studiare interventi architettonici con parti mobili, un fattore determinante è il tempo in cui le lavorazioni dello schema vengono eseguite, e quello in cui i macchinari usati per le stesse non risultano impiegati. Di conseguenza i quesiti posti alle aziende si concentrano maggiormente sulle tempistiche di utilizzo delle attrezzature o dei reparti, oltre che sulla eventuale periodicità a cui può essere soggetta l'intera produzione come nel caso di articoli stagionali.

Infine, si considera rilevante anche la possibilità di movimentazione delle macchine presenti in stabilimento, e conseguentemente le loro necessità impiantistiche e di fondazioni speciali che potrebbero ostacolare il loro riposizionamento all'interno di strutture mobili.

42. Micheletti Federico, *L'industria e le sue esigenze di spazio: dal plant-layout ad un catalogo di edilizia industriale*, Torino, Finpiemonte, 1984.

1.4.2 Definizione delle caratteristiche da rilevare

Al fine di mantenere una validità generale dell'analisi per le strutture individuate, durante i rilievi si identificano le seguenti caratteristiche:

○ **Architettoniche:**

Per un confronto con la precedente analisi risulta fondamentale conoscere:

- L'anno di realizzazione della parte prefabbricata in cemento dello stabilimento;
- Le sue principali dimensioni strutturali di altezza utile, campata maggiore ed interasse tra pilastri;
- La tipologia di copertura: piana, pendenzata, a shed; e la sua conformazione strutturale con travi principali, secondarie, pannelli o altro.

Secondariamente, qualora fosse possibile approfondire altri aspetti si cerca di reperire dati riguardo:

- Tipologia e caratteristiche geometriche delle fondazioni;
- Sezione, testa e caratteristiche geometriche dei pilastri;
- Disposizione delle vie di corsa per carroponi;
- Disposizione e caratteristiche geometriche dei pannelli di chiusura perimetrali;
- Sezione e caratteristiche geometriche delle travi principali;
- Sezione e caratteristiche geometriche delle travi secondarie;
- Sezione, aggetti e caratteristiche geometriche di tegoli di copertura;
- Caratteristiche geometriche di travi reticolari, travi a ginocchio, travi Vierendeel, volte o pannelli per coperture a shed;
- Caratteristiche geometriche di pannelli o lastre di copertura;
- Conformazione e tipologia di vincolo dei nodi strutturali.

○ **Periodicità di produzione e stoccaggio:**

Fluttuazioni periodiche o stagionali nella produzione o nello stoccaggio di entità oraria, giornaliera, settimanale, mensile, stagionale o annuale, potrebbero risultare molto influenti nell'efficienza e nella scelta di strutture adattive adeguate al caso.

○ **Caratteristiche ambientali dello stabilimento:**

La presenza di ambienti all'interno dello stabilimento o dei magazzini che necessitano di un controllo climatico di temperatura, umidità, illuminazione, polveri o altre peculiarità che esulano dai normali valori di comfort per gli operatori, deve essere presa in considerazione nella definizione dell'intervento.

○ **Lavorazioni e macchinari:**

Oltre ad un'elencazione dei macchinari, reparti o lavorazioni effettuate dall'azienda, per la scelta della corretta tecnologia adattiva e di quali parti dello stabilimento potrebbero beneficiarne, risultano particolarmente determinanti:

- Collegamenti impiantistici richiesti per le l'operatività di macchine o reparti;
 - Eventuale necessità di fondazioni speciali o altre predisposizioni sotterranee;
-

- Dimensioni o grado di ingombro di macchinari o reparti;
- Frequenza di utilizzo dei macchinari o dei reparti nel ciclo produttivo;
- Alternativamente, frequenza e durata delle pause nelle lavorazioni;
- Grado di continuità rispetto le altre lavorazioni (in serie, ravvicinate solo temporalmente, indipendenti).

Tali informazioni sulle apparecchiature utilizzate nelle lavorazioni sono finalizzate a stimarne la possibilità di movimentazione e allestimento di reparti temporanei, sfruttati meno frequentemente nel ciclo produttivo, per massimizzare l'efficienza di eventuali soluzioni adattive mobili.

1.4.3 Stabilimento industriale Grassi Pietre S.r.l. (Nanto, VI)

○ **Caratteristiche architettoniche:**

Lo stabilimento risulta costruito da un lungo processo di ampliamento, iniziato da una segheria già operativa negli anni Cinquanta e utilizzata fino ad oggi. Il nucleo storico si compone di due strutture in pietra e mattoni. La prima, oggi adibita ad uffici, con copertura lignea, capriate e tegole. La seconda, con un solaio curvo in laterocemento che copre due telai multilama e ne permette l'illuminazione tramite dei lucernai. A questo nucleo si aggiunge negli anni Sessanta un deposito rettilineo, monocampata, in blocchi di calcestruzzo per una lunghezza complessiva di 40m; poi espansa fino ad un centinaio di metri negli anni Settanta sfruttando anche degli elementi in calcestruzzo armato, oltre ai medesimi blocchi. A tali depositi si affianca una tettoia a due falde di 120x15m formata da pilastri quadrati di lato 60cm prefabbricati con interasse di 9m, e travi ad S con corsia per carroponte.

Negli anni Novanta si costruisce il capannone che ospita la maggior parte dei reparti produttivi (figura 1.4.3.1): si utilizzano pilastri prefabbricati 60x60cm di altezza 6.50m con angoli sagomati a 45°, posti ad interasse di 9m a formare 11 moduli consecutivi. Le tre file di pilastri formano due campate affiancate di luce pari a 20m, che ospitano tre carroponti ciascuna, per la movimentazione delle lastre e dei blocchi all'interno.

Le vie di corsa per i carroponti sono ricavate sull'ala inferiore delle travi ad I, posate in sommità ai pilastri (figura 1.4.3.2). La sezione delle travi principali ad I è alta 2.1m, pertanto l'altezza utile interna fino all'intradosso di queste è pari all'altezza dei pilastri, mentre in direzione della campata l'altezza fino all'intradosso delle travi ad Y di copertura raggiunge gli 8.60m, ospitando in tale differenza di quota i carrelli dei carroponti. La copertura risulta quindi composta da una serie di tegoli ad Y, distanziati per lasciare posto a lucernai curvi, alternati a pannelli piani di fibrocemento di chiusura verso l'intradosso e pannelli curvi a shed verso l'estradosso,

installati per ospitare l'impianto fotovoltaico con un'inclinazione favorevole (figura 1.4.3.3).

Alla porzione terminale di questa struttura si affianca un tendone esterno a doppia falda con struttura metallica e telo in PVC, posto sopra un'estensione della soletta con pavimento industriale di 25x12m. Le chiusure perimetrali sono formate da pannelli prefabbricati orizzontali con due strati di 5cm di calcestruzzo e uno isolante di 6cm al loro interno. Più di recente, al di sotto della tettoia aperta con carroponte viene aggiunta una struttura leggera in pannelli metallici fonoassorbenti, atta ad ospitare un macchinario necessario ad integrare la produzione di quelli posti nel nucleo storico dell'azienda; inoltre è in fase di realizzazione una nuova segheria con la medesima tecnica costruttiva leggera, distaccata sul retro, che possa ospitare dei più moderni telai multilama in sostituzione di quelli contenuti nel primo laboratorio con murature in pietra e mattoni.

All'esterno dello stabilimento il lotto risulta molto esteso per ospitare, in oltre 20'000 metri quadri di appezzamento, le materie prime, ossia i blocchi estratti dalle cave, prodotti imballati e scarti di produzione che risultano potenzialmente recuperabili. I prodotti semilavorati sono invece depositati sotto la tettoia per evitare che infiltrazioni d'acqua e cicli di gelo e disgelo possano danneggiarli. Inoltre l'azienda dispone di un parcheggio sul lato opposto della strada e di un ampio piazzale all'ingresso per consentire le manovre dei mezzi di trasporto per le materie prime o per i prodotti finiti.

Rispetto le distribuzioni statistiche dei prodotti da costruzione prefabbricati analizzati al paragrafo 1.3.2 lo stabilimento presenta campate di luce maggiore leggermente sopra la media, interasse tra i pilastri compreso nell'intervallo di misure atteso, così come l'altezza utile degli ambienti interni.



Figura 1.4.3.1: A sinistra, vista aerea con evidenziata in giallo la struttura prefabbricata oggetto di studio.

Figura 1.4.3.2: Al centro, vie di corsa dei carroponti interni sull'ala delle travi, intradosso copertura.

Figura 1.4.3.3: A destra, conformazione strutturale della copertura con tegoli ad Y distanziati e pannelli.

- **Periodicità di produzione e stoccaggio:**

Storicamente è riscontrabile una stagionalità anche per l'industria della pietra e del marmo poiché l'applicazione nel campo edilizio spingeva verso una produzione più intensa nei mesi caldi rispetto quelli invernali, ma con l'espansione a livello internazionale e globale della richiesta, le nuove tecnologie e lo sviluppo anche del mercato degli interni, ad oggi tale fluttuazione stagionale non è più rilevabile.

Una periodicità è però presente nello stoccaggio dei prodotti finiti, in quanto sempre più spesso accade che si realizzino numerosi pezzi per determinati cantieri, i quali per complessità di progetto dovute alle numerose figure professionali coinvolte, o alle necessità dei clienti, possono rimanere fermi per mesi, talvolta anche anni prima di ripartire. Durante questo tempo i prodotti rimangono in azienda, che per mantenerli in condizioni ottimali necessita di spazi chiusi. Pertanto, nel magazzino sono più frequenti dei periodi più o meno prolungati in cui i prodotti si accumulano, ma risulta difficile una stima della durata di questi periodi, in quanto dipendono da fattori esterni di cadenza casuale.

- **Caratteristiche ambientali dello stabilimento:**

All'interno degli ambienti di produzione è sufficiente mantenere una temperatura di 18° C per il comfort degli operatori, nonostante il frequente spostamento dei materiali e l'uso di pannelli radianti a soffitto comporti gradienti termici difficilmente evitabili all'apertura dei passaggi perimetrali verso l'esterno. Le uniche lavorazioni eseguite che richiedono un ambiente particolare sono le sabbiature, ma essendo queste operazioni richieste estremamente di rado (massimo quattro volte l'anno), vengono eseguite in accordo al coordinatore per la sicurezza, all'esterno con sabbia a perdere, senza la necessità del complesso sistema di recupero.

Per lo stoccaggio dei blocchi interi provenienti dalle cave e portati in stabilimento per consentire di continuare gli scavi, l'unica necessità è una grande estensione di terreno all'esterno che permetta di organizzarli per stock in base alla qualità e alle condizioni del blocco. Al contrario, le lastre tagliate in attesa di finitura vengono stoccate al riparo della lunga tettoia con carroponte, per evitare che l'acqua piovana possa danneggiarli a seguito di cicli di gelo e disgelo. L'azienda produce anche elementi scultorei e campionari che vengono conservati all'interno della struttura temporanea non riscaldata a fianco della produzione, ma attualmente molti prodotti finiti vengono stoccati all'aperto, con il rischio che l'imballaggio si danneggi, sporchi o sia invaso dagli insetti. Per tale motivo è di recente emersa la necessità di un ulteriore magazzino dove conservare al meglio i bancali confezionati e i fogli con le informazioni delle partite di prodotti che li accompagnano.

○ **Lavorazioni e macchinari:**

La maggioranza delle lavorazioni eseguite all'interno dell'impianto vengono eseguite continuativamente da macchinari pesanti, adatti al materiale trattato. Tali macchine operatrici sono montate su fondazioni speciali profonde anche 2.5-3m in calcestruzzo armato, che, oltre a sostenerne il peso, permettono di raccogliere l'acqua necessaria al loro funzionamento. Distribuite tra il settore produttivo, la vecchia segheria e le strutture leggere di nuova realizzazione si trovano:

- Monolama per lo squadro dei blocchi (collegamento elettrico e idraulico)
- Frese a ponte (collegamento elettrico e idraulico)
- Sagomatrice a controllo numerico (collegamento elettrico e idraulico)
- Macchina per lucidatura lastre (collegamento elettrico e idraulico)
- Due telai multilama a 80 lame (in sostituzione, collegamento elettrico e idraulico)
- Telaio multilama a 50 lame (collegamento elettrico e idraulico)

Sono inoltre presenti un manettone a colonna per la lucidatura a mano e 3 laboratori di finitura e imballaggio attrezzati, che non richiedono invece fondazioni speciali, ma necessitano comunque dell'allacciamento idraulico ed elettrico.

Oltre a questi macchinari, l'azienda dispone di alcuni strumenti usati meno frequentemente, data la natura della produzione con ordini su commissione che può richiedere personalizzazioni o pezzi particolari meno diffusi sul mercato. In particolare, oltre alla necessità di adattare alcune delle macchine sopracitate, e di formare gli operatori per rispondere alle necessità degli ordini, vengono utilizzate anche se di rado:

- Sagomatrice
- Tornio
- Carotatrice
- Sabbiatrice

Questi utensili, utilizzati per pezzi curvi, colonne, pezzi forati e finiture superficiali meno richieste, risultano più leggeri delle precedenti macchine, ma necessitano ad ogni modo di collegamento elettrico oltre che al sistema idraulico.

1.4.4 Rivendita e stoccaggio Rossato Legnami (Noventa Vicentina, VI)

○ Caratteristiche architettoniche:

Il magazzino per le merci realizzato in elementi di calcestruzzo prefabbricati presenta una singola campata di 20.5m, tra due infilate di pilastri 50x50cm di passo diverso. I quattro pilastri verso l'ingresso dalla strada presentano una testa a forcella che inquadra una trave principale rettangolare, si alternano ad interasse di 6.65m a pannelli prefabbricati orizzontali che ospitano verso terra vetrine per l'esposizione dei prodotti. I pilastri sul retro invece hanno la medesima sezione ma terminano con testa piatta su cui poggiano travi rettangolari della stessa altezza di 70cm della precedente, ma di base pari al lato del pilastro. Questi pilastri hanno invece un interasse di 10m, formando uno scanso di 1.8m a lato, realizzato con due ulteriori elementi portanti verticali di sezione quadrata più stretta con lato 42cm e terminazione con una sola ala della forcella.

La copertura è formata da tegoli Pi-greco larghi 2.45m, affiancati in una coppia e due triplete, che lasciano due spazi di 1.20m tra di loro. Questo distanziamento è coperto da pannelli in calcestruzzo piani verso le estremità ad una quota di intradosso pari a 5.90m, e verso il centro da voltine in materiale plastico trasparente a formare dei lucernari. I tegoli nervati, a vista dall'interno, sporgono sul retro per un aggetto di 3m. Mentre, i pannelli di facciata laterali e sul lato dell'aggetto hanno diverse altezze e risultano verticali al contrario di quelli sul lato strada. Tali pannelli raggiungono la base delle nervature dei tegoli ad una quota di 4.33m, aprendosi ciascuno con una finestra quadrata in alto; hanno base di 2.00m e spessore di 25cm.

Come per lo stabilimento precedente la campata maggiore si attesta leggermente superiore ai valori attesi dall'analisi statistica, mentre gli interassi tra i pilastri di e l'altezza utile rientrano pienamente nelle previsioni.



Figura 1.4.4.1: A sinistra, sistema strutturale con pilastri a forcella e tegoli Pi-greco a vista di copertura.

Figura 1.4.4.2: A destra, pannelli prefabbricati di facciata verticali e aggetto dei tegoli sul retro.

○ **Periodicità di produzione e stoccaggio:**

Trattandosi di una azienda di piccole dimensioni a conduzione quasi familiare, la politica aziendale punta all'acquisizione di prodotti diversificati per la rivendita, portati in magazzino quando questi risultano più convenienti. Per questo, a differenza di produzioni o rivenditori più specializzati in singoli prodotti che potrebbero avere grandi quantità di prodotto da immagazzinare in una stagione per poi diminuire via via le scorte da magazzino, l'azienda analizzata non denuncia rilevanti periodicità nello stoccaggio. Le uniche variazioni nella quantità di merce presente in stabilimento sono legate alla vendita delle rimanenze a fine anno per poi sostituirle con nuovi prodotti, o altre fluttuazioni legate al mercato più o meno attivo sul lungo periodo con annate più o meno intense.

○ **Caratteristiche ambientali dello stabilimento:**

L'attività di rivendita immagazzina prodotti già essiccati o finiti che, pertanto, non richiedono particolari accortezze ambientali di controllo della temperatura o dell'umidità all'interno del magazzino. Numerosi prodotti sono anche stoccati all'esterno, coperti da tettoie in legno o acciaio, prive di chiusure perimetrali. Queste risultano sufficienti per garantire una protezione dall'acqua piovana e dal sole battente.

○ **Lavorazioni eseguite:**

Nonostante l'attività sia concentrata maggiormente sulla rivendita dei prodotti, si eseguono sporadiche lavorazioni artigianali sul legno. Si tratta di semplici operazioni con macchine leggere e semplicemente trasportabili a mano o con l'uso di carelli elevatori. Le attrezzature, impiegate soltanto di rado per particolari richieste, sono:

- Banco sega con sega circolare (collegamento elettrico)
- Multilama a 4 alberi (collegamento elettrico e condotto di areazione)
- Pialla a spessore (collegamento elettrico e condotto di areazione)

Nel complesso nessuna di queste risulta ingombrante né richiede una fondazione speciale. Date le dimensioni ridotte dei prodotti trattabili e delle macchine stesse, non è complesso trovarne una collocazione all'interno dello stabilimento senza particolari necessità di spazio.

1.4.5 Stabilimento industriale Bozza legnami (Vigonza, PD)

○ Caratteristiche architettoniche:

La produzione di Bozza Legnami si divide in due fabbricati distinti, quello oggetto del sopralluogo si compone di elementi prefabbricati in calcestruzzo armato e risale agli anni 1981-82. Tale struttura comprende due campate di luci differenti, pari a 11.5m e 16.5m, Gli elementi verticali sono tre serie di pilastri quadrati di lato 50cm, posti ad interasse di 6m. Le due infilate lungo la campata maggiore presentano delle mensole vicine alla sommità che non sono utilizzate data l'assenza di un carroponete. La testa dei pilastri invece si divide in una forcella che sorregge delle travi principali a T di sezione alta 0.7m (figura 1.4.5.1). La copertura è completata da tegoli ad Y di calcestruzzo armato, distanziati con interasse di 2.4m, che poggiano sulle travi principali, fornendo un'altezza utile interna pari a 6m (figura 1.4.5.2). L'intradosso interno della copertura è completamente chiuso da pannelli di lamiera grecata fissati all'ala inferiore dei tegoli, mentre verso l'esterno altri pannelli curvi in lamiera congiungono le ali sporgenti delle Y. Le chiusure perimetrali sono composte da pannelli di calcestruzzo orizzontali 6.0 x 2.2m, fissati tra pilastri successivi, e aperti con infissi a nastro metallici oltre i 3.5m di altezza. Tale chiusura si ripresenta all'interno chiudendo l'ambiente con la campata maggiore in corrispondenza del sesto pilastro, mentre la campata minore corre per due pilastri in più, il secondo dei quali con interasse ravvicinato a 2.5m (figura 1.4.5.3).

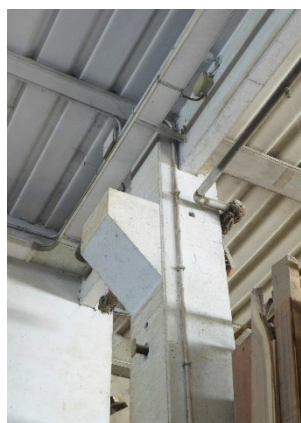


Figura 1.4.5.1: A sinistra, pilastro a forcella con mensola sporgente, incastro con trave principale a T.

Figura 1.4.5.2: Al centro, facciata esterna con tegoli ad Y sporgenti e voltine in lamiera grecata.

Figura 1.4.5.3: A destra, vista interna sulla piastra, sul fondo le murature che dividono l'ampliamento.

Oltre la coppia di setti paralleli che chiudono la campata maggiore si instaura un ampliamento dell'edificio realizzato con sempre con platea ed elementi verticali di calcestruzzo armato, ma con copertura lignea, che ospita il reparto per l'ultima finitura separato dal resto della produzione, oltre ad una stanza adibita a deposito e

un incavo, aperto verso l'esterno ma coperto ad eccezione del foro per ospitare un silos che svetta sulla copertura piana. Sul lato opposto il complesso si unisce con una parte in muratura dedicata agli uffici; mentre la restante porzione del lotto è occupata da depositi di materiali all'aperto, se non coperti da una copertura in legno o da una struttura temporanea a telaio metallico che sostiene un telo flessibile.

Rispetto ai prodotti da catalogo analizzati le misure delle campate maggiori e di altezza utile rientrano pienamente nei valori previsti, mentre l'interasse tra i pilastri si attesta leggermente sotto la media statistica arrivando a soli 6 metri.

○ **Periodicità di produzione e stoccaggio:**

Generalmente, nell'arco annuale, l'attività edilizia e la richiesta per legame da costruzioni rallentano nei mesi freddi, da Novembre a Febbraio, ma anche durante il calo stagionale la produzione continua abbastanza invariata.

Per quanto concerne il magazzino, invece, la gestione di prodotti con dimensioni considerevoli, come travi che possono raggiungere i 18 metri di lunghezza, presenta problemi e costi considerevoli. Pertanto, la maggioranza dei produttori preferisce mantenere al minimo le scorte da magazzino e lavorare soltanto su commessa. Nel caso di Bozza Legnami si mantiene comunque una sufficiente scorta, piuttosto costante, di prodotti per garantire maggiore flessibilità nelle richieste, anche se le rimanenze di magazzino vengono computate come utili con costi di giacenza sempre elevati.

○ **Caratteristiche ambientali dello stabilimento:**

Per le lavorazioni di carpenteria e falegnameria non sono previste particolari condizioni controllate, l'unico reparto che prevede meramente delle accortezze nella dislocazione all'interno del processo produttivo è l'impregnatura, che viene collocata per quanto possibile separatamente rispetto le altre lavorazioni per evitare che la polvere prodotta da queste possa interferire nella lavorazione.

Per lo stoccaggio dei prodotti sarebbero da preferire ambienti coperti, ma il costo per delle strutture in grado di contenere elementi così ingombranti è inaccessibile soprattutto per aspetti legali che non distinguono tra fabbricati produttivi e quelli adibiti al mero deposito. Pertanto, attualmente si utilizzano anche strutture temporanee estensibili in acciaio, coperte da tessuti plastici, oppure si ricoprono direttamente i prodotti con nylon o altri prodotti, i quali però sono degradati dall'azione del sole e del vento nelle giacenze prolungate.

○ **Lavorazioni eseguite:**

Nello stabilimento visitato, le lavorazioni eseguite riguardano principalmente legname da costruzioni di conifera, con operazioni di carpenteria, di falegnameria e di finitura su travi e pannelli di CLT da tagliare. Secondariamente, in occasione del reperimento di particolari varietà arboree, vengono anche prodotti artigianalmente oggetti di arredo in legno. I macchinari utilizzati meno frequentemente sono quelli impiegati per particolari richieste di falegnameria, quali:

- Pialla a banco (collegamento elettrico)
- Cannello per bruciatura (nessun collegamento impiantistico, bombola di gas)
- Spazzole da rusticatura (collegamento elettrico)
- Tranciatore (collegamento elettrico)

Queste tecniche sono utilizzate per particolari richieste dei clienti, quindi risulta difficile stimarne una esatta periodicità, ma mediamente sono effettuate poche volte ogni 2-6 mesi, per un numero di ore o di giorni molto variabile a seconda dell'entità dell'ordine.

Per la gran parte dei prodotti, invece, non sono richieste queste attrezzature, ma l'iter produttivo segue una serie di macchinari impiegati quotidianamente senza necessità di particolari pause durante l'utilizzo:

- Pialla (collegamento elettrico, aria compressa azionata da compressore elettrico)
- Centro taglio (collegamento elettrico, richiede inoltre una fossa nella pavimentazione per la raccolta dei trucioli)
- Impregnatrice (collegamento elettrico)
- Truciolatrice per pezzi di scarto (collegamento elettrico, aria compressa)
- Testata del silos con pistone per tronchetti truciolari (collegamento elettrico)
- Sega a nastro per pezzi di dimensioni fuori standard (collegamento elettrico)

Nel complesso nessun macchinario impiegato richiede particolari fondazioni, ad eccezione di una fossa per il centro taglio, e il peso di questi è abbastanza ridotto da consentirne l'eventuale movimentazione tramite carroponti, gru o rotaie. La richiesta impiantistica delle stesse si limita al collegamento elettrico, in quanto l'eventuale componente idraulica dei macchinari è installata a bordo, e il sistema ad aria compressa per l'aspirazione dei trucioli, che li convoglia verso il silos, è azionato a sua volta elettricamente. Le tempistiche produttive di ogni macchinario sono molto rapide (ad esempio la pialla su quattro lati procede a 9m al minuto), ma l'intero processo è regolato dall'ultima operazione di impregnatura che richiede particolari accortezze, dall'impostazione delle lavorazioni da parte degli operatori, e dalle eventuali finiture svolte a mano.

1.4.6 Stabilimento industriale Aster s.r.l. (Santo Stefano, VR)

○ **Caratteristiche architettoniche:**

Le principali caratteristiche rilevabili del fabbricato sono l'altezza utile pari a 5m, l'interasse tra i pilastri pari a 8m, e l'utilizzo in copertura di tegoli a Y in acciaio. Tali travi da ponte di sezione sottile consentono di coprire l'unica campata dello stabilimento di luce 22m, poggiandosi esclusivamente sulle travi di bordo a T di sezione alta 0.8m che si incastrano nella forcella di testa ai pilastri in cemento armato. Gli elementi di copertura sporgono su un lato per un aggetto di 3m, e risultano alti 1.0m e con ali sporgenti per un totale di 0.8m di larghezza; presentano una finitura simile all'acciaio corten e sono disposti ad interasse di 2.6m. Il loro distanziamento è coperto verso l'esterno, senza l'apertura di lucernari per l'illuminazione zenitale, da voltine in lamiera ondulata con la medesima finitura delle travi ad Y. Le chiusure perimetrali sono realizzate da pannelli prefabbricati verticali intonacati di bianco, che lasciano spazio in alto, ad ampie aperture a nastro lungo i due lati dove si susseguono i pilastri (figura 1.4.6.1).

L'utilizzo di travi da ponte in metallo invece di tegoli in calcestruzzo armato, comporta la realizzazione di una luce superiore alle misure previste durante l'analisi dimensionale del paragrafo 1.3.2, mentre l'interasse tra i pilastri e l'altezza utile dello stabilimento rientrano nella fascia dimensionale prevista.



Figura 1.4.6.1: Vista esterna dello stabilimento, in evidenza l'aggetto di copertura con travi ad Y metalliche.

○ **Periodicità di produzione e stoccaggio:**

La produzione per il tessuto non tessuto e il taglio di altri materiali plastici procede senza variazioni in ogni periodo dell'anno, senza distinzioni stagionali o periodi più intensi di qualsivoglia durata. Leggere variazioni possono verificarsi soltanto in base ai contratti di fornitura, ma in genere la produzione risulta continua.

L'azienda non mantiene scorte di magazzino ad eccezione di alcuni rotoli non ancora lavorati per far fronte ad imprevisti con l'arrivo della materia prima.

- **Caratteristiche ambientali dello stabilimento:**

I reparti di lavorazione, così come lo stoccaggio del materiale, non richiedono alcuna particolare condizione ambientale da monitorare.

- **Lavorazioni eseguite:**

L'azienda di piccole dimensioni esegue poche tipologie di lavorazioni, pertanto senza una produzione differenziata, i macchinari sono tutti impiegati continuativamente. Risultano quindi assenti eventuali lavorazioni eseguite meno frequentemente di altre. All'interno dello stabilimento si trova soltanto una serie di macchine per il taglio e la ribobina del tessuto non tessuto e di altri film plastici (che eventualmente consentono anche la stampa sublimatica del polipropilene), attivi continuativamente per 8 ore al giorno, con pause per il tempo necessario a caricare o scaricare le bobine. Tali dispositivi sono azionati elettricamente e sfruttano l'aria compressa, ottenuta sempre con compressori elettrici, inoltre nessuno di questi richiede particolari fondazioni anche se sono fissati a terra. Date le loro dimensioni e peso potrebbero, però, essere movimentati anche tramite carrello elevatore.

1.4.7 Stabilimento industriale PLASTIME s.r.l. (Castegnero, VI)

- **Caratteristiche architettoniche:**

Il fabbricato rettangolare anche nel complesso, si divide in tre distinte porzioni adiacenti: sul fronte principale si trovano gli uffici, seguiti dai reparti produttivi in una struttura prefabbricata di altezza utile pari a 10m, e infine il magazzino, realizzato in deroga alle direttive comunali per raggiungere un'altezza di 12.5m (figura 1.4.7.1). I pilastri prefabbricati in calcestruzzo armato delle medesime altezze, sono posti in maglie quasi quadrate di 11 per 10 metri, a sostegno di travi principali ad I lungo la direzione trasversale allo sviluppo dello stabilimento.

In sommità alle travi, nella porzione di fabbricato destinata alla produzione, sono appoggiati tegoli per una copertura a shed di larghezza 6.5m, completati da infissi a nastro simili a quelli perimetrali, e sopra ai quali sono installati numerosi pannelli fotovoltaici (figura 1.4.7.2). La copertura del magazzino, invece, fa uso di tegoli più piccoli per realizzare microshed e realizzare trasversalmente dei lucernari sopra i quali viene interrotta la sempre presente distribuzione di pannelli fotovoltaici.

Le chiusure perimetrali sono composte da pannelli prefabbricati in calcestruzzo orizzontali, larghi quanto le campate e alti 2.1m. Le finestrate a nastro perimetrali, di altezza 1.6m, sono disposte a diverse altezze sui vari lati dell'edificio: a sud sono più basse, incastrandosi tra il secondo ed il terzo pannello in verticale; a nord si spostano di un pannello più in alto; e infine sulla facciata ovest del magazzino sono poste sopra una pensilina esterna (figura 1.4.7.3).

Nel complesso, considerando che il fabbricato è più recente rispetto agli elementi analizzati dai cataloghi, si riscontrano delle misure leggermente diverse da quelle attese: l'altezza utile è superiore sia per l'impianto produttivo che per il magazzino, le campate maggiori risultano invece di inferiore estensione a causa della tendenza allo schema quadrato, mentre quelle inferiori rientrano nei valori previsti.



Figura 1.4.7.1: Vista esterna dello stabilimento, si distinguono in altezza uffici, produzione e magazzino.



Figura 1.4.7.2: A sinistra, copertura a shed della parte produttiva, sul fondo una pressa ad iniezione.

Figura 1.4.7.3: A destra, esterno del magazzino e delle pensiline di copertura della zona di carico e scarico.

○ **Periodicità di produzione e stoccaggio:**

La produzione per alcuni degli articoli realizzati rimane costante tutto l'anno, ma alcune serie di prodotti come quelli estivi, gli ombrelloni, annaffiatori, vasi da fiore e altri, subiscono variazioni stagionali, con una richiesta maggiore in primavera o in estate in base al loro utilizzo.

Nello stoccaggio, similmente, per questi prodotti vengono stivate delle scorte esclusivamente durante la stagione in cui sono richiesti, terminata la quale le corrispondenti celle di magazzino vengono riempite con gli articoli adatti alla successiva stagione. Pertanto si cerca di ottimizzare in questo modo l'uso degli spazi.

- **Caratteristiche ambientali dello stabilimento:**

I reparti di lavorazione, così come lo stoccaggio del materiale, non richiedono alcuna particolare condizione ambientale da monitorare.

- **Lavorazioni eseguite:**

L'azienda si occupa della produzione di diversi articoli plastici, tramite l'utilizzo principalmente di due sole tipologie di macchine. Ma, tra le lavorazioni, effettuate continuativamente 24 ore al giorno, quelle che impiegano le soffiatrici sono considerabili come meno frequenti. Questo in quanto solitamente i macchinari vengono accesi ad inizio settimana, il lunedì, e poi utilizzati senza pause fino al venerdì, ma esistono periodi in cui le soffiatrici sono lasciate spente per tre settimane o anche un mese in base alla produzione stagionale.

A differenza di queste, le presse ad iniezione sono attive costantemente tutto l'anno, e si tratta comunque di macchinari piuttosto pesanti, che vengono montati anche per pezzi con l'uso di carroponti da 20 tonnellate, risultando pertanto inamovibili. Tra queste presse si trovano modelli diversi, alcuni anche abbastanza datati, che possono richiedere il solo collegamento elettrico, idraulico, oppure entrambi nei modelli oleodinamici.

1.4.8 Calzaturificio Lazzari, dismesso (Saonara, PD)

- **Caratteristiche architettoniche:**

Lo stabilimento si compone di una parte in muratura per gli uffici, annessi all'abitazione, e una parte prefabbricata con struttura in calcestruzzo armato sviluppata alle loro spalle (figura 1.4.8.1). Tale costruzione presenta una fascia rettangolare più bassa che conteneva spogliatoi, magazzini di materie prime, refettorio e servizi; e due campate più alte di larghezza 11.2m ciascuna, coperte da volte in calcestruzzo con guaina esterna, a raggio variabile che si aprono in shed (figura 1.4.8.2). Queste volte nel punto più alto raggiungono una altezza di 7.8m, e 6.0m in mezzeria dove la curvatura è minore. La loro base di imposta scende fino a 5.15m di altezza da terra, dove si congiungono a delle travi rettangolari di calcestruzzo armato con tiranti all'inizio, al termine ed al centro di ogni pannello voltato di copertura. Le travi rettangolari poggiano a filo su pilastri 35x30cm e l'altezza libero al loro intradosso è pari a 4.6m. I pilastri che dividono le campate sono disposti con un interasse di 5.3m, per una lunghezza complessiva interna di 39.6m (figura 1.4.8.3).

Al rettangolo composto dalle due campate si aggiunge sul fondo una struttura in muratura su due piani, sporgente di 5.4m, in cui era contenuto il reparto per il taglio delle soles, direttamente comunicante e allineato ad una campata.

Le aperture finestrate a nastro lungo i lati lunghi delle campate, assieme agli ampi shed di copertura, forniscono ancora un'ottima illuminazione naturale, nonostante la polvere e la vegetazione le abbiano in parte ostruite.

Nel complesso le misure delle campate, dell'interasse dai pilastri e dell'altezza utile risultano tutte di poco inferiori ai valori attesi dall'analisi dei prodotti disponibili negli anni di costruzione del fabbricato.



Figura 1.4.8.1: A sinistra, vista esterna dello stabilimento sul lato degli spogliatoi.

Figura 1.4.8.2: Al centro, vista interna su una campata con shed curvi di copertura.

Figura 1.4.8.3: A destra, dettaglio del nodo trave-pilastro, dove convergono i tiranti della copertura.

○ **Periodicità di produzione e stoccaggio:**

Nel periodo in cui la produzione era attiva si riscontravano stagionalità per la produzione di modelli di scarpa invernali ed estivi. Questi prodotti venivano realizzati in anticipo sulla stagione e temporaneamente immagazzinati, ma la filosofia più artigianale portava a lavorare a picchi intensi e con mesi sporadici o consecutivi in cui la produzione rimaneva più ferma. Con il tempo, però, tutti i calzaturifici hanno smesso di tagliare nello stesso stabilimento i pezzi di modelliera per la cucitura delle tomaie, e così anche le soles, fino a delegare ad aziende esterne anche la cucitura e l'orlatura e specializzandosi in certe lavorazioni per modelli da donna o da uomo. Infine, verso la fine del secolo, tali attività vengono dislocate prima in est Europa, poi in Cina dove la manodopera è reperibile a costi inferiori. Questo processo assieme ai nuovi materiali e alla moda, ha portato oggi ad una produzione che non segue più un ritmo stagionale siccome i modelli, basati quasi tutti su soles di gomma molto simili, non hanno più la distinzione invernale-estiva; e i processi produttivi frammentati e specializzati tendono a continuare senza soste o picchi produttivi.

- **Caratteristiche ambientali dello stabilimento:**

Durante l'attività non erano necessari particolari accorgimenti per umidità o temperatura, quella necessaria al comfort dei lavoratori era generata dalla centrale termica e sfruttava delle puntuali ventole a soffitto per muovere verso il basso l'aria calda, date le dimensioni dell'ambiente.

- **Lavorazioni eseguite:**

La produzione delle calzature iniziava dal taglio del cartamodello nel reparto modelleria, oppure dalla predisposizione di una dima per tagliare la pelle di calzature più richieste, invece di adoperare un bisturi. Una volta tagliata e rifinita la base della tomaia, questa veniva passata al reparto di cucitura dove le orlatrici affinavano i bordi per cucirli o eseguivano altre specifiche lavorazioni. Successivamente il prodotto passava nell'altra campata dello stabilimento dove, seguendo una serie di banchi e macchine disposte ad U, venivano sottoposte ad una moltitudine di altre lavorazioni, si tagliava la suola nel locale annesso per mezzo della pressa idraulica, e questa poi veniva cucita alla tomaia. Alla fine della catena avveniva la lucidatura e l'inscatolamento dopo una serie di più di 100 diverse lavorazioni.

Di conseguenza il prodotto finito veniva portato in magazzino, pronto per le consegne, mentre la camera blindata presente in un angolo dello stabilimento era utilizzata per le pelli pregiate di conceria. Oggi tutte queste operazioni nei calzaturifici sono discretizzate in diversi stabilimenti, e spesso i prodotti, che ormai non fanno quasi più uso di pelle non sintetica, sono sottoposti a molte meno lavorazioni ed accortezze. Tutti i macchinari che erano presenti ai tempi dell'attività non necessitavano di fondazioni speciali o impianti particolari oltre all'elettricità, nonostante alcuni potessero risultare anche abbastanza pesanti (come la pressa per il taglio delle soles). Inoltre tutto il ciclo produttivo era collegato ed essenziale alla realizzazione del prodotto, anche se non fisicamente come altre produzioni in serie, pertanto non erano presenti nemmeno allora delle lavorazioni meno frequenti di altre.

1.4.9 Fabbricato industriale Tommasin Gomme (Padova, PD)

○ **Caratteristiche architettoniche:**

Il fabbricato, costruito tra nei primi anni Sessanta, si estende su due campate di larghezza 12m, profonde 34.8m. Gli elementi verticali portanti sono pilastri in calcestruzzo armato prefabbricati con terminazione a testa piatta e doppia mensola sporgente dalla sezione quadrata di lato 30cm. Questi sono posti ad un interasse di 4.6m a sorreggere una trave principale piana rettangolare, solidale alle volte a raggio variabile di copertura, a loro volta realizzate in calcestruzzo prefabbricate. L'altezza utile fino all'intradosso della trave misura 4.4m, mentre l'imposta degli archi sopra la trave arriva a 5.1m. In mezzeria le volte variano tra un'altezza di 6.2m e 7.2m, lasciando in tale intervallo delle aperture a shed (figura 1.4.9.1).

Una delle due campate presenta delle pareti ribassate che creano uno spazio di 8 x 28m addossato alla parete perimetrale. Oltre quest'ultima viene aggiunta una copertura esterna con struttura leggera in acciaio ad archi reticolari, che prosegue in un'unica volta ribassata lungo tutta la lunghezza del fabbricato. La tettoia si appoggia su mensole puntuali metalliche fissate all'edificio, e su pilastrini esili in acciaio sul lato esterno, disposti rasenti al capannone adiacente (figura 1.4.9.2).

Nel complesso le misure delle campate, dell'interasse dai pilastri e dell'altezza utile risultano tutte di poco inferiori rispetto l'analisi dimensionale dei prodotti.



Figura 1.4.9.1: A sinistra, foto interna sull'infilata di pilastri tra le due campate e sulla copertura a shed curvi.

Figura 1.4.9.2: A destra, vista esterna del fabbricato e della pensilina esterna in acciaio.

○ **Periodicità di produzione e stoccaggio:**

Si verificano dei picchi stagionali nel corso dell'anno a causa del cambio tra pneumatici estivi e invernali, questo si riflette nello stoccaggio dei pneumatici dei clienti che occupano gran parte del fabbricato.

○ **Caratteristiche ambientali dello stabilimento:**

L'unica necessità è quella di mantenere coperti da sole e pioggia i pneumatici stivati all'interno e avere una copertura per le pedane dove questi vengono montati.

○ **Lavorazioni eseguite:**

Oltre i ponti sollevatori situati sotto la copertura metallica esterna, si dispone di diversi macchinari all'interno che vengono comunque utilizzati tutti frequentemente:

- Smotagomme
- Divaricatore
- Equilibratrici
- Compressori

Tutte queste apparecchiature risultano piuttosto leggere e trasportabili tramite carrello elevatore o manualmente, inoltre necessitano soltanto di un collegamento all'impianto elettrico per il funzionamento.

1.4.10 Stabilimento industriale KSE (Alonte, VI)

○ **Caratteristiche architettoniche:**

Lo stabilimento, costruito negli anni 90, si compone di due campate ampie 23m, affiancate agli estremi di altre tre campate con luce ridotta a 17m. L'interasse tra i pilastri si attesta a 9m, ma ha delle leggere variazioni nel passo finale per ottenere un lato seghettato verso sud ovest.

L'altezza interna utile all'intradosso delle travi è pari a 6.4m, mentre la luce libera lungo le campate, all'intradosso dei tegoli di copertura, è di 7.0m. I tegoli sono disposti distanziati con interasse di 2.75m, e completati da coppelle curve senza alcun lucernario. L'illuminazione naturale è migliorata dalla presenza di due cavedi scoperti all'interno del perimetro del fabbricato, oltre che dalle finestrate disposte sopra i pannelli di chiusura orizzontali perimetrali, lungo tutti i lati (figura 1.4.10.1).



Figura 1.4.10.1: Vista esterna dello stabilimento KSE, in facciata pannelli di chiusura orizzontali e aperture.

Di conseguenza tutte le misure di altezza utile, interasse tra pilastri e campata, combaciano alle previsioni, ad eccezione delle due campate laterali più estese che superano di poco la soglia stabilita.

○ **Periodicità della produzione:**

Non si verificano particolari stagionalità annue, ma nella produzione di macchine utensili per la piega di lamiera e tubi si evidenziano picchi incostanti dovuti alle richieste. Risulta però impossibile prevedere tali fluttuazioni che possono comportare settimane o mesi più o meno intensi irregolarmente.

Per il magazzino si può individuare una parte di componenti e pezzi più largamente utilizzati che rimane abbastanza costante, mentre la parte più specialistica subisce incrementi volumetrici a fronte della richiesta di certi macchinari o riparazioni.

○ **Caratteristiche ambientali dello stabilimento:**

L'unica caratteristica ambientale controllata nei reparti produttivi vede la necessità di condizionamento per gli ambienti di assemblaggio delle schede elettroniche e del controllo numerico, al fine di non superare determinate temperature.

Nel resto dello stabilimento non sono necessarie particolari accortezze, fatta eccezione della cella ad umidità e temperatura controllata, utilizzata per il collaudo dei macchinari prodotti.

○ **Lavorazioni eseguite:**

L'azienda produce macchinari utensili per la piega di lamiera e tubi, utilizzati generalmente da ditte che producono radiatori o impianti di condizionamento. In questo ambito ogni macchinario o lavorazione opera allo stesso ritmo, poiché il processo produttivo, razionalizzato e programmato per la massima efficienza, necessita di tutte le operazioni per raggiungere il prodotto finito. L'assenza di una lavorazione comprometterebbe l'intero ciclo, anche se fisicamente le macchine non sono collegate in serie come può avvenire in altre aziende. Di conseguenza, non sono presenti macchinari utilizzati meno frequentemente di altri nel seguente ciclo produttivo:

Taglio laser (non eseguito in azienda, ma delegato a ditte esterne)

Carpenteria (collegamento elettrico)

Montaggio (collegamento elettrico)

Verniciatura (collegamento elettrico ed idraulico per l'abbattimento delle polveri)

Realizzazione dei quadri elettrici (collegamento elettrico)

Cablaggio e parti elettriche a lato macchine (collegamento elettrico)

Programmazione e controllo numerico (collegamento elettrico)

Fatta eccezione della verniciatura, nessun macchinario necessita di un collegamento all'impianto idraulico e le loro eventuali componenti idrauliche sono installate in modo autonomo a bordo.

Per le operazioni di carpenteria vengono usate frese a controllo numerico, dette centri di lavoro, che devono essere montate su fondazione speciale con attenzione alla loro perfetta orizzontalità. Tali attrezzature sono pesanti e delicate, pertanto una volta montate risultano inamovibili. Mentre gli altri reparti dispongono di apparecchiature in generale meno pesanti, che possono essere movimentate

1.4.11 Stabilimento industriale Kerakoll (Zimella, VR)

○ Caratteristiche architettoniche:

Lo stabilimento che sviluppato su 13'000 metri quadri, viene costruito nel 1974 e successivamente ampliato, con altezze interne diverse per le varie parti che lo compongono (figura 1.4.11.1). I reparti di lavorazione dei prodotti e alcuni magazzini si attestano su altezze libere di 7.5m, mentre il magazzino intensivo ha altezza libera di stoccaggio di 14.5m. La campata libera dello stabilimento corrisponde alle due che coprono il magazzino principale di luce 20m. Nei reparti produttivi le distanze tra pilastri si attestano a 15m, mentre per l'annesso esterno realizzato da poco si arriva anche ad una campata di 25m. In direzione trasversale, invece, l'interasse tra i pilastri misura 12m nell'ottica di ridurre al minimo il numero per un'agevole organizzazione del magazzino.

La copertura si compone di travi principali rettangolari in calcestruzzo armato che sostengono dei tegoli alari distanziati ad interassi di 6m, e completati da pannelli curvi, leggeri, in lamiera coibentata, o da lucernari che continuano la curvatura delle ali esterne dei tegoli formando delle volte (figura 1.4.11.2).



Figura 1.4.11.1: A sinistra, vista esterna del magazzino e del magazzino intensivo rialzato.

Figura 1.4.11.2: A destra, vista interna del magazzino con travi rettangolari dove sono fissate le vie di corsa dei carroponti e dove poggiano i tegoli alari di copertura.

I pannelli di chiusura perimetrali in calcestruzzo sono disposti verticalmente e con aperture poste sopra i 4,5m dei portoni di accesso.

Ne risultano principali misure strutturali di altezza, campate ed interasse, vicine alle previsioni per alcune parti dell'edificio, mentre per gli ampliamenti più moderni, le distanze e le altezze tendono ad essere superiori a quanto preventivato dall'analisi.

○ **Periodicità di produzione e stoccaggio:**

Si registra una stagionalità nella produzione e nelle vendite con un picco nel periodo estivo, quando i prodotti da costruzioni sono più richiesti perché il settore è più movimentato.

○ **Caratteristiche ambientali dello stabilimento:**

Non sono necessarie particolari condizioni climatiche all'interno dello stabilimento per la produzione, né per lo stoccaggio delle merci.

○ **Lavorazioni eseguite:**

All'interno dello stabilimento, per la realizzazione di diversi prodotti legati impiegati per la costruzione, il rinforzo sismico o la finitura di manufatti edili, viene genericamente eseguito, a seguito dello scarico stoccaggio delle materie prime, il seguente ciclo produttivo:

Dosaggio e miscelazione delle materie prime

Confezionamento dei prodotti finiti

Pallettizzazione e stoccaggio dei prodotti finiti

Per eseguire tali passaggi, sono impiegate numerose macchine, alcune utilizzate specificatamente per determinati prodotti, che vengono di conseguenza usate meno frequentemente di altre, in base alle richieste dei clienti e del mercato. A causa di questi fattori esterni, risulta però impossibile determinare con precisione un intervallo di utilizzo localizzato nel tempo, né stimare al contrario quanto frequentemente tali attrezzature rimangano inutilizzate.

Tutti gli altri impianti e lavorazioni sono attivi con continuità, intervallati al più da piccole pause, e si compongono di gruppi di macchinari pesanti e teoricamente inamovibili, in quanto molto ingombranti e composti da più macchine in serie. Lo smontaggio e la rimozione di questi rimangono possibili in caso di guasti o sostituzioni, ma non sono operazioni agevoli. Inoltre, alcune macchine necessitano di predisposizioni sotterranee legate alla loro funzionalità, rendendole driver nella progettazione delle linee produttive.

Le uniche operazioni discretizzate nel corso della giornata sono lo scarico e lo stoccaggio delle materie prime, in quanto legato all'arrivo in stabilimento dei camion.

1.4.12 Stabilimento industriale Ovodry (Alonte, VI)

○ **Caratteristiche architettoniche:**

Lo stabilimento si compone di un nucleo costruito nel 1984, e un ampliamento del 2004 (figura 1.4.12.1). L'altezza utile interna rimane costante a 6m per entrambe le parti, mentre le campate si differenziano tra 15 e 20m. L'interasse tra i pilastri di sezione quadrata all'interno misura 9m, e tali elementi portanti sorreggono in appoggio sulla testa piatta, delle travi ad L a cui si fissano verso l'esterno i pannelli di chiusura prefabbricati verticali. Alcuni di questi pannelli presentano forometrie quadrate intestate sotto alla trave principale, la quale è posta perimetralmente alla singola campata ad un'altezza di 4.15m da terra.

Di conseguenza l'altezza utile precedentemente citata di 6m fa riferimento all'intradosso dei tegoli di copertura con sezione ad Ω , posizionati con passo di 5m sopra le travi ad L, e completati da pannelli di chiusura curvi per aperture a shed (figure 1.4.12.2 e 1.4.12.3).

Le principali caratteristiche geometriche del fabbricato risultano, pertanto, coerenti alle previsioni, anche se la campata coperta dai tegoli descritti misura leggermente sopra i valori previsti.



Figura 1.4.12.1: A sinistra, vista aerea dello stabilimento con ampliamento rettangolare a shed.

Figura 1.4.12.2: Al centro, reparto di stoccaggio e pallettizzazione, sul fondo visibile il sistema strutturale.

Figura 1.4.12.3: A destra, reparto per la sterilizzazione in camera calda, all'interno della campata con shed.

○ **Periodicità di produzione e stoccaggio:**

Nella produzione o nello stoccaggio del prodotto finito non si riscontrano fluttuazioni e il processo procede a ritmo costante. Soltanto nell'arrivo della materia prima, ossia l'albume di uovo liquido, si potrebbero trovare fluttuazioni nell'arco della giornata o dell'anno, ma tale alimento è conservato in silos che permettono di dilazionarne la lavorazione durante la giornata.

○ **Caratteristiche ambientali dello stabilimento:**

Durante il ciclo produttivo si realizza una fase di sterilizzazione in camera calda, un ambiente di circa 400 metri quadri, in cui la temperatura viene mantenuta costante a 70-72°C. Un ulteriore controllo ambientale, anche se di entità meno stringente, si esegue nel magazzino dove l'umidità viene ridotta sotto il 60% quando necessario per evitare che comprometta il cartone delle confezioni.

Per i restanti reparti non si riscontrano altre particolari necessità di questo tipo.

○ **Lavorazioni eseguite:**

L'azienda produce esclusivamente albumina d'uovo in polvere, pertanto le lavorazioni effettuate appartengono tutte al medesimo ciclo produttivo. Risultano di conseguenza assenti macchine o lavorazioni sfruttate meno frequentemente di altre.

In sintesi il processo produttivo si compone di:

- Stoccaggio della materia prima in serbatoi
- Essiccazione tramite nebulizzazione a caldo
- Trattamento termico per sterilizzazione
- Stoccaggio e analisi

Per ognuna di queste operazioni si utilizzano macchine che richiedono di essere collegate all'impianto elettrico, inoltre. Oltre ai serbatoi di stoccaggio liquido, che vengono periodicamente risciacquati, alcuni macchinari comprendono compressori raffreddati idraulicamente, necessitando quindi dell'allacciamento a tale impianto.

La movimentazione delle attrezzature impiegate in queste lavorazioni sarebbe teoricamente possibile, dato il loro peso contenuto, ma notevolmente ostacolata dalle loro dimensioni, trattandosi di macchine voluminose.

1.4.13 Stabilimento industriale Grejo (Lonigo, VI)

○ **Caratteristiche architettoniche:**

Lo stabilimento rettangolare di lati 39 e 20m è suddiviso con un'altra azienda per metà, e risale agli anni tra il 1980 e 1985. La struttura simmetricamente divisa da un setto centrale, si compone di due file di pilastri quadrati, alti 6.5m, con testa a forcella entro alla quale si incastrano travi a T. L'interasse tra questi pilastri è di 8m, mentre la campata che formano misura 18m.

L'altezza interna libera dell'unica campata si riferisce all'intradosso dei tegoli di copertura, arrivando a 7m. I tegoli ad Y sono disposti con interasse di 2.5m, ed il loro distanziamento è coperto da voltine in lamiera metallica senza lucernari. Le chiusure perimetrali sono realizzate con pannelli in cemento prefabbricati disposti orizzontalmente tra i pilastri per un'altezza di 2.1m ciascuno, e due file di finestre a nastro lungo i lati lunghi sopra il secondo pannello.

Pertanto le maglie strutturali e l'altezza utile del fabbricato rientrano perfettamente nelle previsioni effettuate durante l'analisi dei cataloghi per l'edilizia industriale.

○ **Periodicità di produzione e stoccaggio:**

Nella produzione di alimentari essiccati di cui si occupa l'azienda, come farine o altri preparati in polvere, si può riscontrare una diversificazione tra prodotti estivi ed invernali. Questo però non influisce in maniera sufficientemente marcata da causare picchi nella produzione o nello stoccaggio dei prodotti, in quanto alcuni prodotti sono realizzati tutto l'anno, e la produzione può passare da un tipo ad un altro mantenendosi costante.

○ **Caratteristiche ambientali dello stabilimento:**

Trattandosi di prodotti essiccati non sono necessarie particolari accortezze tra la produzione o il magazzino, il quale può tranquillamente arrivare a temperature basse d'inverno e calde d'estate. Soltanto per alcuni prodotti specifici, come i bancali con impasti che contengono zuccheri, è necessaria la premura di stivarli all'interno senza esporli a pioggia o sole battente.

○ **Lavorazioni eseguite:**

La produzione di una discreta gamma di prodotti alimentari essiccati dell'azienda avviene principalmente tramite il miscelamento che vede un continuo utilizzo degli appositi macchinari. Ma il ciclo produttivo si completa, in sintesi, in due fasi: miscelamento e confezione. Tutte le macchine impiegate per queste operazioni sono connesse all'impianto elettrico ed eventualmente a compressori elettrici per le componenti pneumatiche, e risultano tutte molto leggere: alcune montate su ruote, altre posate a terra, ma comunque movimentabili tramite muletto o transpallet per l'assemblaggio delle linee produttive.

L'utilizzo di macchine leggere è dovuto alla necessità di riorganizzare le linee produttive in base al prodotto richiesto. È infatti possibile assemblare alcune attrezzature, seppur non in serie con un collegamento fisico fisso, tramite giustapposizione e regolando in altezza le loro componenti, o incastrando e aggiungendo appositi dispositivi come tramogge o altro per adattarle alla produzione. Tali riconfigurazioni avvengono spesso per mantenere attivo il laboratorio di analisi e ricerca che occupa circa un terzo del fabbricato, oppure per adattare la produzione alle richieste stagionali. Infatti, mentre le miscelatrici vengono sempre utilizzate, gli apparecchi di confezionamento per alcuni specifici prodotti vengono usati più di rado e spesso stagionalmente.

1.4.14 Stabilimento per la produzione di mangimi (Cologna Veneta, VI)

○ **Caratteristiche architettoniche:**

La struttura si compone di una parte storica, costruita attorno agli anni Settanta, con struttura portante in acciaio per permettere lo sviluppo verticale di torri alte fino a 28m, che contengono i silos delle materie prime e diversi macchinari per lavorazioni a cascata (figure 1.4.13.1 e 1.4.13.2). Successivamente, nel 2015, si aggiunge a questa struttura una nuova torre per silos e altri reparti produttivi, sempre in acciaio controventato da diagonali imbullonate (figura 1.4.13.3), e due parti in cemento di un solo piano: una tettoia esterna all'ingresso dello stabilimento, e un ampliamento del magazzino (figura 1.4.13.4). Le maglie strutturali della parte in acciaio variano tra 20 e 11m di campata per 5m di interasse, mentre la campata tra i pilastri del magazzino misura 24m, e i pilastri a sezione rettangolare 40x50cm, sono disposti ad interassi di 10m. Anche le coperture si differenziano per la parte storica e gli ampliamenti, le prime a doppia falda con puntoni metallici e pannelli in lamiera grecata; e la seconda con tegoli in calcestruzzo armato di sezione ad Y, distanziati ad interassi di 2.5m, e completati da pannelli nervati piani all'intradosso e curvi all'estradosso (figura 1.4.13.5). Le chiusure perimetrali sono realizzate con pannelli di cemento orizzontali appoggiati esternamente ai pilastri, che consentono l'apertura di finestre a nastro continue anche in corrispondenza dei sostegni strutturali.

Lo schema strutturale del magazzino e della tettoia fa uso della terminazione a forcella dei pilastri per incastrare delle travi principali a T con ali corte, sopra le quali appoggiano direttamente i tegoli, per una altezza interna utile di 6m, contro quella variabile da 5 a 6m in colmo della parte storica con coperture a pendenzate.

Nel complesso le misure strutturali della parte in metallo esulano dall'analisi effettuata per materiale e numero di piani considerati, mentre quelle delle aggiunte in calcestruzzo prefabbricate corrispondono alle valutazioni nonostante siano recenti, fatta eccezione per la lunghezza libera della campata che supera i valori attesi.



Figura 1.4.14.1: A sinistra, vista esterna dello stabilimento, sul fronte strada l'ampliamento del magazzino.

Figura 1.4.14.2: A destra, vista interna delle strutture portanti metalliche segmentate tra i macchinari.



Figura 1.4.14.3: A sinistra, vista della cima della nuova torre, a pavimento gli imbocchi sommitali dei silos.

Figura 1.4.14.4: Al centro, parte degli anni Settanta del magazzino, con struttura metallica a due falde.

Figura 1.4.14.5: A destra, giustapposizione tra struttura metallica e in cemento del nuovo magazzino.

- **Periodicità di produzione e stoccaggio:**

Nella produzione di mangimi per pesce si seguono molto stagionalità dovute ad un incremento dei consumi di mangime nei mesi caldi tra Maggio e Ottobre, quando i pesci sono più attivi. Mentre nei mesi freddi la produzione che a regime arriva a 50 quintali l'ora, cala anche del 60%. Nonostante il picco stagionale, però, le macchine rimangono sempre attive anche d'inverno per perché la richiesta non arriva mai ad azzerarsi.

Il magazzino dello stabilimento è di dimensioni limitate e si sta progettando di recuperare un fabbricato adiacente per estenderlo, ma risulta comunque già sufficiente perché utilizzato esclusivamente per le rimanenze di produzione, essendo il mangime un articolo venduto a fresco senza l'accumulo di scorte.

Lo stoccaggio delle materie prime, invece, avviene all'interno dei silos divisi per farine animali, vegetali e per oli, dopo uno scarico alla rinfusa direttamente dai camion alle fosse con nastro trasportatore che sollevano il carico fino alla sommità dello stabilimento. L'unica eccezione è per gli additivi che arrivano in sacchi e sono aggiunti manualmente in piccola quantità durante le lavorazioni.

- **Caratteristiche ambientali dello stabilimento:**

Trattandosi di prodotti secchi, non ci sono necessità particolari di controllo climatico per la produzione né per il magazzino, la deumidificazione e la cottura avvengono all'interno dei macchinari. Alcuni di questi possono risultare rumorosi, ma essendo controllati in remoto tramite il software gestionale, non richiedono neanche la predisposizione di barriere fonoassorbenti per l'abbattimento sonoro.

○ **Lavorazioni eseguite:**

Il ciclo produttivo si estende principalmente in verticale, in due linee separate per non contaminare i mangimi che non devono contenere farine di animali da terra richieste da alcuni clienti. Questa disposizione permette di sfruttare la gravità per il passaggio del prodotto da una macchina alla successiva, che risultano pertanto collegate in serie in un intricato schema che occupa numerosi piani; per questo eventuali ampliamenti tendono a svilupparsi in altezza.

In generale le lavorazioni effettuate non richiedono l'impiego di macchinari particolarmente pesanti o delicati, al punto da richiedere fondazioni speciali, ma ogni macchina risulta fissa e inamovibile per le sue dimensioni piuttosto ingombranti e perché è fissata alla struttura portante in acciaio in una precisa serie di operazioni collegate.

Di conseguenza è possibile definire un preciso schema di flusso, inserito nel programma gestionale per permettere l'operatività automatica dell'impianto anche con due soli operatori, che comprende l'intero processo produttivo:

- Pesa e scarico della materia prima nelle fosse con nastro trasportatore
- Suddivisione nei silos per farine vegetali, animali o pompaggio ai silos per gli oli
- Dosaggio e miscelazione degli ingredienti
- Macinazione fino a diametri inferiori a 5 micron per consentire la digeribilità
- Rimiscelazione e passaggio al setaccio per eliminare impurità o pezzi grossolani
- Precondizionamento nell'impastatrice con olio, vapore e acqua
- Estrusione della pasta con vite senza fine a sezione variabile, dove la forza meccanica e il calore provocano la cottura a 180°C
- Trafilatura con diametri tra 1.5 e 8.5mm
- Essiccatura in forni per abbassare l'umidità dal 24% ad un massimo del 9%
- Pesa e suddivisione in lotti da 400kg a cui è aggiunto l'olio vegetale o di pesce
- Miscelazione e depressurizzazione fino al sottovuoto
- Ritorno in atmosfera per far penetrare l'olio nei pallet
- Raffreddamento e stoccaggio nei silos dei prodotti finiti
- Confezionamento

Tutte queste operazioni vengono svolte in ciclo continuo, pertanto non sono presenti macchinari usati meno frequentemente di altri, e tutti richiedono il collegamento elettrico. Soltanto alcuni passaggi hanno necessità di azionamento pneumatico o del collegamento al sistema idrico dell'acqua da pozzo, riscaldata tramite le caldaie.

La sala caldaie, così come dei compressori elettrici per l'impianto pneumatico, è posizionata all'esterno del fabbricato, dove un pozzo permette la raccolta dell'acqua della falda, limitando l'utilizzo dell'acquedotto ai servizi igienici soltanto.

1.4.15 Conclusioni dell'analisi su casi esistenti

Lo studio della casistica esistente rileva una buona accuratezza nel confronto tra l'analisi sui prodotti proposti nei cataloghi e quelli impiegati nei casi reali. Nonostante questo, è riscontrabile una leggera discrepanza per la dimensione attesa della campata maggiore, che in diverse istanze si rivela superiore di pochi metri rispetto i valori preventivati. Questo avviene esclusivamente nelle costruzioni più recenti, dagli anni Novanta in avanti, quando il miglioramento tecnologico rende più accessibili economicamente luci libere di 20-24m, che precedentemente non erano coperte o convenienti dai prodotti analizzati. Occorre quindi tenere in considerazione l'anno di costruzione del fabbricato su cui si va ad intervenire, oppure nel caso di nuove costruzioni, utilizzare delle campate di dimensione più adeguata alle moderne esigenze.

Lo studio rileva, inoltre, come le dimensioni strutturali possono differire rispetto le previsioni anche per la tipologia costruttiva che fa uso di uno schema a maglie quadrate, oltre a evidenziare la presenza di casi che vedono l'uso di diversi materiali affiancati per diverse parti dello stabilimento, come elementi di acciaio e di calcestruzzo.

Nel complesso si può affermare che l'analisi svolta sugli elementi prefabbricati presenti nei cataloghi abbia un riscontro sufficientemente accurato nel costruito, ma la variabilità dimensionale delle strutture industriali relazionata alle diverse tipologie costruttive per materiali, schemi progettuali e elementi di copertura, è difficilmente rappresentabile da un campione ristretto di casi come quello che è stato possibile reperire in tempi ragionevoli.

Le informazioni riguardanti le strutture analizzate sono da considerarsi indicative per la successiva scelta di un caso studio, e per quest'ultimo vengono integrate nel dettaglio al capitolo 4.



2 Architettura adattiva

2.1 Definizione e strategie adattive

Il termine “adattivo” applicato all’architettura, indica la capacità di trasformazione di un edificio nella sua forma, struttura, comportamento o caratteristiche per rispondere al cambiamento delle esigenze degli utenti e all’ambiente che lo circonda. In particolare, oggi vengono definite come “edifici adattivi” le strutture concepite, studiate e progettate fin dal principio per garantire una determinata capacità di adattamento.

Anche escludendo le costruzioni tradizionali, che pur non prevedendoli nel progetto, possono essere sottoposte ad interventi che ne modifichino l’assetto, come ampliamenti o riorganizzazioni interne, la definizione rimane ampia e comprende una notevole varietà di tecniche costruttive o progettuali: soluzioni modulari, pareti o parti mobili, involucri o sistemi di facciata intelligenti, media facades, architettura cinetica, riconfigurabile, divisibile, a pianta libera e altre ancora.

In generale, una demarcazione tipologica di queste strutture può seguire quella proposta da C.M.J.L. Leieveld⁴³, basata sul livello tecnologico degli edifici o delle loro componenti che si modificano in risposta agli stimoli esterni. La classificazione procede dai sistemi meno avanzati a quelli più autonomi e integrati:

- **Flexible:** flessibili, dove le azioni di adattamento sono controllate direttamente dall’uomo, senza alcuna automazione. Fanno uso di tecniche comuni come parti mobili con guide, cuscinetti e cerniere;
- **Active:** attivi, reagiscono all’attività dell’utente o dell’ambiente secondo il principio di azione-reazione più semplificato;
- **Dynamic:** dinamici, cambiamenti nell’ambiente o dall’utenza provocano specifici adattamenti consequenziali delle parti attive dell’edificio, si aggiunge al principio di azione-reazione la possibilità di introdurre più opzioni e settaggi per lo stesso componenti tramite una basilare computerizzazione;
- **Interactive:** interattivi, caratterizzati da una relazione bilaterale tra edificio e utenza che comporta l’avvio di azioni programmate al rilevamento digitale dell’utente;
- **Intelligent:** intelligenti, in grado di rilevare, elaborare dati e decidere se reagire o meno senza l’intervento dell’utente, per supportarlo in vari aspetti come sicurezza, risparmio energetico, informazione, comunicazione e comfort ambientale di ventilazione e riscaldamento;
- **Smart:** capaci di “imparare” e apportare modifiche di propria iniziativa, basandosi sui comportamenti degli utenti, su stimoli ambientali e in modo integrato tra loro, possono anticipare i bisogni degli occupanti e promuovere il loro comfort.

43. Leieveld C.M.J.L., *Adaptable Architecture, in Building stock activation (2007): pp. 245 - 252*

Da un punto di vista progettuale, invece, la realizzazione di un edificio adattivo può seguire diverse strategie, riassumibili in quattro linee di pensiero:

- **Utilizzo di singoli componenti adattivi:** attuabile per costruzioni ex novo o esistenti, consiste nell'impiego di uno o più componenti in grado di adattarsi alle necessità dell'utenza o alle condizioni ambientali, conferendo un carattere adattivo ad una parte dell'edificio. L'obiettivo della strategia è il miglioramento dell'efficienza degli spazi interni, energetica, funzionale ed eventualmente dell'estetica della struttura, ma l'utilizzo di singole componenti ne limita i risultati rispetto al funzionamento dell'intero edificio. Alcuni esempi molto diffusi d'uso di componenti adattivi sono gli involucri intelligenti C.A.B.S. (Climate Adaptive Building Shell), i quali possono ad esempio regolare il flusso d'aria, termico, luminoso e raccogliere energia solare tramite sistemi integrati in facciata (figura 2.1.1).



Figura 2.1.1: Involucro adattivo del SDU Campus Kolding, Henning Larsen Architects, Danimarca, 2014.

- **Riutilizzo adattivo:** tecnica di intervento su strutture esistenti, obsolete per le loro funzioni originali, con il fine di renderle nuovamente utilizzabili attraverso un nuovo programma funzionale (figura 2.1.2). Si tratta di un concetto applicato spesso anche a manufatti industriali come veicoli, container e serbatoi, oltre che all'architettura e ai singoli elementi prefabbricati che vengono impiegati per uno scopo diverso da quello originario. Il principale ostacolo a questa strategia è l'impossibilità di superare i limiti geometrici imposti dalla struttura esistente. Conseguentemente, nel tempo si è sviluppata soprattutto per edifici industriali, commerciali e agricoli a grazie alla loro modularità, semplicità geometrica, diffusa illuminazione naturale e disponibilità di grandi campate coperte. Caratteristiche che permettono un facile retrofit, anche tramite l'inserimento nella struttura di nuovi involucri o moduli completamente indipendenti (nested buildings) non dissimili dal concetto di strutture "open building systems" trattate nella successiva strategia.⁴⁴

44. Hunting Eric, *Adaptive Architecture, Collaborative Design, and the Evolution of Community*, 2008



Figura 2.1.2: Riutilizzo adattivo di una stazione dismessa Ataranzas Municipal Market Restoration Project, Aranguren & Gallegos Arquitectos, Spagna, 2010.

- **Architettura funzionalmente generica:** prevede la realizzazione ex novo di edifici polifunzionali ad alto livello di adattabilità, che anticipino e rispondano ai possibili bisogni futuri degli utenti. Per massimizzare l’adattabilità di tali sistemi, in vista di un riutilizzo perpetuo, si progettano strutture “skybreak”, appositamente pensate come sovrastruttura per riparare dagli agenti atmosferici altre costruzioni al loro interno, oppure si sviluppano strutture portanti discrete che formano “open building systems” contenendo elementi modulari di varie forme, leggeri e riconfigurabili in costi e tempi ridotti (figura 2.1.3). Queste tipologie di strutture sono applicate soltanto di rado nell’ambito residenziale, e maggiormente nell’edilizia commerciale o per uffici, dove i posti di lavoro possono essere riorganizzati a piacimento, incrementando l’efficienza della struttura. Il concetto di sovrastruttura con maglie strutturali determinate, su cui vengono predisposti agganci per gli elementi modulari interni, anche denominati come sistemi di interfaccia “in-fill”, possono essere trasposti alla scala macro-urbana nell’organizzazione di interi centri abitati. La possibilità di adeguamento della planimetria al maggior numero possibile di funzioni, consente di incrementare la vita utile del complesso e rende più economica ed efficiente, anche da un punto di vista ambientale, la rifunzionalizzazione nel tempo.^{45, 46}

45. Novara Andrea, *Strategie e tecniche per un’architettura evolutiva*, tesi di laurea magistrale, Torino, 2017-2018, Alessandro Mazzotta relatore.

46. Maryam G.A., *Toward a convergent model of flexibility in architecture*, in *Journal of Architecture and Urbanism*, 42 (2018): pp. 120 - 133

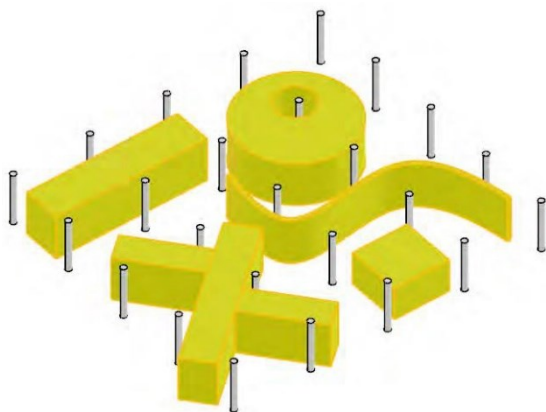


Figura 2.1.3: Esempio di struttura open building system, Next 21, Yositika Utida, Shu-Koh-Sha Architectural and Urban Design Studio, Osaka, Giappone, 1994.

- Sistemi costruttivi adattivi:** impiegano per la costruzione di complessi ex-novo dei componenti modulari facilmente trasportabili assemblabili e smontabili, rendendo adattivo l'intero sistema costruttivo, comprese le componenti strutturali. L'intera strategia progettuale si basa quindi su componenti modulari leggeri, solitamente prefabbricati, da assemblare in un edificio modificabile ad ogni scala, dal singolo modulo all'intero complesso. Si possono distinguere due categorie di sistemi costruttivi adattivi: sistemi di moduli unitari e sistemi di componenti modulari. I primi si basano su unità modulari relativamente di grandi dimensioni con una o più stanze a formare da sé strutture prefabbricate complete, componibili con altri moduli simili, anche all'interno di una sovrastruttura esterna (figura 2.1.4). I secondi presentano componenti di dimensioni ridotte, in genere combinazioni di telaio, pannelli e moduli di fissaggio predisposti per un assemblaggio rapido robotico o manuale tipico dell'architettura "plug-in". Il principale limite di questa strategia è la scala di costruzione, in quanto la dimensione dell'edificio influenza quella dei suoi componenti. Questo riduce l'adattabilità a complessi di dimensioni eccessive o può portare a problemi nel montaggio dei moduli o dei componenti.



Figura 2.1.4: Sistema costruttivo adattivo dell'Habitat 67, Moshe Safdie, Montreal, Canada, 1967.

In generale, le tecniche costruttive adattive risultano più efficienti e immediate nel rispondere alle esigenze dell'utenza e alle loro variazioni nel tempo. Rispetto ai sistemi tradizionali, permettono un rapido ed economico adeguamento della struttura alle condizioni di utilizzo richieste a breve termine, come il cambiamento di parametri termo-igrometrici, o a lungo termine, come la riorganizzazione di spazi interni e volumetrie.

Tramite l'architettura adattiva, a fronte di un costo iniziale più elevato, si ottiene un miglioramento nelle condizioni di utilizzo da parte dell'utenza e della sua interazione con l'ambiente costruito, un risparmio sul fronte delle risorse energetiche, in quanto la maggioranza dei sistemi adattivi sono progettati per favorire lo sfruttamento delle fonti di energia naturali e ridurre la dissipazione, ed infine una riduzione dei costi e delle risorse altrimenti necessarie per eventuali ampliamenti o adeguamenti a nuove destinazioni funzionali.⁴⁷

2.2 Edifici adattivi a volumetria variabile

A fronte di un panorama tecnologico e costruttivo considerevolmente ampio ed eterogeneo si è scelto, ai fini di queste ricerche, di concentrare l'analisi sui meccanismi adattivi ad oggi disponibili che maggiormente possono influenzare l'architettura degli stabilimenti industriali. In particolare, l'interesse si orienta verso gli edifici a volumetria variabile. Si tratta di una tipologia edilizia ancora poco conosciuta e diffusa, in cui l'intera struttura è progettata per adattarsi a richieste di alterazione planimetrica o volumetrica interna. Tale variazione dimensionale è realizzata tramite diverse modalità, attraverso l'impiego di componenti di dimensioni ridotte come telai di finestre che si aprono in balconi e patii esterni, o pareti mobili attrezzate che consentono di manipolare gli spazi interni (figura 2.2.1); oppure progettando intere strutture coperte in grado di creare nuovi ambienti tramite una traslazione su rotaie (figura 2.2.2). La versatilità riscontrabile in questa tipologia costruttiva, tipica delle strutture adattive, le rende potenzialmente preferibili alle soluzioni tradizionali, anche per i complessi industriali. Infatti la possibilità di incrementare o ridurre il volume complessivo dell'edificio, durante determinate fasi produttive, consente di diminuirne l'occupazione di suolo. Questo aspetto, abbinato ad una attenta progettazione, riduce la necessità di appezzamenti di terreno molto estesi. Basti pensare ad esempio ad un magazzino per prodotti stagionali in grado di modificare la propria capienza e volume a seconda delle necessità. Inoltre, la volumetria variabile consente un risparmio sulle spese di gestione per ambienti che ad esempio devono mantenere determinate condizioni termo-igrometriche, oltre che garantire un migliore isolamento perimetrale quando le pareti sono richiuse e sovrapposte.

47. Dorigati Giorgia, *Edifici adattivi per un'edilizia polifunzionale sostenibile. Analisi comparata di soluzioni costruttive moderne ed applicazione ad un caso studio*, tesi di laurea magistrale, Padova, 2018-2019, Umberto Turrini relatore.

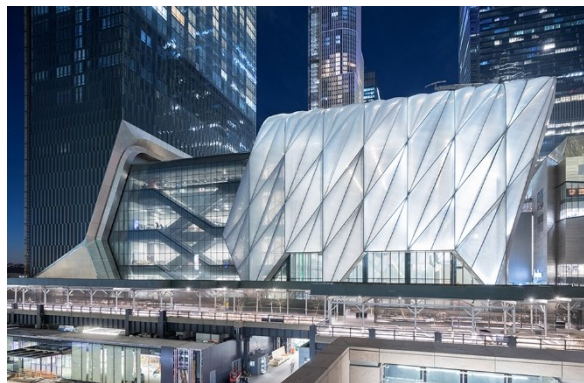
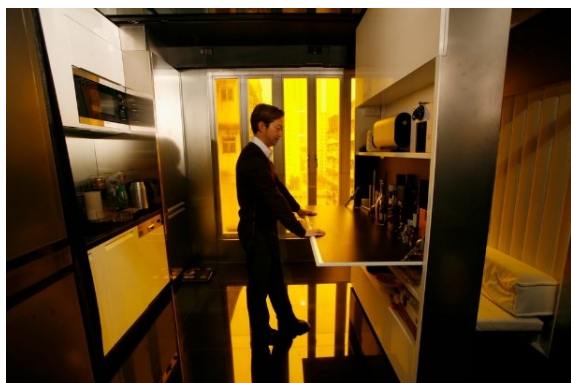


Figura 2.2.1: A sinistra, pareti mobili del Domestic Transformer, Gary Chang, Hong Kong, Cina, 2007.

Figura 2.2.2: A destra, struttura mobile del The Shed, Scofidio & Renfro, New York, Stati Uniti, 2017.

Gli sviluppi storici di questa tipologia di edifici risultano difficilmente collegabili, in quanto i casi costruiti si presentano singolari e sporadici, privi di uno sviluppo temporale lineare o di una letteratura dedicata. Pertanto risulta necessario studiare anche i sistemi, edifici o metodi costruttivi che incorporino al loro interno anche un solo componente o meccanismo in grado di traslare, ruotare o espandersi, almeno fintanto che lo sviluppo e la costruzione di meccanismi edilizi a volumetria variabile rimangono limitati.

2.2.1 Materiale e movimento

I sistemi costruttivi impiegati nella realizzazione delle componenti mobili per edifici a volumetria variabile, fanno uso esclusivamente di materiali leggeri e in grado di supportare gli sforzi meccanici dovuti al movimento. Si prediligono pertanto l'acciaio, il legno e i più moderni materiali sintetici come resine e fibre. Inoltre, la precisione richiesta per la realizzazione delle componenti meccaniche, presuppone una produzione tramite l'utilizzo di macchine a controllo numerico in stabilimento. Di conseguenza risulta impossibile l'utilizzo di sistemi costruttivi tradizionali per la realizzazione di edifici a volumetria variabile, che necessitano di un grado più o meno elevato di prefabbricazione.

Date le tecnologie produttive odierne, le componenti meccaniche che consentono il movimento come rotaie, carrelli, ruote dentate o pistoni, saranno necessariamente in acciaio, ma queste possono essere collegate ad esempio ad una struttura portante del medesimo materiale che sorregge pannellature leggere, a pannelli portanti in cross laminated timber, o ancora a sottili membrature in materiali compositi.

La scelta dei materiali di impiego rimane comunque legata alla tipologia di movimento cui le componenti sono soggette, il tempo che impiegano a compierlo e le conseguenti accelerazioni e velocità raggiunte, oltre alle prestazioni richieste di flessibilità, durezza, resistenza, duttilità, sostenibilità, resistenza ad azioni cicliche, al fuoco, di tenuta al fumo, capacità ed isolamento termico e idraulico. Risulta quindi fondamentale la conoscenza della cinetica per i movimenti meccanici da compiere.

Alla base di ogni azione di movimento sono individuabili due categorie: traslazione e rotazione. Questi spostamenti nello spazio possono essere combinati o ripetuti per ottenere una molteplicità di risultati differenti, anche se nella piccola scala rimangono riconducibili alle due categorie iniziali. Talvolta, operando su sistemi di movimenti complessi, risulta conveniente specificare con una nomenclatura maggiormente intuitiva il movimento complessivo che emerge ad una scala più ampia. Quindi la successiva figura 2.2.1.1 riporta una classificazione dei movimenti a partire da quelli più basilari e bidimensionali, arrivando ad applicarli ad oggetti nelle tre dimensioni. Al concetto di traslazione e rotazione si aggiunge, infine, quello di allungamento ed espansione di materiali elastici, tipico dell'architettura pneumatica.

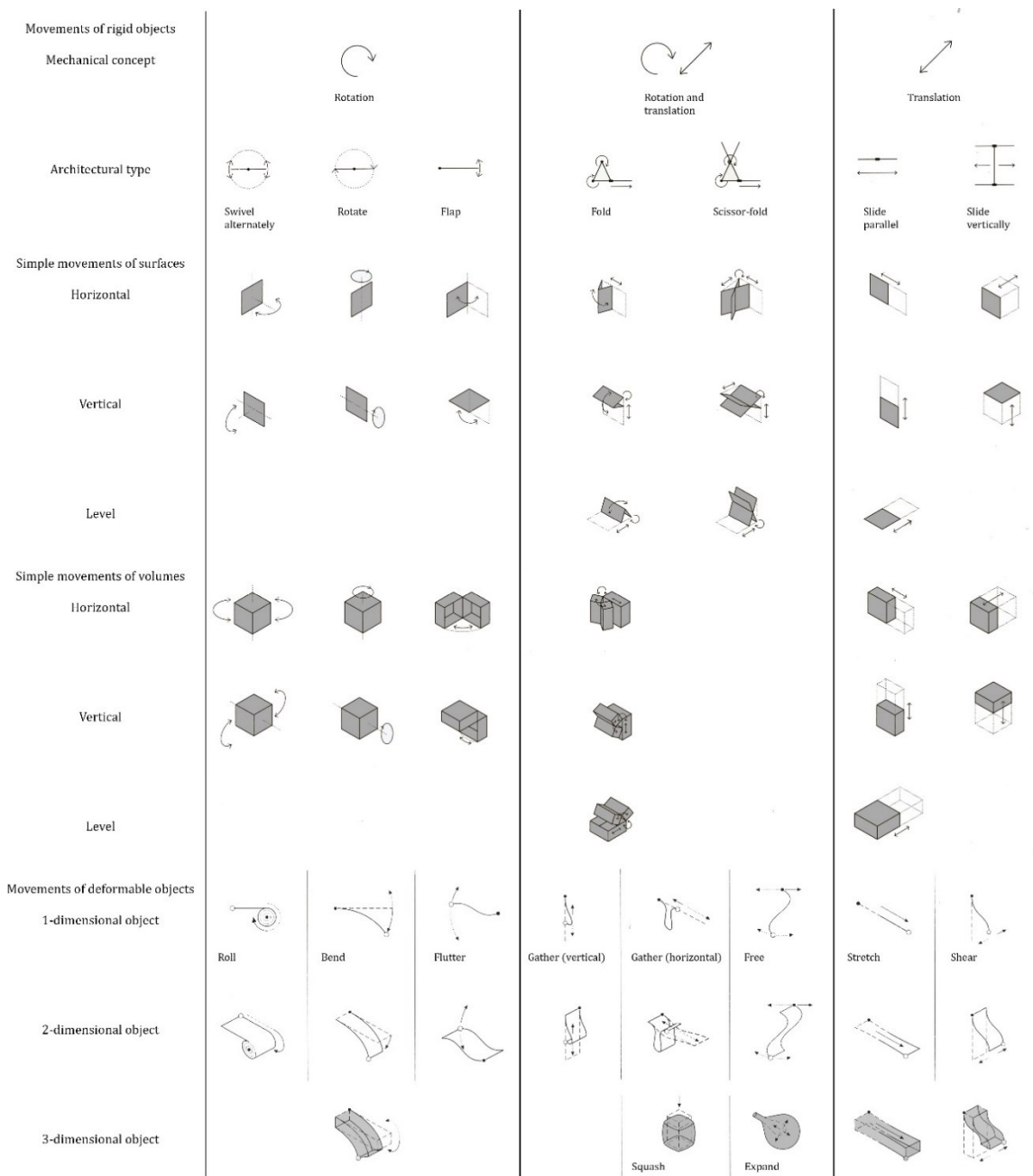


Figura 2.2.1.1: Tipologie di movimento meccanico per oggetti rigidi e flessibili.

Al fine di compiere un qualsiasi movimento meccanico, la struttura deve disporre di un meccanismo di azionamento detto attuatore, in grado di generare e trasmettere forze sufficientemente intense per spostare le componenti mobili. In architettura, l'energia necessaria alla movimentazione è in genere richiesta ad un'elevata intensità e per periodi di tempo prolungati, pertanto, solo alcuni attuatori sono adatti tra i seguenti tipi:

- **Ad azionamento Manuale:** solamente per parti o strutture estremamente leggere;
- **Azione del vento:** incostante, utile solo per parti da muovere in relazione al vento;
- **Motori a gasolio:** adatti, ma vanno riforniti e producono emissioni;
- **Motori elettrici:** adatti, e alimentabili direttamente dagli impianti presenti;
- **Pistoni idraulici:** adatti, e alimentabili direttamente dagli impianti presenti;
- **Pistoni pneumatici:** adattabili, ma forniscono meno spinta di quelli idraulici;
- **Pompe fluidodinamiche:** adattabili, ma solitamente impiegate in altri ambiti;
- **Verricelli:** adatti, ma lavorano unidirezionalmente usando cavi flessibili;
- **Contrappesi:** favoriscono un movimento direzionale, ma vanno combinati ad altri;
- **Ruote dentate e catene:** componenti che favoriscono o consentono certi movimenti.

2.2.2 Architettura pneumatica

Un particolare tipo di strutture a volumetria variabile è quello nato dall'architettura pneumatica. Questa vede l'impiego di membrane sottili e flessibili per realizzare tensostrutture, sfruttando la differenza di pressione generata all'interno delle stesse, rispetto quella atmosferica esterna. La pressurizzazione di queste strutture leggere permette loro di deformarsi e assumere una posizione e forma stabile, fintanto che le condizioni di pressione sono mantenute. Questo principio può essere sfruttato nell'edilizia per creare ambienti protetti dall'esterno senza elementi portanti al di fuori della membrana stessa, la quale è in grado di sopportare carichi applicati trasferendoli come sforzo di tensione sulla superficie della membrana anziché sul terreno. Pertanto, la capacità portante di queste strutture è influenzata direttamente dalla resistenza a trazione, lacerazione e strappo del materiale costituente le membrane, oltre che dalla pressione interna. Infatti, le strutture pneumatiche sono in grado di resistere ai carichi fino a quando la compressione da loro generata non eguaglia la tensione longitudinale di trazione della membrana, dovuta alla pressione interna. Al raggiungimento di questo valore la struttura cede per instabilità al carico di punta, o si formano grinze sulla superficie vicino al punto di applicazione del carico, dove questa non risulta più in tensione, che portano di conseguenza al collasso strutturale.

Il principio di funzionamento è noto già dall'antichità, quando veniva sfruttato ad esempio per le imbarcazioni a vela, anche se l'utilizzo di energia artificiale per mantenere una differenza di pressione risale al 1600, con i primi palloni aerostatici. La prima applicazione in edilizia risale invece al 1918, quando F. W. Lanchester realizza degli

ospedali da campo e dei depositi pneumatici trasportabili. Nel tempo, si sono impiegati anche numerosi materiali per la realizzazione di membrane adatte a tali applicazioni, tra cui si possono distinguere i materiali isotropi:

- Tessuti in fibra di vetro o fibre sintetiche (solitamente rivestiti con polimeri per garantire tenuta all'acqua, all'aria e resistenza alla corrosione)
- Pellicole plastiche (come polivinilcloruro, polietilene, poliestere e poliammide)
- Membrane di gomma (molto flessibili ma più suscettibili a deformazioni termiche)
- Lamine metalliche (resistenti e con ottima tenuta, ma difficili da produrre)

Ed i materiali con caratteristiche meccaniche anisotrope:

- Tessuti intrecciati (spesso rivestiti con polimeri, possono anche includere fibre organiche come cotone, lana o seta, minerali come vetro, metalliche come sottili fili di acciaio, o sintetiche)
- Tessuti a griglia (simi ai precedenti, ma composti con griglia a maglie più larghe, per rinforzo strutturale o particolari necessità di illuminazione)
- Gomme sintetiche (combinazione di gomma e plastica dalla migliore resistenza a trazione, strappo e lacerazione)
- Plastiche (dalla ottima resistenza a trazione in una o diverse direzioni)

Oltre alla resistenza meccanica, per la scelta del materiale, va considerata anche quella chimica alla corrosione, oltre alla permeabilità all'aria e alla dispersione termica.⁴⁸

Il numero di strati che compongono l'involucro può variare, definendo due principali categorie di strutture pneumatiche dal diverso funzionamento:

- **A parete semplice** (figura 2.2.2.1): strutture aerostatiche costituite da un singolo involucro, sostenuto dal fluido pressurizzato all'interno ed eventualmente ancorato a terra esternamente tramite funi. La differenza di pressione che mantiene le proprietà strutturali è solitamente alimentata tramite compressori o elettro turbine a bassa potenza, automaticamente regolate alle variazioni di carico. Considerata la presenza di aperture non sigillate ermeticamente verso l'esterno, il guasto di questi dispositivi o la lacerazione della membrana, possono provocare la fuoriuscita di aria e la conseguente riduzione di pressione interna. In tal caso, la velocità della fuoriuscita d'aria che porta al collasso della struttura sarebbe comunque ridotta, non costituendo un pericolo immediato per gli utenti. Per consentire un adeguato ricambio d'aria all'interno ed evitare fenomeni di condensa o incrementi di temperatura, si installano sfiati a valvola, e si utilizzano materiali permeabili ai gas.

48. Schumacher M., Schaeffer O., Vogt M., *Move: Architecture in motion, dynamic components and elements*, Basilea, Birkhauser Architecture, 2010.

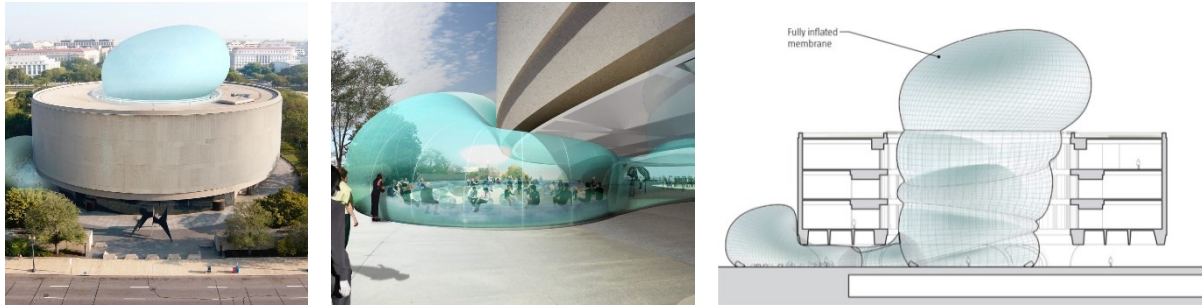


Figura 2.2.2.1: *Inflatable Expansion dell'Hirshhorn Museum, Scofidio & Renfro, New York, Stati Uniti, 2009.*

- **A doppia parete** (figura 2.2.2.2): strutture aerostatiche formate da due involucri che racchiudono al loro interno un fluido pressurizzato. Rispetto al caso precedente, non è necessario predisporre accessi con tenuta all'aria, che deve essere garantita soltanto per il cuscinetto e non per gli ambienti interni. Questo permette di limitare la necessità di compressori costantemente funzionanti e permette di ottenere un involucro dalla discreta coibenza termica, regolabile tramite la trasparenza delle membrane e dimensionando opportunamente le camere pneumatiche. Inoltre, la possibilità di realizzare molteplici cuscinetti, collegati o meno, consente di realizzare forme più libere rispetto alle strutture con parete singola.

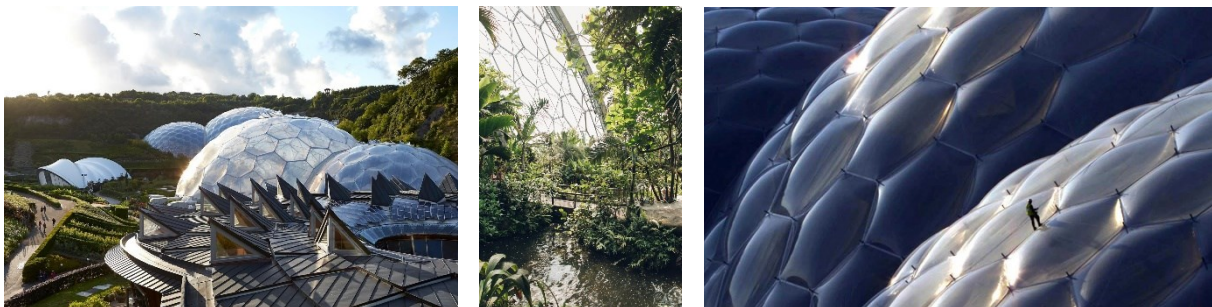


Figura 2.2.2.2: *Cupole doppia parete, The Eden Project, Grimshaw Architects, Bodeva, Regno Unito, 2000.*

2.2.3 Sistemi di tenuta e impianti di parti mobili

La letteratura riguardante edifici a volumetria variabile, o che incorporino componenti mobili spesso si sofferma sulla conformazione del meccanismo che ne governa il movimento e sul suo attuatore, ma tralascia altri aspetti tecnici fondamentali per il sistema edilizio come l'impiantistica ed i sistemi di tenuta.

Nella maggior parte dei casi, la dinamicità viene applicata esclusivamente ad elementi frangisole mobili di facciata, che permettono di regolare la radiazione luminosa senza alterare la tenuta all'aria o la capacità di isolamento termico dell'involucro esterno. Alternativamente, molti sistemi adattivi presentano la possibilità di passare da una conformazione chiusa, a tenuta, ad una in diretto contatto con l'ambiente esterno.

In questi casi il funzionamento non è dissimile da quello di un comune serramento, che garantisce l'isolamento soltanto durante la sua configurazione chiusa, facendo uso di guarnizioni elastiche inserite in un battente scalettato che forma un labirinto per bloccare il passaggio diretto di aria, umidità e acqua.

Esclusivamente per alcuni specifici casi, in cui la struttura si muove passando da una conformazione isolata richiusa, ad una estesa similmente a tenuta, si può parlare di incrementi di volumetria interna. In questi casi, la frizione provocata dal movimento danneggerebbe le guaine protettive, pertanto si utilizzano sistemi che permettono di ritrarre questi elementi in corrispondenza dei giunti durante il movimento, per poi riposizionarli una volta raggiunta la conformazione finale. Quando il movimento compiuto lo permette, si possono anche applicare sistemi di tenuta realizzati ad hoc che garantiscono l'isolamento anche durante le fasi intermedie della movimentazione, grazie alla loro elasticità o conformazione meccanica estensibile.

Similmente, per l'impiantistica si cerca di ridurre al minimo i collegamenti impiantistici tra una parte fissa e una mobile del sistema edilizio, in quanto azioni cicliche provocate dal movimento possono facilmente usurare le giunzioni tra questi sistemi. Pertanto, la gran parte delle strutture mobili si presenta priva di impianti, se non quelli strettamente necessari. Nel caso di necessità di giunzioni impiantistiche mobili, si può ricorrere a materiali flessibili o incastri particolari per consentire l'allungamento di cavi, tubazioni o condotti. Il principio di movimento dei giunti mobili in questi impianti deve adattarsi al movimento della struttura e deve essere compatibile alla flessibilità del materiale costituente l'impianto stesso (figura 2.2.3.1):

- Materiale flessibile
 - Rotazione flessibile relativa tra due segmenti consecutivi
 - Avvolgimento attorno ad un centro di rotazione
 - Raggruppamento a seguito di una traslazione
 - Allungamento assiale o deviato
 - Estensione bidirezionale elastica
 - Materiale rigido
 - Rotazione rigida relativa tra due segmenti consecutivi
 - Allungamento assiale telescopico
 - Allungamento assiale per avvitanamento
-

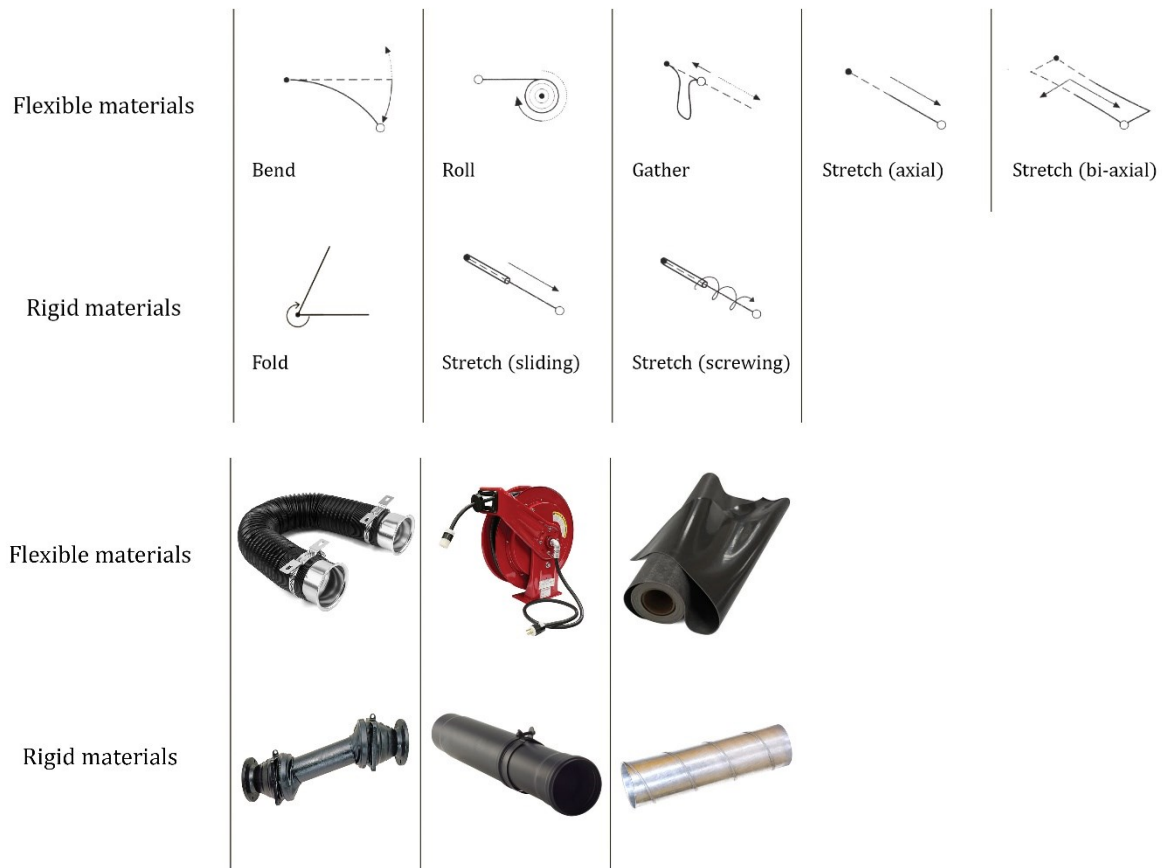


Figura 2.2.3.1: Tipologie di movimento meccanico per impianti rigidi e flessibili con esempi di prodotti.

2.3 Efficienza dei meccanismi adattivi

Per una stima dell'efficienza dei meccanismi adattivi che caratterizzano il panorama edilizio attuale, si fa riferimento all'analisi svolta dalla Dott.ssa Giorgia Dorigati, nella sua tesi magistrale: *"Edifici adattivi per un'edilizia polifunzionale sostenibile. Analisi comparata di soluzioni costruttive moderne ed applicazione ad un caso studio"* (2019).

L'elaborato analizza un campione eterogeneo di 100 edifici adattivi per delineare lo stato dell'arte nelle tecnologie del settore, e stimarne l'efficienza percentuale, basandosi su numerosi fattori elencati brevemente a seguito:

- Tipologia di movimento
- Attuatore impiegato
- Velocità del movimento
- Dimensioni di aree o volumi movimentati
- Variazioni di parametri ambientali quali ventilazione, temperatura e illuminazione
- Sostenibilità energetica e possibilità di reimpiego al termine della vita utile
- Automatizzazione
- Convenienza economica
- Interoperabilità

I risultati di efficienza derivanti dall'analisi caso per caso, sono raggruppati secondo macrocategorie di edifici che presentano similitudini nella tipologia di movimento o nei meccanismi di azionamento. Al termine dell'analisi si evidenziano quindi i parametri di efficienza ed interoperabilità delle categorie individuate (figura 2.3.1), in quanto si propone di migliorare l'efficienza raggiungibile impiegando una singola tecnologia adattiva, tramite l'applicazione di più meccanismi congiuntamente.

Macrocategoria	Efficienza	Interoperabilità	Macrocategoria	Efficienza	Interoperabilità
componente installato sulla forometria che va a formare un'estensione del piano.	55 %	19 %	pannelli di copertura che scorrono verso un punto comune.	25 %	28 %
componente pneumatico a doppia parete installato su uno scheletro strutturale.	29 %	56 %	pannelli di facciata che ruotano secondo un centro di rotazione centrale e si aprono in direzione verticale.	37 %	41 %
componenti che mediante rotazione e traslazione espandono la loro superficie.	36 %	31 %	pannelli di facciata che ruotano secondo un centro di rotazione centrale.	31 %	42 %
componenti strutturali e di facciata che vengono arrotolati.	39 %	25 %	pannelli di facciata che ruotano secondo un centro di rotazione d'estremità e si aprono in direzione orizzontale.	38 %	31 %
edificio a moduli indipendenti che ruotano su un perno centrale.	21 %	25 %	pannelli di facciata che ruotano secondo un centro di rotazione d'estremità e si aprono in direzione verticale.	46 %	32 %
edificio che ruota come un elemento unito secondo centri di rotazione differenziati.	35 %	25 %	pannelli di facciata che ruotano secondo un centro di rotazione d'estremità e si aprono verso l'esterno.	40 %	25 %
edificio che ruota come un elemento unito secondo un centro di rotazione centrale.	19 %	19 %	pannelli di facciata che traslano in direzione orizzontale.	44 %	50 %
elementi che si aprono a raggiera ruotando su un perno e diventano complanari.	45 %	31 %	pannelli di facciata che traslano in direzione verticale.	28 %	38 %
elementi non strutturali che ruotano secondo un centro di rotazione centrale e si aprono in direzione verticale.	41 %	38 %	pannelli di facciata che si ripiegano in orizzontale e si impacchettano gli uni sugli altri.	38 %	52 %
elementi non strutturali esterni che ruotano secondo un centro di rotazione d'estremità e si aprono in direzione verticale.	46 %	63 %	pannelli di facciata che si ripiegano in verticale e si impacchettano gli uni sugli altri.	27 %	36 %
elementi non strutturali esterni che scorrono in direzione orizzontale.	33 %	49 %	pannelli di facciata che vengono arrotolati all'interno di un contenitore.	39 %	50 %
elementi non strutturali esterni che scorrono in direzione verticale.	24 %	56 %	pannelli non strutturali interni che scorrono in direzione orizzontale.	36 %	38 %
elementi non strutturali esterni che scorrono l'uno sull'altro in modo concentrico.	29 %	81 %	pareti interne che ruotano secondo un centro di rotazione d'estremità e si aprono in direzione orizzontale.	27 %	33 %
elementi strutturali che scorrono in direzione orizzontale.	57 %	44 %	posizionamento di moduli prefabbricati che vanno ad affiancarsi gli uni agli altri per formare un complesso abitativo.	48 %	19 %
elementi strutturali esterni che scorrono in direzione orizzontale.	41 %	47 %	posizionamento di un modulo prefabbricato che viene installato su un edificio pre esistente.	46 %	25 %
elementi strutturali interni che scorrono in direzione verticale.	30 %	38 %	struttura compatta che si può espandere in direzione orizzontale e verticale.	56 %	25 %
padiglione pneumatico installato a terra.	48 %	28 %	struttura retraibile ad ombrello	45 %	19 %
padiglione pneumatico installato su una struttura pre esistente.	31 %	38 %	volume che trasla in direzione orizzontale.	37 %	63 %
panelli della copertura che si sollevano in verticale.	25 %	41 %	volume che trasla in direzione verticale.	32 %	19 %
pannelli di copertura che ruotano secondo un centro di rotazione d'estremità e si aprono in direzione verticale.	30 %	36 %			

Figura 2.3.1: Efficienza ed interoperabilità percentuali delle categorie adattive, Dorigati Giorgia, 2019.

Al fine di consentire un effettivo miglioramento prestazionale, lo studio suggerisce di seguire delle linee guida nella scelta dei meccanismi adattivi da applicare, mantenendosi entro una certa soglia di efficienza ed interoperabilità, ottenute come frattili dei grafici di distribuzione normale per i valori individuati (figure 2.3.2, 2.3.3):

- Efficienza superiore al 37% e possibilmente nell'ultimo terzo del diagramma;
- Interoperabilità superiore al 30% e possibilmente oltre la metà del diagramma;
- Impiego di meccanismi che lavorino in modo indipendente e su piani diversi.

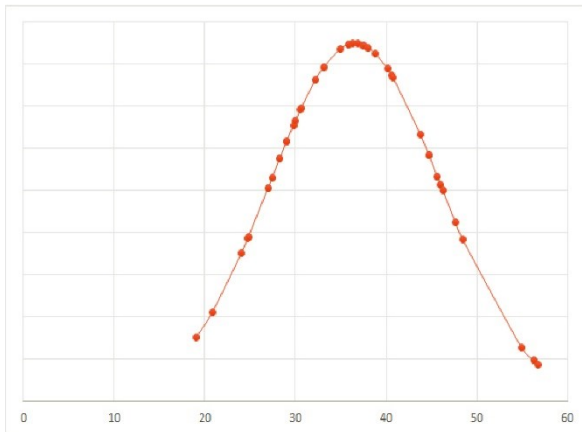


Figura 2.3.2: A sinistra, distribuzione normale dell'efficienza delle categorie, Dorigati Giorgia, 2019.

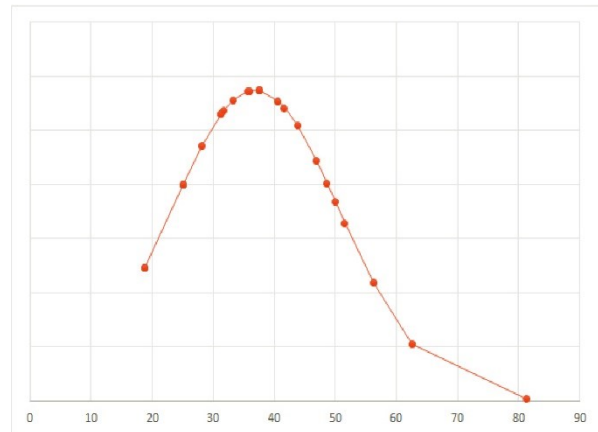


Figura 2.3.3: A destra, distribuzione normale dell'interoperabilità delle categorie, Dorigati Giorgia, 2019.

Questo studio costituisce un'ottima base per la definizione di strategie adattive in grado di migliorare le prestazioni di svariate categorie di edifici, ma, come riporta la stessa autrice al termine dell'analisi, per la scelta dei sistemi adattivi da integrare all'interno di uno specifico edificio è necessario valutare un numero più ampio di parametri rispetto la sola efficienza percentuale. In particolare, vanno considerate anche le specifiche esigenze dell'utenza, che possono avere un peso determinante per l'applicabilità di alcuni meccanismi. Nel caso industriale, ad esempio, le lavorazioni potrebbero richiedere tempistiche di movimentazione stringenti, o la necessità di mantenere determinate condizioni termo-igrometriche all'interno degli ambienti che potrebbero precludere l'utilizzo di sistemi adattivi che non garantiscano la tenuta all'aria.⁴⁹

49. Dorigati Giorgia, *Edifici adattivi per un'edilizia polifunzionale sostenibile. Analisi comparata di soluzioni costruttive moderne ed applicazione ad un caso studio*, tesi di laurea magistrale, Padova, 2018-2019, Umberto Turrini relatore.

3 Linee guida per la progettazione

Al fine di applicare i concetti di architettura adattiva visti in precedenza alla tipologia del fabbricato industriale, è necessario individuare delle linee guida di carattere generale per favorire l'applicazione del metodo di intervento anche in casi eterogenei. Prima di considerare l'integrazione di meccanismi adattivi all'interno di complessi industriali esistenti, è opportuno valutare in termini generali quali tra questi sistemi comporterebbero un maggiore beneficio per la tipologia costruttiva oggetto di studio.

3.1 Meccanismi adattivi applicati all'industria

Concentrandosi esclusivamente sull'ambito edilizio industriale, si possono individuare gli aspetti tipologici che più beneficerebbero di sistemi adattivi. Per far fronte alle necessità di spazio eterogenee dei vari rami dell'industria, l'utilizzo di strategie adattive porta l'immediato vantaggio di garantire possibili reimpieghi degli stabilimenti, una volta giunti alla cessazione o al trasferimento dell'attività per cui sono progettati. Inoltre, la stessa attività può essere soggetta a variazioni anche drastiche, a seguito dei rapidi sviluppi tecnologici che caratterizzano molti settori; pertanto, la possibilità di variazioni planimetriche interne risulta una strategia adattiva dall'ampio potenziale per questo ambito edilizio.

Allo stesso modo, l'utilizzo di meccanismi che consentano variazioni volumetriche interne, o complessive, potrebbero essere destinati ad assumere un ruolo fondamentale per l'industria. Infatti, l'adattabilità degli edifici a volumetria variabile nella gestione dello spazio interno è un pregio che si andrebbe a sommare alla possibilità di realizzare fabbricati dalla ridotta occupazione di terreno. Questo fattore avrà rilevanza sempre crescente nel prossimo futuro, in quanto il contenimento del consumo di suolo è un tema attualmente centrale per le direttive europee, che ne prevedono l'azzeramento per le nuove costruzioni entro il 2050.

3.1.1 Considerazioni tecniche ed economiche

Le tecnologie adattive che consentono la costruzione di sistemi adattivi a volumetria variabile, risultano ancora poco esplorate e più costose rispetto a soluzioni tradizionali. Pertanto, nell'applicazione di questi interventi ad un ambito edilizio privato e mirato alla massimizzazione dei profitti come l'industria, l'aspetto della sostenibilità economica diventa fondamentale. Per quanto concerne l'automazione, i costi iniziali incrementano assieme al livello tecnologico impiegato, a fronte di una diminuzione dei costi di gestione sul lungo periodo. Quest'ultima risulta maggiormente significativa per sistemi edilizi complessi o che arrivino ad adattarsi in tempo reale alle condizioni ambientali esterne. Tuttavia, nell'ambito industriale, gli aspetti ambientali esterni sono secondari rispetto alle energie e alle necessità delle attività produttive svolte all'interno dell'involucro.

Facendo riferimento ai livelli di automazione proposti al paragrafo 2.1, risulterebbe quindi sconveniente l'utilizzo di tecnologie smart in grado di adattarsi autonomamente ai cambiamenti comportamentali dell'utenza, in quanto sul posto di lavoro questi vengono regolati in modo prevedibile dal sistema aziendale. Date le dimensioni elevate degli ambienti in questo contesto e la gravità di possibili errori da parte dell'utenza, sono altresì sconsigliabili soluzioni flessibili o attive, ad azionamento manuale o comunque gestite completamente dall'utenza. Di conseguenza, la scelta ricadrebbe tra soluzioni dinamiche, interattive e intelligenti in funzione dell'attività svolta e del tipo di movimento previsto.

Considerata la natura rapida e ciclica dei processi produttivi, per i meccanismi di movimentazione è consigliabile limitare la selezione a movimenti semplici e, nel caso di volumetrie variabili, sufficientemente ampi per incrementi planimetrici significativi, in grado di contenere i macchinari e attrezzature necessarie. Inoltre, l'utilizzo di movimenti meno complessi contribuisce a limitare il numero di giunti impiantistici tra parti mobili e fisse, comportando una manutenzione semplificata e meno gravosa per questi snodi suscettibili di rapida usura. Tra le categorie di meccanismi adattivi proposte al paragrafo 2.3, si predilige l'assenza di complesse intersezioni tra piani di movimento, che corrisponde ad un minor numero di giunti per passare tra la configurazione retratta e quella estesa, oltre che ad un numero ridotto di parti mobili indipendenti tra loro.

Infine, è indispensabile conoscere la funzione degli ambienti, nonché le alternative possibili per futuri adattamenti o cambi di destinazione del complesso, assieme alle conseguenti esigenze strutturali e ambientali. Ad esempio l'impiego di macchinari più o meno pesanti determina diverse resistenze ai carichi della soletta, oppure un magazzino potrebbe necessitare di condizioni termo-igrometriche controllate. In questi casi occorre delineare le esigenze caso per caso data l'eterogeneità della richiesta.

3.2 Definizione delle linee guida

Al fine di impostare delle linee guida di carattere generale, applicabili ad una casistica il più ampia possibile, si dovranno aggiungere alle considerazioni effettuate al paragrafo precedente, nuove indicazioni di intervento relative agli edifici industriali esistenti. In particolar modo, per consentire l'adeguatezza di un intervento alla maggioranza degli edifici industriali oggi soggetti ad abbandono o sottoutilizzo, si fa riferimento all'analisi dimensionale svolta al paragrafo 1.3.2, per i sistemi costruttivi più diffusamente impiegati nel periodo di massima attività costruttiva della tipologia.

L'obiettivo è quello di progettare un meccanismo adattivo con ampie possibilità di impiego, che consenta variazioni volumetriche dell'involucro, e costituisca un effettivo miglioramento prestazionale rispetto alle tecniche costruttive tradizionali.

A seguito si definiscono delle sintetiche linee guida per la realizzazione di un intervento applicabile alla casistica edilizia più diffusa e rappresentativa dell'industria:

- Per la progettazione di un intervento su strutture esistenti, costruite tra gli anni Sessanta e Novanta, sono preferibili soluzioni che coprano maglie strutturali con campate maggiori comprese tra 14 e 18 m, interasse tra i pilastri compreso tra 7 e 13 m (rappresentativi dell'80% dei sistemi indagati), e altezze utili comprese tra 5 e 8 m (rappresentativi del 90% dei sistemi indagati);
 - Per la progettazione di strutture di nuova costruzione, o interventi su strutture più recenti rispetto al precedente punto, l'analisi di cui al paragrafo 1.4 evidenzia la diffusione di luci libere di campata superiori rispetto al passato. Pertanto, questi interventi devono considerare una campata maggiore tra 18 e 24 m, mentre le altre misure strutturali corrispondono a quelle già individuate.
 - Per la corretta progettazione dell'intervento è necessario individuare le funzioni da inserire nel caso studio, e le possibili destinazioni alternative che possono in futuro sostituirle. Per indicazioni di carattere generale si faccia riferimento al paragrafo 1.2.3, che analizza le attività produttive limitatamente alla regione Veneto;
 - Salvo particolari necessità derivate dalle funzioni previste, orientare la scelta dei meccanismi adattivi da inserire nel complesso edilizio verso movimenti meno complessi, che comportino la necessità del minor numero possibile di snodi;
 - Tra le categorie definite al paragrafo 2.3, figura 2.3.1, prediligere quelle con efficienza superiore al 37% (possibilmente entro l'ultimo terzo del diagramma di figura 2.3.2);
 - In caso di inserimento di due o più meccanismi adattivi che operino congiuntamente all'interno del sistema edilizio, è preferibile impiegare dispositivi che operino su piani di movimento diversi, e prediligere le categorie di cui al paragrafo 2.3, figura 2.3.1, che presentino un'interoperabilità superiore al 30% (possibilmente oltre la metà del diagramma di figura 2.3.3);
 - Per favorire la sicurezza senza eccedere in costi di costruzione superflui è suggerito un livello di automazione per le componenti adattive dell'edificio che rientri in una categoria dinamica, interattiva o intelligente a seconda delle funzioni richieste e alle necessità che ne conseguono.
 - Data l'eterogeneità delle richieste riscontrabili per i diversi processi produttivi che potrebbero occupare gli ambienti adattivi della struttura, è necessario svolgere una analisi esigenziale approfondita caso per caso che potrebbe portare ad escludere determinati meccanismi adattivi o preferirne alcuni meno efficienti, ma in grado di rispondere adeguatamente a necessità strutturali, impiantistiche, di resistenza, di spazio, di sicurezza in caso di incendio, di tenuta ai gas, di velocità di azionamento del meccanismo, di controllo delle caratteristiche termo-igrometriche o di illuminazione ambientali, di resistenza alla corrosione, di riduzione del rumore, delle vibrazioni, di aspetti igienico-sanitari o altri ancora.
-

4 Progettazione architettonica dell'intervento

4.1 Metodologia operativa

L'analisi svolta nei capitoli precedenti risulta una fondamentale preparazione per la successiva fase di progettazione, sia per la definizione del caso studio tra quelli rilevati al paragrafo 1.4, sia per l'individuazione delle tecniche e soluzioni costruttive più adeguate all'applicazione dei concetti adattivi sull'architettura industriale.

In particolare, l'iter metodologico per la realizzazione del progetto si basa su quanto delineato nei precedenti capitoli, riassumibile nei seguenti punti:

- Analisi storica dell'edilizia industriale e dei prodotti prefabbricati al fine di individuare la tipologia costruttiva più diffusa nel patrimonio esistente;
- Studio dei settori e delle attività economiche più diffuse nella regione Veneto per individuare le destinazioni produttive più rappresentative dei fabbricati industriali;
- Analisi dei prodotti prefabbricati per edifici in calcestruzzo armato, da cui risulta possibile definire le più comuni dimensioni strutturali per tale tipologia costruttiva, che risulta la maggiormente impiegata dall'analisi storica;
- Studio di edifici costruiti, considerati rappresentativi per le attività individuate, tramite sopralluoghi; al fine di individuare un caso studio per lo sviluppo del progetto e di confrontare al caso reale le dimensioni strutturali ricavate dall'analisi dei prodotti precedentemente svolta;
- Analisi dello stato dell'arte delle soluzioni architettoniche adattive, in particolare per la realizzazione di edifici a volumetria variabile;
- Definizione delle linee guida progettuali di carattere generale, applicabili ad architetture esistenti, di nuova costruzione e per la scelta dei meccanismi adattivi da applicare per un miglioramento prestazionale di tali edifici.

Di conseguenza, il progetto architettonico riguardante uno specifico intervento affrontato in questo capitolo, si sviluppa a partire da quanto analizzato, attraverso:

1. Individuazione del caso studio, nonché delle esigenze di produzione relative al settore di appartenenza;
 2. Analisi funzionale, relativa alle destinazioni degli ambienti necessari per la produzione e per possibili variazioni funzionali future, tipiche dei sistemi adattivi;
 3. Normative tecniche di riferimento, al fine della definizione delle dimensioni minime degli spazi e di altre proprietà utili alle successive analisi;
 4. Analisi dimensionale, relativa alle necessità di spazio dei reparti, magazzini, macchinari e operatori all'interno dello stabilimento;
-

5. Scelta dei materiali e della tecnica costruttiva, in funzione di sicurezza strutturale, efficienza economica e antisismica, sostenibilità ambientale e movimentazioni in previsione dell'applicazione di sistemi adattivi;
6. Individuazione delle soluzioni adattive da applicare, nonché approfondimento dei loro sistemi di realizzazione, giunzione e movimentazione;
7. Individuazione dell'area e dell'impianto planimetrico indicativo per massimizzare l'efficienza dell'organizzazione produttiva;
8. Stesura del progetto architettonico di massima.

4.2 Individuazione del caso studio

Data la disponibilità offerta dall'azienda, nonché l'interesse della stessa nelle soluzioni innovative e adattive che la tesi si propone di studiare, la scelta del caso studio si indirizza verso la progettazione di uno stabilimento per Bozza Legnami di Busa di Vigonza (PD).

L'azienda sta valutando il progetto per una nuova sede produttiva che includa tutti i reparti attualmente utilizzati, nonché i servizi e gli uffici necessari allo svolgimento dell'attività. Il progetto di tesi verterà su una struttura da realizzare ex novo, che possa soddisfare le esigenze dell'azienda ma che risulti, al contempo, adattabile a diverse destinazioni ed applicazioni anche a fabbricati esistenti seguendo le linee guida definite, con le minime demolizioni e modifiche degli stessi.

L'intervento dovrà comprendere degli elementi che permettano inoltre di ridurre al minimo il consumo di suolo del fabbricato, tramite l'applicazione di tecnologie adattive per volumetrie variabili.

Tale struttura verrà pensata all'interno del lotto attualmente occupato dalla sede staccata dell'azienda nell'area industriale di Villamarzana, Rovigo, in sostituzione del fabbricato esistente che servirà come metro di confronto nelle variazioni spaziali apportabili tramite l'adozione dell'intervento.

La scelta di realizzare un edificio ex novo, che risulti inseribile o adeguabile alle strutture esistenti, è dettata dall'impossibilità di eseguire una campagna di prove entro i tempi previsti e con strumentazioni adeguate, per l'alternativo adeguamento di un fabbricato esistente. La precedente analisi sullo stato dell'arte dell'edilizia industriale rimane però fondamentale per poter applicare le linee guida generali anche all'intervento ex novo, in modo da renderlo potenzialmente adeguato anche al recupero edilizio di fabbricati più o meno recenti, oltre che a garantire il soddisfacimento delle moderne necessità degli impianti industriali.

4.3 Analisi funzionale

Lo stabilimento per la produzione di legname da costruzioni deve comprendere un nucleo produttivo fisso, che contenga tutte le attrezzature produttive utilizzate frequentemente, nonché i reparti per le lavorazioni di falegnameria, nonostante queste vengano sfruttate più di rado. La richiesta dell'azienda prevede di impiegare, invece, l'ambiente a volumetria variabile per la realizzazione di un magazzino coperto, destinato allo stoccaggio della materia prima e dei prodotti intermedi.

Di conseguenza il progetto si dovrà articolare come segue:

- **Nucleo produttivo:** struttura fissa, che consenta al suo interno la disposizione, secondo uno schema efficiente, di una pialla, un centro di taglio, una impregnatrice, un reparto di falegnameria che comprenda le predisposizioni per trancio di piccoli pezzi, bruciatura e rusticatura, pialla a banco e le macchine meno ingombranti e più leggere come la sega a nastro e la truciolatrice. Inoltre, dovrà comprendere degli uffici per i tecnici dell'impianto, per il rilascio dei documenti di accompagnamento alle merci in uscita, degli spogliatoi, docce e locali di servizio, un deposito per gli impregnanti idraulici utilizzati nella produzione, oltre ai necessari percorsi di transito e manovra dei prodotti e degli operatori.
- **Magazzino esterno:** con copertura mobile per ridurre al minimo il consumo di suolo, che consenta lo stoccaggio delle materie prime e dei prodotti intermedi, direttamente collegato al nucleo produttivo e di dimensioni adeguate al transito dei carrelli elevatori per stivare la merce.
- **Spazio esterno:** sufficiente per il transito e la manovra dei mezzi pesanti in entrata con la materia prima ed in uscita con i prodotti, per un parcheggio di dimensioni adeguate alle necessità del personale, per il sistema di raccolta e recupero dei trucioli all'interno di un container sostituibile quando necessario.

Oltre a queste funzioni, previste per l'impiego immediato del fabbricato dalla committenza, si prevede la possibilità di future trasformazioni funzionali o ampliamenti della struttura nell'ottica adattiva. Secondo l'analisi delle attività economiche della regione svolta al paragrafo 1.2.3 il fabbricato potrebbe essere adattato ad altre attività di falegnameria, oppure di produzione alimentare agricola, di stoccaggio e logistica che rimangono attualmente i settori meno in calo. Per queste attività potrebbero rivelarsi opportune delle predisposizioni per una possibile via di corsa da carroponte, non richiesta dalla committenza, ma non dovrebbero essere necessarie particolari predisposizioni fondazionali o di sicurezza antincendio salvo casi specifici di produzioni alimentari. Infine, nonostante l'ambito industriale non richieda particolari prestazioni di coibenza termica e isolamento dall'esterno, si considera tale fattore ad ogni modo importante per l'eventuale cambio di destinazione ad altre categorie funzionali e per raggiungere una efficienza energetica adeguata ad edifici di nuova costruzione.

4.4 Normative tecniche di riferimento

Il reperimento e l'analisi delle prescrizioni tecniche, che regolamentano le caratteristiche architettoniche dell'intervento, è un punto fondamentale per basarvi o verificare l'adeguatezza delle successive indicazioni dimensionali, di scelta dei materiali e delle soluzioni adattive e architettoniche. Di conseguenza, si riportano a seguito le principali norme vigenti al momento di stesura del progetto, limitatamente alle loro prescrizioni che ne influenzino direttamente o indirettamente lo sviluppo:

- A livello nazionale, il D.lgs. 9 aprile 2008, n. 81, *“Testo Unico sulla Salute e Sicurezza sul Lavoro”*, aggiornato al luglio 2008, che esprime all'allegato IV, *“Requisiti dei luoghi di lavoro”*, le dimensioni minime per i locali destinati al lavoro nelle aziende industriali e agli uffici come segue:
 - 1.2. *Altezza, cubatura e superficie*
 - 1.2.1. *I limiti minimi per altezza, cubatura e superficie dei locali chiusi destinati o da destinarsi al lavoro nelle aziende industriali che occupano più di cinque lavoratori, ed in ogni caso in quelle che eseguono le lavorazioni che comportano la sorveglianza sanitaria, sono i seguenti:*
 - 1.2.1.1. *Altezza netta non inferiore a 3m;*
 - 1.2.1.2. *Cubatura non inferiore a 10m³ per lavoratore;*
 - 1.2.1.3. *Ogni lavoratore occupato in ciascun ambiente deve disporre di una superficie di almeno 2m².*
 - 1.2.2. *I valori relativi alla cubatura e alla superficie si intendono lordi cioè senza deduzione dei mobili, macchine ed impianti fissi.*
 - 1.2.3. *L'altezza netta dei locali è misurata dal pavimento all'altezza media della copertura dei soffitti o delle volte.*
 - 1.2.4. *Quando necessità tecniche aziendali lo richiedono, l'organo di vigilanza competente per territorio può consentire altezze minime inferiori a quelle sopra indicate e prescrivere che siano adottati adeguati mezzi di ventilazione dell'ambiente. L'osservanza dei limiti stabiliti dal presente punto 1.2 circa l'altezza, la cubatura e la superficie dei locali chiusi di lavoro è estesa anche alle aziende industriali che occupano meno di cinque lavoratori quando le lavorazioni che in esse si svolgono siano ritenute, a giudizio dell'organo di vigilanza, pregiudizievoli alla salute dei lavoratori occupati.*
 - 1.2.5. *Per i locali destinati o da destinarsi a uffici, indipendentemente dal tipo di azienda, e per quelli delle aziende commerciali, i limiti di altezza sono quelli individuati dalla normativa urbanistica vigente.*
 - 1.2.6. *Lo spazio destinato al lavoratore nel posto di lavoro deve essere tale da consentire il normale movimento della persona in relazione al lavoro da compiere.*

- Una ulteriore norma a livello nazionale da tenere in considerazione è il D.P.R. del 1 agosto 2011, n. 151, *“Regolamento di prevenzione incendi”*, che per l'attività 37, “stabilimenti e laboratori per la lavorazione del legno con materiale in lavorazione e/o in deposito superiore a 5'000kg” definisce una categoria 1B fino ad un quantitativo di materiale inferiore a 50'000kg, superato il quale l'attività rientrerebbe invece in categoria 2C. Per entrambe le categorie l'approvazione del progetto o la presentazione di segnalazione certificata di inizio attività per la costruzione prevede l'approvazione da parte del Comando dei vigili del fuoco. Non risultano però presenti limitazioni specifiche da normativa per: reazione al fuoco, resistenza al fuoco, compartimentazione, gestione della sicurezza antincendio, controllo dell'incendio, rivelazione ed allarme o di sicurezza degli impianti tecnologici e di servizio. Come è invece specificato per altre attività dal DM del 3 agosto 2015, *“Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139”*.

Tale regola tecnica verticale reca disposizioni di prevenzione incendi esclusivamente per attività che non comprendono quelle industriali di lavorazione del legno. Gli stessi uffici interessati dalla norma, sono intesi con riferimento ad attività che prevedono oltre 300 occupanti. Pertanto, al fine della stesura del progetto non si riscontrano particolari restrizioni legate alla normativa antincendio, ad eccezione delle eventuali indicazioni recepite dal Comando dei vigili del fuoco per l'approvazione.

- A livello regionale Delibera n. 1887 del 27 maggio 1997 della Regione Veneto, *“Criteri generali di valutazione dei nuovi insediamenti produttivi e del terziario”*. Nella Parte I: *“Requisiti generali degli ambienti di lavoro”*, in breve la norma delinea:
 1. *Strutture edilizie*
 - 1.1 *Tamponamenti (D.lgs. 624/94, art.33 c.9)*

I tamponamenti esterni devono impiegare materiali con bassa trasmittanza termica e sufficiente inerzia termica per garantire il benessere termico degli occupanti e soddisfare le esigenze di isolamento termico nel rispetto della normativa in materia di contenimento dei consumi energetici. Le strutture contenenti lavorazioni particolarmente rumorose devono garantire un adeguato fonoassorbimento, e nel caso di aziende adiacenti o attigue devono abbattere ad almeno 40 dB(A) le emissioni sonore, salvo ulteriori esigenze di contenimento.
 - 1.2 *Coperture (D.lgs. 626/94, art. 33 c. 9).*

Preferibilmente di tipo a shed, devono possedere adeguate caratteristiche di resistenza e modalità di accesso in sicurezza per la manutenzione (ad esempio con punti di ancoraggio)

- 1.3 *Altezza, cubatura e superficie (D.P.R. 303/1965, art.6 come modificato dal D.lgs. 242/96, art.16 c.4)*
a) *altezza netta non inferiore a m. 3;*
b) *cubatura non inferiore a m³ 10 per lavoratore;*
c) *ogni lavoratore deve disporre di una superficie di almeno m² 2.*
- 1.4 *Pavimento (D.lgs. 626/94, art. 33 c.9)*
Deve essere facilmente percorribile e lavabile, privo di asperità, antisdrucciolevole e per terreni umidi deve disporre di vespaio areato sottostante. Ove vi sia la possibilità di spandimenti liquidi devono essere predisposte pendenze, pozzetti e vasche di raccolta per facilitare la pulizia ed il recupero degli spandimenti.
- 1.5 *Caratteristiche delle superfici vetrate (D.lgs. 242/96, art.16 c.5 punto b)*
Non devono comportare pericolo agli occupanti, pertanto devono essere del tipo di sicurezza, e antisfondamento qualora sussistesse pericolo di caduta nel vuoto.
- 1.6 *Porte - uscite di sicurezza (D.lgs. 626/94, art. 33 c. 1 e 2 come modificati dal D.lgs. 242/96, art.16 c 2 e 3)*
Il numero, la distribuzione e le dimensioni delle vie e delle uscite di emergenza devono essere adeguate alle dimensioni dei luoghi di lavoro, la loro ubicazione, destinazione d'uso, attrezzature installate e al numero massimo di persone presenti. Le vie di circolazione e le uscite di emergenza non devono essere ostruite da oggetti o impedimenti, devono essere alte almeno 2m e di larghezza definita dalla normativa antincendio.
Le porte delle uscite di emergenza devono essere facilmente apribili senza aiuto speciale, non devono essere chiuse a chiave o presentare saracinesche a rullo, porte scorrevoli verticalmente o girevoli su asse centrale, e devono essere segnalate dall'apposita segnaletica luminosa di sufficiente intensità, che entri in funzione in caso di guasto dell'impianto elettrico, come per le vie di emergenza.
Similmente le porte dei locali di lavoro e magazzino devono per numero, dimensioni, posizione e materiali di realizzazione consentire la rapida uscita delle persone risultando agevolmente apribili dall'interno. Non sono ammesse porte scorrevoli, saracinesche a rullo, porte girevoli su asse centrale quando non esistano altre porte apribili verso l'esterno, e queste devono disporre di sistemi di sicurezza che ne impediscano la caduta o l'uscita dalle guide. In caso di lavorazioni o materiali che comportino rischi di esplosione o di incendio con più di 5 lavoratori nel locale, si deve disporre almeno una porta apribile verso l'esodo e di larghezza minima 1.2m, ogni 5 lavoratori. Per altre lavorazioni fino a 25 occupanti il locale deve essere dotato di una porta avente larghezza minima di 0.9m.
Le porte devono essere adeguatamente segnalate e le loro superfici trasparenti o traslucide devono essere in materiali che non comportano rischi in caso di rottura.
-

Porte e portoni ad azionamento automatico devono disporre di dispositivi di arresto di emergenza accessibili e devono poter essere aperte manualmente se non automaticamente in mancanza di energia elettrica.

Immediatamente accanto a portoni esclusivamente destinati alla circolazione di mezzi si devono disporre porte pedonali a meno che il passaggio dei pedoni non sia sicuro.

Porte e portoni apribili nei due versi devono disporre di pannelli trasparenti.

1.7 *Scale - Scale di sicurezza (D.P.R. 547/55, art.16 e D.lgs. 242/96, art.16 c. 2)*

Considerando che l'edificio si estenderà in un solo piano, si riportano soltanto le indicazioni utili per un eventuale impalcato interno per uffici, e per scale di servizio di manutenzione alla copertura:

I gradini devono avere pedata di tipo antisdrucchiolo, di almeno 30cm (25cm in alcuni casi), nel rispetto del rapporto $2 \times \text{alzata} + \text{pedata} = 62-64\text{cm}$.

Sui lati aperti vanno disposti parapetti con arresto al piede e in ogni caso corrimani a quota 100cm dal piano di riferimento.

1.8 *Posti di lavoro e vie di circolazione all'aperto (D.lgs. 626/94, art.33 c.13 come modificato dal D.lgs. 242/96, art.16 c. 1)*

Le vie di circolazione vanno collocate e dimensionate in modo che possano essere utilizzate da pedoni e/o veicoli in sicurezza e senza comportare rischi per i lavoratori operanti nelle vicinanze, e in relazione al numero potenziale di utenti e del tipo di impresa. In caso l'uso dei locali o delle attrezzature lo esigano, il tracciato delle vie di circolazione va evidenziato, e comunque devono passare ad una sufficiente distanza da porte, portoni, passaggi pedonali e scale.

Eventuali zone di pericolo per le lavorazioni o il rischio di caduta di operatori, oggetti o carichi sospesi, vanno opportunamente segnalate ed interdette ai lavoratori non autorizzati.

1.9 *Barriere architettoniche (D.lgs. 626/94, art.30 c. 4 e 5)*

I luoghi di lavoro devono essere strutturati tenendo conto, se del caso, di eventuali portatori di handicap. Questo obbligo vige in particolare per porte, vie di circolazione, scale, docce, gabinetti e posti di lavoro utilizzati o occupati direttamente da lavoratori portatori di handicap.

In ogni caso, i dispositivi non automatici di lotta antincendio devono essere facilmente accessibili e utilizzabili, con apposita segnaletica.

Qualora il tipo di attività o la frequenza di infortuni lo richiedano, occorre prevedere uno o più locali adibiti al pronto soccorso, o comunque essere dotati di apparecchi e materiale di primo soccorso facilmente accessibili dove le condizioni di lavoro lo richiedano.

2. *Servizi*

2.1 *WC (D.lgs. 626/94, art.33 c. 12)*

Fino a 10 persone, tra dipendenti, titolare e soci, deve essere presente almeno 1 WC. Oltre le 10 persone devono essere distinti per sesso, e se ne deve disporre almeno un altro ogni 30 ulteriori unità, con ubicazione tale da evitare percorsi esterni al fabbricato. In ogni caso va disposto un antibagno con lavabo, con altezza minima dei locali di servizio di 2.40m, per una superficie utile minima di almeno 1.20m² e lato minimo di 1.00m. La porta di accesso deve essere apribile verso l'esterno, con serratura di emergenza azionabile dall'esterno, indicatore di presenza e fessura di almeno 5cm in caso di ventilazione artificiale.

Ciascun vano WC deve disporre di finestra apribile per almeno 0.4m² o ventilazione artificiale se l'antibagno dispone di finestra o condotta comunicante con l'esterno, e in grado di garantire, se continua, 5 ricambi l'ora, oppure temporizzata, 10 ricambi l'ora.

2.2 *Docce (D.lgs. 626/94, art.33 c. 12)*

In numero pari almeno ad una ogni 5 dipendenti per attività o salubrità che le esigono, direttamente comunicanti con i locali spogliatoi, separatamente almeno nell'utilizzo per uomini e donne. Queste devono disporre di acqua corrente calda e fredda, mezzi detergenti e per l'asciugatura.

2.3 *Spogliatoi (D.lgs. 626/94, art.33 c. 11 come modificato dal D.lgs. 242/96, art.16)*

Superficie in pianta non inferiore a 1.50m² per addetto per i primi 10 occupanti in un turno; 1m² per ogni addetto eccedente i primi 10;

Altezza libera interna di almeno 2.40m;

Ventilazione e areazione naturale diretta nei rapporti 1/10 e 1/20, oppure per ventilazione meccanica un ricambio di 5 volte l'ora. Devono inoltre essere predisposti armadietti personali con chiave e doppio scomparto se del caso.

2.4 *Lavandini (D.lgs. 242/96, art.16 c. 10)*

In numero parti almeno ad uno ogni 5 addetti in un turno, disposti con interasse di almeno 60cm tra gruppi distributori d'acqua (calda e fredda) in linea.

3. *Illuminazione dei locali di lavoro (D.lgs. 626/94, art.33 c. 8 come modificato dal D.lgs. 242/96, art.16 c. 7)*

3.1 *Locali ad uso produttivo (attività di produzione in genere, laboratori e magazzini presidiati)*

L'illuminazione naturale diretta deve avvenire tramite una superficie illuminante, rapportata eventualmente al coefficiente di trasmissione del vetro, per ogni locale pari ad almeno:

1/10 di quella di calpestio, per locali di superficie in pianta fino a 1000m²;

1/12 di quella di calpestio, per la parte eccedente i primi 1000m²;

1/15 di quella di calpestio, per la parte eccedente 3000m² con altezza interna netta superiore a 5m;

In caso di lucernari il 50% della superficie illuminante deve comunque essere collocata a parete, mentre in caso di shed quella a parete può essere ridotta al 25%.

4. Areazione dei locali di lavoro (D.lgs. 626/94, art. 33 c. 6 e 9)

4.1 Locali ad uso produttivo (attività di produzione in genere, laboratori e magazzini presidiati)

L'areazione naturale diretta derivata dalla superficie finestrata apribile, escluse porte e portoni, per ogni locale deve essere almeno:

1/20 di quella di calpestio, per locali di superficie in pianta fino a 1000m²;

1/24 di quella di calpestio, per la parte eccedente i primi 1000m²;

1/30 di quella di calpestio, per la parte eccedente 3000m² con altezza interna netta superiore a 5m;

La superficie apribile deve essere almeno il 50% a parete per lucernari, e il 25% in caso di shed, la sua soglia deve collocarsi al massimo a 2/3 dell'altezza della parete dalla quota del pavimento, e deve essere distribuita uniformemente lungo le superfici a contatto con l'esterno. Zone di lavoro lontane più di 15m dalle finestre devono disporre di aperture sul soffitto.

5. Riscaldamento e condizionamento (D.lgs. 626/94, art.33 c.7)

Nei locali di lavoro va garantito il comfort bioclimatico degli operatori in relazione all'attività svolta; per attività manuali a basso dispendio energetico si ritiene adeguata una temperatura di almeno 16° C, eventualmente tramite riscaldamento localizzato dove non ne è possibile uno generalizzato.

Nella Parte II: "Requisiti specifici per locali destinati ad uffici", la norma delinea:

9.2 Altezza e spazi liberi (D.lgs. 242/96, art.16 c. 4)

L'altezza minima in generale per uffici è di 2.70m, salvo altre norme urbanistiche;

Negli uffici dove è previsto libero accesso del pubblico l'altezza minima è di 3.00m, e la superficie va dimensionata in rapporto all'affluenza prevista;

La superficie minima per addetto deve essere di almeno 4m².

9.3 Illuminazione naturale diretta (D.lgs. 626/94, art.33 c. 8 come modificato dal D.lgs. 242/96, art.16 c. 7)

La superficie illuminante di ogni locale deve essere di almeno:

1/8 di quella di calpestio, per locali entro i 50m², e con un minimo di 1.5m²;

1/10 di quella di calpestio, per la parte eccedente i 50m².

9.5 Areazione naturale (D.lgs. 626/94, art.33 c. 6 e 9)

La superficie finestrata apribile di ogni locale deve essere di almeno:

1/8 di quella di calpestio, per locali entro i 50m², e con un minimo di 1.5m²;

1/10 di quella di calpestio, per la parte eccedente i 50m².

9.7 *Servizi igienici (D.lgs. 242/96, art.16 c. 10)*

La norma riprende quanto detto per quelli al paragrafo 2.1.

- A livello locale, invece, si fa riferimento al Piano degli Interventi del comune di Villamarzana. All'interno del Regolamento Edilizio contenuto in tale piano, la parte terza, al capo IV, "Costruzioni a destinazione speciale", riporta nell'articolo 85 le seguenti precisazioni:
 1. *Gli stabilimenti industriali, i depositi, i magazzini, le autorimesse ed i laboratori in genere, devono sottostare alle norme ed alle prescrizioni stabilite dalle vigenti leggi, devono inoltre uniformarsi alle prescrizioni del presente Regolamento, alle norme per i locali abitabili e per quelli ad essi sussidiari.*
 2. *Sono considerati locali abitabili, gli uffici, i refettori, ecc.*
 3. *Adeguati servizi igienici saranno previsti in ragione del numero degli addetti e comunque nei rispetto della vigente legislazione in materia ed in particolare quanto previsto dal D.P.R. 303/56, D.lgs. 626/96 e successive modifiche ed integrazioni.*
 4. *Per le attività in oggetto al presente articolo si rimanda alla Circolare n° 13 del 1 luglio 1997 del Dipartimento per l'igiene pubblica della Regione Veneto che definisce i criteri generali per la valutazione dei nuovi insediamenti produttivi e del terziario.*
 5. *Per le altezze, la cubatura e la superficie si richiama il rispetto dell'art. 16 D.lgs. 242/1996*

Al capo III, "Requisiti degli ambienti abitabili", nel medesimo documento, sono riscontrabili ulteriori limitazioni per quanto concerne:

Art. 72 Locali abitabili

1. *Sono considerabili di abitazione permanente tutti i locali in cui la permanenza di una o più persone abbia continuità come uffici.*
 2. *Non sono considerati abitabili magazzini, depositi, archivi, o con la presenza soltanto saltuaria di persone come servizi igienici, disimpegni, ingressi.*
 3. *I locali ad abitazione permanente devono avere i requisiti del D.M. 05/07/1975:*
 - b) *Superficie di illuminazione e areazione comunicante con l'esterno di almeno 1/8 del pavimento.*
 - c) *Superficie abitabile non inferiore a 14m² per i primi 4 abitanti e 10m² per ciascuno dei successivi.*
 4. *Nei locali adibiti ad usi collettivi (sale riunione) l'altezza deve essere di 3.00m anche per i piani successivi al piano terra.*
 6. *L'altezza minima per locali ad uso ufficio non a servizio della collettività è 2.70m.*
-

Art. 73 Locali accessori

1. *Ai sensi dell'art. 1 del D.M. 05/07/1975, l'altezza minima di questi locali è di 2.40m.*

Art. 75 Locali per servizi igienici

6. *I locali WC negli insediamenti produttivi possono avere dimensioni minime di mq 1,00 per 1,20, ovviamente dotati di anti-WC e dei requisiti di aeroilluminazione previsti dalla Circ. Regione Veneto 13/1997.*

Art 80 Corridoi e disimpegni

1. *I corridoi e disimpegni possono essere illuminati e areati in modo indiretto.*

2. *L'altezza minima è di 2.40m, la larghezza minima di 1.00m.*

4.5 Analisi dimensionale

Per quanto riguarda il nucleo produttivo, le dimensioni minime dello stabilimento sono dettate dai macchinari da disporre al suo interno, dai reparti lavorativi e ambienti di servizio o transito necessari all'attività, nonché dalle normative vigenti per i luoghi di lavoro riportate al precedente paragrafo. In particolare, per soddisfare le esigenze dell'azienda, lo stabilimento richiede una metratura adeguata a collocare all'interno:

- **Pialla:** di larghezza pari a 2.5m e lunghezza 19m, comprensivi della postazione dell'operatore e dell'area di carico e scarico degli elementi soggetti alla lavorazione.
 - **Centro di taglio:** macchinario più ingombrante, per una larghezza di 7m a cui si aggiunge una postazione per l'operatore distanziata di altri 1.5m, e una lunghezza di 44m, considerando le zone di carico e scarico degli elementi da lavorare. Il macchinario presenta una porzione centrale, dove sono presenti i pistoni di manovra, che sporge di 1.5m rispetto al resto delle corsie laterali. Questa porzione potrebbe essere realizzata in una nicchia sporgente, fino 1.5m rispetto la parete esterna dello stabilimento, senza che questa venga computata nella metratura utile per il regolamento del comune. La medesima tettoia sporgente, può essere utilizzata per coprire il compressore dell'impianto di aspirazione dei trucioli.
 - **Sega a nastro:** macchinario di dimensioni ridotte, 1.5x1.5m, leggero e trasportabile secondo evenienza, per un carico e scarico più agevole dei elementi da tagliare. Pur trattandosi di una macchina da carpenteria, può essere inserita nei successivi reparti di falegnameria, perché similmente utilizzata in modo più sporadico.
 - **Truciolatrice:** macchinario di dimensioni ridotte, pari a 2.5x1.5m, leggero, ma collegato all'impianto di aspirazione dei trucioli, quindi da considerarsi fisso salvo impiantistica apposita.
 - **Reparti di falegnameria:** non vi sono indicazioni precise sulla metratura necessaria per queste lavorazioni, se non la disponibilità di spazio sufficiente ad alloggiare i prodotti che possono raggiungere lunghezze di 20m. Ad ogni modo, non sussiste la
-

necessità di dislocare in reparti separati le singole lavorazioni di falegnameria, come la piallatura con pialla da banco, la bruciatura con cannello a gas e la successiva rusticatura, poiché tali attrezzi sono facilmente trasportabili e le operazioni vengono eseguite su richiesta, poco di frequente. Di conseguenza, lo stesso spazio può essere sfruttato in tempi diversi dai vari operatori, avendo l'accortezza di ravvicinare una postazione con pialla da banco all'impregnatrice, essendo questa spesso utilizzata per aggiustamenti finali sui prodotti.

- **Impregnatrice:** di larghezza pari a 2m e lunghezza di 12m, comprensivi della postazione per l'operatore e della zona di carico e scarico. Il posizionamento di questa macchina è preferibile più distanziato possibile dalle altre lavorazioni, che producono inevitabilmente polvere, anche se non richiede compartimentazioni particolari. Seguendo le indicazioni dei vigili del fuoco, nonostante le emissioni già risultino inferiori ai livelli di legge grazie all'impiego di impregnanti esclusivamente idraulici, va prevista una cappa aspirante in uscita dal macchinario.
 - **Deposito impregnante:** per il deposito dei prodotti per l'impregnatura è sufficiente un ambiente chiuso di 10m², con resistenza al fuoco REI60 secondo le indicazioni dei vigili del fuoco, seppur la normativa non preveda, nel caso di impregnanti idraulici alcuna necessità antincendio, ma la sola presenza di un pozzetto e vasca in fondazione che prevenga eventuali sversamenti in falda dei prodotti.
 - **Uffici tecnici:** la richiesta della committenza prevede una superficie di 42m² destinata agli uffici per il personale tecnico dello stabilimento, collocabili anche ad un piano rialzato, per un totale di 8 dipendenti. Da normativa per gli uffici risulta un'altezza minima di 2.70m e una superficie minima dei locali di 9.00m², ammettendo quindi la suddivisione del totale in 4 stanze separate, come secondo richiesta della committenza.
 - **Ufficio per documenti di accompagnamento:** si stima sufficiente uno spazio di 16m², collocato al piano terra, possibilmente collocato in vicinanza della fine del ciclo di lavorazione e in corrispondenza del portone per l'uscita dei prodotti dallo stabilimento. Per le dimensioni di questo ambiente vale quanto in precedenza per gli altri uffici.
 - **Spogliatoi:** nessuna particolare richiesta da parte della committenza, pertanto si considerano soltanto le indicazioni minime normative, con altezza di 2.40m, e la più gravosa tra la superficie di 1.50m² ad occupante per i primi 10, e ulteriori 1.00m² per gli occupanti eccedenti, oppure 1.20m² ad occupante e con un minimo di 6.00m²; combinando le misure più restrittive delle norme locali e regionali.
 - **Docce:** nessuna particolare richiesta da parte della committenza, da normativa risultano in numero pari ad almeno una ogni 10 dipendenti, con altezza minima di 2.40m e superficie di almeno 1.00m² per lavoratore.
-

- **Bagni:** nessuna richiesta da parte della committenza, da normativa si deve disporre di almeno un WC fino a 10 dipendenti, e un ulteriore bagno, diviso per sesso, ogni ulteriori 30 dipendenti. Ogni bagno deve avere superficie minima di 2.00m² e lato minimo di 1.00m, inoltre deve disporre di ventilazione naturale o artificiale, e di antibagno con almeno un lavandino ogni 5 addetti.
- **Spazi di transito:** le dimensioni di questi spazi sono dettate, secondo tolleranze di legge, da quelle dei carrelli elevatori (2x2.5m), dei prodotti (possono variare per pannelli in CLT o travi che raggiungono anche 20m di lunghezza), e delle manovre che questi devono compiere per il passaggio tra le diverse lavorazioni, l'ingresso e l'uscita dello stabilimento. In generale, la committenza specifica che dimensioni di campata molto estese, senza pilastri intermedi, permettono una movimentazione più agile dei prodotti all'interno dello stabilimento, con meno rischi anche per gli operatori; di conseguenza, al fine di determinare la luce massima tra i pilastri si consideri la dimensione maggiore disponibile, ma al contempo compatibile all'analisi del costruito per massimizzarne l'applicabilità.

In generale, i locali produttivi, escludendo quindi uffici e servizi, per il nucleo chiuso dell'edificio, devono avere altezza utile superiore a 3.00m. Pertanto, confrontando anche le linee guida definite al paragrafo 3.2, risulta adeguata la richiesta della committenza di un'altezza utile pari a 6.00m per il fabbricato. Eventuali aggiustamenti in altezza potrebbero risultare necessari al fine di sviluppare gli uffici su due piani.

Le maglie strutturali, invece, dovranno tenere conto del materiale impiegato, dell'esigenza di campate quanto più grandi possibile per la movimentazione di prodotti con lunghezze notevoli, e della volontà di progettare una soluzione applicabile anche su strutture esistenti, con le minime modifiche del caso. Di conseguenza, per la luce maggiore di campata è auspicabile il massimo valore tra quelli rappresentativi, emersi dall'analisi sulle strutture esistenti e ripresi nelle linee guida del paragrafo 3.2, pari a 18 metri lineari.

Per l'interasse tra i pilastri, rimane indicativa l'indicazione delle linee guida per valori compresi tra 7 e 13m, tenendo però in considerazione le esigenze dimensionali delle aperture per il transito di mezzi (prevedendo almeno due aperture in entrata larghe 6m ciascuna, e una in uscita larga 12m), e quelle relative alle prestazioni del materiale scelto per gli elementi costruttivi al seguente paragrafo.

La struttura deve inoltre disporre di uno spazio coperto per il deposito delle materie prime e dei prodotti intermedi, disposto anche all'aperto, ma in grado di garantire protezione dall'irraggiamento solare diretto e dalla pioggia. L'azienda non necessita di particolari spazi per lo stoccaggio dei prodotti finiti, in quanto questi vengono spediti entro un giorno dal termine della lavorazione, e calcola come sufficiente a soddisfare le necessità di stoccaggio un'area coperta minima pari a 300m², ma in grado di contenere elementi dalla massima lunghezza di 20m.

Ai fini di massimizzare l'efficienza di questo magazzino, considerando le dimensioni delle corsie per il passaggio dei carrelli elevatori pari a 2.20m, e la profondità occupata dalla gran parte dei prodotti in arrivo o degli imballi tradizionali pari a 1.25m, risulta conveniente disporre le colonne di sostegno della copertura ad interasse di 5.00m o multipli di tale valore; in modo da disporre per ogni campata una via di corsa centrale e due file di prodotti accessibili da essa. L'altezza libera della copertura si può allineare a quella del restante fabbricato conferendo continuità al complesso, in quanto le forche dei carrelli elevatori, sia di tipo frontale, che trilaterale, a disposizione dell'azienda, raggiungono una altezza massima di 4.50m, con estremità superiore in battuta a 5.20m.

Infine, all'esterno dello stabilimento, devono essere previsti gli spazi per il container di raccolta dei trucioli (dimensioni standard di 2.5 x 6.0m), della zona di manovra per i mezzi pesanti in arrivo e in uscita e dei parcheggi per i dipendenti.

4.6 Scelta dei materiali

Al fine di scegliere i materiali e le tecniche costruttive per la realizzazione del progetto, è necessario tenere in considerazione diversi fattori.

Il primo è la sicurezza e l'efficienza strutturale raggiungibile tramite l'utilizzo di materiali largamente studiati ed impiegati come il calcestruzzo, l'acciaio e più di recente il legno. Le strutture di carattere industriale, infatti, hanno storicamente fatto largo uso del calcestruzzo armato e dell'acciaio a causa delle loro performance di resistenza, che permettono la realizzazione di campate con notevoli dimensioni. La diffusione e la ricerca riguardo tali prodotti, portano negli anni ad una conoscenza avanzata delle loro proprietà fisiche, garantendo livelli di sicurezza ed efficienza elevati. Soltanto in tempi più recenti, a questi capisaldi dell'edilizia strutturale si aggiunge il legno, che richiede particolari accorgimenti per raggiungere livelli competitivi ai precedenti, ma che presenta una serie di qualità a loro mancanti, pur trattandosi di un prodotto naturale e più difficile da gestire. Infatti, con le tecnologie attuali, come la giustapposizione di lamelle di legno bidirezionali a formare pannelli o travi di Cross Laminated Timber (CLT) e le resine ad alta resistenza, le prestazioni strutturali del legno hanno raggiunto livelli competitivi nel settore.

Un secondo fattore importante è la sicurezza in campo antisismico della struttura da realizzare, in quanto, a seguito della deliberazione della Giunta Regionale n.244 del 9 marzo 2021, la zonizzazione sismica della regione si aggrava rispetto alla precedente norma del 2003. In particolare, sia la provincia di Padova che di Rovigo, passano dalla zona 4 alla zona 3, comportando l'inadeguatezza dal punto di vista sismico di numerose strutture industriali progettate per il livello di sicurezza inferiore. La risposta sismica delle strutture è direttamente influenzata dai materiali utilizzati, in quanto l'azione cinetica del terremoto si relaziona direttamente alla massa in gioco.

Quindi, materiali leggeri, a parità di prestazioni, sono di preferibile impiego specialmente per ridurre le masse sospese di travi e solai. Il legno è il materiale più indicato per il suo peso ridotto rispetto al calcestruzzo, e una soluzione strutturale in legno può essere impiegata, anche soltanto in copertura, per l'adeguamento sismico delle strutture esistenti non più adatte secondo la nuova normativa.

Un'ulteriore considerazione riguarda sempre il peso del materiale da impiegare, per includere nel progetto delle soluzioni architettoniche adattive. Al fine di ottenere la mobilità di componenti anche strutturali, è infatti indispensabile fare uso di materiali quanto più leggeri possibile. Perciò, ancora una volta, la scelta va indirizzata ai materiali più leggeri come il legno e l'acciaio almeno nelle parti mobili della struttura.

Grazie alla sensibilizzazione sui temi di risorse rinnovabili e sostenibilità, divenuti centrali nella società odierna, una particolare attenzione va posta sulla sostenibilità ambientale ed energetica dell'intervento edilizio che si vuole realizzare. Per ridurre l'impronta di carbonio rilasciato in atmosfera, il settore delle costruzioni punta sempre di più sull'integrazione di fonti di energia rinnovabile, sulla sostenibilità e sul riutilizzo dei materiali impiegati. Pertanto, il legno risulta il migliore materiale sotto questi aspetti, in quanto, grazie ai naturali processi di fotosintesi, permette di fissare il carbonio assorbito dall'atmosfera durante la sua crescita vegetativa, per rilasciarlo soltanto al termine della sua vita utile quando è bruciato o degradato da processi biologici. Un metro cubo di legno può sottrarre all'atmosfera e conservare al proprio interno anche 1000kg di anidride carbonica, mentre per la produzione dello stesso volume di calcestruzzo o di acciaio, vengono immessi in atmosfera rispettivamente 2500 e 5000kg di CO₂. Inoltre, il legno rappresenta una risorsa rinnovabile, fintanto la gestione del patrimonio forestale rimane esercitata in modo sostenibile, oltre ad essere più facilmente riutilizzabile al termine del suo ciclo di impiego, come combustibile.

Altri fattori che possono concorrere alla scelta del materiale da utilizzare, sono le preferenze estetiche del committente, l'accessibilità economica, la sua disponibilità a livello locale senza percorrere eccessive distanze e le prestazioni termiche dello stesso, pur essendo meno rilevanti nell'ambito industriale rispetto ad altre tipologie edilizie.

Al termine della soppesata valutazione dei fattori in gioco, si sceglie il legno come materiale strutturale e per i tamponamenti perimetrali e di copertura, completato da inserti metallici di giunzione per garantire la duttilità dei collegamenti, e da una soletta fondazionale in calcestruzzo armato per prevenire gli effetti deterioranti dell'umidità del suolo sul legno strutturale e garantire la stabilità del complesso.

4.6.1 Il legno

Il legno è un materiale utilizzato dall'umanità per un'ampia gamma di applicazioni, sin da tempi antichi. Le sue naturali caratteristiche meccaniche di resistenza derivano dalla necessità per i vegetali arborei di raggiungere quanta più luce solare possibile tramite l'estensione di fusto, rami e foglie, al fine di produrre più energia tramite il processo di fotosintesi. Il ciclo di Calvin che dà luogo alla fotosintesi clorofilliana è alla base della sostenibilità ambientale del materiale, derivata principalmente dalla sua capacità di immagazzinare al suo interno l'anidride carbonica, che combinata con l'acqua viene sfruttata per creare zuccheri. Tale sostanza emessa da svariate fonti energetiche, costituisce uno dei principali agenti del riscaldamento climatico, e può essere in parte sequestrata dall'atmosfera all'interno del legno. Gli atomi che compongono l'anidride carbonica sono sperati dalla fotosintesi che libera l'ossigeno e lega il carbonio nelle strutture cellulari della pianta. Questo permette di sottrarre dal bilancio globale, seppur temporaneamente, una tonnellata di anidride carbonica al metro cubo di legno, fino a quando questo non viene deteriorato dai naturali processi di biodegradazione o di combustione.

La combustibilità del legno, derivata dall'ottima capacità di restituire l'energia immagazzinata dai processi fotosintetici, ne permette l'utilizzo, al termine del suo ciclo vitale, come fonte energetica di discreta efficienza. Questo ultimo impiego del materiale avviene però soltanto dopo un utilizzo "a cascata" dello stesso, che prevede il passaggio da materia prima, a materiale strutturale e successivamente anche non strutturale, prima dello smaltimento. Si può quindi desumere che il legno disponga di ottime possibilità di reimpiego e recupero, specialmente in quanto si presta a soluzioni di messa in opera a secco, che richiedono quindi meno risorse per lo smantellamento al termine della vita utile dell'opera.

Occorre però specificare che la risorsa naturale del legno va considerata rinnovabile solamente fintanto che le foreste siano soggette ad una gestione corretta e sostenibile. In passato i disboscamenti per la produzione di legno e l'espansione urbana o agricola hanno portato alla decimazione del patrimonio forestale europeo e del nord-est America, ma, mentre queste realtà hanno attualmente stabilito criteri e certificazioni per contrastare il fenomeno e portando ad un incremento della superficie forestale, in altri territori l'abbattimento di foreste di primaria importanza come quelle equatoriali, continua ad un ritmo preoccupante. Nonostante questo la richiesta volumetrica di legno destinato al settore delle costruzioni rappresenta soltanto una piccola porzione delle attuali capacità rigenerative delle foreste a livello europeo, pertanto rimane una risorsa estremamente sostenibile, soprattutto confrontata agli altri materiali impiegati nello stesso settore.

4.6.2 Struttura del legno

Il legno deve le sue caratteristiche meccaniche alla particolare struttura organica che lo forma. Si può considerare questo materiale secondo 4 diversi livelli di dettaglio:

- **A livello molecolare:** il legno è composto da carbonio, ossigeno, idrogeno, altre sostanze minerali e azoto che formano dei composti chiamati cellulosa, emicellulose, lignina, o altre sostanze estrattive come la pectina, presenti in minore quantità. In ordine, tali composti conferiscono rispettivamente resistenza a trazione e taglio, flessibilità e resistenza alla compressione. Inoltre, queste sostanze possono essere singolarmente mirate da attacchi biotici di diversa natura.
- **A livello nanoscopico:** le strutture e le catene molecolari si organizzano in ordinate microfibrille longitudinali, che si raggruppano in fibre perlopiù parallele allo sviluppo del tronco. Questa direzionalità nella struttura interna del legno determina il suo comportamento marcatamente anisotropo, rispetto a sollecitazioni di trazione o compressione parallele e perpendicolari alla fibratura (figura 4.6.2.1). Essendo le fibre raccolte in fasci da un collante meno resistente, le sollecitazioni parallele al loro sviluppo incontrano una notevole resistenza, salvo instabilità in compressione, mentre la compressione perpendicolare alle fibre comporta lo schiacciamento dei vasi al loro interno con una resistenza ridotta. Infine, la resistenza al distacco delle fibre per trazione perpendicolare è ancora inferiore alla precedente.

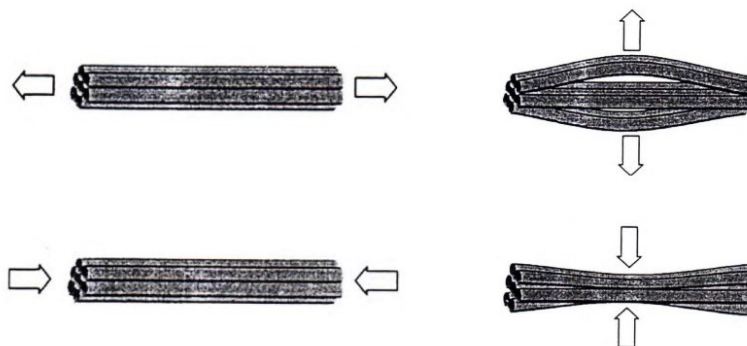


Figura 4.6.2.1: Rappresentazione delle tipologie di sollecitazioni rispetto la direzione della fibratura.

- **A livello microscopico:** le fibre precedenti si sviluppano secondo anelli circolari di fasci paralleli e raggi che vanno a formare nodi e rami. Tuttavia, escludendo questi ed altri difetti come ad esempio lo sviluppo di fibre ritorte e cretti, si può semplificare la struttura del materiale. Assumendo anche che le sollecitazioni radiali (R) e tangenziali (T), allo sviluppo circolare dei fasci di fibre, siano contrastate da una simile resistenza, di molto ridotta rispetto a quella per azioni longitudinali alle fibre (L). Si ottiene così il modello meccanico del legno netto (figura 4.6.2.2).

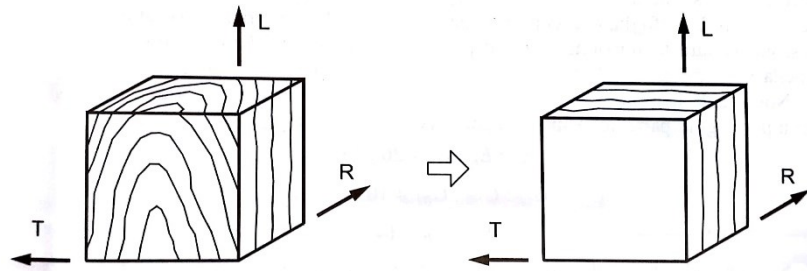


Figura 4.6.2.2: Modello semplificato del legno netto, con assi longitudinale *L*, radiale *R* e tangenziale *T*.

Il modello viene utilizzato applicandovi severi fattori riduttivi, per considerare le imperfezioni e i difetti riscontrabili nel caso reale, dove non tutte le fibre sono perfettamente parallele e a seconda della specie legnosa e dell'ambiente in cui si trova a crescere, si possono incontrare varie eterogeneità. In particolare, al microscopio, si possono distinguere chiaramente le specie omoxile ed eteroxile:

Le prime sono formate per il 95% da cellule oblunghe e identiche, chiamate fibrotracheidi, che svolgono sia la funzione di sostegno del fusto, che di trasporto dei liquidi. Questa omogeneità appartiene alle gimnosperme (conifere), dove la distinzione stagionale tra tracheidi è più marcata dal colore scuro di quelle tardive. Le specie eteroxile usate nelle costruzioni, sono invece appartenenti al gruppo delle angiosperme dicotiledoni (latifoglie ad esclusione delle specie monocotiledoni dove l'attività vegetativa non è interrotta dalla pausa invernale come palme ed erbacee). In queste varietà legnose, le cellule si distinguono in tracheidi e trachee (dette vasi), per svolgere diverse funzioni di sostegno e trasporto (figura 4.6.2.3).

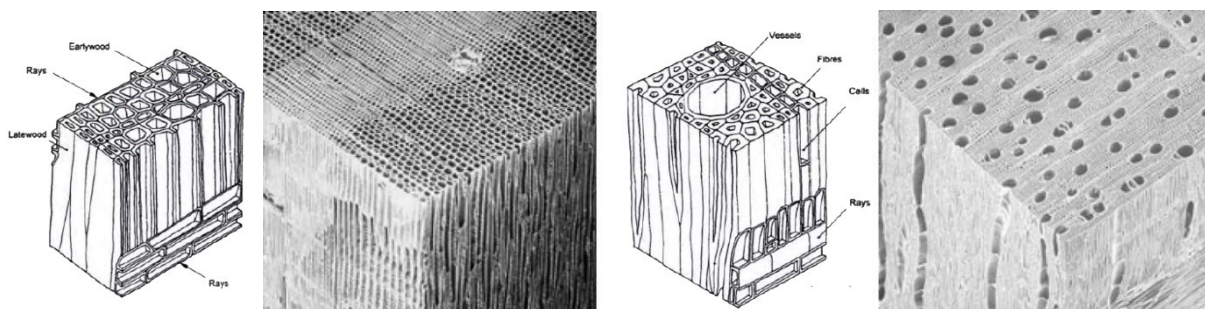


Figura 4.6.2.3: Schemi e ingrandimenti microscopici 250x di legno di conifera a sinistra, e latifolia a destra.

- **A livello macroscopico:** si possono distinguere ad occhio nudo delle proprietà del materiale che emergono dalla sua struttura e dal suo sviluppo. Ogni tronco infatti cresce in diametro secondo una serie di cerchi concentrici, distinguibili ad occhio nudo a causa delle variazioni climatiche stagionali. Ogni anello di accrescimento, infatti, è influenzato dalle condizioni ambientali del periodo della sua formazione, dando luogo ad una struttura a strati concentrici (figura 4.6.2.4), formata da:

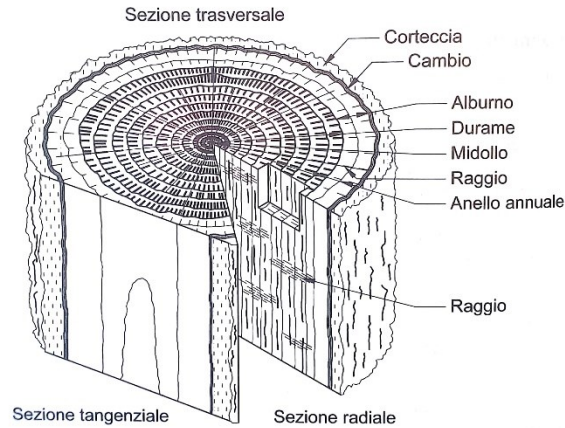


Figura 4.6.2.4: Schematizzazione del tronco, delle sue parti e delle sezioni trasversale, radiale e tangenziale.

Midollo, cuore al centro del tronco, formato nel primo anno di vita;

Durame, verso il cuore interno del tronco, più vecchio, durevole e resistente;

Alburno, strato più giovane e vivo, attraverso cui scorre la linfa grezza;

Cambio cribro-vascolare, sottile anello di cellule meristematiche che producono i tessuti precedenti (xilema) e la corteccia verso l'esterno (floema);

Corteccia, la cui parte interna (libro) trasporta le sostanze dalle foglie verso il basso, e la cui parte esterna svolge una funzione di protezione degli altri tessuti.

4.6.3 Caratteristiche meccaniche

Per la sua conformazione strutturale vista al paragrafo precedente, il legno mostra caratteristiche meccaniche di resistenza fortemente direzionali. L'anisotropia del materiale comporta una variabilità nella resistenza parallela e perpendicolare alle fibre. La prima raggiunge, per le curve tipiche del legno di conifera, valori di 90 - 100 MPa in trazione e 40 - 50 MPa in compressione, ma si riduce ad appena 1 - 2 MPa o 2 - 5 MPa rispettivamente per la trazione e la compressione perpendicolari (figura 4.6.3.1).

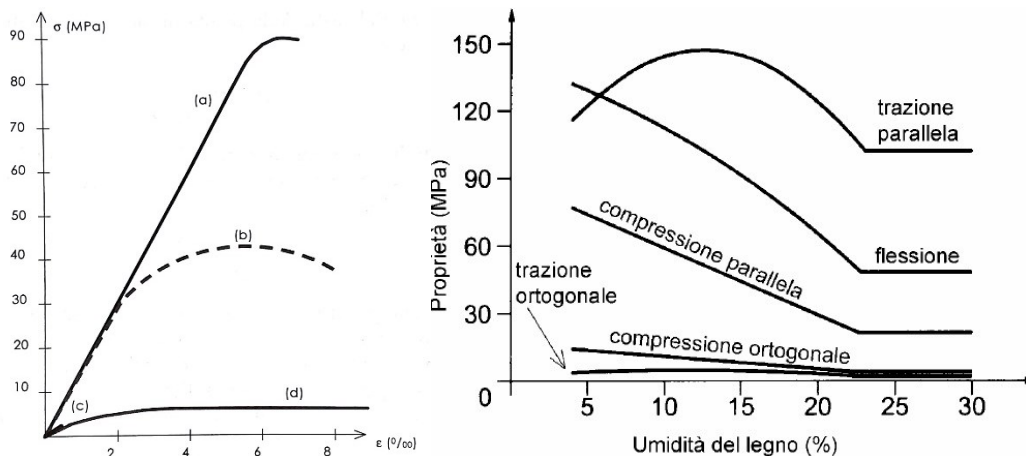


Figura 4.6.3.1: A sinistra, diagramma tensione-deformazione tipico per il legno netto anidro di conifera.

Figura 4.6.3.2: A destra, variazione di resistenza al variare del contenuto di umidità del legno di abete.

Questi valori sono riferiti al legno netto anidro, di conseguenza, è necessario considerare dei fattori restrittivi per passare al legno massiccio, che tengano conto dei difetti, oltre a verificarne il contenuto di umidità.

L'essiccazione del legno è infatti un processo fondamentale per il legno da costruzione, che deve garantire un contenuto di umidità sotto al 18% al momento della posa in opera, in modo da raggiungere l'equilibrio igrometrico (per una umidità relativa esterna del 65% e temperatura di 20°C), corrispondente a circa il 12%, senza sviluppare eccessive fessurazioni per la differenza tra coefficienti di ritiro tangenziali e radiali, dette cretti da ritiro. Questo perché le fibre legnose sono naturalmente igroscopiche, e già ad un'umidità del 25 - 30%, si trovano al punto in cui i gruppi ossidrilici delle pareti cellulari raggiungono la saturazione, legando le molecole d'acqua con ponti idrogeno. Superato tale valore detto Punto di Saturazione delle Fibre (FSP), l'acqua libera inizia a riempire anche i lumi cellulari, comportando un incremento volumetrico oltre che di peso. Qualsiasi incremento di umidità, rispetto al legno essiccato, comporta una grave riduzione delle resistenze (figura 4.6.3.2), e può favorire attacchi biotici di muffe e insetti, superata la soglia del 20%.

Un'ultima caratteristica del materiale, che potrebbe risultare controintuitiva, è la sua resistenza in caso di incendio. Nonostante sia un buon combustibile, il legno presenta una ottima resistenza al fuoco, misurata in termini di tempo, dalle apposite sigle "R" dalla normativa antincendio, poiché la combustione provoca una degradazione della sezione resistente abbastanza lenta, di circa 0.7 mm al minuto, che consente l'uscita in sicurezza dell'utenza. Una particolare attenzione va posta però nei giunti metallici tra le diverse membrature lignee, che esposti alle alte temperature vedono ridotte le loro caratteristiche di resistenza, rischiando di portare al collasso fragile della struttura, se non appositamente calcolate con un adeguato spessore di coprilegno.

Il legno rimane comunque controindicato per attività soggette ad un particolare rischio incendio, in quanto la sua reazione al fuoco tende ad alimentare le fiamme essendo un combustibile, inoltre, un secondo punto a cui prestare attenzione è il comportamento di rottura del materiale. Come si può desumere dai precedenti diagrammi, il legno è naturalmente soggetto a rottura fragile, ma l'utilizzo di giunti metallici come viti e bulloni, obbligatori anche in aggiunta a incastri di carpenteria, permette di ottenere un comportamento pseudo-plastico con buone deformazioni prima della rottura.

4.6.3 Legno lamellare

Il legno risulta quindi un materiale di complessa applicazione, a causa della sua eterogeneità intrinseca, che comporta fattori riduttivi per le sue proprietà meccaniche. Ma la conoscenza e lo studio del suo sviluppo, permettono il suo utilizzo con fattori di incertezza sempre più ridotti. Grazie a tecniche di taglio e assemblaggio mediante resine

sintetiche e giunti a pettine, è infatti possibile rimuovere un buon numero dei difetti diffusi nel legno grezzo quali nodi, fibre deviate e sacche di resina, incrementando così le prestazioni meccaniche del legno da costruzione.

La tecnologia, che negli ultimi anni ha permesso in questo modo un migliore impiego del legno, è chiamata legno lamellare (Cross Laminated Timber, CLT). Questa prevede il taglio dei tronchi in tavole, di spessore solitamente 40 o 33mm, per il successivo incollaggio in elementi di dimensioni anche notevoli. L'utilizzo di lamelle sottili permette il taglio dei difetti, una più rapida essiccazione e consente anche di disporre le tavole successive in direzione ruotata di 90 gradi, per ottenere elementi bidirezionali resistenti e meno soggetti al naturale ritiro e fluage lungo le stesse. Le lamelle raggiungono in genere una base massima commerciale di 22cm. A limitare le travi lamellari snelle, sono quindi le verifiche di svergolamento e stabilità dell'equilibrio, ma rispetto ad altri materiali sono ottime per realizzare elementi curvi, imponendo una deformazione durante l'incollaggio e sfruttando le proprietà viscoso elastiche del materiale per recuperare nel tempo la resistenza ridotta dalla deformazione iniziale. Le verifiche più stringenti sul materiale rimangono quelle per deformazioni e vibrazioni di esercizio, e quella al taglio per gli stati limite ultimi, soprattutto se ha due componenti perpendicolari alle fibre (Rolling Shear).

A seguito di queste considerazioni per la realizzazione dell'intervento, si sceglie di impiegare colonne, travi e orditure strutturali in legno lamellare. La specie legnosa di appartenenza delle lamelle costituenti sarà da scegliere tra quelle localmente disponibili e diffuse, di conseguenza restringendo la scelta tra abete rosso, abete bianco, larice e pino, in quanto il legno di latifolia risulta meno impiegato a causa della sua compattezza che richiede l'utilizzo di prefori per l'inserimento delle viti alle giunzioni.

La classe di resistenza potrà variare in accordo alle necessità strutturali, secondo quanto calcolato nei in sede di verifica, ma per quanto possibile sarà mantenuta pari a quella degli elementi commercialmente più diffusi, ossia facendo uso di prodotti GL24h oppure GL24c.

4.6.3 Normativa di riferimento per il legno da costruzione

Nel contesto nazionale italiano, le norme di riferimento per le costruzioni in legno sono, a partire dal 2008 e dal successivo aggiornamento del 2018, le Norme Tecniche per le Costruzioni, i cui capitoli 4.4, 7.7 e 11.7, trattano rispettivamente di: *“costruzioni di legno”*, *“Costruzioni di legno nella progettazione per azioni sismiche”*, e *“Materiali e prodotti a base di legno”*.

Questa normativa che include indicazioni per molteplici prodotti in legno, dal massiccio al lamellare, non risulta però esaustiva in alcuni argomenti, come le verifiche di resistenza agli Stati Limite Ultimi per la tensione perpendicolare alle fibre, per le quali rimanda ad *“altre normative di comprovata validità”*, elencate a seguito:

Per quanto non diversamente specificato nella presente norma, si intendono coerenti con i principi alla base della stessa, le indicazioni riportate nei seguenti documenti:

- a. Eurocodici strutturali pubblicati dal CEN, con le precisazioni riportate nelle Appendici Nazionali;*
- b. Norme UNI EN armonizzate i cui riferimenti siano pubblicati su Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea; 4.3.*
- c. Norme per prove su materiali e prodotti pubblicate da UNI.*

Inoltre, a integrazione delle presenti norme e per quanto con esse non in contrasto, possono essere utilizzati i documenti di seguito indicati che costituiscono riferimenti di comprovata validità:

- a. Istruzioni del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;*
- b. Linee Guida del Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;*
- c. Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale e successive modificazioni del Ministero per i Beni e le Attività Culturali, previo parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici sul documento stesso;*
- d. Istruzioni e documenti tecnici del Consiglio Nazionale delle Ricerche (C.N.R.).*

Di conseguenza, in ambito europeo, per la progettazione di strutture in legno si può fare principalmente riferimento alle seguenti:

- Eurocodice 5 EN 1995-1-1 *“Design of timber structures. General. Common rules and rules for buildings”*;
- EN 1995-1-2 *“Design of timber structures. General. Structural fire design”*;
- EN 1995-2 *“Design of timber structures. Bridges”*;
- DIN 1052:04 *“Entwurf, berechnung und bemessung von holzbauwerken”*, Germania
- SIA 265:2003 *“Timber structures”*, Svizzera.

4.7 Individuazione delle soluzioni adattive

Al fine di individuare le soluzioni adattive da applicare nel caso studio, tenendo conto delle linee guida indicate al paragrafo 3.2, vanno considerate di primaria importanza anche le richieste dell'azienda committente, e l'obiettivo di realizzare un intervento modello, applicabile anche in edifici costruiti con le minime demolizioni e modifiche. Inoltre, al fine di minimizzare il consumo di suolo, si prediligono soluzioni che comportino una variazione volumetrica dell'intero fabbricato per le sue parti dove questa variabilità può essere sfruttata al meglio.

Si propone quindi di realizzare un elemento adattivo di copertura, in quanto questa risulterebbe più facilmente applicabile a casi esistenti, in grado di estendersi e restringersi secondo necessità, per coprire i depositi di materie prime e semilavorati

stoccati dall'azienda. Tale copertura mobile dovrà essere progettata per rispondere al meglio alle variazioni volumetriche delle merci da essa protette, garantendo una velocità nella movimentazione adeguata alle tempistiche per cui queste variazioni avvengono. Secondo la richiesta dell'azienda, non è necessario proteggere tali prodotti con un involucro completamente chiuso, ma dovrà esserne garantita la copertura dalle intemperie e dal costante irraggiamento solare diretto.

Di conseguenza, riprendendo le macrocategorie di soluzioni adattive riportate in figura 2.3.1, se ne individuano le migliori in termini di efficienza ed interoperabilità, al fine di realizzare una copertura mobile (figura 4.7.1).

Macrocategoria	Efficienza	Interoperabilità
Volume che trasla in direzione orizzontale	37%	63%
Pannelli di copertura che ruotano secondo un centro di rotazione d'estremità	30%	36%
Componenti che mediante rotazione e traslazione espandono la loro superficie	36%	31%

Figura 4.7.1: Efficienza ed interoperabilità percentuali delle categorie adattive scelte per il caso studio.

Si ipotizza quindi la realizzazione di una copertura esterna, con pannelli ripiegabili e carrelli alla base o in sommità ai pilastri, che ne permettano lo scorrimento orizzontale e il conseguente incremento di volume coperto.

La copertura prende come riferimento le attuali tecnologie utilizzate per pergole bioclimatiche estensibili (figure 4.7.2 e 4.7.3), e per strutture a pantografo mobili di carattere industriale (figura 4.7.4). Si propone inoltre di sviluppare da tali tecnologie una soluzione che incorpori elementi strutturali e pannelli di copertura in legno, in quanto queste presentano maggiori difetti che possono pesare sulla loro applicazione per la realizzazione di uno stabilimento industriale.



Figura 4.7.2: A sinistra, pergola bioclimatica estensibile in configurazione aperta.

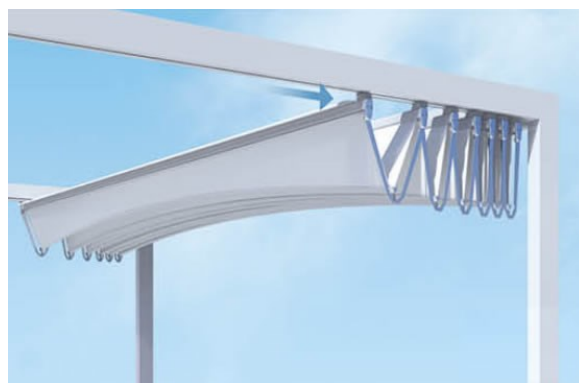


Figura 4.7.3: A destra, pergola bioclimatica estensibile in configurazione richiusa.



Figura 4.7.4: Tunnel mobile retrattile su binari, per applicazione industriale, con struttura in acciaio e PVC.

In particolare emerge dai sopralluoghi e dalle interviste effettuate al paragrafo 1.4, che numerosi stabilimenti impiegano correntemente delle strutture mobili a pantografo, realizzate in montanti e controventi di acciaio e chiuse soltanto da un telo in materiale plastico come PVC o simili. Queste strutture temporanee, utilizzate spesso come deposito di materiali oppure come ampliamenti dello stabilimento principale, presentano una variazione di temperatura al loro interno pari, se non aggravata rispetto a quella stagionale. La mancanza di isolamento termico di tali chiusure perimetrali, abbinata al sole battente o alla collocazione in ombra del fabbricato principale, risulta un fattore determinante per il raggiungimento di temperature troppo elevate d'estate e troppo basse d'inverno per il comfort ambientale o addirittura per la conservazione delle merci e l'operatività dei macchinari contenuti all'interno di queste strutture.

La tecnologia utilizzata per la realizzazione di pergole bioclimatiche esterne, invece, è pensata per mitigare e adattarsi alle temperature esterne, pur non limitando perimetralmente con chiusure rispetto l'ambiente esterno. Questa soluzione in contatto diretto con l'esterno potrebbe essere applicata per determinati depositi di materiale che non richiedono particolari condizioni termiche, ma non può essere di per sé impiegata per coprire reparti produttivi con macchinari all'interno. Inoltre, lasciare il perimetro aperto comporta una maggiore sollecitazione sulla copertura a causa del vento, che può arrivare a lacerare il tessuto plastico usato per la chiusura o a scardinare il sistema dalle rotaie su cui scorre. Come diretta conseguenza dell'azione del vento, la maggioranza delle pergole estendibili viene dotata di sensori per il rilevamento elettronico della velocità dell'aria, che portano la copertura immediatamente a ripiegarsi superato un valore di soglia. A differenza di pergole esterne, installate appositamente su ambienti che possono essere lasciati esposti alle intemperie, un sistema simile nell'ambito industriale risulterebbe inadeguato alla protezione dei materiali o delle macchine coperte dalla struttura mobile, dovendo retrarsi ogni volta che il vento raggiunge velocità preoccupanti.

Di conseguenza, il progetto propone di riprendere queste tecnologie, combinandole in un sistema mobile con pannelli rigidi, in grado di sopportare l'azione del vento, e che possa essere sviluppato sia per una conformazione con perimetro chiuso, che una con perimetro aperto, in modo da poter rispondere alle diverse esigenze degli impianti industriali. La soluzione chiusa dovrà necessariamente presentare un sistema di pannelli laterali richiudibili in un pacchetto di dimensioni ridotte, di conseguenza si propone di sfruttare una disposizione telescopica delle arcate di copertura, similmente ad un sistema di chiusura mobile per piscine (figura 4.7.5). Mentre, nella configurazione priva di chiusure perimetrali le arcate della copertura mobile potranno avere assi allineati.



Figura 4.7.5: Esempio di copertura telescopica su rotaie per piscine, Del Taglia Piscine, modello Milano.

4.8 Individuazione dell'area

Il lotto di riferimento per l'intervento è situato ad est del comune di Villamarzana, Rovigo, in corrispondenza di un'area produttiva di espansione, dove diversi lotti soggetti alla trasformazione prevista dal Piano Insediamenti Produttivi "Macroarea SS 434 - Transpolesana", risultano attualmente occupate da appezzamenti di carattere agricolo.

Il progetto è previsto in sostituzione del fabbricato presente nel lotto n°23 del piano (Viale dell'artigianato 406), di estensione pari a 15597 m² (figure 4.8.1, 4.8.2, 4.8.3). I lati del lotto misurano rispettivamente 151 e 103m, con maggiore sviluppo in direzione est-ovest. Pertanto, le dimensioni dell'appezzamento risultano generose non sono presenti dislivelli notevoli al suo interno. L'accesso al lotto avviene da nord, sul lato contiguo a Viale dell'Artigianato, raggiungibile a meno di 3km dal casello autostradale Villamarzana-Rovigo della A13.



Figura 4.8.1: Inquadramento del lotto di intervento per la sede Bozza Legnami a Villamarzana, Rovigo.



Figura 4.8.2: A sinistra, fotografia della sede di Bozza Legnami presente nel lotto, Villamarzana, Rovigo.

Figura 4.8.3: A destra, fotografia grandangolare dall'angolo Nord-Ovest dell'appezzamento.



Figura 4.8.4: A sinistra, fotografia grandangolare dall'angolo Sud-Ovest dell'appezzamento.

Figura 4.8.5: A destra, fotografia grandangolare dall'angolo Nord-Est dell'appezzamento.

4.8.1 Riferimenti normativi urbanistici

L'area individuata per il progetto è identificata dal Piano degli Interventi (P.I.) del comune di Villamarzana, come zona territoriale omogenea D, destinata all'insediamento di impianti industriali, e contrassegnata all'interno del medesimo documento come D3/A- Industriale e artigianale di espansione.

Il Piano di Assetto del Territorio Intercomunale (P.A.T.I.) del Medio Polesine fa rientrare la zona di intervento all'interno dell'Ambito Territoriale Omogeneo (A.T.O.) P6.2 – Macroarea Ovest, di tipo produttivo, con una nuova espansione produttiva quantificata nel 2010 per un totale di 622.225 m²; secondo le aree e i servizi da realizzare frazione per frazione. Tale strumento urbanistico di riferimento per il P.I di Villamarzana e dei comuni limitrofi, prevede per le zone D3/A le limitazioni approvate dal Piano Urbanistico Attuativo adottato nello specifico. Qualora non sia più valido o non ancora approvato tale strumento si fa invece riferimento alle limitazioni previste per la zona D3:

5. *Le destinazioni ammesse sono di carattere prevalentemente industriale, logistico, artigianale, terziarie e direzionali a servizio delle attività produttive, mostre ed esibizioni di prodotti, impianti tecnologici, attrezzature di natura ricettiva e socio-sanitaria per gli addetti dell'attività produttiva, servizi esterni alle imprese, laboratori di ricerca e analisi, oppure altre destinazioni compatibili con la zona.*
 6. *Per ogni unità produttiva è consentita l'edificazione di una volumetria residenziale non superiore a 500m³; essa dovrà comporsi in volume e morfologicamente con il corpo edilizio principale, preferibilmente in posizione sovrastante la zona direzionale.*
 7. *Entro il limite della zona, le attività non possono avere carattere nocivo e/o pericoloso; dovendo prevedere una relazione tecnica sul ciclo di lavorazioni previste per le concessioni edilizie, nonché la particolareggiata descrizione su acque di rifiuto, fumi, esalazioni, polveri, rumori e sui mezzi adottati per la loro neutralizzazione.*
 8. *Per depositi di materiali maleodoranti o insalubri esterni di altezza superiore a 3m si richiede la realizzazione di schermi alberati, oltre al rispetto della normativa vigente al riguardo.*
 9. *Richiamando l'applicazione di Del. G.R. Veneto n. 2948/2009, si precisa che i P.U.A. dovranno prevedere idonei volumi di invaso, atti a non aggravare la rete di bonifica, con le modalità e parametri fissati nello studio di compatibilità idraulica, cui si dovrà fare riferimento per l'urbanizzazione delle aree che comportano trasformazione urbanistica, quali le zone D3.*
 10. *All'interno dell'area dovranno essere rispettati i seguenti indici stereometrici e distanze oltre alle indicazioni e prescrizioni riportate nella Scheda Normativa n.2 della variante al Piano degli Interventi n.1:*
-

Superficie minima del lotto:

Non potrà essere inferiore a 2000m², salvo edificazione in aderenza ove è fissato un minimo di 1000m² per unità in aderenza;

Percentuale superficie coperta:

Non potrà essere superiore al 50% della superficie fondiaria complessiva;

Altezza massima netta:

Non dovrà essere superiore a 14.00m, misurata all'intradosso della trave di copertura, esclusi i volumi tecnici; potranno essere consentite altezze superiori sulla base di documentate esigenze dei cicli produttivi, che non potranno in ogni caso superare il 30% della superficie coperta;

Distanza dai confini:

Non dovrà essere inferiore ai 2/3 dell'altezza del fabbricato, con un minimo di 5.00m; è consentita l'edificazione sul confine nel caso di edifici in aderenza;

Distanza dal ciglio della strada:

Non potrà essere inferiore a ml. 5,00 per strade non più larghe di 7.00m; 7.50m per strade con larghezza da 7.00 a 15.00m; a 10.00m per strade con larghezza maggiore a 15.00m; la distanza dalle aree di parcheggio o di verde pubblico è assimilabile alla distanza dai confini, con un minimo di 5m;

Distanza tra i fabbricati o corpi di fabbrica:

Non potrà essere inferiore all'altezza del fabbricato o corpo di fabbrica più alto, con un minimo di 10.00m. Le cabine elettriche, se necessarie all'azienda, potranno essere costruite con distacchi minimi dalle strade di 5.00m e dai fabbricati preesistenti di 6.00m. Le cabine elettriche, se necessarie all'azienda, potranno essere costruite con distacchi minimi dalle strade di 5.00m e dai fabbricati preesistenti di 6.00m.

Dotazione di standard:

Le aree a standard dovranno essere adeguate al disposto dell'Art. 31 della L.R. 11/2004 e alle previsioni delle presenti N.T.O., a seconda delle diverse attività che si dovranno insediare. Distanze diverse sono ammesse nell'ambito dei P.U.A. in applicazione ultimo comma art. 23 L.R. 61/1985;

15. *Deve essere prevista una barriera alberata a est del comparto a protezione e schermatura dell'attigua zona agricola.*

4.9 Stesura del progetto architettonico di massima

Considerate le analisi preliminari svolte in precedenza, per la stesura del progetto, si riprende il medesimo percorso logico. A partire dalle necessità funzionali e dimensionali dell'intervento, inserite nel contesto del lotto individuato, si dispongono, planimetricamente affiancati, il nucleo produttivo con struttura fissa e i magazzini per materie prime e prodotti intermedi. Al fine di elaborare un intervento dimostrativo e adeguato a molteplici casi industriali, si sceglie di inserire anche un secondo magazzino in uscita per i prodotti finiti, nonostante non sia richiesto per lo specifico caso di Bozza Legnami, ma comunque utilizzabile come estensione di quello in entrata (figura 4.9.1).



Figura 4.9.1: Schema planimetrico generale dello stabilimento.

Per il blocco centrale che racchiude i reparti produttivi, si prevede uno sviluppo su maglie strutturali di 18m per 8m, in conformità alle linee guida per incrementare l'applicabilità del progetto a diverse strutture esistenti. Si ipotizza una singola campata di 18m per limitare gli impedimenti dovuti a pilastri intermedi nelle movimentazioni, e disponendo i macchinari necessari in direzione longitudinale allo sviluppo. È riscontrata la necessità di almeno 8 moduli consecutivi con interasse di 8m, per una estensione complessiva di 64m. Questa conformazione permette di collocare lungo le due pareti perimetrali sui lati lunghi: una pialla di lato 16m, un reparto di falegnameria con sega a nastro, truciolatrice e altre attrezzature riposizionabili secondo necessità, una impregnatrice di lunghezza pari a 12m e fino a due accessi con portoni di apertura pari a 6m; sul lato opposto si trovano invece il centro di taglio di lunghezza pari a 44m e il blocco uffici e servizi ad occupare lo spazio rimanente (figura 4.9.2).

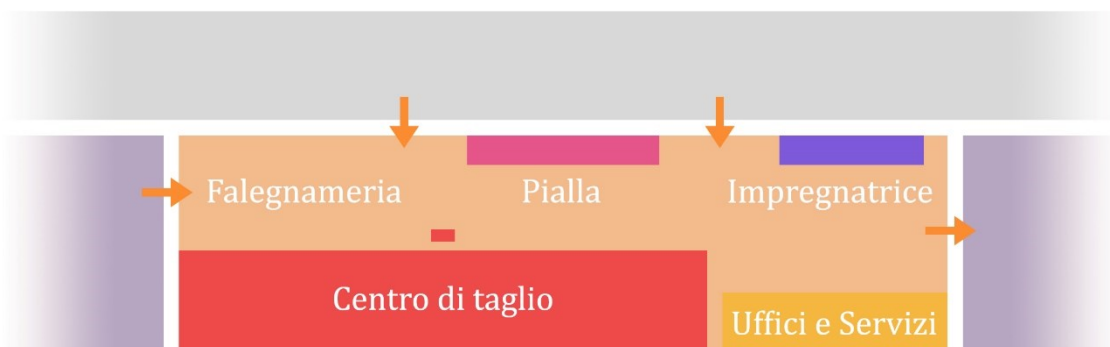


Figura 4.9.2: Disposizione interna di macchine, reparti e ingressi del nucleo produttivo.

4.9.1 Riferimenti progettuali

Nella scelta dei riferimenti progettuali per l'intervento, si cercano di integrare le forme tradizionali locali dell'industria veneta, alle nuove tecnologie costruttive del legno lamellare, al fine di esaltarne il pregio estetico.

In particolare, si prende come spunto lo schema di copertura di molte antiche fabbriche padovane, che seguono una linea seghettata a spioventi simmetrici, i quali si susseguono allineati per la dimensione necessaria ad ospitare le attività manifatturiere o di derivazione agroalimentare del tempo. L'estetica semplice che caratterizza questi edifici, rimanda alla zona geografica di origine dell'azienda committente, senza risultare lontana o estranea al contesto similmente rurale di Villamarzana (figure 4.9.1.1 e 4.9.1.2).



Figura 4.9.1.1: A sinistra, stabilimento in muratura non più utilizzato lungo SP35, Saonara, Padova.

Figura 4.9.1.2: A destra, immagine storica dello stabilimento Orticoltura Sgaravatti di Saonara, Padova.

Come riferimento nell'uso del legno da costruzione per la struttura di un complesso industriale, si cita l'Atelier Ecotim II in Francia, realizzato dallo studio Architectures Amiot - Lombard nel 2011. La struttura copre con delle capriate reticolari una luce di 35 m tra i supporti, che ospitano anche una via di corsa in legno per un carroponete sulla sala centrale nonostante i pesanti oneri strutturali che ne conseguono (figure 4.9.1.3 e 4.9.1.4).

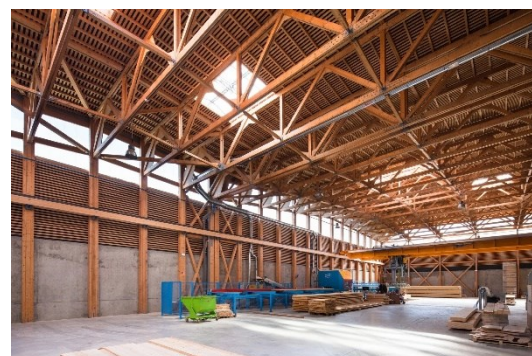


Figura 4.9.1.3: A sinistra, vista esterna dello stabilimento Ecotim II, Architectures Amiot-Lombard, Francia.

Figura 4.9.1.4: A destra, vista interna su copertura, capriate e pilastri interamente in legno.

4.9.2 Spazi adattivi e copertura

Riprendendo le soluzioni adattive individuate al paragrafo 4.7, ed i riferimenti progettuali precedenti, si ipotizza la realizzazione dei depositi di materiale in ingresso ed uscita allo stabilimento come strutture adattive in legno lamellare incollato, formate da una serie di arcate che possano traslare in orizzontale su rotaie poste al livello del terreno. Tali arcate si compongono ciascuna di una coppia di pilastri di base rettangolare con asse forte nella direzione dello scorrimento, e di una trave di campata con sezione anch'essa rettangolare, vincolata agli stessi in sommità. A chiusura dell'interasse variabile lasciato tra queste travi, si dispongono una serie di travetti lignei accoppiati e ancorati alle travi per mezzo di tre cerniere di estremità, in modo che siano liberi di ruotare durante lo scorrimento della struttura. Tali travetti sono infine coperti da un sottile tavolato, una guaina per l'impermeabilizzazione, continua e flessibile oltre i giunti a cerniera e dei pannelli di copertura coibentati; il tutto a formare delle falde ad inclinazione variabile che richiamino la linea seghettata dei riferimenti progettuali locali.

Per favorire questa estetica, e per evitare configurazioni di carico eccessive sui travetti, l'inclinazione minima delle falde è limitata a 20° , pendenza ripresa anche per la copertura del nucleo fisso dell'edificio. L'inclinazione massima risulta invece ricavabile soltanto una volta definito l'ingombro dei pilastri ed il loro interasse minimo quando completamente richiusi (figura 4.9.2.1). L'interasse massimo raggiungibile da un modulo è fissato a 5 m per ottenere una disposizione efficiente di corsie di transito e prodotti depositati anche nella direzione trasversale allo scorrimento della struttura, rispettando quanto definito nell'analisi dimensionale al paragrafo 4.5.

Per consentire la movimentazione dei singoli moduli rispetto a quelli affiancati si predispongono delle coppie di perni metallici incernierate ai pilastri ad una altezza di 6 m, e sull'estremità opposta, ad un attuatore che possa spingerli in verticale lungo la faccia del pilastro. Coordinando elettronicamente gli attuatori di una campata, è possibile aprire e richiudere la stessa in modo indipendente dalle successive, inoltre la disposizione cruciforme dei perni permette di controventare la struttura nella direzione dello scorrimento riducendo il momento trasmesso al giunto mobile di base ad ogni pilastro.

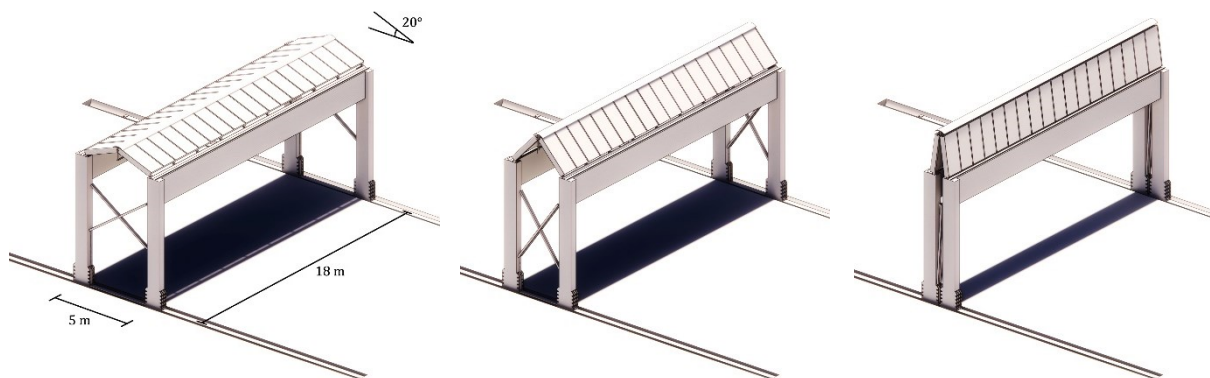


Figura 4.9.2.1: Modello digitale architettonico del singolo modulo adattivo per la copertura dei magazzini.

Considerando che la dimensione minima raggiungibile dal pacchetto richiuso può essere sfruttata come porzione fissa della struttura, e impiegata anche per ospitare i macchinari di uso comune nello stabilimento, è possibile stimare che nel caso studio sono necessari un numero minimo di sei moduli consecutivi per poter coprire prodotti in grado di raggiungere lunghezze di 20m (figura 4.9.2.2). Non risulta conveniente raggiungere tale dimensione per la campata tra i due appoggi della struttura mobile, in quanto le infilate di pilastri si dovranno necessariamente allineare a quelle della porzione fissa, la quale presenta una luce tra i pilastri di 18m per massimizzare l'applicabilità del modello sia per edifici esistenti costruiti tra il 1960 e il 1980 (con campate più frequenti tra 14 e 18m), che per quelli più moderni (con campate fino a 22m), come indicato nelle linee guida.

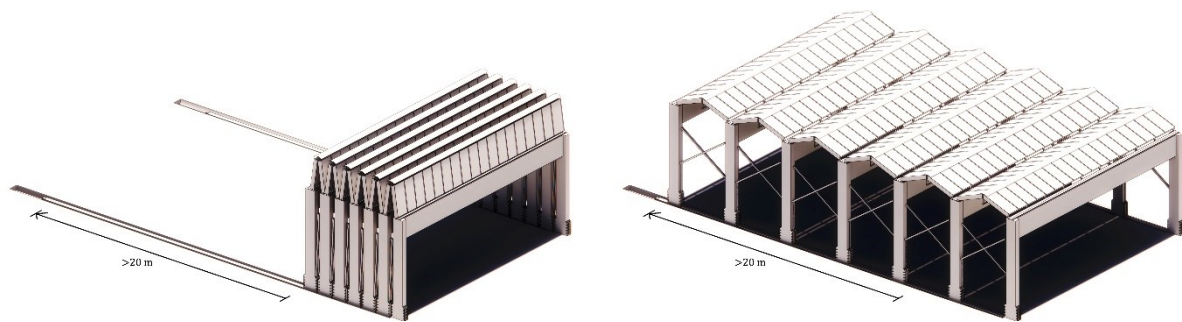


Figura 4.9.2.2: Modello digitale architettonico di 6 moduli in successione in configurazione richiusa e estesa.

Per poter usufruire dell'area coperta dalla struttura adattiva completamente chiusa come estensione del nucleo produttivo permanente, è necessario predisporre dei pannelli di perimetrazione fissi che separino tale pertinenza dall'ambiente esterno. Pertanto si dispone una parete trasversale allo scorrimento delle campate e due elementi esterni alle stesse che arrivino a coprire fino in sommità il pacchetto quando richiuso (figura 4.9.2.3). Si ipotizza di sfruttare dei giunti ad azionamento pneumatico per sigillare la struttura rispetto le sue parti mobili. Le camere d'aria che costituiscono queste guarnizioni progettate per aderire tramite rigonfiamento al profilo della struttura mobile, così come i relativi compressori ed i dispositivi per il controllo degli attuatori che estendono la struttura, possono essere compresi nei due volumi laterali alle campate. Il collegamento elettrico tra questi ultimi ed i meccanismi di movimentazione alla base dei pilastri è realizzabile tramite delle bobine di cavi flessibili, riavvolgibili meccanicamente tramite molle o elettricamente durante la movimentazione della struttura su rotaie (figura 4.9.2.4). Come attuatori per il movimento della struttura, si ipotizza l'utilizzo di pistoni oleodinamici o, in alternativa, di motori elettrici bidirezionali con rotaie dentate. La scelta tra i due sistemi deve tener conto della massa complessiva dei moduli di copertura, calcolata nel successivo capitolo.

Infine, per garantire la tenuta all'acqua ed il deflusso della stessa dalle falde di copertura si studia un sistema di compluvio che fa uso di una coppella di sommità, controbilanciata dal peso delle lampade di illuminazione e da eventuali meccanismi a molla per evitarne eccessive oscillazioni. L'elemento di colmo è quindi fissato anche alle guaine impermeabili flessibili, che corrono sul tavolato fino ai canali di gronda posizionati sopra alle travi di campata. Queste grondaie sono di conseguenza pendenzate verso l'esterno, dove scendono con dei pluviali lungo i pilastri fino al canale di raccolta alla base delle rotaie di scorrimento della struttura (figura 4.9.2.5).

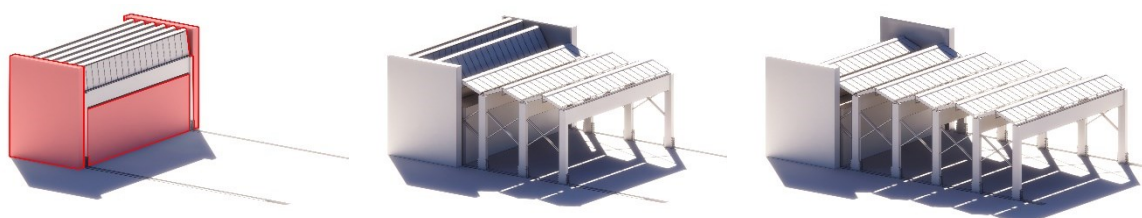


Figura 4.9.2.3: Modello digitale preliminare degli elementi di chiusura per la porzione fissa della struttura.

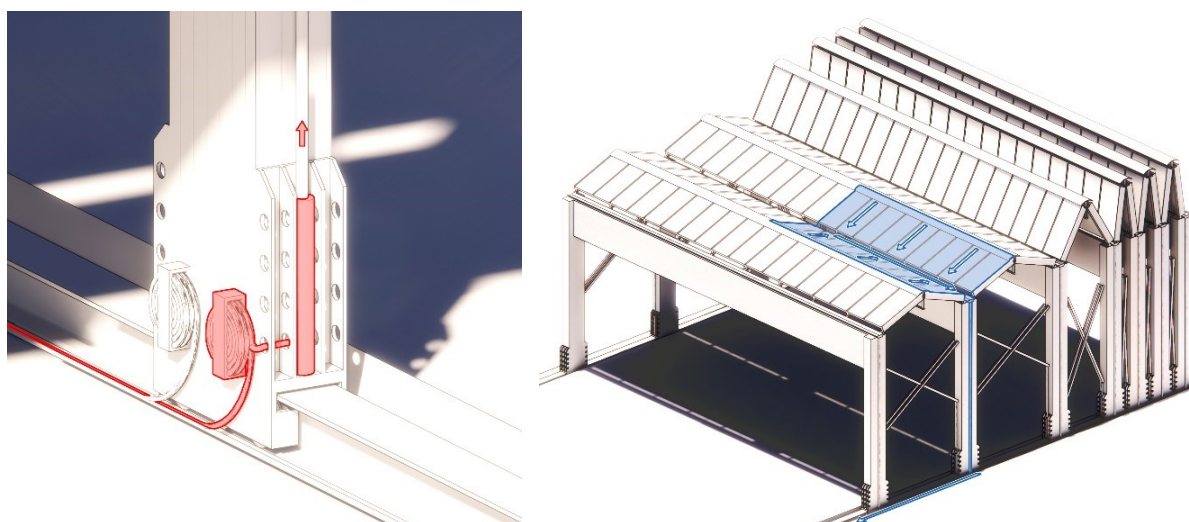


Figura 4.9.2.4: A sinistra, modello preliminare di attuatori e collegamenti elettrici per le campate mobili.

Figura 4.9.2.5: A destra, schema di deflusso delle acque meteoriche dalle falde di copertura.

4.9.3 Soluzione adattiva alternativa con chiusure perimetrali

La soluzione adattiva richiesta dalla committenza non necessita di chiusure laterali, ma, per ampliare l'applicabilità dell'intervento a diversi casi industriali, si procede a sviluppare degli elementi di chiusura perimetrale integrabili alla copertura adattiva. Tali elementi sono ipotizzati come pannelli in legno lamellare incrociato (CLT), che scorrono assieme ai medesimi moduli seguendo una guida metallica a terra.

I pannelli di chiusura laterali devono essere disposti secondo una configurazione telescopica, raggiungibile anche lasciando i pilastri allineati sulla stessa rotaia, per mezzo di giunti che consentano una certa eccentricità o distanziamento dalla faccia esterna degli stessi. Per limitare il crescente ingombro trasversale, nonché la necessità di molteplici guide di scorrimento da prevedere per un numero elevato di pannelli, risulta conveniente incorporare l'intera parete laterale in due soli elementi lignei. Inoltre, per minimizzare l'estensione lungo il lato dell'edificio di questi due pannelli, si dispongono in modo che coprano rispettivamente i tre moduli più esterni ed i due successivi, lasciando a chiusura dell'ultimo modulo soltanto l'elemento laterale rialzato già predisposto nella soluzione priva dei pannelli. Con la differenza che lo spazio al suo interno sarà occupato dalle guide e, una volta richiuse, dalle stesse perimetrazioni scorrevoli. Pertanto, al fine di allocare gli impianti relativi ai dispositivi di attuazione, al loro coordinamento, e all'espansione delle guarnizioni pneumatiche di tenuta all'acqua e all'aria, si considera di incrementare la dimensione di questi vani tecnici laterali ai moduli. Queste componenti impiantistiche possono in alternativa essere ricollocate verso l'interno delle campate.

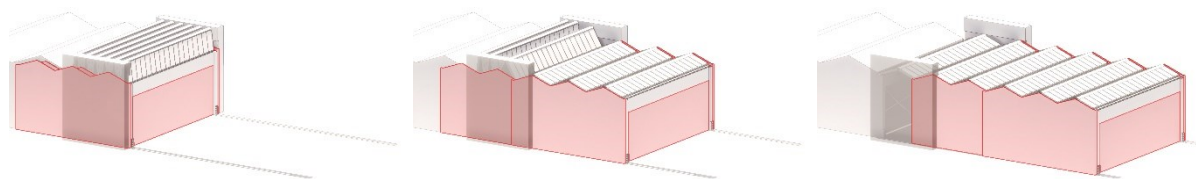


Figura 4.9.3.1: Modello digitale preliminare dei pannelli di chiusura perimetrale e loro sovrapposizione.

La configurazione descritta per i pannelli, quando la copertura è completamente ritratta, prevede la sovrapposizione alla porzione fissa dell'edificio, dove i pannelli arrivano a coprire la dimensione la parete per quasi 7.5 m di lunghezza. Questo aspetto può comportare una diminuzione dell'illuminazione naturale dell'ambiente interno, pertanto, nell'implementazione dei pannelli di chiusura perimetrali potrebbero essere previste aperture finestrate, innestate negli stessi pannelli, oppure lucernari in copertura nell'ultima campata fissa, così come nella copertura mobile, al fine di garantire l'adeguata luce anche per il volume adattivo che diventa in questo modo chiuso.

La stessa sovrapposizione degli elementi scorrevoli può comportare un vantaggio dal punto di vista dell'isolamento termico, anche se tale aspetto non è di primaria importanza per la maggioranza delle attività industriali; ma, per garantire l'isolamento termico e la tenuta dell'intero ambiente perimetrato dai pannelli scorrevoli, risultano necessarie ulteriori guaine pneumatiche alla loro base e al contorno superiore, oltre ad altri compressori per la messa in pressione delle camere d'aria aggiunte. A seconda delle esigenze della produzione e del livello di adattabilità a future destinazioni d'uso che si vogliono raggiungere, è quindi da valutare l'implementazione di un sistema di tenuta

completo per l'incremento delle prestazioni energetiche del fabbricato, in alternativa al basilare sistema di guarnizioni pneumatiche che garantiscano esclusivamente la tenuta all'acqua dell'ambiente adattivo.

In questa valutazione, è importante tenere in considerazione l'energia richiesta per la messa in pressione del sistema di guaine. Considerando l'aria come fluido comprimibile, la sua pressione all'interno di un contenitore qualsiasi decresce esponenzialmente dalla base del contenitore (p_0), al crescere della quota (z), fino alla sommità, per effetto della gravità (g), secondo la relazione:

$$p(z) = p_0 e^{-\frac{g \cdot \rho_0}{p_0} z}$$

Date le dimensioni ridotte in altezza delle camere d'aria, la variazione di pressione dovuta alla gravità tra le facce opposte è trascurabile. Pertanto, si può utilizzare il valore di pressione alla quota media corrispondente all'asse delle guarnizioni.

Per ricavare la pressione necessaria a ottenere un giunto di tenuta all'aria, si assume che la pressione interna, in qualunque punto della guarnizione, debba superare quella atmosferica (pari a 1 atm \approx 0.1 MPa). Quindi l'attuatore, ad esempio un compressore elettrico, deve garantire una pressione misurata in Pascal o Newton su metro quadro, superiore a quella atmosferica agente su tutta la superficie della guarnizione esposta, dalla definizione:

$$P = \frac{F_{\perp}}{A}$$

Dalla precedente formula si desume che: all'incremento dell'area superficiale della guarnizione, corrisponde un incremento della forza e quindi dell'energia necessaria a mantenere il sistema in pressione. Quindi, la migliore efficienza è raggiungibile riducendo al minimo l'estensione e la dimensione delle camere d'aria per formare il profilo chiuso di tenuta. Questo comporta anche la riduzione al minimo della distanza libera tra le parti mobili e fisse della struttura, richiedendo una elevata precisione nella posa in opera, raggiungibile con i materiali strutturali impiegati quali legno lamellare e acciaio, dato il loro procedimento produttivo controllato di prefabbricazione.

Lo sviluppo progettuale di questo modello alternativo con pannelli di chiusura perimetrali, non essendo pertinente alle richieste del committente, viene limitato nel presente elaborato all'elaborazione del prototipo concettuale e all'inclusione delle azioni dovute alla presenza dei pannelli nelle successive verifiche statiche. Tali aspetti sono considerati al fine di produrre un modello strutturale adeguato a sostenere entrambe le configurazioni, per estendere l'applicabilità dell'intervento a casi studio con diverse esigenze progettuali e alla possibile aggiunta o rimozione dei pannelli per adeguare la struttura a future destinazioni d'uso.

4.9.4 Elaborati grafici architettonici

Lo sviluppo del progetto conduce agli elaborati grafici disposti in seguito. Il P.A.T.I. del Medio Polesine vigente, impone l'obbligo di non coprire con superficie impermeabile oltre il 50% di quella complessiva del lotto.

L'utilizzo delle strutture adattive permette di comprimere al minimo i percorsi carrabili di transito, carico, scarico e manovra esterni.

Per l'ampia area verde che risulta dai precedenti aspetti, si propone una piantumazione di filari di alberi da legna, che possano risultare utili alla ditta per la sperimentazione su specie arboree direttamente controllate.



Figura 4.9.4.1: Render esterno sulla copertura adattiva per il magazzino d'ingresso.

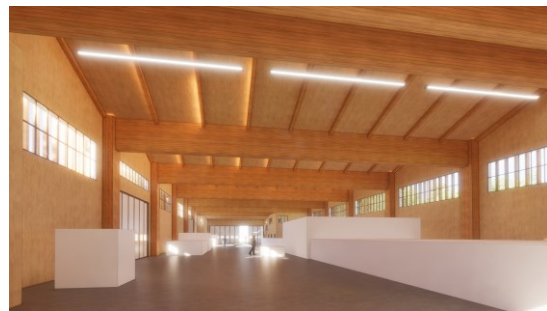


Figura 4.9.4.2: Render interno al nucleo fisso.

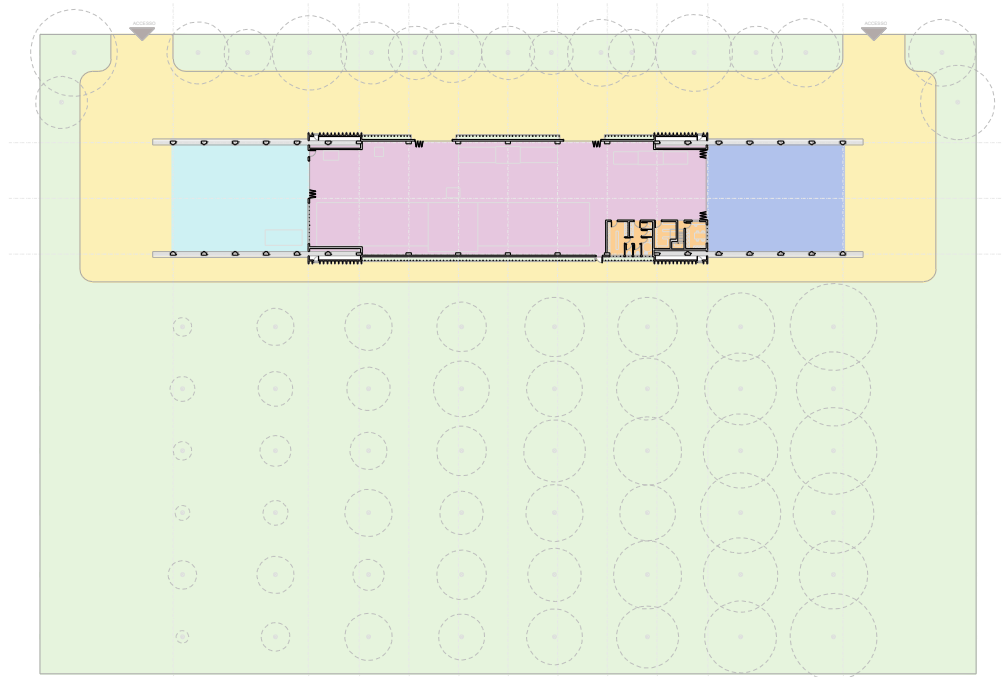
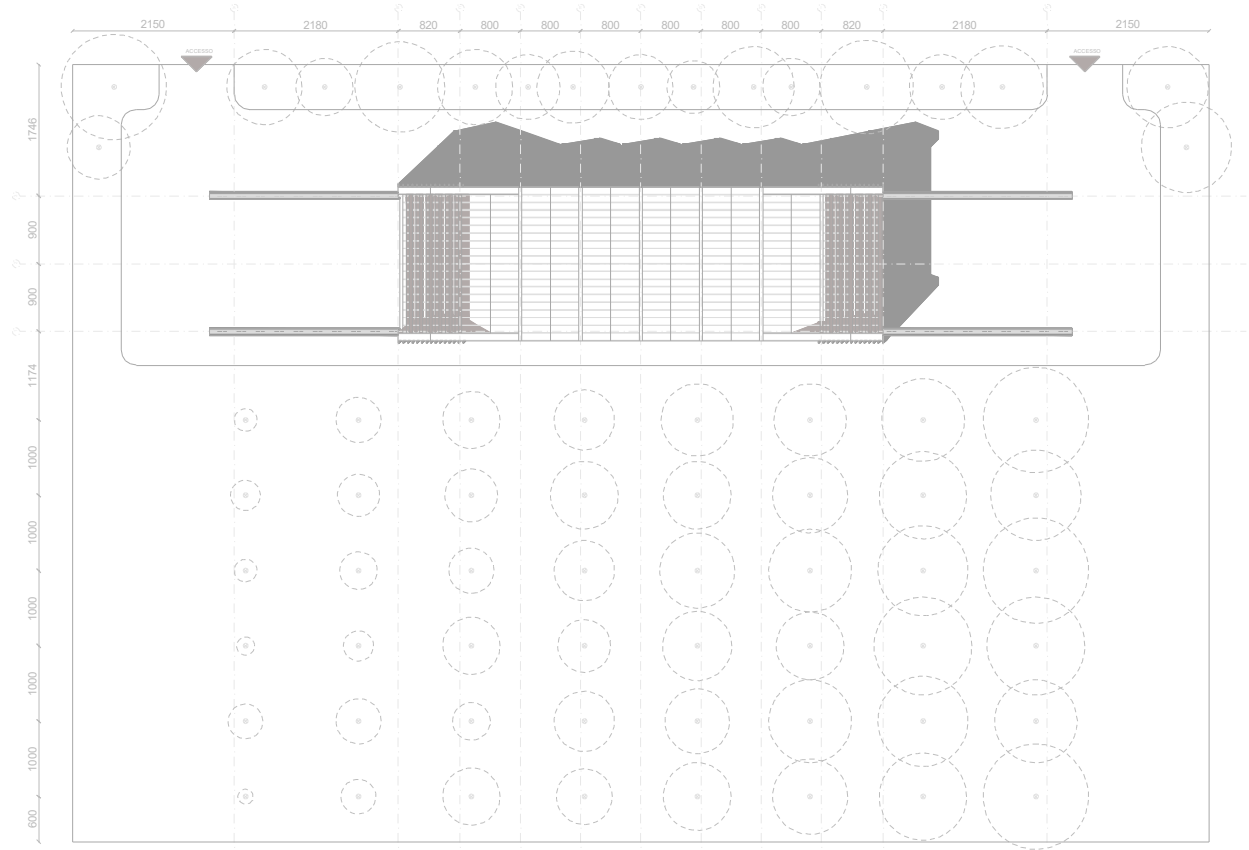
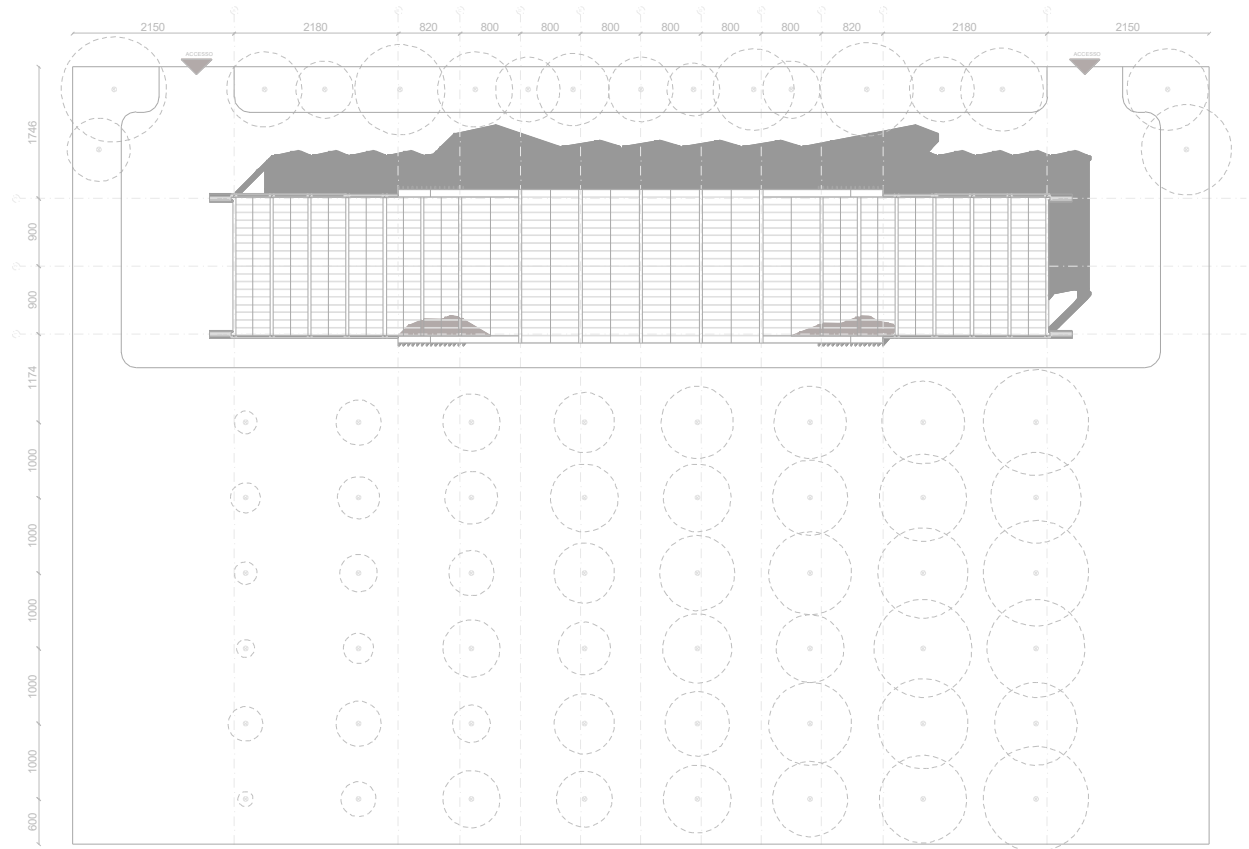
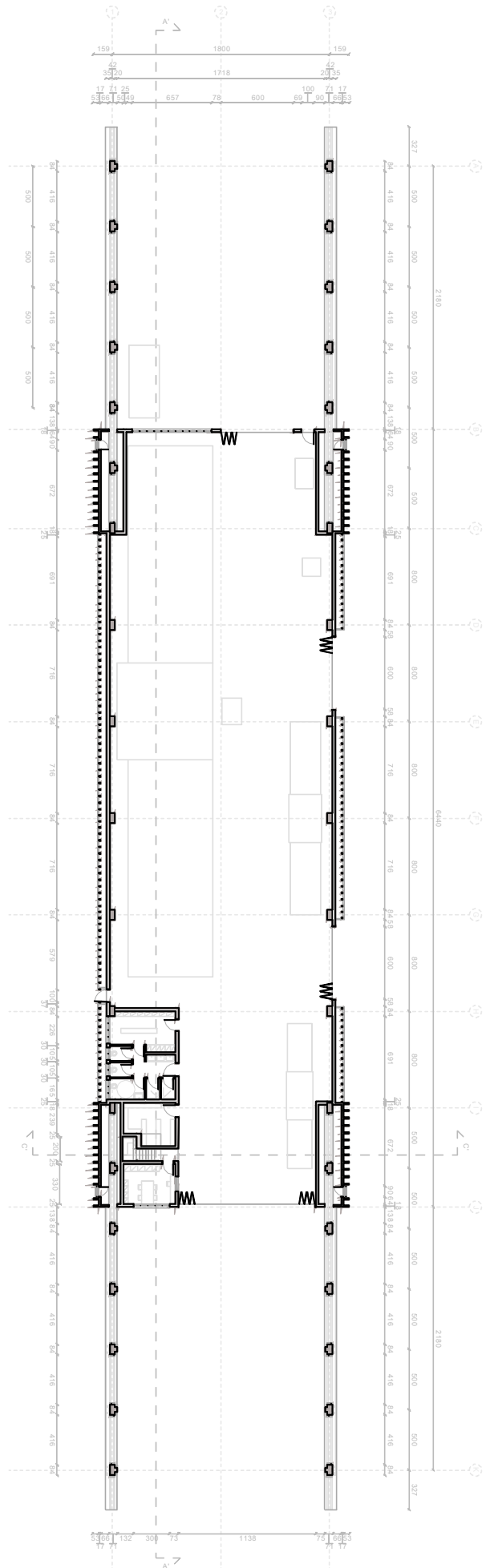
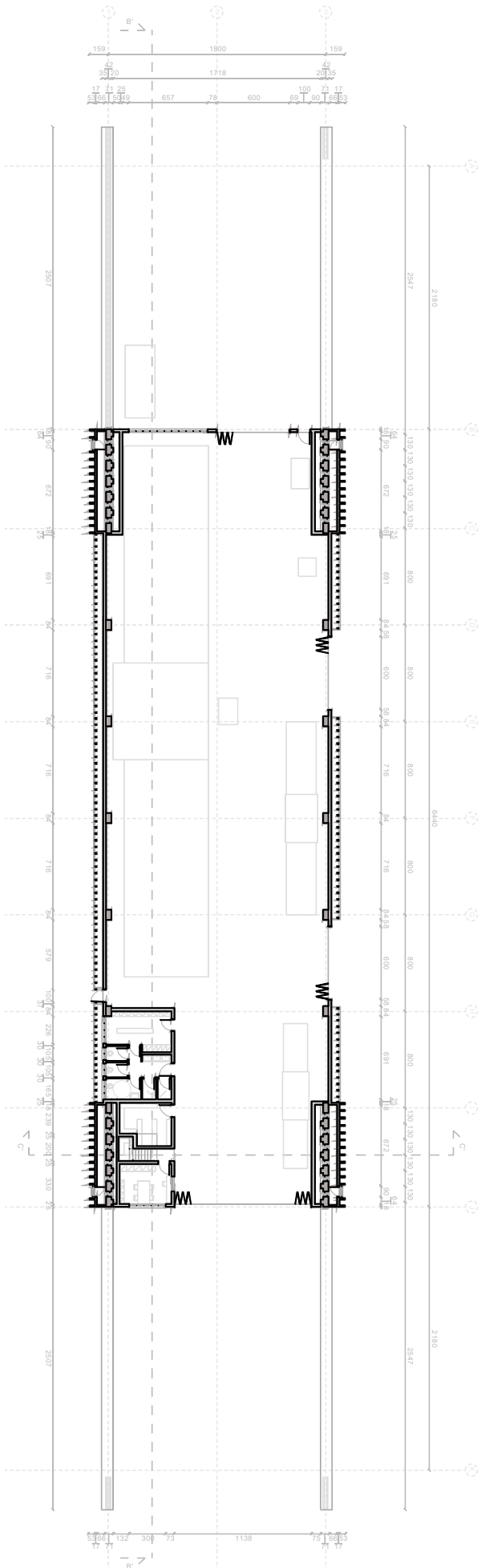
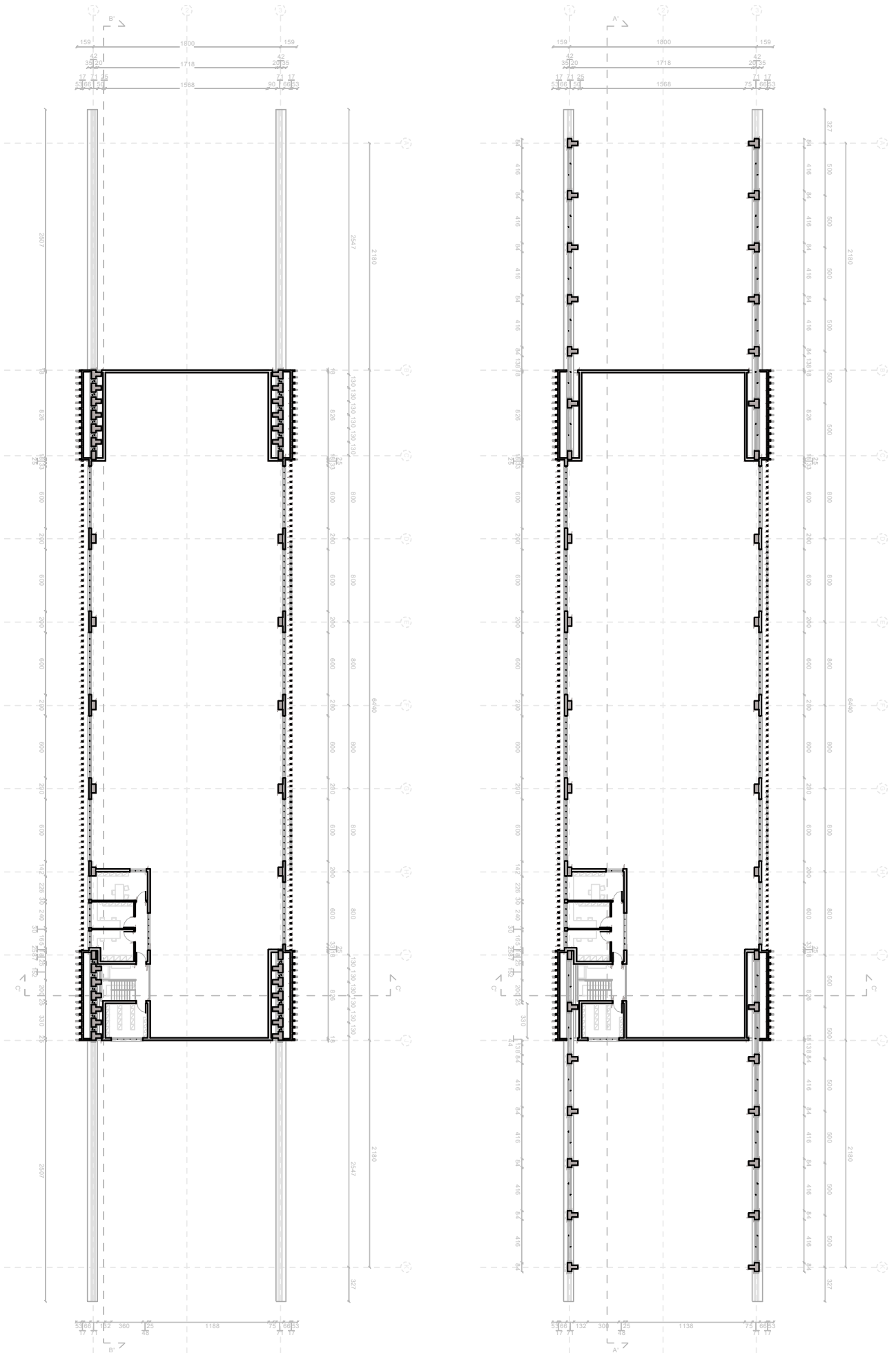


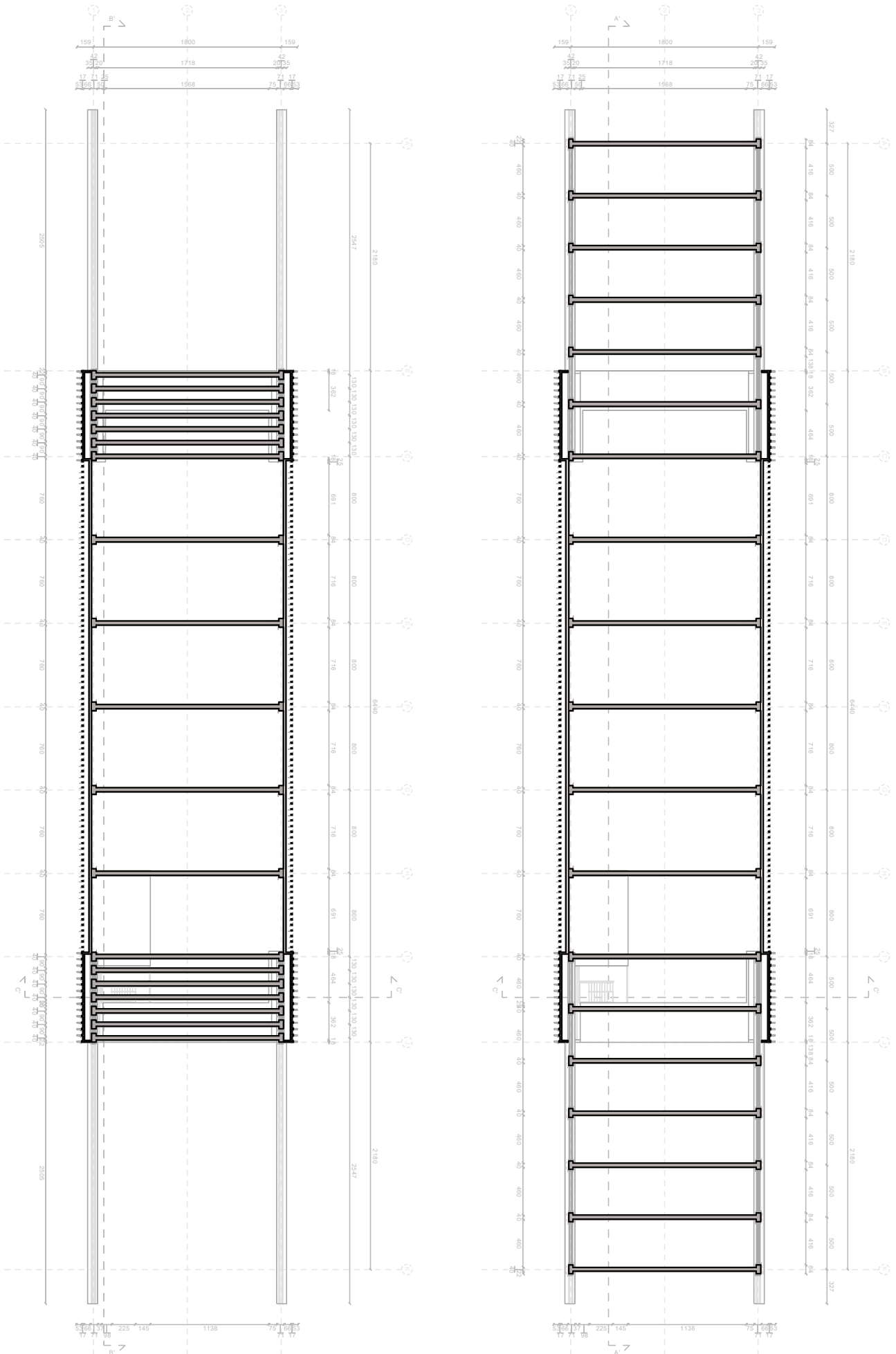
Figura 4.9.4.3: Pianta delle destinazioni d'uso generali con piantumazioni indicative, scala 1:1200, N(↑).

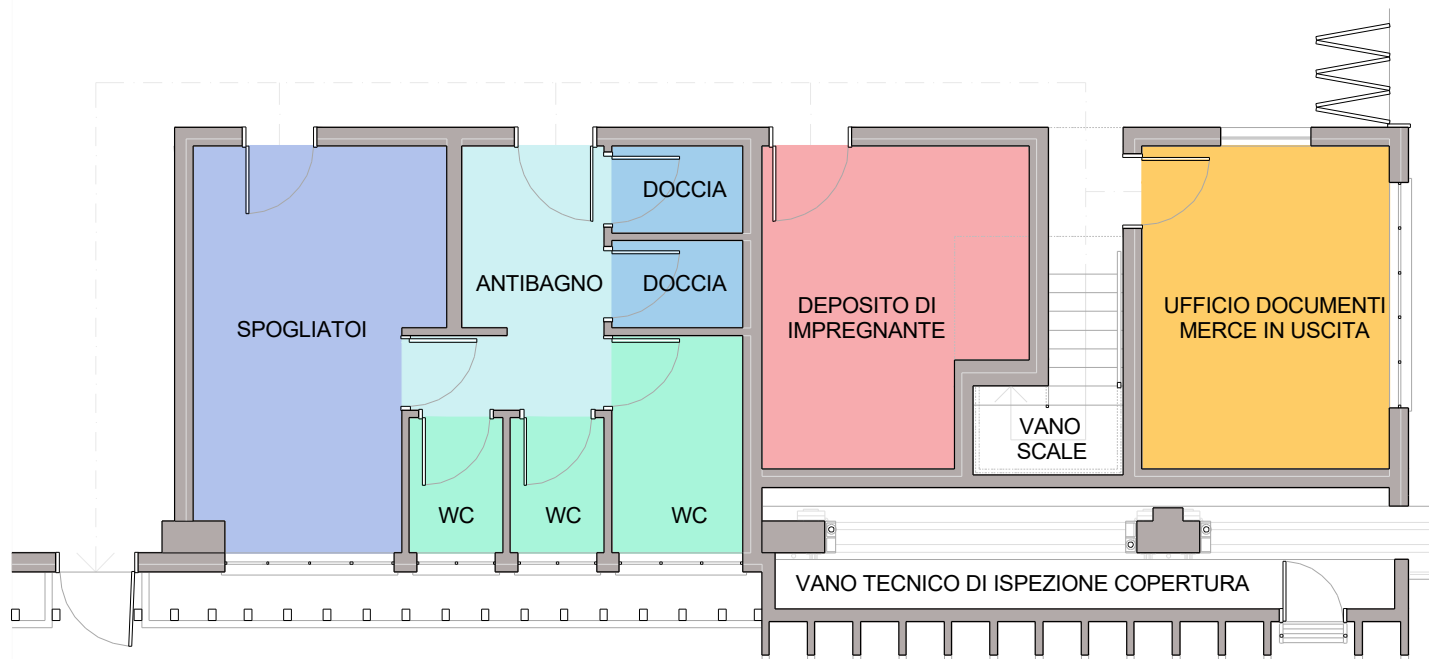
Aree verdi	Area carrabile esterna	Deposito in ingresso	Nucleo di produzione	Modulo uffici	Deposito in uscita
10'800 m ²	2'650 m ²	380 m ²	1'060 m ²	70 m ²	380 m ²
70.3 %	17.2 %	2.5 %	7.0 %	0.5 %	2.5 %









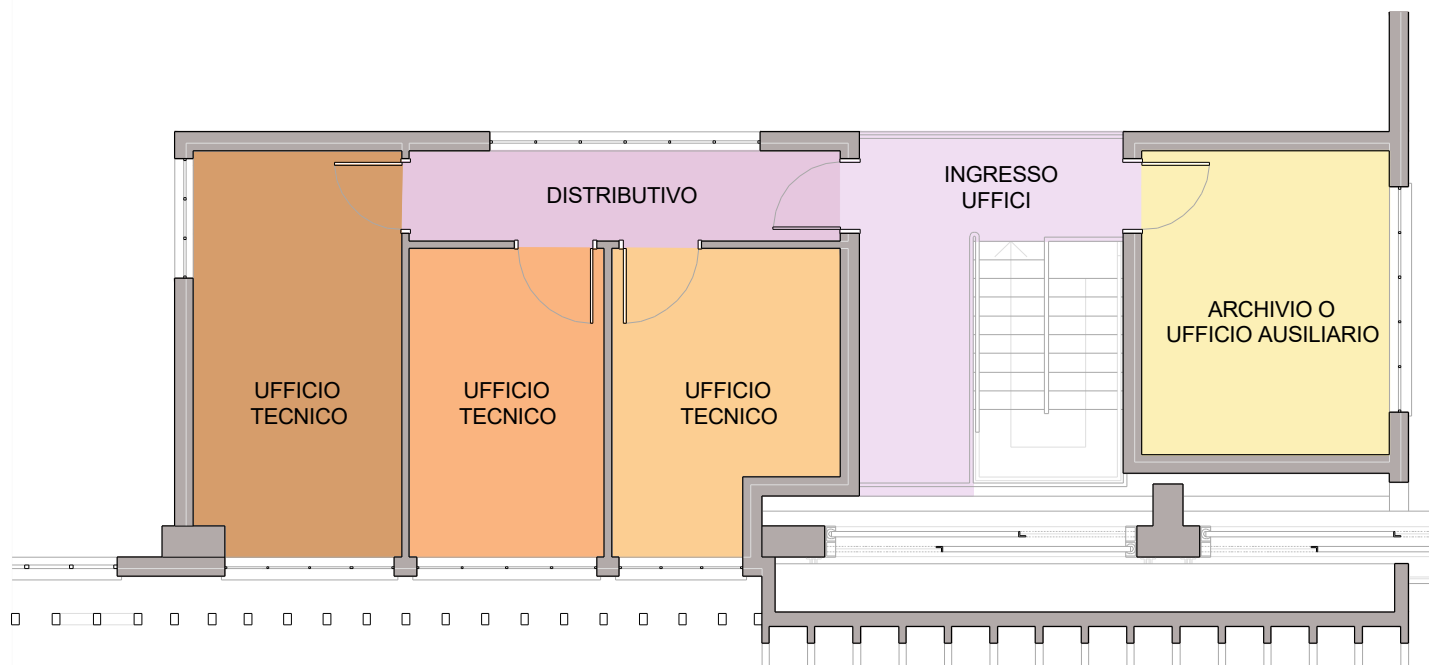










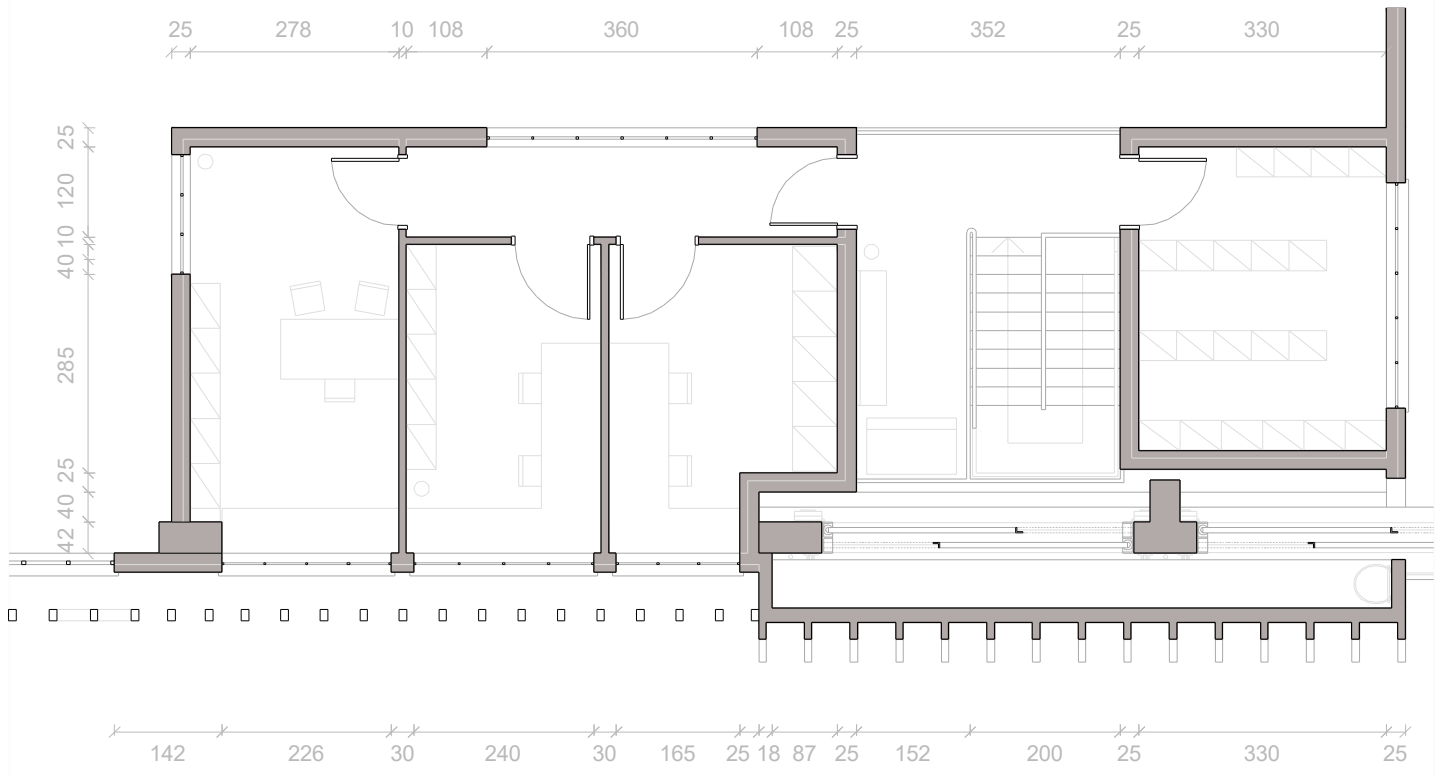
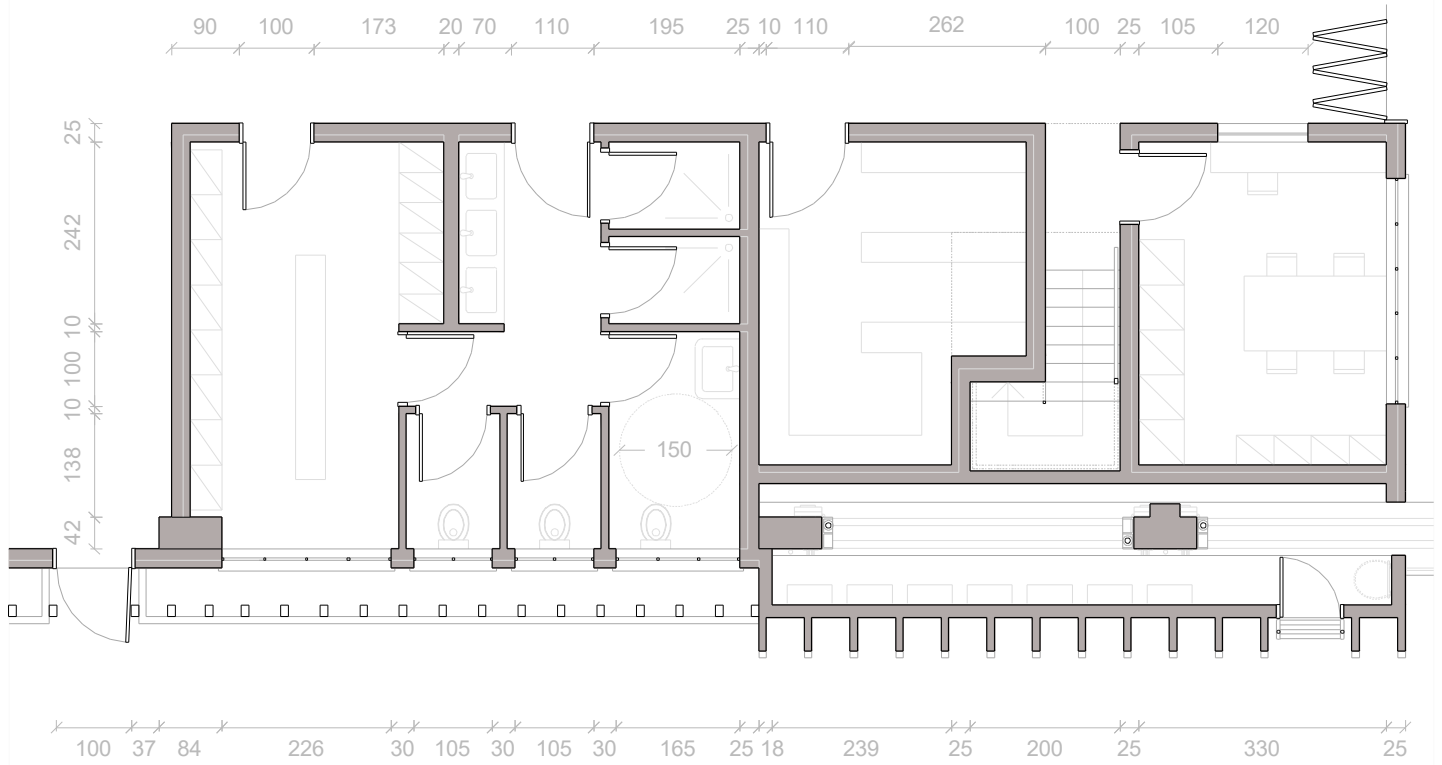




Spogliatoi	Antibagno	Docce	WC	Deposito impregnante	Ufficio documenti
					
16.3 m ²	7.8 m ²	4.0 m ²	9.5 m ²	13.9 m ²	14.2 m ²



Ufficio tecnico	Ufficio tecnico	Ufficio tecnico	Distributivo	Ingresso	Archivio
					
14.8 m ²	10.7 m ²	11.1 m ²	7.1 m ²	10.7 m ²	13.3 m ²





PROSPETTO EST



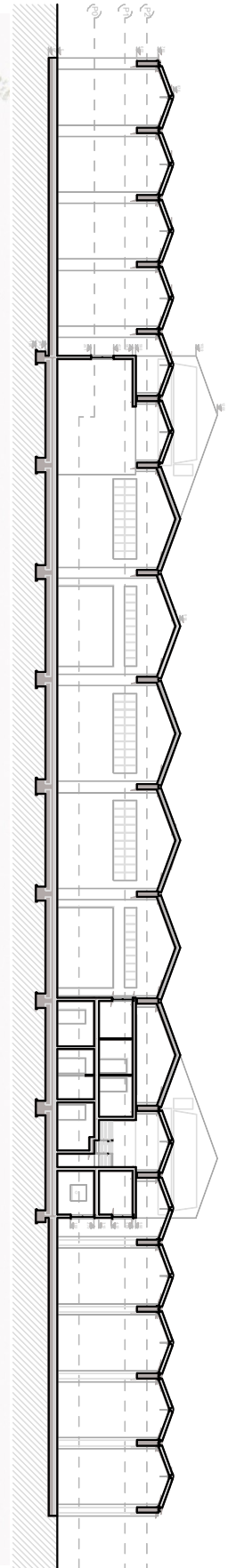
PROSPETTO OVEST



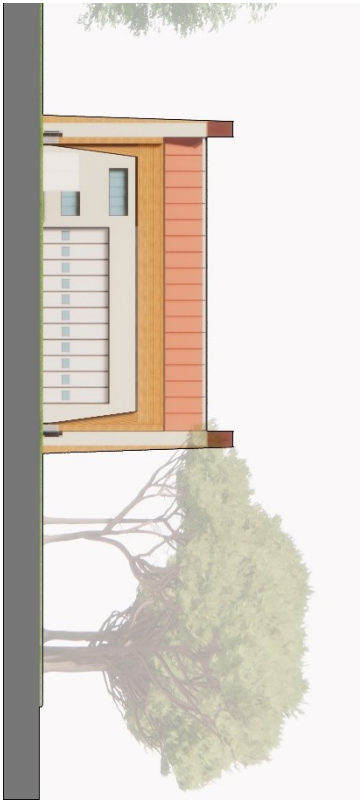
PROSPETTO SUD



PROSPETTO NORD



SEZIONE A'-A'



PROSPETTO EST



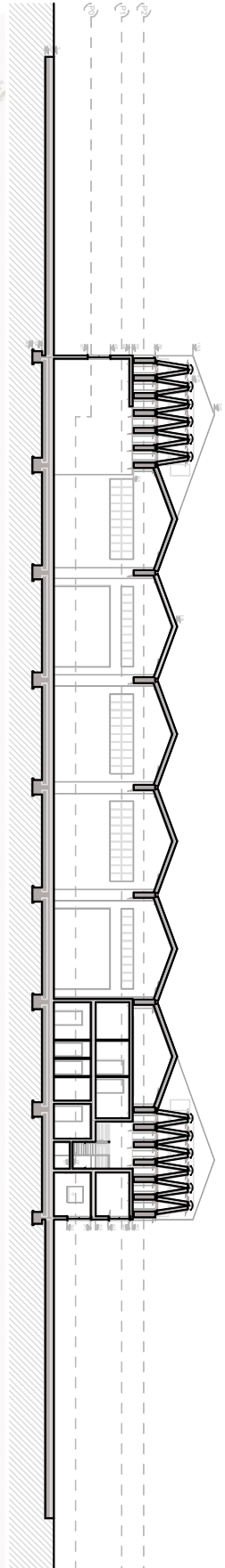
PROSPETTO OVEST



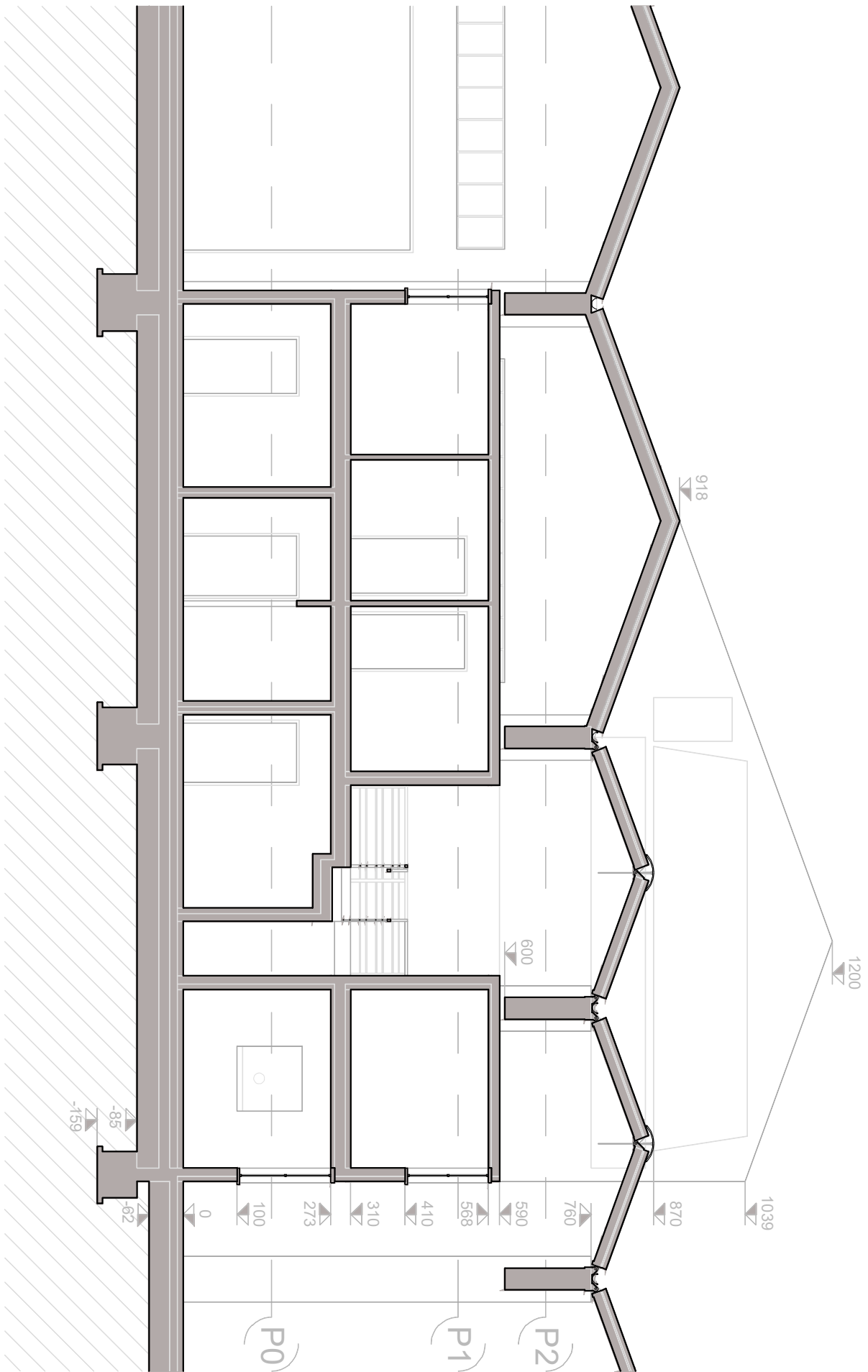
PROSPETTO SUD

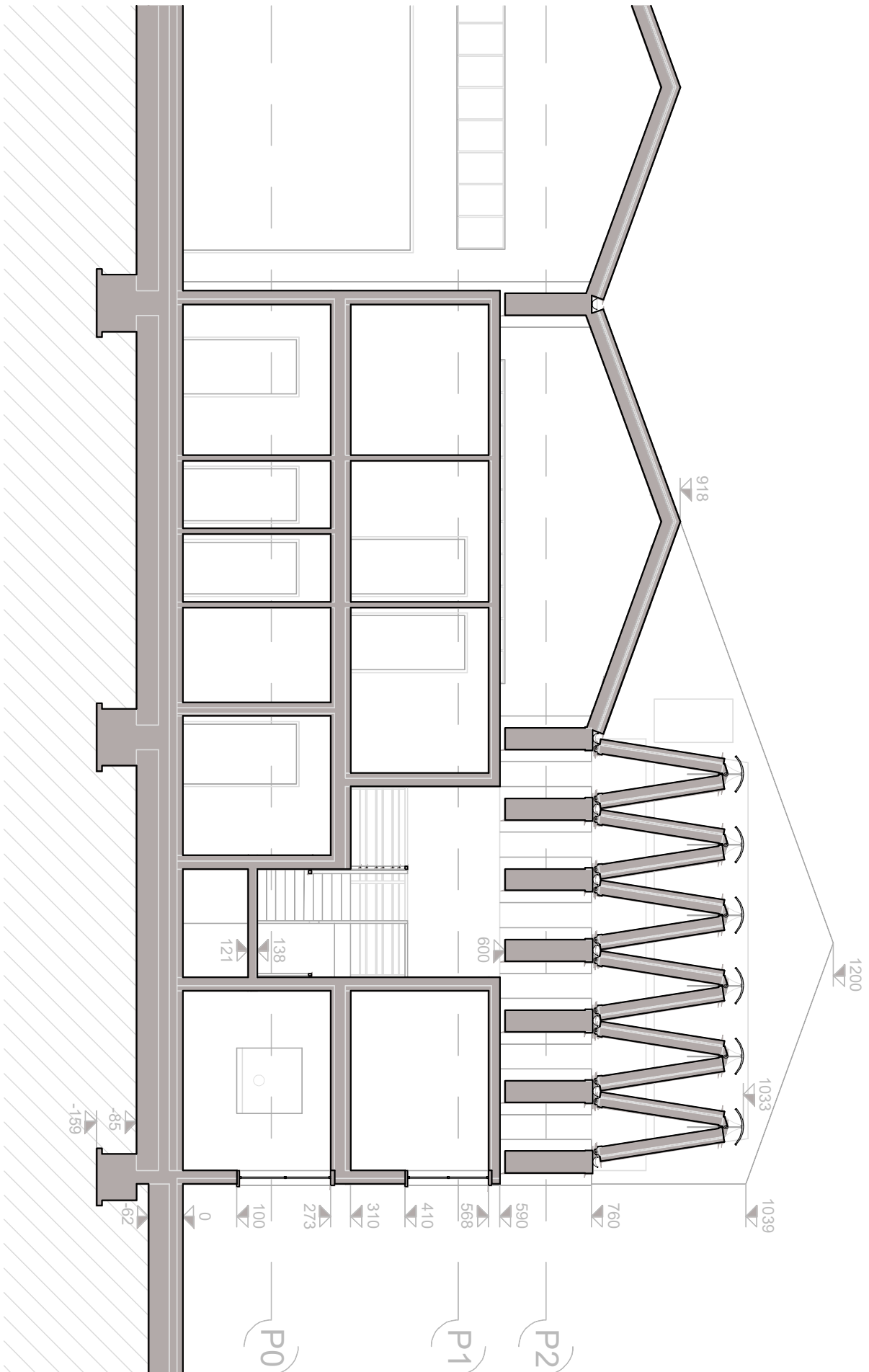


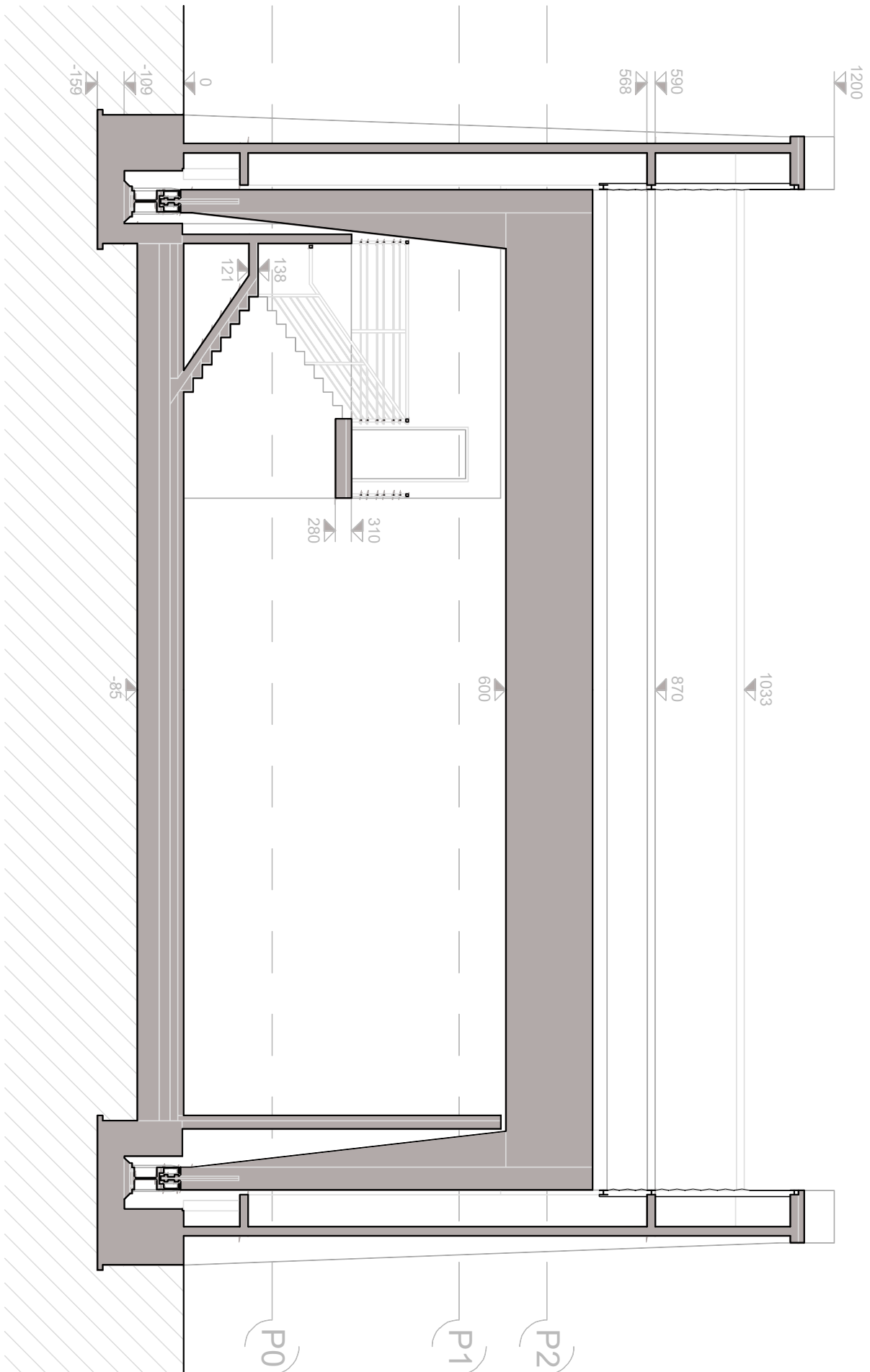
PROSPETTO NORD



SEZIONE B'-B'







1: Dettaglio cielo-terra copertura adattiva-uffici [1:50]**1.1: Sommità modulo di chiusura pneumatico**

- Intonaco e rasatura (2 cm)
- Pannello CLT 5 strati, faccia interna a vista (15 cm)
- Cavedio di ispezione (65 cm)
- Celle pneumatiche con guaina elastica (~10 cm)

1.2: Solaio superiore modulo uffici

- Strati di chiusura della copertura adattiva [vedi a seguito]
- Trave mobile in legno lamellare incollato (160 cm)
- Intercapedine libera per scorrimento e fluage (15 cm)
- Pannello CLT 5 strati, faccia superiore a vista (15 cm)
- Controsoffittatura impiantistica con correnti per cartongesso e riempimento in fibra di legno (5 cm)
- Pannello singolo di cartongesso intonacato (1.25 cm)

1.3: Parete perimetrale interna modulo uffici

- Pannello CLT 5 strati, faccia a vista (15 cm)
- Controparete impiantistica con correnti per cartongesso e riempimento in pannelli isolanti in sughero (7.5 cm)
- Pannello di cartongesso (1.25 cm)
- Pannello di cartongesso intonacato (1.25 cm)

1.4: Solaio intermedio modulo uffici

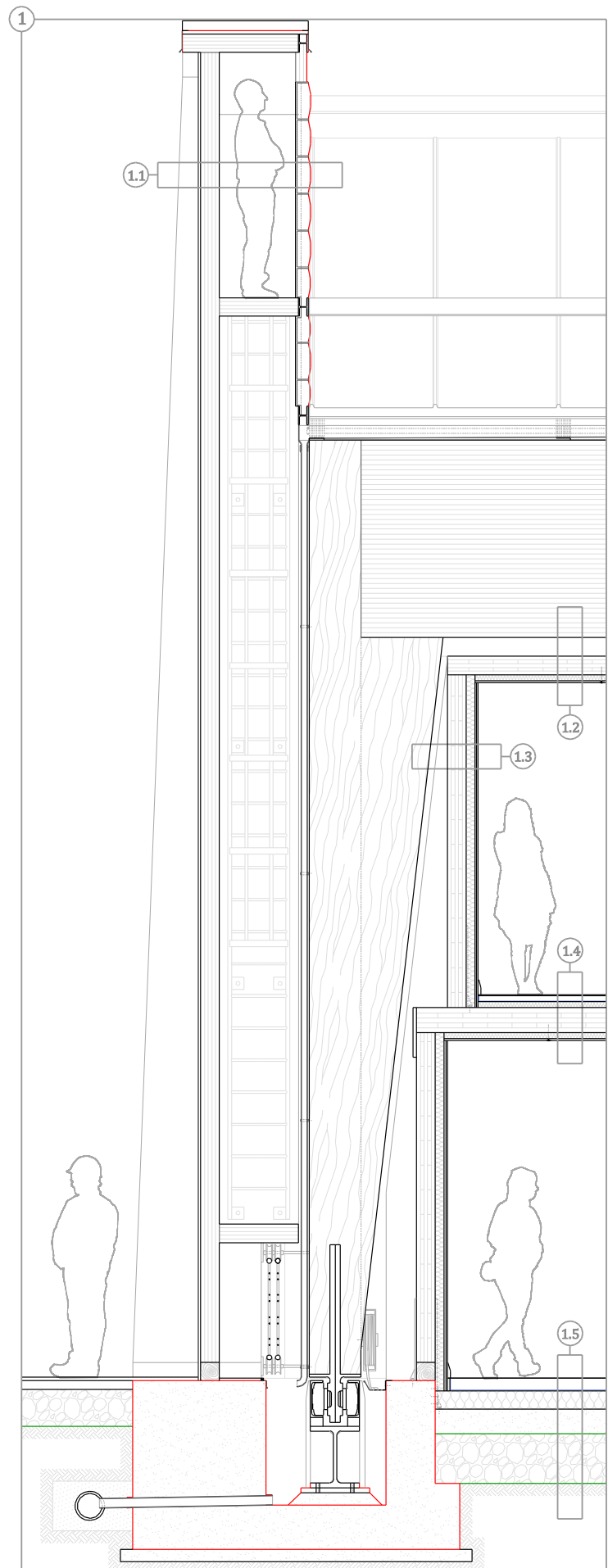
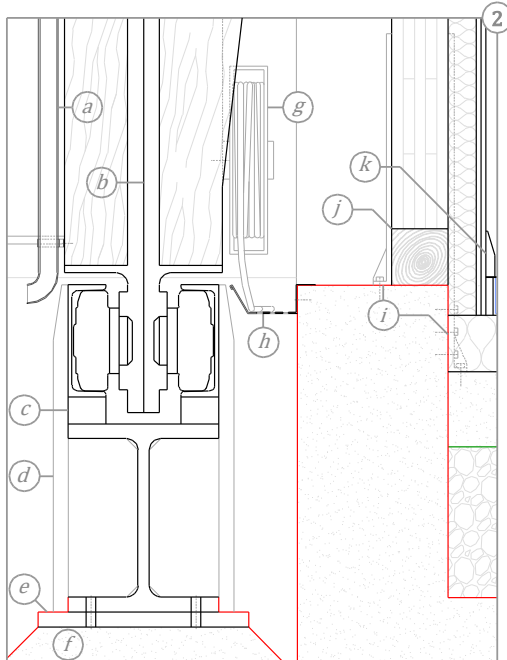
- Finitura continua in resina (0.5 cm)
- Massetto di finitura (5 cm)
- Vasca acustica anti-ingrano (0.5 cm)
- Strato impiantistico con pannelli isolanti in sughero (5 cm)
- Pannello CLT 5 strati (20 cm)
- Controsoffittatura impiantistica con correnti per cartongesso e riempimento in fibra di legno (5 cm)
- Pannello singolo di cartongesso intonacato (1.25 cm)

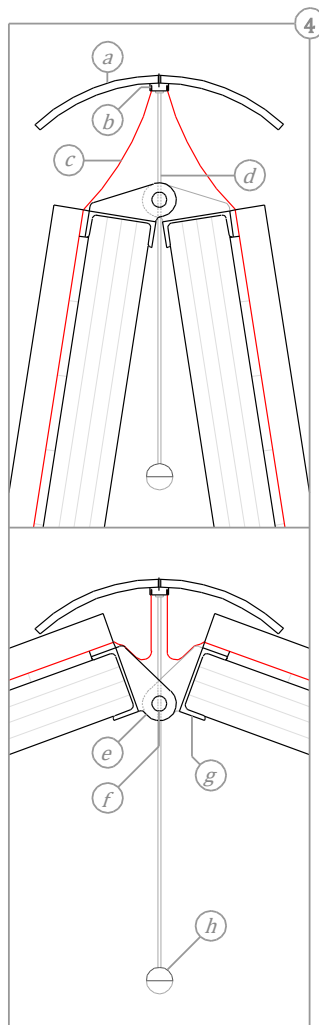
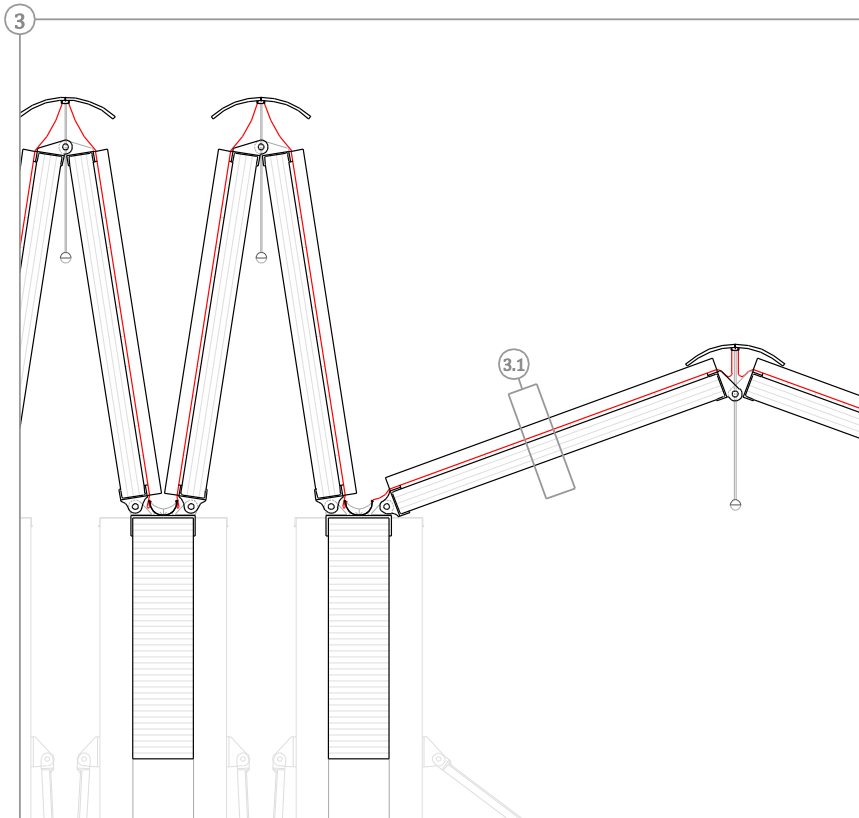
1.5: Solaio controterra uffici e produzione

- Strato di usura con spolvero di quarzo continuo (0.2 cm)
- Massetto fibrorinforzato con fibra in acciaio e giunti di dilatazione per grandi estensioni e carichi (10 cm)
- Telo anti-ingrano in nylon (0.2 cm)
- Triplo strato di pannelli in poliuretano espanso rigido ad elevata resistenza 120 kPa Stiferite (15 cm)
- Soletta in calcestruzzo armato (20 cm)
- Intasamento in ghiaia fine oppure tessuto non tessuto (0.2 cm)
- Vespaio in ghiaia grossa (40 cm)
- Membrana antiradice (0.2 cm)

2: Ingrandimento rotaia di base ai pilastri [1:20]

- Terminazione pluviale di raccolta dalle falde adattive
- Base pilastro in legno lamellare incollato con alloggiamento per la piastra in acciaio di collegamento alle ruote
- Sistema rotaia con ruote frenate, profilati in acciaio UPN 300 poggiati su barre rettangolari piene e trave HEM rinforzata
- Rinforzi puntuali antisbandamento e instabilità dell'ala
- Piastra di acciaio di base con fori per i tirafondi
- Inghisaggio puntuale rotaia rivestito da guaina impermeabile spalmata Plastivo
- Bobina avvolgicavo per il collegamento elettrico
- Canalina metallica forata per la sospensione dei cavi elettrici
- Posizionamento hold-down e squadrette per il CLT
- Cordolo in larice
- Spondina di dilatazione per il massetto e battiscopa





3. Falde copertura adattiva [1:50]

3.1 Elementi di falda a inclinazione variabile

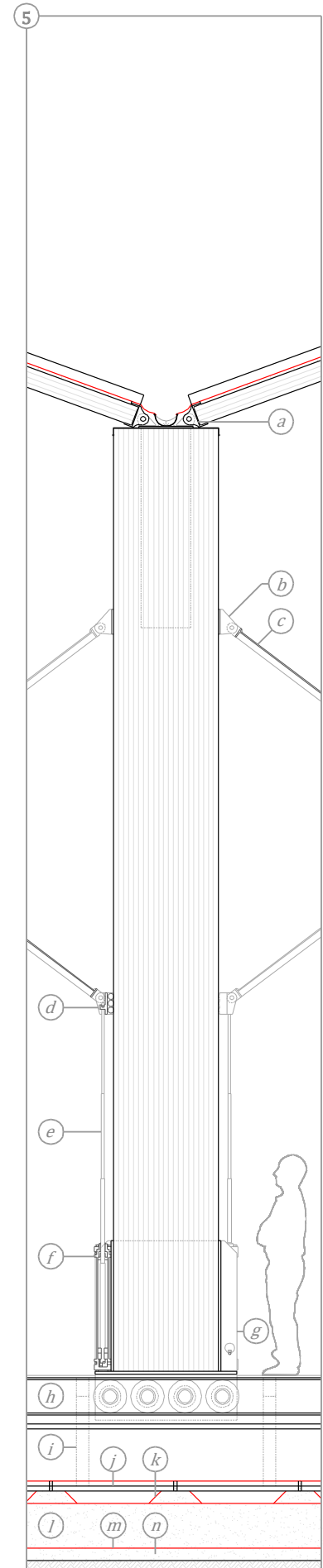
- Pannello in lamiera metallica coibentata fonoassorbente per coperture Metecno TOPROOF G3 (8 cm)
- Doppio strato di guaina impermeabile flessibile, estesa oltre i pannelli a giungere le cerniere mobili (0,4 cm)
- Tavolato in larice (2,5 cm)
- Travetti di falda in legno lamellare incollato GL 24h, sezione rettangolare (b = 12 cm; h = 16 cm), passo 200 cm

4. Ingrandimento elementi di colmo [1:20]

- a. Coppella di protezione in materiale plastico rigido leggero
- b. Elemento metallico lineare di fissaggio guaina e coppella
- c. Risvolti guaina impermeabile flessibile per la tenuta all'acqua
- d. Asticelle in acciaio puntuali di collegamento
- e. Flange in acciaio saldate e forate per il passaggio del perno
- f. Perno in acciaio con distanziatori a sfera per ridurre l'attrito della cerniera (Ø 40 mm)
- g. Profilati UPN continui alla terminazione dei travetti
- h. Portalampade industriale continuo, sostenuto dalle asticelle

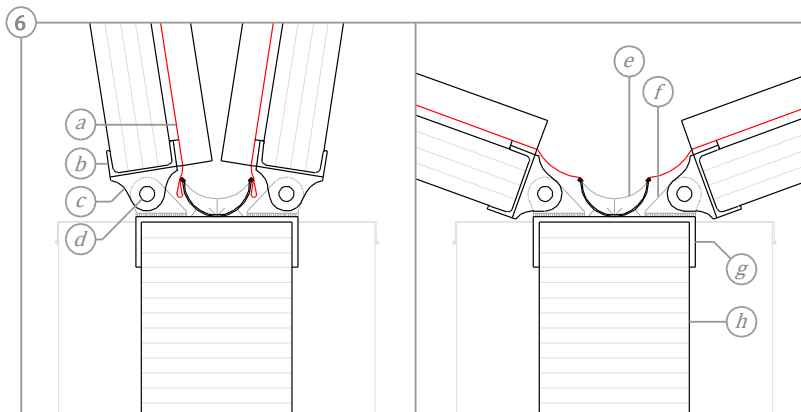
5. Dettaglio cielo-terra pilastro [1:50]

- a. Giunto travi di campata - elementi di falda [vedi a seguito]
- b. Flangia sommitale di collegamento ai perni di controvento
- c. Perno di movimentazione e controventamento composto da profilati in acciaio ad L accoppiati ad ali diseguali
- d. Giunto a cerniera perno - pistone, in appoggio tramite un carrello al pilastro
- e. Asta estensibile del pistone oleodinamico (in alternativa si può disporre una cremagliera della medesima lunghezza per attuatori con motore elettrico)
- f. Corpo principale del pistone oleodinamico Tecnos MD
- g. Fazzoletto saldato per alloggiamento pistoni, con foro di passaggio dei cavi di alimentazione avvolti nelle bobine laterali
- h. Prospetto del sistema rotaia con profilati in acciaio UPN 300 _ poggianti su barre rettangolari piene e trave HEM rinforzata, che inquadrano 4 coppie di ruote gommatae
- i. Rinforzi puntuali antisbandamento e instabilità dell'ala
- j. Piastra di acciaio di base con fori per i tirafondi
- k. Inghisaggio puntuale rotaia rivestito da guaina impermeabile spalmata Plastivo
- l. Solettone in calcestruzzo armato di base (35 cm)
- m. Guaina impermeabile (0,2 cm)
- n. Magrone (10 cm)



6: Ingrandimento cerniere travi-falde [1:20]

- a. Risvolti guaina impermeabile flessibile per la tenuta all'acqua
- b. Profilati UPN continui alla terminazione dei travetti
- c. Flange in acciaio saldate e forate per il passaggio del perno
- d. Perno in acciaio con distanziatori a sfera per ridurre l'attrito della cerniera (\varnothing 40 mm)
- e. Canale di gronda in lamiera piegata a freddo con pendenza minima ammessa dello 0.5%
- f. Flange in acciaio saldate alternate alle precedenti per il collegamento della cerniera alla trave
- g. Piastra in acciaio risvoltata per il trasferimento carichi dalle falde alla trave
- h. Trave di campata in legno lamellare incollato GL 24h con sezione rettangolare (b = 40 cm; h = 160 cm)

**7: Dettaglio di pianta murature uffici [1:50]****7.1: Parete perimetrale interna modulo uffici**

- Pannello CLT 5 strati, faccia a vista (15 cm)
- Controparete impiantistica con correnti per cartongesso e riempimento in pannelli isolanti in sughero (7.5 cm)
- Pannello di cartongesso (1.25 cm)
- Pannello di cartongesso intonacato (1.25 cm)

7.2: Tramezza in cartongesso interna

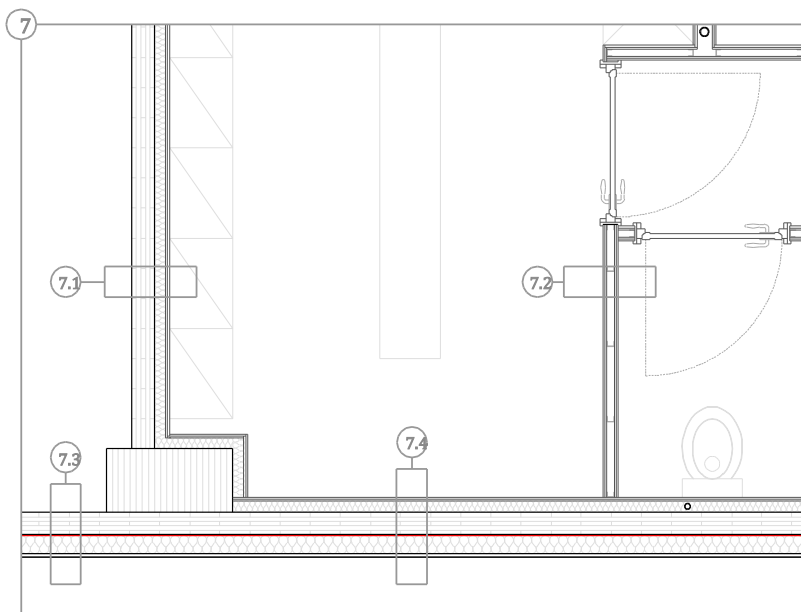
- Pannello di cartongesso intonacato (1.25 cm)
- Pannello di cartongesso (1.25 cm)
- Vuoto impiantistico con correnti profilati UPN sottili da cartongesso (4.9 cm)
- Pannello di cartongesso (1.25 cm)
- Pannello di cartongesso intonacato (1.25 cm)

7.3: Parete perimetrale locali di produzione

- Intonaco e rasatura (2 cm)
- Pannelli isolanti in sughero (12 cm)
- Freno al vapore (0.3 cm)
- Pannello CLT 5 strati, faccia a vista (15 cm)

7.4: Parete perimetrale esterna modulo uffici

- Intonaco e rasatura (2 cm)
- Pannelli isolanti in sughero (12 cm)
- Freno al vapore (0.3 cm)
- Pannello CLT 5 strati (15 cm)
- Controparete impiantistica con correnti per cartongesso e riempimento in pannelli isolanti in sughero (7.5 cm)
- Pannello di cartongesso (1.25 cm)
- Pannello di cartongesso intonacato (1.25 cm)

**8: Fossa esterna per rotaie e pozzetto [1:50]**

- a. Pozzetto di ispezione fognario prefabbricato in calcestruzzo armato Oppo
- b. Chiusino in ghisa (\varnothing 400 mm)
- c. Fondo fogna in gres
- d. Scatola con perni guida per lo scorrimento del parapetto esterno, fissate ai pilastri mobili
- e. Parapetto sulla fossa rotaie, estraibile assieme all'estensione dei moduli
- f. Spondina in lamiera metallica con guida per lo scorrimento della grata di chiusura avvolgibile che segue i pilastri quando vengono ritratti
- g. Sistema rotaia [vedi dettaglio 2]
- h. Spondina in lamiera metallica con guida per la grata avvolgibile, ripiegata a formare la canalina forata per sostenere i cavi elettrici a struttura estesa
- i. Fossa in calcestruzzo armato con base di spessore 35 cm, interamente rivestita da guaina impermeabile
- j. Magrone (10 cm)

8.1: Pavimentazione carrabile esterna

- Manto d'usura (3 cm)
- Binder (7 cm)
- Fondazione stradale (30 cm)
- Terreno (variabile secondo la quota della fognatura)
- Letto di rinfianco in sabbia vagliata e tubatura di deflusso per le acque reflue in PVC

8.2: Pavimentazione industriale copribile

- Strato di usura continuo con finitura realizzata tramite spolvero di quarzo (0.2 cm)
- Massetto fibrinforzato con fibra in acciaio e giunti di dilatazione per grandi estensioni e carichi (10 cm)
- Telo anti-ingrano in nylon (0.2 cm)
- Soletta in calcestruzzo armato (20 cm)
- Intasamento in ghiaia fine oppure tessuto non tessuto (0.2 cm)
- Vespaio in ghiaia grossa (40 cm)
- Membrana antiradice (0.2 cm)

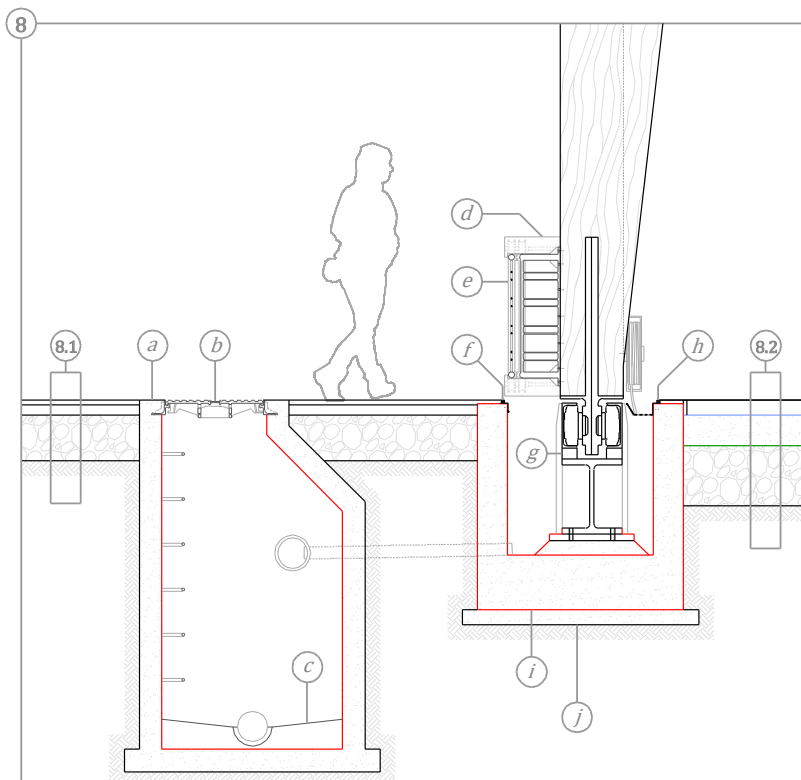




Figura 4.9.4.4: Vista esterna sul deposito merci in uscita dalla configurazione chiusa a quella aperta.



Figura 4.9.4.5: Vista esterna dello stabilimento in configurazione chiusa, intermedia e del tutto aperta.



Figura 4.9.4.6: Vista esterna frontale del deposito merci in uscita in configurazione chiusa e aperta.



Figura 4.9.4.7: Vista sul vano scale di ingresso agli uffici con copertura chiusa (a sinistra) e aperta (a destra).

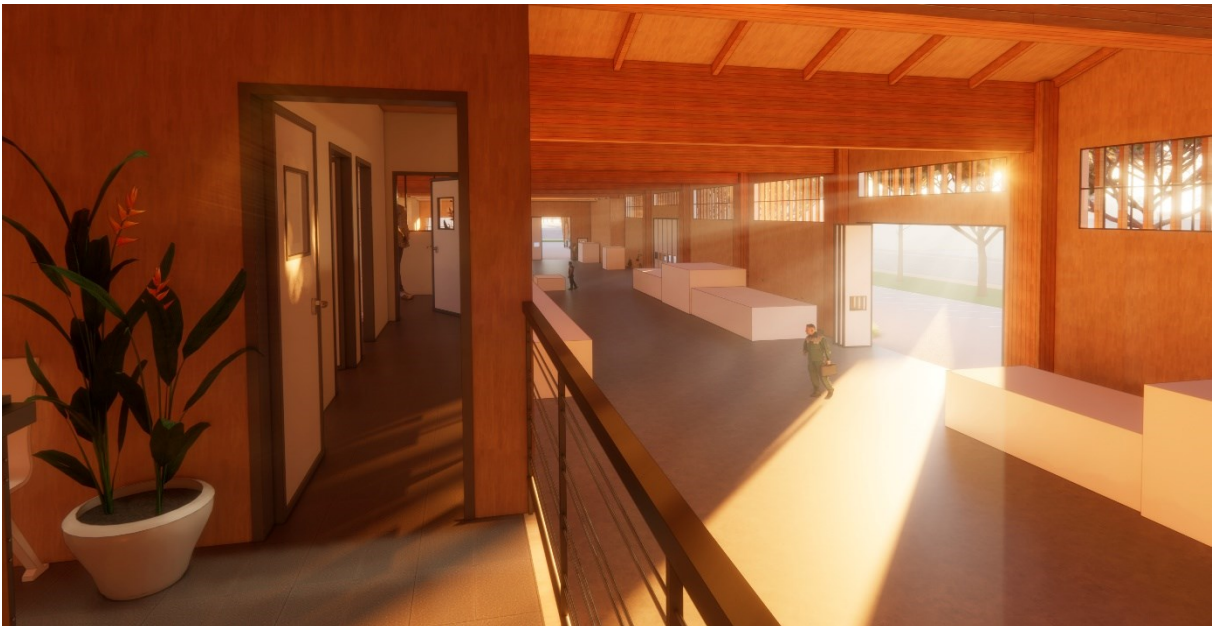


Figura 4.9.4.8: Vista dall'affaccio del vano scale del blocco uffici verso l'interno del nucleo produttivo.



Figura 4.9.4.9: Vista interna all'ufficio documenti con copertura chiusa (a sinistra) e aperta (a destra).

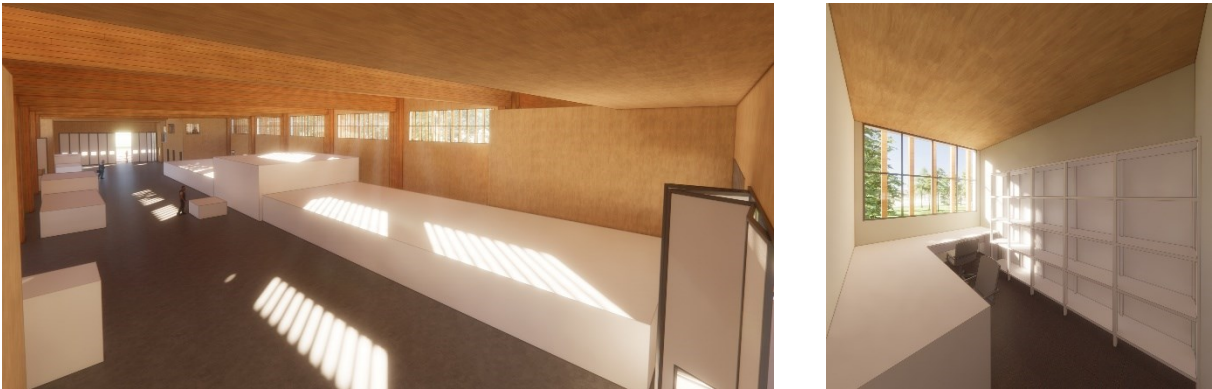


Figura 4.9.4.10: Viste interne di uffici al piano superiore e viste diagonali interne al nucleo produttivo.



Figura 4.9.4.11: Pianta generale prospettica del piano terra (moduli chiusi).



Figura 4.9.4.12: Pianta generale prospettica del piano primo (moduli chiusi).



Figura 4.9.4.13: Pianta generale prospettica al livello delle travi di campata (moduli chiusi).



Figura 4.9.4.14: Pianta generale prospettica al livello delle travi di campata (moduli aperti).

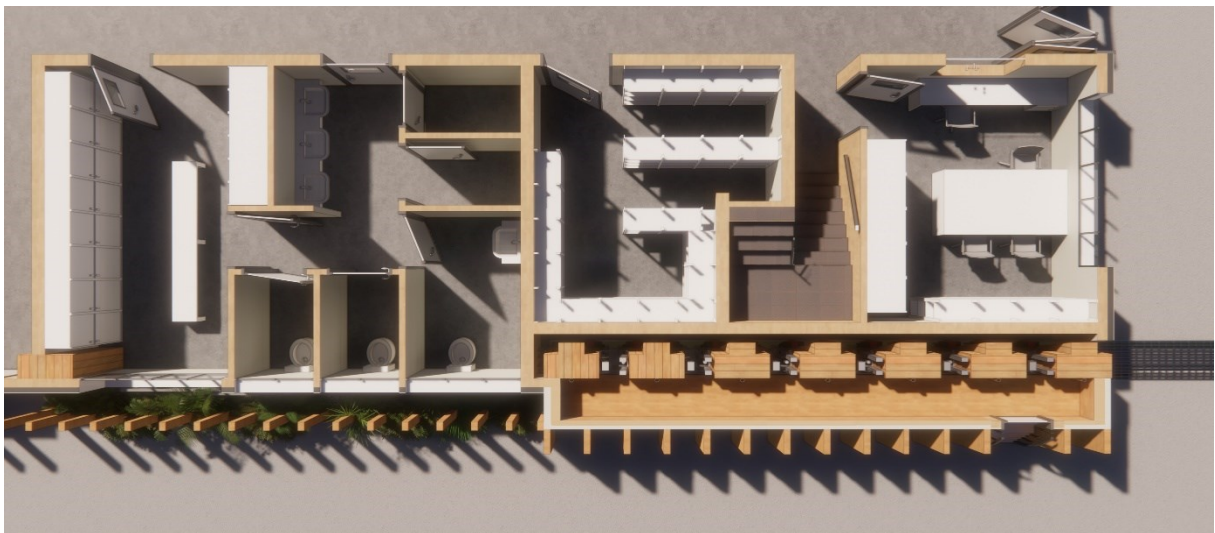


Figura 4.9.4.15: Pianta prospettica del piano terra del blocco uffici (moduli chiusi).

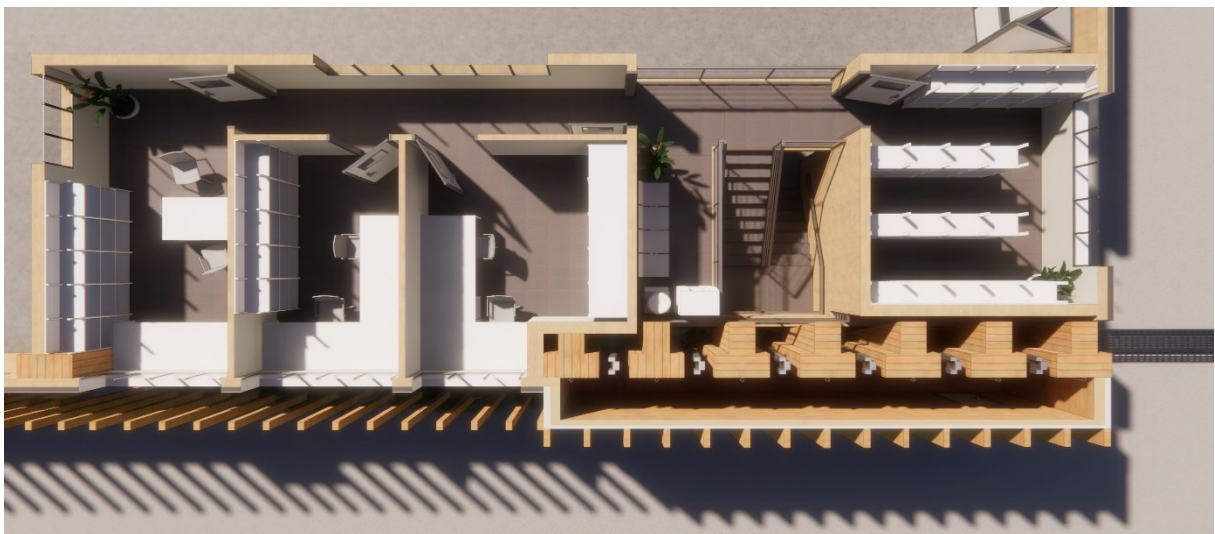


Figura 4.9.4.16: Pianta prospettica del piano primo del blocco uffici (moduli chiusi).

5 Progettazione strutturale del sistema adattivo

Una volta definite le dimensioni minime che la struttura adattiva deve raggiungere per rispondere alle richieste progettuali architettoniche, si procede al dimensionamento strutturale delle componenti portanti per ciascun modulo della struttura mobile. Questo impianto è ipotizzato come addossato ad una porzione fissa dell'edificio, specchiato sui lati opposti, pertanto le successive verifiche prescritte dalla normativa vengono svolte per un singolo sistema adattivo dei due simmetrici presenti nel progetto.

Inoltre, il nucleo produttivo, che presenta strutture inamovibili tradizionali, verrà trascurato dalle verifiche le quali si focalizzano sul comportamento della parte mobile, nelle sue varie conformazioni assunte, prima, durante ed a seguito della sua movimentazione. L'analisi svolta nel presente capitolo, mirata alla comprensione dell'andamento delle sollecitazioni in una struttura mobile, si limita al comportamento statico lineare delle molteplici configurazioni, trascurando eventuali sforzi o momenti del secondo ordine derivati da deformazioni della struttura sotto l'effetto dei carichi, ma assume ipotesi e fattori di sicurezza conservativi, in linea alle prescrizioni normative.

Trattandosi di una struttura completamente lignea, ad esclusione dei giunti e dei controventi metallici, la normativa di riferimento per verifiche agli Stati limite ultimi e di esercizio è quella definita al paragrafo 4.6.3 per il legno da costruzioni, in breve:

- D.M. 17 gennaio 2018, "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", per la definizione delle azioni agenti sulla struttura, delle verifiche SLU e SLE e per i coefficienti relativi alla sicurezza e alla resistenza dei materiali;
 - Circ. 21 gennaio 2019, "Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018", non cogenti ma di riferimento per la definizione dei carichi variabili di vento e neve, oltre che per integrare diverse verifiche SLU su elementi lignei;
 - UNI EN 14080:2013, "Strutture di legno - Legno lamellare incollato e legno massiccio incollato - Requisiti", per la definizione di valori caratteristici di resistenza del materiale;
 - UNI EN 1995-1-1:2014, "Eurocodice 5 - Progettazione delle strutture di legno - Parte 1-1: Regole generali - Regole comuni e regole per gli edifici", che armonizza il codice europeo per le verifiche non definite della NTC.
-

5.1 Definizione dello schema statico

Si intende realizzare una struttura mobile in legno lamellare incollato, che possa essere in grado di traslare in orizzontale ed estendere la superficie coperta tramite una ossatura ripiegabile in un pacchetto compatto all'esigenza. Di conseguenza, come indicato al paragrafo 4.9.2, si basa il movimento su una rotaia di base lungo la quale i pilastri delle singole arcate siano liberi di scorrere in modo indipendente, per rendere modulabile lo spazio. Per ottenere una struttura isostatica, si dispongono quindi dei vincoli che si comportino come bipendoli o incastri scorrevoli alla base dei pilastri, lasciando libero lo scorrimento orizzontale con il minimo attrito e mantenendo verticali i pilastri senza che possano ruotare. In sommità a ciascuna arcata, invece, si dispongono i travetti che dovranno sorreggere i pannelli di chiusura tramite un sistema con 3 cerniere che lascino libere le rotazioni relative tra gli elementi vincolati, in modo da consentire l'estensione dei moduli. L'ultimo di questi è pertanto vincolato alla struttura fissa, per garantire la stabilità a forze orizzontali, in prima istanza, tramite una coppia di carrelli (figura 5.1.1).

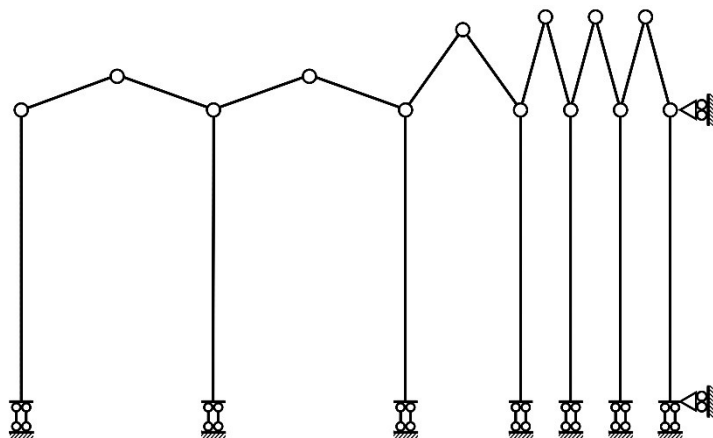


Figura 5.1.1: Schema statico di base in direzione longitudinale allo scorrimento dei sei moduli adattivi.

Con questa conformazione strutturale rimangono liberi gli scorrimenti relativi orizzontali tra le varie arcate, è dunque necessario inserire dei vincoli mobili che possano modulare tali spostamenti. Considerando che lo spazio tra i pilastri risulta ridotto, quando la struttura è richiusa, si ipotizza di sfruttare un movimento verticale per gli attuatori (pistoni oleodinamici oppure motori elettrici su cremagliera). Questi elementi possono spingere e mantenere stabile la struttura per mezzo di profilati simili a bielle, vincolate vicino alla sommità dei pilastri. Le stesse bielle possono trasferire le azioni orizzontali all'estremità inferiore anche tramite un carrello che scorre lungo i pilastri e, quando soggette alla forza modulabile dell'attuatore, fungono anche da controventi. Una volta disattivato l'attuatore, che imprime la sua forza durante il movimento della struttura, diventa necessario imporre un ultimo grado di vincolo per bloccare la struttura da ulteriori movimenti orizzontali; questo è raggiungibile tramite il bloccaggio degli stessi

attuatori sulla verticale, oppure con dei freni a rilascio elettrico (che lavorano anche in caso di blackout), in corrispondenza dei bipendoli di base, portandoli al grado di incastro che rende la struttura iperstatica (figura 5.1.2).

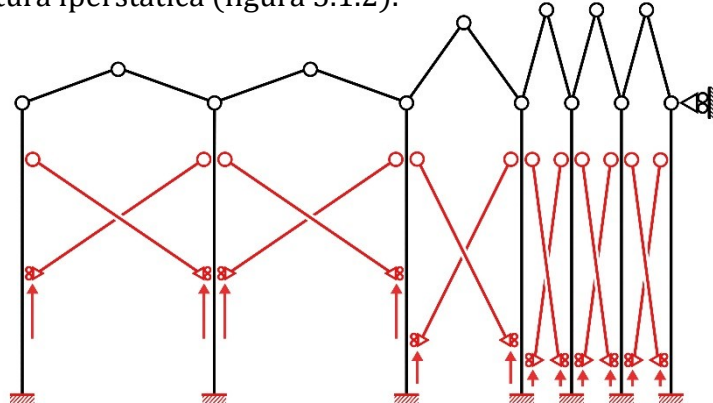


Figura 5.1.2: Schema statico longitudinale comprensivo di bielle, attuatori e freni per la movimentazione e il bloccaggio della struttura.

Nel piano trasversale allo scorrimento, lo schema statico si compone di arcate allineate, formate da pilastri e travi principali a in un portale incernierato alla base. Per garantirne la stabilità, si inseriscono degli irrobustimenti interni ai pilastri, trattati come bielle di controvento eccentriche per ridurre l'ingombro della luce libera interna.

Alla sommità delle travi si collega un profilato UPN, tramite una serie di cerniere, permettendo l'incastro delle coppie di travetti di falda. Il profilato metallico è incernierato alla trave con giunti distanziati del medesimo passo di 2m dei travetti; mentre un secondo corrente, simmetrico ad esso, è disposto in sommità per il collegamento alla falda successiva. Sfruttando la rigidità degli elementi di completamento previsti per le falde, gli stessi pannelli e tavolato di chiusura agiscono come controventi di piano.

Infine, il giunto trave-colonna realizzato tramite spinotti e viti a filettatura completa, pur limitando i movimenti e le rotazioni relative, è considerato a favore di sicurezza come cerniera a causa della flessibilità del materiale utilizzato. Trattandosi di un giunto legno-legno, il comportamento reale può essere accumulato ad un incastro semirigido, pertanto nell'esecuzione delle verifiche si assume un grado di vincolo inferiore per ricavare delle sollecitazioni più sfavorevoli (figura 5.1.3).

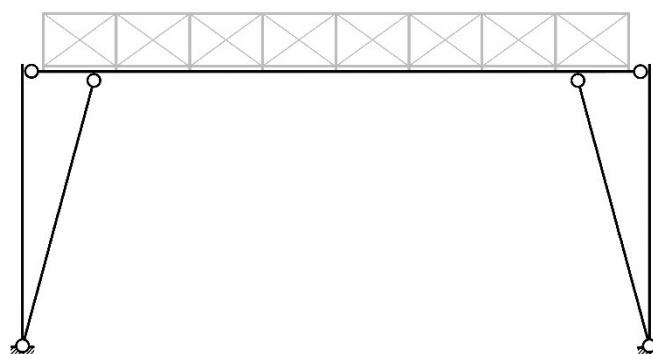


Figura 5.1.3: Schema statico in direzione trasversale allo scorrimento dei moduli di una singola arcata.

5.2 Dimensionamento strutturale

A seguito dello svolgimento delle verifiche preliminari considerate più stringenti per le strutture lignee, di deformazione in esercizio e di flessione a rottura, sono definite le dimensioni dei vari elementi strutturali per le successive analisi. Le resistenze caratteristiche e il peso del materiale strutturale considerato nel predimensionamento corrispondono a quelli del legno lamellare incollato GLULAM GL24h, con lamelle di spessore compreso tra 6 e 45mm, secondo la norma UNI EN 14080:2013 (Tabella 5.2.1).

Tabella 5.2.1: Caratteristiche meccaniche del legno lamellare incollato GL24H con lamelle s. 6 - 45mm.

Resistenza caratteristica a flessione	$f_{m,g,k}$	=	24,00	N/mm ²
Resistenza caratteristica a trazione parallela	$f_{t,0,g,k}$	=	19,20	N/mm ²
Resistenza caratteristica a trazione perpendicolare	$f_{t,90,g,k}$	=	0,50	N/mm ²
Resistenza caratteristica a compressione parallela	$f_{c,0,g,k}$	=	24,00	N/mm ²
Resistenza caratteristica a compressione perpendicolare	$f_{c,90,g,k}$	=	2,50	N/mm ²
Resistenza caratteristica a taglio	$f_{v,g,k}$	=	3,50	N/mm ²
Resistenza a rolling shear (rototaglio)	$f_{r,g,k}$	=	1,20	N/mm ²
Modulo elastico medio parallelo alle fibre	$E_{0,g,mean}$	=	11500	N/mm ²
Modulo elastico caratteristico parallelo alle fibre	$E_{0,g,05}$	=	9600	N/mm ²
Modulo elastico medio perpendicolare alle fibre	$E_{90,g,mean}$	=	300	N/mm ²
Modulo elastico caratteristico perpendicolare	$E_{90,g,05}$	=	250	N/mm ²
Modulo di taglio medio	$G_{g,mean}$	=	650	N/mm ²
Modulo di taglio caratteristico	$G_{g,05}$	=	540	N/mm ²
Modulo a rolling shear medio	$G_{r,g,mean}$	=	65	N/mm ²
Modulo a rolling shear caratteristico	$G_{r,g,05}$	=	54	N/mm ²
Massa volumica caratteristica	$\rho_{g,k}$	=	385	kg/m ³
Massa volumica media	$\rho_{g,mean}$	=	420	kg/m ³
Conducibilità termica	λ	=	0,13	W/mK

Utilizzando tale materiale di comune impiego nel settore e facendo riferimento a tagli e misure commerciali per i prodotti in legno strutturale, si ottengono le seguenti sezioni e lunghezze per la struttura principale dei moduli adattivi:

- **Pilastrì:** sezione a T 84 x 42cm con una sporgenza di irrigidimento trasversale larga 40 cm, di lunghezza variabile da 0 a 66.5 cm, formati da 21 lamelle parallele incollate di spessore 40 mm ciascuna, per un'altezza di 7.60 m per le ali e 6.00 m per la sporgenza. Sono orientati con le ali (asse forte) in direzione dello scorrimento.
- **Travi di campata:** sezione 160 x 40 cm, formate da 40 lamelle parallele incollate di spessore 40mm ciascuna, per una luce da coprire pari a 17.58 m, orientate con asse forte nel piano verticale.

- **Travetti di falda:** si dispongono un numero complessivo di 10 coppie di travetti per ogni campata coperta, con interasse pari a 2.02 m, sezione 16 x 12 cm, formati da 4 lamelle di spessore 40 mm ciascuna, per una lunghezza dei singoli travetti pari a 2.37 m tra le due cerniere alle estremità. L'asse forte è disposto nel piano verticale anche se la sua inclinazione in tale piano varia a seconda del grado di apertura del modulo corrispondente.

Per gli elementi di completamento invece si considerano i pesi dei seguenti prodotti:

- **Pannelli coibentati da copertura:** Metecno TOPROOF® G3, di larghezza pari a 1.00 m, lunghezza 2.40 m e spessore 80 mm. Trasmittanza termica di 0.25 W/m²K e peso di superficie uguale a 10.05 kg/m².
- **Guaina impermeabilizzante:** di spessore 1 mm, massa volumica pari a 150 kg/m³ e conseguente peso di superficie di 0.08 kg/m².
- **Tavolato in larice:** di spessore 25 mm, massa volumica di 500 kg/m³ e conseguente peso di superficie pari a 12.50 kg/m².
- **Elemento di completamento di colmo:** comprendente una coppella plastica rigida, il sistema di aggancio al giunto e il contrappeso con lampade per l'illuminazione, stimato a favore di sicurezza con un peso di 15 kg al metro lineare.
- **Bielle mobili:** realizzate ciascuna con un profilato in acciaio angolare a lati diseguali e spigoli tondi con riferimento alla norma UNI 5874-66, con ali pari a 20 e 30 mm spesse 5 mm, per un peso pari a 1.78 kg al metro lineare.

5.3 Definizione dei carichi

I carichi agenti sulla struttura sono definiti secondo normativa NTC 2018 e circolare applicativa del 2019 assegnando una vita nominale per l'edificio di 50 anni considerando la struttura ordinaria nelle prestazioni richieste (tabella 5.3.1).

Tabella 5.3.1 [2.4.1 nelle NTC]: Valori minimi della Vita nominale di progetto per i diversi tipi di costruzioni.

Tipi di costruzioni	Valori minimi di V_N in anni
Costruzioni temporanee e provvisorie	10
Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari	50
Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	100

I carichi presenti secondo progetto e considerati nell'analisi strutturale risultano:

- **Permanenti:** agiscono durante tutta la vita nominale di progetto della costruzione, la cui variazione di intensità nel tempo è molto lenta e di modesta entità:

- G_1 : Peso proprio degli elementi strutturali, del terreno quando pertinente e della pressione dell'acqua quando si configura costante nel tempo;
 - G_2 : Peso proprio di tutti gli elementi non strutturali.
- **Variabili:** agiscono con valori istantanei che possono risultare sensibilmente diversi fra loro nel corso della vita nominale della struttura:
- Q_K : Sovraccarico previsto per la categoria d'uso dell'ambiente;
 - Q_W : Azione del vento;
 - Q_S : Azione della neve;
 - Q_E : Azione sismica (affrontata al paragrafo 5.6).

Ognuna di queste azioni viene calcolata per essere poi valutata in combinazione alle altre, sui diversi elementi strutturali che compongono i moduli adattivi. Per valutare il comportamento della struttura durante i diversi gradi di apertura per l'intero movimento tra la configurazione richiusa e quella estesa, si ricavano tramite il foglio di calcolo, le sollecitazioni corrispondenti ai vari angoli di inclinazione che le falde di copertura possono assumere. A seguito dell'analisi iterativa per ricavare queste sollecitazioni durante l'apertura differenziata di tutti e sei i moduli vengono ricavati dei grafici riassuntivi per visualizzare il comportamento della struttura, ma per semplicità i valori riportati per i carichi seguenti fanno riferimento ad una singola configurazione di apertura in modo da fornire un'idea indicativa della loro entità.

La configurazione di riferimento per i valori indicativi riportati per i carichi a seguire corrisponde ad un modulo completamente aperto, ed i restanti completamente richiusi, poiché questa conformazione risulta una delle più gravose per gli elementi strutturali una volta combinati i carichi.

5.3.1 Sovraccarico

I sovraccarichi legati alla destinazione d'uso della struttura sono definiti dalle NTC 2018 come comprensivi degli effetti dinamici ordinari, purché non sia presente il rischio di amplificazioni dinamiche della risposta delle strutture. I valori di riferimento della norma sono forniti in relazione alle condizioni di uso corrente e della rispettiva categoria (tabella 5.3.1.1). Altri regolamenti o condizioni particolari, come la presenza di carichi atipici quali macchinari, serbatoi, depositi interni o impianti, possono imporre intensità di carico differenti da valutare caso per caso esplicitandoli nelle documentazioni di progetto e di collaudo statico.

Trattandosi esclusivamente dell'analisi della copertura, l'unico carico considerato è:

- Sovraccarico per coperture accessibili solo per manutenzione, $q_k = 500 \text{ N/m}^2$.
-

Tabella 5.3.1.1 [3.1.II nelle NTC]: Valori dei sovraccarichi per le diverse categorie d'uso delle costruzioni.

Categorie	Ambienti	q_k $\left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right]$	Q_k [kN]	H_k $\left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right]$
H-I-K Coperture	Cat. H Coperture accessibili per sola manutenzione e riparazione	0.50	1.20	1.00
	Cat. I Coperture praticabili di ambienti di categoria d'uso compresa tra A e D	Secondo categorie di appartenenza		
	Cat. K Coperture per usi speciali quali impianti, eliporti	Da valutarsi caso per caso		

5.3.2 Azione del vento

Il movimento dell'aria, generalmente considerato orizzontale, esercita azioni di carattere dinamico sulle strutture. Queste azioni possono essere ricondotte a carichi statici equivalenti seguendo le prescrizioni normative, in particolare, assimilandoli a pressioni o depressioni distribuite sulle superfici dell'involucro esterno dell'edificio. Tali carichi distribuiti agiscono in direzione normale alle superfici in relazione alla direzione del vento considerata, risultando sfavorevoli o favorevoli alla stabilità strutturale. La norma specifica che per costruzioni di forma o tipologia inusuale, molto elevata o lunga, di rilevante snellezza e leggerezza, o che presenti una notevole flessibilità e ridotte capacità dissipative, il vento può dare luogo a fenomeni risonanza che amplificano ciclicamente le deformazioni. Questi, qualora siano possibili, vanno valutati secondo metodologie di calcolo adeguate allo stato dell'arte.

Ai fini delle verifiche si considerano le direzioni in cui il vento comporta le più gravose sollecitazioni per le strutture ricavando la pressione come:

$$q_w = q_r \cdot c_e \cdot c_d \cdot c_p$$

Dove:

q_r è la pressione cinetica di riferimento: $q_r = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2$

ρ è la densità dell'aria assunta come costante pari a 1.25kg/m³

v_r è la velocità di riferimento del vento: $v_r = v_b \cdot c_t$

c_t è un coefficiente riduttivo: $c_t = 0.75 \cdot \sqrt{1 - 0.2 \cdot \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T_r} \right) \right]}$

T_r è il periodo di ritorno, assunto pari a 50 anni

v_b è la velocità base di riferimento che dipende dalla velocità di riferimento al livello del mare relativa alla zona di edificazione (Veneto: zona 1), e al coefficiente di altitudine del sito (Villamarzana: 7mslm), rispetto alla quota di riferimento della zona ($a_0 = 1000\text{mslm}$).

c_e è il coefficiente di esposizione: $\begin{cases} c_e(z) = k_r^2 c_t \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \left[7 + c_t \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right] & [z \geq z_{min}] \\ c_e(z) = c_e(z_{min}) & [z > z_{min}] \end{cases}$

dove l'altezza di riferimento (z) corrispondente al colmo della copertura varia in base al grado di apertura tra 9.92m e 8.41m, ma rimane sempre superiore a quella di pressione costante (z_{\min}) di 4.00m corrispondente alla categoria di esposizione II (sotto i 500mslm, oltre 30km dalla costa, zona 1, classe D), e con classe di rugosità del terreno D (aree prive di ostacoli o al più con ostacoli rari) che determina un coefficiente topografico (c_t) unitario

c_d è il coefficiente dinamico per effetti riduttivi associati alla non contemporaneità delle massime pressioni locali e degli effetti amplificativi dovuti alla risposta dinamica della struttura. Esso può essere assunto cautelativamente pari ad 1 nelle costruzioni di tipologia ricorrente, quali gli edifici di forma regolare non eccedenti 80 m di altezza ed i capannoni industriali, oppure può essere determinato mediante analisi specifiche o facendo riferimento a dati di comprovata affidabilità.

c_p è il coefficiente di pressione calcolato come descritto nella circolare applicativa del 2019 al il paragrafo C3.3.8.1.6 per coperture multifalda di cui al caso (C) in figura, dove si applicano al primo tratto della copertura (prima falda sopravvento) i coefficienti di pressione definiti nel paragrafo coperture a falda singola con inclinazione positiva. Ai tratti successivi della copertura si applicano i coefficienti di pressione riportati nel paragrafo coperture a falda doppia con inclinazione negativa; tali coefficienti sono moltiplicati per il fattore riduttivo 0,6 a partire dal terzo tratto della copertura (figura 5.3.2.1). Mentre per le pareti verticali costituite dai pannelli di chiusura si fa riferimento al paragrafo C.3.3.8.1.1 considerando l'edificio come basso avendo per qualsiasi grado di apertura un'altezza di colmo pari o inferiore alla larghezza della base. Di conseguenza i valori del coefficiente sono definiti di conseguenza per le falde di copertura (tabella 5.3.2.1) e per le pareti verticali (tabella 5.3.2.2).

Per ricavare questo coefficiente con vento in direzione parallela al colmo si considera il caso specifico con doppia falda al paragrafo C3.3.8.1.4, dove si definisce una fascia sopravvento e una restante (tabella 5.3.2.3).

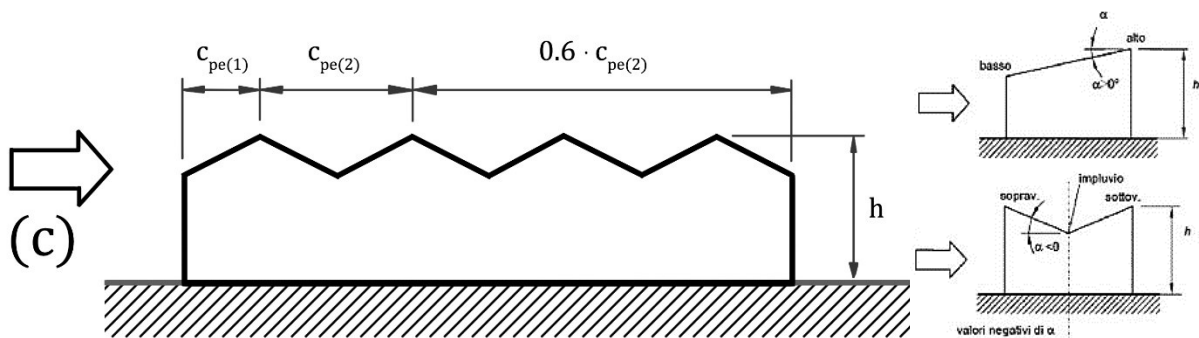


Figura 5.3.2.1: Caso (C) in figura C3.3.18 della circolare per vento perpendicolare ai colmi con falde multiple.

Tabella 5.3.2.1 [C3.3.IV e C3.3.IX nella circolare]: Coefficienti di pressione per coperture a semplice falda e a doppia falda con vento in direzione perpendicolare al colmo.

Falda	Valori positivi		Valori negativi	
Semplice	$\alpha \leq -60^\circ$	$C_{pe} = -0.5$	$0^\circ < \alpha \leq 45^\circ$	$C_{pe} = + \alpha/75$
	$-60^\circ < \alpha \leq -15^\circ$	$C_{pe} = -0.5 - (\alpha+60)/90$	$45^\circ < \alpha \leq 75^\circ$	$C_{pe} = +0.6 + (\alpha-45)/150$
	$-15^\circ < \alpha \leq 30^\circ$	$C_{pe} = -1.0 + (\alpha+15)/75$		
	$30^\circ < \alpha \leq 45^\circ$	$C_{pe} = -0.4 + (\alpha-30)/37.5$		
Doppia	-		$-75^\circ < \alpha \leq -15^\circ$	$C_{pe} = -0.85 + (\alpha+60)/180$
	-		$-15^\circ < \alpha \leq 15^\circ$	$C_{pe} = -0.6$
	-		$15^\circ < \alpha \leq 45^\circ$	$C_{pe} = -0.6 + (\alpha-15)/100$
	-		$45^\circ < \alpha$	$C_{pe} = -0.3$

Tabella 5.3.2.2 [C3.3.I nella circolare]: Coefficienti di pressione per facce sopravvento, sottovento e laterali.

Faccia sopravvento	Faccia sottovento	Facce laterali
$h/d \leq 1$; $C_{pe} = 0.7 + 0.1 \cdot h/d$	$h/d \leq 0.5$; $C_{pe} = -0.5 - 0.8 \cdot h/d$	$h/d \leq 1$; $C_{pe} = -0.3 - 0.2 \cdot h/d$
$h/d > 1$; $C_{pe} = 0.8$	$h/d > 0.5$; $C_{pe} = -0.9$	$1 < h/d \leq 5$; $C_{pe} = -0.5 - 0.05 \cdot (h/d - 1)$

Tabella 5.3.2.3 [C3.3.X nella circolare]: Coefficienti di pressione per coperture a doppia falda con vento in direzione parallela al colmo.

Fascia sopravvento di profondità pari al minimo tra b/2 ed h	$\alpha \leq -30^\circ$	$C_{pe} = -1.0$
	$-30^\circ < \alpha \leq 0^\circ$	$C_{pe} = -0.8 + \alpha/150$
	$0^\circ < \alpha \leq 30^\circ$	$C_{pe} = -0.8 - \alpha/150$
	$30^\circ < \alpha$	$C_{pe} = -1.0$
Restanti zone	$-45^\circ < \alpha \leq -30^\circ$	$C_{pe} = -0.9$
	$-30^\circ < \alpha \leq 10^\circ$	$C_{pe} = -0.9 + (\alpha+30)/100$
	$10^\circ < \alpha$	$C_{pe} = -0.5$

Questi valori di pressione del vento sulle diverse facce e falde dell'edificio sono riferiti alla versione con elementi di chiusura perimetrali, oltre che alla versione aperta esclusivamente per quanto riguarda il vento in direzione parallela ai colmi, in quando la circolare non fornisce un metodo di calcolo specifico per tale configurazione.

Per la versione della struttura priva di pannelli di chiusura perimetrali e vento in direzione perpendicolare ai colmi, è invece possibile far riferimento al paragrafo C3.3.8.2.3 della circolare per tettoie a falde multiple, dove ciascuna coppia di falde della tettoia composte da più coppie di falde affiancate (di uguale pendenza) può essere analizzata, in prima approssimazione, come una singola tettoia a doppia falda. Limitatamente al caso di vento perpendicolare alla direzione dei colmi, e per il solo tipo costruttivo riportato (figura 5.3.2.2).

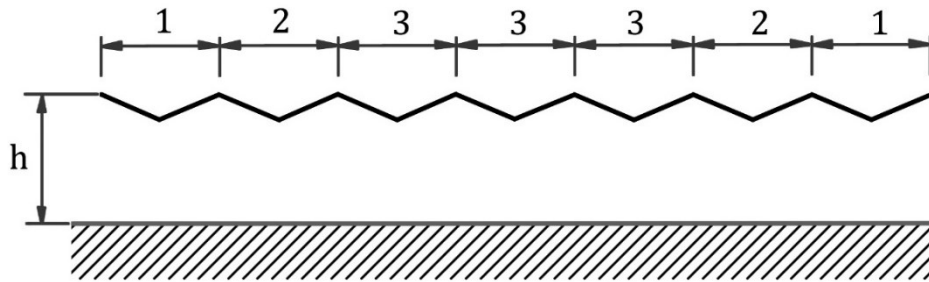


Figura 5.3.2.2: Caso in figura C3.3.25 della circolare per vento perpendicolare a tettoie con falde multiple.

Considerando soddisfatta la condizione di avere falde che presenti la medesima pendenza a coppie, per poter sfruttare correttamente le indicazioni per tettoie a doppia falda del paragrafo C3.3.8.2.2 della circolare, è possibile determinare diversi coefficienti di forza (C_F) per la condizione di vento perpendicolare ai colmi. Tali coefficienti dipendono dal grado di bloccaggio del vento passante sotto la tettoia, nonché dall'inclinazione variabile delle falde. Essendo il coefficiente di bloccaggio (ϕ) dipendente dalla superficie ostruita al di sotto della tettoia con un massimo pari ad 1 (completamente ostruita) ed un minimo pari a 0 (completamente sgombra), si procede a verificare per ogni configurazione della struttura il caso più gravoso di ingombro che deve necessariamente corrispondere al massimo o al minimo grado di bloccaggio (figura 5.3.2.3). Di conseguenza, trattandosi di un deposito dove il materiale può arrivare a ostruire una qualsiasi percentuale di superficie, si considera nel calcolo dei coefficienti di forza il più sfavorevole dei due casi estremi di bloccaggio.

Una volta ricavati i coefficienti di forza ridotti secondo lo schema di falde multiple (tabelle 5.3.2.3 e 5.3.2.4), si può determinare la posizione e la direzione delle risultanti dell'azione del vento sulle coppie di falde della tettoia come illustrato in figura 5.3.2.4.

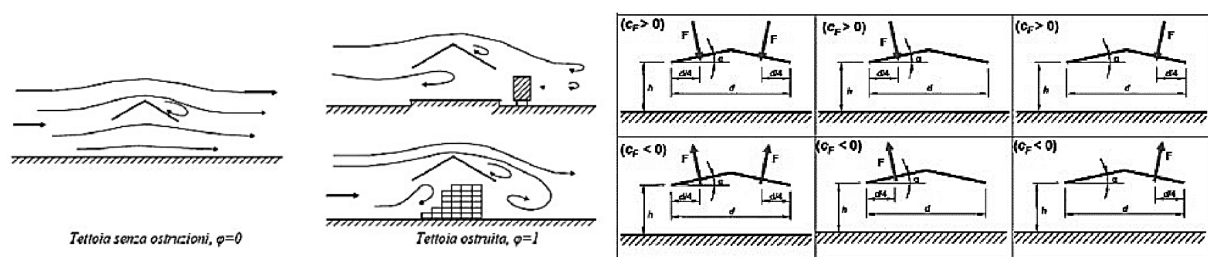


Figura 5.3.2.3: A sinistra, figura C3.3.20 della circolare per illustrare i coefficienti di bloccaggio per tettoie.

Figura 5.3.2.4: A destra, figura C3.3.24 (A) della circolare punti di applicazione e direzione delle risultanti.

Tabella 5.3.2.3 [C3.3.XVI nella circolare]: Coefficienti di forza per tettoie a doppia falda (α in $^\circ$).

Valori positivi	Tutti i valori di ϕ		$C_F = +0.2 + 0.7 \cdot \alpha / 30$
Valori negativi	$\phi = 0$	$\alpha \leq 0^\circ$	$C_F = -0.5 + 0.1 \cdot \alpha / 10$
		$\alpha > 0^\circ$	$C_F = -0.5 - 0.2 \cdot \alpha / 10$
	$\phi = 1$	Tutti i valori di α	$C_F = -1.4$

Tabella 5.3.2.6: Valori di pressione del vento sui pannelli di facciata per la configurazione di esempio.

Vento perpendicolare ai colmi (da ovest)				
Faccia	Sud (d)	Nord (d)	Ovest* (b)	Est* (s)
q_w [N/m ²]	-469	-469	676	-768
Vento parallelo ai colmi (da sud)				
Faccia	Sud (d)	Nord (d)	Ovest* (b)	Est* (s)
q_w [N/m ²]	690	-768	-323	-323

(*) Si considera anche il pannello di chiusura trasversale allo scorrimento della struttura adattiva simmetrica a quella analizzata, perché con vento simmetrico tale azione risulta invece sulla faccia trasversale della struttura analizzata.

5.3.3 Azione della neve

Il carico della neve agisce sempre in direzione verticale, indipendentemente dall'inclinazione delle falde, per questo comporta una sollecitazione lungo gli elementi di copertura inclinati variabile a seconda del loro angolo e scomponibile nelle due componenti normale e parallela alla superficie.

Per il calcolo dell'azione si fa riferimento alla circolare del 2019 dove corrisponde a:

$$q_s = C_E \cdot C_T \cdot q_{sk} \cdot \mu_i$$

Dove:

C_E è il coefficiente di esposizione che tiene conto di caratteristiche topografiche e specifiche dell'area dove sorge il fabbricato. Nel caso del lotto di Villamarzana si considera un'area battuta dai venti, ossia pianeggiante, senza ostruzioni o alberi alti, da cui deriva un coefficiente pari a 0.9

C_T è il coefficiente termico che tiene conto della riduzione del carico della neve, a causa dello scioglimento della stessa, causata dalla perdita di calore della costruzione. Tale coefficiente dipende dalle proprietà di isolamento termico del materiale utilizzato in copertura e in assenza di uno specifico e documentato studio equivale a 1.0

q_{sk} è il carico caratteristico della neve al suolo, che dipende dalle condizioni locali di clima, esposizione e variabilità delle precipitazioni. In mancanza di specifiche indagini locali sull'altezza del manto nevoso e sua densità, il carico di riferimento va assunto pari a quanto definito dalla zonizzazione fornita dalla norma. Nel caso di Villamarzana, Rovigo, per un'altitudine di 7mslm (inferiore a 200mslm), in zona II – Veneto, il carico caratteristico al suolo è pari a 1000n/m²

μ_i è il coefficiente di forma specifico per il tipo e la geometria della copertura considerata. In assenza di dati suffragati da opportuna documentazione, i valori nominali del coefficiente sono definiti per coperture a più falde adiacenti al paragrafo C3.4.3.3 della circolare, che consiglia di considerare

diversi coefficienti per verificare due casi distinti: in cui si presentano o meno degli accumuli di neve, rappresentati da un diagramma di carico triangolare che si somma a quello uniformemente distribuito sulle singole falde (figura 5.3.3.1). La norma specifica che, qualora entrambe le falde convergenti in un compluvio abbiano una inclinazione superiore a 60° , si deve prestare particolare attenzione alla scelta dei coefficienti. Tenendo presente che l'intensità degli accumuli in queste zone è funzione dell'altezza del compluvio e dell'azione di redistribuzione della neve operata dal vento. Inoltre, l'effetto degli accumuli va considerato anche per compluvi con angolo di inclinazione delle falde pari o superiore a 30° qualora la larghezza del tratto sotteso dalle due falde adiacenti che formano tale compluvio sia superiore a 3.5m, sotto i quali la corrugazione della copertura è considerata ininfluenza per la formazione di accumuli finché non si supera l'inclinazione di 60° come visto in precedenza (tabella 5.3.3.1).

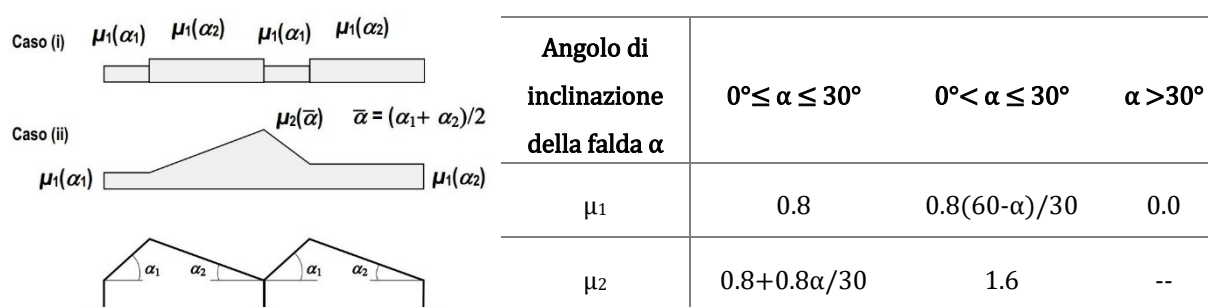


Figura 5.3.3.1: A destra, figura della C3.3.18 nella circolare, coefficiente di forma per coperture a più falde.

Tabella 5.3.3.1 [C3.4.1 nella circolare]: A sinistra, coefficienti di forma per il carico neve.

Trattandosi di una copertura con falde che presentano inclinazioni variabili durante il movimento dei moduli, con un minimo di 20° ed un massimo superiore ai 60° , a seconda della configurazione considerata cambia anche la formula utilizzata per determinare il carico della neve. Per le successive verifiche il caso che considera gli accumuli risulta essere il più gravoso sulla struttura, e la normativa non fornisce un coefficiente di forma da accumulo per inclinazioni relative medie tra le due falde in compluvio superiori ai 60° . Di conseguenza si valuta il peso del volume di neve che può essere compreso tra le due falde dei compluvi tramite la densità della stessa, che è stimata variabile tra i 20kg/m^3 per neve fresca ed i 500kg/m^3 per neve umida e compattata.

Data la notevole variabilità del valore che può incrementare di addirittura un ordine di grandezza a seconda del tempo di sedimentazione e della costanza o meno delle precipitazioni, si considera cautelativamente una densità intermedia, pari a 200kg/m^3 (2000N/m^3), tenendo conto che la struttura può essere aperta e richiusa per ovviare al problema degli accumuli nevosi a seguito di precipitazioni straordinarie.

A differenza delle altre azioni, per il carico neve si ottiene quindi una combinazione di diagrammi di carico con due azioni distribuite distinguibili, la prima con diagramma rettangolare (q_{sr}) e la seconda dovuta agli accumuli con diagramma triangolare (q_{st}) per ciascuna falda (tabella 5.3.3.2). Inoltre, come avviene per il sovraccarico, tali azioni hanno direzione verticale e non necessariamente normale alle superfici, di conseguenza vengono scomposte secondo l'asse degli elementi strutturali da verificare in sede di calcolo.

Tabella 5.3.3.2: Valori del carico neve sulle falde di copertura per la configurazione di esempio.

Carico della neve con accumuli												
Falda n.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
q_{sr} rettangolare di base [N/m ²]	720	720	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
q_{st} triangolare per accumuli [N/m ²]	0	720	1440	4649	4649	4649	4649	4649	4649	4649	4649	1440
Proiezione area sull'orizzontale [m ²]	4.49	4.49	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
Componenti normali alle falde												
$q_{sr\perp}$ normale di q_{sr} [N/m ²]	636	636	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$q_{st\perp}$ normale di q_{st} [N/m ²]	0	636	52	168	168	168	168	168	168	168	168	52
Componenti parallele alle falde												
$q_{sr//}$ parallela di q_{sr} [N/m ²]	231	231	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$q_{st//}$ parallela di q_{st} [N/m ²]	0	231	269	867	867	867	867	867	867	867	867	269

5.3.4 Pesì propri strutturali e non strutturali

Per il calcolo del peso dei diversi elementi si fa riferimento ai dati tecnici dei prodotti utilizzati e al peso specifico per unità di volume del materiale strutturale. Inoltre, per ottenere indicativamente la massa da movimentare per ogni modulo apribile, si esegue un rapido computo della massa di una arcata, delle due falde e degli elementi che la congiungono alla successiva per poter stabilire un attuatore con una potenza adeguata alla movimentazione (tabella 5.3.4.1).

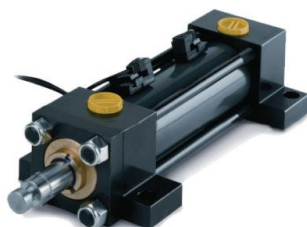
Tabella 5.3.4.1: Pesì propri degli elementi strutturali con riferimento al singolo modulo estensibile.

Elementi strutturali				
Elemento	Peso specifico	Volume	N. elementi per ciascun modulo	Massa complessiva per il modulo
Pilastrì	4200 N/m ³	2.68 m ³	2	2252 kg
Travi di campata	4200 N/m ³	11.25 m ³	1	4725 kg
Travetti d falda	4200 N/m ³	0.04 m ³	20	325 kg

Tabella 5.3.4.2: Pesì propri degli elementi non strutturali con riferimento al singolo modulo estensibile.

Elementi non strutturali				
Elemento	Peso specifico	Lunghezza o area	N. elementi per ciascun modulo	Massa complessiva per un modulo
Pannelli coibentati	99 N/m ²	2.40 m ²	36	872 kg
Guaina di tenuta	0.74 N/m ²	44.18 m ²	2	7 kg
Tavolato in larice	123 N/m ²	44.18 m ²	2	1105 kg
Elemento di colmo	147 N/m	18 m	1	270 kg
Bielle mobili	17.45 N/m	5.29 m	4	38 kg

Considerando che l'intera massa da mobilitare per il singolo modulo corrisponda alla sommatoria di quella delle sua componenti strutturali, non strutturali e arrotondando il margine di 400 kg per tenere conto di giunti metallici, degli attuatori stessi e dei cavi impiantistici, si arriva a toccare appena 10'000 kg (10 ton), ossia circa il peso di un camion moderno vuoto. Di conseguenza la scelta del tipo e numero di attuatori su cui ripartire la spinta necessaria a muovere una massa di 10 tonnellate, in orizzontale e su carrelli con ruote per ridurre l'attrito, rimane libera tra motori elettrici con catena o rotaia (figura 5.3.4.1), e pistoni oleodinamici con allungamento di 2.4 m (figura 5.3.4.2). In ciascun caso, le dimensioni dell'attuatore possono risultare sufficientemente ridotte da rientrare nello spazio previsto tra i pilastri a moduli richiusi.

*Figura 5.4.3.1: A sinistra, motore ad azionamento elettrico con catena riavvolgibile con portata di 5 ton.**Figura 5.4.3.2: A destra, pistoni oleodinamici con allungamento tra 2.00 m e 4.00 m, e con portate elevate.*

5.4 Combinazioni di carico agli stati limite ultimi e di esercizio

Per svolgere le verifiche statiche dell'analisi strutturale si fa riferimento alle NTC 2018, dove si definiscono le combinazioni dei carichi definiti in precedenza per tenere conto della probabilità di contemporaneità tra diversi carichi variabili al loro picco massimo quali vento, neve e sovraccarico, in relazione al rischio che questo avvenga per la durata della vita nominale dell'edificio ed in base anche al livello di sicurezza richiesto per la tipologia edilizia corrispondente.

Delle combinazioni presenti in normativa, ai fini delle verifiche eseguite si calcolano:

- **Combinazione fondamentale**, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi:

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

- **Combinazione caratteristica**, impiegata per gli stati limite di esercizio irreversibili:

$$G_1 + G_2 + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

- **Combinazione quasi permanente**, impiegata per gli effetti a lungo termine negli SLE:

$$G_1 + G_2 + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Dove:

G_1 sono i carichi permanenti strutturali

G_2 sono i carichi permanenti non strutturali

Q_{kj} sono i carichi variabili dovuti a sovraccarichi, vento e neve

γ_F sono i coefficienti parziali di sicurezza da assumere nella determinazione delle sollecitazioni dovute alle azioni negli stati limite ultimi (tabella 5.4.1)

ψ_{kj} sono i coefficienti di combinazione per edifici industriali (tabella 5.4.2)

Tabella 5.4.1 [2.6.1 nelle NTC]: Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU

Coefficiente	Sigla	Stato	EQU	A1	A2
Carichi permanenti strutturali G_1	γ_{G1}	Favorevoli	0.9	1.0	1.0
		Sfavorevoli	1.1	1.3	1.0
Carichi permanenti non strutturali G_2	γ_{G2}	Favorevoli	0.8	0.8	0.8
		Sfavorevoli	1.5	1.5	1.3
Azioni variabili Q_i	γ_{Qi}	Favorevoli	0.0	0.0	0.0
		Sfavorevoli	1.5	1.5	1.3

Tabella 5.4.2 [2.5.1 nelle NTC]: Coefficienti di combinazione.

Categoria	Azione variabile	ψ_{0j}	ψ_{1j}	ψ_{2j}
Categoria H	Coperture accessibili per sola manutenzione	0.0	0.0	0.0

Si specifica che per le successive verifiche si svolge un'analisi strutturale di tipo lineare, che trascura gli effetti di secondo ordine prodotti dall'eccentricità nel punto di applicazione delle forze a causa delle deformazioni imposte dalle stesse, poiché tali effetti risulterebbero di minore entità e verificarli richiederebbe modelli di calcolo molto complessi per le limitate risorse a disposizione nella redazione del presente elaborato.

5.5 Verifiche degli elementi lignei

Per la verifica degli elementi strutturali in legno lamellare incollato GL24H si fa riferimento al capitolo 4.4 delle NTC 2018 che definisce le resistenze di progetto come:

$$X_d = \frac{k_{mod} \cdot X_k}{\gamma_M}$$

Dove:

X_k è il valore caratteristico della proprietà del materiale o della resistenza del collegamento, può essere assunto mediante prove sperimentali o sulla base di prove svolte in condizioni definite dalle norme europee applicabili.

γ_M è il coefficiente parziale di sicurezza relativo al materiale, il cui valore è pari a quanto riportato nella colonna B della tabella solamente per produzioni continuativamente controllate di elementi o strutture (tabella 5.5.1)

k_{mod} è un coefficiente correttivo per l'effetto di umidità e durata del carico sui parametri di resistenza del materiale, corrispondente all'azione di minor durata nel caso la combinazione comprenda azioni con differenti classi di durata (tabella 5.5.2). Il coefficiente dipende dalla classe di servizio degli elementi strutturali considerati (tabella 5.5.3).

Tabella 5.5.1 [4.4.III nelle NTC]: Coefficienti parziali γ_M per le proprietà dei materiali.

Stati limite ultimi	Colonna A	Colonna B
Combinazioni fondamentali	γ_M	γ_M
Legno lamellare incollato	1.45	1.35
Pannelli di tavole incrociate a strati incrociati	1.45	1.35

Tabella 5.5.2 [4.4.IV nelle NTC]: Valori di k_{mod} per legno e prodotti strutturali a base di legno.

Materiale	Classe di servizio	Classe di durata del carico				
		Permanente	Lunga	Media	Breve	Istantanea
Legno massiccio,	1	0.60	0.70	0.80	0.90	1.10
Legno lamellare incollato (*) e	2	0.60	0.70	0.80	0.90	1.10
LVL	3	0.50	0.55	0.65	0.70	0.90

(*) I valori indicati si possono adottare anche per i pannelli di tavole incollate a strati incrociati, ma limitatamente alle classi di servizio 1 e 2.

Tabella 5.5.3 [4.4.II nelle NTC]: Classi di servizio.

Classe di servizio 1	Umidità del materiale in equilibrio con l'ambiente a temperatura di 20° C e umidità relativa dell'aria non sopra il 65%, se non per poche settimane l'anno
Classe di servizio 2	Umidità del materiale in equilibrio con l'ambiente a temperatura di 20° C e umidità relativa dell'aria non sopra il 85%, se non per poche settimane l'anno
Classe di servizio 3	Umidità più elevata di quella della classe di servizio 2

Trattandosi di una struttura lignea protetta dall'acqua battente degli elementi di copertura, per travetti, travi e pilastri si considera la classe di servizio 2, mentre per i pannelli in CLT di perimetrazione nella versione chiusa si utilizza la classe di servizio 3.

Al fine di eseguire le verifiche di spostamento agli stati limite di esercizio, non essendo previste specifiche disposizioni da normativa riguardo il valore limite da considerare, si riporta caso per caso quale frazione della luce coperta è stata considerata ammissibile nello svolgimento della verifica, il cui margine di superamento è in seguito evidenziato dai grafici come specificato in calce al paragrafo. Inoltre, si definisce il parametro deformativo per effetti viscosi in relazione alle precedenti considerazioni sulla classe di servizio degli elementi lignei (tabella 5.5.3).

Tabella 5.5.3 [4.4.V nelle NTC]: Valori di k_{def} per legno e prodotti strutturali a base di legno.

Materiale	Classi di servizio		
	1	2	3
Legno lamellare incollato	0.60	0.80	2.00

Al termine di ogni verifica, riportata in termini generali a causa della numerosità dei dati ottenuti per i molteplici gradi di apertura, si mostra, tramite un grafico, il valore reciproco al fattore di sicurezza (F_s) per cui risulta soddisfatta la verifica. Si sceglie di utilizzare il valore reciproco $1/F_s$ per rappresentare in ordinata quanto la sollecitazione impressa dai carichi si avvicini al valore limite consentito dalla verifica in modo immediatamente confrontabile tra le diverse verifiche, evidenziando quali siano le più gravose per le diverse campate durante il loro dispiegamento. Per farlo si rappresenta in ordinata $F_s = \text{valore delle sollecitazioni di progetto} / \text{valore limite per le sollecitazioni}$; e in ascissa il grado di apertura della struttura adattiva in percentuale, dalla configurazione completamente chiusa (0%) a quella completamente aperta (100%). Per facilitare la lettura sono aggiunti all'asse delle ascisse dei marchi che indicano la completa apertura di un modulo e dei successivi (estendendosi questi uno per volta in successione), inoltre il fattore di sicurezza relativo al grado di apertura di ciascuna campata viene compreso nel medesimo grafico distinguendoli per scala cromatica (rosso per il modulo più esterno, il primo ad aprirsi, e blu per il modulo addossato alla parte fissa, l'ultimo ad estendersi). Tali grafici sintetizzano quindi i risultati delle verifiche di ogni configurazione anche intermedia nel movimento della struttura (figure da 5.6.1.1 a 5.8.10.1).

5.6 Verifiche dei travetti di falda

Per eseguire le verifiche dei travetti inclinati di copertura si determina la sezione più sollecitata rispettivamente per compressione, taglio (entrambi in corrispondenza della cerniera alla base) e momento flettente (in mezzeria), considerando lo schema statico di appoggio tra due cerniere. Inoltre si specifica che si considera il travetto più sollecitato tra le 10 coppie simmetriche che formano le due falde di ogni modulo, corrispondente ad uno qualsiasi degli elementi non esterni e verso la falda che presenta il maggiore carico variabile in combinazione tra vento e neve.

5.6.1 Verifica a trazione parallela alla fibratura (SLU)

Viene verificato che:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d}$$

Dove:

$f_{t,0,d}$ è la resistenza di trazione parallela alla fibratura di progetto

$\sigma_{t,0,d}$ è la massima tensione di trazione parallela alla fibratura di progetto da Navier: $\sigma = N_{t,SLU}/A_{ti}$

$N_{t,SLU}$ è la massima trazione in combinazione fondamentale dei travetti

A_{ti} è la sezione più sollecitata dei travetti inclinati (all'estremità inferiore)

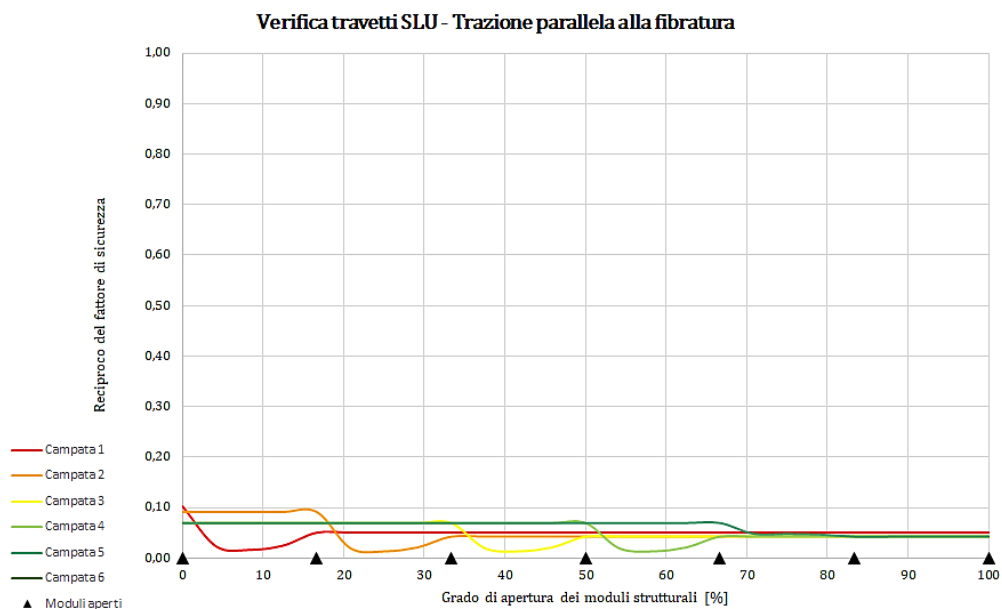


Figura 5.6.1.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di trazione parallela alle fibre nei travetti di falda (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.6.2 Verifica a compressione parallela alla fibratura (SLU)

Viene verificato che:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d}$$

Dove:

$f_{c,0,d}$ è la resistenza di compressione parallela alla fibratura di progetto

$\sigma_{c,0,d}$ è la massima tensione di trazione parallela alla fibratura di progetto da

Navier: $\sigma = N_{c,SLU}/A_{ti}$

$N_{c,SLU}$ è la massima trazione in combinazione fondamentale dei travetti

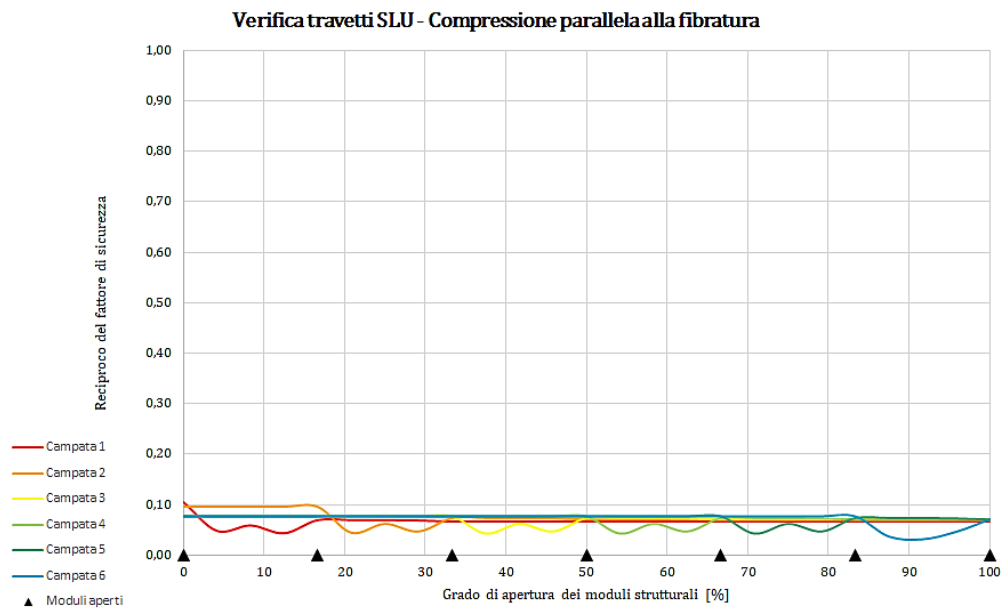


Figura 5.6.2.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di compressione parallela alle fibre nei travetti di falda (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.6.3 Verifica a compressione perpendicolare alla fibratura (SLU)

Viene verificato che:

$$\sigma_{cp,0,d} \leq f_{cp,0,d}$$

Dove:

$f_{cp,0,d}$ è la resistenza di compressione perpendicolare alla fibratura di progetto

$\sigma_{cp,0,d}$ è la massima tensione di trazione perpendicolare alla fibratura di progetto

da Navier: $\sigma = N_{cp,SLU}/A_{sc}$

$N_{cp,SLU}$ è la massima compressione perpendicolare alle fibre (equivalente al taglio) in combinazione fondamentale dei travetti

A_{sc} è l'area della sella di appoggio dei travetti alle cerniere di base

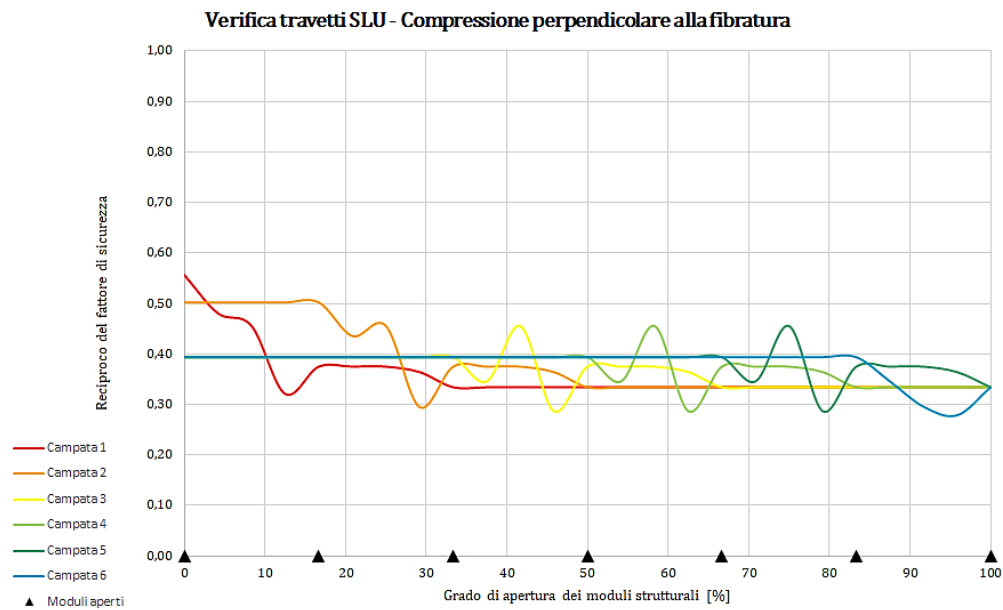


Figura 5.6.3.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di compressione perpendicolare alle fibre nei travetti di falda (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.6.4 Verifica a flessione (SLU)

Viene verificato che:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad \wedge \quad k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Dove:

$f_{m,y,d}$ è la resistenza a flessione attorno all'asse y di progetto

$f_{m,z,d}$ è la resistenza a flessione attorno all'asse z di progetto

$\sigma_{m,y,d}$ è la massima tensione di flessione attorno all'asse y di progetto da Navier:

$$\sigma = M_{y,SLU} / W_y$$

$M_{y,SLU}$ è la massima flessione attorno y in combinazione fondamentale dei travetti

W_y è il modulo di resistenza della sezione rispetto l'asse debole: $W_y = hb^2/6$

$\sigma_{m,z,d}$ è la massima tensione di flessione attorno all'asse z di progetto da Navier:

$$\sigma = M_{z,SLU} / W_z$$

$M_{z,SLU}$ è la massima flessione attorno z in combinazione fondamentale dei travetti

W_z è il modulo di resistenza della sezione rispetto l'asse forte: $W_z = bh^2/6$

k_m è il coefficiente per la redistribuzione delle tensioni, da normativa pari a 0.7 per travi di sezione rettangolare

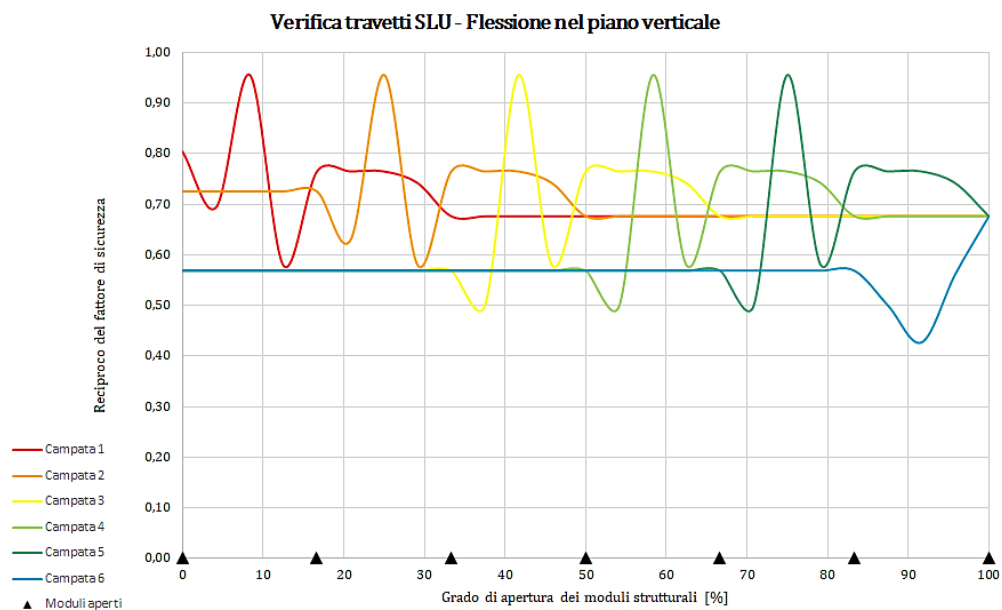


Figura 5.6.4.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di flessione nei travetti di falda (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.6.5 Verifica a tenso-flessione (SLU)

Viene verificato che:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad \wedge \quad \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Dove:

- tutti i coefficienti sono già stati definiti nelle verifiche precedenti

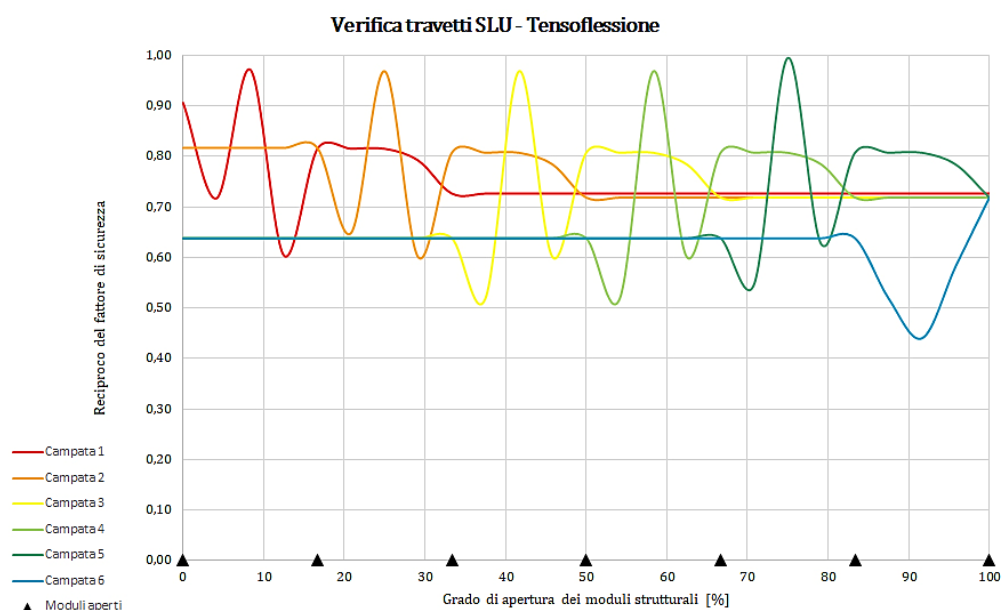


Figura 5.6.5.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di tenso-flessione nei travetti di falda (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.6.6 Verifica a presso-flessione (SLU)

Viene verificato che:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad \wedge \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Dove:

- tutti i coefficienti sono già stati definiti nelle verifiche precedenti

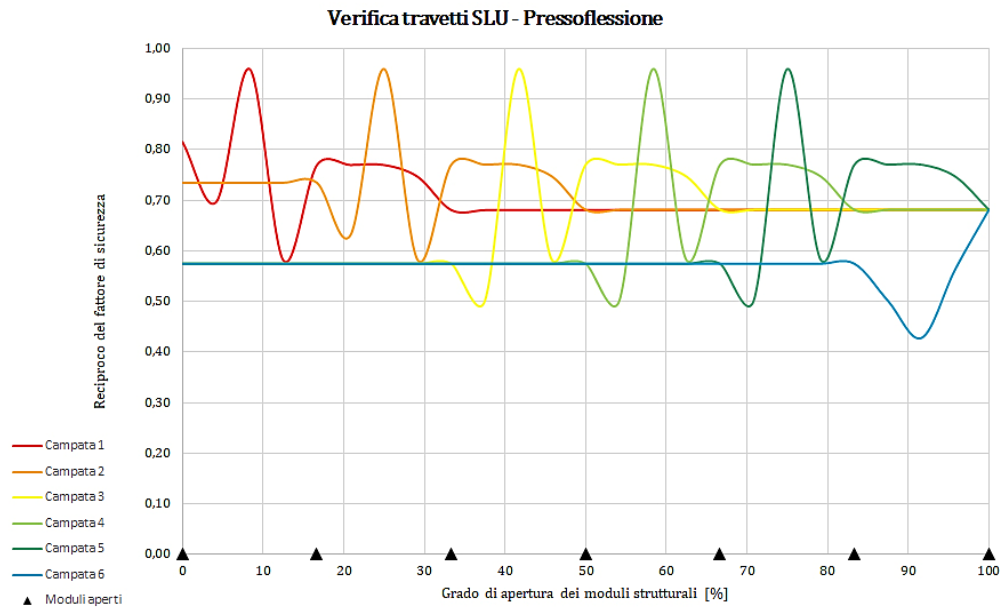


Figura 5.6.6.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di presso-flessione nei travetti di falda (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.6.7 Verifica a taglio (SLU)

Viene verificato che:

$$\tau_{max,d} \leq f_{v,d}$$

Dove:

$f_{v,d}$ è la resistenza a taglio di progetto

$\tau_{max,d}$ è la massima tensione tangenziale di progetto da Jourawski per sezione rettangolare: $\tau_{max,d} = 3 \cdot T_{max,SLU} / 2 \cdot A_{ti}$

$T_{max,SLU}$ è il taglio massimo in combinazione fondamentale dei travetti

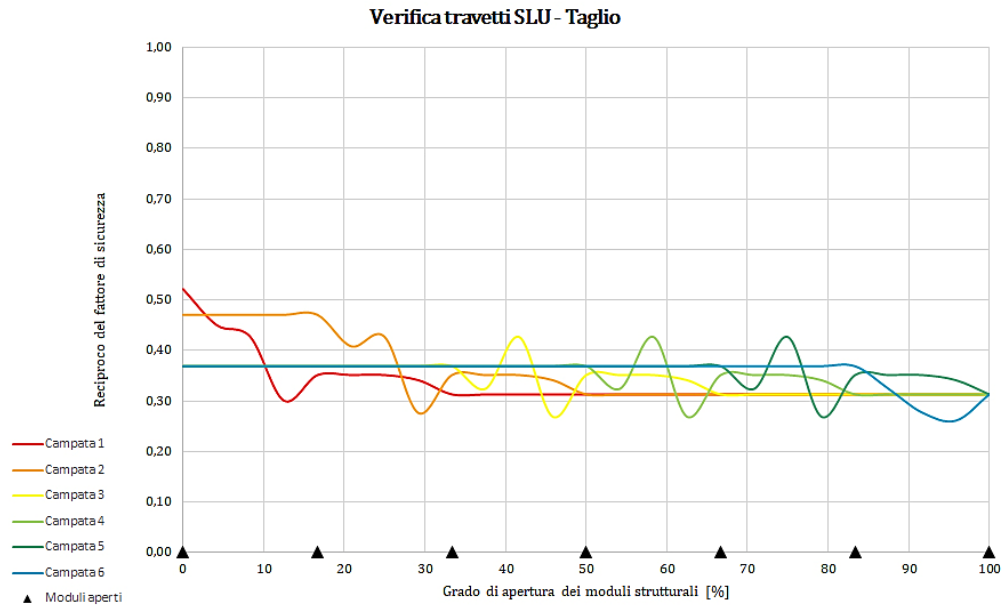


Figura 5.6.7.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di taglio nei travetti di falda (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.6.8 Verifica di stabilità presso-torsionale (SLU)

Viene verificato che:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1$$

Dove:

$f_{m,d}$ è la resistenza a flessione attorno all'asse z di progetto

$f_{c,0,d}$ è la resistenza a compressione parallela alle fibre di progetto

$\sigma_{m,d}$ è la massima tensione di flessione attorno all'asse z di progetto

$\sigma_{c,d}$ è la massima tensione di compressione parallela alle fibre di progetto

k_{crit} è il coefficiente riduttivo per lo sbandamento laterale, dipendente dalla snellezza relativa ($\lambda_{rel,m}$) dell'elemento strutturale:

$$k_{crit} \begin{cases} = 1 & \text{per } \lambda_{rel,m} \leq 0.75 \\ = 1.56 - 0.75 \cdot \lambda_{rel,m} & \text{per } 0.75 < \lambda_{rel,m} \leq 1.4 \\ = 1/(\lambda_{rel,m})^2 & \text{per } \lambda_{rel,m} > 1.4 \end{cases}$$

$\lambda_{rel,m}$ è la snellezza relativa: $\lambda_{rel,m} = \sqrt{f_{mk}/\sigma_{m,crit}} = 0.46$ per tutti i travetti

f_{mk} è la resistenza a flessione caratteristica del materiale pari a 24 N/mm²

$\sigma_{m,crit}$ è la tensione critica a flessione caratteristica:

$$\sigma_{m,crit} = \pi \sqrt{\frac{(E_{0,g,05} \cdot I_y \cdot G_{g,05} \cdot I_{tor})}{(l_{eff} \cdot W_z)}}$$

$E_{0,g,05}$ è il modulo di elasticità parallelo alle fibre caratteristico pari a 9600 N/mm²

- I_y è il momento d'inerzia attorno all'asse debole: $I_y = hb^3/12$ (rettangolare)
- $G_{g,05}$ è il modulo di taglio parallelo alle fibre caratteristico pari a 540 N/mm²
- I_{tor} è il momento torsionale di inerzia della sezione: $I_{tor} = \alpha \cdot h \cdot b^3$
- α è il reciproco del fattore di forma della sezione rettangolare fornito dalla formula empirica: $\alpha = \left(\frac{h}{b} - 0.63\right) / \left(3 \cdot \frac{h}{b}\right) = 0.176$
- l_{eff} è la lunghezza efficace della trave dalla tabella 6.1 dell'eurocodice 5, pari a:
 $l_{eff} = 0.9 \cdot l_{ti} + 2h$ per elementi caricati lungo l'estremità compressa
- l_{ti} è la distanza tra gli appoggi dei singoli travetti inclinati pari alla lunghezza

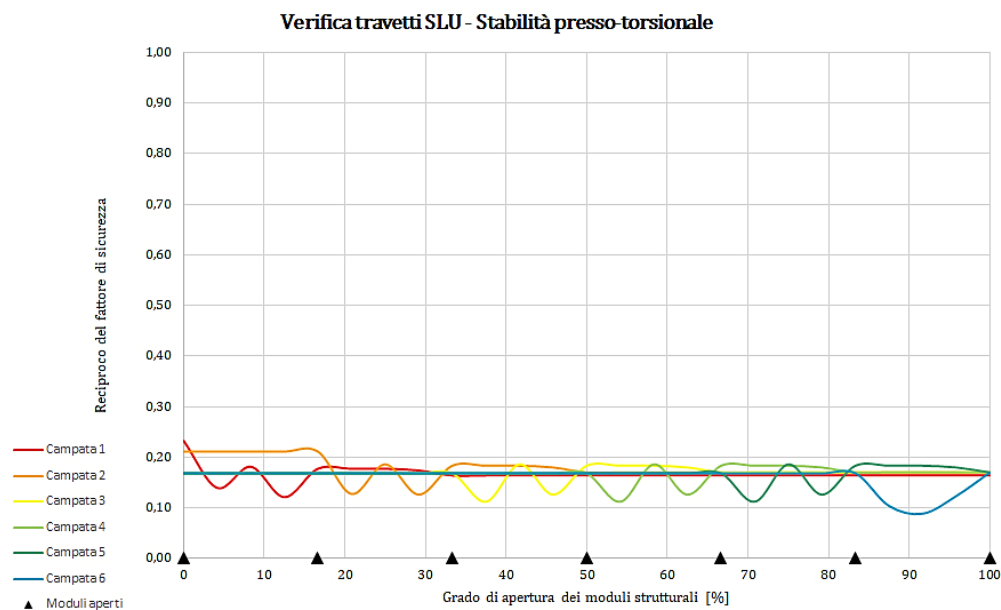


Figura 5.6.8.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di stabilità presso-torsionale nei travetti di falda (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.6.9 Verifica di spostamento verticale (SLE)

Viene verificato che:

$$f_{fin,d} \leq f_{max}$$

Dove:

f_{max} è la freccia verticale massima ammessa, la verifica risulta ampiamente soddisfatta anche considerando l'ipotesi più severa di un limite pari ad 1/300 della lunghezza di un travetto.

$f_{fin,d}$ è la freccia finale massima di progetto: $f_{fin,d} = f_{in} + f_{diff}$

f_{in} è la freccia iniziale dovuta ai carichi in combinazione rara per gli stati limite di esercizio (la più grave tra la combinazione con vento positivo o negativo con relativi coefficienti per carichi favorevoli e sfavorevoli). Ad esempio per il travetto più sollecitato della prima campata, nella configurazione presa

come esemplificativa con un modulo aperto e tutti gli altri chiusi, si hanno dei valori di freccia iniziale pari a +0.64mm con vento positivo, e -0.26mm con vento negativo. Tra i due viene verificato lo spostamento positivo (verso il basso), che risulta il più gravoso.

f_{diff} è la freccia differita, definita come: $f_{diff} = f_{in}' \cdot k_{def}$

f_{in}' è la freccia dovuta ai carichi in combinazione quasi permanente per gli stati limite di esercizio, ricavata similmente alla precedente, pari a +0.09mm per l'esempio illustrato del travetto più sollecitato nella prima campata aperta mentre gli altri moduli sono completamente chiusi.

k_{def} è il coefficiente di deformazione per effetti viscosi, pari a 0.80

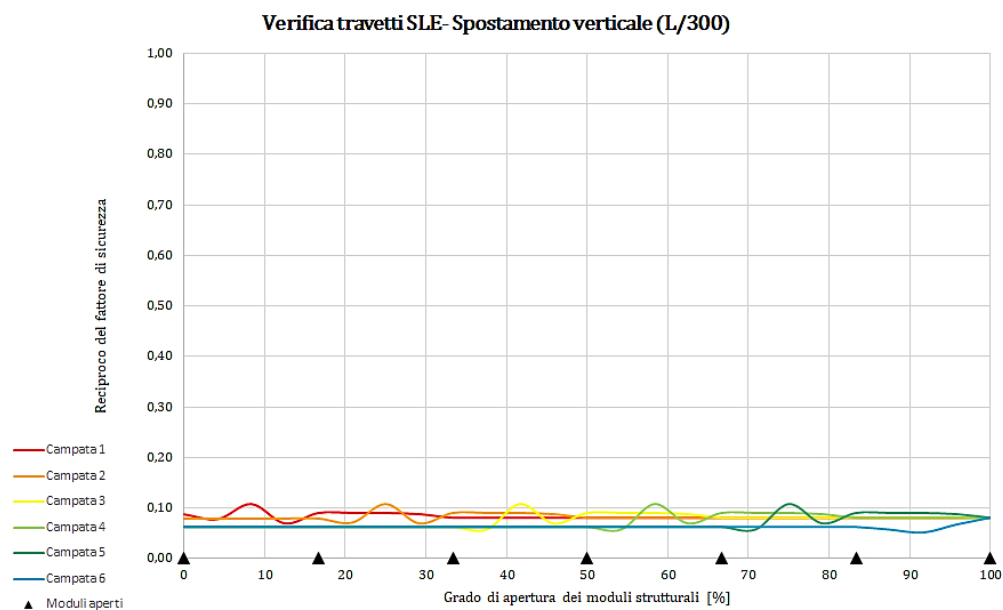


Figura 5.6.9.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di spostamento verticale nei travetti di falda (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.7 Verifiche delle travi di campata

Per eseguire le verifiche delle travi di campata si determina la loro sezione più sollecitata rispettivamente per taglio, momento torcente (entrambi in corrispondenza di uno dei due appoggi simmetrici) e del momento flettente (in mezzeria), considerando uno schema statico vincolato da due cerniere alle estremità come giunto trave-pilastro. Tale vincolo è favore di sicurezza rispetto al caso reale di incastro semirigido per tenere conto della flessibilità del materiale, ma per rendere la struttura tridimensionalmente isostatica è necessario considerare che tali cerniere vincolino anche la torsione della trave. I carichi trasferiti alle travi dai singoli travetti superiori sono considerati come una serie di forze concentrate ai fini delle verifiche per rispecchiare il caso reale.

5.7.1 Verifica compressione perpendicolare alla fibratura (SLU)

Viene verificato che:

$$\sigma_{cp,0,d} \leq f_{cp,0,d}$$

Dove:

$f_{cp,0,d}$ è la resistenza di compressione perpendicolare alla fibratura di progetto

$\sigma_{cp,0,d}$ è la massima tensione di trazione perpendicolare alla fibratura di progetto da Navier: $\sigma = N_{cp,SLU}/A_{tp}$

$N_{cp,SLU}$ è la massima compressione perpendicolare alle fibre (equivalente al taglio) in combinazione fondamentale delle travi di campata

A_{tp} è l'area di appoggio di un eventuale giunto a sella con il pilastro, la quale per soddisfare la verifica deve essere di almeno 1165cm² (equivalente ad una piastra profonda 30cm e larga quanto la sezione della trave, ossia 40cm)

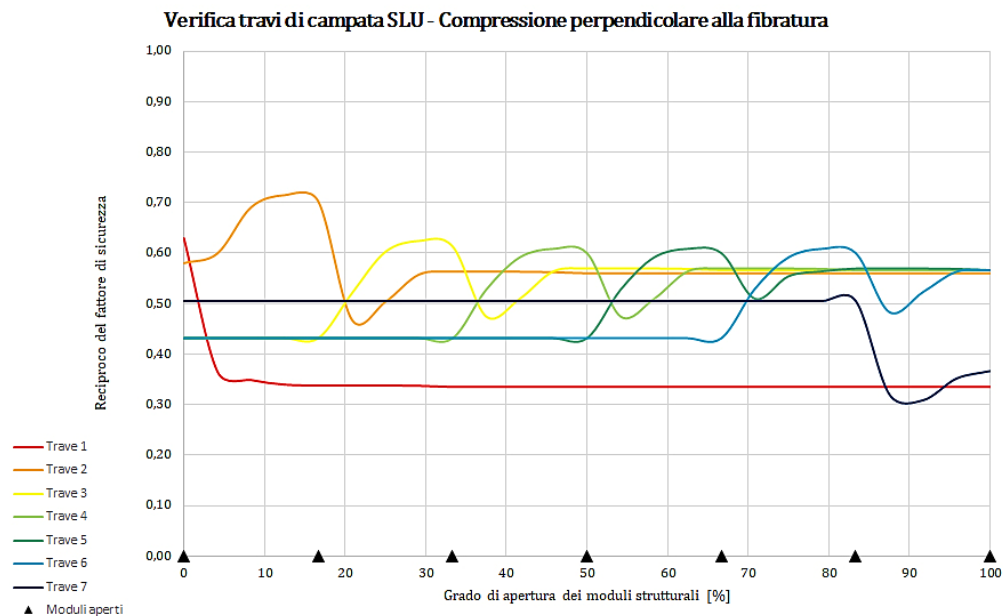


Figura 5.7.1.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di compressione perpendicolare alle fibre nelle travi di campata (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.7.2 Verifica a flessione (SLU)

Viene verificato che:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}} \leq 1 \quad \wedge \quad k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}} \leq 1$$

Dove:

$f_{m,y,d}$ è la resistenza a flessione attorno all'asse y di progetto

$f_{m,x,d}$ è la resistenza a flessione attorno all'asse x di progetto

$\sigma_{m,y,d}$ è la massima tensione di flessione attorno all'asse y di progetto da Navier:

$$\sigma = M_{y,SLU}/W_y$$

$M_{y,SLU}$ è la massima flessione attorno y in combinazione fondamentale delle travi

W_y è il modulo di resistenza della sezione rispetto l'asse debole: $W_y = hb^2/6$

$\sigma_{m,x,d}$ è la massima tensione di flessione attorno all'asse x di progetto da Navier:

$$\sigma = M_{x,SLU}/W_x$$

$M_{x,SLU}$ è la massima flessione attorno x in combinazione fondamentale della trave

W_x è il modulo di resistenza della sezione rispetto l'asse forte: $W_x = bh^2/6$

k_m è il coefficiente per la redistribuzione delle tensioni, da normativa pari a 0.7 per travi di sezione rettangolare

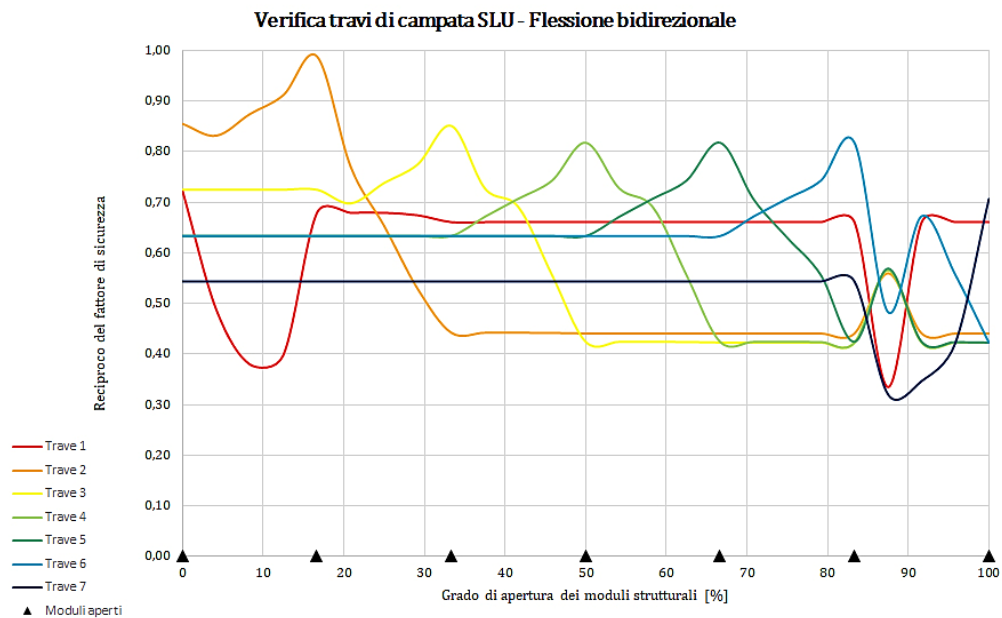


Figura 5.7.2.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di flessione bidirezionale nelle travi di campata (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.7.3 Verifica a taglio (SLU)

Viene verificato che:

$$\tau_{max,d} \leq f_{v,d}$$

Dove:

$f_{v,d}$ è la resistenza a taglio di progetto

$\tau_{max,d}$ è la massima tensione tangenziale di progetto da Jourawski per sezione rettangolare: $\tau_{max,d} = 3 \cdot T_{max,SLU}/2 \cdot A_{eff}$

$T_{max,SLU}$ è il taglio massimo in combinazione fondamentale dei travetti

A_{eff} è l'area efficace a taglio, per l'effetto delle fessurazioni: $A_{eff} = A_s \cdot K_{cr}$

- A_s è l'area lorda della sezione delle travi di campata
 K_{cr} è il fattore riduttivo per fessurazioni: $K_{cr} = 2.5/\rho_{gk} = 0.71$
 ρ_{gk} è la massa volumica caratteristica del materiale, pari a 385 kg/m³

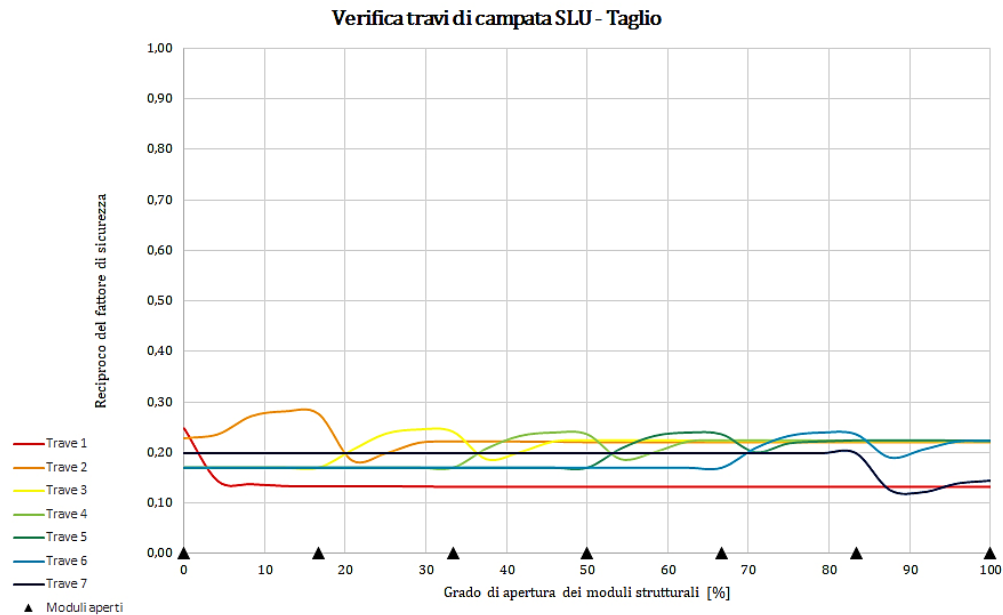


Figura 5.7.3.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di taglio nelle travi di campata (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.7.4 Verifica a torsione (SLU)

Viene verificato che:

$$\tau_{tor,d} \leq k_{sh} \cdot f_{v,d}$$

Dove:

$f_{v,d}$ è la resistenza a taglio di progetto

k_{sh} è il coefficiente di forma per sezione rettangolare piena con lati $b \leq h$:

$$k_{sh} = 1 + 0.15 h/b \leq 2$$

$\tau_{tor,d}$ è la tensione tangenziale massima per il momento torcente di progetto:

$$\tau_{tor,d} = \alpha \cdot M_{t,max} / hb^2 \quad \text{per sezione rettangolare}$$

$M_{t,max}$ è il massimo momento torcente in combinazione fondamentale della trave

α è il coefficiente specifico per la sezione rettangolare: $\alpha = 3 + 1.8(b/h)$

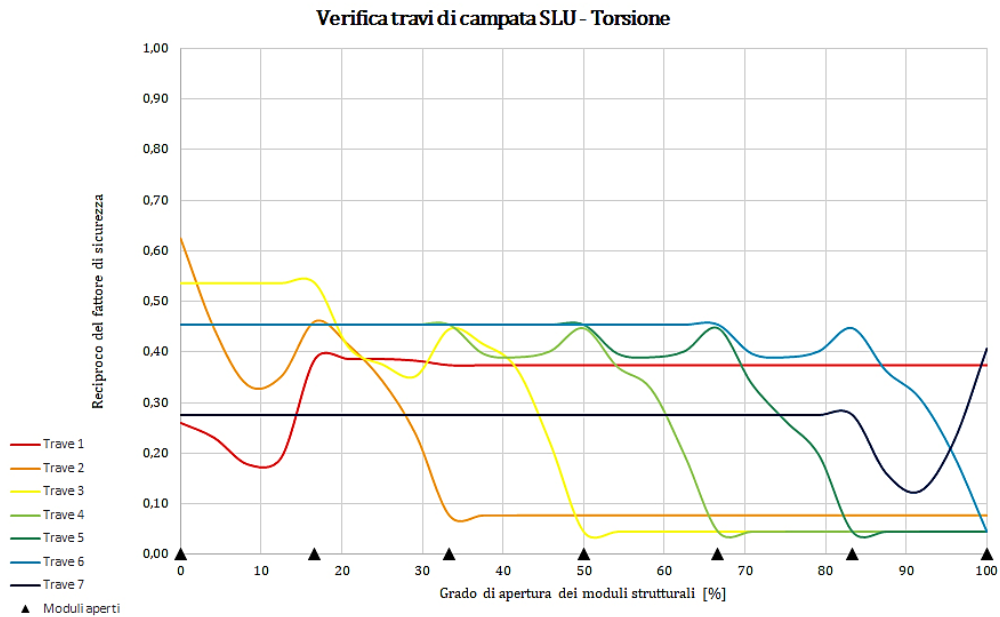


Figura 5.7.4.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di torsione nelle travi di campata (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.7.5 Verifica a taglio-torsione (SLU)

Viene verificato che:

$$\frac{\tau_{tor,d}}{k_{sh} \cdot f_{v,d}} + \left(\frac{\tau_d}{f_{v,d}} \right)^2 \leq 1$$

Dove:

- tutti i coefficienti sono già stati definiti nelle verifiche precedenti

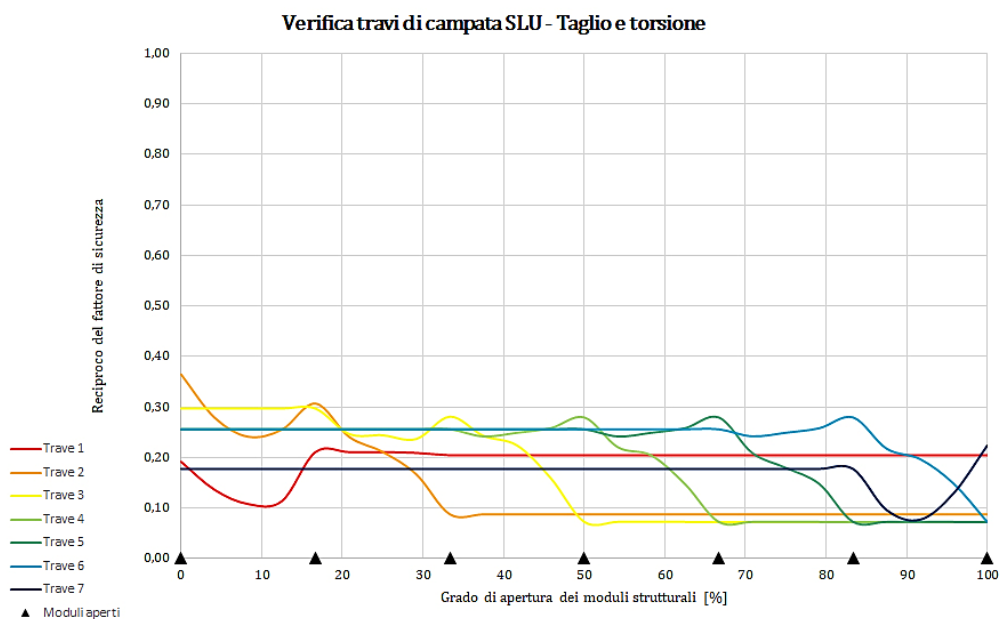


Figura 5.7.5.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di taglio-torsione nelle travi di campata (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.7.6 Verifica di stabilità flessio-torsionale (SLU)

Viene verificato che:

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,d}$$

Dove:

$f_{m,d}$ è la resistenza a flessione attorno all'asse x di progetto

$\sigma_{m,d}$ è la massima tensione di flessione attorno all'asse x di progetto da Navier:

$$\sigma = M_{x,SLU} / W_x$$

$M_{x,SLU}$ è la massima flessione attorno x in combinazione fondamentale della trave

W_x è il modulo di resistenza della sezione rispetto l'asse forte: $W_x = bh^2/6$

k_{crit} è il coefficiente riduttivo per lo sbandamento laterale, dipendente dalla snellezza relativa ($\lambda_{rel,m}$) dell'elemento strutturale:

$$k_{crit} \begin{cases} = 1 & \text{per } \lambda_{rel,m} \leq 0.75 \\ = 1.56 - 0.75 \cdot \lambda_{rel,m} & \text{per } 0.75 < \lambda_{rel,m} \leq 1.4 \\ = 1/(\lambda_{rel,m})^2 & \text{per } \lambda_{rel,m} > 1.4 \end{cases}$$

$\lambda_{rel,m}$ è la snellezza relativa: $\lambda_{rel,m} = \sqrt{f_{mk}/\sigma_{m,crit}} = 0.83$ per tutte le travi

f_{mk} è la resistenza a flessione caratteristica del materiale pari a 24 N/mm²

$\sigma_{m,crit}$ è la tensione critica a flessione caratteristica:

$$\sigma_{m,crit} = \pi \sqrt{\frac{(E_{0,g,05} \cdot I_y \cdot G_{g,05} \cdot I_{tor})}{(l_{eff} \cdot W_x)}}$$

$E_{0,g,05}$ è il modulo di elasticità parallelo alle fibre caratteristico pari a 9600 N/mm²

I_y è il momento d'inerzia attorno all'asse debole: $I_y = hb^3/12$ (rettangolare)

$G_{g,05}$ è il modulo di taglio parallelo alle fibre caratteristico pari a 540 N/mm²

I_{tor} è il momento torsionale di inerzia della sezione: $I_{tor} = \alpha \cdot h \cdot b^3$

α è il reciproco del fattore di forma della sezione rettangolare fornito dalla formula empirica: $\alpha = \left(\frac{h}{b} - 0.63\right) / \left(3 \cdot \frac{h}{b}\right) = 0.176$

l_{eff} è la lunghezza efficace della trave dalla tabella 6.1 dell'eurocodice 5, pari a:

$$l_{eff} = 0.9 \cdot l_{tc} + 2h \quad \text{per elementi caricati lungo l'estremità compressa}$$

l_{tc} è la distanza tra gli appoggi, pari alla luce, della trave di campata

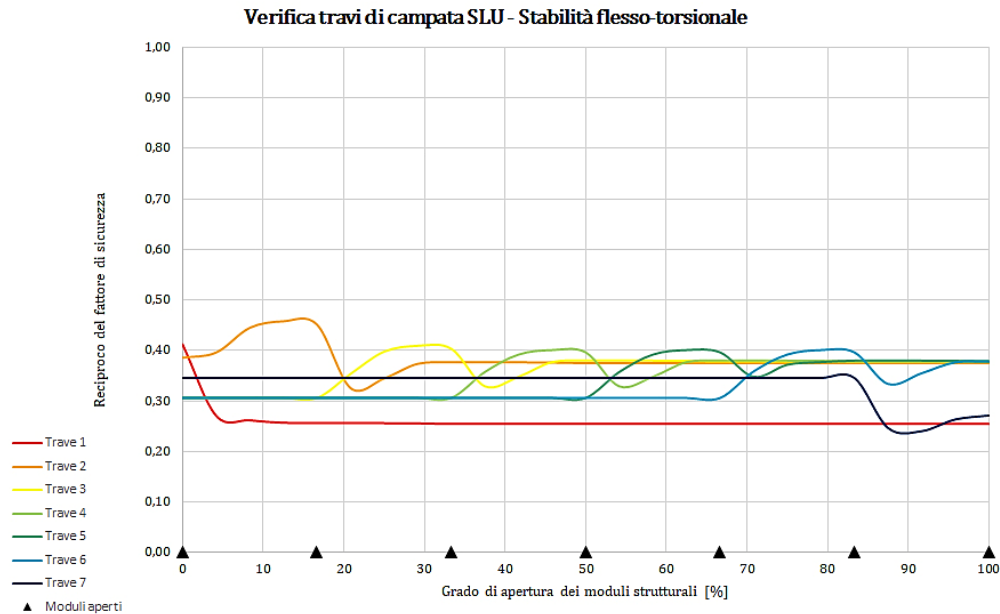


Figura 5.7.6.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di stabilità flessio-torsionale nelle travi di campata (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.7.7 Verifica di spostamento verticale (SLE)

Viene verificato che:

$$f_{fin,v,d} \leq f_{max,v}$$

Dove:

$f_{max,v}$ è la freccia verticale massima ammessa, la verifica risulta soddisfatta con un buon margine anche considerando l'ipotesi più severa di un limite pari ad $1/300$ della luce della trave, ossia 60mm.

$f_{fin,v,d}$ è la freccia finale verticale massima di progetto: $f_{fin,d} = f_{in} + f_{diff}$

f_{in} è la freccia iniziale dovuta ai carichi in combinazione rara per gli stati limite di esercizio (la più grave tra la combinazione con vento positivo o negativo). Nella configurazione presa come esempio, per la trave tra il primo modulo totalmente esteso, ed il secondo richiuso come i successivi, i valori di freccia iniziale sono pari a +14.96mm in mezzeria con vento positivo, e +0.99mm con vento negativo. Questi valori sono ottenuti considerando un grado di vincolo ai giunti più sfavorevole rispetto al caso reale, a favore di sicurezza.

f_{diff} è la freccia differita, definita come: $f_{diff} = f_{in}' \cdot k_{def}$

f_{in}' è la freccia dovuta ai carichi in combinazione quasi permanente per gli stati limite di esercizio, ricavata similmente alla precedente, pari a +6.78mm per l'esempio sopracitato.

k_{def} è il coefficiente di deformazione per effetti viscosi, pari a 0.80

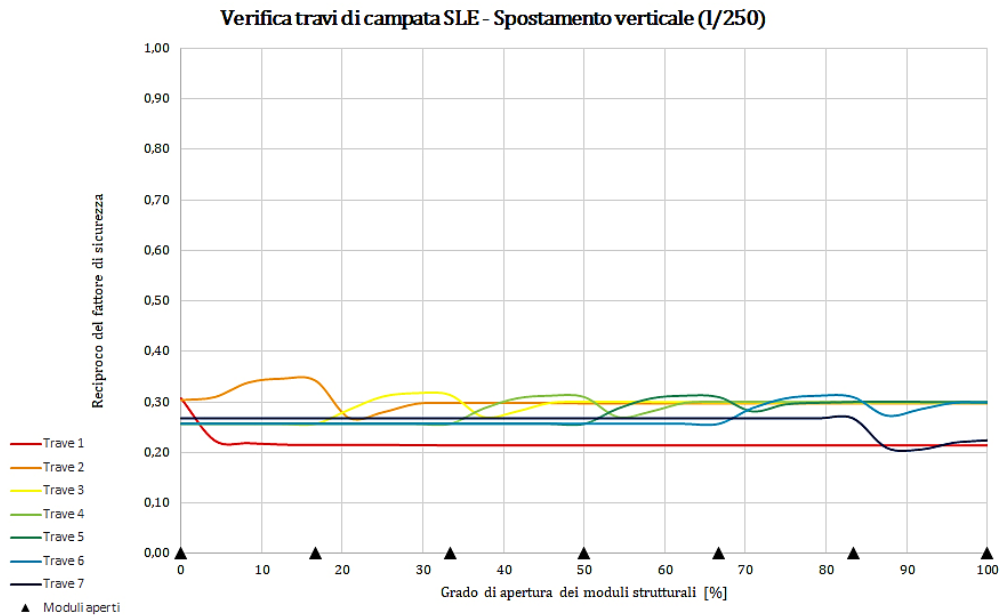


Figura 5.7.7.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di spostamento verticale nelle travi di campata (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.7.8 Verifica di spostamento orizzontale (SLE)

Viene verificato che:

$$f_{fin,h,d} \leq f_{max,h}$$

Dove:

$f_{max,h}$ è la freccia orizzontale massima ammessa, la verifica risulta di poco soddisfatta considerando il più generoso limite da normativa pari ad 1/200 della luce della trave, ossia 90mm.

$f_{fin,h,d}$ è la freccia finale orizzontale massima di progetto: $f_{fin,d} = f_{in} + f_{diff} - f_0$

f_{in} è la freccia iniziale dovuta ai carichi in combinazione rara per gli stati limite di esercizio (la più grave tra la combinazione con vento positivo o negativo). Nella configurazione presa come esempio, per la trave tra il primo modulo totalmente esteso, ed il secondo richiuso come i successivi, i valori di freccia iniziale sono pari a +96.87mm in mezzeria con vento positivo, e -62.48mm con vento negativo. Questi valori sono ottenuti considerando un grado di vincolo ai giunti più sfavorevole rispetto al caso reale, a favore di sicurezza.

f_{diff} è la freccia differita: $f_{diff} = f_{in}' \cdot k_{def} = 16.36$ mm nell'esempio citato.

f_0 è la contrefreccia iniziale, assunta pari a 25mm per superare la verifica. Trattandosi di una delle verifiche più gravose si assume la contrefreccia per minimizzare il peso e le dimensioni della struttura, tale deformazione impressa va direzionata verso l'esterno nella stessa direzione in cui si estendono le campate, per ogni trave tre i moduli, poiché durante l'apertura

degli stessi si raggiunge sempre la massima deformazione orizzontale quando due campate adiacenti sono una completamente aperta ed una completamente chiusa. Questo valore di controfreccia risulta verificato anche nel caso di vento negativo e carichi conseguentemente coefficientati.

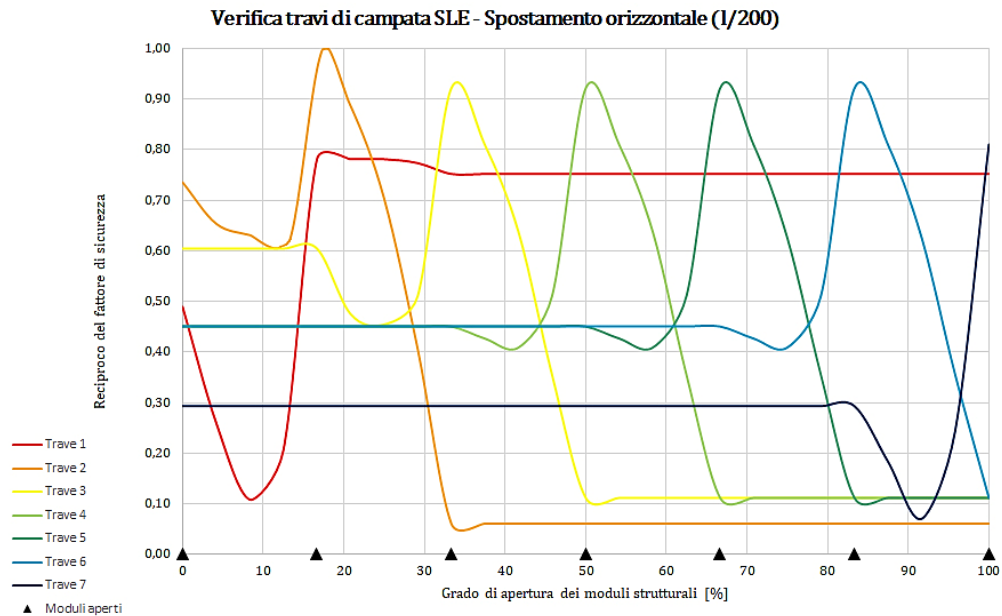


Figura 5.7.8.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di spostamento orizzontale nelle travi di campata (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.8 Verifiche dei pilastri

Per eseguire le verifiche di uno dei pilastri simmetrici di ciascun modulo, si determina sua sezione più sollecitata rispettivamente per sforzo normale (alla base), taglio (considerata alla base nonostante la presenza delle bielle laterali, poiché nel caso peggiore in cui queste sono lasciate libere di muoversi dagli attuatori, l'intero sforzo normale deve essere assorbito dai freni alla rotaia di base), e momento flettente (sempre alla base, trattandosi di uno schema a mensola incastrata con estremità superiore libera).

5.8.1 Verifica a trazione parallela alla fibratura (SLU)

Viene verificato che:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d}$$

Dove:

$f_{t,0,d}$ è la resistenza di trazione parallela alla fibratura di progetto

- $\sigma_{t,0,d}$ è la massima tensione di trazione parallela alla fibratura di progetto da Navier: $\sigma = N_{t,SLU}/A_p$
- $N_{t,SLU}$ è la massima trazione in combinazione fondamentale dei pilastri
- A_p è la sezione più sollecitata dei pilastri inclinati

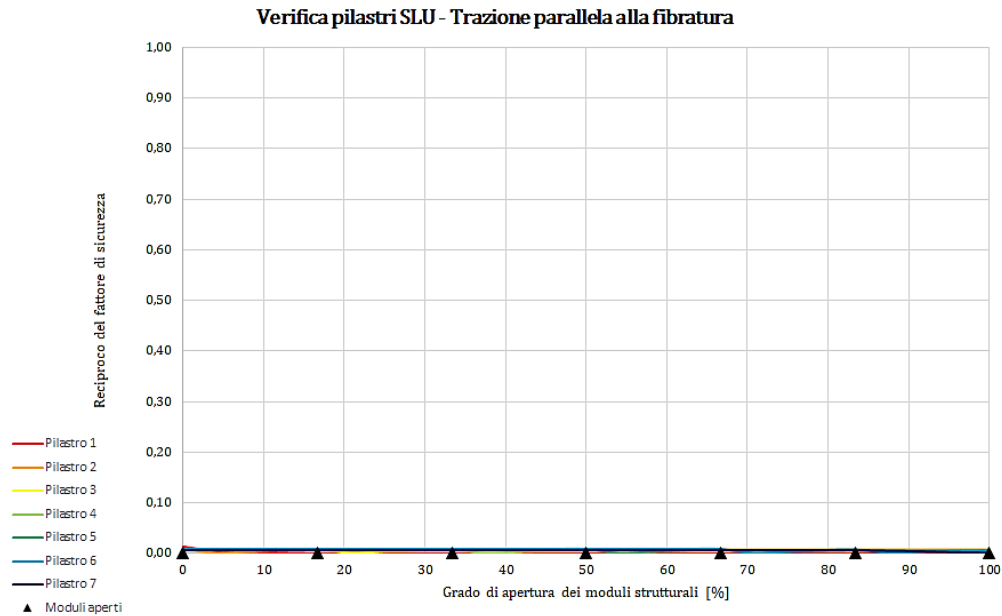


Figura 5.8.1.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di trazione parallela alle fibre nei pilastri (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.8.2 Verifica a compressione parallela alla fibratura (SLU)

Viene verificato che:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d}$$

Dove:

- $f_{c,0,d}$ è la resistenza di compressione parallela alla fibratura di progetto
- $\sigma_{c,0,d}$ è la massima tensione di trazione parallela alla fibratura di progetto da Navier: $\sigma = N_{c,SLU}/A_p$
- $N_{c,SLU}$ è la massima trazione in combinazione fondamentale dei pilastri

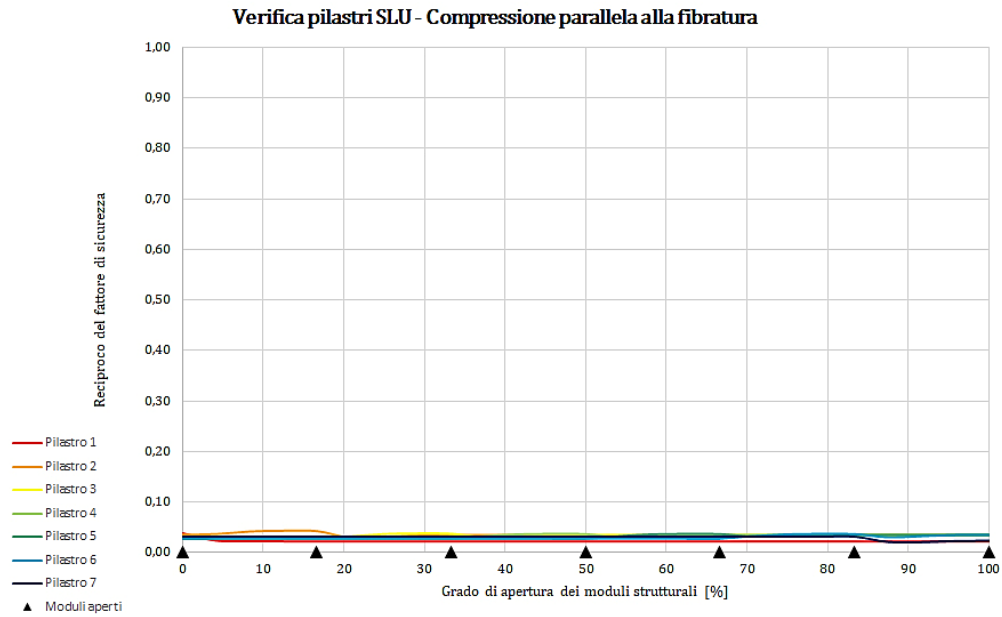


Figura 5.8.2.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di compressione parallela alle fibre nei pilastri (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.8.3 Verifica a flessione (SLU)

Viene verificato che:

$$\frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad \wedge \quad k_m \frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Dove:

$f_{m,x,d}$ è la resistenza a flessione attorno all'asse x di progetto

$f_{m,z,d}$ è la resistenza a flessione attorno all'asse z di progetto

$\sigma_{m,x,d}$ è la massima tensione di flessione attorno all'asse x di progetto da Navier:

$$\sigma = M_{x,SLU} / W_x$$

$M_{x,SLU}$ è la massima flessione attorno x in combinazione fondamentale della trave

W_x è il modulo di resistenza della sezione rispetto l'asse forte: $W_x = bh^2/6$

$\sigma_{m,z,d}$ è la massima tensione di flessione attorno all'asse z di progetto da Navier:

$$\sigma = M_{z,SLU} / W_z$$

$M_{z,SLU}$ è la massima flessione attorno z in combinazione fondamentale delle travi

W_z è il modulo di resistenza della sezione rispetto l'asse debole: $W_z = hb^2/6$

k_m è il coefficiente per la redistribuzione delle tensioni, da normativa pari a 0.7 per pilastri di sezione rettangolare

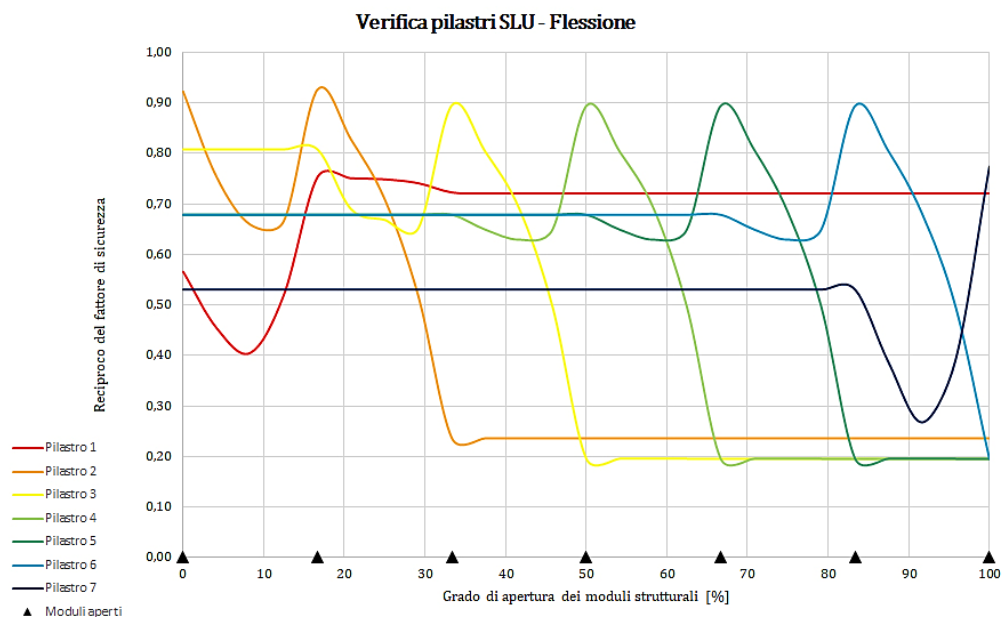


Figura 5.8.3.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di flessione nei pilastri (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.8.4 Verifica a tenso-flessione (SLU)

Viene verificato che:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad \wedge \quad \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Dove:

- tutti i coefficienti sono già stati definiti nelle verifiche precedenti

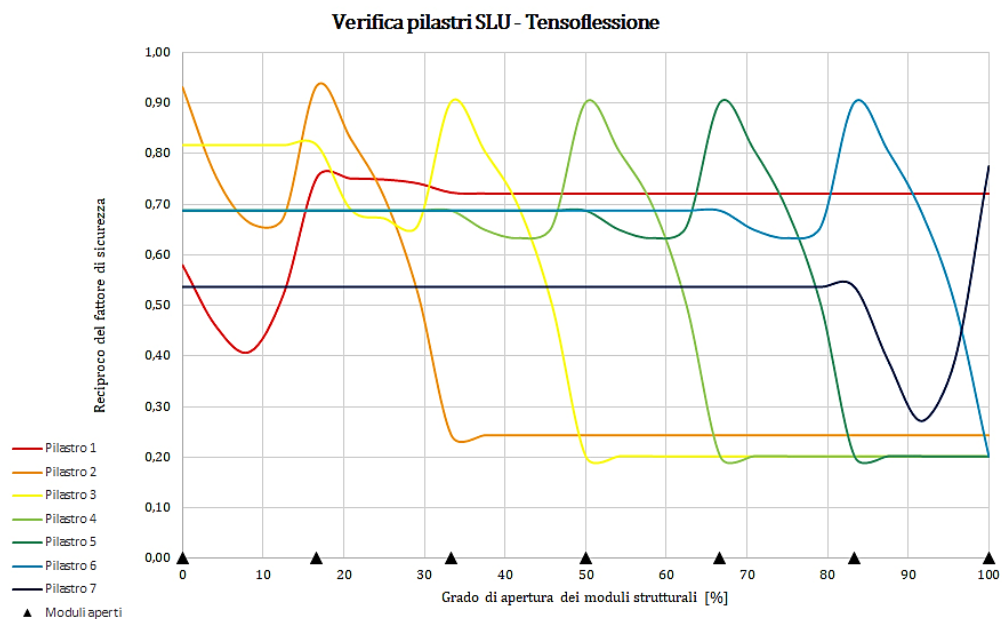


Figura 5.8.4.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di tenso-flessione nei pilastri (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.8.5 Verifica a presso-flessione (SLU)

Viene verificato che:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad \wedge \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Dove:

- tutti i coefficienti sono già stati definiti nelle verifiche precedenti

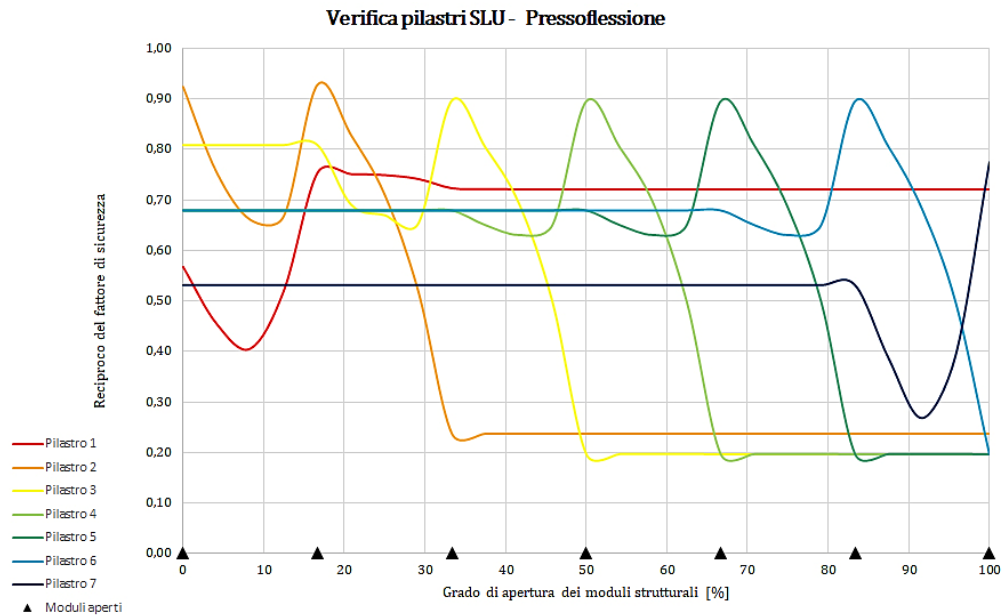


Figura 5.8.5.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di presso-flessione nei pilastri (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.8.6 Verifica a taglio rispetto l'asse forte (SLU)

Viene verificato che:

$$\tau_{max,x,d} \leq f_{v,d}$$

Dove:

$f_{v,d}$ è la resistenza a taglio di progetto

$\tau_{max,x,d}$ è la massima tensione tangenziale in direzione x di progetto da Jourawski per sezione rettangolare: $\tau_{max,x,d} = 3 \cdot T_{max,x} / 2 \cdot A_{eff}$

$T_{max,x}$ è il taglio massimo lungo x in combinazione fondamentale sui pilastri

A_{eff} è l'area efficace a taglio, per l'effetto delle fessurazioni: $A_{eff} = A_p \cdot K_{cr}$

A_p è l'area lorda della sezione dei pilastri

K_{cr} è il fattore riduttivo per fessurazioni: $K_{cr} = 2.5 / \rho_{gk} = 0.71$

ρ_{gk} è la massa volumica caratteristica del materiale, pari a 385 kg/m³

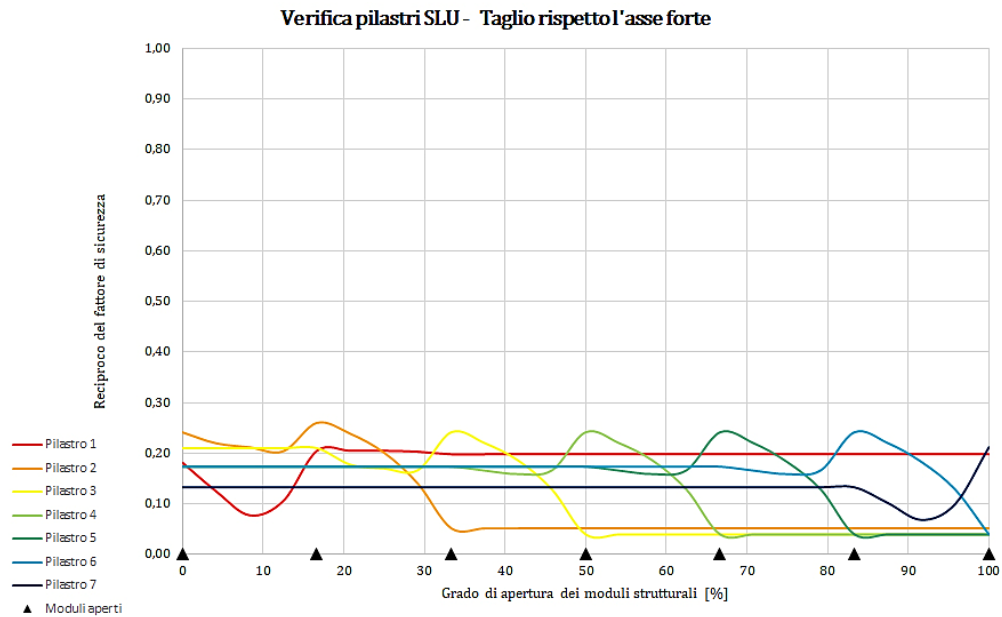


Figura 5.8.6.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di taglio rispetto l'asse forte nei pilastri (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.8.7 Verifica a taglio rispetto l'asse debole (SLU)

Viene verificato che:

$$\tau_{max,z,d} \leq f_{v,d}$$

Dove:

$\tau_{max,z,d}$ è la massima tensione tangenziale in direzione x di progetto da Jourawski per sezione rettangolare: $\tau_{max,z,d} = 3 \cdot T_{max,z} / 2 \cdot A_{eff}$

$T_{max,z}$ è il taglio massimo lungo z in combinazione fondamentale sui pilastri

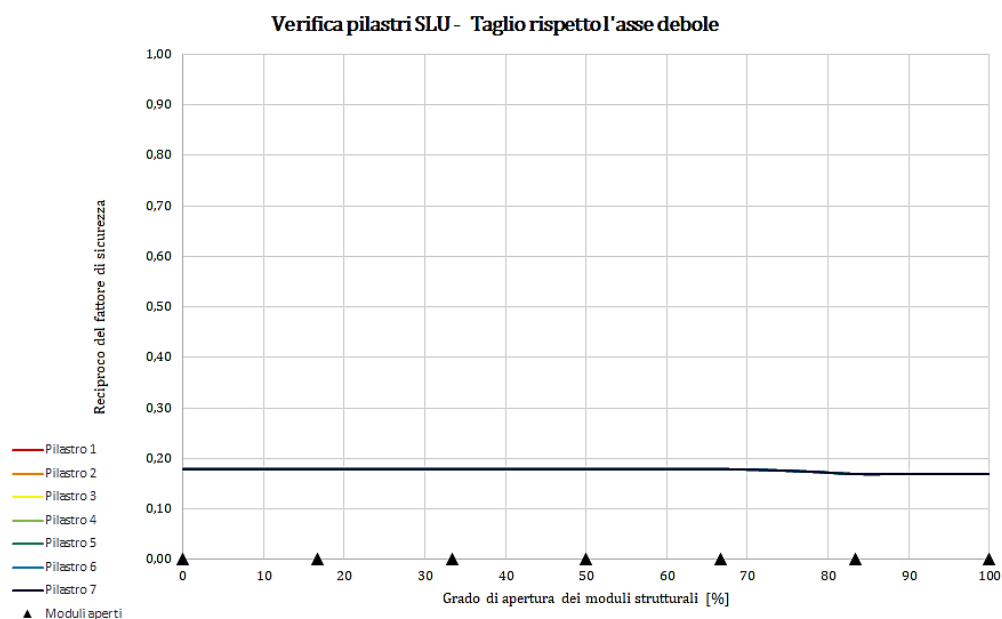


Figura 5.8.7.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di taglio rispetto l'asse debole nei pilastri (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.8.8 Verifica di stabilità di colonna a presso-flessione (SLU)

Viene verificato che:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,x} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad \wedge \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}} \leq 1$$

Dove:

$k_{c,x}$ è il coefficiente riduttivo per compressione rispetto x:

$$k_{c,x} = \frac{1}{k_x} + \sqrt{(k_x^2 - \lambda_{rel,x}^2)}$$

$\lambda_{rel,x}$ è la snellezza relativa rispetto l'asse x: $\lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_k}}$

λ_x è la snellezza rispetto l'asse x: $\lambda_x = l_i / \rho_x$

l_i è la lunghezza libera di inflessione dei pilastri, pari alla loro altezza (h) rispetto l'asse x, considerando il vincolo dovuto alle bielle in sommità

ρ_x è il raggio d'inerzia rispetto l'asse forte x: $\rho_x = \sqrt{I_x / A_p}$

I_x è il momento d'inerzia attorno all'asse x per sezione rettangolare: $I_x = \frac{bh^3}{12}$

A_p è l'area della sezione dei pilastri inclinati

E_k è il modulo elastico caratteristico parallelo alle fibre, anche chiamato $E_{0,g,05}$

k_x è un coefficiente di calcolo pari a: $k_x = 0.5 \cdot (1 + \beta_c (\lambda_{rel,x} - 0.3) + \lambda_{rel,x}^2)$

β_c è il coefficiente di rettilineità per legno lamellare incollato, pari a 0.10

$k_{c,z}$ è il coefficiente riduttivo per compressione rispetto z:

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z} + \sqrt{(k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2)}$$

$\lambda_{rel,z}$ è la snellezza relativa rispetto l'asse z: $\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_k}}$

λ_z è la snellezza rispetto l'asse z: $\lambda_z = l_i / \rho_z$

l_i è la lunghezza libera di inflessione dei pilastri, pari due volte la loro altezza ($2 \cdot h$) rispetto l'asse z, trattandosi di un semplice portale tra sue mensole incastrate a terra su questo piano

ρ_z è il raggio d'inerzia rispetto l'asse debole z: $\rho_z = \sqrt{I_z / A_p}$

I_z è il momento d'inerzia attorno all'asse z per sezione rettangolare: $I_z = \frac{hb^3}{12}$

k_z è un coefficiente di calcolo pari a: $k_z = 0.5 \cdot (1 + \beta_c (\lambda_{rel,z} - 0.3) + \lambda_{rel,z}^2)$

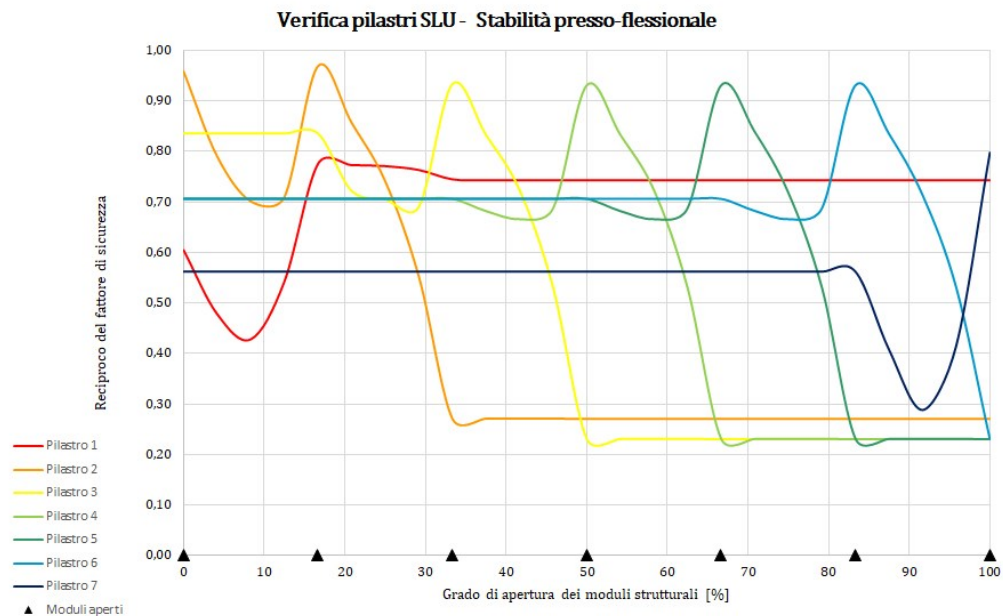


Figura 5.8.8.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di stabilità presso-flessionale nei pilastri (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.8.9 Verifica di spostamento orizzontale lungo asse x (SLE)

Viene verificato che:

$$f_{fin,x,d} \leq f_{max,x}$$

Dove:

$f_{max,x}$ è la freccia orizzontale massima ammessa in sommità ai pilastri, la verifica risulta soddisfatta con un ampio margine, considerando il limite fornito per elementi portanti verticali pari a 1/250 della dell'altezza, ossia 24mm.

$f_{fin,x,d}$ è la freccia finale verticale massima di progetto: $f_{fin,d} = f_{in} + f_{diff}$

f_{in} è la freccia iniziale dovuta ai carichi in combinazione rara per gli stati limite di esercizio (la più grave tra la combinazione con vento positivo o negativo). Nella configurazione presa come esempio, per il pilastro tra il primo modulo totalmente esteso, ed il secondo richiuso come i successivi, i valori di freccia iniziale sono pari a +3.76mm in mezzeria con vento positivo, e -2.43mm con vento negativo. Questi valori sono ottenuti considerando anche l'eventuale presenza dei pannelli di chiusura per la spinta orizzontale del vento.

f_{diff} è la freccia differita, definita come: $f_{diff} = f_{in}' \cdot k_{def}$

f_{in}' è la freccia dovuta ai carichi in combinazione quasi permanente per gli stati limite di esercizio, ricavata similmente alla precedente, pari a +0.79mm per l'esempio sopracitato.

k_{def} è il coefficiente di deformazione per effetti viscosi, pari a 0.80

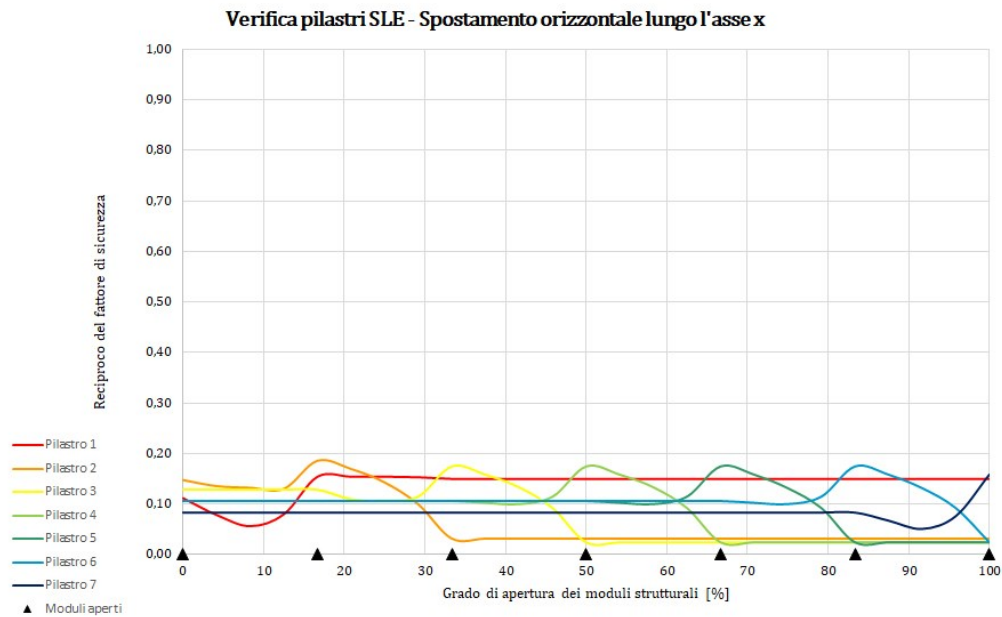


Figura 5.8.9.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di spostamento orizzontale lungo l'asse x nei pilastri (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.8.10 Verifica di spostamento orizzontale lungo asse z (SLE)

Viene verificato che:

$$f_{fin,z,d} \leq f_{max,z}$$

Dove:

$f_{max,z}$ è la freccia orizzontale massima ammessa in sommità ai pilastri, la verifica risulta soddisfatta con un leggero margine, considerando il limite fornito per elementi portanti verticali pari a $1/250$ della dell'altezza, ossia 27mm.

$f_{fin,z,d}$ è la freccia finale verticale massima di progetto: $f_{fin,d} = f_{in} + f_{diff}$

f_{in} è la freccia iniziale dovuta ai carichi in combinazione rara per gli stati limite di esercizio (la più grave tra la combinazione con vento positivo o negativo). Nella configurazione presa come esempio, per il pilastro tra il primo modulo totalmente esteso, ed il secondo richiuso come i successivi, i valori di freccia iniziale sono pari a +20.98mm in mezzeria con vento positivo, e -14.26mm con vento negativo. Questi valori considerano anche l'eventuale presenza dei pannelli di chiusura per la spinta orizzontale del vento.

f_{diff} è la freccia differita: $f_{diff} = f_{in}' \cdot k_{def} = 0.00$ mm nell'esempio citato.

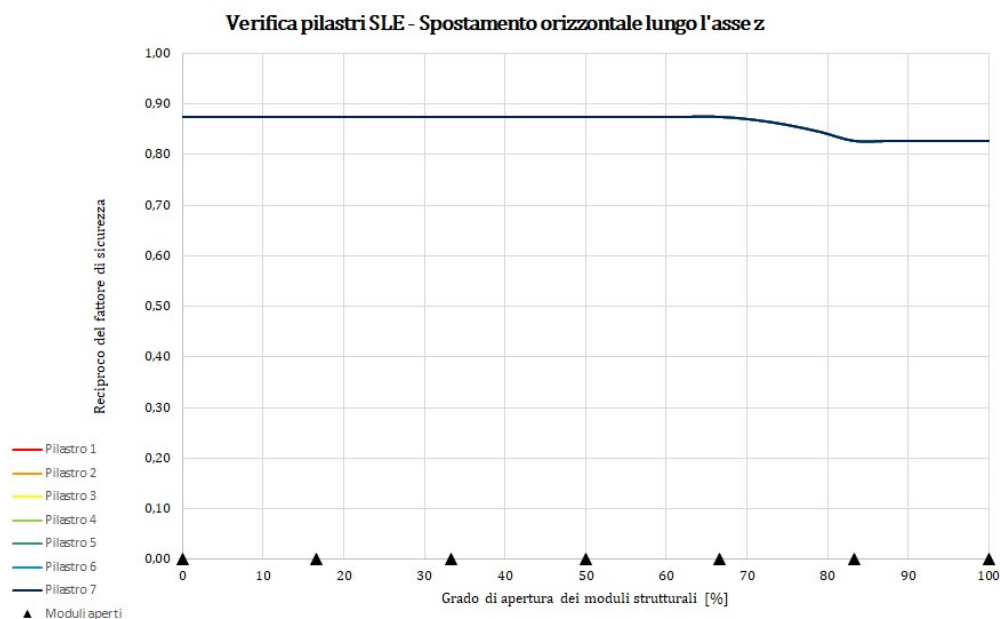


Figura 5.8.10.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza durante l'apertura per la verifica di spostamento orizzontale lungo l'asse z nei pilastri (soddisfatta per valori ≤ 1).

5.9 Valutazione della reazione al sisma

Per valutare la reazione al sisma della struttura, attenendosi alle direttive delle NTC 2018, si considera la corrispondente combinazione di carico ai per l'identificazione delle azioni variabili e permanenti, in relazione alla probabilità che queste siano applicate contemporaneamente all'evento sismico durante la vita utile dell'edificio, e rispetto al livello di sicurezza richiesto per la categoria d'uso dell'edificio.

La combinazione indicata in normativa è la seguente:

- **Combinazione sismica**, impiegata per le verifiche sismiche SLU e più raramente SLE:

$$E + G_1 + G_2 + \psi_{01} \cdot Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Dove:

E è l'azione statica equivalente all'azione del sisma

— gli altri coefficienti sono già stati definiti al paragrafo 5.4

La valutazione del rischio sismico richiede la definizione della "pericolosità sismica di base" del sito, basata sulla accelerazione orizzontale massima attesa (a_g) per un terreno roccioso rigido di categoria A, sul massimo valore del fattore di amplificazione dello spettro di accelerazione orizzontale (F_0), e sul valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale (T'_c). Inoltre, in base allo stato limite considerato per la categoria d'uso e per

la verifica da realizzare si definisce la probabilità di eccedenza (P_{VR}) nel periodo di riferimento (V_R) considerato (tabella 5.9.1).

Tabella 5.9.1 [3.2.1 nelle NTC]: Probabilità di superamento P_{VR} in funzione dello stato limite considerato.

Stati limite	P_{VR} : probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R	
Stati limite di esercizio	SLO: di operatività	81%
	SLD: di danno	63%
Stati limite ultimi	SLV: di salvaguardia della vita	10%
	SLC: di prevenzione del collasso	5%

Impostando quindi il valore della probabilità di eccedenza, durante la vita nominale dell'edificio, pari quello per lo stato limite di salvaguardia della vita, si può ricavare il tempo di ritorno (T_R) di eventi sismici di grave entità come:

$$T_R = -V_R / \ln(1 - P_{VR}) = -C_U V_N / \ln(1 - P_{VR}) = 475 \text{ anni}$$

Dove:

- i coefficienti relativi alla vita nominale dell'edificio sono già definiti al 5.3

Considerando una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni per suoli rigidi (con $V_{S30} > 800\text{m/s}$), per valutare l'accelerazione sismica attesa del sito, è possibile far riferimento ai valori riportati sul sito dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia per la zona geografica che comprende l'area di intervento (figura 5.9.1).

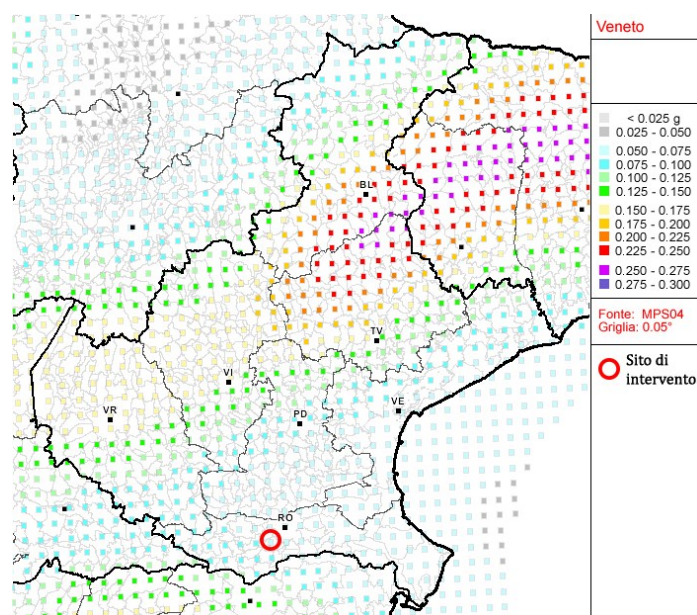


Figura 5.9.1: Pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale, in accelerazione massima del suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli rigidi (Cat. A, 3.2.1, DM 14.09.2005).

La mappa di riferimento per la regione Veneto è aggiornata negli anni successivi alla pubblicazione. In particolare, il più recente aggiornamento avviene con la deliberazione della giunta regionale DGR n. 244 del 09.03.2021, dove il comune di Villamarzana passa dalla zona sismica 4, alla zona 3. Ne consegue un incremento dell'accelerazione sismica orizzontale massima attesa a_g da 0.05g a 0.15g (tabella 5.9.2).

Tabella 5.9.2 [Allegato C]: Accelerazione orizzontale massima per la nuova zonizzazione sismica del Veneto.

Tabella zona	Accelerazione con probabilità di superamento del 10% in 50 anni (a_g)	Accelerazione orizzontale massima convenzionale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico (A_g)
1	$0,25 < a_g \leq 0,35$ g	0,35 g
2	$0,15 < a_g \leq 0,25$ g	0,25 g
3	$0,05 < a_g \leq 0,15$ g	0,15 g
4	$a_g \leq 0,05$ g	0,05 g

Per ricavare i rimanenti parametri si fa riferimento all'allegato B del Decreto del Ministero delle Infrastrutture 14/01/2008, alle coordinate del sito di intervento, per un periodo di riferimento per l'azione sismica di 50 anni, pari alla vita nominale dell'opera (tabella 5.9.3). Allo stato limite di salvaguardia della vita SLV il fattore di amplificazione è pari a $F_o = 2.622$, ed il periodo per l'inizio del tratto a velocità costante è $T'_c = 0.340$ s.

Tabella 5.9.3: Parametri F_o e T'_c per il comune di Villamarzana, Rovigo, periodo di riferimento di 50 anni.

Stato limite	Tempo di ritorno T_R [anni]	Fattore di amplificazione dello spettro di accelerazione orizzontale F_o	Riferimento per l'inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale T'_c [s]
SLO	30	2.538	0.221
SLD	50	2.570	0.268
SLV	475	2.622	0.340
SLC	975	2.619	0.343

Ai fini dell'analisi, rimangono da definire i parametri legati alla tipologia di suolo. La zona alluvionale dove è sito l'intervento appartiene alla categoria di sottosuolo C, definita dalle NTC al paragrafo 3.2.2 Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche come: "depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s". La superficie topografica è di categoria T1 secondo la tabella 3.2.III (NTC 2018): "superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$ ".

Infine, prima di procedere alla modellazione digitale della struttura, è richiesta la definizione di un fattore di comportamento della struttura (q). Il quale viene limitato a 1.5 cautelativamente secondo le direttive dell'eurocodice 8, considerando a favore di sicurezza un comportamento strutturale prevalentemente elastico, a bassa dissipazione.

5.9.1 Modellazione sismica in Midas Gen

Si riproduce lo schema statico della struttura nell'ambiente di modellazione per le tre diverse configurazioni (figura 5.9.1.1):

- Estesa, con tutti i moduli completamente aperti
- Intermedia, con tre moduli aperti e tre moduli richiusi
- Richiusa, con tutti i moduli completamente richiusi

Il modello viene realizzato per ciascuna configurazione considerando diversi vincoli alla base dei pilastri, scorrevoli o meno ad eccezione dell'ultimo pilastro collegato alla parte fissa dello stabilimento. Lo scorrimento viene lasciato libero con bipendoli o carrelli e poi bloccato in entrambi i casi ipotizzando dei freni in grado di assorbire le sollecitazioni orizzontali, al fine di valutare la variazione della risposta sismica della struttura con i diversi gradi di vincolo. I dispositivi di frenaggio considerati devono essere progettati per bloccare il tagliante sismico alla base di ciascun pilastro anche in caso di blackout elettrico, pertanto si ipotizza di utilizzare freni a rilascio elettrico con sufficiente forza e in sufficiente numero sulla base del tagliante sismico.

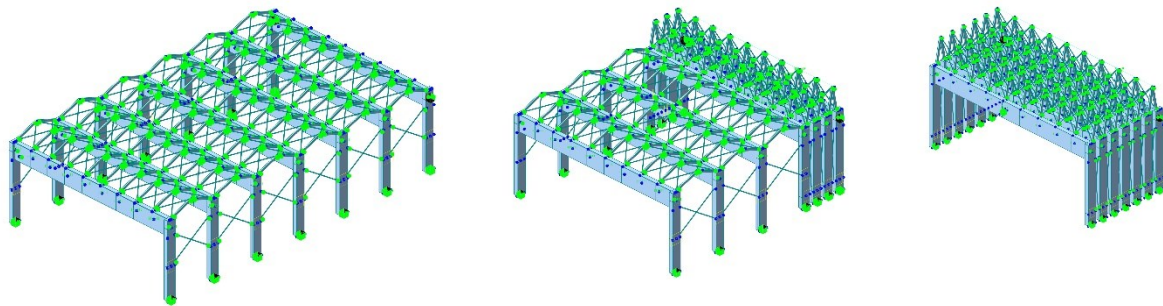


Figura 5.9.1.1: Modelli dello schema strutturale di base per la configurazione estesa (sinistra), intermedia (centro), e richiusa (destra); versioni con bipendoli alla base.

Dopo aver implementato le caratteristiche dei materiali utilizzati e le sezioni degli elementi strutturali, si procede all'applicazione dei carichi previsti dalla combinazione. In particolare, le azioni variabili per la categoria d'uso H sono moltiplicate per un coefficiente nullo, mentre il peso proprio non strutturale degli elementi di copertura è trasformato in carichi lineari distribuiti su ciascun travetto e concentrati sulle cerniere centrali alle campate (figura 5.9.1.2). Invece, il contributo del tavolato e dei pannelli alla rigidezza di piano delle falde, è rappresentato con controventi sottili di peso nullo ai fini del calcolo.

Di conseguenza è necessario trasformare questi carichi nelle masse corrispondenti che vengono applicate ai nodi dal programma ai fini del calcolo delle forze sismiche; allo stesso modo si converte il contributo del peso proprio degli elementi strutturali nella massa medesimi (figura 5.9.1.3).

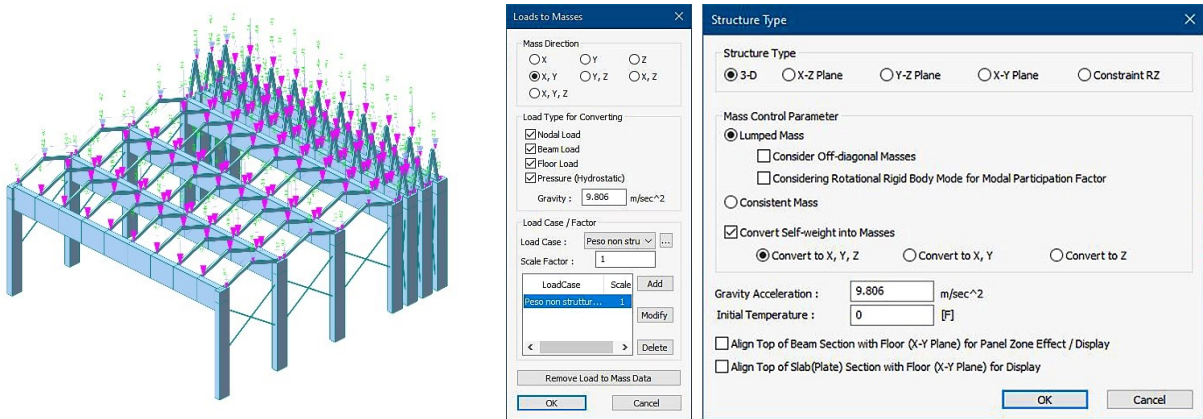


Figura 5.9.1.2: A sinistra, applicazione del peso proprio non strutturale come carichi su travi e nodi.

Figura 5.9.1.3: A destra, comandi di conversione dei carichi di peso proprio in masse per il calcolo sismico.

Una volta definite le masse soggette all'accelerazione sismica si applicano le forze statiche equivalenti ai nodi che rappresentano l'azione dinamica del sisma. Per farlo si impostano all'interno del programma i coefficienti di cui al paragrafo 5.9. Si creano quindi due casi di carico distinti per le direzioni x e y del sisma (figure da 5.1.4.4 a 5.1.4.6).

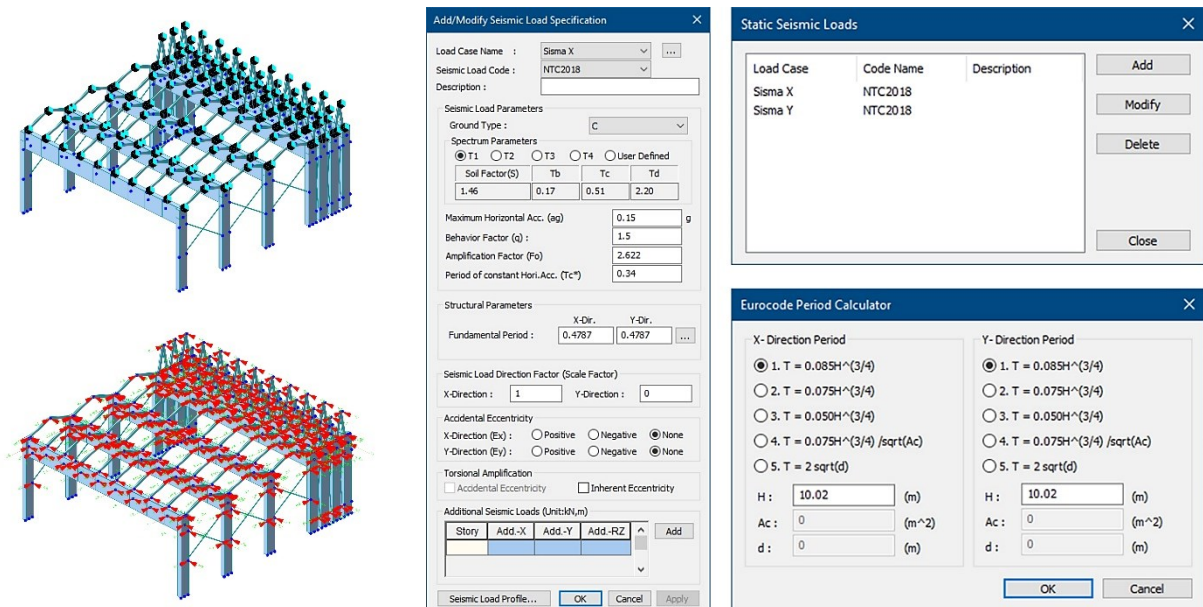


Figura 5.9.1.4: In alto a sinistra, struttura con masse ai nodi equivalenti ai casi di carico di peso proprio.

Figura 5.9.1.5: A destra, comandi per l'applicazione di forze statiche equivalenti a quelle sismiche.

Figura 5.9.1.6: In basso a sinistra, struttura con forze sismiche in direzione x e y applicate ai nodi.

Risulta di conseguenza possibile eseguire l'analisi lineare statica delle sollecitazioni sulla struttura dovute all'azione statica equivalente all'accelerazione sismica, applicata ai nodi. Attraverso le combinazioni di carico si impostano le azioni presenti nella combinazione sismica per le verifiche allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita, che comprendono i pesi propri delle membrature strutturali, i carichi distribuiti equivalenti al peso proprio non strutturale degli elementi di copertura e l'azione sismica.

Considerando l'azione sismica separatamente nelle due direzioni si ottengono le massime sollecitazioni di entrambi i casi, oppure, componendole per somma vettoriale tramite dei fattori moltiplicativi direttamente applicabili in combinazione, è possibile studiare l'effetto di un sisma in direzione generica tramite un'analisi statica.

5.9.2 Analisi lineare dinamica con modi di vibrare

Tramite l'analisi per autovalori (Eigenvalue Analysis) è possibile determinare i modi di vibrare della struttura per eseguire l'analisi lineare dinamica prescritta dalle NTC 2018 per costruzioni in zona sismica.

All'interno dell'ambiente virtuale è possibile impostare il numero di frequenze o modi di vibrare da indagare, ossia le configurazioni deformate che la struttura assumerebbe se lasciata libera di vibrare senza smorzamento, nelle quali lo spostamento di ciascun punto è proporzionale a quello degli altri punti della struttura. Più in particolare i modi di vibrare calcolati sono quelli con andamento sinusoidale nel tempo, per i quali il programma può restituire il periodo proprio di vibrazione e la massa partecipante eccitata in ciascun modo di vibrare.⁵⁰

Al fine di determinare le sollecitazioni sismiche dinamiche derivate da questi modi di vibrare, è necessario correlarli a degli spettri di risposta che mostrano l'accelerazione massima in funzione del periodo di vibrazione di un sistema vibrante ad un solo grado di libertà, la cui massa e periodo proprio coincidono a quelli del singolo modo di vibrare. Schematizzando ogni modo di vibrare come un oscillatore semplice sottoposto agli accelerogrammi rappresentativi di eventi sismici con tempo di ritorno definito dallo stato limite considerato è possibile ricavare il tagliante sismico alla base che caratterizza ciascun modo:

$$F_{h,i} = M_i \cdot S_d(T_i)$$

Dove:

$F_{h,i}$ è il tagliante sismico orizzontale alla base del modo di vibrare i-esimo

M_i è la massa partecipante del modo di vibrare i-esimo

$S_d(T_i)$ è accelerazione spettrale corrispondente al periodo proprio di vibrazione T_i del modo di vibrare i-esimo

Infine, si distribuiscono i taglianti simici alla quota delle masse in funzione del coefficiente di partecipazione modale, del valore della massa e dello spostamento dei punti del corrispondente modo di vibrare. Le sollecitazioni così ricavate per ciascun modo di vibrare studiato sono combinate considerandone la non contemporaneità tramite il metodo della combinazione quadratica completa (CQC) prescritto dalle NTC 2018.

Generalmente, per strutture tridimensionali, i primi tre modi di vibrare rappresentano la gran parte del contributo secondo questo metodo di combinazione, avendo questi le maggiori masse partecipanti e periodi propri di oscillazione, poiché lo spostamento dei vari punti della struttura tende ad essere concorde rispetto ai modi di vibrare successivi.⁵⁰ Però, data la complessità del caso, si esegue l'analisi lineare sui primi 10 modi di vibrare per una maggiore accuratezza.

Il procedimento sopra riportato viene eseguito automaticamente dal programma inserendo lo spettro di risposta, indicato dalla normativa, per la categoria del suolo e i parametri relativi all'accelerazione sismica già definiti al paragrafo 5.9. Trattandosi di uno spettro di risposta di progetto, si utilizzano dei valori normalizzati di accelerazione e uno smorzamento viscoso standard (ξ) pari a 0.05. Quindi si imposta la modalità di combinazione dei contributi di ciascun modo di vibrare e diventa possibile creare il caso di carico relativo al sisma per l'analisi dinamica lineare della struttura (figura 5.9.2.1).

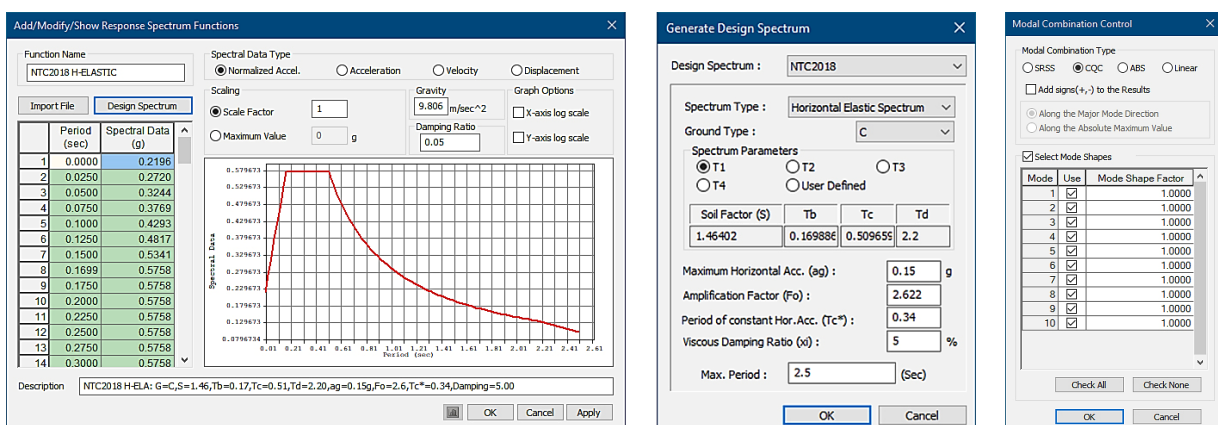


Figura 5.9.2.1: Comandi per la definizione dello spettro di risposta di progetto e del modo di combinazione.

Dopo aver inserito tra le condizioni di carico iniziali il peso proprio della struttura ed il peso proprio non strutturale visti in precedenza (figura 5.9.2.2), e aver scelto il numero di frequenze per i modi di vibrare da indagare (figura 5.9.2.3), è possibile passare all'analisi dei risultati dell'analisi dinamica lineare svolta dal programma.

50. De Pisapia Marco, *Analisi modale con spettro di risposta: tutti i dettagli del calcolo*, in *Articoli Risorse Applicazioni per progettisti strutturali*, 2017, disponibile al link: <https://www.marcodepisapia.com/analisi-modale-con-spettro-di-risposta/>

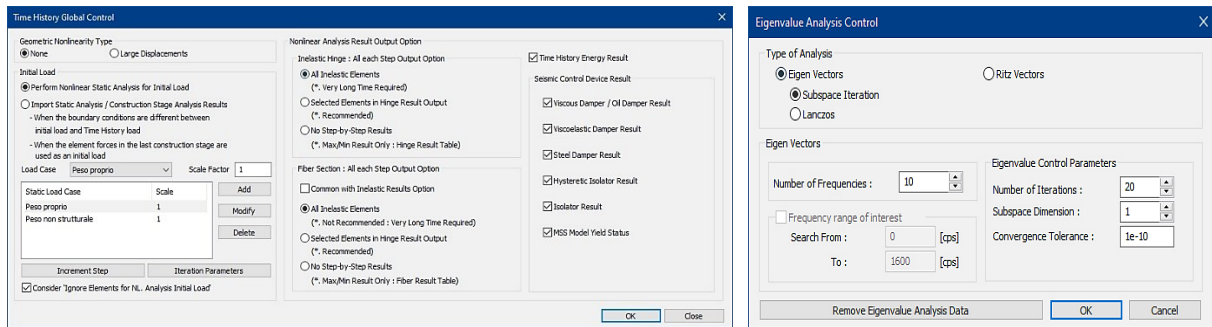


Figura 5.9.2.2: A sinistra, comandi per l'inserimento delle condizioni di carico iniziali.

Figura 5.9.2.3: A destra, comandi per la definizione del numero di frequenza da indagare nell'analisi modale.

5.9.3 Risultati delle analisi sismiche

In entrambe le tipologie di analisi svolte, statica e dinamica lineare, si considera una rigidezza dimezzata per il materiale costituente i controventi laterali, perché nel caso reale di sisma tali elementi metallici snelli sono ipotizzati resistenti solamente a trazione. Questo perché il carico di punta dovuto alle forze orizzontali sviluppate in un evento sismico è tale da mandare in instabilità i profilati, di conseguenza, essendo complesso implementare nel programma membrature che lavorino solamente a trazione nell'analisi dinamica, si utilizza per i controventi un materiale che tenga conto del fenomeno di instabilità che insorge nella metà dei profilati soggetti a compressione.

Attraverso tale accorgimento è possibile avvicinarsi maggiormente al reale comportamento della struttura, inoltre, per la stessa ragione si applica il procedimento di analisi a diversi modelli per i tre gradi di apertura studiati, che differiscono nei vincoli alla base dei pilastri che possono muoversi. Lo studio di diversi gradi di vincolo rispetto a quello di incastro ipotizzato per le precedenti verifiche strutturali, permette di capire come varia la reazione della struttura nel caso di sisma istantaneo anche durante la movimentazione quando i freni non sono in funzione, oppure svincolando il momento nel piano di scorrimento dei pilastri.

Analisi con forza statica equivalente: a seguire si riportano i massimi valori assoluti riscontrati nelle sollecitazioni su travi e pilastri, in combinazione sismica, per le diverse configurazioni di apertura dei moduli e grado di vincolo alla base dei pilastri. Si considera una forza statica equivalente al sisma nelle due direzioni che restituiscono le maggiori sollecitazioni, quali la parallela all'asse di scorrimento dei moduli e la perpendicolare orizzontale allo stesso. Per ogni caso studiato risultano trascurabili le sollecitazioni agenti sui travetti di copertura, mentre quelle calcolate per i controventi laterali non rispecchiano il caso reale in quanto essi sono modellati come reagenti anche in compressione, ma con una rigidezza dimezzata (tabella 5.9.3.1):

Tabella 5.9.3.1: Sollecitazioni su travi e pilastri per la combinazione sismica nell'analisi statica equivalente.

Configurazione e direzione E	Vincoli alla base	Sollecitazioni massime sulle travi*						Sollecitazioni massime sui pilastri*					
		N	T _x	T _y	M _x	M _y	M _t	N	T _x	T _y	M _x	M _y	M _t
Tutti i moduli chiusi, sisma parallelo allo scorrimento	Carrello	0	32	57	51	110	2	145	0	12	0	74	30
	Bipendolo	0	32	58	51	110	2	148	0	10	0	70	30
	Cerniera	0	11	28	22	69	2	60	0	11	0	41	10
	Incastro	0	7	19	25	72	1	42	0	12	0	59	10
Tutti i moduli chiusi, sisma perpendicolare a scorrimento	Carrello	14	2	14	9	29	1	39	12	0	78	0	4
	Bipendolo	14	2	14	9	29	1	38	12	0	78	0	4
	Cerniera	14	2	14	9	29	1	37	12	0	78	0	3
	Incastro	14	2	14	9	29	1	37	12	0	78	0	3
Metà moduli chiusi, sisma parallelo allo scorrimento	Carrello	0	34	62	55	120	26	167	0	18	0	80	33
	Bipendolo	0	34	62	54	119	27	171	0	17	0	75	32
	Cerniera	0	13	24	22	118	14	50	0	23	0	60	7
	Incastro	0	10	26	17	123	11	45	0	16	0	75	5
Metà moduli chiusi, sisma perpendicolare a scorrimento	Carrello	14	5	27	9	112	6	46	13	1	89	3	4
	Bipendolo	14	4	26	9	111	5	47	13	2	89	7	4
	Cerniera	14	5	26	9	111	6	46	13	1	89	4	3
	Incastro	14	5	26	9	110	6	45	13	2	89	16	3
Tutti i moduli aperti, sisma parallelo allo scorrimento	Carrello	0	7	26	12	120	7	41	0	14	0	41	3
	Bipendolo	0	7	25	11	119	7	41	0	14	0	39	3
	Cerniera	0	8	25	13	118	8	45	0	9	0	29	3
	Incastro	0	6	26	10	122	6	45	0	11	0	49	3
Tutti i moduli aperti, sisma perpendicolare a scorrimento	Carrello	16	3	27	6	112	3	48	14	3	89	3	0
	Bipendolo	16	2	26	5	111	2	48	14	3	89	7	0
	Cerniera	16	3	26	6	112	3	46	14	2	89	9	1
	Incastro	16	2	26	5	110	2	45	14	3	89	21	1

(*) Le sollecitazioni individuate sono espresse in [kN] per sforzi normali e taglio, in [kNm] per i momenti flettenti e torcenti.

I momenti sono rispettivamente considerati attorno all'asse locale degli elementi x (asse forte) e y (asse debole) della sezione.

In generale è possibile notare che il grado di vincolo alla base non influenza significativamente gran parte degli sforzi data la presenza delle bielle mobili di controventi che possono trasferire i carichi tra le campate. Dove questa differenza si fa sentire maggiormente è tra i vincoli che impediscono la rotazione (bielle e incastri), rispetto quelli che la lasciano libera (carrelli e cerniere), nelle configurazioni in cui sono ancora presenti dei moduli richiusi e con sisma in direzione dello scorrimento delle campate. In questi casi è riscontrabile un sensibile incremento di sforzo normale nei

pilastrini e, in modo meno accentuato, di altre varie sollecitazioni nelle travi, quando il momento alla base non è vincolato. Questo effetto è verosimilmente dovuto alla notevole inclinazione che raggiungono i controventi quando è presente almeno un modulo richiuso ed il sistema spinge nella direzione dello scorrimento, trasferendone gli effetti con una direzione più verticale sui pilastrini.

Analisi modale dinamica lineare: a seguire si riportano i risultati dell'analisi modale svolta sui primi dieci modi di vibrare di ogni modello con diversi gradi di vincolo alla base dei pilastrini. In tabella sono estrapolati i massimi valori assoluti assunti dalle sollecitazioni su travi di campata e pilastrini, mentre quelle sui travetti risultano trascurabili e quelle sui controventi laterali non rispecchiano perfettamente il caso reale nella modellazione. Tali valori sono riferiti alla combinazione quadratica completa dei modi di vibrare indagati sullo spettro di risposta definito al paragrafo precedente (tabella 5.9.3.2):

Tabella 5.9.3.2: Sollecitazioni su travi e pilastrini in CQC nell'analisi statica modale dinamica lineare.

Configurazione	Vincoli alla base	Sollecitazioni massime sulle travi*						Sollecitazioni massime sui pilastrini*					
		N	T _x	T _y	M _x	M _y	M _t	N	T _x	T _y	M _x	M _y	M _t
Tutti i moduli chiusi	Carrello	16	0	1	1	1	0	1	20	0	135	0	0
	Bipendolo	16	0	1	1	1	0	1	20	0	135	0	0
	Cerniera	16	0	1	1	1	0	1	20	0	135	0	0
	Incastro	16	0	1	0	1	0	1	20	0	135	1	0
Metà moduli chiusi	Carrello	0	15	25	23	50	11	93	0	8	0	38	14
	Bipendolo	0	16	27	33	81	12	94	0	8	0	36	17
	Cerniera	0	16	16	28	73	16	34	0	32	0	85	13
	Incastro	0	12	16	36	98	11	6	0	22	0	112	16
Tutti i moduli aperti	Carrello	0	21	22	34	73	19	44	0	21	0	53	7
	Bipendolo	0	20	22	34	72	19	44	0	21	0	52	7
	Cerniera	0	21	10	34	34	19	17	0	21	0	59	8
	Incastro	0	18	9	28	37	16	7	0	23	0	102	7

(*) Le sollecitazioni individuate sono espresse in [kN] per sforzi normali e taglio, in [kNm] per i momenti flettenti e torcenti. I momenti attorno all'asse locale degli elementi sono riferiti ad x come l'asse forte ed y come l'asse debole delle sezioni.

Oltre a questi valori si riportano anche i periodi e la percentuale di massa coinvolta in base alla direzione degli spostamenti di ciascun modo di vibrare indagato (dove x si intende in direzione dello scorrimento delle campate, ed y la perpendicolare orizzontale, mentre si omettono nella tabella riassuntiva le percentuali di massa rotazionali ed in direzione verticale z). I dati sono ottenuti per diversi gradi di vincolo (tabella 5.9.3.3):

Tabella 5.9.3.3: Caratteristiche dei modi di vibrare della struttura nelle diverse configurazioni di vincolo.

Configurazione e vincoli	Modo di vibrare	Periodo [s]	Massa % in x	Massa % in y	Modo di vibrare	Periodo [s]	Massa % in x	Massa % in y
Tutti i moduli chiusi, carrelli	1°	1.95	83.5	0	6°	0.55	0.1	0
	2°	0.82	2.0	0	7°	0.52	0.5	0
	3°	0.69	4.1	0	8°	0.50	0	69.9
	4°	0.65	0.1	0	9°	0.44	0	0
	5°	0.55	0	0	10°	0.42	0	5.2
Tutti i moduli chiusi, bipendoli	1°	1.93	83.4	0	6°	0.40	0.3	0
	2°	0.69	6.1	0	7°	0.36	0.1	0
	3°	0.50	0	69.9	8°	0.35	0	0
	4°	0.47	1.1	0	9°	0.34	0	2.5
	5°	0.42	0	5.2	10°	0.29	0	0.7
Tutti i moduli chiusi, cerniere	1°	0.84	71.9	0	6°	0.34	0	2.4
	2°	0.51	9.6	0	7°	0.32	0.6	0
	3°	0.50	0	69.9	8°	0.29	0	0.7
	4°	0.42	0	5.2	9°	0.29	0.1	0
	5°	0.38	0.9	0	10°	0.27	0	0
Tutti i moduli chiusi, incastri	1°	0.50	0	69.9	6°	0.25	0	0.3
	2°	0.42	0	5.2	7°	0.25	58.5	0
	3°	0.34	0	2.4	8°	0.24	0.9	0
	4°	0.30	23.9	0	9°	0.23	0	0.1
	5°	0.29	0	0.7	10°	0.22	0	0
Metà moduli chiusi, carrelli	1°	1.92	87.9	0	6°	0.41	0	0
	2°	0.60	1.9	0	7°	0.35	0	3.8
	3°	0.55	1.2	0	8°	0.34	0	0
	4°	0.54	0	71.0	9°	0.29	0	0.5
	5°	0.43	0	6.5	10°	0.29	0.8	0
Metà moduli chiusi, bipendoli	1°	1.91	87.6	0	6°	0.35	0	3.8
	2°	0.54	0	71.0	7°	0.29	0	0.5
	3°	0.53	3.9	0	8°	0.26	0	0.4
	4°	0.43	0	6.5	9°	0.24	5.2	0
	5°	0.37	0.1	0	10°	0.24	0	0.1
Metà moduli chiusi, cerniere	1°	0.54	0	71.0	6°	0.29	0	0.5
	2°	0.50	81.1	0	7°	0.29	1.1	0
	3°	0.43	0	6.5	8°	0.26	0	0.4
	4°	0.37	4.6	0	9°	0.24	5.1	0
	5°	0.35	0	3.8	10°	0.24	0	0.1

Metà moduli chiusi, incastri	1°	0.54	0	71.0	6°	0.24	39.0	0
	2°	0.43	0	6.5	7°	0.24	0	0.1
	3°	0.35	0	3.8	8°	0.23	44.6	0
	4°	0.29	0	0.5	9°	0.22	4.4	0
	5°	0.26	0	0.4	10°	0.19	0.4	0
Tutti i moduli aperti, carrelli	1°	0.55	0	76.5	6°	0.26	0	0.4
	2°	0.53	78.5	0	7°	0.24	0	0.1
	3°	0.46	0	3.9	8°	0.20	6.4	0
	4°	0.37	0	3.0	9°	0.16	0.7	0
	5°	0.30	0	0.7	10°	0.15	0	0
Tutti i moduli aperti, bipendoli	1°	0.55	0	76.5	6°	0.26	0	0.4
	2°	0.53	78.5	0	7°	0.24	0	0.1
	3°	0.46	0	3.9	8°	0.20	6.4	0
	4°	0.37	0	3.0	9°	0.15	1.2	0
	5°	0.30	0	0.7	10°	0.14	0.3	0
Tutti i moduli aperti, cerniere	1°	0.55	0	76.5	6°	0.26	0	0.4
	2°	0.46	0	3.9	7°	0.24	0	0.1
	3°	0.37	0	3.0	8°	0.19	6.8	0
	4°	0.34	75.2	0	9°	0.15	0.9	0
	5°	0.30	0	0.7	10°	0.14	0.3	0
Tutti i moduli aperti, incastri	1°	0.55	0	76.5	6°	0.24	0	0.1
	2°	0.46	0	3.9	7°	0.21	71.6	0
	3°	0.37	0	3.0	8°	0.17	7.2	0
	4°	0.30	0	0.7	9°	0.15	0.6	0
	5°	0.26	0	0.4	10°	0.14	0.3	0

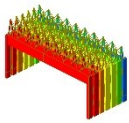




Dalle sollecitazioni ottenute nel metodo dinamico è possibile determinare che la struttura varia ampiamente nella risposta quando tutti i moduli sono chiusi, rispetto a quando alla configurazione aperta e con solamente metà dei moduli estesi. In particolare, confrontandole alle sollecitazioni ottenute con forze statiche equivalenti, si nota come la configurazione chiusa mostra sollecitazioni simili al caso di sisma perpendicolare allo scorrimento delle campate, denotandone una maggiore influenza rispetto a forze sismiche nella direzione parallela al medesimo asse. Inoltre, tali sollecitazioni si attestano a valori simili eccetto per il momento flettente attorno all'asse forte dei pilastri che mostra un incremento anche del doppio rispetto all'analisi statica.

Nelle due configurazioni con moduli aperti, invece, il quadro delle sollecitazioni risulta simile alle forze statiche equivalenti per un sisma parallelo allo scorrimento; di

conseguenza, i modi di vibrare più influenti per questi gradi di apertura sono quelli che portano a deformazioni nella direzione dello scorrimento. Anche in questo caso i valori riscontrati dall'analisi dinamica sono simili a quella statica, ma mostrano una maggiore variazione a seconda del grado di vincolo considerato alla base, arrivando in certi casi anche a quote piuttosto ridotte, e diventando in altri leggermente più alte.

La principale differenza riscontrabile tra l'analisi dinamica e quella statica è la variazione delle sollecitazioni e dei periodi dei modi di vibrare a seconda del grado di vincolo indagato, il quale nel primo studio non mostra una rilevante influenza. Per i vincoli che lasciano libero lo scorrimento orizzontale quali bielle e carrelli, è evidente che il periodo di vibrazione modale incrementa in generale, quasi toccando i due secondi. Un periodo così lungo ed atipico per una struttura relativamente bassa è spiegato dalla ridotta resistenza a forze orizzontali nella direzione dello scorrimento offerta dai controventi laterali dei moduli richiusi, a causa della loro inclinazione che raggiunge quasi la verticale; infatti nella configurazione con tutti i moduli aperti il periodo del primo modo di vibrare diventa ridotto a circa mezzo secondo che maggiormente rispecchia la reazione sismica di edifici di altezza simile al progetto. Per validare questa ipotesi vengono prodotti anche dei modelli della struttura su bipendoli con due e con un singolo modulo richiuso, dei quali si indaga il periodo del modo di vibrare con la maggiore massa partecipante nella direzione dello scorrimento x (tabella 5.9.3.4):

Tabella 5.9.3.4: Modo di vibrare con maggiore massa in x per diversi gradi di apertura con bipendoli.

Grado di apertura	Tutti i moduli chiusi	Metà dei moduli chiusi	Due moduli chiusi	Un modulo chiuso	Tutti i moduli aperti
Rappresentazione delle deformazioni del modo di vibrare					
Modo n°	1°	1°	1°	1°	2°
Periodo	1.93 s	1.91 s	1.77 s	1.59 s	0.53 s
Massa % in x	83.4 %	87.6 %	90.3 %	91.9 %	78.5 %

Dall'indagine risulta un periodo fondamentale crescente in base al numero di moduli richiusi, con un notevole distacco tra la presenza di un singolo modulo ripiegato e la configurazione completamente estesa, dovuto alla ampia variazione nell'inclinazione dei controventi laterali. La differenza è tale da far scalare al secondo posto per frequenza il modo di vibrare principale in direzione dello scorrimento quando la struttura è completamente aperta, lasciando come primo modo quello con deformazioni nella direzione perpendicolare (figura 5.9.3.1).

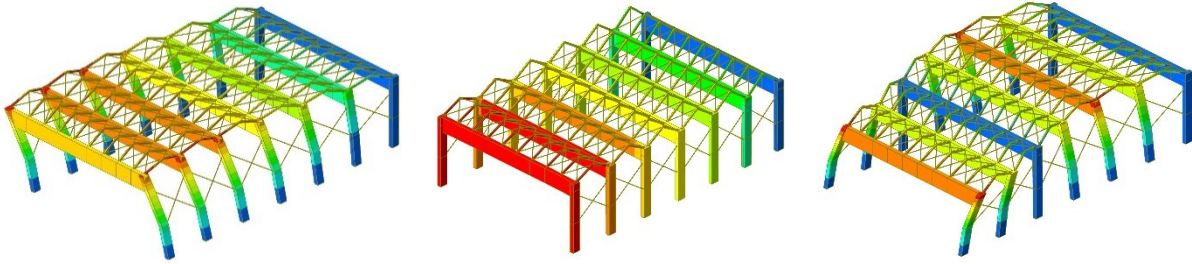


Figura 5.9.3.1: Modi di vibrare della struttura completamente aperta con vincoli a bipendolo alla base dei pilastri, a sinistra il 1° con periodo 0.55s, al centro il 2° con periodo 0.53s e a destra il 3° con periodo 0.46s.

Come ultima osservazione si può apprezzare il cambiamento nelle deformazioni e nei modi di vibrare al variare dei gradi di vincolo considerati alla base (Allegato 1).

In conclusione all'analisi sismica si sottolinea che le sollecitazioni rilevate tramite l'analisi dinamica lineare sono in generale più gravose rispetto a quelle ottenute per mezzo di analisi statiche, con qualche eccezione in base al grado di vincolo considerato. Inoltre, l'analisi modale permette di valutare in modo più accurato la variazione nelle risposte strutturali ottenute con vincoli diversi, anche nello studio delle frequenze di vibrazione. Queste ultime risultano in generale insolite rispetto a strutture di simile elevazione, ma realizzate con tecniche costruttive tradizionali, poiché l'impiego di un materiale flessibile come il legno, abbinato all'eventuale libertà di movimento lungo l'asse di traslazione del volume strutturale consentono di raggiungere periodi fondamentali più estesi nei modi di vibrare, che meno rischiano di amplificare l'accelerazione sismica per risonanza. Tali aspetti, assieme alla leggerezza relativa della struttura, rappresentano quindi un vantaggio nella sua risposta sismica.

La principale complessità nell'analisi presente è dovuta alla necessità di verificare singolarmente ed iterativamente molteplici configurazioni strutturali, le quali, a seconda del grado di apertura, possono restituire comportamenti e sollecitazioni ampiamente diversificate. La verifica di ogni grado di apertura intermedio richiederebbe un tempo eccessivo per essere compresa nel presente elaborato, ma non è da trascurare nella redazione di un progetto strutturale definitivo, in quanto un evento di natura istantanea come il sisma potrebbe verificarsi in qualsiasi momento dell'apertura o chiusura delle campate, tanto più nel presente caso di copertura che può essere estesa modularmente.

Un'ultima difficoltà in questo tipo di modellazione è imputabile alla difficile progettazione ed implementazione nel programma di giunti mobili che sviluppano un certo attrito e di eventuali pistoni dalle proprietà anche viscosse che influenzerebbero le deformazioni dell'analisi dinamica.

5.10 Risultati dell'analisi strutturale

Come premessa alle successive considerazioni è necessario specificare che verifiche eseguite nel progetto sono esclusivamente mirate agli elementi lignei strutturali, di conseguenza, per ottenere un quadro più completo risulterebbe necessario estendere l'analisi strutturale anche alle piastre, profilati e giunti metallici riportati nei dettagli architettonici. L'obiettivo principale delle analisi svolte si limita alla comprensione del comportamento strutturale per delle componenti lignee mobili, durante il moto che le porta dalla configurazione chiusa a quelle intermedie, ed infine alla copertura adattiva completamente estesa. Pertanto, come citato in precedenza, nello sviluppo delle verifiche sono assunte le ipotesi semplificative a seguito raggruppate:

- Si assume il mantenimento delle sezioni piane nel calcolo delle sollecitazioni negli elementi strutturali;
- Si considerano azioni e momenti del secondo ordine, dovute alle deformazioni impresse alla struttura, come trascurabili;
- Si definiscono dei gradi di vincolo perfetti ai giunti tra elementi strutturali, secondo quanto rappresentato nello schema statico;
- Si presuppone una adeguata progettazione del piastrame metallico, delle giunzioni mobili e degli elementi metallici di collegamento tra le strutture lignee, che garantiscano una adeguata resistenza ed un comportamento duttile a rottura, in grado di sviluppare sufficienti deformazioni plastiche prima del cedimento fragile delle membrature in legno lamellare incollato;
- Si assimilano le azioni variabili di sovraccarico, vento e neve a carichi statici permanenti, utilizzando di conseguenza il valore più cautelativo di k_{mod} per le verifiche di cui al paragrafo 5.5. Vengono invece trascurati gli effetti dinamici di tali azioni a differenza di quella sismica;
- Si assumono come rappresentativi per l'andamento del valore reciproco al fattore di sicurezza nella costruzione dei grafici i valori corrispondenti alle percentuali di apertura, per ciascuno dei sei singoli moduli, dello 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Si interpola quindi l'andamento delle sollecitazioni e del conseguente fattore di sicurezza nelle verifiche tra i punti definiti da questi 25 gradi di apertura per ogni campata.

In conclusione alle analisi strutturali svolte è quindi possibile asserire che le verifiche più stringenti nel dimensionamento di strutture lignee mobili di questo tipo, per quanto riguarda gli stati limite ultimi, sono:

- **Per i travetti di falda:** verifiche a flessione, eventualmente abbinate a compressione e trazione, dove si riscontra un picco più alto e vicino al limite di verifica per ogni campata corrisponde all'incremento del carico della neve. Questo avviene quando la
-

campata maggiormente sollecitata raggiunge una apertura intermedia, al 50% tra l'angolo di massima e minima inclinazione che essa può raggiungere, ed è affiancata ad una campata ancora completamente richiusa. Questa particolare configurazione geometrica presenta un lato coperto dal vento che porta alla formazione di un accumulo il quale, computato secondo normativa, porta ad un notevole incremento flessionale. L'intensità dell'accumulo è legata all'angolo compreso tra le due falde successive, e a conferma che il valore di picco si raggiunga solamente quando il modulo adiacente sia ancora richiuso si può osservare l'andamento della sesta campata, che aprendosi per ultima viene considerata contigua alla copertura della parte fissa (che ha falde di inclinazione pari alla minima raggiunta nella parte mobile, ossia di 20°). Tale valore non incrementa come per le altre campate quando il sesto modulo raggiunge metà della sua estensione (figura 5.10.1);

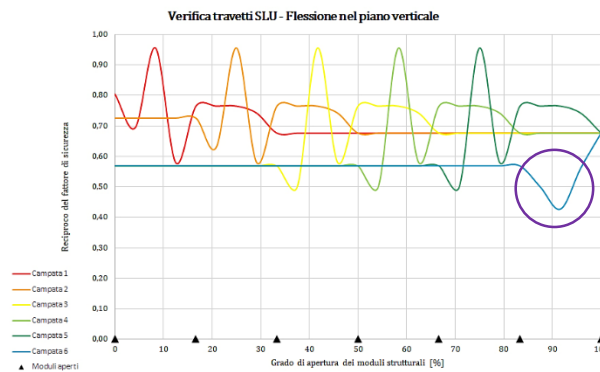


Figura 5.10.1: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza per la verifica di flessione nei travetti di falda.

- **Per le travi di campata:** verifiche a flessione bidirezionale, dove il contributo più impattante è dato dalla flessione orizzontale, come si denota anche dalle verifiche di spostamento per gli stati limite di esercizio. L'influenza maggiore della componente orizzontale è dovuta dalle dimensioni della sezione molto estese in altezza (1.60m), e con una base ridotta (0.40m), a causa di esigenze costruttive del materiale scelto. Il GLULAM viene prodotto in tavole di spessore e larghezza limitate, in seguito assemblate sovrapposte per incollaggio fino ad altezze ampiamente variabili. Data la variazione nell'inclinazione delle falde che gravano sulle travi, si può riscontrare un incremento delle sollecitazioni sostanziale quando le stesse, da un lato della trave, sono completamente estese e le falde sul lato opposto sono ancora chiuse. Il picco corrispondente a questa configurazione viene ulteriormente incrementato per la seconda trave perché è influenzato dall'azione variabile del vento. La normativa, infatti, fornisce per tale carico dei coefficienti riduttivi che scalano tra le coppie di falde partendo da valori più elevati per le prime verso un'estremità della copertura, diminuendo leggermente per le seconde e attestandosi a 0.7 per le successive più interne. Escludendo quindi la prima trave su cui gravano falde soltanto da un lato, si

può comprendere la differenza tra le sollecitazioni sulla seconda e sulle successive, fino al punto in cui l'apertura dell'ultimo modulo comporta una variazione generale nell'andamento del flusso del vento (figura 5.10.2);

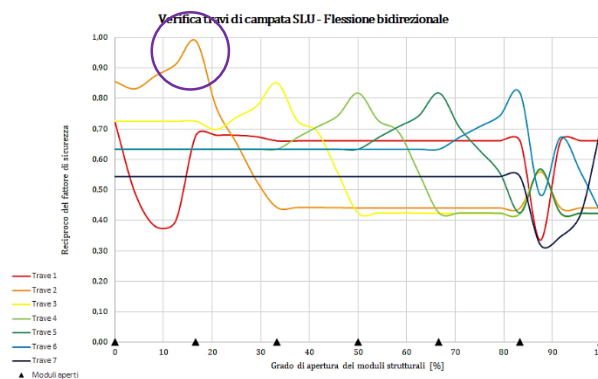


Figura 5.10.2: Grafico del reciproco del fattore di sicurezza per la verifica di flessione nelle travi di campata.

- Per i pilastri:** verifiche di stabilità presso-flessionale, che risultano leggermente più restrittive rispetto a quelle di flessione con eventuale compressione o tensione. Nonostante venga considerata nel calcolo anche l'eventualità di chiusura laterale delle campate mobili con pannelli perimetrali poggiati su una guida a terra e incernierati in sommità ai pilastri al fine del trasferimento dei carichi, l'influenza del carico del vento orizzontale su questi ultimi e sulla copertura risulta meno influente rispetto alla flessione delle travi di campata. Questa assunzione si basa sulla minore differenza relativa nel picco del secondo pilastro rispetto ai successivi, tuttavia, il vento rimane ancora la più influente azione variabile e prima ad entrare in combinazione come si può dedurre dal fatto che la sua influenza è riscontrabile a differenza del sovraccarico o della neve. Il contributo di questi ultimi risulta assente poiché è nullo il coefficiente di combinazione per le azioni variabili successive alla prima (più intensa), per la categoria d'uso H considerata (figura 5.10.3). Un'altra considerazione riguardo la verifica si può ottenere confrontandola a quelle di flessione e compressione, da cui appare evidente ancora una volta che il fenomeno più influente nella verifica è il momento flettente.

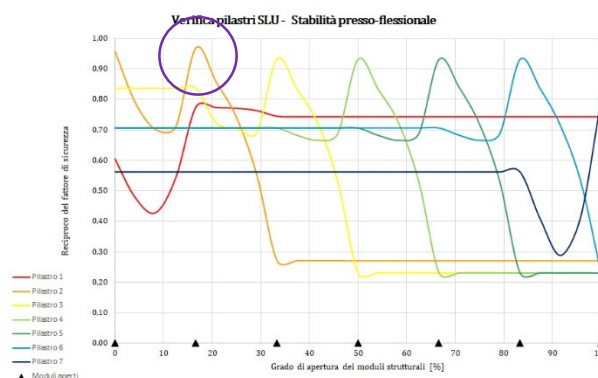


Figura 5.10.3: Grafico, reciproco del fattore di sicurezza, verifica di stabilità presso-flessionale nei pilastri.

Questi risultati mostrano una risposta soddisfacente per il materiale indagato, da integrare per raggiungere il progetto strutturale definitivo con analisi su giunti ed elementi metallici assunti come verificati in prima istanza nella redazione dell'elaborato presente, data l'impossibilità di verificarne le molteplici configurazioni in tempi ragionevoli. Infatti, seppur il legno lamellare incollato presenti lo svantaggio di avere una ridotta resistenza ad azioni perpendicolari alle fibre, e un comportamento in generale anisotropo, grazie ad una accurata progettazione è possibile evitare sollecitazioni rischiose e massimizzare la resistenza del materiale arrivando ad un'efficienza non seconda all'acciaio rispetto al peso delle membrature.

Il principale svantaggio rispetto al materiale concorrente sopracitato, è dovuto alla necessità di realizzare elementi piuttosto voluminosi, seppur leggeri. Queste dimensioni sono principalmente dettate dalle verifiche a flessione, che diventano determinanti soprattutto per le travi di campata soggette ad una flessione bidirezionale. Infatti, quando la struttura presenta due coppie di falde successive rispettivamente del tutto estese e completamente richiuse, l'azione spingente delle prime sulle travi comporta un notevole spostamento orizzontale che deve essere compensato da una leggera controfreccia nelle verifiche agli stati limite di esercizio. A causa di questo l'apertura di un modulo intermedio deve avvenire necessariamente soltanto quando i moduli più esterni sono già estesi, altrimenti lo spostamento orizzontale rischia di superare il limite previsto diventando concorde alla controfreccia iniziale della trave.

La flessibilità del materiale, inoltre, comporta un allungamento dei periodi per i modi di vibrare nell'analisi sismica. Questo da un lato riduce gli effetti di amplificazione dello spettro di accelerazione tipico considerato, spostandosi in una zona del grafico meno energetica (figura 5.10.4); ma, al contempo indica la presenza di spostamenti in genere più significativi rispetto a periodi ridotti.

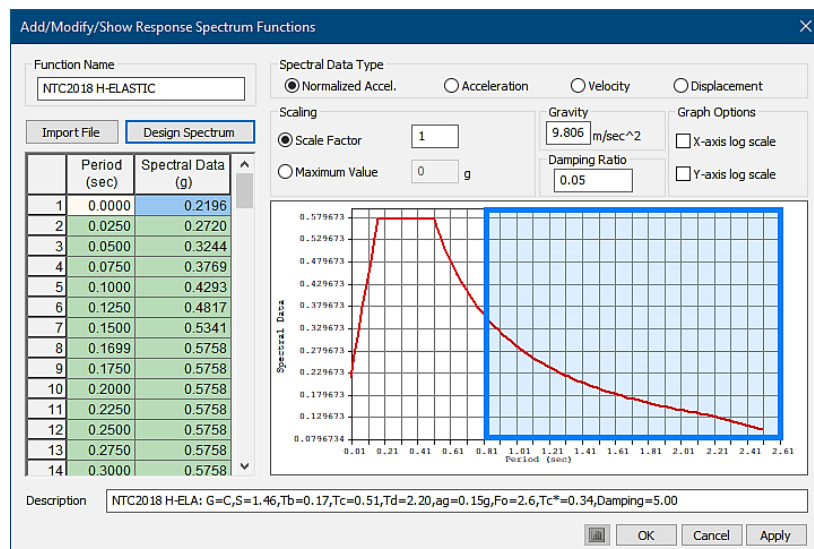
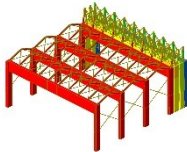

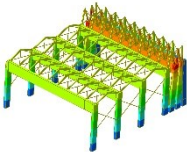
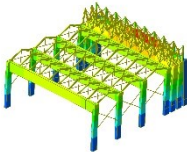


Figura 5.10.4: Spettro di accelerazione sismica di progetto, evidenziati i valori meno energetici per periodi di oscillazione alti (superiori a 0.8 secondi nell'esempio mostrato).

Per compensare questi spostamenti si possono implementare dei sistemi di sensori sismici collegati a smorzatori alla base delle rotaie per la direzione trasversale allo scorrimento; mentre gli stessi sensori sfrutterebbero gli attuatori, già in uso per la movimentazione della struttura, al fine compensare le accelerazioni sismiche nella direzione dello scorrimento.

Infine, l'influenza del grado di vincolo considerato per la base dei pilastri mobili, da quanto risulta a seguito della valutazione sismica, determina una variazione significativa della risposta strutturale solamente in relazione alle forze orizzontali. Come evidenziato dalla tabella 5.9.3.4, quando le arcate sono libere di scorrere lungo le rotaie (con carrelli o bipendoli), tutte le sollecitazioni orizzontali che non sono assorbite dall'attrito si riversano nei sottili controventi metallici laterali. Questi elementi in acciaio snelli offrono una ridotta resistenza in compressione a causa dello sviluppo di fenomeni di instabilità, di conseguenza, la struttura raggiunge grandi deformazioni favorite dall'inclinazione raggiunta dagli stessi controventi a moduli richiusi. Al fine di evitare questo fenomeno è quindi necessario disporre un sistema di freno al livello delle ruote. Il bloccaggio dello scorrimento alla base dei pilastri può ridurre drasticamente le deformazioni massime della struttura (tabella 5.10.1) migliorandone la risposta sismica. Per il medesimo motivo è preferibile limitare anche le rotazioni relative al vincolo di base, anche se le sollecitazioni negli elementi strutturali lignei non presentano eccessive variazioni tra la configurazione con cerniere e con incastri.

Tabella 5.10.1: Massime deformazioni in analisi dinamica lineare per la configurazione apertura intermedia.

Carrelli	Bipendoli	Cerniere	Incastri
			
Max: 156 mm	Max: 153 mm	Max: 56 mm	Max: 14 mm

Nonostante la struttura sia progettata per poter scorrere lungo la direzione citata, le deformazioni soprariportate potrebbero rappresentare un problema quando la stabilità longitudinale delle arcate è realizzata tramite l'esclusivo bloccaggio degli attuatori, che comporterebbe eccessive deformazioni dei perni metallici di controvento. Per una analisi più approfondita di questo caso sarebbe da considerare anche un eventuale smorzamento viscoso realizzabile tramite i pistoni di movimentazione, per ridurre l'entità delle azioni sismiche sulla struttura.

Il sistema di rotaia, ruote e freni, deve quindi idealmente formare un bipendolo rilasciabile durante la movimentazione della struttura e frenato ad incastro in posizione.



6 Conclusioni e sviluppi futuri

Ricapitolando brevemente quanto esposto all'interno dell'elaborato presente, si passa alla trattazione delle conclusioni finali e degli sviluppi futuri della ricerca.

6.1 Riepilogo dell'elaborato

- **Ricerca sulla tipologia costruttiva degli stabilimenti industriali:**

L'analisi storica iniziale permette di conoscere lo sviluppo e la cronologia delle tecniche costruttive dell'edilizia industriale, focalizzandosi poi sull'ambito italiano e veneto, per individuare un'indicazione del periodo di costruzione e delle tecniche costruttive più diffuse nella realizzazione degli odierni capannoni industriali; i quali sono frequentemente lasciati in stato di sottoutilizzo o abbandono. Dalla ricerca si può evincere la prevalenza di sistemi in calcestruzzo armato prefabbricati nella realizzazione degli stabilimenti, il cui numero cresce esponenzialmente a partire dagli anni sessanta del novecento, fino ai primi anni novanta.

A validazione ed integrazione di quanto desunto dalle fonti storiografiche, si sottopongono all'analisi i censimenti delle attività economiche Istat, rilevati in tale arco temporale, per la regione Veneto. Da questi dati statistici si può estrapolare quali fossero le attività economiche prevalenti sul territorio, tra quelle che possono presumibilmente essere ubicate all'interno di edifici di tipo industriale. I risultati mostrano che, tra i decenni del 1960 e 1980, i settori con maggiore crescita e diffusione territoriale sono: la costruzione di prodotti in metallo (meccanica leggera), industrie del legno e del mobile, esercizi commerciali all'ingrosso e industrie di calzature e abbigliamento in serie; anche se queste ultime sono le prime toccate dal declino, delocalizzazioni e dismissione degli stabilimenti, con l'inizio della più recente crisi economica agli albori degli anni 2000. Questa recessione tocca la quasi totalità dei settori produttivi, colpendo meno significativamente l'industria alimentare e lasciando però spazio alla crescita di attività logistiche e terziarie.

Il passo successivo è lo studio delle componenti strutturali e di completamento, che caratterizzano la tipologia edilizia industriale nel contesto italiano. A seguito di un breve excursus storico, si propone una classificazione di elementi e sistemi propri degli stabilimenti in cemento armato prefabbricati, per la successiva individuazione delle dimensioni di produzione nel tempo. Queste dimensioni, ricavate dai cataloghi di prodotti del periodo studiato, vengono confrontate per ottenere le larghezze delle maglie strutturali e le altezze utili più diffuse nel panorama costruttivo industriale:

- Maglie strutturali con campate maggiori compresa tra 14 e 18 m (frattile all'80%);
 - Sviluppo trasversale con campate minori comprese tra 7 e 13 m (frattile all'80%);
 - Altezze utili comprese tra 5 e 8 m (frattile al 90%).
-

Tali indicazioni dimensionali ricavate tramite distribuzioni gaussiane dai prodotti di catalogo, sono ritenute rappresentative per gli edifici esistenti della categoria, in quanto non è possibile la rilevazione diretta su un campione numericamente sufficiente. Ma, per verificarne la rispondenza alla realtà, e ottenere al contempo informazioni cruciali nella successiva progettazione, si dispongono dei sopralluoghi sulle attività presenti sul territorio disponibili per il progetto.

Sono definite le informazioni fondamentali da rilevare, previo lo studio delle generalità organizzative dei cicli produttivi, per avviare l'indagine in sito sulle 12 attività che hanno aderito all'iniziativa. Il rilievo sul campo mostra una buona accuratezza dell'analisi svolta, suggerendo una leggera discrepanza nella dimensione attesa per la campata maggiore, che nelle costruzioni più recenti si attesta a valori leggermente superiori, arrivando a 20 - 24 m.

- **Ricerca sull'architettura adattiva:**

Dopo aver compreso e contestualizzato la grande varietà di soluzioni progettuali che rientrano nell'architettura adattiva, lo studio si concentra sugli edifici a volumetria variabile, in quanto si ritiene che la capacità di adattamento di un fabbricato, tramite alterazioni planivolumetriche, possa beneficiare notevolmente la tipologia edilizia degli stabilimenti industriali.

Definiti i generali meccanismi di movimento, si passa ad approfondire l'architettura pneumatica e gli schemi implementabili nel collegamento impiantistico, di tenuta, e quali attuatori possano azionare il movimento di queste strutture adattive.

Si inquadrano quindi, in termini generali, le possibilità realizzative per collegamenti impiantistici di porzioni mobili di edifici, e si riprende uno studio di efficienza per le diverse tipologie di movimento dei meccanismi adattivi, al fine di sceglierne le più adatte nella redazione delle successive linee guida.

- **Linee guida:**

Per definire le linee guida di progettazione per interventi adattivi sull'edilizia industriale, si svolgono delle considerazioni preliminari nella tipologia di elementi adattivi da incorporare. Appare infatti teoricamente vantaggiosa l'implementazione di volumetrie variabili all'interno di questi sistemi edilizi, in quanto possono garantire l'adattabilità a diverse attività e destinazioni d'uso, anche diverse da quelle industriali favorendo il riutilizzo; inoltre, consentono di limitare il consumo di suolo e sfruttando la superficie impermeabile per diverse funzioni.

Di conseguenza si tracciano delle linee guida generali per estendere l'applicabilità dell'intervento alle strutture e alle necessità tipicamente diffuse per l'ambito industriale, facendo riferimento a quanto studiato in precedenza:

- Si prediligano interassi maggiori tra 14 e 18 m, incrementabili fino a 24 m per interventi su stabilimenti più recenti o di nuova costruzione;
 - Si predilige un passo tra i pilastri in direzione trasversale compreso tra 7 e 13 m;
 - L'altezza utile interna indicata, salvo particolari necessità produttive, è tra 5 e 8 m;
 - Data la dinamicità dei processi industriali, le funzioni che il fabbricato deve ospitare vanno delineate nel dettaglio di macchinari, personale e condizioni necessarie nelle lavorazioni, prevedendo anche eventuali possibilità di riutilizzo e cambio di destinazione degli spazi;
 - La scelta dei meccanismi adattivi è da orientarsi verso le categorie che riportano un'efficienza superiore al 37% e un'interoperabilità maggiore del 30%, qualora siano combinati diversi movimenti, preferendo comunque articolazioni meno complesse e con un numero di snodi ridotto.
 - Il livello tecnologico di automazione da raggiungere nelle componenti mobili è da limitare alle categorie dinamica, interattiva e intelligente; escludendo tecnologie smart, di adattamento autonomo basato su proiezioni comportamentali degli utenti, dato che questi sono regolamentati a livello aziendale rendendo il costo ingiustificato, ed escludendo altresì soluzioni flessibili o attive ad azionamento manuale o gestito completamente dall'utenza, a causa dei rischi e delle possibili gravi conseguenze che potrebbero derivare dall'uso errato delle componenti mobili nell'ambito dell'industria.
 - Valutando le numerose e specifiche esigenze di ogni settore e realtà industriale, diverse dimensioni strutturali o meccanismi adattivi che esulano dalle linee guida precedenti possono risultare preferibili a quanto indicato.
- **Progettazione architettonica:**

Basandosi sulle precedenti linee guida viene sviluppato il progetto architettonico di massima per un caso studio, individuato grazie alla collaborazione con l'azienda Bozza Legnami di Busa di Vigonza (PD). Si definiscono le esigenze per un'ipotetica sede, costruita ex-novo, all'interno del lotto di proprietà dell'azienda sito presso Villamarzana, Rovigo. Pur trattandosi di una struttura di nuova costruzione, la progettazione si prefigge di mantenere la massima applicabilità dell'intervento anche a casi esistenti, attenendosi a quanto definito in precedenza all'interno dell'elaborato.

Tramite l'analisi funzionale ed esigenziale, si suddividono la struttura fissa che costituisce il nucleo produttivo dello stabilimento, i magazzini per i prodotti grezzi, finiti e intermedi, coperti da una struttura adattiva mobile, e lo spazio esterno tra carrabile e verde.
-

Nel rispetto delle normative di sicurezza, comfort e urbanistiche vigenti per il sito, si passa quindi all'analisi dimensionale degli ambienti interni e delle maglie strutturali dello stabilimento, specificando macchinari, reparti, uffici e servizi da allocare al suo interno, assieme alle dimensioni minime e più efficienti per vie di transito e magazzino.

Si propone l'impiego del legno lamellare come materiale per le componenti strutturali e tamponamenti dell'intera struttura, completato da giunti metallici in acciaio e da una fondazione in cemento armato. Di conseguenza si studiano le proprietà e le normative di sicurezza strutturale relative a tale materiale.

Di conseguenza, si definisce il movimento delle coperture adattive dei magazzini, tra le categorie individuate nella ricerca sui meccanismi adattivi: nella traslazione orizzontale con pannelli di copertura che ruotano secondo un centro di rotazione di estremità. Si ipotizza quindi la realizzazione di coperture interamente scorrevoli su rotaie alla base, che lascino spazio al transito di mezzi una volta richiuse, e che possano ripiegarsi a pantografo tramite una serie di elementi rigidi incernierati. Si cerca quindi di integrare le esistenti tecnologie usate nelle pergole bioclimatiche estensibili e nelle strutture telate retrattili di applicazione industriale, sopperendo alla loro scarsa resistenza al vento, alla grandine e l'insufficiente coibentazione termica, tramite l'impiego di pannelli rigidi ripiegabili al posto delle sottili membrane di tamponamento. Inoltre, la soluzione di copertura studiata, priva di chiusure perimetrali secondo richiesta dalla committenza, viene pensata anche per l'eventuale integrazione di pannelli di chiusura laterali lignei, per renderla adattabile a diverse esigenze o cambi di destinazione.

Pertanto, una volta individuate le caratteristiche dimensionali e urbanistiche del lotto, si procede alla stesura del progetto di massima, prendendo come riferimenti progettuali le sedi produttive locali, storicamente legate al contesto di provenienza dell'azienda committente, e un esempio più moderno di edilizia industriale in legno. Diventa a questo punto fondamentale progettare nel dettaglio le soluzioni relative alla movimentazione della copertura e le sue principali dimensioni, ipotizzando sistemi di collegamento impiantistico, attuatori che operino l'estensione, schemi di deflusso delle acque meteoriche e la possibilità di implementazione dei pannelli laterali di chiusura.

Il risultato è un edificio dallo sviluppo longitudinale, che si compone di un nucleo fisso destinato ad ospitare le attività produttive ed il blocco uffici, per una superficie 1130 metri quadri, affiancato da due corpi scorrevoli e modulabili a copertura dei magazzini per i prodotti in ingresso ed in uscita. Ciascuno di questi magazzini si compone di sei moduli strutturali contigui, le cui arcate lignee possono traslare su una rotaia metallica al livello delle fondazioni. Quando questi moduli sono

completamente richiusi, una grata scorrevole copre le fosse delle rotaie, permettendo che l'area, rispettivamente di 380 metri quadri di ciascun magazzino, venga sfruttata per l'arrivo e la partenza dei mezzi che trasportano il materiale, o per eventuali lavorazioni da svolgere all'esterno per ridurre il rischio di incendio. La rimanente porzione dell'appezzamento, una volta disposti i percorsi carrabili laterali e i parcheggi, viene completata da piantumazioni utilizzabili anche per sperimentazione e ricerca su specie legnose direttamente controllate dall'azienda. La disposizione interna dei macchinari segue il flusso delle lavorazioni e rispetta gli accorgimenti definiti dall'analisi esigenziale massimizzando l'efficienza produttiva e spaziale; lo stesso criterio è usato per il blocco uffici e servizi. Qui si suddividono al piano terra gli spogliatoi, bagni e docce, dal deposito di impregnante e dall'ufficio che tratta i documenti di accompagnamento delle merci in uscita; mentre, al piano rialzato, si concentrano gli uffici tecnici, accessibili dal vano scale completo di zona di riposo.

- **Progettazione strutturale:**

Si completa il progetto di massima con il dimensionamento e la verifica degli elementi lignei pertinenti alle due coperture adattive mobili, trascurando invece la porzione fissa dell'edificio, in quanto composta da elementi simili e meno complessi, in quanto le relative membrature sono bloccate da giunti tradizionali.

Nel capitolo dedicato alla progettazione strutturale di massima, si identifica quindi lo schema statico, i carichi agenti e le sollecitazioni nelle combinazioni prescritte da normativa degli elementi lignei, al fine di verificare l'applicabilità del materiale per le geometrie e i movimenti definiti. Inoltre, considerando che la massa totale di ciascun modulo raggiunge circa 10 ton, si valutano come adeguati entrambi i tipi di attuatore corrispondenti a motori ad azionamento elettrico a cremagliera, e a pistoni oleodinamici con allungamento di 2.4 m.

Incorporando nei carichi del vento le azioni sulle superfici degli eventuali pannelli perimetrali proposti, si verifica la struttura in vista della possibile implementazione degli stessi a chiusura dell'ambiente.

Al fine di valutare la risposta degli elementi lignei durante l'intero scorrimento della struttura, si realizzano le verifiche per le massime sollecitazioni agenti su di essi per i gradi di apertura dello 0%, 25%, 50%, 75% e 100% di ogni singolo modulo consecutivo. Data la quantità ridondante di valori calcolati, oltre ai carichi relativi ad un esempio di configurazione ritenuta significativa, si riporta esclusivamente, per ogni verifica svolta, un grafico riassuntivo del valore reciproco al fattore di sicurezza, che mostra il margine entro cui la struttura risulta verificata.

Tali grafici comprendono l'andamento del fattore di sicurezza per la sezione più sollecitata di ciascuno dei sei moduli, secondo il grado di apertura complessivo della copertura adattiva. L'utilizzo del valore reciproco rende possibile l'immediato confronto tra le diverse verifiche, evidenziando le più restrittive e consentendo di valutare più agilmente quali azioni variabili causino le massime sollecitazioni.

Infine, si svolge una valutazione della risposta sismica della copertura adattiva tramite la modellazione in Midas della configurazione completamente chiusa, intermedia e del tutto estesa dei moduli. All'interno dell'ambiente di modellazione si ricavano le sollecitazioni, relative al un sisma di progetto, tramite analisi statica equivalente e analisi modale dinamica lineare. Questi due metodi sono applicati considerando diversi gradi di vincolo alla base dei pilastri, per valutare tramite un confronto le variazioni di risposta strutturale applicando un sistema di bloccaggio orizzontale, come freni a rilascio elettrico, e di bloccaggio delle rotazioni relative, ad esempio incrementando il numero o il braccio tra le ruote al livello della rotaia.

Al termine dell'analisi strutturale, si individuano per le membrature le verifiche più restrittive, e i carichi variabili maggiori, che entrano in combinazione per primi durante le configurazioni strutturali più critiche:

- Travetti di falda: verifiche di flessione, con carico neve principale
- Travi: verifiche di flessione soprattutto orizzontale, con azione del vento principale
- Pilastri: verifiche di stabilità presso flessionale, con azione del vento principale

Seguendo una corretta progettazione, che eviti determinati tipi di sollecitazioni, questi elementi risultano comunque voluminosi, ma resistenti e leggeri. La necessità di imporre una minima freccia iniziale orizzontale alle travi di campata per rispettare le verifiche deformative di esercizio, comporta la necessità di seguire una sequenza di apertura ordinata dei moduli (dal più esterno al più interno, e il contrario per la chiusura).

Le valutazioni sismiche mostrano che la flessibilità del materiale allunga i periodi propri di vibrazione strutturale, entrando in una zona meno energetica dello spettro sismico, ma comportando notevoli deformazioni.

Infine, il grado di vincolo di base preferibile risulta uno che vede la traslazione bloccata (cerniera o incastro) quando la struttura non è in movimento, mentre anche il bloccaggio delle rotazioni (bipendolo o incastro) relative migliora, seppur limitatamente, la risposta strutturale.

6.2 Conclusioni

Da quanto analizzato si può concludere che il legno lamellare incollato è un materiale applicabile anche nella realizzazione di ampie campate di carattere industriale, che consente grazie alla sua leggerezza di realizzare anche strutture adattive mobili. Inoltre, date le sue caratteristiche risulta comunque più indicato rispetto all'acciaio per attività soggette al rischio di incendio e garantisce un maggiore livello di sostenibilità ambientale.

L'applicazione di meccanismi adattivi all'ambito industriale mostra anche una notevole potenzialità nella riduzione del consumo di suolo e nella capacità di adattamento dello stesso edificio a diverse attività o destinazioni d'uso comprese o estranee al settore. L'implementazione di strategie adattive aiuta inoltre nella valorizzazione architettonica del contesto industriale nel quale possono essere inserite, e consente, nel progetto trattato, di far fronte a necessità temporanee di immagazzinamento dei prodotti offrendo una buona protezione dal vento, acqua e grandine grazie agli elementi rigidi utilizzati (a differenza delle soluzioni telate attualmente disponibili).

Nonostante il caso studio non ne presentasse la necessità, si sottolinea la possibilità di ottenere un'ambiente chiuso da pannelli perimetrali scorrevoli, che garantiscono una coibentazione termica migliorata dall'utilizzo del legno come materiale strutturale, e consentono l'adattamento ad una gamma di destinazioni ancora più vasta.

Infine, attenendosi alle linee guida progettuali è stato possibile individuare una struttura adattiva adeguata alla riqualificazione di stabilimenti industriali esistenti, che oggi rimangono spesso in stato di sottoutilizzo o abbandono.

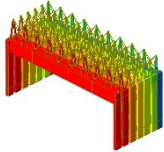

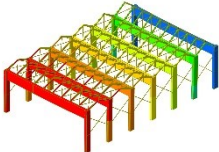
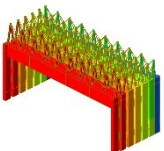


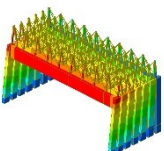
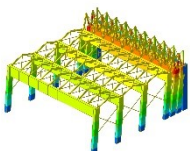
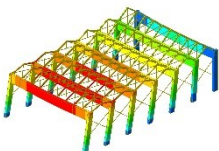
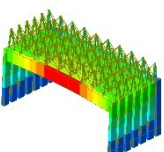
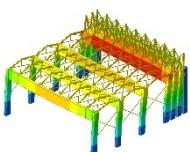
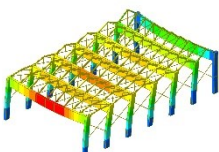
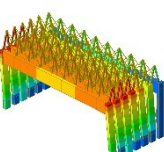
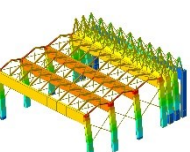
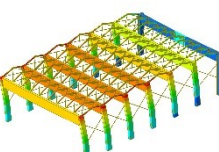
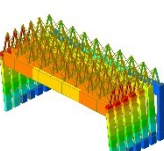
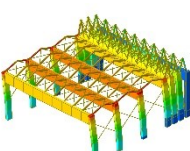
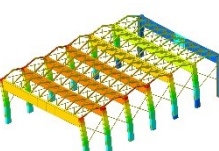
6.3 Sviluppi futuri:

Un eventuale sviluppo diretto del progetto è l'implementazione di smorzatori sismici alla base delle rotaie, che utilizzino anche gli attuatori già presenti per lo scorrimento al fine di garantire la resistenza della struttura anche ad azioni sismiche eccezionali che superano quelle previste per strutture ordinarie.

Inoltre, in termini temporali più ampi, si può estendere l'applicazione del modello progettato a diverse attività produttive industriali o commerciali che possono favorire del meccanismo adattivo e della volumetria variabile studiate. Alcuni esempi sono quelle attività che presentano caratteri di produzione discontinua nel corso del tempo, come l'ambito agroalimentare, vitivinicolo o di produzione di articoli stagionali, oppure le attività che presentano rilevanti variazioni nelle esigenze spaziali come il settore logistico o cicli produttivi che comprendono specifiche lavorazioni con frequenza temporale ridotta.

Allegato 1

Tabella A1.1: Deformazioni delle combinazioni sismiche analizzate.

Tipologia di azione sismica in combinazione	Grado di vincolo alla base	Deformazioni con tutti i moduli chiusi	Deformazioni con metà moduli aperti	Deformazioni con tutti i moduli aperti
Statica equivalente con sisma parallelo allo scorrimento	Carrelli			
		Max: 369 mm	Max: 317 mm	Max: 21 mm
	Bipendoli			
		Max: 360 mm	Max: 310 mm	Max: 22 mm
	Cerniere			
		Max: 84 mm	Max: 31 mm	Max: 10 mm
	Incastri			
		Max: 14 mm	Max: 7 mm	Max: 5 mm
Statica equivalente con sisma perpendicolare allo scorrimento	Carrelli			
		Max: 28 mm	Max: 32 mm	Max: 32 mm
	Bipendoli			
		Max: 28 mm	Max: 32 mm	Max: 32 mm

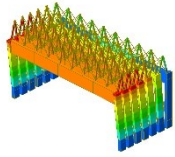
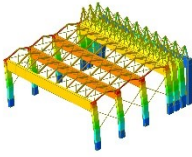
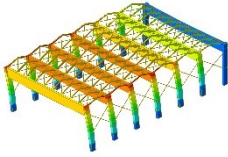
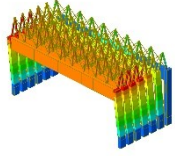
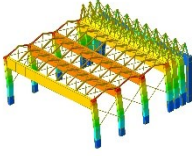
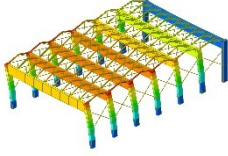
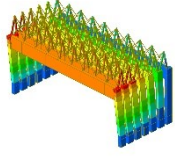
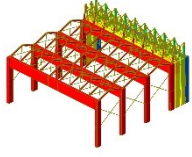
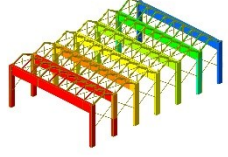
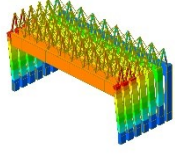
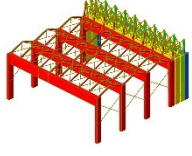
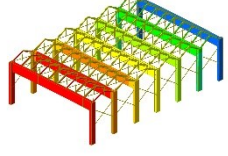
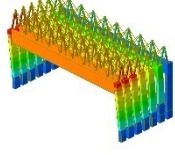
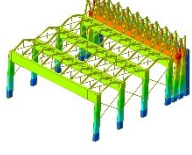
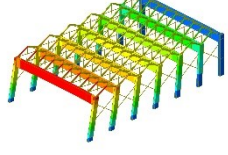
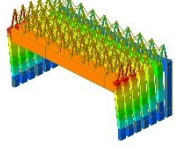
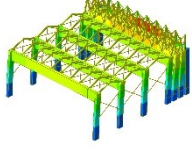
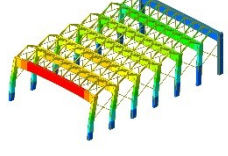
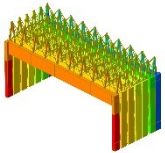

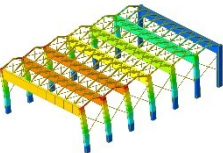
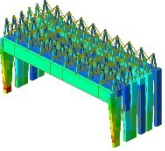
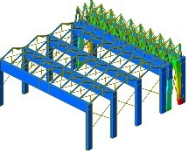
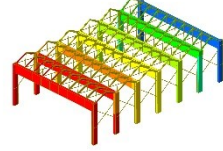
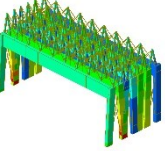
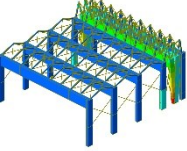
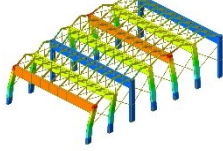
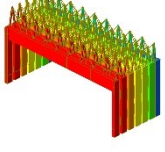

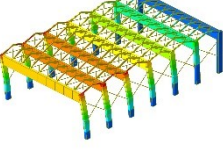
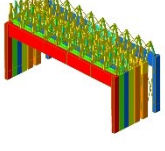
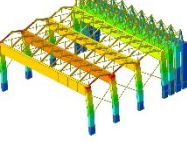
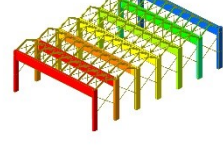
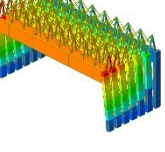
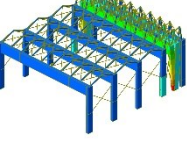
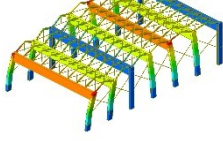
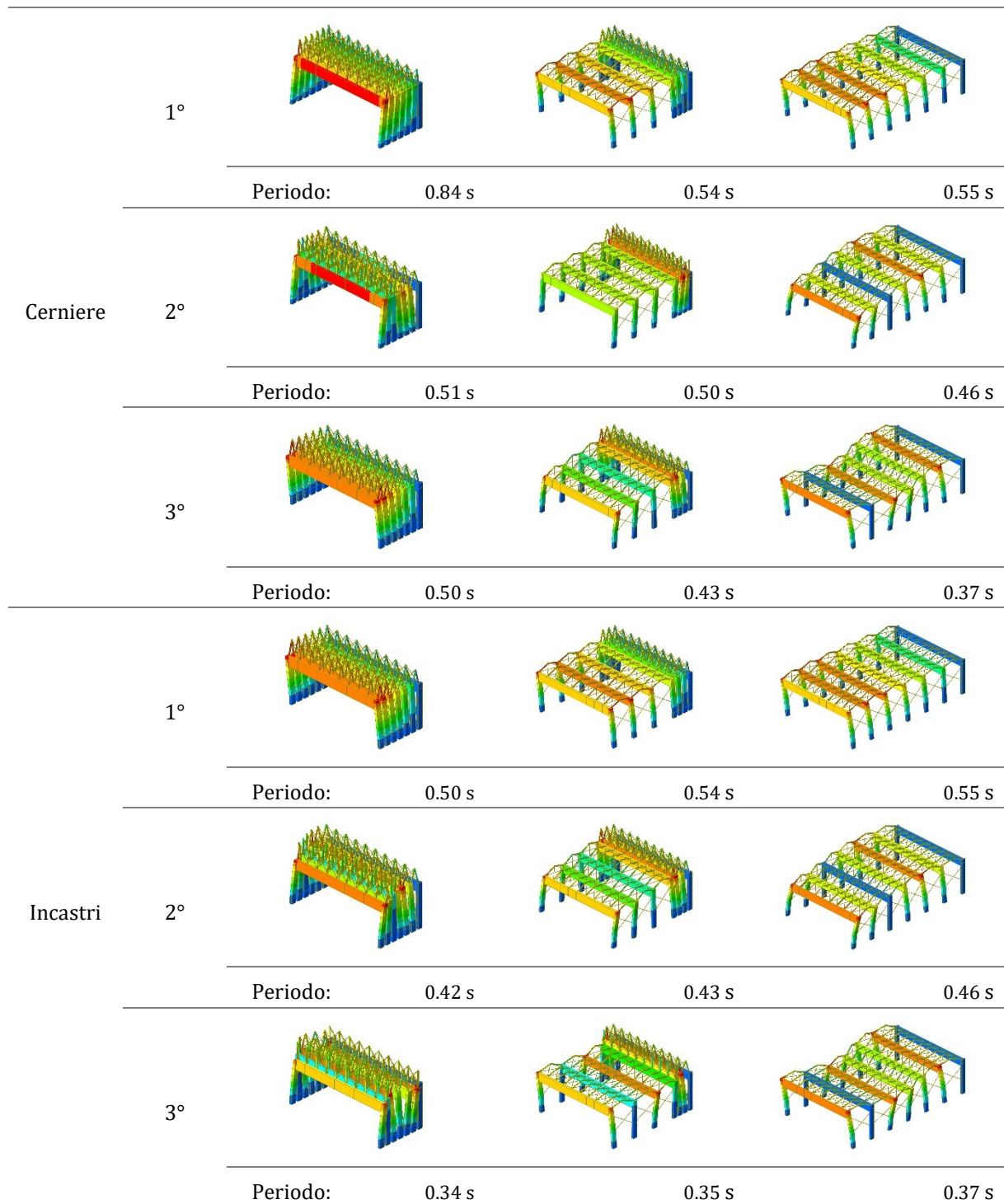
Statica equivalente con sisma perpendicolare allo scorrimento	Cerniere			
		Max: 28 mm	Max: 32 mm	Max: 32 mm
	Incastri			
		Max: 28 mm	Max: 32 mm	Max: 32 mm
Dinamica lineare su 10 modi di vibrare secondo CQC	Carrelli			
		Max: 49 mm	Max: 156 mm	Max: 49 mm
	Bipendoli			
		Max: 49 mm	Max: 153 mm	Max: 49 mm
	Cerniere			
		Max: 49 mm	Max: 56 mm	Max: 24 mm
	Incastri			
		Max: 49 mm	Max: 14 mm	Max: 10 mm

Tabella A1.2: Principali modi di vibrare per influenza nell'analisi dinamica.

Grado di vincolo	Modo di vibrare	Deformazioni relative con tutti i moduli chiusi	Deformazioni relative con metà moduli aperti	Deformazioni relative con tutti i moduli aperti		
Carrelli	1°					
		Periodo:	1.95 s	1.92 s	0.55 s	
		2°				
	Periodo:		0.82 s	0.60 s	0.53 s	
	3°					
		Periodo:	0.69 s	0.55 s	0.46 s	
		Bipendoli	1°			
	Periodo:			1.93 s	1.91 s	0.55 s
	2°					
Periodo:			0.69 s	0.54 s	0.53 s	
3°						
	Periodo:		0.50 s	0.53 s	0.46 s	



Bibliografia

- Ciriaco Salvatore, *Protoindustria, lavoro a domicilio e sviluppo economico nelle campagne venete in epoca moderna*, in Quaderni Storici, XVIII (1983): 57-80
- Borsi Franco, *Introduzione alla archeologia industriale*, Roma, Officina, 1978.
- Cerato Silvia, *Il progetto urbano secondo un approccio multidisciplinare: analisi e rifunzionalizzazione dell'area di un manufatto industriale lungo la Riviera del Brenta*, tesi di laurea magistrale, Padova, 2014-2015, Andrea Giordano relatore
- <https://www.treccani.it/enciclopedia/industria#lediliziaindustriale-1>
- Nigro E., Pustorino S., Cefarelli G., Princi P., *Progettazione di strutture in acciaio e composte acciaio-calcestruzzo in caso di incendio secondo gli Eurocodici e le norme tecniche per le costruzioni*, Milano, Hoepli Editore, 2009.
- <https://www.treccani.it/enciclopedia/prefabbricazione>
- James M. Moore, *Progettazione e layout degli impianti*, Milano, Franco Angeli, 1995.
- Simonetto Marco, *Relayout di una cella di lavoro. Il caso Caminetti Montegrappa*, tesi di laurea magistrale, Padova, 2016-2017, Fabio Sgarbossa relatore.
- Pareschi Arrigo, *Impianti industriali*, Bologna, Esculapio, 2007.
- Zambelli E., Pignataro M., *Le costruzioni prefabbricate: Guida alle progettazioni: Le guide di Modulo*, Milano, BE-MA editrice, 1986.
- Bianco Magda, *L'industria italiana*, Bologna, Il Mulino, 2003.
- Pinto Rosario, *Il Paesaggio industriale*, Nocera Superiore, Print Art Edizioni, 2016.
- Roberto Parisi, *Italia industriale 1861-2011. Vuoti e conflitti di un centocinquantesimo*, in Patrimonio Industriale, 08 (2011): p. 4
- Amatori Franco, *L'impresa pubblica in Italia*, in Patrimonio Industriale, 08 (2011): pp. 30-34
- Catterin Giuseppe, *La storia del lavoro in Veneto: le origini*, in Storia del lavoro in Veneto (2018): p. 1
- Catterin Giuseppe, *La storia del lavoro in Veneto: lo sviluppo*, in Storia del lavoro in Veneto (2018): p. 2
- Foscara Porchia, *Porto Marghera tra pubblico e privato*, in Patrimonio Industriale, 08 (2011): pp. 22-29
- Barbieri F., Negri A., *Archeologia industriale – Indagini sul territorio in Lombardia e in Veneto*, Milano, Unicopli, 1989.
- Catterin Giuseppe, *La storia del lavoro in Veneto: il recupero post bellico e lo sviluppo del "modello Veneto"*, in Storia del lavoro in Veneto (2018): p. 3
- De Angelini Anna, *L'industrializzazione diffusa nel veneto*, Milano, Franco Angeli libri, 1986, p. 37
- Roverato Giorgio, *L'industrializzazione diffusa. Storia dell'economia padovana 1923-2003*, Padova, Esedra, 2005.

- Roverato Giorgio, *Il modello veneto fra storia e futuro*, Padova, Il Poligrafo, 2008.
- De Angelini Anna, *L'industrializzazione diffusa nel veneto*, Milano, Franco Angeli libri, 1986.
- Guerretta Danilo, *Nell'industria veneta devastata dalla crisi un capannone su dieci è abbandonato*, in La Stampa, 09/03 (2019)
- Ferri V., Gastaldi F., *Le dismissioni degli immobili produttivi in Veneto. Gli equilibri instabili dell'economia, della finanza locale, della tassazione e il governo del territorio*, in Archivio di Studi Urbani e Regionali, (2021)
- Rapporti e bollettini statistici per gli anni 2018-20 disponibili nel sito della regione Veneto [al link: https://statistica.regione.veneto.it/banche_dati_economia_impres.jsp?scheda=b2](https://statistica.regione.veneto.it/banche_dati_economia_impres.jsp?scheda=b2)
- Toniolo Giandomenico, *Cent'anni di prefabbricazione in calcestruzzo*, Collegio CTE, 2004.
- Frateili Enzo, *Storia breve della prefabbricazione*, Trieste, Istituto di Architettura e Urbanistica, 1966.
- Bonfanti C., Toniolo G., *Strutture prefabbricate: catalogo delle tipologie esistenti*, Assbeton, 2007.
- *Associazione italiana prefabbricazione, Catalogo dei materiali e dei sistemi nuovi per l'edilizia e da prefabbricazione: 1961*, Abbiati, Milano, 1961.
- *Associazione italiana prefabbricazione, Catalogo dei materiali e dei sistemi nuovi per l'edilizia e da prefabbricazione: 1962*, AIP, Milano, 1962.
- *Associazione italiana prefabbricazione, Catalogo dei materiali e dei sistemi nuovi per l'edilizia e per la prefabbricazione: 1965*, AIP, Milano, 1965.
- *Associazione italiana prefabbricazione per l'edilizia industrializzata, Catalogo dei materiali e dei sistemi per l'edilizia industrializzata: 1971*, AIP, Milano, 1971.
- *Associazione italiana prefabbricazione per l'edilizia industrializzata, Catalogo dei prodotti per l'edilizia industrializzata*, AIP, Milano, 1976.
- *Associazione italiana prefabbricazione per l'edilizia industrializzata, Catalogo dei prodotti per l'edilizia industrializzata e delle normative italiane ed estere*, AIP, Milano, 1978.
- *Associazione italiana prefabbricazione per l'edilizia industrializzata, Repertorio 1980*, AIP, Milano, 1980.
- *Associazione italiana prefabbricazione per l'edilizia industrializzata, Repertorio dei prodotti per l'edilizia industrializzata, dei prodotti e delle imprese operanti nel campo dell'industrializzazione edilizia*, AIP, Milano, 1982.
- *Associazione italiana prefabbricazione per l'edilizia industrializzata, Repertorio 1984: prodotti per l'edilizia industrializzata; enti nazionali ed internazionali di ricerca, normazione, controllo, promozione e documentazione per l'edilizia*, AIP, Milano, 1984.
- *Mulitsch Sergio, Prefabbricare*, Tipografia Bertieri, Milano, 1958-1971.

- *Collegio dei tecnici della industrializzazione edilizia, La Prefabbricazione, Itec, Milano, 1965-1986.*
- *L'industria italiana del cemento, Siac, Roma, 1929-1997.*
- Micheletti Federico, *L'industria e le sue esigenze di spazio: dal plant-layout ad un catalogo di edilizia industriale*, Torino, Finpiemonte, 1984.
- Leieveld CM.J.L., *Adaptable Architecture, in Building stock activation (2007): pp. 245 – 252*
- Hunting Eric, *Adaptive Architecture, Collaborative Design, and the Evolution of Community, 2008*
- Novara Andrea, *Strategie e tecniche per un'architettura evolutiva*, tesi di laurea magistrale, Torino, 2017-2018, Alessandro Mazzotta relatore.
- Maryam G.A., *Toward a convergent model of flexibility in architecture*, in Journal of Architecture and Urbanism, 42 (2018): pp. 120 - 133
- Dorigati Giorgia, *Edifici adattivi per un'edilizia polifunzionale sostenibile. Analisi comparata di soluzioni costruttive moderne ed applicazione ad un caso studio*, tesi di laurea magistrale, Padova, 2018-2019, Umberto Turrini relatore.
- Schumacher M., Schaeffer O., Vogt M., *Move: Architecture in motion, dynamic components and elements*, Basilea, Birkhauser Architecture, 2010.
- <https://www.pavimentiindustriali.com/pavimento-industriale>
- <http://esse1.mi.ingv.it/>
- http://zonesismiche.mi.ingv.it/mappa_ps_apr04/consultazione_005.html
- <https://www.regione.veneto.it/web/sismica#:~:text=Classificazione%20sismica,dei%20comuni%20sismici%20del%20Veneto.>
- https://web.camera.it/cartellecomuni/leg15/RapportoAttivitaCommissioni/commissioni/allegati/08/08_all_dm_2008.pdf
- <https://geoapp.eu/parametrisismici2018/>
- http://manual.midasuser.com/EN_Common/Gen/855/index.htm
- http://manual.midasuser.com/EN_Common/Gen/796/Start/05_Load/01_Response_Spectrum_Analysis_Data/Response_Spectrum_Load_Cases.htm

Fonti iconografiche:

- Figura 1.1.1.1: <https://picturethepast.org.uk/image-library/image-details/poster/dchq001740/posterid/dchq001740.html>
- Figura 1.1.1.2: <https://www.centreforcities.org/blog/from-red-bricks-factories-to-glass-skyscrapers-how-the-geography-of-britains-exports-has-changed-since-1841/>
- Figura 1.1.2.1: <https://pixels.com/featured/ford-model-t-assembly-line-1920s-science-source.html>
- Figura 1.1.3.1: <http://quonset-hut.blogspot.com/2012/12/the-manning-portable-colonial-cottage.html>
- Figura 1.1.3.2: <http://designluminy.com/crystal-palace-1851-joseph-paxton-1803-1865/>

- Figura 1.3.1.1: https://www.cte-it.org/?jet_download=4863
- Figura 1.3.1.2: https://www.cte-it.org/?jet_download=4863
- Figura 1.3.1.3: https://www.cte-it.org/?jet_download=4863
- Figura 1.3.1.4: https://www.cte-it.org/?jet_download=4863
- Figura 1.3.1.5: https://www.cte-it.org/?jet_download=4863
- Figura 2.1.1: <https://henninglarsen.com/en/projects/0900-0999/0942-sdu-campus-kolding>
- Figura 2.1.2: <https://twitter.com/dezeen/status/621239023974096896?lang=ar-x-fm>
<https://divisare.com/projects/236638-aranguren-gallegos-fernando-alda-mercado-municipal-de-atarazanas>
<https://www.archdaily.com.br/br/01-131352/projeto-de-remodelacao-do-mercado-municipal-de-atarazanas-slash-aranguren-and-gallegos-arquitectos>
- Figura 2.1.3: <http://spacesofconflict.blogspot.com/2015/02/next-21-by-yositika-utida-in-osaka.html>
- Figura 2.1.4: <https://www.idealista.it/news/immobiliare/internazionale/2018/02/09/125254-brutalista-allesterno-sofisticato-allinterno-cosi-e-habitat-67>
<https://edilizia-in-un-click.starbuild.it/2018/03/habitat-67-di-montreal-canada.html>
<https://www.abitare.it/it/eventi/2017/08/02/habitat-67-moshe-safdie-mostra/>
- Figura 2.2.1: <https://www.milliyet.com.tr/emlak/cinli-mimardan-akil-almaz-bir-ev-domestic-transformer-63438>
- Figura 2.2.2: <https://www.infobuild.it/approfondimenti/the-shed-edificio-newyorkese-allungaraddoppia-spazio/>
- Figura 2.2.2.1: <https://www.area-arch.it/bubble-hirshhorn-museum-and-sculpture-garden-expansion/>
- Figura 2.2.2.2: https://www.iaacblog.com/programs/the_eden_project_a_garden_in_movement/
<https://www.pinterest.it/pin/96686723235666148/>
- Figura 4.7.2: <https://www.vivereverde.it/it/news-5/strutture-outdoor.html>
- Figura 4.7.3: <https://www.vivereverde.it/it/news-5/strutture-outdoor.html>
- Figura 4.7.4: <https://www.schiesaroserramenti.it/prodotti-industriali/>
- Figura 4.7.5: <http://www.coperture-telescopiche.net/>
- Figura 4.9.1.2: <https://www.greenretail.it/sgaravatti-group-compie-200-anni/>
- Figura 4.9.1.3: <https://www.albertani.com/case-in-legno-lamellare/utilizzo-legno-architetture-industriali/>
- Figura 4.9.1.4: https://cbs-cbt.com/multimedia/images/content/source/AMIOT_LOMBARD_ECOTIM_11H45_HD-30.jpg
- Figura 5.4.3.1: https://nsk.pulscen.ru/products/tal_elektricheskaya_tor_cd_g_p_16_0_t_12_m_87567849
- Figura 5.4.3.2: https://www.idroteck.eu/it/prodotti_costruzioni_oleodinamiche.html
- Figura 5.9.1: http://zonesismiche.mi.ingv.it/mappa_ps_apr04/veneto.html

Ringraziamenti

Un ringraziamento sentito al professore Umberto Turrini, per la completa disponibilità, esperienza e competenza messe a disposizione per la redazione della presente tesi. Grazie per la guida fornita in questi anni di formazione, e soprattutto per avermi trasmesso in questo breve tempo, seppur travagliato da lezioni a distanza e difficoltà, la passione per la materia.

Ringrazio allo stesso modo i correlatori, prof.ssa Faleschini e prof. Bertolazzi, per avermi indirizzato nel percorso corretto. Un sentito ringraziamento e tutti i collaboratori al progetto, in particolare al Sig. Enzo Bozza, alla dottoranda Giorgia Dorigati, ai professori Savino e Scotta, a Giovanni Marcolin e agli altri colleghi dello studio SPC di Padova, per il prezioso aiuto offerto in questo anno di lavoro.

Ringrazio anche tutte le persone le persone coinvolte dal progetto, in particolar modo l'Arch. Francesco Grassi e Nicola Genchi per l'accoglienza e la disponibilità durante lo svolgimento dei sopralluoghi nelle aziende.

Grazie a tutti gli amici, i compagni di studio e di lavoro che ho avuto modo di conoscere e con cui ho condiviso le esperienze che mi hanno aiutato, influenzato e che mi hanno aiutato a crescere nella persona che sono oggi.

Un ultimo ringraziamento, il più importante, alla mia famiglia, ai nonni, ai parenti e alle persone più care che mi hanno sostenuto e supportato con infinito affetto in ogni momento del mio intero percorso di studi.

A tutte queste persone dedico il mio lavoro di tesi e la mia più sincera gratitudine.