



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

**RIQUALIFICAZIONE DEL PATRIMONIO EDILIZIO ESISTENTE:
PROGETTAZIONE DI SISTEMI MODULARI IN XLAM A MOYA
(Castilla-La Mancha, Spagna)**

Candidata: Giulia Mutti

Relatrice: Prof.ssa Daniela Besana

Correlatrici: Prof.ssa Emma Barelles Vicente

Prof.ssa Maria Eugenia Milagro Torner Feltrer

A.A. 2024/2025

SOMMARIO

ABSTRACT.....	1
1. INTRODUZIONE.....	3
1.1. Definizione di “rigenerazione urbana”	3
1.2. Il contesto socioeconomico europeo.....	3
1.3. Analisi di casi studio e benchmarking: modelli di riferimento	5
1.4. Collaborazione accademica e fondi di rigenerazione in Spagna.....	7
2. ANALISI DEL CONTESTO	9
2.1 Inquadramento territoriale e urbano del sito di Moya.....	9
2.2 Evoluzione storica e degrado strutturale.....	13
2.3 Studio demografico come strumento per la definizione della proposta progettuale ..	17
2.4 Valutazione territoriale, economica e turistica.....	18
3. ANALISI DELL’ESISTENTE.....	19
3.1 Rilievo architettonico e fotografico	19
3.2 Stato di conservazione e materiali originari della cinta muraria.....	22
3.2.1 Malta di calce storica.....	23
3.2.2 Pietra calcarea locale	24
3.2.3 Rapporto tra malta e pietra nella muratura esistente	24
3.2.4 Terreno.....	26
4. IMPOSTAZIONE PROGETTUALE	28
4.1 Visione generale e approccio alla riqualificazione	28
4.2 Linee guida del progetto	28
4.3 Filosofia d’intervento sul borgo.....	29
4.4 Scelta strategica del volume distaccato.....	31
5. ANALISI ARCHITETTONICA	34
5.1 Scelta della destinazione d’uso	34
5.2 Configurazione esterna	34
5.3 Configurazione interna	36

6.	ANALISI TECNOLOGICA.....	43
6.1	Scelta materica: il legno XLAM.....	43
6.2	Prestazioni tecnologiche del sistema	45
6.2.1	Sostenibilità ambientale e analisi del ciclo di vita (LCA).....	45
6.2.2	Efficienza energetica e igrometria.....	46
6.2.3	Comportamento al fuoco: il fenomeno della carbonizzazione	46
6.2.4	Risposta sismica e duttilità dei giunti.....	46
6.2.5	Ottimizzazione dei tempi di cantiere e logistica.....	46
6.2.6	Durabilità e strategie di manutenzione	47
6.3	Produzione delle tavole.....	47
6.4	Stratigrafie	49
6.5	Ventilazione meccanica controllata (VMC).....	76
6.6	Trasmittanza.....	77
6.7	Analisi impiantistica	83
6.7.1	Fabbisogno termico	83
6.7.1.1	Dispersione termica per trasmissione	84
6.7.1.2	Dispersione per ventilazione.....	85
6.7.1.3	Guadagni termici	86
6.7.2	Pannelli radianti.....	88
6.7.3	Modellazione energetica.....	92
6.7.3.1	Software CE3X: metodologia e funzionamento	92
6.7.3.2	Sistemi impiantistici e integrazione rinnovabili	92
6.7.3.3	Sintesi e classificazione energetica.....	93
7.	ANALISI STRUTTURALE	94
7.1	Caratterizzazione fisico-meccanica del materiale legno.....	94
7.1.1	Resistenza a compressione	97
7.1.1.1	Compressione parallela alla fibratura	97
7.1.1.2	Compressione ortogonale alla fibratura	98

7.1.2	Resistenza a trazione	98
7.1.2.1	Trazione parallela alla fibratura	98
7.1.2.2	Trazione ortogonale alla fibratura.....	99
7.1.3	Resistenza a taglio	101
7.1.4	Resistenza a flessione	101
7.2	Dalla fibra alla superficie: XLAM come rivoluzione planare	102
7.3	Comportamento strutturale del pannello XLAM.....	103
7.3.1	L'elemento lastra	103
7.3.2	L'elemento piastra	106
7.3.3	L'elemento strutturale piano e la configurazione portante dell'edificio.....	107
7.3.4	Solette in legno massiccio	108
7.3.5	Parete in legno massiccio	110
7.4	Metodi di calcolo e Normative per gli elementi in CLT	111
7.4.1	Fondamenti metodologici per il dimensionamento	113
7.4.2	Analisi degli elementi strutturali soggetti a flessione.....	114
7.4.2.1	Verifica a flessione.....	115
7.4.2.2	Verifica a taglio.....	120
7.4.2.3	Pressione trasversale al piano del pannello.....	122
7.4.2.4	Verifica dello stato di servizio e calcolo delle deformazioni	123
7.4.3	Elementi di parete.....	126
7.4.3.1	Sollecitazioni a taglio nel piano della lastra	127
7.4.3.2	Sforzi assiali nel piano della lastra	130
7.4.3.3	Stabilità.....	132
7.5	Caso studio.....	134
7.5.1	Carichi permanenti e variabili degli elementi strutturali	134
7.5.1.1	Solaio interpiano	134
7.5.1.2	Solaio di copertura.....	136
7.5.1.3	Pareti verticali	136

7.5.2	Calcolo semplificato del solaio	137
7.5.2.1	Definizione dei parametri strutturali di riferimento del pannello	137
7.5.2.2	Verifica della capacità portante allo Stato Limite Ultimo (SLU).....	141
7.5.2.3	Verifica della deformabilità allo Stato Limite di Esercizio (SLE).....	144
7.5.2.4	Analisi del comfort vibrazionale (SLE).....	144
7.5.3	Analisi dei carichi.....	149
7.5.3.1	Elementi strutturali	149
7.5.3.2	Carico della neve	150
7.5.3.3	Azione del vento	152
7.5.3.4	Azione sismica.....	154
7.5.4	Combinazioni	160
7.5.5	Azioni ordinarie.....	162
7.5.5.1	Azioni assiali	162
7.5.5.2	Centro di massa.....	165
7.5.5.3	Forze orizzontali dovute al vento.....	166
7.5.5.4	Rigidezza delle pareti.....	167
7.5.5.5	Forze interne	169
7.5.6	Verifiche azioni statiche	171
7.5.6.1	Verifica a taglio e torsione	171
7.5.6.2	Verifica dei carichi assiali.....	172
7.5.6.3	Verifica a pressoflessione nel piano.....	174
7.5.6.4	Verifica a pressoflessione fuori piano.....	176
7.5.6.5	Verifica della stabilità	179
7.5.7	Forze statiche equivalenti sismiche	180
7.5.8	Eccentricità di piano	180
7.5.9	Sollecitazioni sismiche e combinazioni di carico.....	181
8.	Sistemi di connessione	185
8.1	Introduzione al comportamento strutturale delle connessioni	185

8.2	Lavorazioni di bordo e configurazioni geometriche	185
8.3	Tipologie di collegamento in funzione della sollecitazione.....	188
8.4	Collegamenti complanari e d'angolo.....	188
8.5	Sistemi di connessione a gambo cilindrico: viti e chiodi.....	189
8.6	Sistemi di connessione tramite piastre metalliche	194
8.7	Connessioni alla base: Hold-down.....	198
8.8	Sistemi di connessione puntuale ad alte prestazioni	199
8.9	Caso studio: dimensionamento dei collegamenti.....	200
8.9.1	Progettazione dei collegamenti di fondazione.....	200
8.9.1.1	Dimensionamento hold-down al piano terra.....	200
8.9.1.2	Verifica hold-down al piano terra	202
8.9.1.3	Dimensionamento angle brackets al piano terra	204
8.9.1.4	Verifica angle brackets al piano terra.....	206
8.9.2	Progettazione dei collegamenti interpiano	207
8.9.2.1	Dimensionamento hold-down al piano primo.....	207
8.9.2.2	Verifica hold-down al piano primo	209
8.9.2.3	Dimensionamento angle brackets al piano primo	210
8.9.2.4	Verifica angle brackets al piano primo.....	211
8.9.3	Progettazione delle connessioni puntuali	212
8.9.3.1	Collegamento complanare parete-parete.....	213
8.9.3.2	Collegamento ad angolo parete-parete	214
8.9.3.3	Collegamento parete-copertura.....	215
8.10	Resistenza al fuoco	219
9.	CONCLUSIONI.....	238
10.	ALLEGATI	242
11.	BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	293
11.1.	Quadro Normativo Spagnolo	293
11.2.	Quadro Normativo Europeo (Eurocodici e Norme EN/UNE).....	293

11.3.	Bibliografia tecnica.....	294
11.4.	Portali Istituzionali e ricerca territoriale	294
11.5.	Supporto tecnico e software.....	295
11.6.	Sistemi costruttivi e produttori consultati	295

ABSTRACT

Questa tesi si inserisce in un progetto reale e concreto, attualmente in fase di avviamento, coordinato dalla Universitat Politècnica de València in collaborazione con l'Università degli Studi di Pavia. Il lavoro non si configura, quindi, come un esercizio puramente teorico, ma come un contributo operativo che affronta un caso di studio reale, con definite implicazioni urbanistiche, architettoniche e socioeconomiche. L'obiettivo è fornire una proposta di intervento coerente e articolata, nella consapevolezza che le scelte elaborate potranno assumere rilevanza nei futuri sviluppi del progetto, sia in termini di implementazione fisica che di approfondimento di strategie di rigenerazione sostenibile del territorio.

Nello specifico, si affronta il tema della riqualificazione strutturale e architettonica del sito storico rurale di Moya, località situata nella provincia autonoma di Castilla-La-Mancha (in Spagna), attraverso l'integrazione di sistemi costruttivi in legno all'interno di preesistenze in muratura lapidea.

Nella prima parte, lo studio si concentra sull'analisi del contesto territoriale e demografico, fondamentale per definire una strategia di riattivazione sociale. Viene approfondito lo stato conservativo del patrimonio edilizio esistente, mettendo in evidenza il ruolo centrale della pietra come materiale originario, la cui elevata durabilità e ampia disponibilità locale hanno determinato la persistenza delle strutture murarie tuttora visibili, nonostante il collasso della maggior parte degli elementi strutturali principali.

La seconda parte riguarda la progettazione architettonica e tecnologica dell'intervento. Si definisce un sistema costruttivo modulare in legno XLAM ottimizzato per la destinazione d'uso ricettiva (albergo diffuso). La configurazione planimetrica è studiata per garantire la massima flessibilità distributiva e l'adattabilità alle esigenze derivanti dallo studio demografico precedente. La ricerca si concentra sulla definizione di stratigrafie a secco ad alta efficienza, selezionando materiali da produttori locali e pacchetti isolanti biocompatibili per garantire elevati sfasamenti termici e prestazioni acustiche elevate. Particolare rilievo è dato al dettaglio dei nodi tecnologici, incorporando intercapedini ventilate per il controllo termo-igrometrico e l'eliminazione dei ponti termici.

La terza parte analizza il comportamento strutturale del sistema XLAM progettato. La configurazione dei nodi e dei collegamenti garantisce l'efficacia del comportamento scatolare dell'intero organismo strutturale, garantendo il pieno rispetto degli Eurocodici e del CTE spagnolo. Nello specifico, si è proceduto alla verifica alle azioni ordinarie, risultate più gravose

Riqualificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya,
(Castilla-La Mancha, Spagna)

rispetto a quelle sismiche per il sito in esame. Il focus della trattazione include il dimensionamento analitico delle connessioni strutturali, elementi chiave per garantire la continuità statica dell'edificio.

In conclusione, viene dimostrato come l'integrazione tra diagnostica dell'esistente e progettazione modulare in legno possa costituire uno strumento efficiente per il recupero del patrimonio storico dei contesti storici e rurali, nel rispetto delle identità locali e delle preesistenze materiali, coniugando sicurezza strutturale, conservazione materica e sostenibilità ambientale.

1. INTRODUZIONE

1.1. Definizione di “rigenerazione urbana”

Il concetto di rigenerazione urbana si è evoluto nel tempo, superando la dimensione puramente conservativa del restauro o quella funzionale della ristrutturazione edilizia, per approdare a una visione multidisciplinare e integrata. Secondo l'Istituto dell'Enciclopedia Italiana, essa si configura come un *«processo di recupero e trasformazione del patrimonio esistente volto a migliorarne abitabilità, sicurezza ed efficienza energetica [andando] oltre la ristrutturazione per dare nuova vita a edifici e aree, incrementandone il valore»* (Treccani, 2026).

Nel quadro della presente trattazione, la rigenerazione urbana non viene intesa solo come ripristino fisico, ma come una pratica di intervento che agisce su tessuti edilizi storici o degradati. L'obiettivo primario è l'elevazione delle prestazioni strutturali e funzionali degli elementi esistenti, in modo da non compromettere la memoria materica e l'identità culturale del sito.

In contesti rurali caratterizzati da un avanzato stato di abbandono, la rigenerazione assume una valenza strategica: essa mira a trasformare la rovina da elemento inerte a risorsa attiva.

Tale approccio permette di perseguire obiettivi tecnici fondamentali:

- Stabilità e funzionalità statica;
- Efficientamento energetico, grazie all'ottimizzazione del comportamento termigrometrico dell'involucro;
- Compatibilità architettonica, garantendo il rispetto dei caratteri tipologici del paesaggio.

L'intervento proposto, dunque, supera la logica della sola riparazione a favore di una modalità che coniuga una rigorosa diagnostica conservativa con l'innovazione tecnologica, sulla base dei principi di reversibilità e sostenibilità ambientale, pilastri necessari per il recupero dei borghi del XXI secolo.

1.2. Il contesto socioeconomico europeo

Attualmente, i territori rurali europei attraversano una crisi strutturale senza precedenti, definita dalla convergenza di tre fenomeni critici: lo spopolamento cronico, il degrado del patrimonio costruito e una crescente vulnerabilità climatica. Tali dinamiche rappresentano un'emergenza demografica, ma anche una sfida ingegneristica e sociale che richiede strategie di intervento urgenti e integrate.

Secondo le rilevazioni Eurostat (2003-2023), le aree rurali dell'Unione Europea hanno registrato un calo demografico medio compreso tra il 10% e il 15%. Il fenomeno assume connotati drammatici nelle regioni interne della penisola iberica, come la Castilla-La Mancha, dove si è assistito ad una contrazione della popolazione del 14.2% (passando da circa 2.1 a 1.8 milioni di abitanti). Questo esodo è alimentato da un progressivo invecchiamento demografico (con un'età media che supera i 50 anni) e da una cronica carenza di infrastrutture e servizi, a fronte di una polarizzazione urbana che vede le grandi metropoli assorbire il 75% della crescita demografica comunitaria.

La conseguenza diretta di questo fenomeno è l'abbandono sistematico del patrimonio edilizio: si stima che tra Spagna e Italia vi siano oltre 700.000 edifici rurali dismessi. La mancanza di manutenzione ordinaria, unita all'esposizione prolungata agli agenti atmosferici e agli eventi sismici, accelera il degrado strutturale di borghi storici. A ciò si aggiunge l'impatto dei cambiamenti climatici; il rapporto IPCC (2022) evidenzia come i piccoli centri, spesso privi di reti resilienti, siano i più esposti a danni strutturali causati da eventi meteorologici estremi, con costi annui stimati per l'UE di circa 5 miliardi di euro.

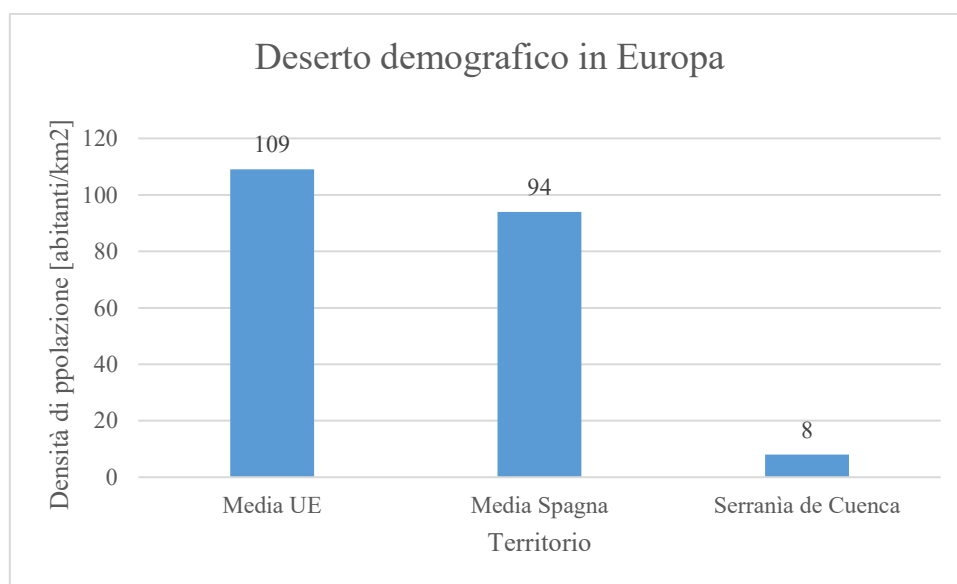


Figura 1: Istogramma che correla i territori considerati e la corrispondente densità abitativa ad oggi, su Excel

In risposta a questo scenario, le politiche comunitarie hanno individuato nella rigenerazione rurale un pilastro per lo sviluppo sostenibile del prossimo decennio:

- La Politica Agricola Comune (PAC 2023-2027): con uno stanziamento di 387 miliardi di euro, promuove il recupero edilizio come leva per l'economia circolare, incentivando il riutilizzo dei volumi esistenti e la riduzione dei rifiuti da demolizione (con l'obiettivo ambizioso del -50% entro il 2030);

Riqualficazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya, (Castilla-La Mancha, Spagna)

- Il Green Deal Europeo e la Direttiva EPBD 2024: impongono una decisa accelerazione sul retrofit energetico del patrimonio esistente. L'obiettivo è la trasformazione degli edifici in strutture a zero emissioni (NZEB), favorendo l'impiego di materiali a bassa impronta di carbonio e tecnologie prefabbricate.

In questo quadro normativo e socioeconomico si inserisce la presente proposta progettuale: il recupero del borgo di Moya rappresenta un progetto di conservazione architettonica e una strategia di resilienza territoriale volta a trasformare un patrimonio in disuso in un motore di sviluppo sostenibile e sociale.

1.3. Analisi di casi studio e benchmarking: modelli di riferimento

L'analisi dei casi studio mira a validare la fattibilità della proposta progettuale di questo lavoro di tesi, isolando per ogni esempio un aspetto tecnico o gestionale che verrà poi approfondito nella presente trattazione. Ciascun esempio è stato scelto per la sua specifica attinenza ad uno o più pilastri del progetto.

Si riportano, quindi, alcuni interventi che hanno declinato con successo i temi del recupero leggero, della rifunzionalizzazione turistica e dell'integrazione di materiali innovativi nel patrimonio storico.

- Santo Stefano di Sessanio (L'Aquila, Italia): il modello dell'albergo diffuso

L'intervento di recupero di questo borgo abruzzese rappresenta un riferimento per la strategia di rifunzionalizzazione. Abbandonato dopo il terremoto del 2009, è stato rigenerato a partire dal 2010 da un'iniziativa privata di Daniele Kihlgren, imprenditore-filantropo definito spesso "pioniere dell'albergo diffuso" grazie a questo progetto: attraverso il recupero di case in pietra con integrazioni leggere in legno e malte naturali, è nato un albergo diffuso che ha triplicato la popolazione residente (da 100 a oltre 300 abitanti) e generato 50 posti di lavoro, attirando 20.000 turisti annui e rilanciando l'economia locale.

Il progetto ha dimostrato come la trasformazione di unità abitative dismesse in una struttura ricettiva possa innescare una rinascita economica e sociale senza alterare l'immagine storica del luogo.

- Casa de los Arcos (Vilamaniscle, Spagna): l'integrazione legno-pietra

Il progetto nasce dal recupero di una piccola rovina in pietra nel cuore dell'*Empordà*, vicino a Girona.

Riqualificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya, (Castilla-La Mancha, Spagna)

L'idea progettuale è stata quella di trattare le vecchie murature non più come elementi portanti per i nuovi solai, ma come un guscio architettonico: all'interno delle mura originali è stata inserita una struttura leggera in legno che sostiene i nuovi carichi verticali. La nuova struttura non spinge lateralmente sulle vecchie pareti (spesso fuori piombo o fragili), ma si appoggia su una propria fondazione o su cordoli interni, lasciando un'intercapedine che permette la ventilazione naturale delle murature. La pietra grezza e irregolare viene mantenuta intatta, preservando l'immagine storica del borgo e garantendo una grande inerzia termica.

Essendo situata in un borgo dai vicoli stretti, la Casa de los Arcos ha beneficiato della costruzione a secco.

➤ Progetto Geroda (Baviera, Germania): modularità e logistica di cantiere

Il progetto, promosso dal Ministero dell'Edilizia bavarese, nasce per dare una seconda vita ai grandi fienili (*scheunen*) dei centri storici tedeschi, spesso abbandonati perché troppo grandi e costosi da riscaldare.

Il concept è "*Haus-im-Haus*" ("Casa nella Casa"): invece di ristrutturare l'intero fienile (disperdendo calore e richiedendo enormi rinforzi strutturali), si inseriscono dei moduli in legno autosufficienti all'interno del volume esistente.

La vera innovazione di Geroda sta nel metodo di assemblaggio: i vicoli dei borghi medievali non permettono il passaggio di grandi autoarticolati o gru di enormi dimensioni; i moduli non arrivano già montati (troppo ingombranti), ma vengono progettati come un kit di montaggio.

I pannelli hanno dimensioni studiate per essere trasportati su piccoli mezzi cingolati o furgoni compatti. L'uso di connessioni metalliche rapide permette di assemblare la struttura all'interno del fienile senza getti di cemento, riducendo l'area di cantiere e il rumore. Se nel corso degli anni le esigenze dovessero cambiare, il modulo può essere smontato senza danneggiare l'edificio storico originale.

L'esperienza del progetto Geroda in Baviera conferma l'efficacia della modularità lignea nel superamento dei vincoli logistici propri dei tessuti storici consolidati.

➤ Recupero di borghi in Galizia (Spagna): soluzioni per zone ad *Espana Vacuada*

Il recupero in Galizia ha iniziato a usare massicciamente il legno (spesso *Eucalyptus Globulus* o *Pino Galiziano*) trasformato in XLAM o legno lamellare, permettendo in diverse aree di raggiungere standard NZEB (Nearly Zero Energy Building) con costi contenuti. Questi interventi puntano sulla sostenibilità della filiera corta e sulla reversibilità delle connessioni, e sono progetti trainati dai fondi del Piano di Recupero, Trasformazione e Resilienza (PRTR) spagnolo.

1.4. Collaborazione accademica e fondi di rigenerazione in Spagna

La presente tesi si inserisce in un solido quadro di cooperazione accademica internazionale, frutto di una collaborazione tra l'Università degli Studi di Pavia e l'Universitat Politècnica de València. La sfida è lavorare sulla *España Vacuada*, trovando nel borgo di Moya un caso studio emblematico per complessità storica e criticità demografica.

L'obiettivo operativo della ricerca è la formulazione di una proposta concreta di recupero per il sito di Moya, ufficialmente classificato come comune ad "estremo spopolamento". L'urgenza dell'intervento è dettata non solo dalla necessità di preservare un patrimonio monumentale in rapido deterioramento, ma anche dalla possibilità di intercettare gli ingenti fondi stanziati dal governo.

In Spagna, il quadro degli incentivi è particolarmente ricco in questo momento storico, grazie alla convergenza tra i fondi strutturali europei e le politiche nazionali spagnole.

- Fondi europei: il principale motore è il Piano di Recupero, Trasformazione e Resilienza (PRTR) spagnolo, alimentato dai fondi NextGenerationEU.
 - Programma PIREP (*Plan de Impulso a la Rehabilitación de Edificios Públicos*): fondo specifico per la riqualficazione sostenibile di edifici pubblici in comuni piccoli o in zone a rischio spopolamento, finanziando interventi che riducono il consumo di energia primaria non rinnovabile di almeno il 30%;
 - Componente 2 (C2): focus sulla ristrutturazione abitativa e rigenerazione urbana, incentivando l'uso di materiali a bassa impronta di carbonio e l'integrazione di energie rinnovabili.
- Politica Agricola Comune (PAC) e Programma LEADER: la Galizia e la Castilla-La Mancha utilizzano massicciamente i fondi LEADER gestiti dai Gruppi di Azione Locale (GAL). Questi incentivi non finanziano solo l'agricoltura, ma anche la creazione di infrastrutture turistiche e il recupero del patrimonio architettonico rurale.

Inoltre, Moya, essendo classificata come zona ad estremo spopolamento, ha accesso a intensità di aiuto più elevate, che possono coprire una quota significativa dei costi di investimento.
- Incentivi Nazionali Spagnoli: il Ministero per la Transizione Ecologica e la Sfida Demografica (*MITECO*) ha attivato linee di credito specifiche:

Riqualificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya,
(Castilla-La Mancha, Spagna)

- Programma DUS 5000: destinato a comuni con meno di 5.000 abitanti, finanzia progetti di energia pulita, che includono l'efficienza energetica dell'involucro edilizio;
 - Bandi per la bioeconomia forestale: esistono sussidi per progetti che utilizzano legno certificato (PEFC o FSC) proveniente da foreste gestite in modo sostenibile, promuovendo la filiera corta.
- Agevolazioni regionali e fiscali:
- Deduzioni IRPF: in Spagna, i proprietari che realizzano opere di riabilitazione energetica possono detrarre tra il 20% e il 60% delle spese dalla dichiarazione dei redditi, a seconda del risparmio energetico ottenuto;
 - Bonus per giovani e imprenditori rurali: contributi a fondo perduto per chi avvia attività di turismo rurale o co-working in borghi abbandonati, coprendo i costi di adeguamento tecnologico degli edifici.

2. ANALISI DEL CONTESTO

2.1 Inquadramento territoriale e urbano del sito di Moya

Il borgo di Moya è un municipio della provincia di Cuenca, situato nella parte nord-orientale della *Comunidad Autónoma di Castilla-La Mancha*, all'interno della regione montuosa della *Serranía Baja*. Il nucleo storico occupa un altopiano roccioso di natura calcarea a circa 1150 m di quota, dominante l'alta valle del Turia e un'ampia parte di territorio al confine con le attuali province di Teruel (Aragón) e Valencia (*Comunidad Valenciana*), corrispondenti ai regni storici di Castilla, Aragón e Valencia.

Proprio per questo ruolo di controllo dei confini è stata definita spesso *llave de Reinos*, cioè *Chiave dei Regni*, in quanto punto di frontiera e di passaggio tra i tre ambiti politici.

Morfologicamente, il territorio comunale si caratterizza per un'alternanza di rilievi collinari e piccoli altipiani con valli fluviali legate al corso del Turia e ai suoi affluenti. L'uso del suolo è prevalentemente agro-pastorale, con boschi di latifoglie e conifere, e una rete di insediamenti minori e case rurali sparse. Il clima di tipo continentale-mediterraneo (con inverni freddi ed estati relativamente secche) accentua il carattere del territorio come interno e marginale rispetto alle coste mediterranee, pur trovandosi ad una distanza relativamente ridotta da Valencia.

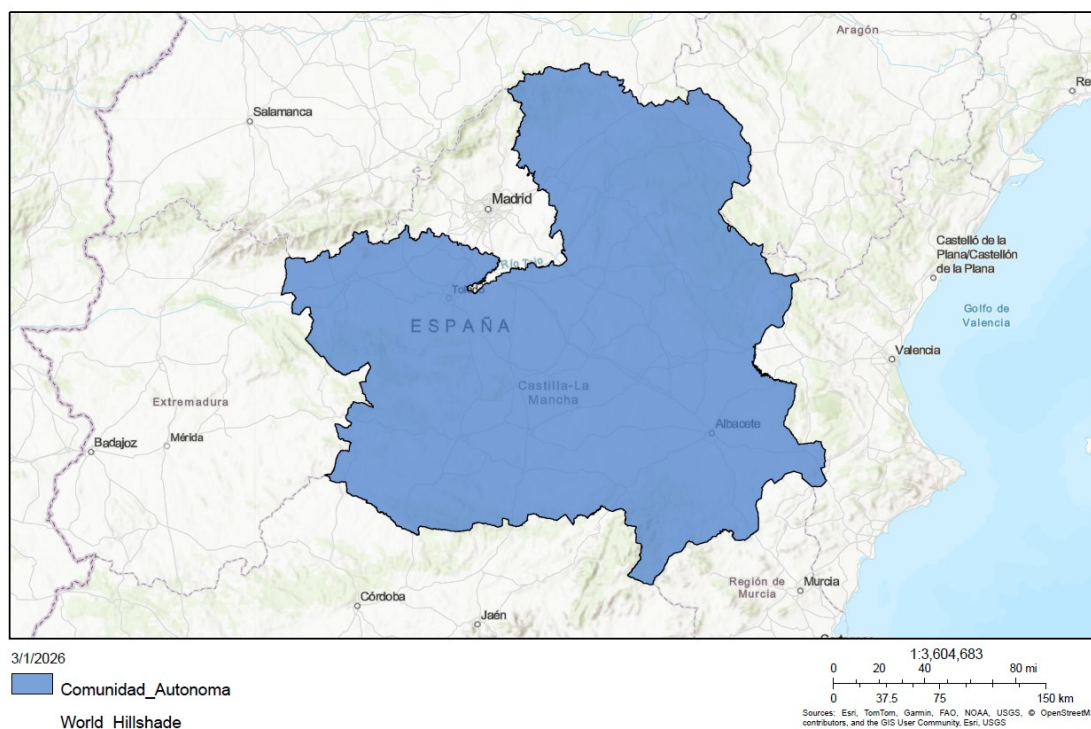


Figura 2: Mappa della provincia autonoma di La Cuenca, Spagna

Riquilificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya, (Castilla-La Mancha, Spagna)



Figura 3: Mappa con indicazione della posizione di Moya: (a) nella Penisola spagnola, (b) nella Comunità autonoma di Castilla-La Mancha








Dal punto di vista urbano, l'abitato storico si configura come un centro fortificato compatto, il cui sviluppo è stato fortemente condizionato dalla topografia del sito. La rete viaria presenta un andamento irregolare, adattato alla morfologia dell'altopiano, mentre il tessuto edilizio risulta denso e continuo, con edifici addossati e lotti di dimensioni contenute. L'impianto urbano è delimitato da un sistema difensivo articolato, costituito da mura perimetrali, torri e accessi controllati, che definiscono il limite tra spazio costruito e territorio aperto.



Figura 4: Vista dall'alto satellitare del borgo storico di Moya



RELIGIUS BUILDINGS

-  Convent of the Conceptionist Nuns (1)
-  Church of Santa Maria la Mayor (2)
-  Church of San Bartolomé (3)
-  Church of Trinidad (4)
-  Church of San Pedro (5)
-  Church of San Juan (6)
-  Church of San Miguel (7)

CIVIL AND MILITARY BUILDINGS

-  Hospital Madre de Dios (1)
-  Cemetery (2)
-  Town Hall (3)
-  Castle (4)
-  Villa Gate (5)
-  San Diego Gate (6)
-  San Juan Gate (7)
-  "De la Calzadilla" Gate (8)
-  "La Corachara" (9)
-  "La Albasara" (10)
-  Corregido's House (11)
-  The Drum "La Picota" (12)
-  Carros Gate (13)
-  San Francisco Gate or False Gate (14)
-  Ojos Gate (15)

Hollow icon – Building no longer extant
 Filled icon – Extant building

RESIDENCIAL STREETS OF THE VILLAGE





-  Residential streets – Pedestrian access
-  Access to village – Vehicles access
-  Medieval city wall – II Enclosure of the wall
-  Medieval city wall – III Enclosure of the wall

Figura 5: Planimetria del borgo fortificato, con indicazione delle costruzioni ancora esistenti, parti non più presenti, rete delle strade residenziali, accessi pedonali e veicolari al villaggio (elaborazione a cura del Politecnico di Valencia)

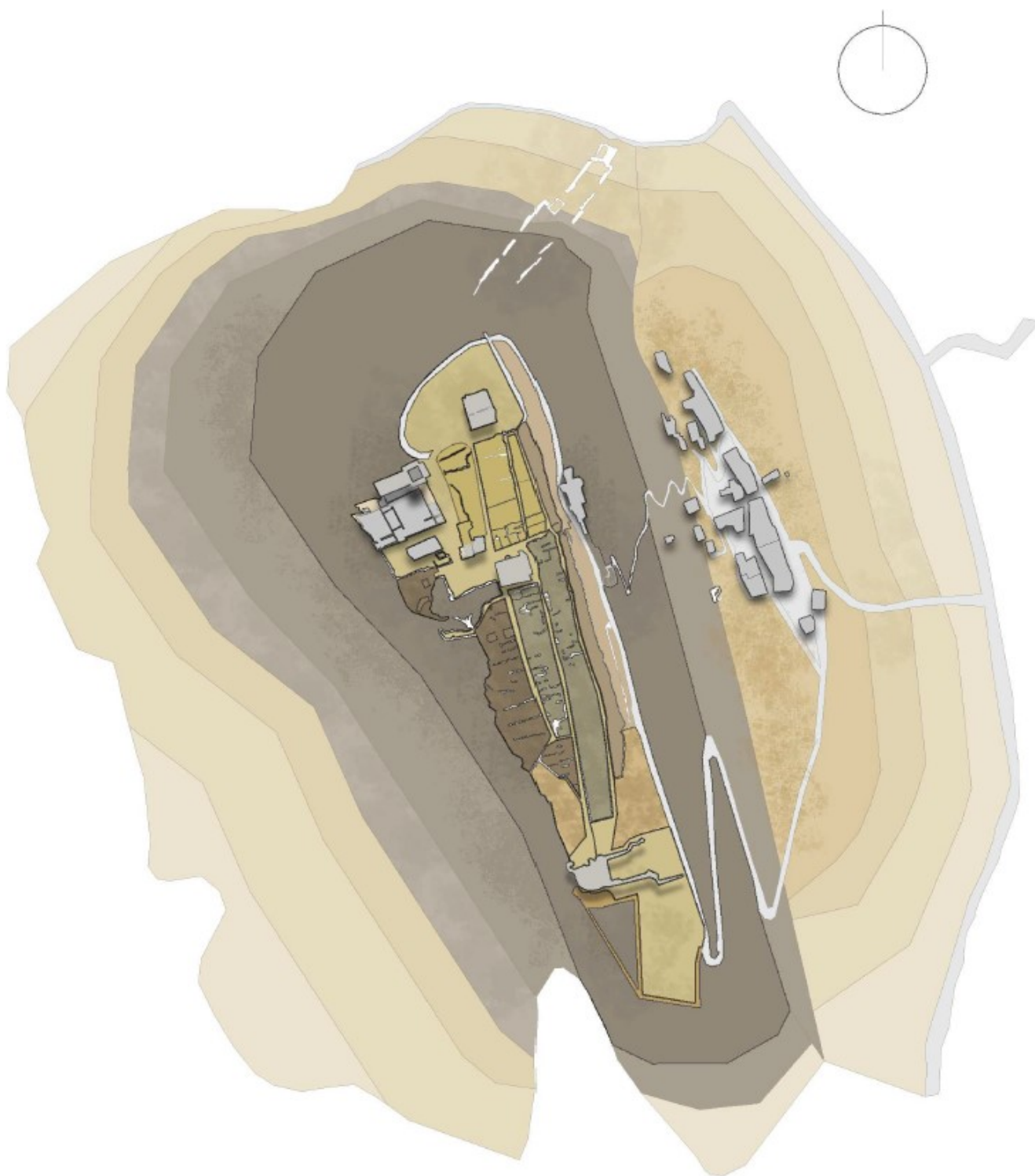


Figura 6: Masterplan - rilievo dello stato di fatto, inquadramento generale dell'area d'intervento, su Autocad e Photoshop (elaborazione a cura dell'autrice)

2.2 Evoluzione storica e degrado strutturale

L'insediamento storico del complesso, attestato già in epoca islamica come struttura fortificata, venne definitivamente incorporato nel sistema territoriale cristiano nel 1177, assumendo nei secoli successivi un ruolo strategico come capoluogo del *Señorío de Moya*. Tra il XIII e il XV secolo la città conobbe una fase di intensa edificazione, caratterizzata dalla realizzazione di un sistema difensivo continuo e di un tessuto residenziale compatto; il costruito è stato prevalentemente realizzato con murature portanti in pietra locale, disposte in apparecchi irregolari e legate con malta di calce aerea, secondo le tecniche tradizionali medievali dell'area.

La fase di massimo sviluppo urbano è collocabile tra il basso Medioevo e l'Età Moderna iniziale, quando la città murata presentava edifici residenziali addossati alle mura o organizzati lungo assi viari principali. L'abbondante disponibilità di materiale lapideo in situ, unita alle elevate esigenze di durabilità e resistenza meccanica richieste in un contesto fortificato, determinò l'adozione generalizzata della pietra come materiale strutturale primario, mentre gli elementi secondari (solai, coperture, infissi e tramezzature interne) erano realizzati in legno e materiali a bassa durabilità. La tessitura muraria è generalmente irregolare, con elementi lapidei di dimensioni medio-piccole, sbizzati sommariamente e disposti in corsi non regolari. In molti casi si osserva una muratura di tipo a sacco, costituita da due paramenti esterni in pietra e un riempimento interno di pietrame minuto e malta. La malta utilizzata è una malta di calce, con presenza di inerti locali.

A partire dal XVI secolo, la progressiva perdita della funzione militare e amministrativa del centro determinò un rallentamento delle attività costruttive e manutentive; si arrivò al vero e proprio declino urbano nel XVIII secolo con la fondazione di un nuovo insediamento in posizione più accessibile e funzionale alle mutate esigenze socioeconomiche. L'abbandono graduale della città murata comportò la cessazione delle operazioni di manutenzione ordinaria e straordinaria degli edifici, innescando processi di degrado fisico e strutturale riconducibili principalmente all'azione degli agenti atmosferici e alla vulnerabilità intrinseca delle componenti non lapidee. In assenza di coperture efficienti, le infiltrazioni d'acqua hanno accelerato il deterioramento delle strutture lignee, provocando il collasso dei solai e delle capriate di copertura; la perdita di tali elementi orizzontali ha conseguentemente compromesso il comportamento scatolare degli edifici, favorendo l'insorgenza di meccanismi di ribaltamento e dissesto delle murature perimetrali.

Le murature in pietra, pur essendo caratterizzate da una buona resistenza a compressione, risultano particolarmente sensibili alla perdita di vincoli e alla disgregazione della malta di calce, fenomeni aggravati dai cicli di gelo-disgelo e dall'azione dilavante delle acque meteoriche. Tuttavia, la maggiore durabilità del materiale lapideo rispetto agli elementi lignei spiega la persistenza, fino allo stato attuale, di porzioni murarie in elevazione, spesso conservate per più

piani: questo restituisce un'immagine di rovina “parziale”, nella quale sopravvive la componente strutturale primaria mentre risultano completamente scomparsi gli elementi di completamento e di chiusura, realizzati presumibilmente con materiali a bassa durabilità. La presenza originaria di tali elementi è deducibile dalle tracce murarie, quali alloggiamenti di travi, riseghe e bucaure. Molte murature risultano ancora in elevazione proprio perché sollecitate prevalentemente a compressione, mentre il collasso si è manifestato attraverso meccanismi di instabilità fuori piano, ribaltamenti e perdita di ammorsamenti.

L'attuale stato di rovina, nella quale si riconoscono i muri nonostante siano scomparsi gli spazi abitabili, è quindi direttamente legato alle caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali impiegati e alla loro diversa durabilità nel tempo. Moya, definibile come “paese fantasma”, non è pertanto il risultato di eventi distruttivi improvvisi, bensì di un processo di collasso progressivo e differenziato, direttamente riconducibile alle caratteristiche meccaniche e di durabilità dei materiali impiegati e alla mancanza di manutenzione nel lungo periodo. Tale condizione rende il sito un caso di studio di particolare interesse per l'analisi del comportamento nel tempo delle murature storiche in pietra e dei meccanismi di degrado e dissesto degli edifici tradizionali in contesto di abbandono.



Figura 7: Veduta panoramica del borgo fortificato di Moya arroccato sul rilievo roccioso, con il nucleo abitato attuale ai piedi della collina



Figura 8: Veduta aerea del nucleo sommitale di Moya, affacciato su paesaggio agricolo e pianura circostante



Figura 9: Veduta del crinale sommitale di Moya con il percorso pedonale attrezzato che conduce alle rovine del borgo fortificato e agli edifici religiosi conservati



Figura 10: Percorso di accesso alla cortina muraria sommitale di Moya con i resti del corpo principale del castello

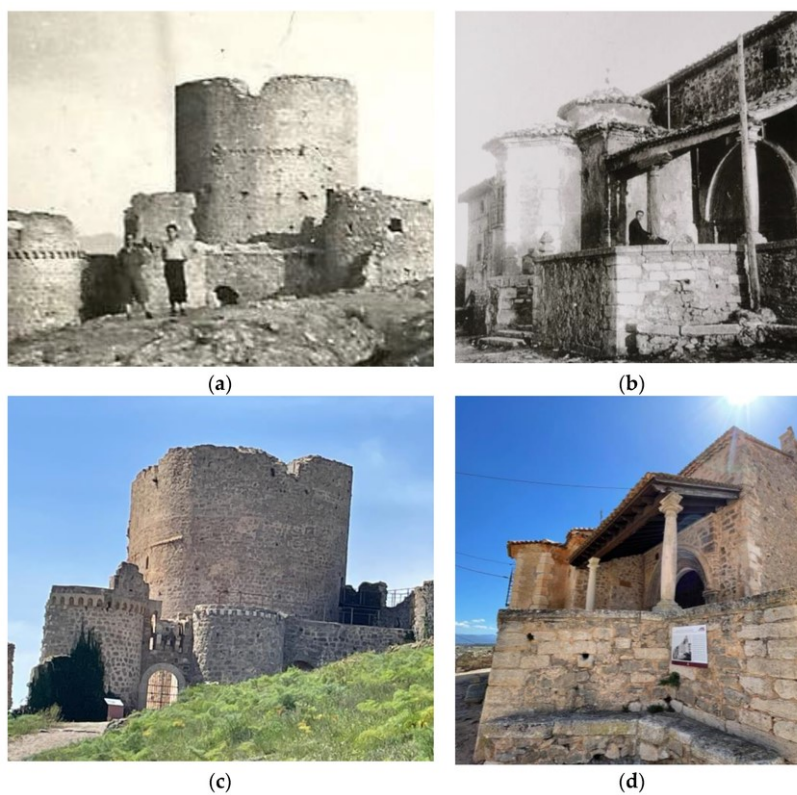


Figura 11: Sequenza di immagini storiche e contemporanee dei principali monumenti di Moya: in alto (a-b) fotografie d'epoca della torre del castello e del portico della chiesa; in basso (c-d) le stesse architetture nello stato attuale

2.3 Studio demografico come strumento per la definizione della proposta progettuale

L'indagine demografica sul borgo di Moya e sui suoi dintorni costituisce uno strumento fondamentale per comprendere le dinamiche sociali, le criticità esistenti e per definire le destinazioni d'uso più adeguate.

L'elenco ufficiale dei *Municipios en situación de despoblación* è una delle fonti più aggiornate e complete, predisposto dalla *Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha* per l'applicazione delle deduzioni IRPF in zone rurali (*Portal Tributario*, ult. agg. 2024).

In tale elenco, la classificazione dei municipi è stata fatta in funzione dell'intensità dei processi di spopolamento e del grado di ruralità, con l'obiettivo di orientare strumenti fiscali e politiche pubbliche di riequilibrio territoriale. Questo permette di distinguere i contesti urbani da quelli periurbani e rurali, e, tra questi ultimi, di riconoscere situazioni di rischio demografico.

Per ciascun comune sono riportati: il nome, la provincia, il codice INE, la classificazione di zona e la percentuale di deduzione fiscale applicabile per la residenza abituale in zona rurale ai sensi dell'art. 12 bis. Tale documento consente di integrare informazioni demografiche, economiche e funzionali, superando la semplice dicotomia urbano/rurale e restituendo la complessità della geografia interna.

In questo quadro, il comune di Moya viene inserito tra i territori caratterizzati da *extrema despoblación* con il codice INE 16135. Ciò evidenzia che il comune rientra nella fascia più critica di spopolamento, caratterizzata da bassa densità abitativa e forti limiti nella capacità di attrazione e trattenimento della popolazione residente.

A tale categoria corrisponde una deduzione fiscale del 25% per la residenza abituale in zona rurale, che rappresenta il livello massimo di agevolazione previsto dalla normativa regionale e segnala il riconoscimento istituzionale della fragilità territoriale di Moya. L'associazione tra categoria e percentuale di deduzione fiscale (25%) mostra come la regione abbia scelto di valorizzare la leva tributaria quale strumento di compensazione e attrazione residenziale.

La classificazione non riguarda solo Moya, ma anche i municipi circostanti, contribuendo a delineare un quadro territoriale omogeneo di forte spopolamento nell'area nord-orientale della provincia di Cuenca. Comuni vicini, come Fuentelespino de Moya (codice INE 16088) e Santa Cruz de Moya (codice INE 16194), sono anch'essi collocati nella categoria di estremo depopolamento con una deduzione del 25%. Ciò conferma una dinamica demografica critica che interessa l'intero ambito locale e non solo il nucleo di Moya, configurando una vera e propria zona problematica dal punto di vista demografico.

2.4 Valutazione territoriale, economica e turistica

Moya può essere vista come un nodo territoriale in cui si sovrappongono tre dimensioni: memoria storica, paesaggio rurale e turismo lento. Oggi lo stesso assetto di “terra di mezzo” consente di interpretare Moya come un piccolo hub tematico all’interno di itinerari che attraversano la Spagna.

In questo quadro si inserisce il progetto *Senderos de la Memoria* sviluppato dall’associazione *La Gavilla Verde*, che lavora al recupero di sentieri e percorsi tradizionali nelle montagne di Cuenca. L’obiettivo è duplice: da un lato recuperare vie storiche legate alla vita rurale e ai sistemi agro-pastorali, dall’altro valorizzare i luoghi della guerriglia antifranchista e della sua repressione, trasformando questi spazi in un paesaggio di memoria condivisa.

All’interno di questa rete, l’area di Santa Cruz de Moya rappresenta un polo di forte rilevanza simbolica, poiché ospita il Monumento alla Guerriglia e alla Resistenza antifranchista ed è punto di partenza di vari *Senderos de la Memoria*. In questo progetto la dimensione escursionistica si intreccia con un vero e proprio “pellegrinaggio civile”.

Il territorio di Moya si inserisce in una rete più ampia di sentieri segnalati e percorsi escursionistici contemporanei: itinerari come il PR-CU 11 *Sendero del Agua*, con partenza da Santa Cruz de Moya, sfruttano la valle del Turia, i suoi affluenti e la morfologia dei canyon per creare anelli e traversate che toccano più borghi (Santa Cruz de Moya, Las Rinconadas, La Olmeda e altri nuclei minori). La promozione turistica provinciale propone, inoltre, rotte come *Por Tierras de Moya*, che uniscono la visita alla città medievale in rovina con siti preistorici e paesaggi fluviali, confermando una logica di rete territoriale piuttosto che di attrazione isolata.

Queste caratteristiche rendono plausibile interpretare Moya come punto di appoggio per soggiorni brevi all’interno di itinerari che collegano grandi città e territori interni. La distanza di circa un’ora e mezza in auto da Valencia e da Cuenca permette di alternare la visita a centri urbani maggiori con una parentesi in un contesto rurale montano, inserendo Moya come borgo di soglia tra il sistema urbano mediterraneo e la Serranía Baja.

L’insieme di questi elementi consente di descrivere Moya come nodo strategico nella rete dei cammini storici e del turismo escursionistico contemporaneo. La combinazione fra progetto associativo (*Senderos de la Memoria*), patrimonio storico della villa fortificata e posizione geografica intermedia fra città maggiori e territori spopolati ne fa un caso esemplare per comprendere come i borghi della *España vaciada* possano essere ripensati non solo come luoghi in declino, ma come punti di articolazione di nuove geografie del viaggio, della memoria e della cittadinanza territoriale.

3. ANALISI DELL'ESISTENTE

La presente tesi concentra l'attenzione su un lotto di terreno all'interno del tessuto storico di Moya, assunto come caso di studio per la verifica della compatibilità tra le caratteristiche morfologiche del sito e una possibile soluzione strutturale.

Il presente capitolo è dedicato all'analisi del lotto di terreno e delle preesistenze murarie su cui si innesta il progetto, con l'obiettivo di definire un quadro conoscitivo completo dello stato di fatto. L'attenzione è posta in particolare su un lotto di impianto gotico, caratterizzato da una configurazione allungata e da proporzioni tipiche del tessuto storico del borgo, nel quale la presenza della cinta muraria costituisce l'unico elemento costruito superstite. L'analisi prosegue con lo studio dei materiali originari della cortina muraria, dello stato di conservazione, delle forme di degrado e delle principali criticità strutturali.

Questa fase conoscitiva rappresenta un passaggio fondamentale per comprendere le condizioni reali del sito, del suo impianto originario e delle tracce ancora leggibili, e costituisce la base per orientare in modo consapevole le successive scelte progettuali. La lettura critica dell'esistente consente, infatti, di individuare gli elementi da valorizzare, come il tracciato murario o gli andamenti del suolo, e i limiti strutturali e materici che rendono necessario un approccio progettuale specifico, in continuità con il contesto, ma adeguato alle esigenze di sicurezza, funzionalità e durabilità.

3.1 Rilievo architettonico e fotografico

Nonostante il progetto realizzato dalla Universitat Politècnica de València e l'indicazione delle nuove destinazioni d'uso (cfr. C.4.3), in questa fase iniziale non viene predefinita la tipologia strutturale e le dimensioni dell'organismo edilizio, così da utilizzare un campione di terreno rappresentativo "neutro" e analogo all'intero borgo.

Dal punto di vista operativo, le dimensioni del lotto sono state derivate dalla planimetria generale elaborata nell'ambito di studi accademici condotti dalla Universitat Politècnica de València, successivamente importata e rielaborata in ambiente CAD per ottenere una base metrica affidabile. Attraverso questo passaggio è stato possibile definire con precisione lunghezza e larghezza del campo attualmente vuoto, definendo un ingombro complessivo di circa 14.12 metri nel lato minore e 18.86 metri nel lato maggiore.



Figura 12: Masterplan - planimetria di dettaglio del lotto gotico selezionato con indicazione dell'area oggetto della proposta progettuale, su Autocad e su Photoshop (elaborazione a cura dell'autrice)

Il rilievo fotografico ha integrato la lettura planimetrica, documentando in modo sistematico diversi aspetti fondamentali: la relazione fra il piano di campagna e la base della muratura conservata, la pendenza del terreno, la presenza di criticità materiche della pietra (quali erosioni, fessurazioni, perdita di malta) e, infine, eventuali discontinuità o crolli. Lo stato di fatto è stato ricostruito a partire proprio da questa cortina muraria, assunta come elemento di riferimento principale per l'analisi complessiva del manufatto.

Come strumento di rilievo è stata impiegata una fotocamera Reflex, utilizzata per acquisire lunghe sequenze di fotografie. L'obiettivo è stato disposto in modo da risultare il più possibile perpendicolare rispetto alla superficie di inquadratura, catturando immagini ripetute con variazioni angolari molto contenute, di pochi gradi alla volta, e garantendo un'ampia sovrapposizione tra i fotogrammi (almeno il 30% dell'area dell'immagine precedente). Questa procedura consente di ottenere una copertura continua e omogenea della superficie analizzata.

Le immagini così acquisite sono state successivamente elaborate tramite il software Agisoft Photoscan, che permette di generare un foto raddrizzamento e una mesh a partire dalla nuvola di punti restituiti dalle fotografie. Il sistema fornisce quindi un output in forma di ortofoto, che rappresenta geometricamente con precisione il prospetto murario. Tale foto è stata adottata come base per il ridisegno CAD, consentendo di riadattare le misure della planimetria originaria fino a ricostruire l'assetto reale del manufatto, nel rispetto delle deformazioni e delle anomalie rilevate sul campo.



Figura 13: Rilievo fotografico in sequenza della cortina muraria in pietra che delimita il lotto oggetto di studio (realizzazione a cura del Politecnico di Valencia)

Nel complesso, l'analisi dell'esistente mostra come il lotto, pur attualmente vuoto, sia già fortemente strutturato da tre fattori: la geometria allungata tipica dell'impianto gotico, la presenza qualificante della muratura in pietra e la posizione rispetto al paesaggio circostante.

La compatibilità dimensionale con le unità insediative studiate indica che lo spazio a disposizione è adeguato ad ospitare soluzioni residenziali.

3.2 Stato di conservazione e materiali originari della cinta muraria

La cortina muraria che delimita il lotto si inserisce nel sistema difensivo storico di Moya, riprendendone le principali caratteristiche tipologiche: andamento lineare adattato alla morfologia del crinale, sviluppo su uno o più tratti spezzati per seguire il profilo del terreno e altezza originaria verosimilmente superiore a quella oggi conservata, come indicano i crolli e l'irregolarità della sommità. Dal punto di vista spaziale, la muratura svolgeva la funzione di definire il limite fisico tra spazio interno e strada, costituendo un margine attraverso porte e varchi oggi in parte scomparsi.

Nel caso in esame, i materiali originari di riferimento sono essenzialmente due:

- Le malte di calce storiche impiegate nei giunti e nel nucleo murario;
- Le pietre calcaree locali utilizzate come elemento resistente principale.

La loro diversa risposta meccanica e igro-termica è alla base delle scelte metodologiche e progettuali che orientano la trasformazione del lotto e il possibile addossamento di nuove strutture alla cortina esistente.

Per caratterizzare i materiali della muratura esistente sono stati prelevati in situ e analizzati dalla Universitat Politècnica de València 5 campioni per determinarne il comportamento fisico-meccanico. Per ciascun campione sono state misurate:

- La massa a secco (M_{sec});
- La massa in acqua tramite bilancia idrostatica (M_{eau});
- La massa in aria dopo saturazione (M_{air}).

Conoscendo tali grandezze, attraverso opportune relazioni, è stato possibile ricavare 3 parametri fondamentali:

- L'assorbimento, misura di quanta acqua il materiale è in grado di immagazzinare:

$$A = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{sec}} \cdot 100$$

- La porosità accessibile, quota dei vuoti effettivamente raggiungibile dall'acqua:

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \cdot 100$$

- La densità apparente, misura di quanto il materiale è compatto tenendo conto dei suoi pori:

$$\rho_{apparente} = \frac{M_{sec}}{M_{sec} - M_{eau}} \cdot \rho_{acqua}$$

Di seguito, nella Tabella 1 e nella Tabella 2, vengono riportati i valori dei parametri appena citati e i relativi calcoli, differenziati per i due materiali che compongono la cinta muraria storica.

3.2.1 Malta di calce storica

Le malte originarie, prelevate sotto forma di campioni dalle macerie del complesso, sono state sottoposte a prove normalizzate di porosità accessibile all'acqua, assorbimento e densità apparente, secondo le norme UNE 83980/2014 e NF P18-459/2010.

I risultati contenuti nella Tabella 1 hanno evidenziato valori di porosità fino a circa il 31% e assorbimenti d'acqua prossimi al 20%, associati a densità apparenti non superiori a 2.06 g/cm³, indicando materiali a struttura molto aperta, poco compatti e altamente sensibili all'umidità e ai cicli gelo-disgelo.

In termini qualitativi, queste malte possono essere definite fragili, facilmente degradabili e inadatte a sopportare incrementi di sollecitazioni, soprattutto in presenza di infiltrazioni d'acqua e colonizzazione biologica.

Dal punto di vista microstrutturale, l'elevata porosità da un lato favorisce la traspirazione e la capacità di regolare l'umidità all'interno della muratura, ma dall'altro comporta una significativa riduzione della resistenza meccanica e una maggiore vulnerabilità all'erosione chimica dei leganti nel tempo. Questo quadro spiega la frequente perdita di malta nei giunti, la polverizzazione superficiale, l'erosione dei bordi e la formazione di cavità che compromettono la continuità del paramento e la collaborazione tra i conci lapidei. Di conseguenza, le malte esistenti non possono essere considerate affidabili come componente portante, ma richiedono interventi di consolidamento mirato, ad esempio mediante iniezioni di calce idraulica naturale (NHL 3.5) e operazioni di ristilatura compatibile.

Tabella 1: Risultati delle prove di laboratorio sui campioni di malta prelevati dalla cortina muraria (elaborazione a cura del Politecnico di Valencia)

	CAMPIONI DI MATERIA	M _{sec}	M _{eau}	M _{air}	Porosità accessibile	Assorbimento	Densità apparente [g/cm ³]
		[g]	[g]	[g]			
Malta	1	11.56	5.84	12.64	15.88%	9.34%	2.02
	2	37.57	22.17	44.55	31.19%	18.58%	2.44
	3	47.34	24.40	56.61	28.78%	19.58%	2.06

3.2.2 Pietra calcarea locale

La pietra locale, anch'essa analizzata attraverso campioni prelevati in sito, presenta un comportamento diametralmente opposto rispetto alle malte. I test fisico-meccanici hanno mostrato valori di porosità contenuti ($\leq 11.85\%$ nella maggior parte dei campioni e inferiori all'1% nel campione più compatto) e densità apparenti elevate ($\geq 2.77 \text{ g/cm}^3$, fino a circa 2.79 g/cm^3), indicando un materiale molto più stabile, resistente e poco permeabile.

Tali valori suggeriscono una pietra calcarea o calcarenitica compatta, idonea a sopportare carichi e relativamente poco sensibile ai fenomeni di degrado connessi all'assorbimento d'acqua, se correttamente protetta.

Queste proprietà rendono la pietra esistente particolarmente adatta al riutilizzo in interventi di consolidamento e integrazione.

Tabella 2: Risultati delle prove di laboratorio sui campioni di pietra prelevati dalla cortina muraria (elaborazione a cura del Politecnico di Valencia)

	CAMPIONI DI MATERIA	M _{sec}	M _{eau}	M _{air}	Porosità accessibile	Assorbimento	Densità apparente [g/cm ³]
		[g]	[g]	[g]			
Pietra locale	4	711.27	454.35	745.80	11.85%	4.85%	2.77
	5	141.49	90.73	141.77	0.55%	0.20%	2.79

3.2.3 Rapporto tra malta e pietra nella muratura esistente

La muratura esistente può essere letta come un sistema composito in cui la pietra svolge il ruolo di scheletro resistente, mentre la malta assicura coesione, ripartizione dei carichi e tenuta igro-termica. Il degrado avanzato delle malte, a fronte di una pietra ancora meccanicamente valida, produce un disequilibrio: la capacità della muratura di lavorare come corpo solidale si riduce, e i conci tendono a comportarsi come elementi quasi indipendenti, con aumento del rischio di fessurazioni, distacchi e crolli locali. Da qui nasce la necessità di un approccio che consideri prioritario il consolidamento delle malte e il ristabilimento di una sufficiente continuità tra i blocchi, prima di qualsiasi intervento che introduca nuovi carichi.

Nel complesso, la lettura congiunta dei materiali originari e dello stato di conservazione evidenzia un manufatto che conserva una significativa capacità di definire lo spazio e di trasmettere il carattere storico del luogo. Tuttavia, le fragilità strutturali e materiche riscontrate ne compromettono l'idoneità a fungere da base portante per l'eventuale realizzazione di una struttura sovrastante, condizione che si riscontra nella maggior parte degli edifici del borgo.

La trasformazione del lotto deve, quindi, assumere la cortina in pietra solo come limite fisico.

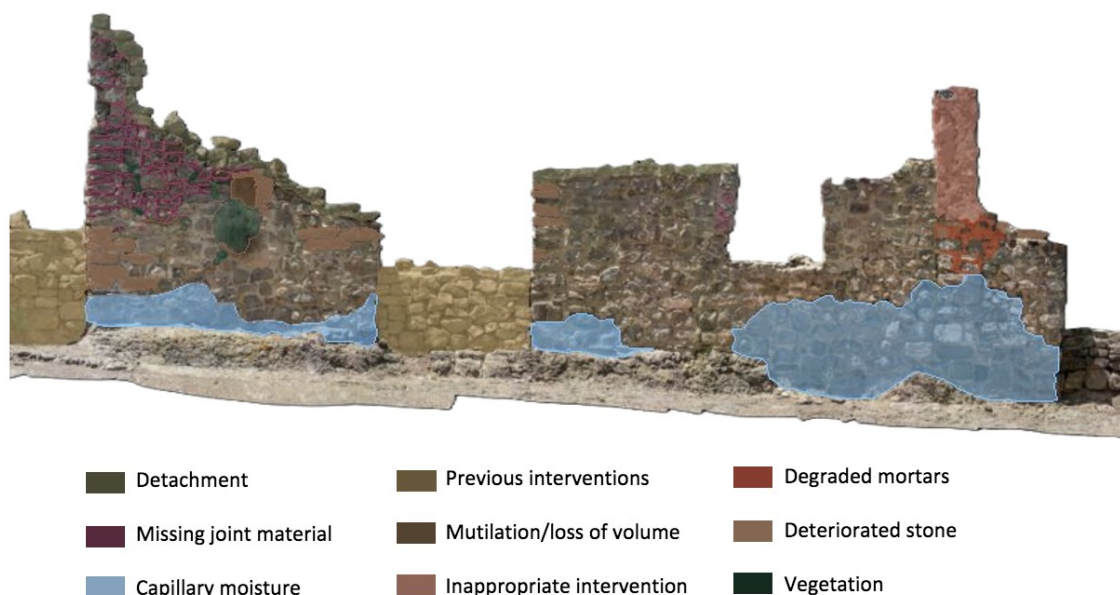


Figura 14: Mappatura tematica dello stato di conservazione e delle patologie di degrado dei paramenti in pietra locale e malta di calce. Rilievo fotogrammetrico e analisi diagnostica (elaborazione a cura dell'Università Politecnica di Valencia)

Questa immagine rappresenta la mappatura del degrado, ovvero un'analisi tecnica utilizzata nel restauro architettonico per identificare e localizzare visivamente le diverse patologie che affliggono (in questo caso) la muratura.

L'immagine utilizza dei codici colore sovrapposti a un rilievo fotografico o fotogrammetrico per distinguere i vari tipi di deterioramento:

- *Capillary moisture* (azzurro): indica l'umidità di risalita capillare, concentrata nella parte inferiore delle mura;
- *Vegetation* (verde scuro): presenza di vegetazione infestante che cresce tra le pietre;
- *Missing joint material* (viola/rosso scuro): mancanza di malta nei giunti tra le pietre, che compromette la stabilità;
- *Deteriorated stone* (marrone chiaro): porzioni di pietra che presentano un degrado superficiale o strutturale;
- *Previous/Inappropriate interventions* (marrone/rosso): identifica restauri passati o interventi non idonei eseguiti con materiali non compatibili;
- *Degraded mortars* (ruggine): malte di allettamento sbriciolate o polverizzate.

Tale rilievo grafico ha permesso di individuare e spazializzare le diverse patologie che interessano la cinta esistente, evidenziando una distribuzione critica dell'umidità di risalita capillare alla base delle strutture e una diffusa mancanza di materiale nei giunti di malta di calce. La sovrapposizione

cromatica delle patologie sulla base fotogrammetrica costituisce lo strumento operativo indispensabile per definire la corretta metodologia di intervento.

In particolare, i dati raccolti indicano la necessità di procedere con operazioni di stilatura dei giunti e reintegrazione materica utilizzando malte a base di calce idraulica naturale, compatibili con i materiali preesistenti del lotto.

3.2.4 Terreno

Per completezza, è stata effettuata un'analisi delle pendenze del terreno mediante una ricerca autonoma sul *Centro de Descargas* del CNIG, scaricando il *Modelo Digital del Terreno* per il foglio cartografico MTN25 n. 678-699 che include Moya (Cuenca, Castilla-La-Mancha).

Utilizzando software GIS, quali QGIS, è stato delimitato un ritaglio attorno al sito (coordinate approssimative: 40.033°N, 1.833°W), estraendo dati dall'immagine GeoTIFF. Questo file contiene un'informazione puntuale della quota del terreno sul livello del mare; l'area è suddivisa in quadrati di 25 metri per lato, ognuno dei quali contiene un'unica informazione sulla quota del terreno.

Attraverso la manipolazione dei dataset digitali, sono state estratte le curve di livello (isoipse) per la comprensione dell'orografia del sito.

Secondo la definizione dell'Istituto dell'Enciclopedia Italiana, l'isoipsa rappresenta il «*luogo dei punti di una superficie che si trovano a uguale livello*».

Nel contesto della presente ricerca, la loro proiezione planimetrica garantisce un'evidente interpretazione dell'andamento altimetrico. Si determina, così, la differenza di quota tra due punti di interesse; poiché ogni quadrato della griglia ha lato 25 m, si conosce con precisione la distanza orizzontale tra due curve di livello considerate. Dividendo il dislivello tra due isoipse per la distanza orizzontale tra le stesse, si ottiene la pendenza media del tratto in esame.

Dal confronto delle pendenze su diversi versanti del borgo risulta che la pendenza media varia in modo significativo a seconda dell'orientamento e della morfologia del pendio. Per il lotto di terreno considerato si osserva un dislivello totale di 90 m dal punto considerato (quota 1140 m s.l.m.) al punto a valle (quota 1050 m s.l.m.).

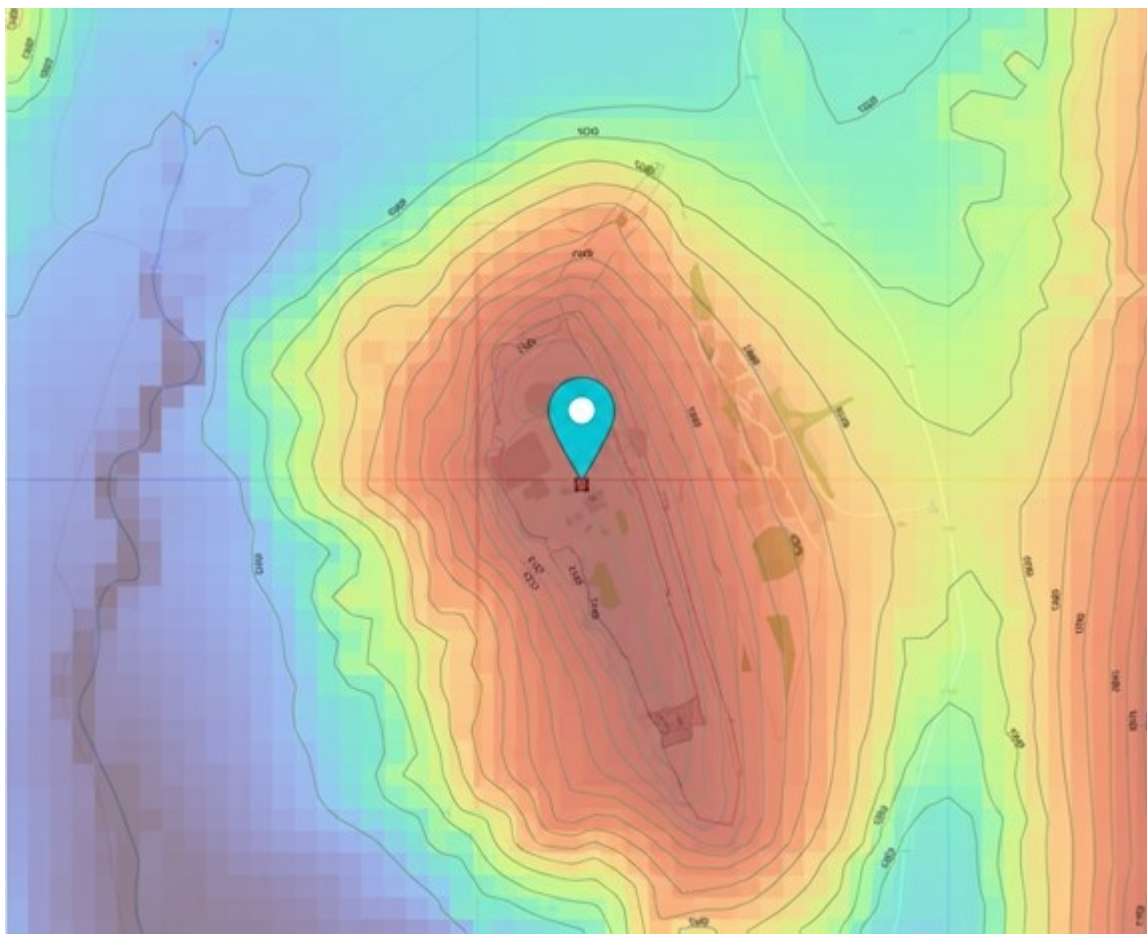


Figura 15: Mappa tematica delle pendenze elaborata dal Modelo Digital del Terreno scaricato dal Centro de Descargas CNIG per il sito di Moya (Cuenca, hoja MTN25 n. 678-699)

4. IMPOSTAZIONE PROGETTUALE

Dal momento che questo capitolo segna l'ingresso nella fase progettuale, dopo la descrizione dettagliata dello stato di fatto di Moya, è necessario presentare l'iter con cui si è arrivati a concepire la strategia adottata. Quest'ultima viene elaborata in funzione dello stato di conservazione degli edifici, declinandosi in modo specifico per ciascun fabbricato e per l'insieme del contesto.

4.1 Visione generale e approccio alla riqualificazione

Il recupero edilizio rappresenta, oggi, una delle principali strategie per la gestione sostenibile del patrimonio costruito, in contrapposizione ai modelli di espansione urbana basati sulla nuova edificazione. La riqualificazione del borgo storico di Moya si fonda su una visione progettuale che assume l'esistente come risorsa primaria e non come limite all'intervento contemporaneo.

In un contesto caratterizzato da un avanzato stato di abbandono e da una diffusa condizione di rovina, il progetto non persegue una ricostruzione integrale del tessuto edilizio originario, bensì una strategia di valorizzazione delle permanenze materiali e spaziali che costituiscono l'identità storica del sito. La rovina di Moya non è intesa come una condizione di degrado da cancellare, ma come l'esito di un processo storico stratificato, che ha lasciato tracce leggibili dell'organizzazione urbana, delle tecniche costruttive e delle modalità insediative tradizionali.

In questa prospettiva, il progetto assume un atteggiamento critico e selettivo nei confronti dell'esistente, volto a distinguere gli elementi dotati di valore strutturale e identitario da quelli irrimediabilmente compromessi.

La valorizzazione dell'esistente si configura anche come scelta sostenibile, in quanto orientata alla riduzione del consumo di suolo e di risorse materiali.

Il progetto si propone, quindi, come un modello di intervento consapevole nei contesti storici abbandonati, in cui la conservazione non è intesa come tutela statica, ma come processo dinamico capace di integrare passato e futuro in una visione unitaria e sostenibile.

4.2 Linee guida del progetto

Di seguito vengono riportati, sotto forma di elenco puntato, i principi chiave che hanno guidato la progettazione, costantemente presi in considerazione e rispettati durante l'intero lavoro al fine di concepire un intervento adeguato:

Riqualficazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya, (Castilla-La Mancha, Spagna)

- ✓ Rispetto dell’impianto urbano storico: l’assetto del borgo, pur in stato di abbandono, rimane leggibile e costituisce il riferimento principale per l’organizzazione degli spazi, la definizione dei percorsi e la localizzazione delle nuove funzioni;
- ✓ Reversibilità degli interventi: ogni intervento è concepito in modo da poter essere rimosso o modificato senza compromettere le strutture preesistenti;
- ✓ Compatibilità materica e strutturale: le scelte costruttive rispettano i materiali originali e le caratteristiche strutturali degli edifici esistenti;
- ✓ Sostenibilità ambientale ed economica: le soluzioni progettuali mirano a garantire un equilibrio tra efficienza energetica, impatto ambientale e gestione economica nel lungo periodo.

La riqualficazione è concepita come un processo aperto e progressivo:

- Modularità: le soluzioni costruttive possono essere replicate o estese in base alle esigenze future;
- Flessibilità: gli spazi e le funzioni possono evolvere nel tempo, consentendo un adattamento continuo alle risorse disponibili e alle nuove necessità.

4.3 Filosofia d’intervento sul borgo

Il progetto si propone di preservare, nella misura del possibile, l’organizzazione esistente del borgo, mantenendo la disposizione degli spazi, dei lotti, delle strade, delle destinazioni d’uso e dei resti materiali, quando adeguati e in buone condizioni strutturali. La persistenza del tracciato viario, della suddivisione dei lotti e delle volumetrie originarie costituisce il riferimento principale per l’organizzazione delle nuove funzioni.

Si prevedono, però, approcci differenti che vengono valutati nei casi specifici: alcune strutture possono essere rafforzate e recuperate, consolidando le murature storiche e valorizzando le tracce materiali esistenti, mentre altre richiedono soluzioni più radicali a causa del loro elevato deterioramento.

La proposta di rifunzionalizzazione elaborata dalla Universitat Politècnica de València introduce una nuova distribuzione delle destinazioni d’uso all’interno del recinto storico di Moya. Il piano distingue tre macro-ambiti funzionali: educativo, servizi comuni e turistico/culturale.

Nell’area educativa trovano posto alloggi, spazi collettivi (sale comuni, biblioteca e sala lettura), laboratori e servizi connessi alla didattica, affiancati da aree aperte dedicate allo sport, alle coltivazioni e alla sperimentazione agricola. I servizi comuni (parcheggi, centro visitatori, centro medico, uffici e servizi igienici) sono collocati in posizioni strategiche rispetto agli accessi, in

Riqualificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya,
(Castilla-La Mancha, Spagna)

modo da garantire il supporto logistico necessario senza compromettere la percezione unitaria del borgo storico. L'ambito turistico-culturale comprende funzioni ricettive e di fruizione del patrimonio: case rurali, ristorante, negozio tradizionale, hotel, spazi espositivi, aree verdi, belvedere e percorsi di visita tra le rovine e il castello.

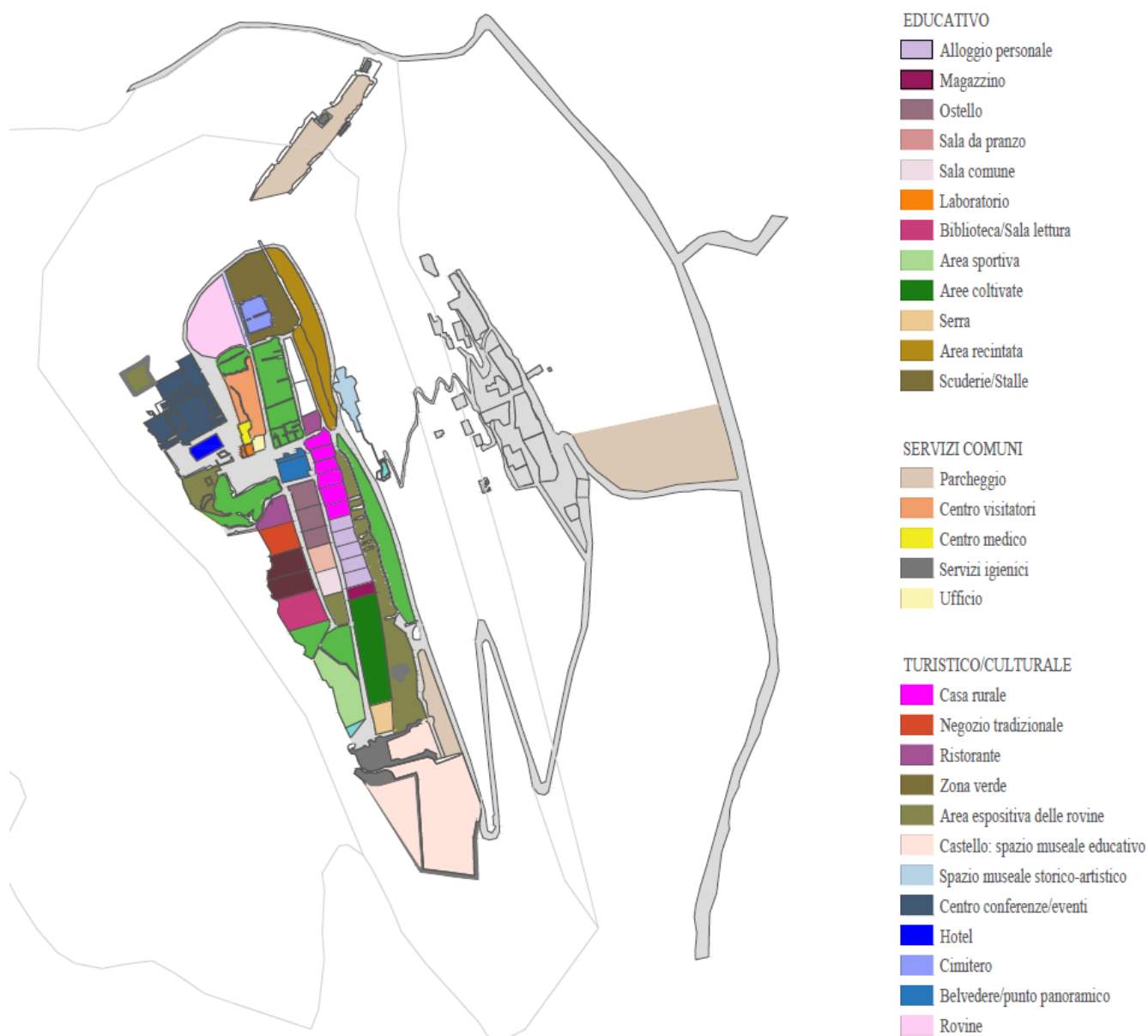


Figura 16: Planimetria funzionale del borgo di Moya, su Autocad (elaborazione a cura del Politecnico di Valencia, tradotta e adattata dall'autrice)

4.4 Scelta strategica del volume distaccato

Operando nell'ottica di una “trasformazione controllata”, è necessario analizzare caso per caso le possibilità di intervento e la scelta delle tecnologie e dei materiali più coerenti, in modo da garantire un equilibrio corretto tra la necessità di adeguare l'esistente agli standard contemporanei (prestazionali, normativi e fruibili).

Sono state analizzate varie possibilità:

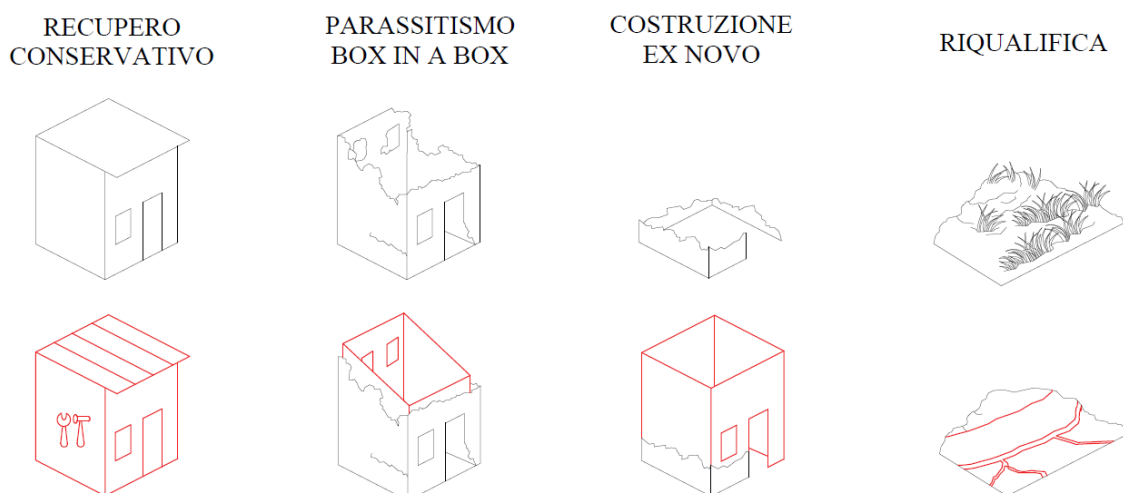


Figura 17: Icone esplicative delle possibilità di intervento, su Autocad (elaborazione a cura dell'autrice)

- **Recupero conservativo:** questa soluzione risulta attuabile laddove il costruito non presenti segni di cedimento strutturale e abbia mantenuto inalterata la propria forma e tipologia originaria. L'intervento prevede, tra l'altro, la rimozione delle superfetazioni, la manutenzione dei fronti mediante l'uso degli stessi materiali tradizionali, la sostituzione degli infissi in modo coerente e unitario a livello di intero borgo, nonché la ricostruzione degli interni attraverso la sistemazione dei solai e delle chiusure verticali, al fine di rendere gli edifici idonei ad accogliere nuovi nuclei abitativi;
- **Parassitismo:** la cosiddetta strategia della “scatola”, ovvero “costruire nel costruito”, rappresenta una modalità progettuale applicabile quando ci si confronta con tracce del passato. L'introduzione di volumi e involucri in materiali contemporanei e innovativi consente di dare riconoscibilità all'intervento, valorizzandolo come elemento distinto ma comunque integrato, nel rispetto della preesistenza. Tale approccio, inoltre, permette di sopperire a carenze funzionali o prestazionali, inserendo una nuova “pelle” all'interno del preesistente, in grado di assolvere a tutte le prestazioni necessarie per un nuovo uso e, nel rispetto delle normative esistenti, anche in ragione delle funzioni più critiche dal punto di vista impiantistico e tecnologico.

Più specificatamente, la formula della “scatola nella scatola” si rivela particolarmente adatta a nuclei storici minori o paesi parzialmente o totalmente abbandonati: la prefabbricazione degli elementi consente trasportabilità e assemblaggi rapidi, eseguibili anche con mezzi non tradizionali, in casi estremi persino con l'ausilio di elicotteri. Inserire un volume all'interno di un contenitore edilizio esistente lo delega a una funzione di mero rivestimento, mantenendone tuttavia la visibilità e il valore di lettura storica, nonostante le sue obsolete prestazioni dal punto di vista strutturale e tecnologico.

Questa strategia trova ampia applicazione negli edifici storici sottoposti a vincoli di tutela o, in generale, a tutti quei progetti che intendono, per scelta o necessità, conservare la materia originaria esistente. A seconda del valore storico-architettonico del bene di partenza e dei vincoli normativi imposti, i volumi possono o distaccarsi fisicamente e dimensionalmente dal contenitore edilizio che le ospita oppure andare in aderenza rispetto all'esistente;

- Costruzione ex novo: grazie alla prefabbricazione è possibile collocare nuove costruzioni di facile assemblaggio laddove sussista la necessità di introdurre una funzione specifica, ma non esiste una preesistenza adatta. Si tratta comunque di piccoli edifici inseriti in spazi aperti, concepiti in modo da non interferire con il tessuto storico circostante, ma piuttosto da integrarsi in modo leggero e reversibile;
- Riqualfica: questa soluzione riguarda gli spazi aperti, con l'obiettivo di ristabilire l'urbanizzazione primaria e il verde urbano, delineando nuovi luoghi pubblici, collettivi e di sosta. L'intervento mira ad integrare tali aree nel tessuto antico del borgo, al fine di accogliere le funzioni necessarie a garantire gli standard di qualità della vita contemporanea (accessibilità, sicurezza, servizi, fruizione ricreativa e culturale), mantenendo un'appropriata continuità formale e materiale con il contesto storico.

È evidente che le possibilità progettuali sono molteplici, lasciando al progettista discrezionalità nella scelta di un intervento coerente e contestualmente appropriato.

Questo lavoro di tesi si colloca all'interno di un quadro di studi e indicazioni fornite da un progetto in fase di avviamento coordinato dalla Universitat Politècnica de València, in collaborazione con l'Università degli Studi di Pavia, già richiamato precedentemente. In tale ambito, pur essendo teoricamente possibile distanziarsi dalle opzioni progettuali preliminarmente definite, si è ritenuto opportuno impostare la progettazione su di un percorso con potenziale riscontro applicativo effettivo.

Per questo motivo, è stato mantenuto il concetto originale previsto nel progetto, ovvero l'adozione della strategia del “box in the box”, declinata come principio generale per gli interventi previsti.

A partire da questa idea di base, sono state successivamente sviluppate le scelte tecniche, tipologiche e distributive, articolando il progetto in modo da rispettare la logica del guscio storico esterno e della nuova struttura inserita, pur declinandola in relazione alle specifiche condizioni del luogo e alle esigenze funzionali contemporanee. In tal modo, le decisioni operative risultano legate al quadro di riferimento collettivo, ma con scelte di dettaglio che riflettono il percorso interpretativo e progettuale individuale intrapreso nel corso della tesi.

A Moya, il volume indipendente è motivato da esigenze di conservazione, sicurezza e fattibilità. Le murature lapidee esistenti, pur identitarie, presentano degrado strutturale avanzato: elevarle con nuova costruzione comporterebbe carichi trasmessi su elementi fragili, richiedendo rinforzi invasivi che altererebbero irreversibilmente la matericità passata. Pur costituendo un importante riferimento estetico e storico, sono elementi troppo danneggiati e poco consistenti per poter essere conservati strutturalmente.

Le soluzioni tecnico-costruttive per il progetto del nuovo, indipendentemente dalla strategia progettuale adottata, si muovono verso soluzioni leggere, non invasive, ossia verso i sistemi stratificati a secco che scompongono il pacchetto costruttivo in elementi strutturali (struttura portante) ed elementi di involucro interno ed esterno (rivestimento) mediante connessioni meccaniche.

5. ANALISI ARCHITETTONICA

L'analisi architettonica dell'edificio progettato si concentra su elementi fondamentali per valutare l'adeguatezza compositiva e funzionale dell'intervento. In particolare, verranno esaminati la destinazione d'uso, per definire le esigenze performative e normative; le distanze tra edifici, per garantire l'inserimento urbano e il rispetto delle prescrizioni vigenti; la forma della struttura, per analizzare l'ottimizzazione volumetrica e strutturale; la divisione interna degli spazi, per verificare la qualità distributiva e l'efficienza spaziale.

Tale approccio fornisce una cornice interpretativa sistematica, essenziale per una piena comprensione del lavoro complessivo.

5.1 Scelta della destinazione d'uso

Avendo individuato in fase preliminare il lotto di terreno che costituirà la base del progetto (cfr. C.3.1), la scelta della destinazione d'uso è stata declinata in coerenza con le indicazioni fornite dallo stato di progetto relativo alle nuove funzionalità del borgo elaborato Universitat Politècnica de València (cfr. C.4.3). Ne consegue che il lotto considerato è stato definito come ambito destinato ad ospitare una struttura con finalità residenziali.

In precedenza, tuttavia, nell'ambito di questa tesi, è stato condotto uno studio demografico e sociale del territorio (cfr. C.2.3), che ha evidenziato le significative potenzialità turistiche del borgo. A partire da questa lettura, pur mantenendo la base strutturale dell'edificio orientata a una funzione residenziale, si è ripensata la distribuzione e la configurazione degli spazi interni, attribuendo alla struttura la connotazione di albergo diffuso. Tale tipologia ricettiva, caratterizzata da unità abitative autonome inserite organicamente nel tessuto urbano esistente, risulta pienamente conforme alle normative spagnole vigenti, in particolare al CTE DB-UE e alle *ordenanzas turísticas della Comunidad de Castilla-La Mancha*.

Questa configurazione si presenta come soluzione particolarmente flessibile, in grado di soddisfare inizialmente le esigenze ricettive, garantendo nello stesso tempo la possibilità di adattare l'edificio a future necessità abitative private, senza modifiche sostanziali della struttura portante e del sistema distributivo.

5.2 Configurazione esterna

Per il lotto analizzato si prevede l'inserimento di due abitazioni distinte in configurazione duplex su pianta rettangolare di 6.66 metri x 14.78 metri, sfruttando le dimensioni disponibili.

La singola duplex impone i due lati lunghi ciechi; tale scelta è determinata dall'obbligo di garantire una distanza minima di 10 metri tra pareti finestrate, impedendo l'apertura di vedute laddove non sia possibile assicurare tale distacco rispetto agli edifici adiacenti. Questo valore rispetta rigorosamente le norme del CTE DB-HS e le ordinanze municipali di Moya, che subordinano l'apertura di finestre al soddisfacimento dei parametri di illuminazione naturale, ventilazione e sicurezza antincendio. Nel contesto del lotto, questa prescrizione orienta gli affacci principali sui fronti corti rendendo i lati lunghi ciechi: questa scelta orienta verso una configurazione con setti monolitici portanti per massimizzare la rigidezza strutturale distribuendo carichi verticali e orizzontali senza aperture laterali.

In altezza, l'edificio è impostato su due piani distinti: il piano terra e il piano primo, separati da un'altezza interpiano standard di 3.00 metri. La volumetria è completata da un tetto a capanna, con due falde inclinate di 19°, configurazione che favorisce il naturale deflusso delle acque meteoriche.

In base a questa geometria, il punto più basso del colmo si colloca all'altezza di 5.70 metri dal piano di riferimento, mentre la quota massima raggiunge i 7.17 metri.

Per rispettare i rapporti areo-illuminanti (cfr. C.5.3), oltre che per assolvere ad una funzione estetica, le aperture sono obbligate in prossimità dei lati corti (a est e a ovest) e sono previste di estese dimensioni, per massimizzare il guadagno solare passivo.

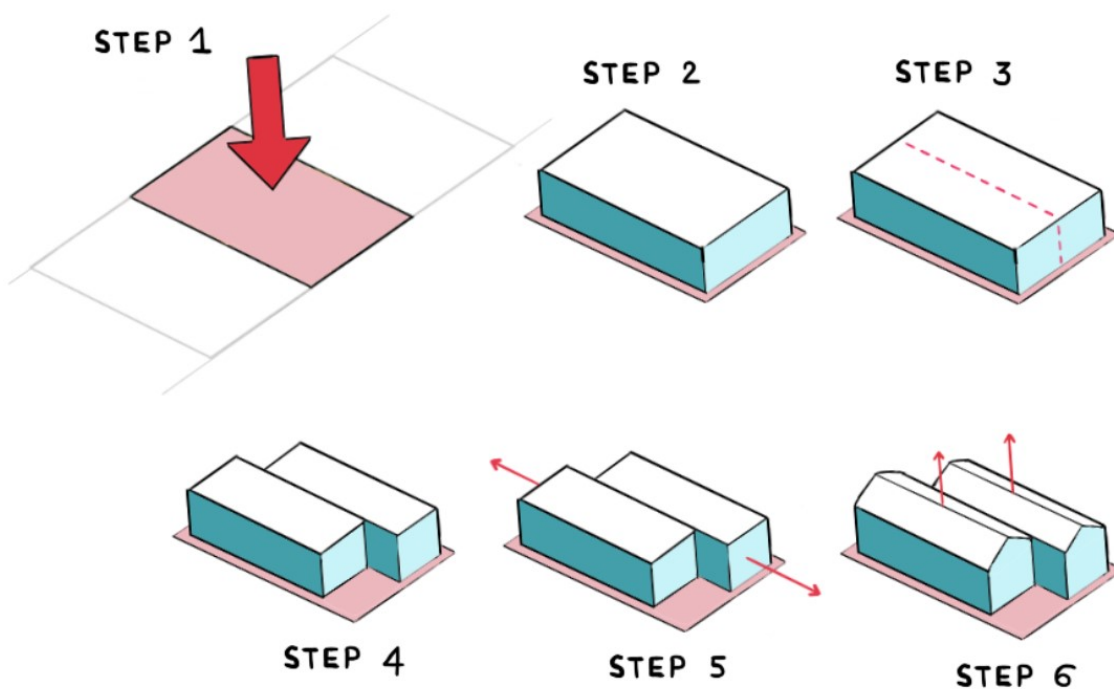


Figura 18: Schema volumetrico dei due duplex nel lotto di terreno analizzato, su SketchUp e Photoshop (elaborazione a cura dell'autrice)

La valorizzazione della zona esterna delimitata dal lotto di terreno rappresenta un elemento strategico della progettazione, mirato ad estrarre il massimo potenziale ricettivo e turistico dall'unità abitativa in duplex. Tale ambiente esterno è delimitato dai confini fondiari e schermato dalla preesistente cinta muraria, che funge da efficace barriera protettiva dal lato stradale garantendo privacy acustica e visiva in conformità ai principi di protezione contro il rumore (CTE HS 5); esso viene riorganizzato in aree semi-private multifunzionali, appositamente concepite per ospitare un tavolo dimensionato per sei persone, in perfetta continuità con la capienza della zona giorno interna, corredato da sedute ergonomiche impermeabili e resistenti agli agenti atmosferici. L'integrazione di pavimentazioni drenanti in materiale riciclato e ghiaia stabilizzata, unitamente a fioriere per la micro-vegetazione autoctona permette di sfruttare un ulteriore spazio che si viene a creare in armonia con l'orientamento panoramico.

5.3 Configurazione interna

La divisione degli spazi affronta il problema della zona centrale della pianta buia (inevitabile se progettata con lati lunghi ciechi), destinandola funzionalmente a bagni con ventilazione meccanica, pianerottoli, scale e cucine.

Focalizzandosi sul singolo duplex, viene progettata una soluzione ricettiva su due piani destinata ad ospitare dalle due alle quattro persone in ogni appartamento, per un totale di 65.80 m² per singolo appartamento. L'entrata si apre direttamente sul pianerottolo comune che distribuisce verso la scala ad L e la porta d'ingresso dell'appartamento del piano terra; al piano superiore, viene prevista la stessa distribuzione di spazi, per dare uniformità, facilità di esecuzione e di montaggio.

Con un dislivello di 3.00 m adottando alzate e pedate in linea con i valori standard, la scala risulta articolata su 18 alzate totali, corrispondenti a 17 gradini complessivi (a esclusione dell'arrivo, coincidente con il piano superiore). Questo valore è stato ricavato assumendo pari a circa 17 cm l'alzata del singolo gradino, e il numero di alzate calcolato come segue:

$$n = \frac{\text{dislivello}}{\text{alzata}} = \frac{300 \text{ cm}}{17 \text{ cm}} = 17.65 [-]$$

Il valore è compreso nel range di comfort 16–19 cm e pienamente conforme ai limiti fissati dal CTE (DB-SUA) per le scale di uso generale.

Applicando la relazione di Blondel, si calcola la misura della pedata:

$$2 \cdot n + \text{pedata} = 63 - 64 \text{ cm}$$

Riqualificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya, (Castilla-La Mancha, Spagna)

da cui, avendo appena definito l'alzata, si ottiene una pedata indicativa di 28.7 cm, compatibile con la pedata minima di 28 cm prevista dal CTE per scala di uso generale.

Il numero delle pedate corrisponde a:

$$\text{numero pedate} = \text{alzate} - 1$$

da cui si ricavano 17 pedate in totale.

La scelta di dimensionare una scala di forma ad L è motivata dalla necessità di posizionare la porta d'ingresso dell'appartamento del piano superiore in modo centrale, in corrispondenza della zona interna e meno illuminata dell'unità immobiliare. Il vano scala, inoltre, non richiedendo obbligatoriamente ventilazione e illuminazione naturale, può essere collocato in posizione centrale senza vincoli stringenti di esposizione, garantendo la massima flessibilità distributiva. La scala ad L può essere progettata integrando opportuni accorgimenti impiantistici e meccanici, quali illuminazione artificiale qualitativamente adeguata, ventilazione meccanica o aeraulica e, se necessario, sistemi di ricambio d'aria specifici, in modo da assicurare igiene, sicurezza e comfort anche in assenza di aperture dirette verso l'esterno.

In una scala ad L con pianerottolo intermedio si mantiene l'uguaglianza di tutte le alzate e si ripartiscono le 18 alzate sulle due rampe, lasciando il pianerottolo come superficie di sosta senza alzata aggiuntiva. In questo caso, seguendo le dimensioni della pianta del duplex, sono state previste 12 alzate sulla prima rampa e 6 alzate sulla seconda rampa.

In un contesto di albergo diffuso in Spagna, la scala ad L deve essere considerata scala di uso generale/uso pubblico (residenziale pubblico-alberghiero). Il CTE DB-SUA prevede, per scala di uso generale in edifici residenziali pubblici/hotel, una larghezza utile minima di 0.80 m per bassi affollamenti, con requisiti più restrittivi qualora la scala faccia parte dell'itinerario accessibile o di evacuazione principale. Come buona pratica, il valore di 1.00 m costituisce il limite minimo diffuso per scale principali; in molti casi si adotta una larghezza di 1.20 m per maggiore sicurezza e per consentire agevole l'incrocio delle persone. Su quest'ultimo valore è stata dimensionata la larghezza utile, e di conseguenza il pianerottolo quadrato misura 1.20 m x 1.20 m.

L'arrivo del pianerottolo della scala e la posizione dei servizi restituiscono già una distinzione immediata tra zona notte e zona giorno.

Dall'analisi socioeconomica trattata precedentemente, si prevede l'afflusso di turisti attirati dai cammini naturalistici nell'entroterra della Spagna; essi viaggiano prevalentemente in coppia o con un gruppo ristretto di amici, motivo per il quale si è optato per garantire dai due ai quattro posti letto.

Nell'ampia area destinata alla zona giorno, caratterizzata da una superficie complessiva di 27.81 m², si prevede l'inserimento di un angolo cottura integralmente attrezzato con tutti gli elettrodomestici essenziali, disposti secondo una sequenza funzionale ottimizzata che garantisce efficienza operativa e razionalità d'uso. Tale disposizione tiene conto dei principi ergonomici e delle normative vigenti in materia di progettazione abitativa, minimizzando i percorsi di movimentazione e massimizzando l'accessibilità. Frontalmente all'angolo cottura, è pianificato uno spazio dedicato specificamente all'ospitalità di un tavolo in grado di accomodare sei sedute (di cui quattro destinate agli ospiti dell'appartamento e due aggiuntive, in conformità alle regole consolidate della progettazione spaziale residenziale, che privilegiano la flessibilità e il comfort collettivo). La zona giorno si completa con l'area soggiorno, attrezzata con un divano trasformabile all'occorrenza in letto matrimoniale. Questa area è strategicamente posizionata in primo piano rispetto alle ampie superfici vetrate, al fine di offrire una vista panoramica verso la strada principale, enfatizzando così l'aspetto turistico e ricettivo dell'unità abitativa.

La zona notte, collocata in posizione diametralmente opposta all'interno della pianta rettangolare, si articola in un disimpegno distributivo che serve una camera matrimoniale principale di 19.49 m² e due bagni distinti e autonomi, ciascuno di 4.76 m².

La camera matrimoniale principale è ubicata sul lato corto orientato a est, posizione privilegiata per il beneficio dell'illuminazione naturale al sorgere del sole, ed è affacciata mediante ampie vetrate verso la valle. Nell'organizzazione interna degli spazi della camera, è stato previsto un distanziamento minimo di 1.0 m tra l'armadio e il letto, in aderenza ai criteri ergonomici standardizzati definiti dalle linee guida UNE EN e dal CTE al fine di assicurare circolazione agevole, ventilazione adeguata e accessibilità ottimale.

Per il piano terra dell'unità in duplex, si programma lo sfruttamento efficace dello spazio sottostante la scala, trasformandolo in un locale di servizio polifunzionale. Tale vano può essere destinato al deposito ordinato di valigie o bagagli degli ospiti, oppure configurato come area non accessibile agli utenti esterni, ma riservata ai proprietari per operazioni rapide di ricambio e pulizia degli appartamenti tra un ciclo di soggiorno e l'altro.

Di seguito, ai fini dell'illustrazione del progetto, si riportano le piante architettoniche elaborate, che dettagliano la configurazione degli spazi appena descritti.

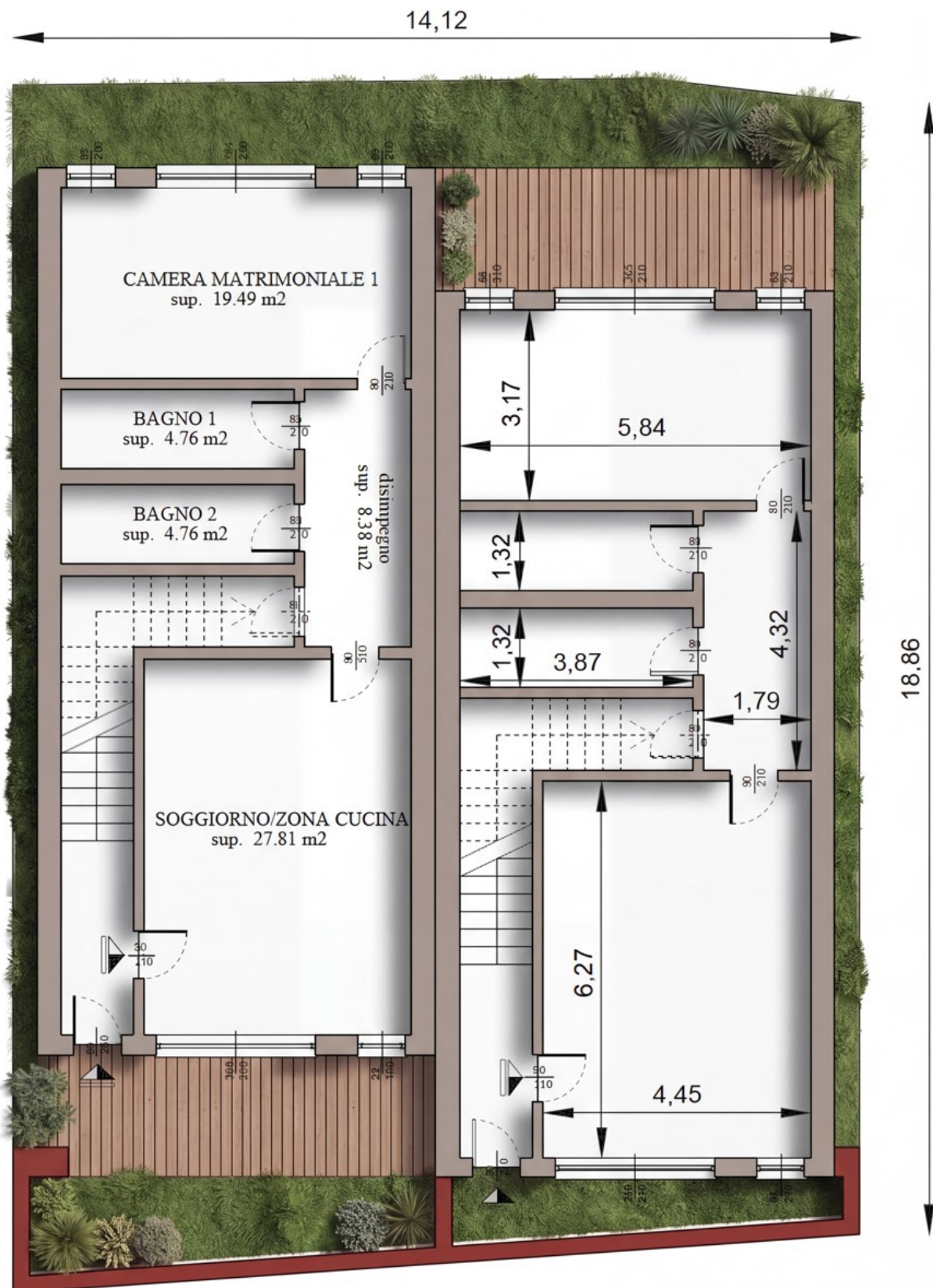


Figura 19: Pianta architettonica con indicazione delle stanze e relative dimensioni, su Autocad, su Photoshop, su Firefly (elaborazione a cura dell'autrice)



Figura 20: Pianta architettonica del piano terra con indicazione degli arredi, su Autocad e Photoshop (elaborazione a cura dell'autrice)



Figura 21: Pianta architettonica del piano primo con indicazione degli arredi, su Autocad e Photoshop (elaborazione a cura dell'autrice)

I rapporti aeroilluminanti previsti nel progetto risultano pienamente rispettati, conformemente ai parametri stabiliti dalle normative spagnole vigenti in materia di salubrità e benessere abitativo. In particolare, il rapporto aeroilluminante, definito come il quoziente tra la superficie delle aperture apribili per la ventilazione (finestre e portefinestre) e la superficie del pavimento netto dei locali, raggiunge valori minimi non inferiori a 1/8 per le zone giorno e 1/10 per le zone notte, soddisfacendo così i requisiti del CTE (sezione HS3 *Qualità dell'aria interna*) e del Decreto 351/2007 della *Junta de Castilla-La Mancha*, che regolano la ventilazione naturale negli edifici residenziali e turistico-ricettivi. Analogamente, il rapporto di illuminazione naturale, calcolato come rapporto tra la superficie vetrata totale orientata (esclusi i serramenti opachi) sono rispettati, come richiesto dal CTE (sezione HE0 *Limitazione della domanda energetica* e HS 4 *Salubrità*), garantendo un'illuminazione diurna adeguata e un risparmio energetico da illuminazione artificiale.

Di seguito, vengono riportate le tabelle con i calcoli appena descritti:

Tabella 3: Rapporti di areazione per i locali del duplex, su Excel

LOCALE	SUP. LOCALE [m2]	SUP. FINESTRA [m2]	SUP.FINESTRA/SUP. LOCALE
CAMERA MATRIMONIALE 1	19.49	$(2.65*1.60) + (0.80*1.60) + (0.80*1.60)$ 6.80	0.245 > 1/10
ZONA GIORNO	27.81	$(2.65*1.60) + (0.80*1.60)$ 5.52	0.198 > 1/8
BAGNO 1	4.76	Aerazione non necessaria	
BAGNO 2	4.76	Aerazione non necessaria	
disimpegno	8.38	Aerazione non necessaria	

Tabella 4: Rapporti di illuminazione per i locali del duplex, su Excel

LOCALE	SUP. LOCALE [m2]	SUP. FINESTRA [m2]	SUP.FINESTRA/SUP. LOCALE
CAMERA MATRIMONIALE 1	19.49	$(2.65*(1.60-0.30)) + (0.80*(1.60-0.30)) + (0.80*(1.60-0.30))$ 5.53	0.199 > 1/10
ZONA GIORNO	27.81	$(2.65*(1.60-0.30)) + (0.80*(1.60-0.30))$ 4.49	0.161 > 1/8
BAGNO 1	4.76	Illuminazione artificiale	
BAGNO 2	4.76	Illuminazione artificiale	
disimpegno	8.38	Illuminazione artificiale	

6. ANALISI TECNOLOGICA

Il seguente capitolo pone particolare attenzione alle scelte tecnologiche adottate per la singola unità abitativa in configurazione duplex, concentrandosi in maniera dettagliata e sistematica sulle ragioni che hanno portato a prediligere determinate soluzioni.

Vengono approfondite le stratigrafie delle chiusure verticali e orizzontali, con specifica attenzione alla composizione multistrato, agli spessori, alle reperibilità e al trasporto dei componenti; vengono motivate le selezioni materiche; vengono presentati nel dettaglio i calcoli effettuati per definire le trasmittanze termiche (U), verificate in conformità con la normativa spagnola CTE HE e DB-HE; viene fatto uno studio preliminare sulle scelte impiantistiche, inclusi sistemi di ventilazione e riscaldamento radiante, inseriti per massimizzare l'efficienza energetica e il comfort termoigrometrico degli occupanti.

6.1 Scelta materica: il legno XLAM

In un panorama edilizio orientato alla decarbonizzazione e all'efficienza strutturale, la volontà di progettare e costruire in legno risponde alla necessità di coniugare la sostenibilità ambientale con le esigenze del restauro contemporaneo. L'impiego del materiale ligneo, nelle sue diverse forme tecnologiche, si configura come una scelta strategica capace di massimizzare il rapporto tra leggerezza e resistenza meccanica.

La scelta del sistema Cross Laminated Timber (detto "XLAM" o "CLT") per l'intervento a Moya scaturisce da un'analisi comparativa tra le diverse tecnologie lignee, valutate in base alla risposta strutturale, alla logistica di cantiere e all'integrazione con la preesistenza lapidea.

- XLAM vs. sistemi a telaio (Platform Frame/Balloon Frame): sebbene i sistemi a telaio garantiscano un'elevata flessibilità planimetrica e leggerezza, essi necessitano di sistemi di controventamento secondari per assicurare la rigidità scatolare necessaria. Al contrario, l'XLAM, grazie alla sua composizione a strati incrociati e ortogonali, offre una portanza bidirezionale intrinseca e una rigidità nel piano superiore; questa caratteristica permette di realizzare una scatola strutturale auto-stabile e più compatta, ottimizzando le altezze interne e facilitando l'ancoraggio di carichi uniformi o controsoffittature;
- XLAM vs. Blockbau (legno massiccio a incastro): il sistema tradizionale Blockbau garantisce un'ottima inerzia termica grazie alla massa del legno pieno, ma presenta criticità in termini di duttilità e richiede tempi di posa significativamente più lunghi. Mentre un sistema a tronchi sovrapposti può richiedere dalle 4 alle 6 settimane per il

montaggio, l'XLAM permette di completare l'elevazione strutturale in circa 7 giorni, garantendo una precisione millimetrica grazie alla prefabbricazione, essenziale per l'inserimento all'interno di involucri storici.



Figura 22: Confronto tra i principali sistemi costruttivi in legno e relativi schemi strutturali. Da sinistra: sistema XLAM (pannelli massicci a strati incrociati), sistema a Telaio (elementi lineari con controventi metallici), Platform Frame (intelaiatura leggera rivestita), Blockbau (sovrapposizione di tronchi massicci)

Considerando valori quantitativi basati su standard tecnici (Eurocodice 5 e produttori), i principali punti di confronto sono riportati di seguito:

Tabella 5: Analisi comparativa dei parametri ingegneristici e operativi tra i sistemi XLAM e Telaio, su Excel

Parametro	Unità di misura	XLAM (5 strati)	Platform Frame (Telaio)
Modulo elastico medio ($E_{0,mean}$)	[N/mm ²]	~ 11000-12000	~ 11000 solo montanti
Rigidezza nel piano (GA_{eff})	[kNm]	Elevata (lastra)	Bassa
Portanza bidirezionale	[-]	Si (piastra)	No (unidirezionale)
Spessore strutturale	[m]	90-120	140-160
Capacità dissipativa q	[-]	2.0-3.0	3.0-4.0

Tabella 6: Analisi comparativa dei parametri ingegneristici e operativi tra i sistemi XLAM e Blockbau, su Excel

Parametro	Unità di misura	XLAM (5 strati)	Blockbau
Tempo di montaggio	[giorni/m ²]	0.15-0.20	0.80-1.20
Precisione di taglio (CNC)	[mm]	± 2.0	± 10.0-15.0
Calo dimensionale	[mm/m]	Trascurabile	Elevato
Inerzia termica	[kJ/m ² K]	Media (60-80)	Alta (120-150)
Peso specifico medio	[kg/m ³]	~ 450-500	~ 400-450

L'impiego del pannello XLAM rappresenta il punto di equilibrio ottimale tra comportamento strutturale monolitico, efficienza operativa e compatibilità materica, configurandosi come la tecnologia più idonea in questo contesto.

I pannelli XLAM sono elementi strutturali massicci di tipo planare, realizzati mediante la sovrapposizione di multipli strati di tavole in legno, solitamente abete bianco o larice. La peculiarità del sistema risiede nella disposizione incrociata della fibratura, ruotata di 90° tra strati adiacenti, che conferisce al pannello un comportamento meccanico isotropo nel piano.

Il numero di strati varia da 3 (minimo funzionale) a 9 (ottimale per pareti portanti).

Deve essere subito sottolineato che, per ottenere un comportamento fisico-meccanico efficace e corrispondente alla definizione di elemento multistrato, il numero minimo di strati dovrebbe essere uguale a 5. Il pannello formato da 3 strati presenta nel proprio piano una direzione particolarmente debole dal punto di vista delle caratteristiche strutturali e meccaniche, presentando debolezza lungo l'asse longitudinale dominante, riducendo la rigidità torsionale. Nonostante questo, il pannello da 3 strati viene classificato come un pannello XLAM a tutti gli effetti secondo l'ETA-09/0012.

6.2 Prestazioni tecnologiche del sistema

6.2.1 Sostenibilità ambientale e analisi del ciclo di vita (LCA)

Il legno è l'unico materiale strutturale in grado di invertire l'impronta carbonica di un edificio. Il processo di crescita degli alberi agisce come un "polmone tecnologico", riducendo le emissioni di gas serra:

- Stoccaggio di carbonio: ogni metro cubo di legno assorbe circa 1 tonnellata di CO₂ atmosferica durante la crescita (bilancio ambientale dell'opera potenzialmente negativo (*Carbon Negative*));
- Emissioni nocive: durante la produzione, la colla poliuretanica monocomponente sfrutta l'umidità naturale del legno per la giunzione, eliminando solventi volatili ed emissioni nocive, a tutela della salute umana e dell'ambiente;
- Energia grigia: analisi del ciclo di vita (LCA) condotte secondo gli standard ISO 14040 evidenziano che l'energia necessaria per produrre un pannello XLAM è ridotta a circa 1/5 rispetto a quella richiesta per l'acciaio strutturale;
- Certificazione e filiera: l'approvvigionamento da foreste certificate PEFC o FSC garantisce una gestione forestale responsabile, dove il tasso di prelievo è inferiore al tasso di ricrescita naturale.

6.2.2 Efficienza energetica e igrometria

L'integrazione di moduli in XLAM permette di raggiungere standard prestazionali da *Near Zero Energy Building* (nZEB):

- Isolamento termico: la bassa conducibilità termica del legno ($\lambda \cong 0.13 \text{ W/mK}$) consente di abbattere drasticamente i ponti termici; in combinazione con isolanti naturali (fibra di legno), si ottengono trasmittanze basse con spessori d'involucro ridotti;
- Regolazione igrometrica: grazie alla sua natura igroscopica, il legno funge da regolatore naturale dell'umidità interna, mantenendo costantemente il range del 40-60%, ideale per la salute respiratoria degli utenti e per prevenire la formazione di condense superficiali.

6.2.3 Comportamento al fuoco: il fenomeno della carbonizzazione

La resistenza al fuoco dell'XLAM è elevata, perché il legno massiccio brucia in modo lento e prevedibile:

- Velocità di carbonizzazione: secondo l'Eurocodice 5, il legno carbonizza a una velocità nominale di circa 0,67 - 0,70 mm/min. Lo strato carbonizzato superficiale agisce da isolante termico, proteggendo gli strati interni che mantengono inalterate le proprie capacità meccaniche;
- Stabilità strutturale: mentre l'acciaio subisce un repentino decadimento della rigidità a 500°C, portando spesso al collasso improvviso, l'XLAM assicura tempi di evacuazione certi e sicuri con minimi accorgimenti (come l'aggiunta di lastre in gessofibra).

6.2.4 Risposta sismica e duttilità dei giunti

La sicurezza sismica è garantita dalla combinazione di due fattori: leggerezza e dissipazione.

- Forze inerziali: pesando circa 1/5 del calcestruzzo armato, le strutture in XLAM generano forze inerziali notevolmente ridotte durante il sisma;
- Sistema scatolare: il pannello XLAM si comporta come un setto rigido; quindi, la dissipazione dell'energia avviene nei giunti meccanici (viti, hold-down e angle brackets). Questa duttilità impedisce il collasso fragile della struttura, mantenendo l'integrità del guscio abitativo anche sotto forti sollecitazioni.

6.2.5 Ottimizzazione dei tempi di cantiere e logistica

La velocità di esecuzione non è solo un vantaggio economico, ma una necessità operativa quando si lavora in siti con accessibilità limitata:

- Prefabbricazione off-site: il sistema XLAM permette di spostare gran parte delle lavorazioni dal cantiere all'officina; i pannelli arrivano in sito già tagliati al millimetro tramite macchine a controllo numerico (CNC), completi di fori per serramenti e tracce per gli impianti;
- Montaggio a secco: l'assenza di getti e tempi di maturazione del calcestruzzo riduce drasticamente i tempi: si stima che l'elevazione di una struttura in XLAM richieda il 50-60% di tempo in meno rispetto alla muratura tradizionale;
- Cantiere pulito: la logistica permette di scaricare e montare i pannelli direttamente dal mezzo di trasporto alla posizione finale, eliminando la necessità di ampie aree di stoccaggio, spesso inesistenti in contesti arroccati.

6.2.6 Durabilità e strategie di manutenzione

Se progettata correttamente, una struttura in XLAM ha una vita utile pari o superiore a quella di un edificio in cemento armato.

- Dettaglio costruttivo: la durabilità si ottiene "per forma" e per trattamenti chimici. L'adozione di un piede di partenza rialzato (cordolo in acciaio o calcestruzzo) protegge la base dei pannelli dall'umidità di risalita capillare, mentre l'uso di membrane traspiranti e barriere al vapore (scudo igro-termico) gestisce la migrazione dell'umidità interna;
- Manutenzione predittiva: al contrario del calcestruzzo armato, dove la corrosione dei ferri è spesso invisibile, nel legno eventuali criticità (legate a infiltrazioni accidentali) sono facilmente rilevabili e localizzabili;
- Ispezioni e ciclo di vita: la manutenzione ordinaria si riduce a ispezioni decennali dei nodi strutturali e degli strati di finitura. Grazie alla modularità dei pannelli, eventuali riparazioni sono puntuali e meno invasive, garantendo l'efficienza per generazioni.

6.3 Produzione delle tavole

Il pannello XLAM rappresenta l'apice dell'industrializzazione del legno strutturale, basandosi su una stratificazione ortogonale di tavole selezionate con rigore millimetrico. La geometria dei singoli elementi, con spessori standard tra i 15 e i 30 mm e larghezze ottimizzate in multipli di 40 mm (da 80 a 240 mm), risponde a una duplice esigenza di efficienza produttiva: massimizzare la resa della materia prima e garantire la perfetta compatibilità con le tecnologie di taglio CNC, riducendo gli scarti a soli 2 mm.

Attualmente, l'XLAM non è regolato da una singola norma di prodotto armonizzata univoca, ma la produzione fa riferimento alle valutazioni tecniche europee (ETA - European Technical Assessment) specifiche per ogni produttore. Il ciclo produttivo segue, comunque, un protocollo standardizzato volto a garantire l'omogeneità meccanica del prodotto finito, in conformità con le norme EN 14081 ed EN 338, e si compone di fasi industrializzate.

1. Taglio e calibrazione delle lamelle

Il processo ha inizio in segatoi automatici ad alta precisione dove le tavole grezze vengono calibrate per uniformarne spessore e larghezza. In questa fase, le lamelle vengono predisposte per la continuità longitudinale attraverso giunzioni a secco (piallatura o pre-fresatura dei denti), garantendo una base geometricamente perfetta per le lavorazioni successive.

2. Essiccazione controllata e protezione naturale

È la fase critica per la stabilità dimensionale del pannello. Le tavole vengono trattate in forni a ciclo continuo (60°C - 80°C) per raggiungere un'umidità costante del 12% ($\pm 2\%$). Tale valore garantisce:

- Efficacia chimica: è il prerequisito fondamentale per la polimerizzazione degli adesivi strutturali;
- Durabilità naturale: al 12% di umidità il legno è immune dall'attacco di funghi e insetti xilofagi, eliminando la necessità di trattamenti chimici;
- Prestazione energetica: l'umidità controllata esalta le proprietà del legno come volano termico, fondamentale per il comfort indoor.

3. Classificazione meccanica e selezione qualitativa

Ogni tavola è sottoposta a uno screening rigoroso:

- Selezione visiva (EN 518): individuazione dei nodi cadenti o fessurazioni;
- Selezione meccanica: utilizzo di scanner automatici che eliminano le sezioni non conformi e assegnano la classe di resistenza.

4. Giunzione longitudinale (Finger Joint)

Per produrre elementi fino a 18 metri, si utilizza la tecnologia della giunzione "a pettine" incollata (EN 14080). Vengono realizzati denti con profondità di 8-12 mm, incollati con adesivi ad alta resistenza; il risultato è un giunto la cui capacità portante è spesso superiore a quella della tavola stessa ($f_{m,j} \geq f_{m,k}$), eliminando i punti deboli strutturali.

5. Configurazione dei giunti trasversali (fianco a fianco)

Il collegamento laterale tra tavole dello stesso strato può avvenire secondo tre modalità, variando in base al protocollo del produttore e alle esigenze estetiche/prestazionali:

- Incollaggio laterale continuo: tavole incollate anche sui fianchi, aumentando la rigidità torsionale e garantendo la massima ermeticità del pannello;
- Accostamento a secco (pressato): le tavole sono mantenute in posizione dalla pressione di assemblaggio degli strati incrociati; il giunto risulta visivamente chiuso, ma non è strutturalmente incollato;
- Giunto aperto: con intercapedini millimetriche (1-3 mm), utilizzato per specifiche esigenze di ventilazione o acustica.

6. Incollaggio multistrato e stratificazione ortogonale

Le facce dei singoli pannelli vengono incollati e ruotati a 90°, sovrapponendoli. Questa procedura viene svolta mediante adesivi poliuretani (PUR), oggi più diffusi rispetto ai classici adesivi a base di formaldeide (PRF/MUF). I poliuretani sono preferiti per la loro capacità di reagire meglio in condizioni di umidità variabile e per l'assenza di emissioni nocive, garantendo un'adesione strutturale che rispetta la norma EN 15425.

6.4 Stratigrafie

Particolare attenzione è stata rivolta alla caratterizzazione delle stratigrafie degli elementi che costituiscono l'edificio.

Sulla base della planimetria dimensionata in fase preliminare, sono stati delineati i setti strutturali primari e i setti non portanti secondari.

La pianta strutturale è riportata di seguito:

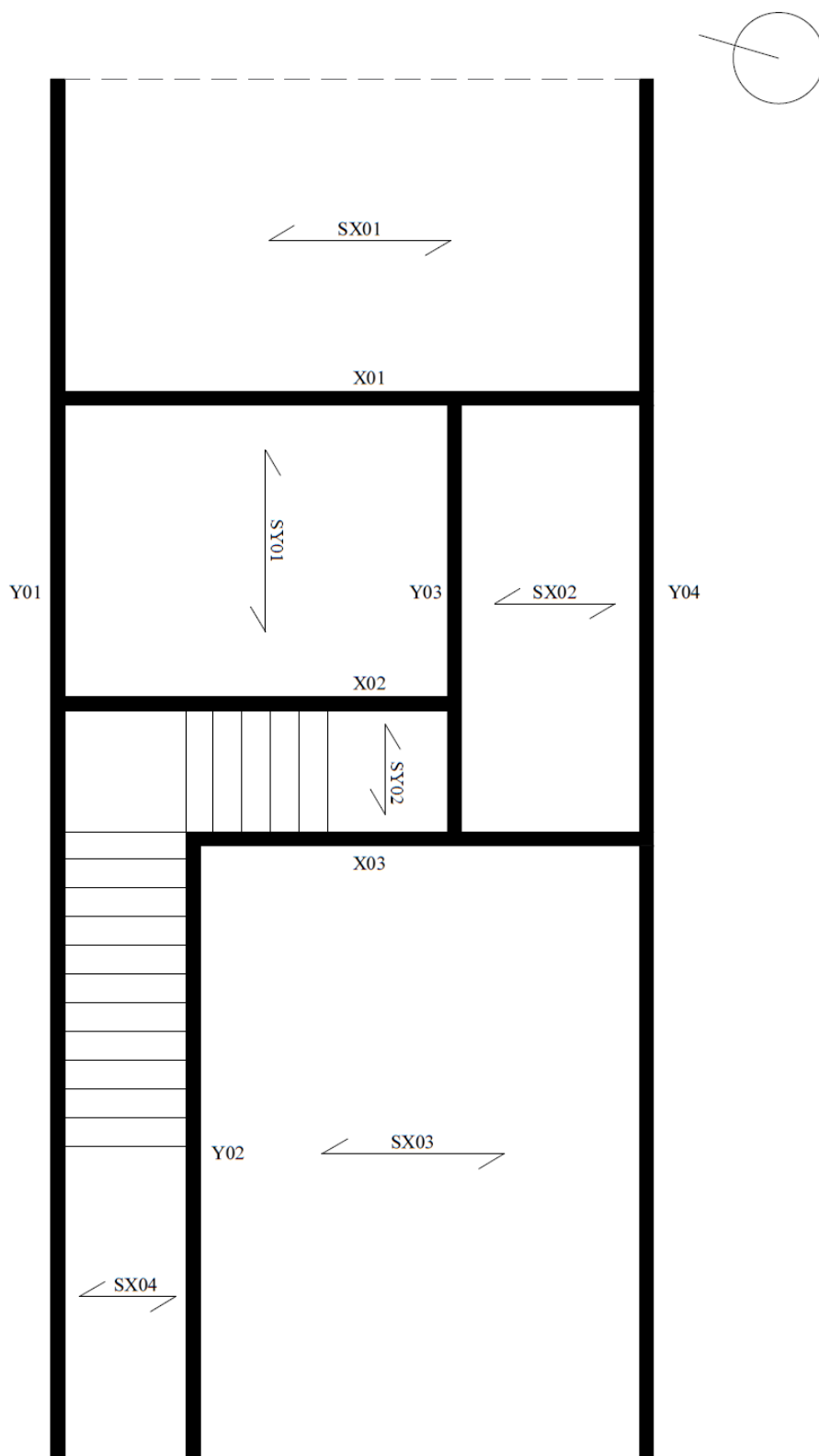


Figura 23: Pianta strutturale 2D rappresentante gli elementi strutturali portanti, su Autocad (elaborazione a cura dell'autrice)

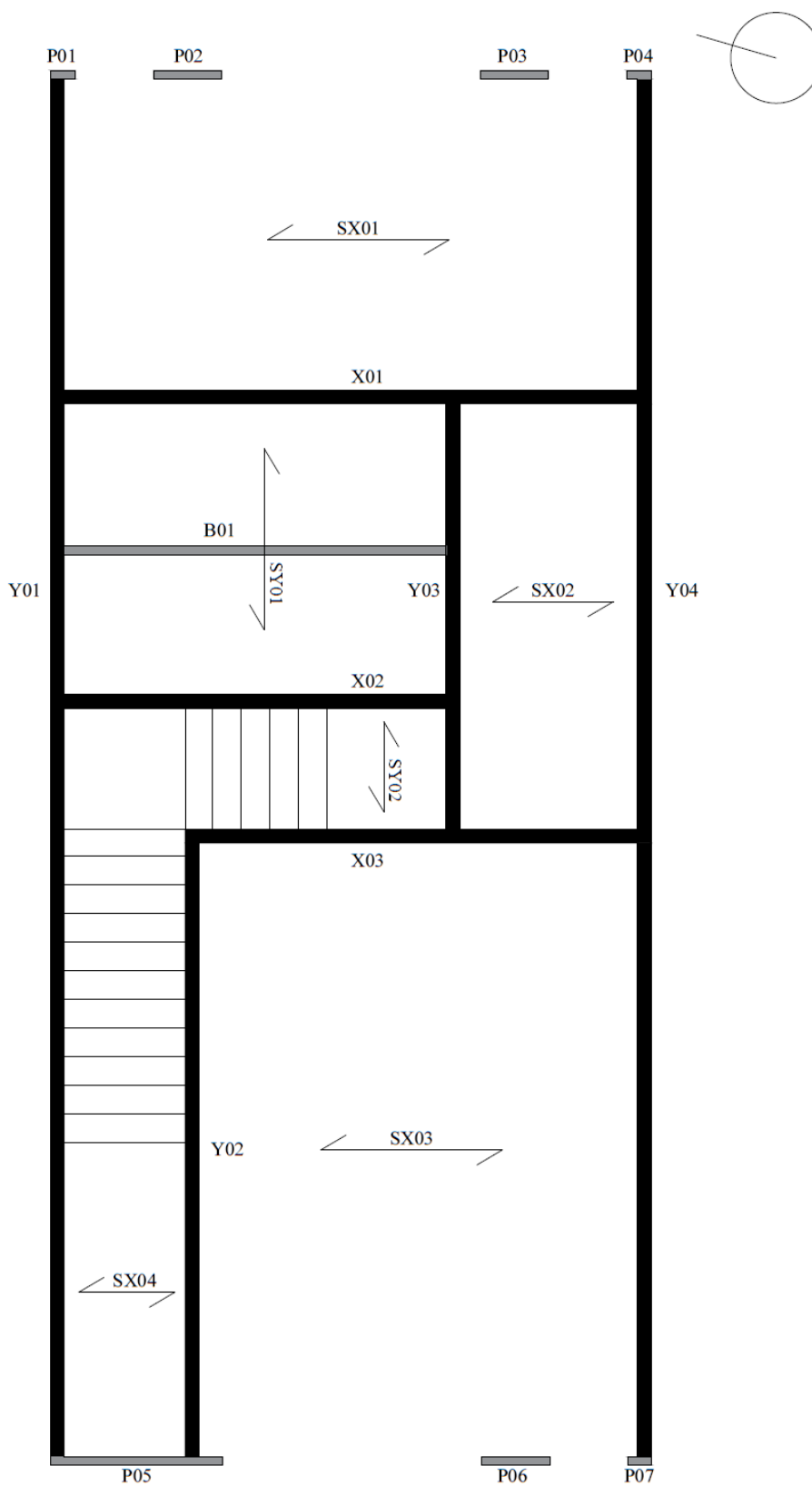


Figura 24: Pianta strutturale 2D rappresentante gli elementi strutturali portanti e non portanti, su Autocad (elaborazione a cura dell'autrice)

È stato adottato un approccio progettuale basato su setti portanti per la definizione dello schema strutturale principale. Si distinguono, pertanto, pareti verticali portanti nelle direzioni X e Y, pareti non portanti di chiusura in direzione X lungo il lato corto della pianta, solai bidirezionali con orditura in una direzione preferenziale, e un vano cavo destinato ad accogliere la scala di collegamento tra piano terra e piano primo.

Particolare rilievo è stato attribuito alla valorizzazione di produttori locali di materiali, privilegiando, ove possibile, imprese spagnole al fine di minimizzare i costi di trasporto e l'impatto ambientale.

Pertanto, la selezione del materiale portante, ovvero i pannelli XLAM, è ricaduta sulla ditta *Egoi*; si tratta di un'azienda spagnola leader nella bio-edilizia, specializzata nella progettazione e produzione di pannelli in legno lamellare a strati incrociati di alta qualità.

Utilizzando esclusivamente materie prime provenienti da foreste certificate a gestione sostenibile, questo produttore integra l'intero ciclo industriale, dalla segheria alla posa in opera.

Le proprietà meccaniche degli elementi XLAM saranno dettagliate nel capitolo dedicato (cfr. C.8). Nelle tabelle successive sono riportate le dimensioni degli elementi strutturali e il numero di strati di legno che compongono il pannello in CLT di ciascun elemento specifico:

- Per i pannelli del solaio di copertura la Tabella 7;
- Per i pannelli del solaio interpiano la Tabella 8;
- Per i pannelli delle pareti portanti esterne la Tabella 9;
- Per i pannelli delle pareti portanti interne la Tabella 10;
- Per i pannelli della parete divisoria interna la Tabella 11;
- Per i pannelli delle pareti non portanti esterne la Tabella 12.

Tabella 7: Dimensioni dei pannelli del solaio di copertura dell'edificio in legno, su Excel

Elementi	Lunghezza [m]	Larghezza [m]	Spessore strutturale [m]	Numero di strati	Spessore singoli strati [m]				
2 FALDE	14.78	3.53	0.200	5	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040

Tabella 8: Dimensioni dei pannelli del solaio interpiano dell'edificio in legno, su Excel

	Elementi	Lunghezza [m]	Larghezza [m]	Spessore strutturale [m]	Numero di strati	Spessore singoli strati [m]				
SOLAIO IN X	SX01	6.09	3.19	0.200	5	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040
	SX02	1.91	4.22							
	SX03	4.59	6.36							
	SX04	1.20	3.22							
SOLAIO IN Y	SY01	2.74	3.89	0.200	5	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040
	SY02	1.20	1.22							

Tabella 9: Dimensioni delle pareti portanti esterne dell'edificio in legno, su Excel

	Elementi	Lunghezza [m]	Spessore strutturale [m]	Numero di strati	Spessore singoli strati [m]				
PARETI IN Y	Y01	14.66	0.140	5	0.030	0.020	0.040	0.020	0.030
	Y04	14.66							

Tabella 10: Dimensioni delle pareti portanti interne dell'edificio in legno, su Excel

	Elementi	Lunghezza [m]	Spessore strutturale [m]	Numero di strati	Spessore singoli strati [m]				
PARETI IN X	X01	6.09	0.140	5	0.030	0.020	0.040	0.020	0.030
	X02	3.89							
	X03	4.88							
PARETI IN Y	Y02	6.36	0.140	5	0.030	0.020	0.040	0.020	0.030
	Y03	4.22							

Tabella 11: Dimensioni della parete divisoria interna dell'edificio in legno

Elementi	Lunghezza [m]	Spessore strutturale [m]	Numero di strati	Spessore singoli strati [m]		
B01	3.89	0.060	3	0.02	0.02	0.02

Tabella 12: Dimensioni delle pareti non portanti esterne dell'edificio in legno

	Elementi	Lunghezza [m]	Spessore strutturale[m] [m]	Numero di strati	Spessore singoli strati [m]		
PARETI IN X	P01	0.20	0.060	3	0.02	0.02	0.02
	P02	0.70					
	P03	0.70					
	P04	0.20					
	P05	1.20					
	P06	0.70					
	P07	0.20					

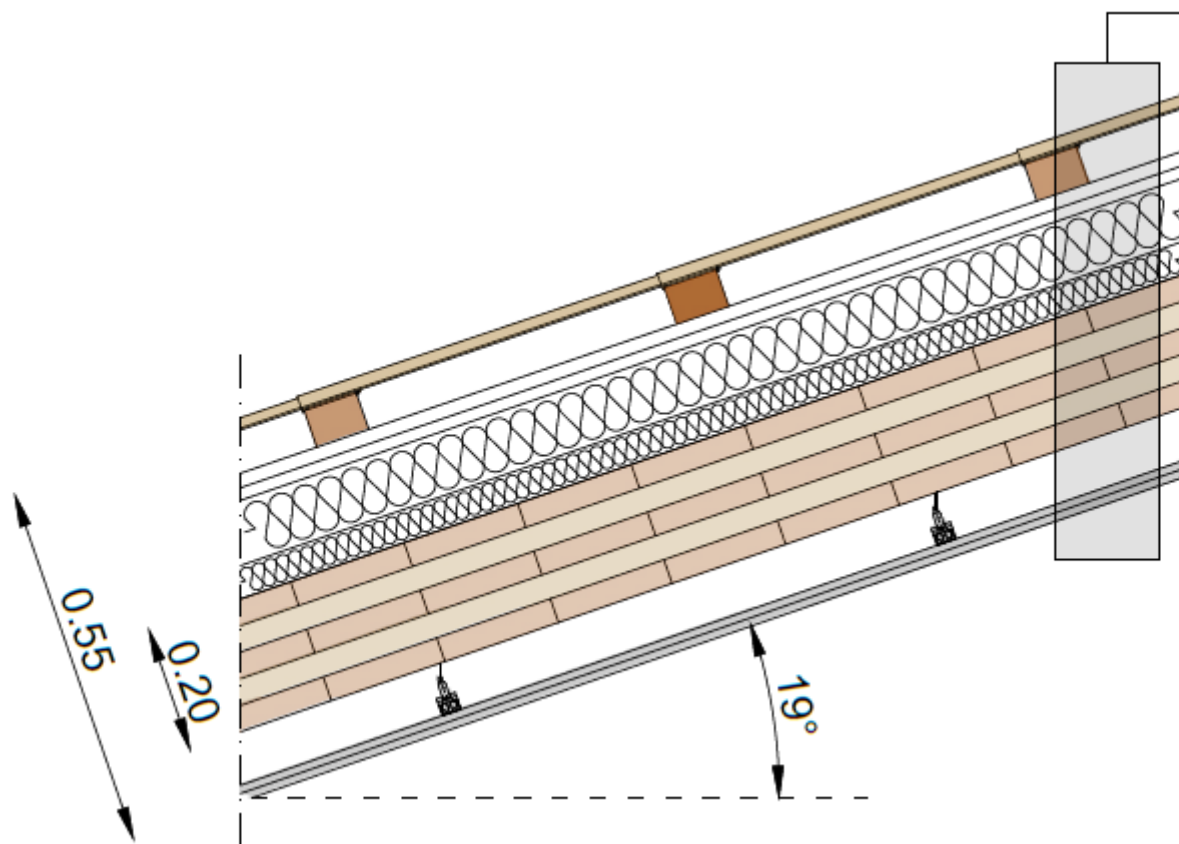
La dimensione dello spessore del solaio è stata definita in funzione dei limiti di deformabilità, mentre lo spessore delle pareti è principalmente governato dai carichi verticali agenti, nonché dalle esigenze di rigidità imposte dai carichi orizzontali.

Le scelte in merito agli spessori specifici vengono trattate e giustificate approfonditamente nel capitolo dedicato all'analisi strutturale (cfr. C.8).

Oltre alla parte strutturale portante in XLAM, è stata definita la selezione materica del pacchetto non strutturale, configurando così gli spessori totali degli elementi orizzontali e verticali.

Queste scelte derivano dallo stesso principio che ha orientato la selezione del produttore di pannelli XLAM, vale a dire la prioritizzazione di fornitori spagnoli.

Di seguito vengono illustrate le stratigrafie complete dei singoli elementi strutturali:



CHIUSURA ORIZZONTALE DI COPERTURA

Manto di copertura composto da doghe lisce in abete/cedro (25 mm spessore), impregnate in autoclave per lisciatura superficiale e resistenza UV (ditta Incofusta, Valencia)

Serie di listelli portategola in legno (60 mm)

Membrana sottogola antivapore traspirante tipo Fiberthem Multi UDB, 3 strati rinforzati in polipropilene (1mm)

Pannello CementoLegno tipo Betonwood N (spessore 22 mm, dimensioni 1220 x 520 mm)

Pannelli in fibra di legno naturale tipo Fiberthem Isorel (spessore 19 mm, dimensioni 2500 x 1200 mm)

Isolante Rockwool Tectum (100 mm)

Isolante acustico: Rockwool Rockmur (50 mm)

Pannello XLAM EGOIN CLT 200 - 5 strati Certificato ETA-12/0358 (200 mm)

Pendino con occhio aperto e gancio in acciaio con molla per profili a C tipo Knauf D112

Profilo con orditura metallica zincata a C per controsoffitti autoportanti tipo Knauf

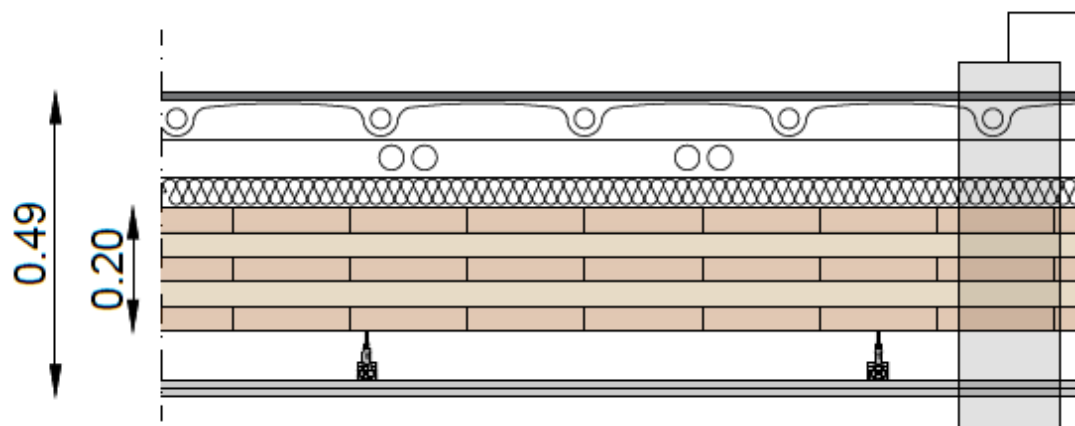
Legenda dei materiali

 ABETE/CEDRO

 LEGNO

 METALLO

Figura 25: Stratigrafia 2D della chiusura orizzontale di copertura, su Autocad (elaborazione a cura dell'autrice)



CHIUSURA ORIZZONTALE INTERPIANO

Gres porcellanato: 10+2 mm fughe (12 mm)

Massetto radiante: Uponor Minitemp argilla espansa + tubi radianti PEX 16x2 (65 mm)

Passaggio impianti: Scatole 50x50x60 mm + Canali 80x40 mm (60 mm)

Isolante acustico: Rockwool Rockmur (50 mm)

Pannello XLAM EGOIN CLT 200 - 5 strati Certificato ETA-12/0358 (200 mm)

Pendino con occhiolo aperto e gancio in acciaio con molla per profili a C tipo Knauf D112

Profilo con orditura metallica zincata a C per controsoffitti autoportanti tipo Knauf

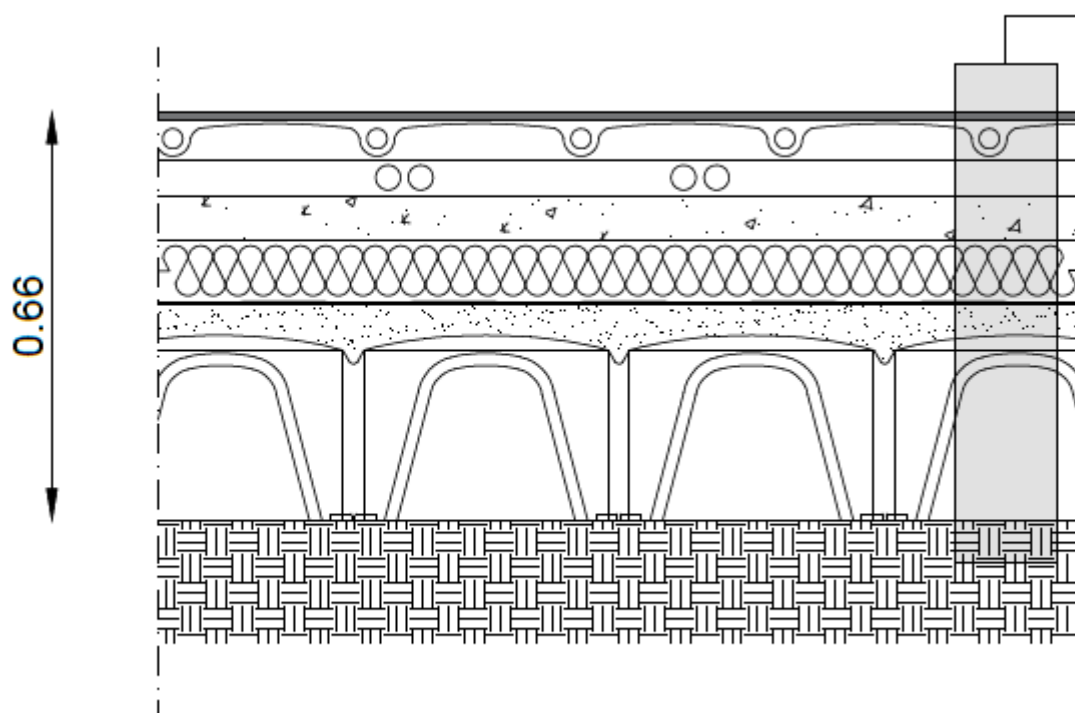
Legenda dei materiali

 GRES PORCELLANATO

 LEGNO

 METALLO

Figura 26: Stratigrafia 2D della chiusura orizzontale interpiano, su Autocad (elaborazione a cura dell'autrice)



CHIUSURA ORIZZONTALE CONTROTERRA

Gres porcellanato: 10+2 mm fughe (12 mm)

Massetto radiante: Uponor Minitemp argilla espansa + tubi radianti PEX 16x2 (65 mm)

Passaggio impianti: Scatole 50x50x60 mm + Canali 80x40 mm (60 mm)

Massetto di sottofondo in calcestruzzo (70 mm)

Isolante Rockwool Tectum (100 mm)

Guaina impermeabilizzante: Soprema Proteguarda (5 mm)

Magrone (50 mm)

Igloo areato: Daliform Iglù (300 mm)

Legenda dei materiali



TERRENO

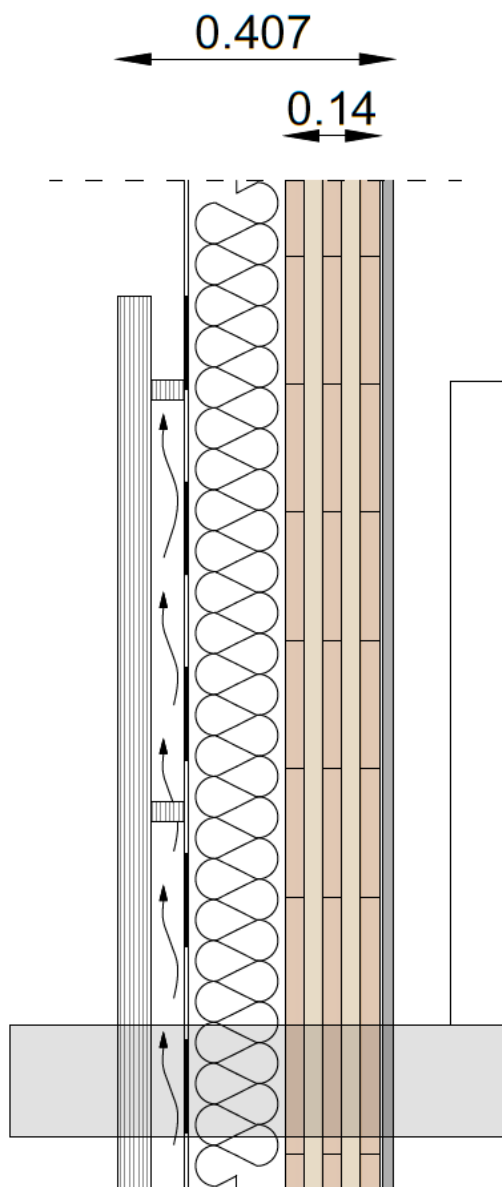


MAGRONE (CLS)



GRES PORCELLANATO

Figura 27: Stratigrafia della chiusura orizzontale controterra, su Autocad (elaborazione a cura dell'autrice)



PARETE VERTICALE PORTANTE ESTERNA

Rivestimento di facciata in tavole di legno per esterno - Garabandal Madera (Asturie):

Doghe larice siberiano termotrattato 27×148 mm - spessore 50 mm.

Fissaggio su listelli 28×58 mm (interasse 60 cm)

Intercapedine areata (50 mm)

Guaina traspirante permeabile al vapore certificata CTE - Delta Membranas Ibérica (Madrid): Delta-Vent S (Sd=0,15 m) (5 mm)

Cappotto isolante esterno - Rockwool "Rainscreen Duo Slab (145 mm)

Pannello XLAM EGOIN CLT 140 - 5 strati Certificato ETA-12/0358 (140 mm)

Rivestimento interno: 6mm colla Sikaflex®-221 di Sika España (Poliuretano modificato (MS Polymer), elastico, resistente a umidità e vibrazioni)

Pannello lamellare in abete bianco (Pinus sylvestris) CL24h di Derque Maderas (15 mm)

Legenda dei materiali



LARICE



POLIURETANO (COLLA)

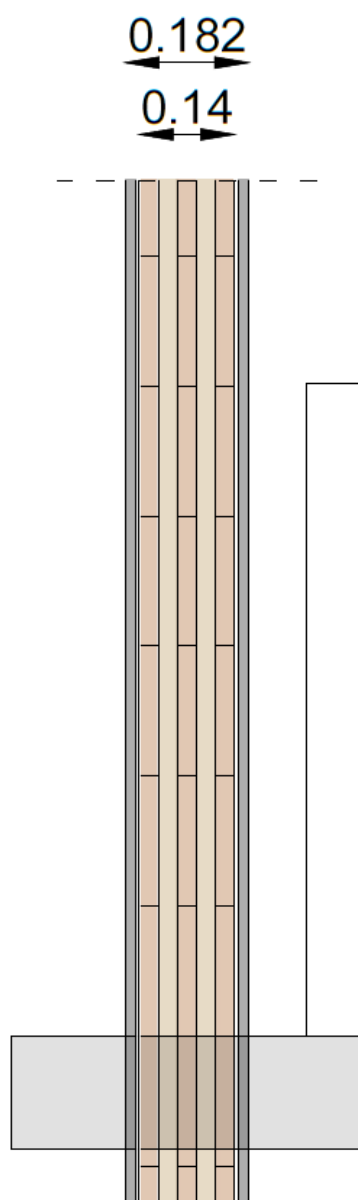


LEGNO



ABETE BIANCO

Figura 28: Stratigrafia della chiusura verticale portante esterna, su Autocad (elaborazione a cura dell'autrice)



PARETE VERTICALE PORTANTE INTERNA

Pannello lamellare in abete bianco (*Pinus sylvestris*) CL24h di Derque Maderas (15 mm)

Colla Sikaflex®-221 di Sika España (Poliuretano modificato (MS Polymer) (6 mm)

Pannello XLAM EGOIN CLT 140 - 5 strati Certificato ETA-12/0358 (140 mm)

Colla Sikaflex®-221 di Sika España (Poliuretano modificato (MS Polymer) (6 mm)

Pannello lamellare in abete bianco (*Pinus sylvestris*) CL24h di Derque Maderas (15 mm)

Legenda dei materiali



LARICE



POLIURETANO (COLLA)

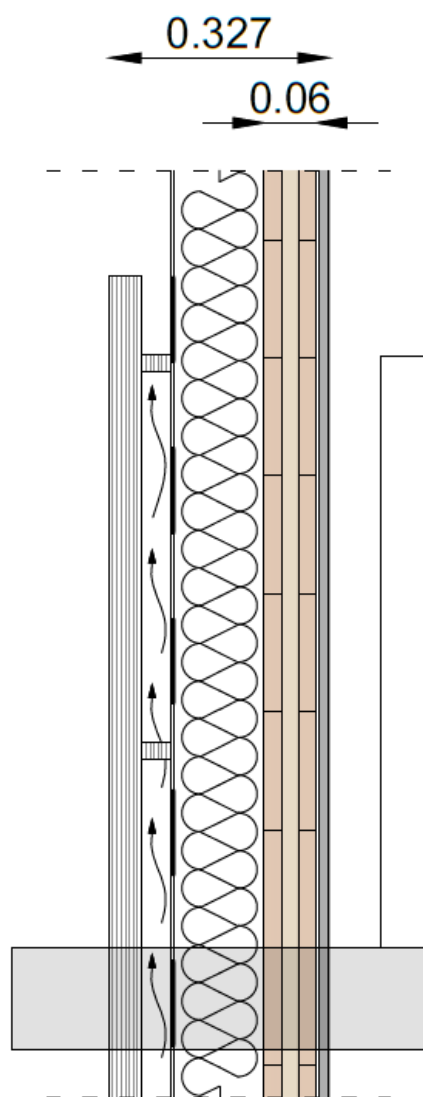


LEGNO



ABETE BIANCO

Figura 29: Stratigrafia della chiusura verticale portante interna, su Autocad (elaborazione a cura dell'autrice)



PARETE VERTICALE NON PORTANTE ESTERNA

Rivestimento di facciata in tavole di legno per esterno - Garabandal Madera (Asturie):
Doghe larice siberiano termotrattato 27×148 mm - spessore 50 mm.
Fissaggio su listelli 28×58 mm (interasse 60 cm)

Intercapedine areata (50 mm)

Guaina traspirante permeabile al vapore certificata CTE - Delta Membranas Ibérica (Madrid): Delta-Vent S
(Sd=0,15 m) (5 mm)

Cappotto isolante esterno - Rockwool "Rainscreen Duo Slab (145 mm)

Pannello XLAM EGOIN CLT 60 - 3 strati Certificato ETA-12/0358 (60 mm)

Rivestimento interno: 6mm colla Sikaflex®-221 di Sika España (Poliuretano modificato (MS Polymer), elastico,
resistente a umidità e vibrazioni)

Pannello lamellare in abete bianco (Pinus sylvestris) CL24h di Derque Maderas (15 mm)

Legenda dei materiali



LARICE



POLIURETANO (COLLA)

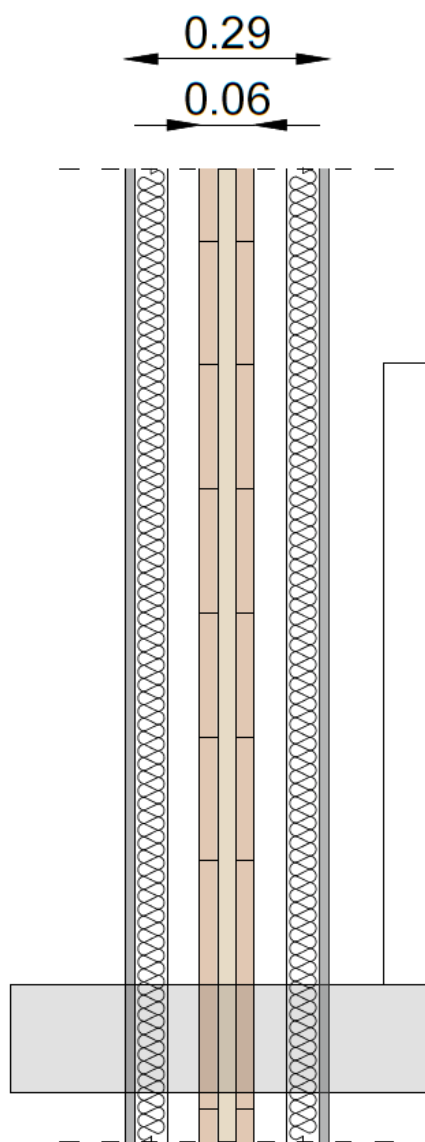


LEGNO



ABETE BIANCO

Figura 30: Stratigrafia della chiusura verticale non portante esterna, su Autocad (elaborazione a cura dell'autrice)



PARETE VERTICALE NON PORTANTE INTERNA

Rivestimento interno: HPL (Duropal, Polyrey España) + rasante (15 mm)

Isolante acustico: Rockwool Rockmur (50 mm)

Camera impianti (scatole + canalizzazioni) (50 mm)

Pannello XLAM EGOIN CLT 60 - 3 strati Certificato ETA-12/0358 (60 mm)

Camera impianti (scatole + canalizzazioni) (50 mm)

Isolante acustico: Rockwool Rockmur (50 mm)

Rivestimento interno: HPL (Duropal, Polyrey España) + rasante (15 mm)

Legenda dei materiali

 RESINA PLASTICA

 LEGNO

Figura 31: Stratigrafia della chiusura verticale non portante interna, su Autocad (elaborazione a cura dell'autrice)

CHIUSURA ORIZZONTALE DI COPERTURA (dall'alto verso il basso)

Il sistema di copertura, con uno spessore complessivo di 553 mm, è stato progettato privilegiando soluzioni a secco.

L'elemento di finitura esterna, costituito da doghe in abete/cedro su listellatura in legno funge da guscio protettivo primario. Il trattamento in autoclave garantisce la necessaria durabilità biologica in accordo alla norma UNE EN 335: è un processo industriale in cui il legno viene inserito in una camera a pressione e impregnato con sali protettivi che penetrano in profondità nelle fibre, creando una protezione che arriva alla doga. Questo trattamento è necessario poiché il legno, essendo un materiale organico, se rimane umido attira funghi, muffe e insetti xilofagi (che mangiano il legno).

La membrana traspirante *Fibertherm Multi UDB* assicura la tenuta all'acqua meteorica, lasciando al contempo evaporare il vapore acqueo proveniente dagli ambienti interni, prevenendo così condense interstiziali.

Il cuore tecnologico del pacchetto si basa sulla combinazione di materiali ad alta e bassa densità. La rigidità strutturale e la stabilità igrometrica sono affidate al pannello *CementoLegno Betonwood N*: in una copertura in legno, il carico (neve, vento o il peso proprio del manto) non deve gravare solo sui singoli listelli o sulle travi sottostanti, e il pannello in CementoLegno agisce come un piano rigido. Inoltre, avendo una densità molto elevata, è meno sensibile ai cicli di umidità rispetto ai pannelli in solo legno; è uno strato di protezione che impedisce che le variazioni di umidità esterna (pioggia, condensa) vadano a intaccare rapidamente l'isolante del pacchetto. Si tratta, inoltre, di un elemento che funge da volano inerziale: in fisica, un "volano" è un dispositivo che accumula energia per restituirla gradualmente; quindi, il pannello assorbe il calore durante le ore più calde e lo rilascia lentamente verso l'esterno quando la temperatura scende (ore notturne). Questo processo attenua il picco di calore che entra in casa, garantendo lo sfasamento termico.

A questo si affianca una sezione isolante stratificata: l'impiego della fibra di legno *Fibertherm Isorel* agisce come regolatore igroscopico e termico, migliorando lo sfasamento estivo, mentre il doppio strato di lana di roccia (*Rockwool Tectum* e *Rockmur*) garantisce prestazioni elevate sia sul piano della conducibilità termica che dell'abbattimento acustico.

La struttura portante è delegata al pannello *XLAM EGOIN CLT 200* (200 mm suddivisi in 5 strati), che conferisce all'intero organismo edilizio rigidità e capacità portante.

Riqualificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya, (Castilla-La Mancha, Spagna)

Infine, la finitura interna è completata da un controsoffitto tecnico con orditura metallica *Knauf*. La scelta di utilizzare pendini D112 con molla non è puramente funzionale al supporto del cartongesso, ma rappresenta una soluzione per il disaccoppiamento vibrazionale, garantendo che le sollecitazioni esterne non vengano trasmesse alla struttura, migliorando il comfort percepito all'interno degli spazi abitativi.

CHIUSURA ORIZZONTALE INTERPIANO (dall'alto verso il basso)

Il solaio interpiano, con uno spessore complessivo di 492 mm, è stato progettato come un sistema stratificato a secco/umido ottimizzato per la ripartizione dei carichi e il comfort acustico tra i diversi livelli dell'edificio. La soluzione adottata integra le funzioni strutturali con sistemi radianti a bassa inerzia e tecnologie per l'abbattimento del rumore da calpestio.

La parte superiore del pacchetto è definita da una finitura in gres porcellanato (12 mm) posata su un sistema di riscaldamento a pavimento di tipo *Uponor Minitemp*. Questo strato, composto da un massetto in argilla espansa (65 mm) che annega i tubi radianti PEX, funge da massa termica per la diffusione omogenea del calore.

Al di sotto del sistema radiante, è stato previsto uno strato tecnico (60 mm) dedicato al passaggio delle dorsali impiantistiche (scatole e canali), senza interferire con la struttura portante.

Viene inserito uno strato isolante in lana di roccia *Rockwool Rockmur* (50 mm) come dispositivo di disaccoppiamento vibrazionale; senza di esso, la struttura in legno diventerebbe un ponte acustico, trasmettendo ogni vibrazione da un piano all'altro. Inserendolo, si interrompe la continuità rigida tra la massa del massetto radiante in argilla espansa (pesante e rigido) e la massa del solaio in XLAM (pesante e rigido). È il principio “massa-molla-massa”, dove è lo strato isolante a subire una deformazione elastica, assorbendo gran parte dell'energia meccanica della vibrazione e dissipandola in calore per attrito tra le sue fibre, intrappolando il rumore prima che possa propagarsi attraverso la struttura portante.

Il supporto strutturale è costituito da un pannello in *XLAM EGOIN CLT 200* (200 mm suddivisi in 5 strati), che garantisce l'indefornabilità del solaio e resistenza meccanica.

Analogamente alla copertura, l'intradosso è completato da un sistema di controsoffittatura *Knauf* sospeso su pendini antivibranti D112. Questa intercapedine tecnica finale garantisce planarità estetica e contribuisce ulteriormente all'isolamento acustico aereo tra i piani, creando una camera d'aria che abbatte la trasmissione delle frequenze sonore.

CHIUSURA ORIZZONTALE CONTROTERRA (dall'alto verso il basso)

La chiusura orizzontale controterra è stata progettata per garantire l'isolamento dell'edificio dal terreno sottostante, prevenendo fenomeni di risalita capillare e assicurando la salubrità degli ambienti interni. Con uno spessore complessivo di 660 mm, il sistema integra tecnologie di ventilazione naturale e isolamento ad alta resistenza.

L'intradosso calpestabile è rifinito con un sistema radiante a bassa inerzia *Uponor Minitemp*. I tubi PEX sono annegati in un massetto di argilla espansa (65 mm), preceduto da uno strato tecnico (60 mm) per l'alloggiamento delle reti impiantistiche. Questa configurazione assicura una distribuzione uniforme del calore verso la pavimentazione in gres porcellanato (12 mm).

Al di sotto dello strato impiantistico si trova un massetto di sottofondo in calcestruzzo (70 mm). Questa soluzione sostituisce il pannello in XLAM, eliminando i rischi di degrado biologico legati alla vicinanza con il terreno. Il calcestruzzo garantisce un'ottima durabilità e funge da piano di ripartizione dei carichi verso gli strati isolanti sottostanti.

Lo strato isolante del pacchetto è costituito da pannelli in lana di roccia *Rockwool Tectum* (100 mm). Tale scelta garantisce elevate prestazioni termiche e, grazie alla natura incombustibile del materiale, aumenta la sicurezza al fuoco del sistema. L'impiego della medesima tecnologia isolante e del medesimo fornitore già adottati per le altre chiusure orizzontali (copertura e interpiano) garantisce compatibilità tecnica tra i diversi nodi costruttivi e ottimizza la gestione delle forniture di cantiere.

Al di sotto è presente una guaina impermeabilizzante ad alto spessore *Soprema Proteguarda* (5 mm) e uno strato di calcestruzzo magrone (50 mm), che fungono da sistemi di completamento per la sottostante parte a sigillare il pacchetto.

La base del sistema poggia su un vespaio areato realizzato con casseri a perdere *Daliform Iglù* (300 mm). Senza di esso, il pavimento appoggerebbe direttamente sulla terra o su un massetto pieno; poiché il terreno è naturalmente umido, l'acqua verrebbe assorbita per capillarità dai materiali da costruzione come una spugna, risalendo nelle strutture. I casseri a perdere creano un vuoto d'aria, così che l'umidità del terreno non ha un mezzo fisico per risalire verso il solaio in XLAM. L'aria stessa, quindi, funge da isolante. Inoltre, l'intercapedine creata dagli Iglù viene collegata all'esterno tramite dei tubi ("bocche di lupo") posti lungo il perimetro dell'edificio: si crea così un flusso d'aria costante effetto camino che raccoglie il Radon, gas radioattivo naturale che fuoriesce dal sottosuolo, e lo espelle in atmosfera prima che possa penetrare all'interno della casa.

PARETE ESTERNA PORTANTE (dall'interno verso l'esterno)

La parete perimetrale, con uno spessore complessivo di 407 mm, è stata progettata seguendo il modello costruttivo della facciata ventilata a secco.

All'interno, la finitura è realizzata con pannelli lamellari in abete bianco (*Derque Maderas*), incollati con adesivo poliuretano elastico *Sikaflex-221* di *Sika España* al pannello in *XLAM EGOIN CLT 140* (140 mm suddivisi in 5 strati), che svolge la funzione portante e costituisce la massa strutturale.

Per l'isolamento della facciata è stato previsto l'impiego di pannelli in lana di roccia a doppia densità, tipologia *Rockwool Rainscreen Duo Slab*. Questa scelta tecnologica è mirata a risolvere le criticità tipiche delle facciate ventilate: la superficie esterna ad alta densità garantisce stabilità meccanica contro l'azione erosiva del flusso d'aria nell'intercapedine (nelle facciate ventilate l'aria corre veloce dietro il legno e un isolante morbido si rovinerebbe), mentre l'interno più elastico assicura l'aderenza al supporto in XLAM, annullando i ponti termici per convezione.

Inoltre, essendo lana di roccia, è incombustibile (Euroclasse A1), caratteristica fondamentale per le pareti ventilate, che per loro costruzione alimentano eventuali fiamme.

A protezione del pacchetto isolante è posta la guaina traspirante *Delta-Vent S (Delta Membranas Ibérica)*. Tale membrana assicura la tenuta al vento e all'acqua, mantenendo un'alta permeabilità al vapore. La scelta di una membrana con un valore di $S_d = 0.15 m$ è stata determinata dalla necessità di favorire la massima diffusione del vapore acqueo verso l'intercapedine ventilata. Infatti, il vapore acqueo prodotto all'interno della casa (cucina, bagno, traspirazione umana) deve poter uscire verso l'esterno. Se la membrana avesse un valore di $S_d = 50 - 100 m$, il vapore rimarrebbe intrappolato nel pannello isolante e causerebbe condensa interstiziale, rovinando le prestazioni termiche e strutturali della parete.

Il valore di $S_d [m]$ rappresenta lo spessore di una colonna d'aria ferma che offre la stessa resistenza al passaggio del vapore acqueo del materiale in esame; è il parametro tecnico fondamentale per misurare quanto un materiale è "traspirante" o, viceversa, quanto fa da "barriera" al passaggio del vapore acqueo.

Il rivestimento esterno è costituito da doghe in larice siberiano termotrattato (prodotto dalla ditta *Garabandal Madera, Asturias*). Le doghe sono fissate su una sottostruttura di listelli che crea l'intercapedine areata di 50 mm. Questo spazio è fondamentale per l'attivazione dell'effetto camino: in estate, il moto convettivo dell'aria rimuove il calore accumulato dal rivestimento, mentre in inverno favorisce l'evacuazione del vapore acqueo proveniente dall'interno.

PARETE INTERNA PORTANTE (dal nucleo centrale verso gli ambienti interni)

La parete interna portante, con uno spessore complessivo di 182 mm, è stata progettata per assolvere alle funzioni portanti definite dall'assetto strutturale dell'edificio. La struttura si basa su un sistema a secco.

Il nucleo strutturale è costituito da un pannello in *XLAM EGOIN CLT 140* (140 mm suddivisi in 5 strati), che assicura la stabilità globale dell'edificio e la ripartizione dei carichi verticali.

Su entrambe le facce del setto portante è applicato un rivestimento in pannelli lamellari di abete bianco (15 mm), prodotti da *Derque Maderas*.

L'integrazione tra la finitura e il nucleo in XLAM avviene tramite l'uso di un adesivo poliuretano modificato, lo *Sikaflex-221* di *Sika España*. Non è stato inserito un pannello isolante tradizionale, essendo una stratigrafia finalizzata a separare ambienti della stessa abitazione. La funzione di smorzamento acustico è affidata allo strato di *Sikaflex-221*, che agisce come un giunto elastico continuo, interrompendo la trasmissione delle vibrazioni sonore tra il rivestimento superficiale e il nucleo strutturale in XLAM.

PARETE ESTERNA NON PORTANTE (dall'interno verso l'esterno)

Si è optato per una soluzione di continuità tecnologica rispetto alla parete portante esterna precedentemente analizzata: il pacchetto di finitura e isolamento rimangono invariati, mantenendo il sistema a facciata ventilata con doghe in larice termotrattato, l'intercapedine areata e lo strato isolante in *Rockwool Rainscreen Duo Slab*.

L'unica variazione funzionale riguarda lo strato XLAM: in questo caso, non essendo richiesta una resistenza portante elevata, lo spessore del pannello strutturale viene ridotto a 60 mm di *XLAM EGOIN CLT 60* (60 mm suddivisi in 3 strati). Questa differenziazione permette di alleggerire la struttura complessiva e ottimizzare l'uso del materiale, mantenendo, però, inalterate le prestazioni termo-igrometriche e l'estetica dell'edificio.

PARETE VERTICALE INTERNA NON PORTANTE (dal nucleo centrale verso gli ambienti interni)

La parete divisoria tra i 2 bagni interni all'abitazione, con uno spessore complessivo di 290 mm, è stata configurata per garantire un isolamento acustico superiore e protezione contro l'umidità.

Il nucleo strutturale è costituito da un pannello in *XLAM EGOIN CLT 60* (60 mm suddivisi in 3 strati), che conferisce la necessaria rigidità al setto.

Ai lati del nucleo sono state ricavate due camere tecniche (50 mm ciascuna), dedicate all'alloggiamento delle scatole elettriche e delle canalizzazioni idrauliche.

Per garantire un elevato potere fonoisolante, ogni lato è isolato con un pannello in lana di roccia *Rockwool Rockmur* (50 mm).

La finitura superficiale è realizzata con pannelli in *HPL (Duropal/Polyrey)* applicati con rasante (15 mm). Trattandosi di un materiale non poroso, resistente all'acqua, al vapore e agli agenti chimici detergenti, il rivestimento interno offre una superficie igienica e durevole, ideale per ambienti soggetti a elevati tassi di umidità.

Questa configurazione permette di isolare efficacemente i rumori derivanti dagli scarichi idraulici e dalle attività all'interno dei locali bagno, mantenendo un'elevata qualità dell'aria e impermeabilità dei rivestimenti in HPL.

SERRAMENTI

Essendoci ampie superfici vetrate a tutta altezza sia al piano terra (PT) che al piano primo (P1), è stata adottata una soluzione tecnologicamente uniforme, differenziata solo nelle modalità di apertura per rispondere alle specifiche esigenze di sicurezza di ogni quota.

La scelta è ricaduta sul sistema in alluminio a taglio termico *Cor-Vision 88* della ditta spagnola *Cortizo*. La configurazione operativa è stata declinata come segue:

- Piano Terra (PT): si è optato per il sistema *Cor-Vision 88 2+2 ante scorrevoli*, garantendo la piena transitabilità pedonale verso gli spazi esterni: la tecnologia di scorrimento permette di movimentare ante fino a 320 kg, gestendo le importanti dimensioni delle superfici vetrate;
- Piano Primo (P1): per ragioni di sicurezza, è stata esclusa la movimentazione integrale delle ante, e si è adottata una soluzione con parte fissa inferiore e sistema *Cor-Vision 88 oscillo-ventilante motorizzato* in sommità. L'apertura a vasistas, gestita tramite attuatori elettrici a 24V e dotata di sensori di sicurezza, permette un'aerazione controllata senza compromettere l'estetica e la protezione degli utenti.

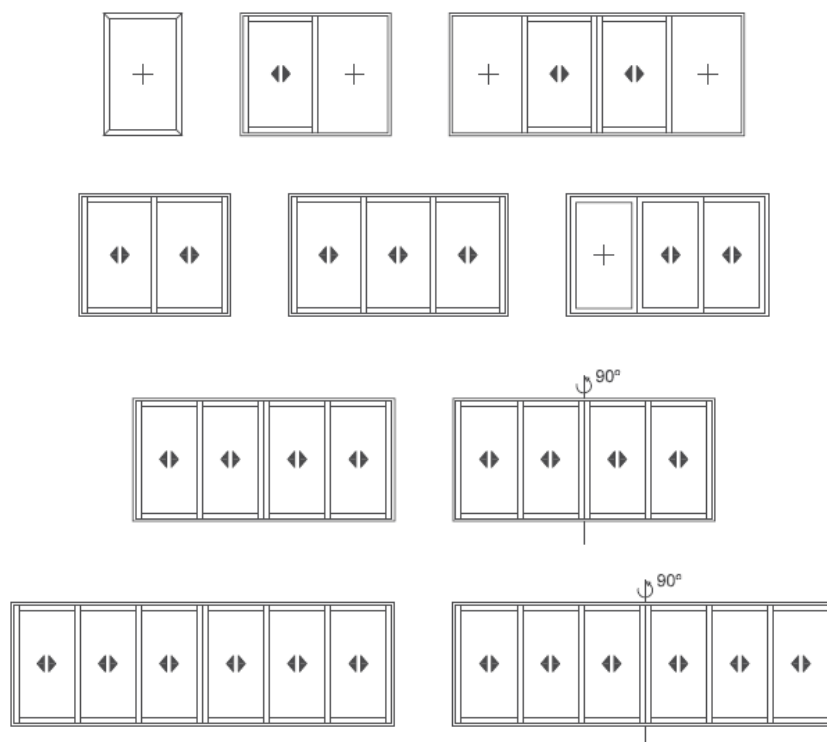

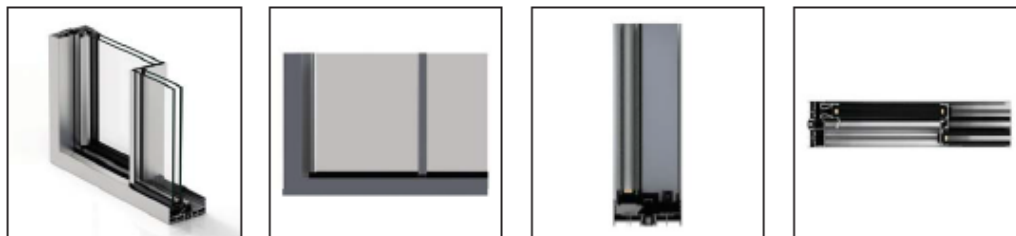


Figura 32: Possibili configurazioni per il serramento *Cor-Vision 88*

Di seguito, viene riportata la scheda tecnica del prodotto.

 **COR VISION - DATOS TÉCNICOS**

Muestra ensayada por **Aluminios CORTIZO S.A.**



Transmitancia

U_H desde 1,3 (W/m²K)

Consultar tipología, dimensión y vidrio.

Zonas de cumplimiento del CTE* : A B C D E
*En función de la transmitancia del vidrio.

Aislamiento acústico

Máximo acristalamiento: 30 mm.

Máximo aislamiento acústico $R_w = 41$ dB

Secciones

Espesor perfilería

Marco 116 mm.

Puerta 1,7 mm.

Marco 182 mm. (tricarriil)

Hoja 37 mm.

Longitud varilla poliamida: de 16 a 24 mm.

Categorías alcanzadas en banco de ensayos

Permeabilidad al aire

(UNE-EN 12207:2000): Clase 4

Estanqueidad al agua

(UNE-EN 12208:2000): Clase 7A

Configuración de drenajes por gravedad mediante tubo Ref. 812040.

Resistencia al viento

(UNE-EN 12210:2000): Clase C5

Ensayo de referencia 1,23 x 1,55 m. 1 hoja + 1 fijo.

Acabados

Posibilidad bicolor.

Lacado colores (RAL, moteados y rugosos).

Lacado imitación madera.

Lacado antibacteriano.

Anodizado.

Posibilidades de apertura

Corredera de 2, 3, 4 y 6 hojas.

Posibilidad tricarriil.

Posibilidad monocarriil (1 hojas + 1 fijo).

Posibilidad de encuentros a 90° sin parteluz.

Dimensiones máximas

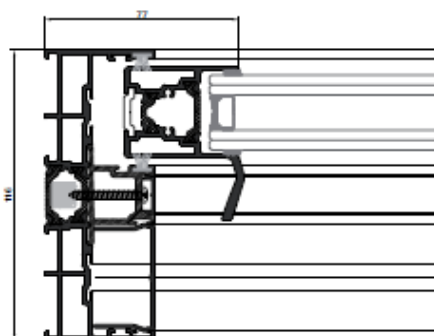
Ancho (L) = 4.400 mm.

Alto (H) = 3.000 mm.

Puerta 2 hojas.

Consultar peso y dimensiones máximas para el resto de tipologías.

Peso máximo/hoja 320 Kg.



Manuel Millán Martínez
Director de I+D+i

Este documento no es válido sin los correspondientes informes de ensayo.

Éstos resultados sólo se refieren a las muestras ensayadas por Aluminios CORTIZO S.A. en sus instalaciones de Padrón y no indican una característica de constancia en la calidad de la producción.

Figura 33: Scheda tecnica dell'infisso scelto

6.5 Ventilazione meccanica controllata (VMC)

L'adozione di sistemi costruttivi in pannelli di legno massiccio a strati incrociati comporta il raggiungimento di elevati standard di tenuta all'aria dell'involucro edilizio. Sebbene tale caratteristica sia fondamentale per l'efficienza energetica e l'eliminazione dei ponti termici, essa limita drasticamente il ricambio d'aria naturale che avveniva per infiltrazione nelle strutture tradizionali.

Per questo motivo, la ventilazione meccanica controllata non è configurata come un semplice impianto accessorio, ma come un componente essenziale per:

1. Preservazione dell'integrità strutturale: il controllo costante dei tassi di umidità relativa previene la saturazione igrometrica dei pannelli in XLAM, evitando il rischio di marcescenze o proliferazioni fungine;
2. Qualità dell'aria interna (IAQ): rimozione costante di inquinanti interni (VOC, CO₂, Radon) e l'immissione di aria filtrata da pollini e polveri sottili;
3. Comfort termico in climi continentali: data l'escursione termica tipica della zona di Castilla-La Mancha, il sistema permette di ventilare senza disperdere l'energia termica accumulata dalla massa del legno.

Il dimensionamento del sistema è stato condotto seguendo i parametri definiti dalla normativa normativa di riferimento per la qualità dell'aria e la ventilazione negli edifici residenziali (CTE DB-HS 3 (*Código Técnico de la Edificación - Documento Básico Higiene, Salud y Protección del Medio Ambiente*)), che stabilisce i rapporti di ricircolo in base alla volumetria e alla destinazione d'uso degli spazi.

Per le zone residenziali (camere da letto e bagni), è stato identificato come valore ottimale un ricambio pari a 0.5 vol/h (con un minimo di 0.3 vol/h).

Per ciascun appartamento dell'unità duplex (di volume stimato 195 m³), si calcola la portata di progetto nominale che deve garantire costantemente l'impianto per la ventilazione meccanica per mantenere l'aria salubre:

$$portata\ di\ progetto = 195\ m^3 \cdot 0.5\ \frac{vol}{h} = 97.5\ \frac{m^3}{h}$$

Dove:

- Coefficiente di ricambio 0.5 vol/h: questo valore indica che viene cambiata metà dell'aria totale della casa ogni ora (ogni 2 ore l'aria all'interno dell'appartamento è stata completamente sostituita con aria fresca esterna).

È stato precedentemente incluso nelle scelte stratigrafiche l'impiego di un massetto radiante: il pannello radiante gestisce il carico termico (caldo/freddo) con la massima inerzia, mentre la VMC si occupa della qualità dell'aria e del controllo igrometrico, evitando condense superficiali sul pavimento in estate.

La scelta dell'impianto per la VMC è ricaduta su un'unità di ventilazione centralizzata orizzontale da controsoffitto con recuperatore entalpico: in coerenza con il calcolo volumetrico dell'appartamento, è stata selezionata l'unità di ventilazione centralizzata *Zehnder ComfoAir Q200* nella versione *ERV (Energy Recovery Ventilation)* con scambiatore entalpico).

La macchina vanta una portata d'aria massima di 200 m³/h ma per il singolo appartamento si prevede tarata su una portata nominale di circa 100 m³/h. Operando a circa il 50% della sua capacità massima, l'unità garantisce un funzionamento estremamente silenzioso.

La tecnologia *FlowControl* integrata permette di mantenere costante il volume d'aria immesso ed estratto, compensando automaticamente le inevitabili perdite di carico dovute ai filtri o alla lunghezza delle tubazioni.

Durante i mesi invernali, quando l'aria esterna è estremamente secca, il recupero dell'umidità interna impedisce che il legno si secchi eccessivamente e garantisce che l'umidità relativa interna rimanga nel range di comfort (45%-55%).

L'unità è equipaggiata con un sistema di filtrazione a doppio stadio:

- Filtro F7 in immissione: una barriera ad alta efficienza capace di trattenere pollini, spore e polveri sottili, garantendo un ambiente ipoallergenico;
- Filtro G4 in estrazione: posizionato per proteggere lo scambiatore di calore dalle impurità provenienti dagli ambienti interni (polvere domestica, fibre tessili).

6.6 Trasmittanza

Le zone climatiche definite dal CTE, specificamente attraverso il documento DB-HE "*Ahorro de Energía*", rappresentano un quadro normativo fondamentale per la classificazione climatica delle località spagnole, basato su parametri di severità termica invernale ed estiva che influenzano direttamente il dimensionamento termoigrometrico dell'involucro edilizio.

La normativa distingue cinque categorie di severità per il periodo invernale (nominate con lettere da A ad E, in ordine crescente di rigore) e quattro per quello estivo (identificate dai numeri da 1 a 4). Questa classificazione deriva da un'analisi integrata di variabili quali temperature medie, gradi-giorno di riscaldamento, irraggiamento solare e ore di insolazione.



Figura 34: Mappa della severità climatica invernale in Spagna (Fonte: DB-HE)

La suddivisione cartografica consente di identificare aree omogenee per comportamento termico. La regione della Castilla-La Mancha è caratterizzata da un clima mediterraneo continentale, segnato da marcate escursioni termiche stagionali. Il territorio si articola prevalentemente in tre zone climatiche invernali, la cui distribuzione segue il profilo altimetrico locale:

- Zona C: caratterizzata da una severità climatica contenuta, tipica delle aree pianeggianti;
- Zona D: fascia dominante, espressione di una severità intermedia;
- Zona E: tipica delle aree montane, dove l'elevata altitudine determina condizioni rigide.

La prevalenza della Zona D delinea un microclima in cui inverni rigidi (con temperature minime che oscillano generalmente tra 0°C e 5°C) sono mitigati da un elevato soleggiamento diurno.

Per una verifica puntuale applicata al caso specifico, si fa riferimento alla Tabella A dell'Allegato B del DB-HE, che correla la zona climatica alla provincia e all'altitudine sul livello del mare. Moya, ubicata ad un'altitudine di 1150 m s.l.m., afferisce alla zona climatica D2: "D" per la componente invernale (severità intermedia) e "2" per quella estiva (comfort estivo ottenibile con ventilazione naturale e schermature moderate).

Tale classificazione vincola il progetto al rispetto di specifici parametri di trasmittanza termica (U , espressa in W/m^2K) per l'involucro, da verificarsi in conformità alla norma UNE-EN ISO 6946 e ai coefficienti di calcolo tabulati nel CTE.

Per la zona climatica D, i parametri di riferimento estratti dalla Tabella 3.1.1.a del CTE sono i seguenti:

- Pareti verticali opache: $U_M < 0.41 W/m^2K$;
- Coperture opache: $U_C < 0.35 W/m^2K$;
- Solai verso terreno/esterno: $U_T < 0.65 W/m^2K$;
- Chiusure trasparenti (infissi): $U_W < 1.80 W/m^2K$.

Di seguito, viene riportato il riferimento normativo da cui sono stati estratti i limiti di trasmittanza.

Tabella 13: Valori limite di trasmittanza termica, funzione della zona climatica invernale

3.1.1 Transmittancia de la envolvente térmica

- 1 La *transmittancia térmica* (U) de cada elemento perteneciente a la *envolvente térmica* no superará el valor límite (U_{lim}) de la tabla 3.1.1.a-HE1:

Tabla 3.1.1.a - HE1 Valores límite de *transmittancia térmica*, U_{lim} [W/m^2K]

Elemento	Zona climática de invierno					
	α	A	B	C	D	E
Muros y suelos en contacto con el aire exterior (U_s , U_M)	0,80	0,70	0,56	0,49	0,41	0,37
Cubiertas en contacto con el aire exterior (U_C)	0,55	0,50	0,44	0,40	0,35	0,33
Muros, suelos y cubiertas en contacto con espacios no habitables o con el terreno (U_T) Medianerías o particiones interiores pertenecientes a la <i>envolvente térmica</i> (U_{MD})	0,90	0,80	0,75	0,70	0,65	0,59
<i>Huecos</i> (conjunto de marco, vidrio y, en su caso, cajón de persiana) (U_H)*	3,2	2,7	2,3	2,1	1,8	1,80
Puertas con superficie semitransparente igual o inferior al 50%				5,7		

*Los *huecos* con uso de escaparate en *unidades de uso* con actividad comercial pueden incrementar el valor de U_H en un 50%.

La determinazione della zona climatica di un sito può essere ricavata anche mediante l'incrocio tra l'appartenenza geografica (provincia) e l'altitudine sul livello del mare del sito in esame. La Tabella a-Anejo B codifica tale relazione, classificando il territorio spagnolo in base alla severità climatica.

Tabella 14: Determinazione della zona climatica in base alla provincia di appartenenza e all'altitudine sul livello del mare del sito

Anejo B Zonas climáticas

1 Zonas climáticas

- 1 La tabla a-Anejo B permite obtener la zona climática (Z.C.) de un emplazamiento en función de su provincia y su altitud respecto al nivel del mar (h):

Tabla a-Anejo B. Zonas climáticas

Provincia	Altitud sobre el nivel del mar (h)																						
	≤ 50 m	51 - 100 m	101 - 150 m	111 - 200 m	201 - 250 m	251 - 300 m	301 - 350 m	351 - 400 m	401 - 450 m	451 - 500 m	501 - 550 m	551 - 600 m	601 - 650 m	651 - 700 m	701 - 750 m	751 - 800 m	801 - 850 m	851 - 900 m	901 - 950 m	951 - 1000 m	1001 - 1050 m	1051 - 1250 m	1251 - 300 m
Albacete	C3					D3					E1												
Alicante/Alacant	B4			C3			D3																
Almería	A4		B4		B3		C3		D3														
Araba/Álava	D1					E1																	
Asturias	C1		D1					E1															
Ávila	D2					D1					E1												
Badajoz	C4				C3		D3																
Balears, Illes	B3			C3																			
Barcelona	C2		D2		D1		E1																
Bizkaia	C1		D1																				
Burgos	D1					E1																	
Cáceres	C4					D3					E1												
Cádiz	A3		B3		C3		C2		D2			E1											
Cantabria	C1		D1					E1															
Castellón/Castelló	B3		C3			D3		D2			E1												
Ceuta	B3																						
Ciudad Real	C4				C3		D3																
Córdoba	B4		C4			D3																	
Coruña, A	C1		D1																				
Cuenca	D3					D2			E1														
Gipuzkoa	D1					E1																	
Girona	C2		D2		E1																		
Granada	A4		B4		C4		C3		D3			E1											
Guadalajara	D3					D2		E1															
Huelva	A4		B4		B3		C3		D3														
Huesca	C3			D3		D2		E1															
Jaén	B4			C4		D3			E1														
León	E1																						
Lleida	C3		D3			E1																	
Lugo	D1					E1																	
Madrid	C3					D3			D2		E1												
Málaga	A3		B3		C3		D3																
Melilla	A3																						
Murcia	B3		C3			D3																	
Navarra	C2		D2		D1		E1																
Ourense	C3		C2		D2			E1															
Palencia	D1					E1																	
Palmas, Las	α3			A2		B2			C2														
Pontevedra	C1		D1																				
Rioja, La	C2		D2			E1																	
Salamanca	D2					E1																	
Santa Cruz de Tenerife	α3			A2		B2			C2														
Segovia	D2					E1																	
Sevilla	B4		C4			E1																	
Soria	D2				D1		E1																
Tarragona	B3		C3			D3																	
Teruel	C3			C2		D2			E1														
Toledo	C4					D3					E1												
Valencia/València	B3		C3			D2			E1														
Valladolid	D2					E1																	
Zamora	D2					E1																	
Zaragoza	C3		D3			E1																	

Ai fini della corretta impostazione della verifica della trasmittanza termica, è necessaria una preliminare identificazione delle superfici a diretto contatto con l'ambiente esterno o con zone non climatizzate. Tali componenti costituiscono il confine del volume riscaldato e rappresentano le interfacce critiche attraverso cui avvengono le dispersioni termiche dell'involucro.

Sono state analizzate le seguenti stratigrafie:

Riquilificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya,
(Castilla-La Mancha, Spagna)

- Solaio di copertura (Tabella 15): elemento di chiusura superiore, soggetto alle massime sollecitazioni termiche stagionali;
- Solaio controterra (Tabella 16): elemento di separazione tra il volume abitabile e il suolo;
- Parete verticale portante (opaca) (Tabella 17): sistema in CLT a 5 strati;
- Parete verticale non portante (vetrata) (Tabella 18): sistema in CLT a 3 strati integrato con ampie superfici trasparenti;
- Infissi (Tabella 19): componenti trasparenti che, in combinazione con il telaio, definiscono il punto di maggiore criticità per le dispersioni termiche lineari e puntuali.

Tabella 15: Calcolo della trasmittanza per il solaio di copertura, in Excel

STRATIGRAFIA SCELTA (dall'alto al basso)	Spessori [m]	Conduttività λ [W/mK]	Resistenza termica [m ² k/W]
Adduttanza esterna			0.17
Manto di copertura composto da doghe lisce in abete/cedro, impregnate in autoclave per lisciatura superficiale e resistenza UV (ditta Incofusta, Valencia)	0.025	0.192	0.13
Serie di listelli portategola in legno	0.060	0.462	0.13
Membrana sottotegola antivapore traspirante "Fibertherm Multi UDB", 3 strati rinforzati in polipropilene	0.001	0.005	0.20
Pannello CementoLegno tipo Betonwood N, dimensioni 1220 x 520 mm	0.022	0.085	0.26
Pannelli in fibra di legno naturale tipo Fibertherm Isorel, dimensioni 2500 x 1200 mm	0.019	0.05	0.38
Isolante termico: Rockwool "Tectum"	0.100	0.035	2.86
Isolante acustico: Rockwool "Rockmur"	0.050	0.035	1.43
Pannello XLAM EGOIN CLT 200 - 5 strati Certificato ETA-12/0358	0.200	0.17	1.18
Pendino con occhio aperto e gancio in acciaio con molla per profili a C tipo Knauf D112	0.080	-	-
Profilo con orditura metallica zincata a C per controsoffitti autoportanti tipo Knauf	0.025	-	-
Adduttanza interna			0.04

0.582	6.77	Rtot
	0.15	Utot
	0.35	Ulimite

Tabella 16: Calcolo della trasmittanza per il solaio controterra, su Excel

STRATIGRAFIA SCELTA (dall'alto al basso)	Spessori [m]	Conduttività λ [W/mK]	Resistenza termica [m ² k/W]
Adduttanza interna			0.04
Gres porcellanato: 10+2 mm fughe	0.012	1.3	0.01
Massetto radiante: Uponor Minitemp argilla espansa + tubi radianti PEX 16x2	0.065	-	-
Passaggio impianti: Scatole 50x50x60 mm + Canali 80x40 mm	0.060	-	-
Massetto di sottofondo in calcestruzzo	0.070	1.6	0.04
Isolante termico: Rockwool "Tectum"	0.100	0.035	2.86
Guaina impermeabilizzante: Soprema Proteguarda	0.005	0.033	0.15
Magrone	0.050	0.75	0.07
Igloo arcato: Daliform Iglù	0.300	0.037	8.11
Adduttanza esterna			0.17

0.662	Rtot	11.45
	Utot	0.09
	Ulimite	0.65

Riqualficazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya,
(Castilla-La Mancha, Spagna)

Tabella 17: Calcolo della trasmittanza per la parete verticale esterna portante opaca, su Excel

STRATIGRAFIA SCELTA (da interno a esterno)	Spessori [m]	Conduttività λ [W/mK]	Resistenza termica [m ² k/W]
Adduttanza interna			0.04
Pannello lamellare in abete bianco (Pinus Sylvestris) CL24h di Derque Maderas	0.015	0.13	0.12
Colla Sikaflex-221 di Sika Espana (poliuretano modificato)	0.006	-	-
Pannello XLAM EGOIN CLT 140 - 5 strati Certificato ETA-12/0358	0.140	0.17	0.82
Isolante termico: Rockwool "Rainscreen Duo Slab"	0.145	0.035	4.14
Guaina traspirante permeabile al vapore certificata CTE - Delta Membranas Ibérica (Madrid): Delta-Vent S (Sd=0,15 m)	0.001	0.17	0.00
Intercapedine areata	0.050	0.28	0.18
Rivestimento di facciata in tavole di legno per esterno - Garabandal Madera (Asturie): Doghe larice siberiano termotrattato 27×148 mm	0.050	0.13	0.38
Adduttanza esterna			0.13

0.407

5.82	Rtot
0.17	Utot
0.41	Ulimite

Tabella 18: Calcolo della trasmittanza per la parete verticale esterna non portante vetrata, su Excel

STRATIGRAFIA SCELTA (da interno a esterno)	Spessori [m]	Conduttività λ [W/mK]	Resistenza termica [m ² k/W]
Adduttanza interna			0.04
Pannello lamellare in abete bianco (Pinus Sylvestris) CL24h di Derque Maderas	0.015	0.13	0.12
Colla Sikaflex-221 di Sika Espana (poliuretano modificato)	0.006	-	-
Pannello XLAM EGOIN CLT 140 - 3 strati Certificato ETA-12/0358	0.060	0.17	0.35
Isolante termico: Rockwool "Rainscreen Duo Slab"	0.145	0.035	4.14
Guaina traspirante permeabile al vapore certificata CTE - Delta Membranas Ibérica (Madrid): Delta-Vent S (Sd=0,15 m)	0.001	0.17	0.00
Intercapedine areata	0.050	0.28	0.18
Rivestimento di facciata in tavole di legno per esterno - Garabandal Madera (Asturie): Doghe larice siberiano termotrattato 27×148 mm	0.050	0.13	0.38
Adduttanza esterna			0.13

0.327

5.35	Rtot
0.19	Utot
0.41	Ulimite

Tabella 19: Calcolo della trasmittanza per vetrate esterne, su Excel

	Uw [W/m ² K]	Ulimite [W/m ² K]
PT: Cor-Vision 88 2+2 ante scorrevoli (4 totali)	1.3	1.8
P1: Cor-Vision 88 1 fissa + 1 anta oscilloventilante (o 2+2 miste)	1.3	1.8

Le stratigrafie presentate sono state verificate rispetto ai limiti di trasmittanza termica imposti dalle normative spagnole vigenti, risultando conformi per la zona climatica D2 di Castilla-La Mancha.

6.7 Analisi impiantistica

In coerenza con le stratigrafie descritte, le chiusure orizzontali calpestabili (identificate nel solaio controterra e nel solaio interpiano) integrano un sistema radiante di riscaldamento a basso spessore di tipo *Uponor Minitemp*.

La determinazione della trasmittanza termica globale di tali pacchetti non risponde esclusivamente a un obbligo normativo di conformità ai limiti, ma costituisce la base analitica necessaria per il corretto dimensionamento termotecnico del sistema radiante. Il valore di trasmittanza, infatti, condiziona direttamente il flusso di calore e le dispersioni, parametri critici nel definire la resa termica del massetto radiante e l'efficienza complessiva dell'impianto.

Di seguito si riporta la procedura di calcolo analitico, implementata tramite applicativo Excel, finalizzata alla quantificazione del fabbisogno termico della singola unità abitativa (duplex).

6.7.1 Fabbisogno termico

Il calcolo del fabbisogno è stato impostato definendo tre parametri chiave:

1. Temperatura interna di progetto T_{int} fissata a 20 °C, in conformità con gli standard di comfort termoigrometrico per l'edilizia residenziale;
2. Temperatura esterna media invernale T_{ext} identificata in 5 °C; questo valore definisce il caso peggiore o la condizione media di esercizio su cui l'impianto deve garantire la copertura del carico;
3. Salto termico di progetto ΔT , ovvero la differenza di 15 °C tra interno ed esterno che rappresenta il gradiente che guida il flusso di calore attraverso l'involucro; maggiore è questo valore, maggiore è la spinta cinetica del calore verso l'esterno che l'impianto deve contrastare.

Per una stima energetica sul lungo periodo, non è sufficiente considerare la potenza istantanea di picco; è necessario quantificare l'energia totale richiesta dall'edificio durante l'intera stagione fredda (tipicamente da ottobre a marzo). A tal fine, è stato adottato l'indice dei “Gradi Giorno di Riscaldamento” (denominati *Grados-Día de Calefacción* o *Heating Degree Days*, HDD), un parametro climatico fondamentale che sintetizza la severità dell'inverno nel sito.

L'HDD misura l'intensità del freddo stagionale come sommatoria degli scarti termici giornalieri tra la temperatura esterna media e la soglia convenzionale di 15 °C, calcolata unicamente per i valori inferiori a tale riferimento.

Il calcolo degli HDD annuali per il sito in esame è stato condotto seguendo una metodologia di aggregazione mensile basata sulle medie climatiche della provincia di Cuenca. Il contributo di ogni mese viene determinato moltiplicando la differenza tra la temperatura base (15 °C) e la temperatura media mensile $T_{m,m}$ per il numero di giorni del mese N :

$$HDD_{mese} = (15^{\circ}\text{C} - T_{m,m}) \cdot N$$

Tabella 20: Calcolo stimato di GDH a Moya, Castilla-La Mancha, su Excel

MESE	$T_{m,m}$ [°C]	n° giorni [-]	Gradi Giorno GDH [°C giorno]	
Gennaio	2.9	31	$(15-2.9) \cdot 31$	375.1
Febbraio	3.6	28	$(15-3.6) \cdot 28$	319.2
Marzo	6.6	31	$(15-6.6) \cdot 31$	260.4
Aprile	9.5	30	$(15-9.5) \cdot 30$	165
Maggio				
Giugno				
Luglio				
Agosto				
Settembre				
Ottobre	12.8	31	$(15-12.8) \cdot 31$	68.2
Novembre	6.4	30	$(15-6.4) \cdot 30$	258
Dicembre	3.6	31	$(15-3.6) \cdot 31$	353.4

1799.3

Nei mesi estivi (maggio-settembre), la temperatura media permane stabilmente sopra i 15 °C, determinando un contributo nullo al fabbisogno di riscaldamento.

Dalla sommatoria dei contributi mensili si ottiene un valore annuo complessivo di circa 1800 HDD, che per la specifica altitudine di Moya (1150 m s.l.m.) viene cautelativamente normalizzato nel modello di calcolo a 2350 K (GDH).

Il fabbisogno energetico di un edificio ad alte prestazioni non è determinato esclusivamente dalle caratteristiche isolanti dell'involucro, ma è il risultato di un equilibrio dinamico tra flussi energetici uscenti (perdite) ed entranti (guadagni). La domanda netta di riscaldamento viene quindi calcolata secondo la seguente relazione:

$$Q_{tot} = (Q_{trasm} + Q_{vent}) - (Q_{sol} + Q_{int})$$

6.7.1.1 Dispersione termica per trasmissione

Il calcolo della dispersione termica annua (Q_{trasm}) è stato eseguito applicando una formula semplificata che integra le prestazioni dei componenti edilizi con le specificità climatiche del sito, in conformità con la prassi termotecnica spagnola. La relazione adottata è la seguente:

$$Q_{trasm} = U \cdot A \cdot GDH \cdot \frac{24}{100} [kWh/anno]$$

Dove:

- U : trasmittanza termica del componente [W/m^2k];
- A : superficie disperdente [m^2];
- GDH : gradi giorno [K] definiti precedentemente.

Tabella 21: Calcolo della dispersione termica per trasmissione, su Excel

ELEMENTO	TRASMITTANZE W/m2K	SUP. DISPERDENTI m2	Q kWh/anno	Qtras tot kWh/anno
Pareti in Y	0.16	167.12	1552.52	6552.99
Pareti in X	0.16	42.46	394.44	
Finestre triplo vetro	1.30	45.77	3355.86	
Solaio controterra	0.09	87.64	431.83	
Copertura inclinata	0.14	103.50	818.35	

6.7.1.2 Dispersione per ventilazione

Oltre alle perdite per trasmissione, una quota significativa del fabbisogno termico è imputabile alla ventilazione. In un edificio moderno a elevata tenuta all'aria, il ricambio volumetrico necessario a garantire la qualità dell'aria interna (IAQ - *Indoor Air Quality*) comporta una dispersione energetica che deve essere quantificata e, ove possibile, mitigata.

La potenza termica dispersa per ventilazione P_v è stata calcolata considerando un tasso di ricambio d'aria n di 0.5 ricambi/ora, valore standard per garantire condizioni igieniche ottimali in un'abitazione media. Il calcolo si basa sull'equazione del bilancio termico dell'aria:

$$P_v = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Dove:

- V : portata d'aria ventilata [m^3/s] derivata dal volume dell'edificio V moltiplicato per il tasso di ricambio n ;
- ρ : densità dell'aria ($\sim 1.2 \text{ kg/m}^3$);
- c_p : calore specifico dell'aria ($\sim 1005 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$);
- ΔT : differenza di temperatura tra interno ed esterno (15 K).

Per l'unità tipo (duplex) a Moya, con un volume riscaldato di circa 415.77 m^3 la portata d'aria risulta pari a:

$$V = \frac{\text{volume} \cdot n}{3600}$$

Il fabbisogno annuo Q_{vent} viene ricavato moltiplicando la potenza termica dispersa per ventilazione P_v per il numero di ore di riscaldamento invernali. Considerando 6 mesi di riscaldamento (circa 180 giorni), il numero di ore risulta essere di 4320.

Tabella 22: Calcolo della dispersione termica per ventilazione, su Excel

Ricambi d'aria [h ⁻¹]	V [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	cp [J/(kgK)]	Pv [W]	Qv [kWh/anno]
0.5	0.0577	1.2	1005	1044.63	4512.811

6.7.1.3 Guadagni termici

I guadagni termici sono l'energia che entra nell'edificio e riduce la quantità di riscaldamento necessaria. Si distinguono in:

- Guadagni solari: energia che entra dalle finestre per irraggiamento solare;
- Guadagni interni: calore generato da persone, elettrodomestici, illuminazione e altre fonti interne.

Il calcolo dei guadagni solari si basa sull'equazione generale che mette in relazione l'esposizione, la qualità del vetro e l'ombreggiamento:

$$Q_{solare} = A_f \cdot g \cdot I \cdot f_s$$

Dove:

- A_f (superfici esposte): l'unità dispone di ampie vetrate distribuite tra l'orientamento ovest (21.26 m²) ed est (24.60 m²);
- g (fattore solare del vetro): impostato a 0.5 [-], valore tipico di un triplo vetro selettivo che permette di bilanciare l'ingresso del calore invernale con il controllo del surriscaldamento estivo;
- I (irraggiamento solare): assunto pari a 2.8 [kWh/m²] sul piano della finestra per la stagione fredda, dato che riflette l'elevata disponibilità di radiazione solare della regione;
- f_s (fattore di schermatura): fissato a 0.3, indicando la presenza di sistemi oscuranti (tapparelle o frangisole) che filtrano la radiazione.

Tabella 23: Calcolo dei guadagni termici solari, su Excel

A finestre Ovest [m ²]	A finestre Est [m ²]	g [-]	I [kWh/m ²]	fs [-]	Qs (finestre Ovest) [kWh/giorno]	Qs (finestre Est) [kWh/giorno]
21.26	24.60	0.5	2.8	0.3	8.929	10.332

L'ultimo elemento per completare il bilancio energetico del duplex a Moya riguarda i guadagni interni ovvero il calore generato involontariamente all'interno dell'edificio da fonti che non appartengono al sistema di riscaldamento principale. Il calcolo si basa sulla potenza termica media generata dalle attività quotidiane e dalla permanenza degli occupanti:

- Occupanti: una persona a riposo o leggermente attiva emette tra 70 e 100 W; per il calcolo del duplex, sono stati considerati 70 W a persona, 8 persone totali, 6 ore di stazionamento;
- Illuminazione domestica, stimata in 10 W/m²;
- Apparecchiature ed elettrodomestici, considerando una media costante di 200 W accessi durante la giornata.

La formula risolutiva è:

$$Q_{int} = \sum (P \cdot h)$$

Dove:

- P : potenza termica generata da persona, apparecchio o illuminazione;
- h : ore di utilizzo nell'arco del giorno.

Tabella 24: Calcolo dei guadagni termici interni, su Excel

P persona [W]	P illuminazione domestica [W/m ²]	P elettrodomestici [W]	Q _{int} persone [kWh/giorno]	Q illuminazione + elettrodomestici [kWh/giorno]
70	10	200	3.36	2

Dopo aver analizzato tutte le voci, il bilancio energetico finale si definisce sottraendo gli apporti gratuiti alle dispersioni totali:

- Carico uscente (perdite): trasmissione + ventilazione;
- Carico entrante (guadagni): solari + interni.

$$Q_{totale} = Q_{trasmissione} + Q_{ventilazione} - Q_{guadagni} = 20.60 \frac{kWh}{giorno} = 7520.35 \frac{kWh}{anno}$$

Il risultato è la domanda annua o giornaliera di riscaldamento ($kWh/anno$ o $kWh/giorno$), secondo le procedure di calcolo previste dalla norma UNE-EN 12831 e dal DB-HE0.

Questa analisi integrata consente di ottimizzare la resa del sistema radiante, garantendo un'efficiente distribuzione superficiale del flusso termico e il rispetto dei gradienti di temperatura superficiale ($\leq 29^{\circ}C$ per pavimenti abitabili).

L'orientamento planimetrico stesso è stato ottimizzato al fine di massimizzare il guadagno solare passivo, sfruttando l'energia radiante naturale per incrementare il benessere termo-energetico

degli occupanti e minimizzare i consumi ausiliari. In particolare, la camera matrimoniale principale, posizionata sul lato corto est, beneficia di ampie superfici vetrate orientate verso il sorgere del sole, favorendo un'illuminazione naturale progressiva al mattino e un caldo radiante moderato; analogamente, la zona giorno è affacciata a sud mediante vetrate panoramiche, che catturano l'incidenza solare nei mesi freddi per un effetto serra passivo controllato, mitigato da schermature mobili per prevenire surriscaldamenti estivi. Tale disposizione eleva l'efficienza energetica globale, con potenziali riduzioni del 20-30% della domanda termica, secondo modelli bioclimatici standard.

6.7.2 Pannelli radianti

Sulla base del fabbisogno termico calcolato, la potenza di picco necessaria nelle condizioni climatiche più rigide si attesta su valori compresi tra $35-45 \text{ W/m}^2$. L'integrazione del sistema radiante a basso spessore *Uponor Minitec* all'interno delle chiusure orizzontali calpestabili rappresenta una soluzione tecnologica valida.

L'adozione di tubazioni in *PEX 9.9 mm* con un passo di posa standard (100-150 mm) garantisce un'erogazione termica fino a $70-80 \text{ W/m}^2$ con temperature di mandata a $35 \text{ }^\circ\text{C}$, confermando che il sistema è ampiamente dimensionato per coprire i carichi calcolati.

Un aspetto critico nella progettazione di edifici in legno è la scarsa massa termica del materiale; per ovviare a tale limite, è stata prevista l'introduzione di uno strato in argilla espansa volto a fungere da volano termico. Così facendo, è possibile stabilizzare la temperatura interna a fronte delle escursioni termiche tipiche della zona climatica D2, evitando rapidi surriscaldamenti o raffreddamenti del volume abitativo.

In merito alla configurazione del pacchetto stratigrafico, sono state valutate diverse opzioni per ottimizzare la conducibilità termica del sistema: sebbene l'argilla espansa sia un ottimo isolante, la sua bassa conducibilità ne sconsiglia l'impiego come massetto di copertura dei tubi, poiché costringerebbe a innalzare la temperatura del fluido termovettore, riducendo l'efficienza globale. Pertanto, ai fini della massimizzazione della resa impiantistica, si è scelto di mantenere l'argilla espansa esclusivamente come strato di riempimento e isolamento posizionato al di sotto del pannello bugnato *Uponor*; sopra le tubazioni viene impiegato un massetto autolivellante ad alta conducibilità, capace di trasmettere il calore in modo rapido ed uniforme verso la superficie calpestabile.

Per il solaio controterra, lo strato di argilla e l'isolante ad alta resistenza termica impediscono che il calore venga disperso verso il terreno. Per il solaio interpiano, il sistema *Minitec* assicura che le dispersioni verso il basso rimangano comunque all'interno del volume riscaldato del duplex.

Infine, data l'elevata incidenza dei guadagni solari analizzati, si rende indispensabile l'adozione di un sistema di regolazione avanzato: l'utilizzo di sonde climatiche esterne e termostati intelligenti permetterà di anticipare l'apporto solare gratuito, attenuando il funzionamento del pannello radiante ed evitando fenomeni di surriscaldamento dovuti all'inerzia del massetto.

Il dimensionamento e la posa del sistema radiante sono stati definiti in funzione dei carichi termici specifici di ogni ambiente, ottimizzando la distribuzione dei circuiti per garantire un'emissione uniforme e contenere le perdite di carico delle tubazioni a diametro ridotto (9.9 mm). La strategia di installazione prevede una segmentazione capillare dei flussi, limitando la lunghezza di ogni singolo anello entro i 60 m per assicurare una circolazione del fluido termovettore efficiente e una cessione di calore omogenea.

Di seguito si riportano le specifiche di installazione adottate per i diversi ambienti:

- Zona giorno (4 circuiti - interasse 10 cm): la posa prevede un interasse costante di 10 cm, con un addensamento a 5 cm nelle zone perimetrali in corrispondenza delle grandi vetrate per contrastare le dispersioni localizzate; con tubi da 9.9 mm, è fondamentale non superare i 60-70 m per circuito a causa delle elevate perdite di carico;
- Locali bagno (1 circuito - interasse 5 cm): a causa della ridotta superficie calpestabile residua (al netto di sanitari e piatti doccia), si è optato per il fittaggio massimo consentito;
- Camera matrimoniale (3 circuiti - interasse 10 cm): l'area è servita da tre circuiti distinti per mantenere la lunghezza delle tubazioni entro i limiti prestazionali del sistema. In fase di posa, è stato previsto un distacco di circa 10-15 cm in corrispondenza di arredi pesanti o letti contenitori a terra, al fine di evitare accumuli termici inefficienti e garantire la libera dilatazione del massetto;
- Disimpegno (1 circuito - interasse 10 cm): in quest'area, caratterizzata dall'elevata densità di tubazioni di adduzione dirette agli altri ambienti, il circuito dedicato è stato integrato mantenendo un distanziamento minimo di 10 cm tra i tubi; questa accortezza evita zone di sovratemperatura localizzata in prossimità del collettore di distribuzione.

Tabella 25: Specifica tecnica di posa del sistema radiante a basso spessore Uponor Minitec, su Excel

Stanza	Superficie pavimento [m ²]	Diametro tubo [mm]	Interasse [mm]	n° circuiti [-]	Lunghezza singolo circuito [m]
ZONA GIORNO	27.81	9.9 x 1.1	100.00	4	~ 55-60
BAGNO 1	4.76	9.9 x 1.1	50.00	1	~ 60
BAGNO 2	4.76	9.9 x 1.1	50.00	1	~ 60
CAMERA MATRIMONIALE	19.49	9.9 x 1.1	100.00	3	~ 50-55
disimpegno	8.38	9.9 x 1.1	100.00	1	~ 55

n° tot circuiti

Riqualificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya,
(Castilla-La Mancha, Spagna)

Considerando i 10 circuiti totali, si prevede un singolo collettore da 10 vie. Il collettore deve essere centrale rispetto ai carichi, vicino alla colonna montante della pompa di calore e accessibile per la manutenzione.

Di seguito, viene riportata la planimetria con il riassunto del dimensionamento del sistema; viene riportata solo la planimetria del piano terra PT, assumendo identica la disposizione nel solaio interpiano a servizio del piano primo P1.

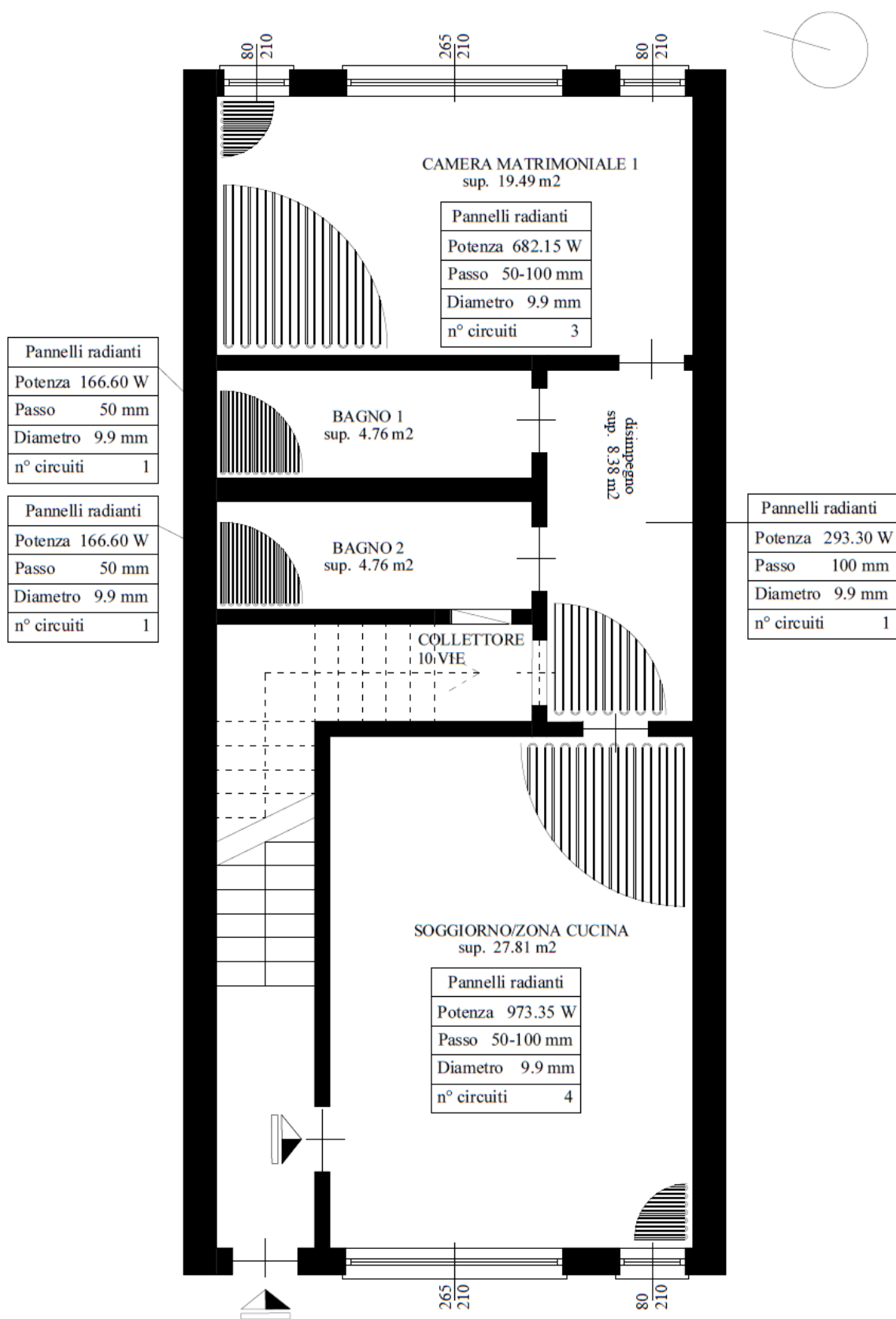


Figura 35: Planimetria con indicazione dei massetto radiante dimensionato, su Autocad (elaborazione a cura dell'autrice)

6.7.3 Modellazione energetica

Oggi, la valutazione della prestazione energetica di un edificio rappresenta un passaggio cruciale per l'adempimento normativo e per la verifica progettuale.

L'obiettivo della modellazione è quantificare l'efficienza del sistema costruttivo in XLAM e convalidare le scelte impiantistiche. Per fare ciò, è stato utilizzato il software CE3X (versione 2.3), uno degli strumenti ufficialmente riconosciuti dal Ministero spagnolo per la certificazione energetica.

6.7.3.1 Software CE3X: metodologia e funzionamento

Il software CE3X adotta un metodo di calcolo semplificato basato su una procedura di confronto tra l'edificio reale e un edificio di riferimento. Il programma opera attraverso tre fasi distinte:

1. Input dei dati amministrativi e climatici: in questa fase viene definita la localizzazione geografica dell'immobile. Per l'edificio a Moya, l'inserimento della località (Cuenca) e dell'altitudine ha permesso al software di assegnare in automatico la zona climatica D2;
2. Definizione dell'involucro edilizio: il software permette di definire ogni elemento disperdente (pareti, solai, tetti e serramenti);
3. Definizione degli impianti: in questa sezione vengono inseriti i sistemi di generazione (pompe di calore, caldaie, pannelli solari) per calcolare l'energia primaria necessaria a coprire i fabbisogni dell'involucro.

Oltre all'inserimento dei valori di trasmittanza riportati precedentemente, sono stati presi in considerazione anche altri parametri significativi: uno di questi, spesso trascurato ma inserito con precisione in questo modello, è la massa superficiale.

Ad esempio, per la copertura, è stata calcolata una massa di 174 kg/m^2 : mentre il legno è un materiale leggero, lo spessore del pannello stratificato XLAM da 200 mm unito agli strati di finitura conferisce all'involucro un'inerzia termica capace di garantire uno sfasamento temporale dell'onda termica, migliorando il comfort estivo.

6.7.3.2 Sistemi impiantistici e integrazione rinnovabili

L'edificio è stato concepito con una logica "all'Electric" supportata da fonti rinnovabili in situ.

- Climatizzazione: l'utilizzo di una pompa di calore ad alta efficienza permette di coprire il fabbisogno termico invernale e il carico di raffrescamento estivo con rendimenti stagionali elevati;

- Solare termico: il sistema di produzione di acqua calda sanitaria (ACS) è integrato da collettori solari che coprono l'80% della domanda annuale, riducendo drasticamente l'uso della caldaia a condensazione di supporto;
- Fotovoltaico: la presenza di un impianto fotovoltaico da circa 3500 kWh/anno agisce direttamente sull'indicatore di energia primaria non rinnovabile, permettendo l'autoconsumo di energia pulita e abbattendo le emissioni.

6.7.3.3 Sintesi e classificazione energetica

Il processo di ottimizzazione del modello ha prodotto un avanzamento significativo della classe energetica.

Il risultato finale di $4.9 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$ colloca l'edificio saldamente in CLASSE A. Questo dato è il successo principale del progetto: dimostra che l'uso del legno XLAM e la corretta coibentazione possono ridurre l'impatto ambientale.

Il consumo di energia primaria non rinnovabile si attesta a $28.8 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{anno}$ (Classe B): il valore è ampiamente al di sotto dei limiti per gli edifici NZEB (Nearly Zero Energy Buildings).

Dall'analisi emerge che il fabbisogno di riscaldamento $49.5 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{anno}$ risente della severità della zona D2. Tuttavia, l'efficienza degli impianti di generazione mitiga questo fabbisogno elevato in fase di consumo finale. Per quanto riguarda il raffrescamento $12.2 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{anno}$, la classe E risultante evidenzia una caratteristica intrinseca degli edifici in XLAM molto coibentati: l'ottima tenuta termica richiede una gestione attenta dei guadagni solari interni per evitare fenomeni di surriscaldamento, che nel progetto sono gestiti tramite l'inerzia delle masse calcolate (tetto e solaio).

La modellazione eseguita tramite CE3X ha confermato che la qualità del sistema costruttivo XLAM, se supportata da una corretta integrazione impiantistica, permette di raggiungere alti livelli di efficienza energetica. La validazione attraverso il passaggio da dati stimati a dati reali ha dimostrato che la precisione nella definizione delle proprietà termofisiche dei materiali è una condizione necessaria per una progettazione completa e sostenibile.

Si precisa che il dettaglio completo dei calcoli termofisici e i risultati integrali della relazione tecnica prodotta dal software CE3X sono consultabili nell'Allegato A (cfr. C.10).

7. ANALISI STRUTTURALE

Questo capitolo si pone l'obiettivo di analizzare la fattibilità progettuale e le prestazioni strutturali dell'edificio a uso residenziale progettato.

Viene caratterizzato il materiale mediante le proprietà meccaniche del legno massiccio e, in seguito, vengono spiegati i fenomeni legati all'anisotropia del materiale; successivamente, viene approfondita la tecnologia dei pannelli a strati incrociati, analizzando come l'incollaggio ortogonale delle lamelle consenta di superare i limiti intrinseci del legno, rendendo il pannello un materiale ortotropo e offrendo stabilità dimensionale e resistenza bidirezionale superiori.

Il pannello XLAM è stato modellato sfruttando le sue diverse attitudini statiche:

- Elemento solaio: analizzato come una piastra capace di distribuire i carichi in modo ottimale su tutta la superficie, paragonabile a una griglia continua di travi ortogonali, garantendo spessori ridotti ed elevate prestazioni;
- Elemento parete: interpretato come una lastra verticale ad alta rigidità, in grado di fungere da trave di grandi dimensioni per il supporto di solai sbalzanti e la trasmissione dei carichi verticali e orizzontali.

Il dimensionamento e le verifiche agli Stati Limite Ultimi (SLU) e di Esercizio (SLE) sono stati condotti in conformità al Código Técnico de la Edificación (CTE) e agli Eurocodici di riferimento. In particolare, il documento spagnolo di riferimento è il DB-SE-M (*Seguridad Estructural Madera*), che recepisce l'Eurocodice 5 (EN 1995).

L'obiettivo primario dell'analisi è determinare lo stato di sollecitazione degli elementi in XLAM per garantire il rispetto dei requisiti di sicurezza e durabilità dell'opera.

Particolare rilievo, infatti, è dato all'estrazione e all'analisi delle sollecitazioni agenti sui nodi critici della struttura perché tali valori risulteranno propedeutici al dimensionamento delle connessioni metalliche che verrà approfondito nel capitolo successivo (cfr. C.8).

7.1 Caratterizzazione fisico-meccanica del materiale legno

Il comportamento meccanico del legno (cosiddetto “legno netto”) è determinato dalla genesi biologica e dalla funzione strutturale che il fusto assolve in natura. Quest'ultimo opera come un elemento a mensola, ottimizzato per sopportare il peso proprio della chioma e le azioni ambientali variabili (neve e vento).

L'efficienza del materiale deriva dalla sua morfologia cellulare: il legno è composto da una fitta matrice di cellule tubolari cave. Questa conformazione permette di ottenere elevati rapporti resistenza/peso, ma è anche la causa di una marcata anisotropia. Infatti, le proprietà di rigidità e resistenza cambiano drasticamente a seconda dell'orientamento dello sforzo rispetto alla fibratura.

Per la modellazione strutturale, il legno viene classificato come un materiale ortotropo.

Le sue proprietà meccaniche devono essere riferite a una terna di assi anatomici fondamentali:

- Direzione longitudinale (L): parallela all'asse del fusto e alla direzione delle fibre (è l'asse con i valori più alti di modulo elastico e resistenza);
- Direzione tangenziale (T): tangente agli anelli di accrescimento annuali (in botanica e nella tecnologia del legno, con il termine "annuali" ci si riferisce ai cerchi/anelli di accrescimento che l'albero produce ogni anno durante il suo ciclo vitale);
- Direzione radiale (R): ortogonale alle precedenti, orientata lungo il raggio della sezione del tronco.

Nella pratica del calcolo strutturale, questa distinzione è fondamentale: la capacità portante del materiale subisce variazioni d'ordine di grandezza se sollecitata in direzione parallela o ortogonale alle fibre.

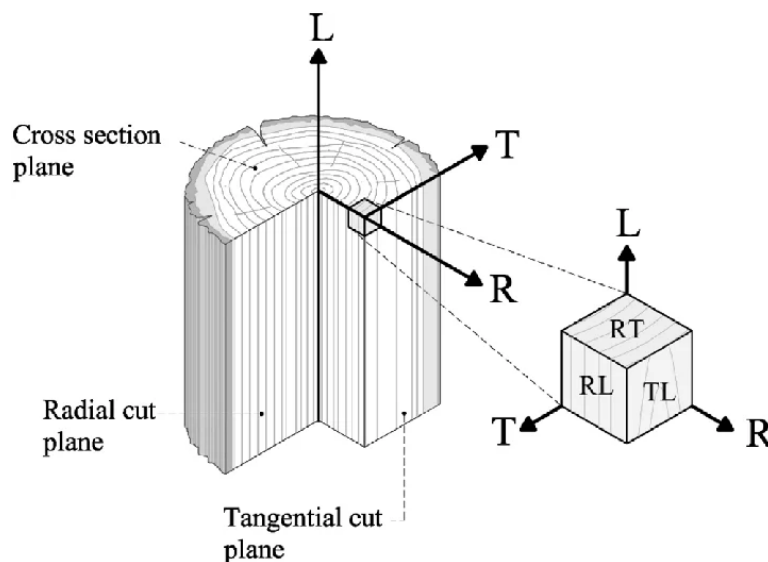


Figura 36: Rappresentazione degli assi anatomici (L, R, T) e dei principali piani di sezione di un elemento ligneo. Il sistema di riferimento ortotropo definisce le direzioni longitudinale (L), radiale (R) e tangenziale (T).

Le proprietà meccaniche sono massime lungo la direzione longitudinale della fibratura, rispecchiando l'adattamento evolutivo dell'organismo arboreo ottimizzato per resistere prevalentemente alle sollecitazioni agenti lungo l'asse principale del fusto.

Sotto il profilo dell'efficienza strutturale, il legno esibisce prestazioni competitive se rapportate ai materiali da costruzione convenzionali. Un indicatore significativo è il rapporto tra la resistenza caratteristica f_k (a compressione o trazione) e la densità ρ . Il valore di tale indice risulta analogo a quello dell'acciaio strutturale e circa cinque volte superiore a quello del calcestruzzo armato. Tale caratteristica, unita alla ridotta massa volumica del materiale, consente una significativa riduzione dei carichi permanenti, con evidenti benefici in termini di vulnerabilità sismica.

Dal punto di vista della rigidezza, il rapporto tra il modulo di elasticità E e la resistenza f_k del legno è paragonabile a quello dell'acciaio e risulta inferiore di circa tre volte rispetto a quello del calcestruzzo armato. Questa condizione operativa impone al progettista una particolare attenzione nel dimensionamento: in analogia con le strutture metalliche, le verifiche allo Stato Limite di Esercizio (SLE), relative al controllo delle deformazioni e alla stabilità dell'equilibrio (instabilità per flessione-compressione), assumono un ruolo predominante rispetto alle verifiche di resistenza ultima.

Tabella 26: Confronto tra le prestazioni meccaniche dei principali materiali strutturali

Fonte: Rielaborazione propria su base normativa Eurocodice (EN 338, EN 1992, EN 1993). Valori di rigidezza e resistenza calcolati secondo le proprietà caratteristiche del materiale in conformità al Código Técnico de la Edificación (CTE)

Materiale	Efficienza f/ρ [m ² /s ²]	Rapporto E/f [-]
Legno massiccio (C24)	57.14	458
Legno lamellare (GL24h)	53.33	479
Legno XLAM (CLT)	48	458
Calcestruzzo (C25/30)	10	1.24
Acciaio (S275)	35.03	763
Alluminio (Lega 6061)	88.88	291

I parametri di efficienza statica analizzati in Tabella 26 fanno riferimento al cosiddetto "legno netto" o in sezione integra, ovvero un materiale privo di discontinuità macroscopiche. Tuttavia, nel passaggio alla dimensione strutturale, il legno si configura come un materiale intrinsecamente eterogeneo e caratterizzato dalla presenza di difetti naturali, ad esempio nodi, deviazioni localizzate della fibratura, sacche di resina e fessurazioni da ritiro, originati durante il ciclo vitale della pianta.

Queste irregolarità, seppur necessarie all'albero per il proprio adattamento biologico, rappresentano zone di concentrazione degli sforzi e discontinuità che compromettono la continuità meccanica delle fibre. Di conseguenza, la resistenza caratteristica del legno strutturale risulta sensibilmente inferiore a quella del legno netto.

Ai fini della progettazione, tale divario di resistenza viene gestito attraverso due strategie fondamentali:

- Classificazione meccanica o visuale: la suddivisione dei semilavorati in classi di resistenza (es. C18, C24, C30 secondo EN 338) permette di raggruppare i pezzi in base alla loro effettiva capacità portante, tenendo conto statisticamente della frequenza e della dimensione dei difetti presenti;
- Effetto di scala e omogeneizzazione: la lavorazione industriale, come nel caso del legno lamellare o dell'XLAM, favorisce un processo di "omogeneizzazione". Il frazionamento del fusto in lamelle e la successiva ricomposizione permettono di distribuire e limitare l'incidenza dei difetti. In questo modo, si riduce la variabilità prestazionale dell'elemento strutturale finito rispetto al legno di partenza, rendendo il comportamento meccanico del componente industriale più prevedibile e affidabile.

In sintesi, il progettista non deve mai fare riferimento diretto alle proprietà del legno netto, ma deve operare esclusivamente sui valori caratteristici tabellati (norma EN 338), i quali integrano già, su base probabilistica, la presenza inevitabile di difetti strutturali.

7.1.1 Resistenza a compressione

Il comportamento meccanico del legno strutturale sotto sforzi di compressione è fortemente condizionato dall'anisotropia del materiale. La risposta del componente varia a seconda dell'orientamento del carico rispetto alla direzione delle fibre.

7.1.1.1 Compressione parallela alla fibratura

In questa configurazione, il legno esprime la sua massima capacità portante.

Il meccanismo di collasso non è una semplice rottura fragile, ma un fenomeno di instabilità locale ("*micro-buckling*") delle pareti cellulari: le fibre, a causa della loro morfologia allungata, si inflettono e si ripiegano su sé stesse corrugandosi.

Analizzando il diagramma tensione - deformazione (cfr. Figura 37 e Figura 38) si osserva:

- Una fase iniziale elastica lineare;
- Una fase visco-plastica successiva, dove la viscosità del materiale genera deformazioni ritardate che si sommano a quelle elastiche, portando la sezione al limite di snervamento e alla successiva crisi.

7.1.1.2 Compressione ortogonale alla fibratura

Quando la sollecitazione agisce perpendicolarmente alle fibre, la resistenza crolla drasticamente, attestandosi mediamente a circa 1/5 del valore parallelo. Il collasso avviene per lo schiacciamento laterale delle cellule e la progressiva chiusura del lume cellulare.

In ambito progettuale (secondo Eurocodice 5 e il CTE DB-SE-M), questo comportamento impone considerazioni specifiche:

- Limitazione delle deformazioni: spesso la crisi non è definita da una rottura netta, ma da una deformazione plastica eccessiva che compromette la funzionalità dell'opera (Stato Limite di Esercizio);
- Coefficiente $k_{c,90}$: la normativa permette di incrementare la resistenza di calcolo in presenza di carichi parziali su elementi continui mediante questo coefficiente correttivo, poiché il legno non sollecitato adiacente all'area di carico esercita un effetto di confinamento che ne aumenta la rigidità locale; tale coefficiente tiene conto della capacità delle fibre non caricate di sostenere quelle sollecitate, riducendo le deformazioni locali e aumentando la capacità portante negli appoggi.

La resistenza a compressione del legno perpendicolare alla fibra $f_{c,k,90}$ è molto bassa (circa il 10-15% di quella parallela). Il $k_{c,90}$ permette di incrementare la resistenza teorica.

7.1.2 Resistenza a trazione

Il comportamento del legno sotto sollecitazioni di trazione è di tipo elasto-fragile, caratterizzato da un'immediata rottura al superamento del limite elastico, senza significativi fenomeni di plasticizzazione. La capacità resistente dell'elemento dipende in modo critico dall'inclinazione dell'asse di carico rispetto alla fibratura.

7.1.2.1 Trazione parallela alla fibratura

In questa direzione, il legno esprime i valori di resistenza a trazione più elevati. La tenacità del materiale è legata alla complessa struttura polimerica delle pareti cellulari, che garantiscono una resistenza alla separazione dei tessuti. Il meccanismo di collasso avviene in due modalità principali:

- Rottura delle pareti cellulari: le fibre si spezzano per superamento del limite di trazione della cellulosa;
- Separazione della lamella mediana: si verifica uno scorrimento tra le cellule a livello della sostanza intercellulare (lignina), che funge da matrice legante.

Nonostante una modesta deformazione plastica visibile in fase terminale, la rottura avviene in modo repentino e improvviso, confermando l'assenza di duttilità globale dell'elemento.

7.1.2.2 Trazione ortogonale alla fibratura

Quando il carico è applicato trasversalmente alle fibre, la resistenza è estremamente ridotta, arrivando a valori che sono una frazione minima rispetto a quelli paralleli. Si tratta della sollecitazione più critica per il materiale, poiché la rottura non avviene per spezzamento delle fibre, ma per lacerazione dei tessuti lungo la direzione di crescita.

Questo tipo di crisi si manifesta come una separazione fragile e immediata lungo i piani di debolezza del legno (raggi midollari o anelli di accrescimento).

A differenza della compressione, nella trazione ortogonale non si osservano fenomeni di adattamento o redistribuzione degli sforzi. Per tale motivo, il progettista deve prevenire, attraverso opportuni dettagli costruttivi (ad esempio, prevedendo rinforzi con viti a tutto filetto o elementi in acciaio), l'insorgere di tensioni di trazione trasversale, specialmente in corrispondenza di intagli, fori o connessioni, dove l'effetto dell'anisotropia può causare una rottura fragile e improvvisa dell'intero elemento strutturale.

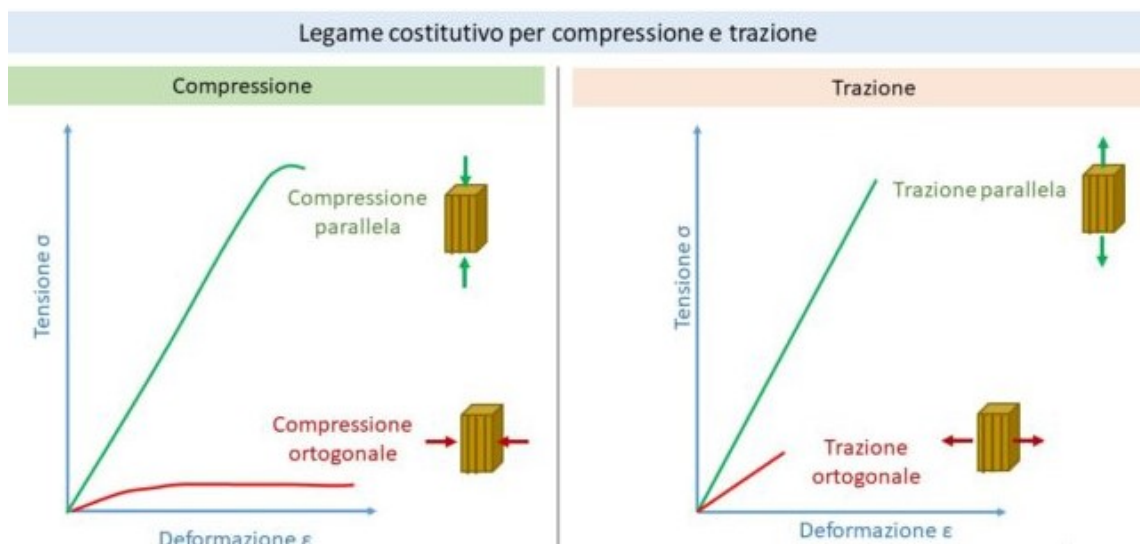


Figura 37: Diagrammi tensione-deformazione per il legno di conifera, rispettivamente compressione parallela e ortogonale alle fibre, e trazione parallela e ortogonale alle fibre.

Fonte: Piazza, M., Tomasi, R., & Modena, R. (2005). *Strutture in legno. Materiale, calcolo, progetto secondo le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni*. Milano: HOEPLI.

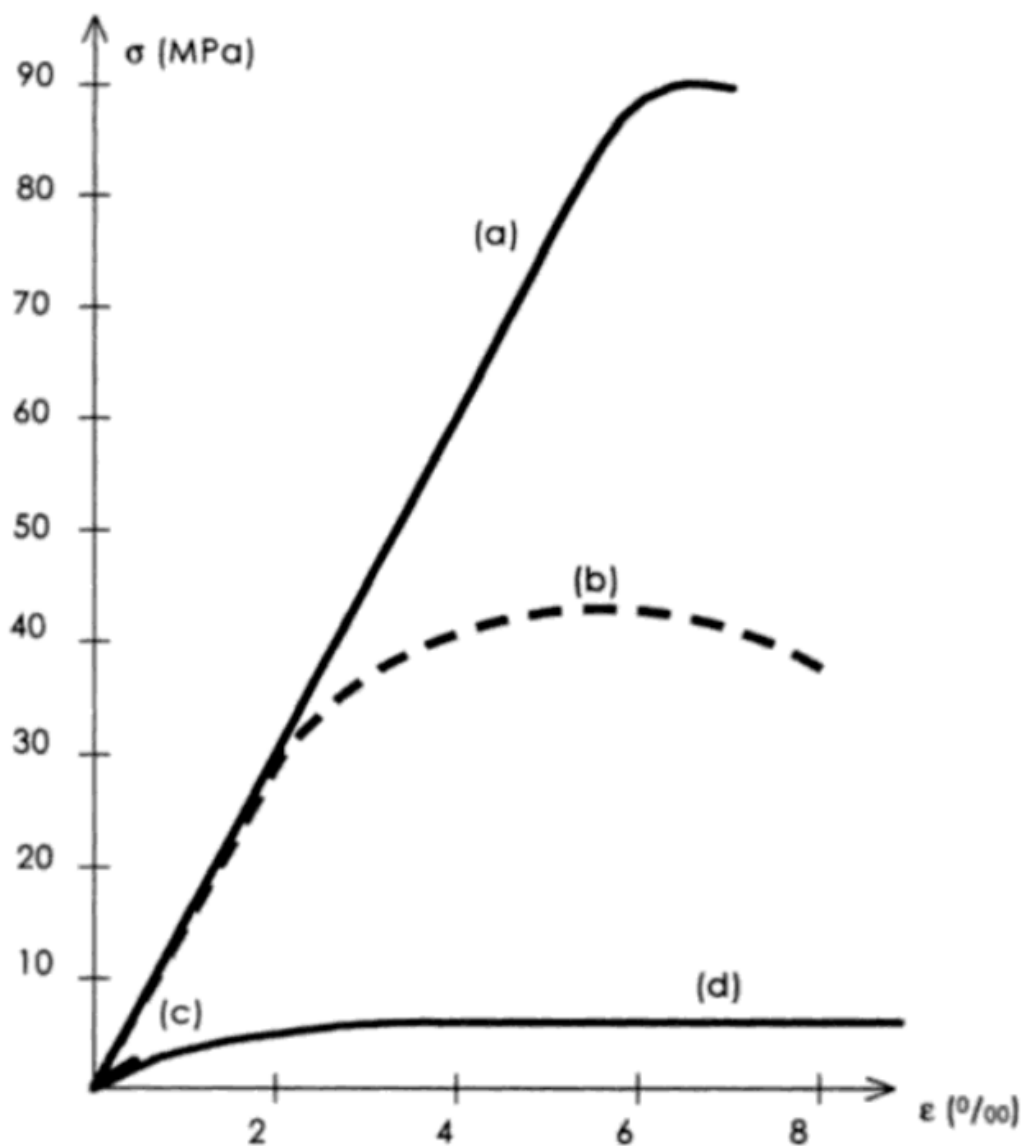


Figura 38: Curve tipiche tensione-deformazione per legno netto di conifera: tensioni di trazione (a) e compressione (b) parallela alla direzione delle fibre, e per trazione (c) e compressione (d) ortogonali alla direzione delle fibre

Fonte: Strutture in legno Piazza Tomasi Modena

Il diagramma tensione - deformazione di Figura 38 sintetizza visivamente i paragrafi precedenti:

- Curva (a) - trazione parallela: è la più alta e ripida (massima rigidezza e resistenza), ma si interrompe bruscamente (rottura fragile);
- Curva (b) - compressione parallela: fase elasto-visco-plastica, con resistenza alta ma inferiore alla trazione;
- Curva (c) e (d) - trazione e compressione ortogonale: i diagrammi mostrano una pendenza estremamente ridotta, a conferma del basso modulo elastico trasversale. Tale andamento,

quasi asintotico all'asse delle ascisse, evidenzia l'esiguità delle proprietà meccaniche del materiale quando sollecitato perpendicolarmente alla fibratura.

7.1.3 Resistenza a taglio

La resistenza a taglio nel legno è un parametro critico che, a causa dell'ortotropia del materiale, richiede una distinzione netta tra diverse configurazioni di carico.

Si distinguono tre modalità principali di crisi per scorrimento:

- Taglio ortogonale: la sollecitazione agisce in modo che le fibre siano caricate perpendicolarmente al loro asse longitudinale. Sebbene teoricamente definibile, tale condizione risulta raramente raggiunta nelle comuni applicazioni strutturali, poiché preceduta da crisi per compressione trasversale o per flessione;
- Taglio parallelo: rappresenta la condizione più ricorrente nel dimensionamento strutturale. In questo caso, la tensione tagliante agisce parallelamente alla direzione delle fibre, provocando uno scorrimento relativo tra le stesse lungo l'asse longitudinale del fusto. La resistenza è limitata dalla capacità di aderenza della matrice lignina-emicellulosa che unisce le fibre;
- Rolling Shear (taglio per rotolamento): questa configurazione si verifica quando le tensioni taglianti agiscono in un piano parallelo alla direzione delle fibre, ma con direzione ortogonale ad esse. Il meccanismo di rottura non è uno scorrimento puro, ma una rotazione dei fasci di fibre che, non essendo vincolati efficacemente in quella direzione, tendono a "rotolare" l'uno sull'altro.

7.1.4 Resistenza a flessione

La flessione non rappresenta una proprietà meccanica elementare, bensì una sollecitazione composta che combina tensioni normali di trazione e compressione e tensioni tangenziali di taglio. Il comportamento a flessione del legno netto è pertanto governato dall'interazione tra le diverse resistenze studiate nei paragrafi precedenti.

In una sezione inflessa, la rottura può manifestarsi attraverso diverse modalità, spesso concomitanti:

- Crisi nel lembo compresso: si manifesta per corrugamento delle fibre (micro-buckling), analogo a quanto descritto per la compressione parallela;
- Crisi nel lembo teso: si manifesta come una rottura fragile e improvvisa, tipica della trazione parallela alla fibratura;

Riqualificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya, (Castilla-La Mancha, Spagna)

- Crisi per taglio: in prossimità dell'asse neutro, dove il momento flettente è massimo ma lo sforzo di taglio è rilevante, possono innescarsi fessurazioni per scorrimento longitudinale (taglio parallelo alla fibratura).

Sperimentalmente, si osserva che elementi con bassa massa volumica possono esibire un comportamento definito pseudo-duttile. In questa configurazione, la crisi inizia sul lembo compresso con un corrugamento progressivo delle fibre, mentre il lato teso continua a reagire in campo elastico. Questo permette un incremento di carico che simula una capacità deformativa plastica.

Tuttavia, tale duttilità è puramente apparente e irreversibile:

- Danneggiamento permanente: il corrugamento delle fibre nel lato compresso crea una lesione permanente nella struttura cellulare;
- Inversione del carico: se si inverte la direzione del momento flettente, la zona precedentemente compressa (ormai danneggiata) viene posta in trazione. Poiché la zona corrugata possiede una resistenza a trazione trascurabile, l'elemento subisce una rottura fragile e istantanea, priva di qualsiasi capacità di dissipazione di energia.

Nella pratica strutturale, l'obiettivo del progettista è favorire, tramite una opportuna scelta della classe di resistenza e della geometria della sezione, una crisi che inizi nel lembo compresso (più graduale) piuttosto che in quello teso (estremamente fragile). Tuttavia, data l'imprevedibilità del comportamento in inversione di carico, la progettazione in legno deve sempre basarsi su un approccio di sicurezza che consideri il materiale come intrinsecamente fragile, escludendo a priori l'affidamento su risorse plastiche paragonabili a quelle dell'acciaio.

In definitiva, mentre nell'acciaio la duttilità è una proprietà intrinseca del materiale, nel legno essa è una proprietà di sistema della sezione. Ciò giustifica l'approccio cautelativo delle normative che impongono fattori di struttura q contenuti, demandando la dissipazione energetica esclusivamente alle giunzioni meccaniche.

7.2 Dalla fibra alla superficie: XLAM come rivoluzione planare

Se il legno massiccio è storicamente confinato alla dimensione lineare (trave e pilastro), l'XLAM rappresenta il superamento di questo limite geometrico, introducendo nell'edilizia in legno il concetto di superficie strutturale massiccia.

Le costruzioni tradizionali (come il *Balloon Frame* o i sistemi a telaio) scompongono l'edificio in una serie di elementi lineari discreti. In tali sistemi, la parete e il solaio non sono portanti in senso

assoluto: necessitano di un'ossatura (montanti) e di sistemi di controventamento secondari per garantire la stabilità globale.

L'XLAM ridefinisce il comportamento statico del legno introducendo il concetto di continuità planare:

- Comportamento bidirezionale: grazie alla stratificazione incrociata di tavole disposte a 90°, il pannello acquisisce una resistenza meccanica in entrambe le direzioni del piano. Ciò consente di dissipare gli sforzi flessionali e di taglio in modo uniforme, superando la debolezza del legno ortogonale alla fibra;
- Sintesi funzionale (lastra + piastra): l'elemento massiccio assolve contemporaneamente due funzioni statiche fondamentali:
 1. Funzione lastra: resiste ai carichi agenti nel proprio piano (vento, sisma, carichi verticali), garantendo la rigidità scatolare dell'edificio assumendo ruolo di controvento;
 2. Funzione piastra: resiste ai carichi ortogonali al piano (flessione dei solai), permettendo di coprire grandi luci con spessori ridotti.

Il passaggio dal legno massiccio all'XLAM trasforma un materiale anisotropo in un semilavorato ortotropo. Se nel singolo elemento di legno la rigidità è confinata alla direzione assiale delle fibre, l'incollaggio di 3, 5 o più strati dispari di tavole permette di uniformare il modulo elastico, distribuendo la rigidità lungo i due assi principali del pannello.

In definitiva, l'XLAM permette di concepire l'edificio non più come un insieme di aste connesse, ma come un organismo scatolare monolitico.

7.3 Comportamento strutturale del pannello XLAM

Le prestazioni meccaniche degli elementi in legno a strati incrociati non sono definibili attraverso i parametri caratteristici di un singolo pezzo di legno, bensì dipendono in modo determinante dalla stratigrafia e dalla tecnologia di assemblaggio del pannello.

La capacità portante del sistema è funzione dell'interazione tra i singoli strati di tavole che compongono la sezione, orientati in direzioni ortogonali tra loro.

7.3.1 L'elemento lastra

Il comportamento strutturale dell'XLAM deriva direttamente dall'interazione sinergica dei singoli strati di legno massiccio. Ciascuna lamella opera come un elemento unidirezionale le cui costanti

elastiche e resistenze sono strettamente dipendenti dall'orientamento della fibratura rispetto alla direzione della sollecitazione.

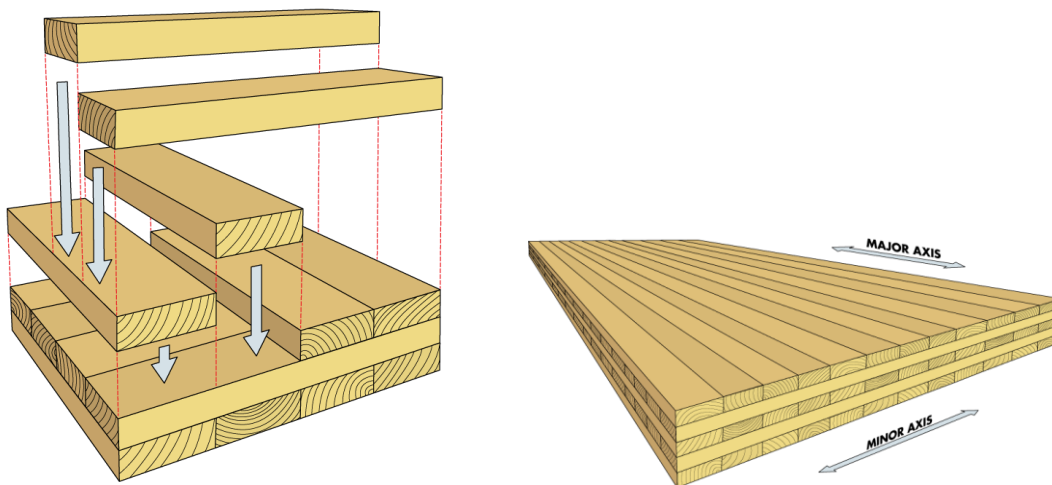


Figura 39: Orientamento ortogonale delle fibre tra gli strati adiacenti: asse principale (major axis), corrispondente alla direzione delle fibre degli strati esterni, asse secondario (minor axis), ortogonale al primo

Come illustrato in Figura 39, la sovrapposizione ortogonale degli strati conferisce al pannello un comportamento meccanico bidimensionale, permettendo di distinguere due direzioni fondamentali:

- Asse principale (Major Axis): corrispondente alla direzione delle fibre degli strati esterni, garantisce la massima rigidità flessionale;
- Asse secondario (Minor Axis): ortogonale al primo, assicura la redistribuzione delle tensioni e conferisce stabilità dimensionale all'elemento, limitando i fenomeni di ritiro e rigonfiamento tipici del legno naturale.

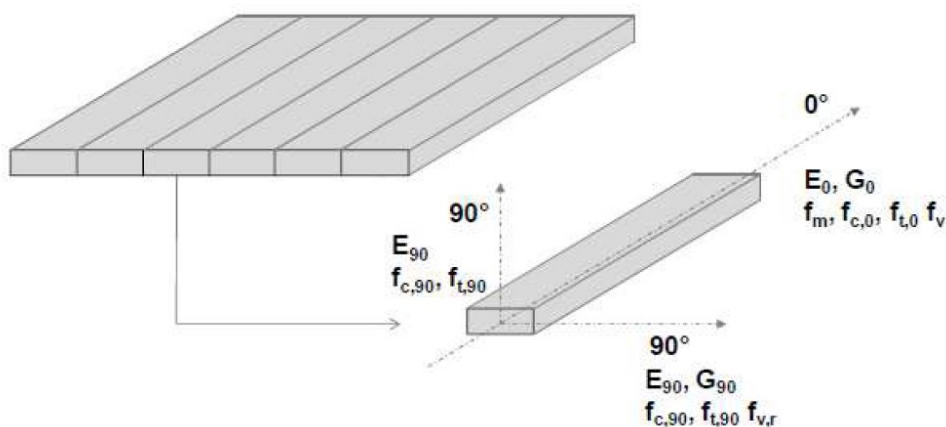


Figura 40: Caratterizzazione meccanica ortotropa dello strato elementare di un pannello XLAM

Un presupposto fondamentale per la modellazione dell'XLAM è l'ipotesi di perfetta solidarietà meccanica tra gli strati. L'incollaggio non rappresenta un piano di debolezza, bensì un legame ad alta rigidezza che rende il sistema un corpo unico e monolitico. In analogia con quanto avviene nel legno lamellare, lo strato di adesivo possiede una rigidezza tale da poter essere considerato infinitamente rigido rispetto alle lamelle lignee. Ai fini del calcolo strutturale, la deformabilità del collante risulta quindi trascurabile, autorizzando l'analisi del pannello come un corpo continuo.

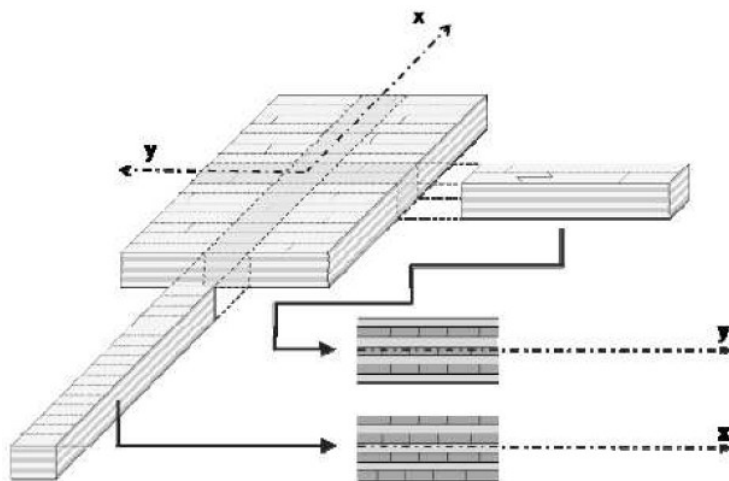


Figura 41: XLAM quale griglia di elementi lineari e multistrato

Per semplificare l'analisi strutturale, il pannello XLAM può essere interpretato come una griglia di elementi lineari multistrato.

In questa schematizzazione, il comportamento nelle direzioni X e Y viene analizzato separatamente: per ciascun asse, si distinguono gli strati "portanti" (con fibre parallele all'asse) dagli strati "trasversali". Questa distinzione è alla base dei metodi di calcolo semplificati, che permettono di determinare le proprietà della sezione trasversale ignorando, in prima approssimazione, il contributo alla rigidezza flessionale degli strati orientati a 90°

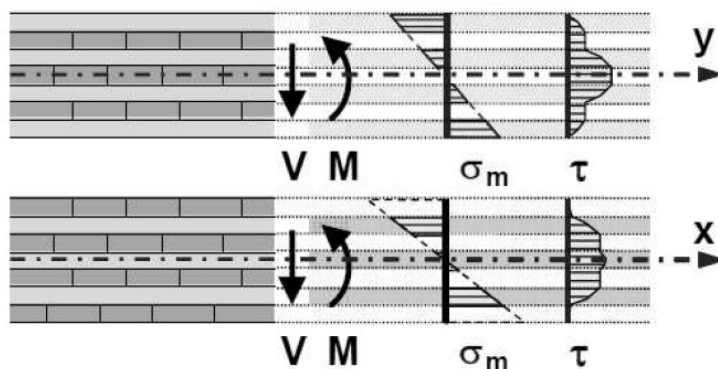


Figura 42: Distribuzione delle tensioni di flessione e di taglio sulla sezione per i due casi

Sebbene gli strati trasversali contribuiscano in misura ridotta alla rigidità flessionale complessiva (data la modesta entità del modulo elastico E_{90}), essi svolgono una funzione statica imprescindibile: garantiscono il collegamento rigido e la continuità tra i corsi di tavole longitudinali. Tale configurazione assicura la coesione del sistema, permettendo la trasmissione delle sollecitazioni di taglio e aumentando il braccio della coppia interna della sezione.

7.3.2 L'elemento piastra

La modellazione dell'XLAM come elemento piastra si basa sulla sua capacità di ricevere e trasferire carichi agenti ortogonalmente al proprio piano. Nella prassi progettuale, l'analisi di questo componente viene semplificata schematizzandolo come una griglia di elementi inflessi, dotati di rigidità differenziate lungo le due direzioni principali.

Come evidenziato nella Figura 43 (c), il carico verticale applicato sulla superficie del pannello viene ripartito nelle due direzioni ortogonali. L'adozione di un modello a griglia di travi è giustificata dalla configurazione geometrica tipica dei solai, che spesso induce un funzionamento strutturale prevalente lungo l'asse di massima rigidità (asse principale).

Nonostante tale semplificazione, la natura bidimensionale del sistema assicura un'efficace distribuzione delle sollecitazioni: la mutua collaborazione tra gli strati permette di mobilitare l'intera sezione trasversale, mitigando le concentrazioni di tensione locale e ripartendo le azioni lungo i perimetri d'appoggio.

Un aspetto distintivo della piastra in XLAM è la sua limitata rigidità torsionale. Questo comportamento è la risultante di due fattori critici:

- Modulo di taglio (G): i bassi valori caratteristici del legno limitano la capacità di trasferimento delle tensioni tangenziali torsionali tra i diversi strati;
- Discontinuità dello strato: l'eventuale fessurazione delle tavole o la mancanza di un incollaggio strutturale sui bordi laterali riduce la continuità del materiale nella direzione trasversale.

Nel comportamento a piastra, il controllo delle prestazioni (sia in termini di resistenza che di deformabilità allo Stato Limite di Esercizio) è strettamente legato alla stratigrafia. Lo spessore complessivo e l'alternanza delle lamelle definiscono l'inerzia flessionale necessaria a contenere le frecce elastiche. In questa configurazione, gli strati longitudinali (paralleli alla luce) operano come fibre resistenti principali, mentre gli strati trasversali fungono da elementi di collegamento e distanziamento, massimizzando il braccio della coppia interna e garantendo la trasmissione dello sforzo di taglio.

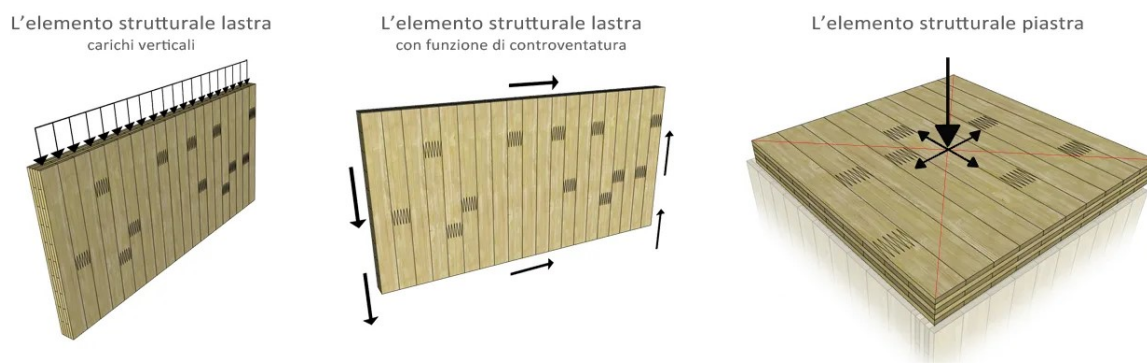


Figura 43: (a) Elemento di parete con funzione di lastra, (b) Elemento di parete con funzione di controvento, (c) Elemento piastra

7.3.3 L'elemento strutturale piano e la configurazione portante dell'edificio

La concezione portante dell'edificio in XLAM si fonda sull'integrazione di componenti piani che, attraverso sistemi di connessione meccanica, danno origine a un organismo tridimensionale a comportamento scatolare. Come illustrato nella Figura 44, il processo costruttivo evolve dalla micro-scala della stratigrafia del pannello alla macro-scala del volume edilizio, dove la stabilità è garantita dalla mutua collaborazione tra solai (diaframmi orizzontali) e pareti (setti di controvento).

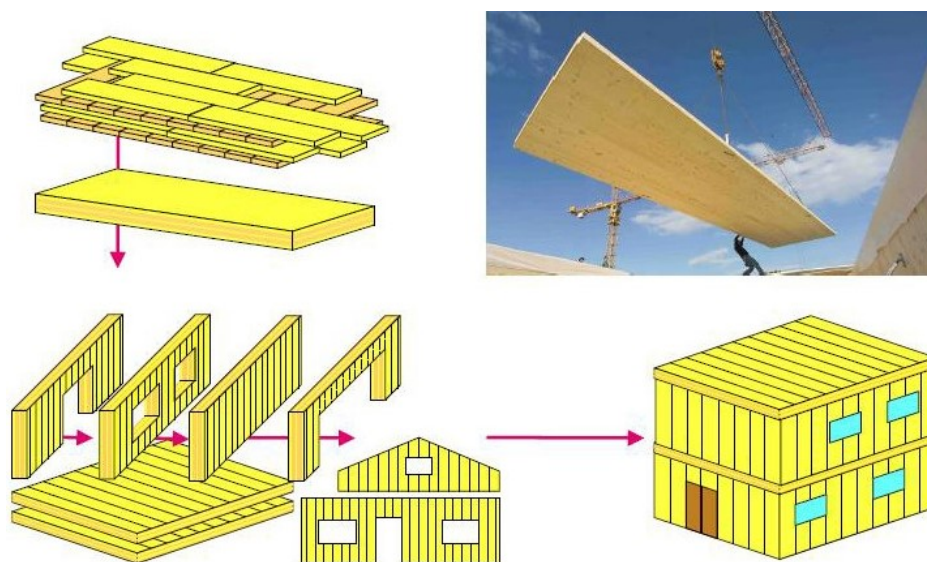


Figura 44: Sintesi del processo costruttivo in XLAM: dalla stratigrafia del pannello (in alto a sinistra) alla sua messa in opera in cantiere (in alto a destra), fino alla logica di assemblaggio scatolare (in basso) che definisce l'organismo edilizio completo

Dal punto di vista della modellazione agli elementi finiti (FEM) e del calcolo analitico, le giunzioni tra i pannelli ortogonali sono convenzionalmente schematizzate come cerniere lineari. Tale assunzione semplificativa implica che:

Riqualificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya, (Castilla-La Mancha, Spagna)

- Trasmissione delle azioni: il trasferimento dei carichi avvenga prevalentemente per contatto e attraverso le connessioni meccaniche, senza fare affidamento sulla rigidità flessionale del nodo;
- Cinematica del nodo: la linea d'azione del flusso delle forze viene fatta coincidere con lo spigolo di intersezione tra i piani medi dei pannelli, minimizzando l'insorgenza di momenti parassiti non previsti in fase di progetto.

Sebbene i nodi reali (realizzati tramite viti a tutto filetto, angolari a taglio o hold-down) possiedano una rigidità rotazionale finita, la prassi di calcolo li considera vincoli disconnessi alla rotazione per favorire un approccio cautelativo.

In questo contesto, il progettista affida la continuità statica del sistema alla corretta disposizione degli elementi di fissaggio, i quali hanno il duplice compito di:

- Assorbire le azioni tangenziali (scorrimento): tipiche delle basi delle pareti soggette a vento o sisma;
- Contrastare le azioni di trazione (ribaltamento): garantendo l'aderenza del setto alla fondazione o ai piani sottostanti.

Questa logica di assemblaggio trasforma l'edificio in un sistema iperstatico e resiliente, dove la duttilità non è ricercata nel materiale legno, bensì nella capacità deformativa delle connessioni metalliche sotto carichi ciclici.

7.3.4 Solette in legno massiccio

Le solette realizzate in pannelli XLAM costituiscono una soluzione strutturale bidimensionale di elevata efficienza, capace di coniugare leggerezza e rigidità. Sebbene il dimensionamento preliminare possa basarsi su regole empiriche legate al rapporto luce-spessore, la progettazione esecutiva deve rispondere a severi requisiti prestazionali, spesso più restrittivi di quelli puramente resistivi.

In fase di predimensionamento, lo spessore del pannello viene stimato tra $1/35$ e $1/40$ della luce di calcolo (solitamente la distanza minore tra gli appoggi). Tuttavia, la verifica reale è quasi sempre governata dai criteri di rigidità (Stati Limite di Esercizio) piuttosto che dalla resistenza ultima del materiale:

- Limitazione delle frecce: le deformazioni istantanee e differite (dovute alla viscosità del legno) devono essere rigorosamente contenute per garantire l'integrità dei divisori non strutturali e il comfort estetico;

- Comfort vibrazionale: data la bassa massa volumica del legno rispetto al calcestruzzo, il comportamento oscillatorio e le frequenze proprie di vibrazione diventano i parametri critici. In ambito residenziale, è necessario garantire che la frequenza fondamentale del solaio resti al di fuori dei range percepibili dall'uomo per evitare fenomeni di disturbo.

Le dimensioni massime dei componenti sono spesso dettate dai limiti del trasporto stradale o dalle condizioni di cantiere. L'impiego di pannelli accostati di dimensioni ridotte è una prassi comune. Dal punto di vista statico, l'accostamento di più pannelli trasforma il solaio in un insieme di elementi inflessi monodirezionali. Il collegamento longitudinale (parallelo alla fibratura principale) è tipicamente progettato come una cerniera lineare. Questo giunto assicura la continuità del solaio come diaframma rigido (effetto lastra) e come superficie di ripartizione del carico (effetto piastra), consentendo il trasferimento degli sforzi di taglio, ma non del momento flettente. Questa scelta evita dettagli costruttivi complessi, semplificando la posa in opera.

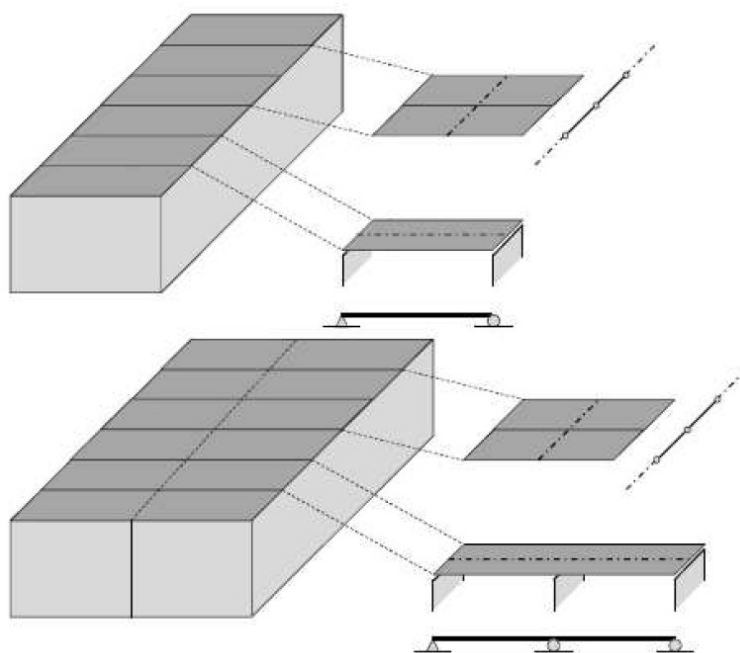


Figura 45: Principio strutturale e giunti della soletta XLAM

Nonostante la semplificazione monodirezionale, la tecnologia XLAM permette di attivare una capacità portante bidirezionale (Figura 46). Tale comportamento, tipico della piastra, si ottiene quando i giunti tra i pannelli sono progettati per garantire la continuità della rigidità flessionale.

In questa configurazione, la struttura è in grado di ridistribuire i carichi trasversalmente, superando i limiti dei sistemi a travi isolate. Oltre alla trasmissione dei carichi verticali, questa caratteristica è essenziale per la funzione di diaframma di piano: il solaio agisce come un elemento

rigido orizzontale capace di raccogliere le azioni sismiche o del vento e ripartirle proporzionalmente verso i sistemi di controvento verticali (pareti), garantendo la risposta scatolare dell'intero organismo edilizio.

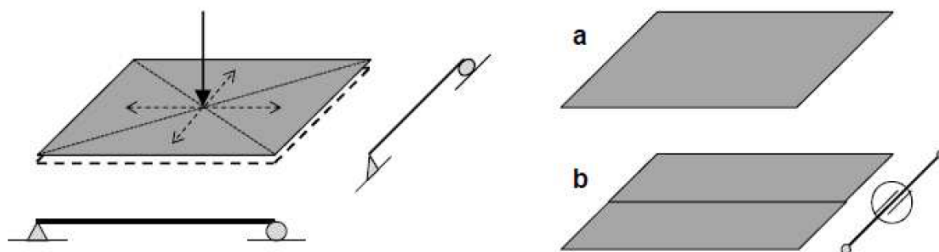


Figura 46: Piastra portante in due direzioni: (a) Elemento unico, (b) Elemento composto da più parti con giunti rigidi

7.3.5 Parete in legno massiccio

La parete strutturale in XLAM viene modellata come un montante o un pilastro a sviluppo continuo. Sebbene il dimensionamento strutturale sia primariamente dettato dalle azioni verticali, lo spessore dell'elemento deve integrare ulteriori requisiti prestazionali, spesso non riconducibili al solo calcolo delle tensioni: l'isolamento acustico, la massa inerziale della costruzione e la robustezza locale in corrispondenza delle aperture richiedono un'attenzione specifica.

Nella prassi progettuale, pur verificando la tenuta strutturale per spessori inferiori, è fortemente sconsigliato scendere al di sotto di 110 mm per le pareti esterne e 100 mm per le pareti portanti interne, al fine di garantire un adeguato margine di sicurezza rispetto alle sollecitazioni impreviste e alle prestazioni igrotermiche e acustiche.

La presenza di vani (finestre, porte) rappresenta la condizione di calcolo più critica per un elemento a parete. L'apertura interrompe il flusso verticale delle tensioni, costringendo il carico a deviare verso i montanti laterali, dove si generano concentrazioni di sollecitazioni.

In queste zone, la porzione di pannello sovrastante l'apertura deve assolvere alla funzione di architrave. La tecnologia XLAM è intrinsecamente vantaggiosa in tale scenario: la stratigrafia del pannello, caratterizzata da corsi di tavole disposti ortogonalmente, offre una capacità flessionale residua che può essere sfruttata direttamente per la funzione di architrave, spesso senza ricorrere ad alcun rinforzo aggiuntivo, a condizione che l'altezza della parte di muro sopra il foro sia sufficiente a garantire rigidità e resistenza adeguate.

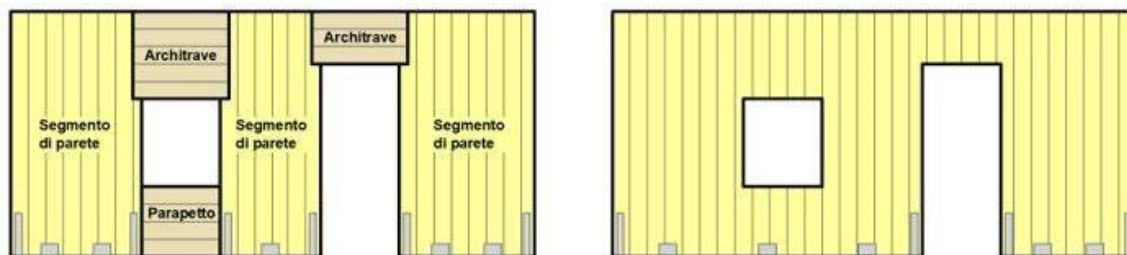


Figura 47: Schematizzazione strutturale di una parete XLAM con aperture (finestre e porte): (a) Scomposizione funzionale in segmenti di parete, (b) Configurazione finale in continuità

Come illustrato in Figura 47, la parete XLAM non deve essere necessariamente pensata come un insieme di elementi lineari separati, ma come un pannello monolitico dove le zone sopra e sotto le aperture (architravi e parapetti) sono parte integrante della stessa superficie strutturale. In particolare, la porzione superiore funge da architrave sfruttando la rigidità flessionale degli strati orizzontali, mentre i segmenti laterali (montanti) assorbono la concentrazione di carico verticale derivante dalla deviazione del flusso delle forze operata dall'apertura stessa.

L'analisi strutturale di un elemento di parete con aperture si configura come lo studio di una lastra a geometria irregolare. Tale processo richiede la mappatura accurata del flusso delle forze interne e l'individuazione delle sezioni critiche, dove le concentrazioni di tensione risultano determinanti per la verifica della sicurezza strutturale.

Le prescrizioni sugli spessori minimi precedentemente citate (110 mm per l'esterno, 100 mm per l'interno) assumono un'importanza fondamentale proprio in presenza di fori o interruzioni. Spesso, infatti, nelle fasi di predimensionamento, il contributo della parete alla rigidità e alla resistenza nel proprio piano (direzione orizzontale) viene trascurato a favore del solo calcolo dei carichi verticali.

Tuttavia, mantenere uno spessore adeguato garantisce che la parete possa assolvere correttamente alla sua funzione di controvento, limitando le deformazioni nel piano e assicurando la stabilità globale dell'edificio anche sotto l'azione di carichi laterali (vento o sisma) che mettono in crisi le zone rese più deboli dalle aperture.

7.4 Metodi di calcolo e Normative per gli elementi in CLT

Da un punto di vista normativo, l'XLAM presenta sfide peculiari. Sebbene sia una tecnologia d'avanguardia, non ancora dettagliata in tutti i codici di calcolo standard nazionali, è erroneo ritenere che manchi un riferimento tecnico-legale solido.

Il corretto inquadramento normativo offre le fondamenta necessarie per validare l'XLAM, permettendo la sua integrazione nelle pratiche di progettazione tecnica consolidata.

Ai fini di questo lavoro di tesi, vengono indicate le normative su cui si è basato questo progetto, quindi limitate al calcolo di un edificio XLAM ubicato in territorio spagnolo.

➤ Il quadro europeo: gli Eurocodici

Sebbene l'XLAM non sia ancora dettagliatamente trattato in una sezione specifica dell'attuale Eurocodice, esso rimane il pilastro fondamentale per il calcolo strutturale.

- Eurocodice 5 (EN 1995-1-1): è il riferimento principale per la progettazione delle strutture in legno;
- Eurocodice 8 (EN 1998): fondamentale per la progettazione sismica, particolarmente rilevante in alcune zone della Spagna (come l'Andalusia o i Pirenei), per definire il comportamento duttile delle connessioni nei sistemi a pannelli.

➤ La normativa nazionale spagnola (CTE)

Per un edificio in Spagna, il documento legale di riferimento è il Codice Tecnico della Edificazione (CTE):

- DB SE-M (*Documento Básico Seguridad Estructural - Madera*): testo normativo specifico per le strutture in legno;
- EAE (*Instrucción de Acero Estructural*): contiene indicazioni sulle parti metalliche e le connessioni bullonate o chiodate che uniscono i pannelli in XLAM.

➤ Documenti tecnici specifici

Poiché l'XLAM è un materiale industriale, la sua applicazione in Spagna è supportata da documenti che integrano il CTE:

- Valutazione Tecnica Europea (ETA): trattandosi di un sistema costruttivo ingegnerizzato, il calcolo deve fare riferimento alla specifica del produttore dei pannelli.

➤ Norme UNE e ISO

Per i test sui materiali e le tolleranze di fabbricazione in Spagna, si fa riferimento alle norme:

- UNE-EN 16351: norma specifica per il "legno lamellare a strati incrociati", che definisce i requisiti di produzione e le caratteristiche strutturali;
- UNE-EN 338: classificazione della resistenza del legno massiccio utilizzato negli strati dei pannelli.

7.4.1 Fondamenti metodologici per il dimensionamento

La determinazione dei valori di calcolo delle proprietà meccaniche dell'XLAM, nell'ambito di un progetto localizzato in Spagna, deve conformarsi rigorosamente al Código Técnico de la Edificación (CTE). È importante sottolineare che l'approccio spagnolo presenta peculiarità distintive rispetto ad altri quadri normativi, specialmente in merito alla definizione dei coefficienti parziali di sicurezza (γ_M)

Nel quadro normativo spagnolo, la resistenza di progetto del materiale (f_d) viene calcolata integrando le proprietà caratteristiche definite nell'ETA specifico del produttore con i fattori di correzione previsti dal DB SE-M.

La formulazione di base è la seguente:

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

Dove:

- f_k : valore caratteristico della resistenza, desunto dalla classificazione strutturale del pannello (basata sulla norma UNE-EN 338 per il legno massiccio o direttamente dal certificato ETA per il CLT);
- k_{mod} : coefficiente che varia in funzione della classe di servizio (ambiente di esercizio) e della classe di durata del carico (azione permanente, variabile, etc.), definito rigorosamente nelle tabelle del DB SE-M (Capitolo 2.2.2);
- γ_M : coefficiente parziale di sicurezza del materiale. Il CTE stabilisce valori specifici che il professionista deve applicare in fase di analisi agli stati limite (SLU), garantendo che il dimensionamento sia coerente con le direttive nazionali.

A differenza di quanto previsto dalle normative italiane (NTC2018), che adottano coefficienti più cautelativi e marcatamente superiori agli standard comunitari, la normativa spagnola si mantiene in linea con le indicazioni dell'Eurocodice 5.

Per il legno lamellare incrociato (XLAM/CLT), inteso come prodotto industriale soggetto a rigorosi controlli di produzione certificati, il coefficiente γ_M assume i valori riportati nella seguente sintesi:

Tabella 27: Valori di coefficiente parziale di sicurezza, CTE DB-SE-M, su Excel

Tipo di materiale	Coefficiente γ_M (CTE DB-SE-M)
Legno lamellare/Pannelli XLAM	1.25
Unioni e connessioni	1.30
Situazioni accidentali	1.00

L'uso di 1.25 (invece di valori più alti) permette un'ottimizzazione del materiale, rendendo la struttura in XLAM potenzialmente più leggera o economica a parità di carichi rispetto a un calcolo effettuato rigorosamente sotto NTC italiane.

I valori del fattore di modifica k_{mod} adottati nel contesto spagnolo mostrano una sostanziale uniformità con quanto previsto dagli Eurocodici e dalle prassi tecniche internazionali. Questo parametro, fondamentale per tradurre la resistenza caratteristica in resistenza di progetto, tiene conto dell'influenza combinata della durata del carico e del grado di umidità della struttura (classe di servizio).

Per i componenti in legno lamellare incrociato (XLAM), i valori di k_{mod} da impiegare nel calcolo secondo la normativa spagnola sono riassunti nella tabella seguente, riflettendo le condizioni ambientali e di carico standard:

Tabella 28: Coefficienti funzione della classe di servizio, CTE DB-SE-M, su Excel

Classe di servizio	Permanente	Lunga durata	Media durata	Breve durata	Istantanea
CLASSE 1	0.60	0.70	0.80	0.90	1.10
CLASSE 2	0.60	0.70	0.80	0.90	1.10
CLASSE 3	0.50	0.55	0.65	0.70	0.90

Si osservi che, per carichi di tipo istantaneo (come il sisma o il vento), la normativa permette un incremento della resistenza di progetto grazie a un k_{mod} pari a 1.10, valore che riflette la capacità del legno di sopportare sforzi elevati per tempi estremamente ridotti. È opportuno specificare che l'XLAM, per sua natura produttiva e igroscopica, trova applicazione quasi esclusiva nelle classi di servizio 1 e 2.

7.4.2 Analisi degli elementi strutturali soggetti a flessione

Nella pratica strutturale, il calcolo delle sollecitazioni interne per i solai in XLAM può essere semplificato, in molti scenari ordinari, ipotizzando un comportamento meccanico monodirezionale. In questa configurazione, il pannello viene analizzato come un elemento inflesso soggetto a flessione e taglio lungo una sola direttrice principale del piano. Tale schematizzazione rende l'elemento inflesso il componente base, e certamente il più ricorrente, nel processo di dimensionamento e verifica.

Tuttavia, i criteri metodologici illustrati nella trattazione mantengono la loro validità generale: le procedure per la verifica della resistenza ai momenti flettenti e agli sforzi di taglio rimangono applicabili indipendentemente dalla natura della sollecitazione, sia essa mono o bidirezionale.

7.4.2.1 Verifica a flessione

L'analisi della resistenza flessionale di un elemento strutturale in XLAM richiede una modellazione che integri la sua specifica conformazione stratificata e le diverse proprietà meccaniche associate a ciascun livello. Poiché il pannello presenta una disposizione ortogonale delle lamelle, la risposta agli sforzi di flessione non può essere assimilata a quella di una sezione omogenea, rendendo necessaria una valutazione puntuale dell'orientamento delle fibre.

La distribuzione delle tensioni deve, infatti, riflettere la rigidità specifica di ogni strato, considerando il differente contributo meccanico offerto dagli strati orientati parallelamente alla direzione del momento flettente rispetto a quelli disposti trasversalmente.

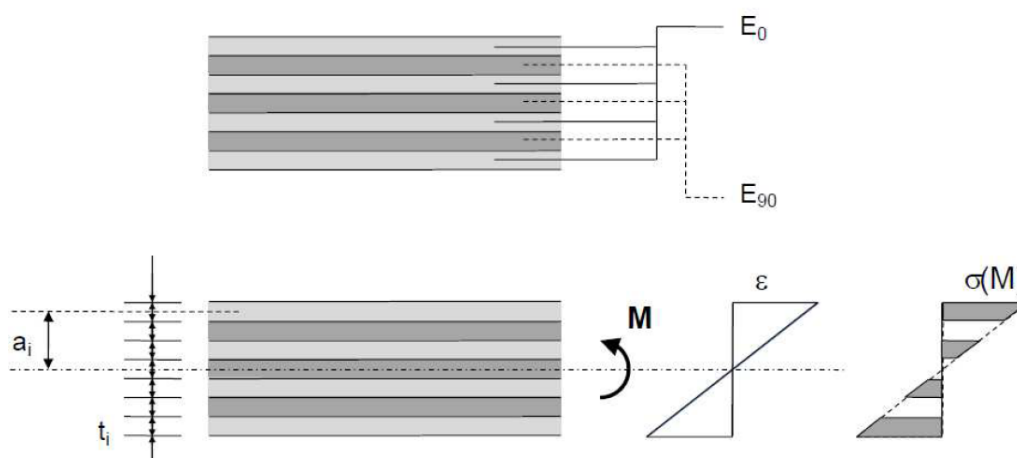


Figura 48: Distribuzione delle sollecitazioni dovute dal momento flettente

La valutazione della rigidità a flessione di una sezione in XLAM richiede un'analisi differenziata dei moduli elastici relativi ai vari strati di tavole. Data la marcata discrepanza tra il modulo elastico parallelo alle fibre (E_0) e quello trasversale (E_{90}), nella pratica del calcolo è opportuno trascurare l'apporto degli strati disposti perpendicolarmente alla direzione principale.

Per una striscia di larghezza unitaria del pannello, la rigidità flessionale complessiva K si ottiene sommando i contributi dei singoli strati tramite la seguente espressione:

$$K = (EJ)_{eff} = \sum_i (J_i \cdot E_i) + \sum_i (A_i \cdot a_i^2 \cdot E_i)$$

Dove:

- K : rigidità flessionale nella direzione di calcolo;
- J_i : momento d'inerzia proprio dello strato i -esimo;
- E_i : modulo elastico dello strato considerato;
- A_i : area della sezione trasversale dello strato;

Riqualificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya, (Castilla-La Mancha, Spagna)

- a_i : distanza baricentrica tra lo strato e l'asse neutro della sezione complessiva.

In base alla rigidità così calcolata, la distribuzione delle tensioni normali all'interno della sezione può essere ricavata applicando la legge di proporzionalità elastica:

$$\sigma = \frac{M}{K} \cdot a \cdot E_i$$

Dove:

- M : momento flettente sollecitante di progetto;
- a : distanza della fibra analizzata dal baricentro meccanico della sezione;
- K : rigidità flessionale precedentemente determinata;
- E_i : modulo di elasticità specifico dello strato in cui ricade la fibra.

Qualora la sezione sia composta da strati appartenenti alla medesima classe di resistenza, l'individuazione della sollecitazione flessionale di picco può essere semplificata. Il valore massimo della tensione di flessione viene determinato attraverso la relazione:

$$\sigma = \frac{M}{W^*}$$

In questa formulazione, il modulo di resistenza efficace W^* è definito come:

$$W^* = \frac{K}{h/2} \cdot \frac{1}{E_0}$$

Dove i parametri considerati sono:

- h : spessore complessivo (altezza) del pannello in XLAM;
- E_0 : modulo di elasticità longitudinale degli strati esterni (paralleli alle fibre);
- K : rigidità flessionale efficace della sezione nella direzione di calcolo.

Il medesimo approccio metodologico è applicabile anche qualora la sollecitazione di flessione agisca lungo la direzione ortogonale del pannello in XLAM, comunemente indicata come "direzione debole" della sezione.

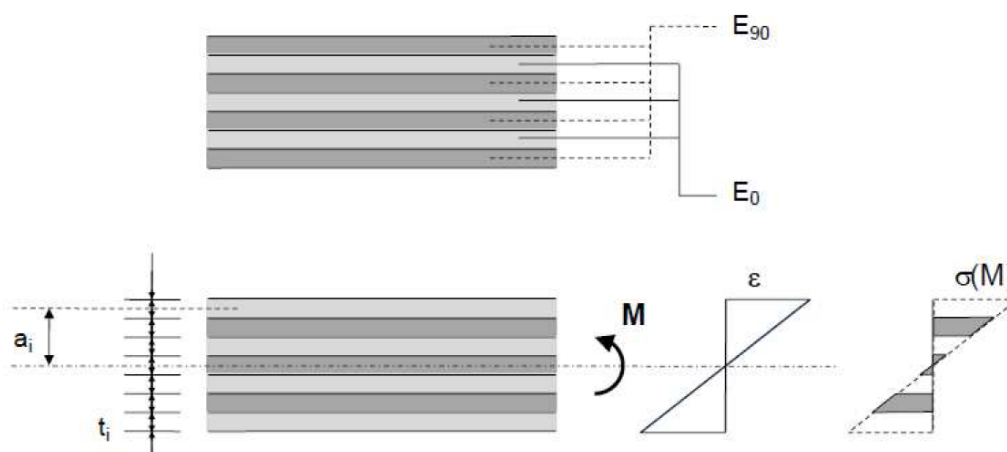


Figura 49: Direzione debole del pannello: distribuzione delle sollecitazioni dovute dal momento

La verifica dello stato limite ultimo, a flessione, dell'XLAM può avvenire nella forma comune a tutte le verifiche:

$$\sigma \leq f_{m,d}$$

$$\text{con } f_{m,d, XLAM} = f_{m,d, BSH} \cdot k_{sys}$$

Dove i parametri considerati sono:

- $f_{m,d, XLAM}$: valore caratteristico della resistenza a flessione dell'XLAM;
- $f_{m,d, BSH}$: valore di calcolo della resistenza a flessione del lamellare della classe di resistenza relativa alle lamelle considerate;
- K_{sys} : coefficiente di sistema.

La determinazione della resistenza flessionale di progetto per pannelli in CLT può essere assunta, in via semplificativa, equivalente alla resistenza di elementi in legno lamellare incollato composti da lamelle della medesima classe di resistenza. Tale analogia è supportata dalla congruenza strutturale delle sezioni trasversali e dalle evidenze sperimentali riscontrate in letteratura scientifica in merito al comportamento agli Stati Limite Ultimi (SLU).

In presenza di una configurazione strutturale caratterizzata da molteplici componenti sollecitate in parallelo, è ammessa l'applicazione di un coefficiente di sistema k_{sys} , finalizzato a tener conto della redistribuzione delle tensioni dagli elementi più sollecitati a quelli meno sollecitati.

Tale parametro è definito analiticamente come segue:

$$k_{sys} = 1 + 0.025 \cdot n \leq k_{sys, max} = 1.1$$

Dove:

- n : numero di lamelle attive sollecitate in parallelo ($n > 1$).

La definizione del numero di lamelle efficaci deve essere desunta dalla geometria del pannello e dalle tolleranze dimensionali delle singole lamelle, in conformità con quanto prescritto nei documenti di Valutazione Tecnica Europea (ETA) o nelle omologazioni di prodotto specifiche. Per pannelli aventi larghezza nominale $b \geq 1.0 m$, è generalmente ammissibile adottare il valore cautelativo di $k_{sys} = 1.1$. Si precisa che tale incremento è subordinato a una distribuzione omogenea delle sollecitazioni sul piano del pannello; pertanto, in presenza di gradienti di carico non uniformi o concentrazioni di sforzo locali, l'applicazione del coefficiente di sistema è da ritenersi non valida.

I criteri sopra descritti si riferiscono a modelli di calcolo generalizzati.

In sede di verifica, è facoltà del progettista utilizzare:

1. Modelli analitici di calcolo basati sulla teoria generale;
2. Valori di calcolo o caratteristici desunti direttamente dalle certificazioni di prodotto specifiche, qualora il profilo prestazionale del produttore fornisca dati puntuali superiori o distinti dallo standard normativo.

In presenza di flessione biassiale, la verifica strutturale viene condotta analizzando in modo indipendente le due direzioni principali del piano. Per ciascuna direzione, la tensione flessionale massima deve essere confrontata con la resistenza delle sole lamelle la cui fibratura risulta parallela all'asse della sollecitazione considerata.

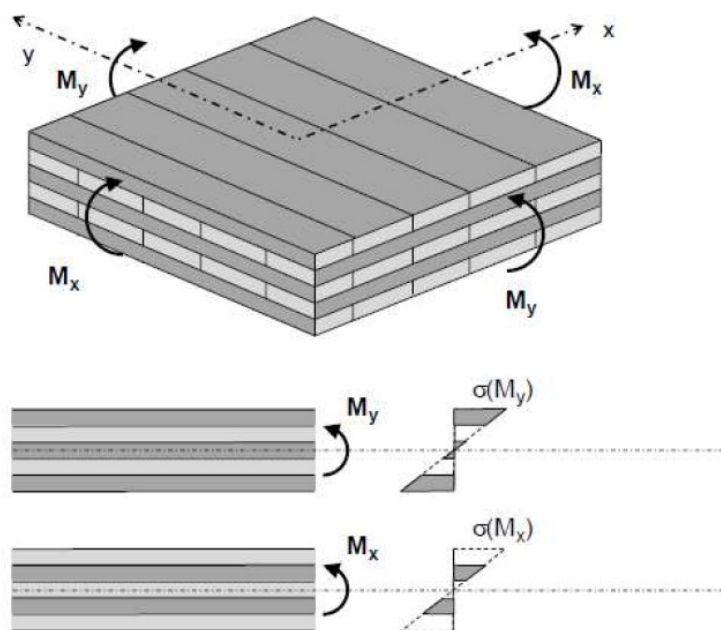


Figura 50: Flessione biassiale della piastra

La verifica assume la forma seguente:

$$\sigma_{mx,max,d} \leq f_{m,d, XLAM} \text{ e } \sigma_{my,max,d} \leq f_{m,d, XLAM}$$

La verifica allo Stato Limite Ultimo per elementi in CLT soggetti a sollecitazione composta da forza assiale e momento flettente deve essere condotta tramite la sovrapposizione degli effetti, previa esclusione degli strati con fibratura trasversale rispetto alla direzione dell'azione assiale analizzata. La verifica deve essere eseguita in modo indipendente per le due direzioni del piano del pannello, considerando in ciascun caso la tensione di calcolo massima agente nelle lamelle con orientamento della fibratura parallelo alla sollecitazione considerata.

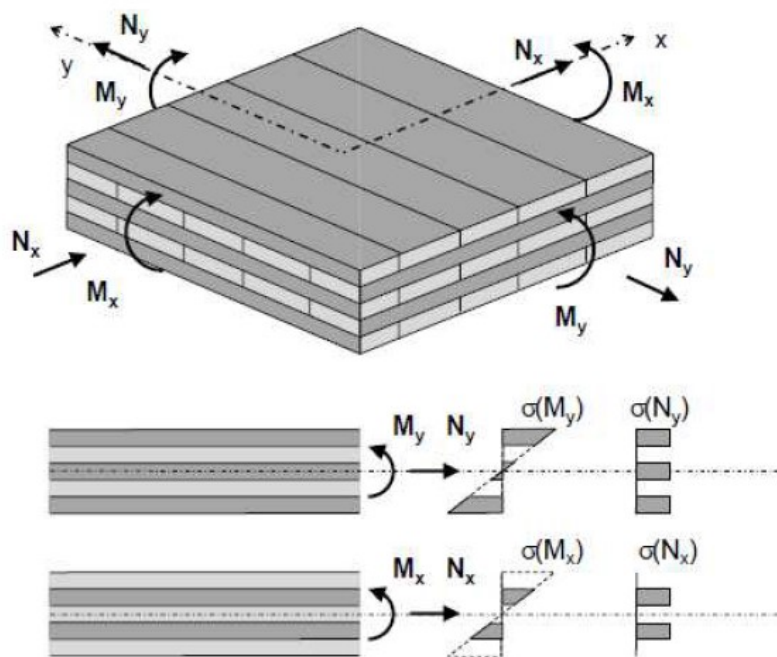


Figura 51: Flessione biassiale e forze normali

Le verifiche da condurre, quindi, sono:

$$\frac{\sigma_{mx,max,d}}{f_{m,d, XLAM}} + \frac{\sigma_{cx,max,d}}{f_{c,d, XLAM}} \leq 1.0$$

$$\frac{\sigma_{my,max,d}}{f_{m,d, XLAM}} + \frac{\sigma_{cy,max,d}}{f_{c,d, XLAM}} \leq 1.0$$

$$\frac{\sigma_{mx,max,d}}{f_{m,d, XLAM}} + \frac{\sigma_{tx,max,d}}{f_{t,d, XLAM}} \leq 1.0$$

$$\frac{\sigma_{my,max,d}}{f_{m,d, XLAM}} + \frac{\sigma_{ty,max,d}}{f_{t,d, XLAM}} \leq 1.0$$

Dove:

- $f_{c,d,XLAM}$: valore di calcolo della resistenza a flessione del lamellare di resistenza relativa alle lamelle considerate;
- $f_{t,d,XLAM}$: valore di calcolo della resistenza a flessione del lamellare della classe di resistenza relativa alle lamelle considerate.

7.4.2.2 Verifica a taglio

La verifica della resistenza al taglio fuori piano (trasversale) per elementi in CLT viene condotta in analogia ai criteri definiti per la sollecitazione flessionale, sebbene la mappatura delle tensioni tangenziali sull'intera sezione debba necessariamente computare l'eterogeneità meccanica dei singoli strati. In tale scenario, risulta strutturalmente improprio trascurare il contributo degli strati con orientamento della fibratura trasversale rispetto alla direzione d'analisi, poiché tali componenti risultano essenziali per garantire la continuità del flusso delle tensioni e la trasmissione dello sforzo di taglio tra gli strati longitudinali adiacenti (effetto *rolling shear*).

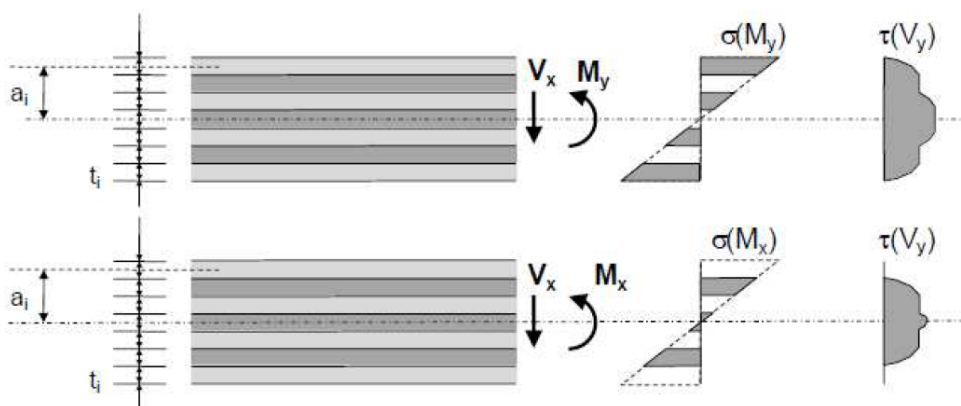


Figura 52: Flessione e taglio trasversale al piano con la rispettiva distribuzione delle tensioni sulla sezione

La distribuzione del profilo tensionale tangenziale è definita analiticamente dalla relazione:

$$\tau(a) = \frac{V \cdot \sum(S_m \cdot E_m)}{K \cdot b}$$

Dove:

- b : larghezza dell'elemento considerato;
- S_m : momento statico della parte di sezione.

L'analisi dei diagrammi degli sforzi evidenzia come i picchi tensionali si localizzino in corrispondenza degli strati trasversali; pertanto, la verifica allo Stato Limite Ultimo deve integrare

l'anisotropia del materiale, poiché la capacità resistente è funzione dell'orientamento della fibratura rispetto al vettore sollecitante.

Oltre alla verifica convenzionale del taglio parallelo alla fibra, è necessario validare la stabilità strutturale degli strati ortogonali, soggetti a regimi di resistenza significativamente inferiori. In tali zone, il meccanismo di collasso è governato dal raggiungimento della resistenza a trazione perpendicolare alla fibra (con inclinazione delle tensioni principali di $\pm 45^\circ$), fenomeno identificato tecnicamente come *rolling shear* ($f_{v,r,d}$).

Si specifica che tale modellazione tensionale costituisce un'approssimazione analitica che trascura le deformazioni da taglio dei singoli strati; tuttavia, tale approccio è considerato cautelativo e cinematicamente ammissibile per elementi bidimensionali aventi un rapporto di snellezza (L/h) superiore a 10, dove gli scostamenti rispetto a modelli teorici più complessi risultano trascurabili ai fini professionali.

La verifica a taglio degli elementi strutturali in CLT assume una formulazione duale, distinguendo tra il regime tensionale nelle lamelle longitudinali e quello negli strati ortogonali:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \text{ per gli strati nella direzione considerata}$$

$$\tau_d \leq f_{v,r,d} \text{ per gli strati trasversali rispetto alla direzione considerata}$$

La resistenza al taglio convenzionale f_v viene assunta equivalente a quella del legno lamellare incollato di pari classe di resistenza, mentre la resistenza al taglio rotatorio (*rolling shear*) può essere stimata, in accordo con gli Eurocodici, come il doppio della resistenza a trazione perpendicolare alla fibra, salvo diverse specifiche tecniche di omologazione.

Il modello prevede, inoltre, un incremento del 25% della capacità resistente a taglio rotatorio per computare l'effetto di sistema, ovvero la capacità del pannello di ridistribuire le tensioni interne tra le lamelle. I parametri di progetto $f_{v,d}$ e $f_{v,r,d}$ si ottengono dai rispettivi valori caratteristici mediante l'applicazione dei coefficienti parziali di sicurezza del materiale γ_M e del fattore correttivo k_{mod} che tiene conto della durata del carico e della classe di servizio.

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M}$$

$$f_{v,r,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,r,k}}{\gamma_M}$$

La gerarchia delle verifiche agli Stati Limite Ultimi per sollecitazioni tangenziali è strettamente dipendente dalla configurazione stratigrafica del pannello e dall'orientamento dell'asse di

sollecitazione principale. In fase di analisi strutturale, la saturazione della capacità resistente è solitamente governata dal meccanismo di collasso per taglio rotatorio, a causa dei valori nominali di resistenza significativamente inferiori rispetto al taglio longitudinale parallelo alla fibra. Di conseguenza, il requisito di sicurezza relativo allo scorrimento negli strati trasversali costituisce, nella quasi totalità dei casi, il parametro limitante per il dimensionamento dell'elemento in CLT.

7.4.2.3 Pressione trasversale al piano del pannello

In presenza di sollecitazioni di compressione ortogonale al piano del pannello, l'intera stratigrafia risulta soggetta a sforzi normali agenti perpendicolarmente alla fibratura di ogni singola lamella.

In corrispondenza delle zone di interfaccia e degli appoggi per contatto tra elementi strutturali orizzontali e verticali, si manifesta un potenziale stato di crisi per schiacciamento trasversale. Per i sistemi in CLT, tale scenario critico si localizza tipicamente nelle zone di appoggio delle solette sulle sommità delle pareti portanti.

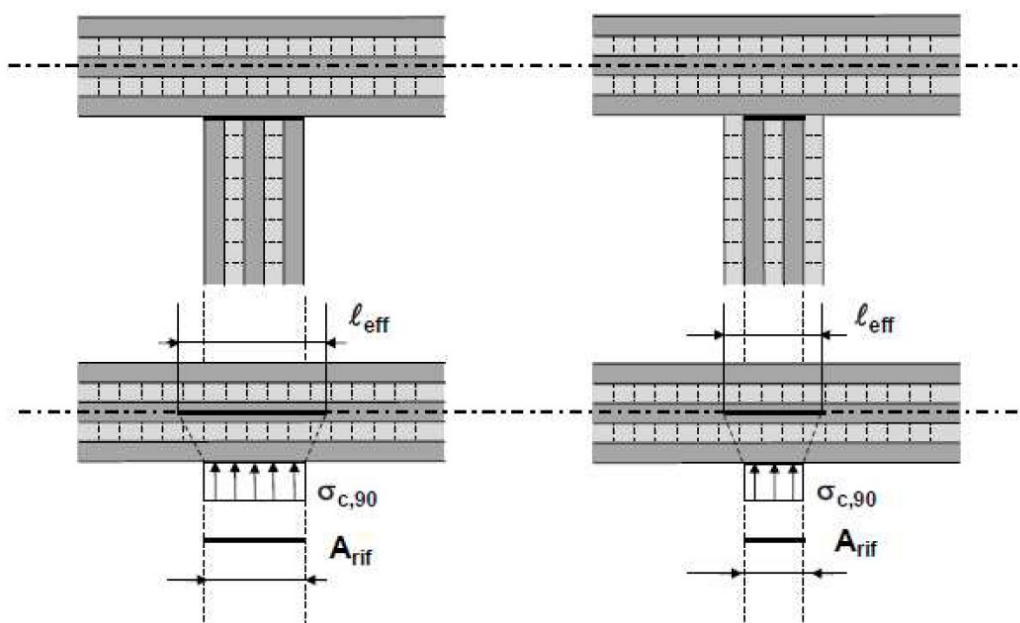


Figura 53: Compressione perpendicolare alla fibratura agli appoggi

La determinazione del regime tensionale per compressione ortogonale alla fibratura si basa sulla definizione di una superficie di contatto efficace, funzione della larghezza degli strati longitudinali (verticali) della parete che trasmettono l'azione assiale alla soletta in CLT; coerentemente con tale approccio, il contributo degli strati con fibratura orizzontale esterni della parete viene omesso dal computo dell'area resistente, poiché la loro minore rigidità trasversale non garantisce una trasmissione efficace dell'azione assiale. Infatti, nella compressione ortogonale ($f_{c,90}$), il materiale è circa 10-20 volte più tenero rispetto alla direzione parallela, e questo è uno

dei punti più critici perché il legno è molto tenero quando viene schiacciato perpendicolarmente alle sue fibre.

La verifica di sicurezza viene quindi formalizzata dalla seguente disuguaglianza:

$$\sigma_{c,90,d} \leq f_{c,90,d}$$

Resta valida la facoltà analitica di incrementare la resistenza di calcolo o di adottare una lunghezza efficace superiore alla dimensione geometrica reale del contatto; tale incremento è gestito dall'Eurocodice 5 mediante il coefficiente $f_{c,90,d}$.

7.4.2.4 Verifica dello stato di servizio e calcolo delle deformazioni

Per l'analisi agli Stati Limite di Esercizio (SLE) in configurazione di carico uniformemente distribuito, la caratterizzazione del comportamento deformativo dell'elemento in CLT è subordinata alla corretta definizione dei parametri di rigidezza flessionale e rotazionale in funzione della stratigrafia nominale.

La rigidezza flessionale equivalente è derivata analiticamente dalla relazione riportata precedentemente nell'ambito della verifica a flessione, mentre la rigidezza a taglio del pacchetto stratigrafico deve computare l'eterogeneità meccanica dei singoli strati e il relativo contributo alla deformabilità globale. Il modulo di elasticità tangenziale assume infatti valori discreti in funzione dell'orientamento delle fibre rispetto al vettore sollecitante: si definisce pertanto un modulo di taglio G_0 per le sollecitazioni parallele alla fibratura (taglio longitudinale) e un modulo G_{90} specifico per il regime di taglio rotatorio negli strati trasversali.

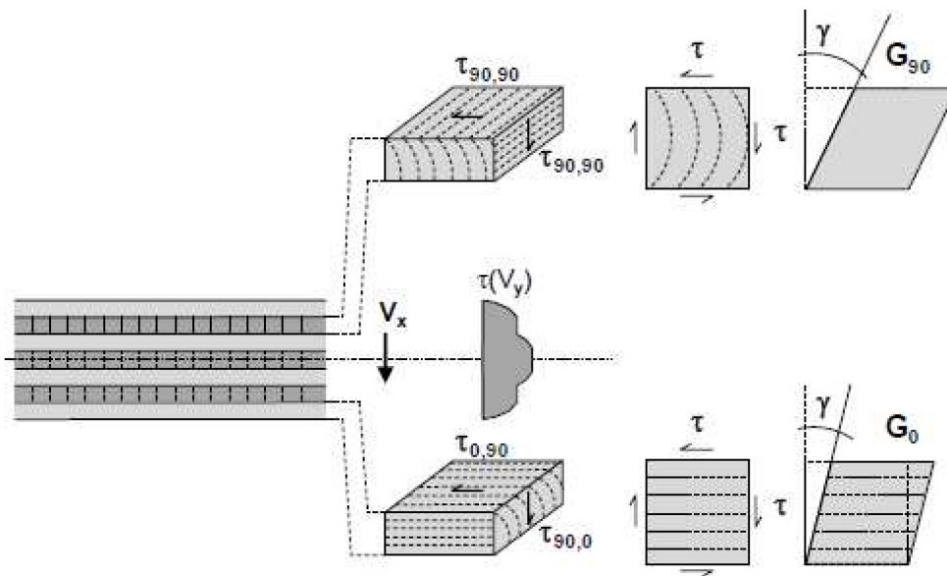


Figura 54: Sollecitazioni a taglio e definizione di taglio trasversale, con i moduli G_0 e G_{90}

La rigidezza a taglio della sezione stratificata in CLT è definita dalla seguente relazione:

$$S_V = GA' = \kappa \cdot \sum (G_i \cdot b_i \cdot t_i) = \kappa \cdot \sum (G_i \cdot A_i)$$

Dove:

- S_V : rigidezza a taglio nella direzione considerata;
- G_i : modulo di taglio del singolo strato;
- A_i : superficie del singolo strato;
- b_i : larghezza dell'elemento considerato;
- t_i : spessore del singolo strato;
- κ : coefficiente di correzione, introdotto per modellare la distribuzione non uniforme delle tensioni tangenziali lungo lo spessore del pannello, funzione della geometria della sezione e delle proprietà elastiche dei singoli strati.

L'espressione analitica completa del coefficiente di forma κ è data dal reciproco dell'integrale del momento statico pesato sulle rigidezze locali:

$$\kappa = \left(\sum (G_i \cdot A_i) \frac{1}{K^2} \cdot \int \frac{S^2(z)}{G_i(z) \cdot b} dz \right)^{-1}$$

dove $S(z)$ rappresenta il momento statico rispetto all'asse neutro e K la rigidezza flessionale efficace. Il valore K è strettamente dipendente dal numero di strati, dal rapporto tra i moduli di taglio longitudinale e rotatorio (G_0/G_{90}) e dagli spessori nominali delle lamelle.

Per sezioni con spessori costanti e rapporto $G_0/G_{90} = 10$, i valori del coefficiente variano tipicamente in un intervallo compreso tra 0.21 e 0.27 al crescere del numero di strati (da 3 a 13), stabilizzandosi asintoticamente per stratigrafie ad elevata complessità.

Tabella 29: Valori di k in funzione del numero di strati, su Excel

	Numero di strati					
	3	5	7	9	11	13
κ	0.21	0.24	0.26	0.27	0.27	0.27

Sebbene si operi con stratigrafie di CLT asimmetriche o caratterizzate da anisotropia marcata tra le direzioni principali, l'analisi di sensibilità del coefficiente di correzione κ evidenzia, per le configurazioni di impiego strutturale standard, una stabilità dei valori nell'intervallo 0.20 – 0.30. Assumendo che l'aliquota deformativa imputabile allo scorrimento trasversale non ecceda generalmente il 20% della freccia globale, risulta analiticamente ammissibile l'adozione di un valore costante per il computo delle deformazioni effettive. Tale semplificazione procedurale è

giustificata da uno scostamento dei risultati (errore relativo) tecnicamente trascurabile ai fini della verifica degli Stati Limite di Esercizio (SLE).

I parametri di rigidità del materiale, inclusi i moduli di scorrimento G_0 (taglio nel piano delle fibre) e G_{90} (taglio trasversale o *rolling shear*), sono determinati mediante le schede tecniche di prodotto e i profili prestazionali di riferimento. In linea generale, è possibile assumere per il CLT le proprietà meccaniche tipiche del legno lamellare incollato (GLT) appartenente alla medesima classe di resistenza. A livello normativo europeo, il modulo di taglio trasversale viene convenzionalmente definito tramite la relazione semplificata:

$$G_{90} = \frac{G_0}{10}$$

Tale rapporto rappresenta un'approssimazione prudente comunemente adottata in assenza di prove sperimentali specifiche; tuttavia, si rammenta che le certificazioni di prodotto (ETA) possono contenere prescrizioni di calcolo difformi o valori di rigidità puntuali, i quali prevalgono sulle assunzioni normative di carattere generale ai fini della progettazione esecutiva.

La risposta reologica del legno è una componente critica nella modellazione del comportamento deformativo a lungo termine, caratterizzata da una fase iniziale linearmente elastica seguita da un incremento viscoso dipendente dal tempo (*fluage*). Sotto l'azione di carichi persistenti, tale fenomeno induce un incremento della freccia di inflessione che non è integralmente recuperabile al momento della rimozione dei carichi accidentali, portando all'accumulo di deformazioni anelastiche permanenti.

Di conseguenza, ai fini della verifica allo Stato Limite di Esercizio (SLE), non è sufficiente valutare la freccia istantanea; è necessario implementare un controllo rigoroso sulla freccia differita, in particolare laddove la quota di carichi permanenti o semi-permanenti (pesi propri, carichi neve in zone altimetriche critiche) incida in misura significativa sul carico totale. La deformazione finale si valuta come somma della deformazione istantanea e della deformazione dovuta al *fluage*:

$$u_{finale} = u_{ist} + u_{diff}$$

La valutazione della freccia differita deve essere condotta sulla base delle combinazioni di carico quasi-permanenti, come definito dagli standard normativi per l'analisi agli Stati Limite di Esercizio (SLE). Assumendo, a scopo semplificativo, l'ipotesi di omogeneità dei parametri reologici tra i diversi strati e un comportamento costitutivo di tipo lineare-elastico per l'intero

pacchetto stratigrafico, la componente di deformazione differita può essere espressa mediante la seguente relazione analitica:

$$u_{fin} = u_{fin,G} + u_{fin,Q1} + u_{fin,Qi}$$

Dove:

- $u_{fin,G} = u_{ist,G} \cdot (1 + k_{def})$ deformazione finale causata dalle azioni permanenti;
- $u_{fin,Q1} = u_{ist,Q1} \cdot (1 + \psi_{2,1} \cdot k_{def})$ deformazione finale causata dall'azione variabile Q_1 ;
- $u_{fin,Qi} = u_{ist,Qi} \cdot (\psi_{0,i} + \psi_{2,1} \cdot k_{def})$ deformazione finale causata dalle altre azioni variabili Q_i ;
- $u_{ist,G}$, $u_{ist,Q1}$, $u_{ist,Qi}$ deformazioni istantanee relative, rispettivamente alle azioni G , Q_1 , Q_i ;
- k_{def} è un coefficiente che tiene conto dell'aumento di deformazione con il tempo causato dall'effetto combinato della viscosità e dell'umidità del materiale.

Le verifiche risultano:

$$u_{ist} \leq \frac{l}{300}$$

$$u_{fin} \leq \frac{l}{200}$$

7.4.3 Elementi di parete

La parete in CLT è modellabile strutturalmente come una lastra, soggetta a un regime di sforzi membranali, a cui deve essere sovrapposto l'effetto piastra nel caso di sollecitazioni flessionali fuori piano. Tale configurazione è tipica delle pareti di elevazione in edifici multipiano, sottoposte simultaneamente a carichi verticali di compressione e ad azioni orizzontali fuori piano, come la pressione del vento uniformemente distribuita sull'intera superficie.

La dinamica degli sforzi interni risultanti da tale combinazione di azioni è schematizzata nella Figura 55, la quale sintetizza il comportamento dell'elemento lastra e le relative sollecitazioni di calcolo.

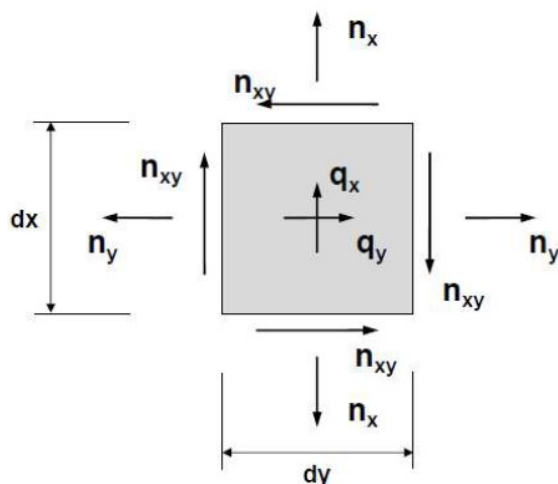


Figura 55: Elemento di lastra con le forze agenti su di esso

Le componenti sollecitanti nel piano del pannello sono definite dai parametri n_x , n_y , n_{xy} , dove n_x e n_y identificano le azioni assiali membranali, mentre n_{xy} rappresenta lo sforzo di taglio nel piano della lastra in CLT. Secondo la convenzione di calcolo strutturale, la notazione in lettere minuscole indica le intensità di forza riferite all'unità di larghezza dell'elemento, laddove le lettere maiuscole designano le risultanti delle forze effettive agenti sulla sezione.

7.4.3.1 Sollecitazioni a taglio nel piano della lastra

La determinazione del regime tensionale tangenziale all'interno della lastra può essere condotta mediante un approccio semplificato, espresso dalla seguente relazione analitica:

$$\tau_{xy} = \tau_0 = \frac{n_{xy}}{t} = \frac{V_{xy}}{t \cdot a}$$

Dove:

- τ_{xy} o τ_0 rappresenta la tensione di taglio nel piano della lastra;
- V_{xy} identifica la forza di taglio totale agente sulla sezione;
- t indica lo spessore del pannello (o lo spessore efficace degli strati paralleli alla sollecitazione);
- a rappresenta la larghezza della sezione considerata.

Il pannello di XLAM non è omogeneo lungo tutto lo spessore, essendo formato da una serie di strati incrociati di lamelle; bisogna pertanto considerare la composizione e l'orientazione dei singoli strati.

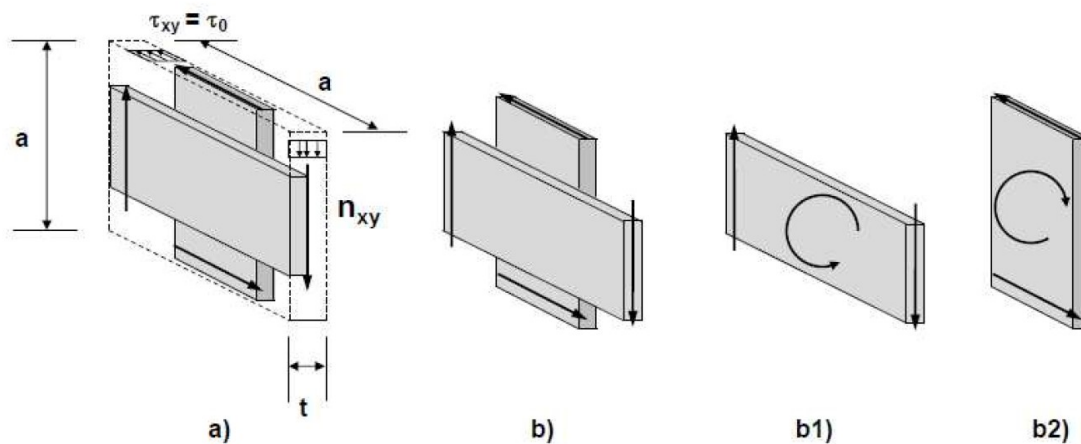


Figura 56: Sollecitazioni sulle due tavole ortogonali formanti l'elemento sollecitato a taglio

L'analisi strutturale deve tenere conto del fatto che il collegamento tra i vari strati incrociati avviene esclusivamente attraverso le superfici di interfaccia tra le lamelle disposte orizzontalmente e quelle verticali.

La trasmissione delle sollecitazioni tra i diversi livelli del pannello è garantita dallo strato di colla presente tra le tavole. Poiché i bordi laterali delle singole lamelle sono considerati scarichi, il flusso delle tensioni tangenziali si genera nell'area di sovrapposizione di due tavole ortogonali, entrambe soggette a sforzi di taglio.

Di conseguenza, lo stato tensionale che si sviluppa sulle superfici di contatto tra gli elementi è prodotto proprio da questo meccanismo di torsione localizzata (taglio rotatorio).

La sollecitazione di taglio nel CLT, in virtù della sua peculiare stratigrafia, si configura come un'azione complessa risultante dalla sovrapposizione di una componente di scorrimento (taglio longitudinale) e una componente torsionale (taglio rotatorio). L'effetto combinato della forza di piano n_{xy} deve essere pertanto analizzato scomponendo le azioni, poiché i due meccanismi di crisi presentano cinematismi di rottura distinti e valori di resistenza caratteristici non coincidenti.

In particolare, la tensione indotta dall'azione torsionale può essere espressa mediante la seguente relazione:

$$\tau_t = \frac{M_t}{W} = \frac{3\tau_0 \cdot t}{a}$$

Dove:

$$M_t = \tau_0 \cdot t \cdot a^2$$

$$W = a^3/3$$

Gli spessori dei singoli strati e lo spessore complessivo della lastra devono essere convertiti in spessori ideali t^* . Tale procedura di calcolo si articola secondo le seguenti modalità:

- Per gli strati esterni (superficie A nella Figura 57): lo spessore ideale si assume pari al valore minimo tra il doppio dello spessore dello strato esterno e lo spessore dello strato interno adiacente alla superficie incollata:

$$t_A^* = \min [2t_1; t_2]$$

- Per gli strati interni (superficie B nella Figura 57): lo spessore ideale corrisponde al valore minimo tra i due spessori degli strati a contatto con la superficie d'incollaggio considerata:

$$t_B^* = \min [t_3; t_4]$$

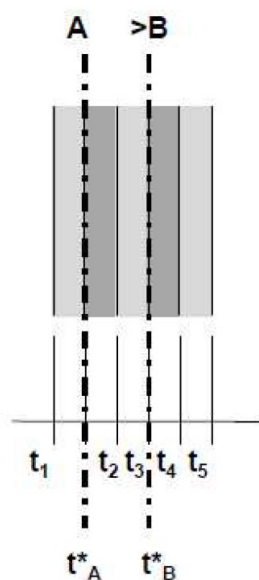


Figura 57: Spessori ideali degli strati per il calcolo della resistenza a taglio

Lo spessore ideale complessivo della sezione, necessario per le verifiche tensionali, è determinato dalla sommatoria degli spessori ideali dei singoli strati interessati:

$$t_{tot}^* = \sum_1^n t_i^*$$

In tale espressione, n identifica il numero totale delle superfici incollate all'interno della stratigrafia del pannello.

Come precedentemente evidenziato, la sicurezza strutturale deve essere garantita verificando distintamente entrambe le componenti tensionali (taglio longitudinale e torsione), assicurandosi che non superino i rispettivi valori di progetto della resistenza:

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d,XLAM}$$

$$\tau_{T,d} \leq f_{v,d,XLAM}$$

Infine, l'azione tangenziale n_{xy} riferita alle specifiche superfici incollate viene calcolata mediante la seguente relazione:

$$\tau_{0,i} = \frac{n_{xyi}}{t_i^*} = \frac{n_{xy}}{\sum_1^n t_i^*} = \frac{n_{xy}}{t_{tot}^*}$$

In sintesi, le tensioni di progetto per il taglio e la torsione devono soddisfare i seguenti requisiti di verifica:

$$\tau_{v,d} = 2 \cdot \tau_0^* \leq f_{v,d,XLAM}$$

$$\tau_{T,d} = 3 \cdot \tau_0^* \cdot t_i^*/a \leq f_{T,d,XLAM}$$

Per quanto concerne i valori di resistenza meccanica, si osserva quanto segue:

- Resistenza a torsione $f_{T,k,XLAM}$: le evidenze sperimentali e le omologazioni di prodotto indicano solitamente un valore caratteristico pari a 2.5 N/mm²;
- Resistenza a taglio $f_{v,k}$: sebbene venga spesso adottato cautelativamente il valore di 3.00 N/mm² (in analogia con il legno lamellare), ricerche condotte dal Politecnico di Graz suggeriscono che la resistenza effettiva possa essere significativamente superiore, raggiungendo valori fino a 10 N/mm².

7.4.3.2 Sforzi assiali nel piano della lastra

Il calcolo delle tensioni deve tenere conto dell'orientamento e della natura eterogenea degli strati che compongono il pannello in XLAM.

Coerentemente con quanto previsto per la verifica a flessione (effetto piastra), dove si valorizza l'elevata disparità tra il modulo di elasticità degli strati orientati nella direzione del carico e quelli trasversali, anche nel calcolo degli sforzi assiali si adotta un criterio analogo: il contributo strutturale degli strati non orientati lungo la direzione della sollecitazione viene trascurato, considerandoli non reagenti ai fini della resistenza e della rigidezza assiale.

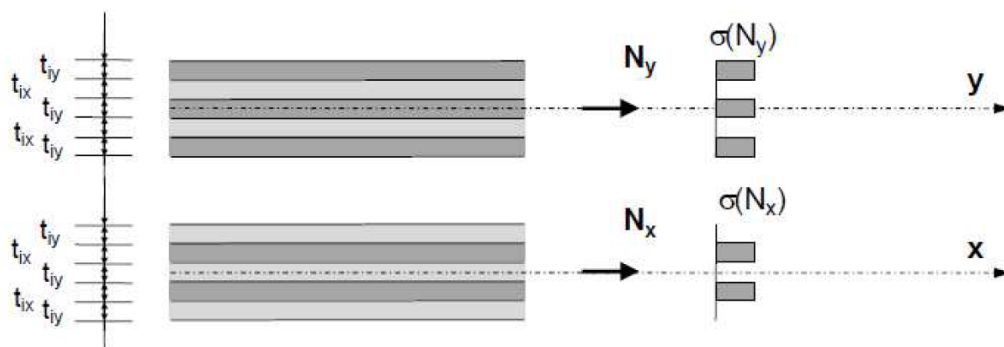


Figura 58: Definizioni delle sezioni per il calcolo delle tensioni

Per il dimensionamento strutturale, si definisce la sezione efficace specifica per la direzione di carico analizzata, considerando esclusivamente il contributo degli strati orientati parallelamente alla sollecitazione:

$$A_x = \sum t_{ix} \cdot b = t_x \cdot b$$

$$A_y = \sum t_{iy} \cdot b = t_y \cdot b$$

I parametri contenuti nelle relazioni sono così definiti:

- t_{ix}/t_{iy} : spessore dei singoli strati orientati rispettivamente nella direzione x o y;
- t_x/t_y : spessore totale efficace risultante dalla somma degli strati paralleli alla direzione considerata;
- b : larghezza unitaria o larghezza totale dell'elemento strutturale;
- A_x/A_y : superficie efficace (area della sezione resistente) nelle direzioni x e y.

Il calcolo delle tensioni normali agenti nel piano del pannello XLAM è definito dalle seguenti espressioni analitiche:

$$\sigma_x = \frac{n_x}{t_x} = \frac{N_x}{A_x}$$

$$\sigma_y = \frac{n_y}{t_y} = \frac{N_y}{A_y}$$

In tali relazioni, i parametri rappresentano:

- N_x, N_y : forze assiali totali nelle direzioni x e y;
- n_x, n_y : forze assiali per unità di larghezza nelle direzioni x e y.

Ai fini della validazione strutturale, le tensioni di progetto (σ_d) devono risultare inferiori o uguali alle resistenze di progetto del materiale, sia per sollecitazioni di compressione ($f_{c,d}$) che di trazione ($f_{t,d}$), secondo le seguenti relazioni:

$$\sigma_{x,c,d} = \frac{n_x}{t_x} \leq f_{c,d,XLAM}$$

$$\sigma_{x,t,d} = \frac{n_x}{t_x} \leq f_{t,d,XLAM}$$

$$\sigma_{y,c,d} = \frac{n_y}{t_y} \leq f_{c,d,XLAM}$$

$$\sigma_{y,t,d} = \frac{n_y}{t_y} \leq f_{t,d,XLAM}$$

Queste verifiche garantiscono che gli strati portanti del pannello siano in grado di assorbire i carichi nel piano senza incorrere in fenomeni di rottura del legno o instabilità locale.

7.4.3.3 Stabilità

In caso di forze di compressione agenti su una parete verticale, questa può essere soggetta all'instabilità dovuta allo sbandamento; la presenza di un carico trasversale, come, ad esempio, il vento, crea un momento flettente sulla parete che tale rischio. Per la verifica dello Stato Limite Ultimo può essere applicato il medesimo principio di verifica agli elementi lineari sottoposti a compressione e flessione.

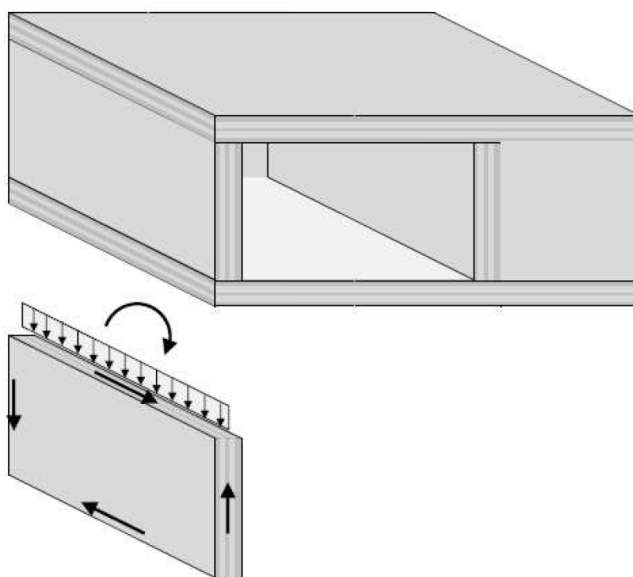


Figura 59: Elemento di parete per la verifica della stabilità

Per quanto riguarda l'elemento strutturale illustrato nella Figura 59, soggetto simultaneamente a una compressione verticale e a un momento flettente dovuto a carichi trasversali, l'analisi dell'instabilità per sbandamento viene condotta focalizzandosi sulla sezione critica. Questa corrisponde solitamente alla mezzeria dell'altezza della parete, dove si registra l'intensità maggiore dello sforzo di compressione, localizzata in prossimità del bordo verticale libero.

È possibile ottenere una stima preliminare, tuttavia sufficientemente precisa, delle sollecitazioni interne applicando le equazioni fondamentali dell'equilibrio statico, metodo che permette di valutare rapidamente l'entità dei carichi in gioco.

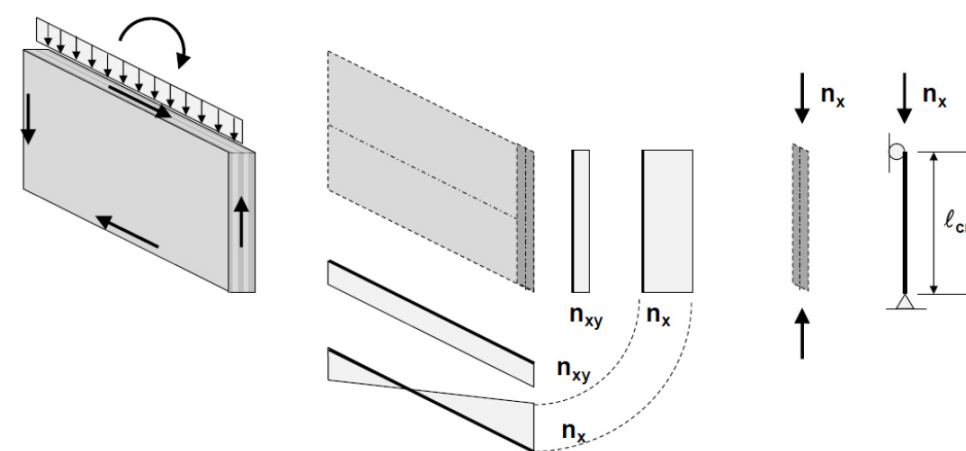


Figura 60: Sollecitazioni dovute alla forza assiale di compressione

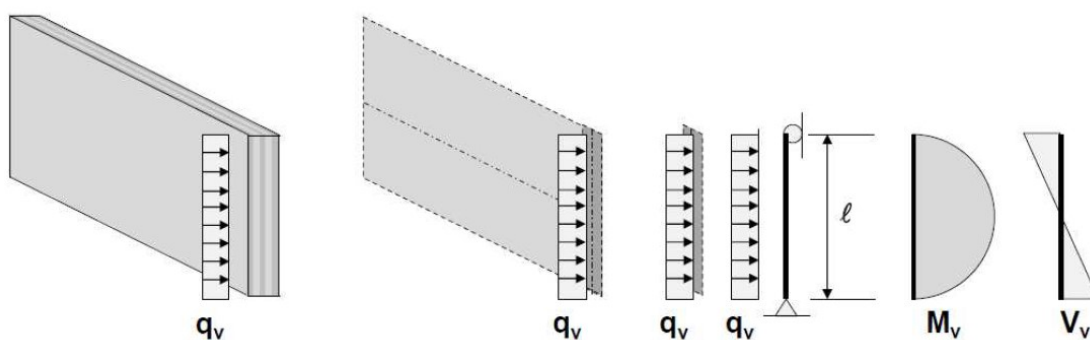


Figura 61: Sollecitazioni dovute al momento flettente e al carico trasversale

Per la verifica allo Stato Limite Ultimo (SLU) del pannello XLAM, è necessario valutare l'effetto combinato delle sollecitazioni flessionali e degli sforzi assiali. Il criterio di verifica adotta la seguente formulazione:

$$\frac{\sigma_{x,c,d}}{k_c \cdot f_{c,d,XLAM}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d,XLAM}} \leq 1$$

Dove:

- k_c : coefficiente di sbandamento (instabilità), che riduce la capacità portante a compressione in funzione della snellezza dell'elemento;
- $f_{c,d,XLAM}$: resistenza di progetto a compressione parallela alla fibratura degli strati reagenti;
- $\sigma_{x,c,d}$: tensione di progetto dovuta alla forza di compressione assiale;
- $\sigma_{m,d}$: tensione di progetto dovuta al momento flettente (flessione fuori piano);
- $f_{m,d,XLAM}$: resistenza di progetto a flessione del pannello.

7.5 Caso studio

7.5.1 Carichi permanenti e variabili degli elementi strutturali

Il dimensionamento dello spessore del solaio è stato guidato dal rispetto degli stati limite di deformazione, con l'obiettivo di garantire la durabilità del componente ed evitarne il precoce decadimento prestazionale. In linea generale, per i solai in XLAM, si adotta uno spessore compreso tra 1/35 e 1/40 della luce di calcolo inferiore, parametro fondamentale per il controllo della freccia massima.

7.5.1.1 Solaio interpiano

Sono stati valutati i carichi permanenti strutturali G_1 e i carichi permanenti non strutturali G_2 in funzione della composizione del pacchetto solaio interpiano presentato precedentemente.

Per determinare il carico permanente non strutturale G_2 che grava sul solaio, bisogna procedere distinguendo ciò che è "distribuito" (la stratigrafia) da ciò che è "lineare" (le pareti), per poi uniformare.

Il peso proprio di ogni strato che compone il pacchetto di finitura del solaio viene calcolato moltiplicando il peso specifico γ di ogni materiale per lo spessore t :

$$G_{2, \text{stratigrafia}} [kN/m^2] = \sum (\gamma_i \cdot t_i)$$

Tabella 30: Stratigrafia del solaio interpiano, calcolo dei carichi permanenti, su Excel

Stratigrafia	γ		t		G2 [kN/m2]	G1 [kN/m2]
	[kN/m3]	[kN/m2]	[m]	[cm]		
Profilo con orditura metallica zincata a C per controsoffitti autoportanti tipo Knauf		0.15	0.025	2.5	0.15	
Pendino con occhio aperto e gancio in acciaio con molla per profili a C tipo Knauf D112		0.05	0.08	8	0.05	
Pannello XLAM EGOIN CLT 200 - 5 strati Certificato ETA-12/0358		4.2	0.2	20		0.84
Isolante acustico: Rockwool Rockmur		1	0.05	5	0.05	
Passaggio impianti: Scatole 50x50x60 mm + Canali 80x40 mm (60 mm)		0.8	0.06	6	0.048	
Massetto radiante: Uponor Minitemp argilla espansa + tubi radianti PEX 16x2 (65 mm)		12	0.065	6.5	0.78	
Gres porcellanato: 10+2 mm fughe (12 mm)		23	0.012	1.2	0.276	

0.492 49.2 1.354

Per la parete divisoria tra i bagni, essendo una parete non strutturale, il suo peso va considerato come un carico lineare, quindi calcolando il peso per metro lineare.

$$G_2 \left[\frac{kN}{m} \right] = \sum (\gamma_i \cdot t_i \cdot h)$$

Tabella 31: Stratigrafia della parete divisoria, calcolo dei carichi permanenti, su Excel

Stratigrafia	γ		t		h	G2		G1
	[kN/m3]	[kN/m2]	[m]	[cm]		[kN/m2]	[kN/m]	
Rivestimento interno: HPL (Duropal, Polyrey España) + rasante	13		0.015	1.5	3	0.195	0.585	
Isolante acustico: Rockwool Rockmur	1		0.050	5	3	0.05	0.15	
Camera impianti (scatole + canalizzazioni)	0.8		0.050	5	3	0.04	0.12	
Pannello XLAM EGOIN CLT 140 - 3 strati Certificato ETA-12/0358	4.2		0.060	6	3			0.252
Camera impianti (scatole + canalizzazioni)	0.8		0.050	5	3	0.04	0.12	
Isolante acustico: Rockwool Rockmur	1		0.050	5	3	0.05	0.15	
Rivestimento interno: HPL (Duropal, Polyrey España) + rasante	1.3		0.015	1.5	3	0.0195	0.0585	
			0.290	29.000		0.3945	1.1835	

Il calcolo dei carichi permanenti non strutturali è stato condotto in conformità al Código Técnico de la Edificación (CTE) - Documento Básico DB-SE AE (*Acciones en la edificación*).

Per le pareti divisorie interne, aventi un peso lineare caratteristico di 1.1835 kN/m, si è adottato un carico distribuito equivalente di 1.00 kN/m² in accordo con la tabella 3.1 del suddetto documento, in quanto rientrante nella categoria di peso compreso tra 1.00 e 3.00 kN/m:

- Se il carico della parete è ≤ 1.00 kN/m, si considera un carico ripartito di 0.50 kN/m²;
- Se il carico della parete è ≥ 1.00 kN/m e ≤ 3.00 kN/m, si considera un carico ripartito di 1.00 kN/m².

Il valore finale di G_2 per il solaio interpiano è:

$$G_{2,interpiano} = G_{2,stratigrafia} + G_{2,tramezzi} = 2.345 \frac{kN}{m^2}$$

Il peso proprio G_k del solaio interpiano sarà dunque la somma dei carichi permanenti strutturali e non strutturali:

$$G_{k,interpiano} = G_{1,interpiano} + G_{2,interpiano} = (0.84 + 2.345) \frac{kN}{m^2} = 3.194 \frac{kN}{m^2}$$

Per il solaio interpiano, infine, sono stati calcolati i sovraccarichi (carichi variabili) Q_k , determinati in base alla destinazione d'uso dell'edificio secondo quanto previsto dal CTE. Nello specifico, l'edificio ricade nella Categoria A (aree ad uso residenziale), per la quale si è adottato un carico

$$Q_{k,interpiano} = 2.00 \frac{kN}{m^2}$$

7.5.1.2 Solaio di copertura

Per il solaio di copertura è stata adottata la medesima tecnologia strutturale in legno lamellare a strati incrociati (CLT) utilizzata per gli impalcati interpiano, impiegando un pannello EGOIN CLT 200 da 20 cm. Tuttavia, trattandosi di una copertura a falde inclinate non praticabile è stato definito un pacchetto stratigrafico specifico.

Tabella 32: Stratigrafia del solaio di copertura, calcolo dei carichi permanenti, su Excel

Stratigrafia	γ		t		G2 [kN/m2]	G1 [kN/m2]
	[kN/m3]	[kN/m2]	[m]	[cm]		
Serie di listelli portategola in legno (60 mm) + manto di copertura composto da doghe lisce in abete/cedro (25 mm spessore), impregnate in autoclave per lisciatura superficiale e resistenza UV (ditta Incofusta, Valencia)	10		0.085	8.5	0.85	
Membrana sottotegola antivapore traspirante tipo Fibertherm Multi UDB, 3 strati rinforzati in polipropilene, spessore 1mm	8		0.001	0.100	0.008	
Pannello Cemento Legno tipo Betonwood N, spessore 22 mm, dimensioni 1220 x 520 mm	14		0.022	2.2	0.308	
Pannelli in fibra di legno naturale tipo Fibertherm Isorel dimensioni 2500 x 1200 mm	2.5		0.019	1.9	0.0475	
Isolante Rockwool Tectum (100 mm)	1.6		0.100	10	0.16	
Isolante acustico: Rockwool Rockmur (50 mm)	1		0.050	5	0.05	
Pannello XLAM EGOIN CLT 200 - 5 strati Certificato ETA-12/0358	4.2		0.200	20		0.84
Profilo con orditura metallica zincata a C per controsoffitti autoportanti tipo Knauf		0.15	0.025	2.5	0.15	
Pendino con occhiolo aperto e gancio in acciaio con molla per profili a C tipo Knauf D112		0.05	0.080	8	0.05	
			0.582	58.200	1.6235	

Questa configurazione determina un carico permanente non strutturale

$$G_{2,copertura} = 1.6235 \frac{kN}{m^2}$$

Il peso proprio G_k del solaio di copertura sarà dunque la somma dei carichi permanenti strutturali e non strutturali:

$$G_{k,copertura} = G_{1,copertura} + G_{2,copertura} = (0.84 + 1.6235) \frac{kN}{m^2} = 2.4635 \frac{kN}{m^2}$$

Per quanto riguarda le azioni variabili, l'edificio ricade nella Categoria G (coperture accessibili solo per manutenzione) del CTE, per la quale si assume un sovraccarico di uso non cumulabile con altre azioni variabili (come neve o vento) sulla stessa superficie:

$$Q_{k,copertura} = 1.00 \frac{kN}{m^2}$$

7.5.1.3 Pareti verticali

Di seguito, vengono dettagliate le stratigrafie adottate per le diverse tipologie di pareti presenti nel progetto (perimetrali portanti, perimetrali non portanti, interne portanti) al fine di determinare correttamente i carichi permanenti strutturali G_1 e i carichi permanenti non strutturali G_2 in funzione della composizione dei pacchetti.

Per ogni elemento è stato calcolato il peso proprio analitico sommando i contributi dei singoli strati, come sintetizzato nelle tabelle riportate di seguito.

Riquilificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya,
(Castilla-La Mancha, Spagna)

Tabella 33: Stratigrafia della parete portante esterna, calcolo dei carichi permanenti, su Excel

Stratigrafia	γ		t		G2 [kN/m ²]	G1 [kN/m ²]
	[kN/m ³]	[kN/m ²]	[m]	[cm]		
Pannello lamellare in abete bianco (Pinus Sylvestris) CL24h di Derque Maderas	4.5		0.015	1.5	0.0675	
Colla Sikaflex-221 di Sika Espana (poliuretano modificato)	11		0.006	0.6	0.066	
Pannello XLAM EGOIN CLT 140 - 5 strati Certificato ETA-12/0358	4.2		0.140	14		0.588
Isolante termico: Rockwool "Rainscreen Duo Slab"	1.2		0.145	14.5	0.174	
Guaina traspirante permeabile al vapore certificata CTE - Delta Membranas Ibérica (Madrid): Delta-Vent S (Sd=0,15 m)	9		0.0005	0.05	0.0045	
Intercapedine areata (50 mm)			0.050	5		
Rivestimento di facciata in tavole di legno per esterno - Garabandal Madera (Asturie): Doghe larice siberiano termotrattato 27×148 mm - spessore 50 mm.	4.5		0.05	5	0.225	
			0.407	40.650		0.537

Tabella 34: Stratigrafia della parete non portante esterna, calcolo dei carichi permanenti, su Excel

Stratigrafia	γ		t		G2 [kN/m ²]	G1 [kN/m ²]
	[kN/m ³]	[kN/m ²]	[m]	[cm]		
Pannello lamellare in abete bianco (Pinus Sylvestris) CL24h di Derque Maderas	4.5		0.015	1.5	0.0675	
Colla Sikaflex-221 di Sika Espana (poliuretano modificato)	11		0.006	0.6	0.066	
Pannello XLAM EGOIN CLT 140 - 3 strati Certificato ETA-12/0358	4.2		0.060	6		0.252
Isolante termico: Rockwool "Rainscreen Duo Slab"	1.2		0.145	14.5	0.174	
Guaina traspirante permeabile al vapore certificata CTE - Delta Membranas Ibérica (Madrid): Delta-Vent S (Sd=0,15 m)	9		0.0005	0.05	0.0045	
Intercapedine areata (50 mm)			0.050	5		
Rivestimento di facciata in tavole di legno per esterno - Garabandal Madera (Asturie): Doghe larice siberiano termotrattato 27×148 mm - spessore 50 mm.	4.5		0.05	5	0.225	
			0.327	32.650		0.537

Tabella 35: Stratigrafia della parete portante interna, calcolo dei carichi permanenti, su Excel

Stratigrafia	γ		t		G2 [kN/m ²]	G1 [kN/m ²]
	[kN/m ³]	[kN/m ²]	[m]	[cm]		
Pannello lamellare in abete bianco (Pinus Sylvestris) CL24h di Derque Maderas	4.5		0.015	1.5	0.0675	
Colla Sikaflex-221 di Sika Espana (poliuretano modificato)	11		0.006	0.6	0.066	
Pannello XLAM EGOIN CLT 140 - 5 strati Certificato ETA-12/0358	4.2		0.140	14		0.588
Colla Sikaflex-221 di Sika Espana (poliuretano modificato)	11		0.006	0.6	0.066	
Pannello lamellare in abete bianco (Pinus Sylvestris) CL24h di Derque Maderas	4.5		0.015	1.5	0.0675	
			0.182	18.200		0.267

7.5.2 Calcolo semplificato del solaio

Per l'analisi del solaio, si è scelto un modello strutturale che assimila il pannello a una trave continua su due campate. Lo schema statico considera una striscia di larghezza unitaria caratterizzata da una sezione a cinque strati tra loro perfettamente solidarizzati, ovvero con connessione rigida.

7.5.2.1 Definizione dei parametri strutturali di riferimento del pannello

Nella identificazione dei parametri strutturali, nell'ambito dell'XLAM è fondamentale fare delle importanti considerazioni sul riferimento normativo.

Tabella 36: Riferimenti normativi utilizzati, su Excel

Documento normativo	
CTE DB-SE-M	Regole generali di calcolo e i coefficienti γ_M e k_{mod} (in Spagna)
UNE-EN 338	Qualità del legno grezzo usato per fare le lamelle
ETA 11/0464	Carta d'identità del pannello (resistenze del CLT, incollaggio, marcatura CE)

La norma UNE EN 338 definisce le classi di resistenza strutturale per il legno (conifere e latifoglie), stabilendo la classe di resistenza del legno massiccio, e di conseguenza i valori caratteristici di resistenza, rigidezza e massa volumica di una singola tavola/lamella che compone il pannello. È il documento che definisce le singole “tessere del mosaico”. Questa norma armonizzata europea è il riferimento tecnico per progettisti e produttori per classificare il legno strutturale, facilitando la libera circolazione dei materiali.

Per il prodotto “EGOIN CLT”, il riferimento normativo europeo fondamentale è l'ETA 11/0464. Questo documento è l'European Technical Assessment (Valutazione Tecnica Europea) rilasciata dall'ITeC (Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya) e aggiornata periodicamente (l'ultima revisione significativa è del febbraio 2024).

Poiché non esiste ancora una norma EN armonizzata definitiva per il CLT, l'ETA è l'unico documento che permette la marcatura CE del pannello. I valori di calcolo usati nel progetto derivano dalle prove certificate in questo documento, ed essendo un'ETA rilasciata da un ente spagnolo (ITeC), è il documento di riferimento assoluto per il CTE. Così facendo si tiene conto che il CLT non è legno massiccio, ma un prodotto ingegnerizzato; l'ETA di *Egoin* specifica come quelle lamelle C24 lavorano insieme, e ogni produttore deve ottenerne una. Si può dire che è il documento che descrive il “mosaico completo”

In sintesi, la UNE-EN 338 serve a classificare le singole tavole (le lamelle), mentre l'ETA serve a certificare il pannello intero (il CLT).

Vengono riepilogati i principali dati utilizzati:

- Materiale: Abete C24 (conifera) (UNE-EN-338);
- Contesto normativo: CTE DB-SE-M (Spagna);
- Prodotto: EGOIN CLT.

Tabella 37: Valori caratteristici del pannello C24, su Excel

Resistenza caratteristica a:		Valore caratteristico ABETE C24
Flessione	$f_{m,k}$	24
Trazione parallela alla fibra	$f_{t,0,k}$	14
Trazione perp. Alla fibra	$f_{t,90,k}$	0.4
Compressione parallela alla fibra	$f_{c,0,k}$	21
Compressione perp. alla fibra	$f_{c,90,k}$	2.5
Taglio	$f_{v,k}$	4
Rolling shear	$f_{r,k}$	1.1

I valori di progetto delle resistenze sono stati ricavati a partire dai valori caratteristici applicando i coefficienti correttivi stabiliti dal Codice Tecnico della Edificazione (CTE DB-SE-M).

Nello specifico, l'analisi è stata condotta considerando una classe di servizio 2, a cui corrisponde un coefficiente di modifica delle proprietà meccaniche k_{mod} pari a 0.80 (per carichi di media durata). La sicurezza del materiale è garantita dall'applicazione di un coefficiente parziale γ_M pari a 1.25; in Italia (NTC18) per il CLT si usa solitamente 1.45. È stato utilizzato quest'ultimo, in modo da avere un approccio più cautelativo e a favore di sicurezza.

$$\gamma_M = 1.45$$

$$k_{mod} = 0.80$$

Tabella 38: Valori di progetto del pannello C24, su Excel

Resistenza di progetto a:		Valore di calcolo ABETE C24
Flessione	$f_{m,d, XLAM}$	14.57
Trazione parallela alla fibra	$f_{t,0,d, XLAM}$	7.72
Trazione perp. Alla fibra	$f_{t,90,d, XLAM}$	0.22
Compressione parallela alla fibra	$f_{c,0,d}$	11.59
Compressione perp. alla fibra	$f_{c,90,d, XLAM}$	1.38
Taglio	$f_{v,d, XLAM}$	2.21
Rolling shear	$f_{r,d, XLAM}$	0.61

Di seguito, vengono riportate le formule utilizzate:

- Resistenza di progetto a flessione:

$$f_{m,d, XLAM} = k_{sys} \frac{(k_{mod} \cdot f_{m,k})}{\gamma_M} = 1.1 \frac{(0.80 \cdot 24)}{1.45} 1.45 = 14.57 \text{ MPa}$$

- Resistenza di calcolo a trazione parallela alla fibratura:

$$f_{t.0.d.XLAM} = \frac{(k_{mod} \cdot f_{t.0.k})}{\gamma_M} = \frac{(0.80 \cdot 14)}{1.45} = 7.72 \text{ MPa}$$

- Resistenza di calcolo a trazione perpendicolare alla fibratura:

$$f_{t.90.d.XLAM} = \frac{(k_{mod} \cdot f_{t.90.k})}{\gamma_M} = \frac{(0.80 \cdot 0.6)}{1.45} = 0.22 \text{ MPa}$$

- Resistenza di calcolo a compressione parallela alla fibratura:

$$f_{c.0.d.XLAM} = \frac{(k_{mod} \cdot f_{c.0.k})}{\gamma_M} = \frac{(0.80 \cdot 21)}{1.45} = 11.59 \text{ MPa}$$

- Resistenza di calcolo a compressione perpendicolare alla fibratura:

$$f_{c.90.d.XLAM} = \frac{(k_{mod} \cdot f_{c.90.k})}{\gamma_M} = \frac{(0.80 \cdot 3.1)}{1.45} = 1.38 \text{ MPa}$$

- Resistenza di calcolo a taglio:

$$f_{v.d.XLAM} = \frac{(k_{mod} \cdot f_{v.k})}{\gamma_M} = \frac{(0.80 \cdot 3.8)}{1.45} = 2.21 \text{ MPa}$$

- Resistenza di calcolo a taglio trasversale (“rolling shear”):

$$f_{r.d.XLAM} = \frac{(k_{mod} \cdot f_{r.k})}{\gamma_M} = \frac{(0.80 \cdot 1.2)}{1.45} = 0.61 \text{ MPa}$$

La determinazione delle rigidezze flessionali e a taglio, necessaria per il calcolo delle deformazioni e la risoluzione delle iperstaticità strutturali, è stata condotta adottando il modello di trave di Timoshenko. Tale approccio tiene conto della deformabilità a taglio, essenziale per i pannelli in legno CLT. Coerentemente con il CTE DB-SE-M e la norma UNE-EN 338, per il legno di classe C24 sono stati adottati i valori medi dei moduli di elasticità E_{mean} e di taglio G_{mean} .

Tabella 39: Valori caratteristici del modulo elastico e di taglio per la categoria C24, su Excel

Modulo caratteristico di:		Valore caratteristico C24 [N/mm ²]
Modulo elastico medio parallelo alle fibre	E0,mean	11000
Modulo elastico caratteristico parallelo alle fibre	E0.05	7400
Modulo elastico medio perpendicolare alle fibre	E90,mean	370
Modulo di taglio medio	Gmean	690
Modulo di taglio rotolamento medio	Gr,mean	65

Per la rigidezza flessionale, in accordo con i criteri di calcolo per il CLT, il contributo degli strati trasversali E_{90} è stato trascurato, focalizzando l'analisi sulla collaborazione degli strati longitudinali.

$$K_{XLAM} = \sum_{i=1}^5 (J_i \cdot E_i) + \sum_{i=1}^5 (A_i \cdot a_i^2 \cdot E_i) = 5.808 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2$$

Tabella 40: Calcolo della rigidezza flessionale, su Excel

STRATO (dall'alto)	l [mm]	t [mm]	Ai [mm ²]	Ji [mm ⁴]	Ei [MPa]	ai [mm]	Ki [Nmm ²]
1	1000	40	40000	5333333.333	11000	80	2.8747E+12
2	1000	40	40000	5333333.333	370	40	2.5653E+10
3	1000	40	40000	5333333.333	11000	0	5.8667E+10
4	1000	40	40000	5333333.333	370	40	2.5653E+10
5	1000	40	40000	5333333.333	11000	80	2.8747E+12

K_XLAM 5.808E+12

Per quanto concerne la rigidezza a taglio, il calcolo integra l'influenza della stratigrafia e l'eterogeneità dei moduli elastici trasversali G_0 e G_{90} lungo lo spessore del pannello. Si è adottato un coefficiente di correzione κ pari a 0.24, calcolato analiticamente in funzione della stratigrafia del pannello (numero e spessore degli strati) (cfr. Tabella 29) e del rapporto tra i moduli di elasticità trasversale G_0 e G_{90} . Viene, quindi, definito in funzione della specifica configurazione a 5 strati del pannello EGOIN, assicurando la coerenza con i requisiti di deformabilità stabiliti nel CTE DB-SE-M.

Tabella 41: Calcolo della rigidezza a taglio, su Excel

STRATO (dall'alto)	l [mm]	t [mm]	Ai [mm ²]	Gi [MPa]	k [-]	Sv,i [N]
1	1000	40	40000	690	0.24	2.76E+07
2	1000	40	40000	65		2.60E+06
3	1000	40	40000	690		2.76E+07
4	1000	40	40000	65		2.60E+06
5	1000	40	40000	690		2.76E+07

Sv 2.11E+07

Sm 4.22E+06

7.5.2.2 Verifica della capacità portante allo Stato Limite Ultimo (SLU)

La verifica di sicurezza strutturale del pannello in CLT è stata condotta determinando il valore di progetto del carico q_d secondo le combinazioni di azioni definite dal CTE DB-SE (*Documento Básico de Seguridad Estructural*). La formula di riferimento per la combinazione fondamentale è la seguente:

$$q_d = \gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2}$$

Il modello di calcolo adottato prevede uno schema di trave continua su tre appoggi. Per massimizzare le sollecitazioni, sono state analizzate diverse configurazioni di carico, alternando la posizione del carico variabile sulle campate per ottenere l'involuppo dei momenti e del taglio. Considerando una striscia di larghezza unitaria e una lunghezza della campata critica pari a 6.17 m, i valori massimi delle sollecitazioni di progetto per le due tipologie di solaio vengono riportati di seguito.

Sulla base dei carichi permanenti ($G_1 = 0.84 \text{ kN/m}^2$, $G_2 = 2.354 \text{ kN/m}^2$) e del sovraccarico di uso ($Q_k = 2.0 \text{ kN/m}^2$), si ottengono i seguenti sforzi per il solaio interpiano:

- Momento flettente massimo di calcolo (in mezzeria): $M_{Ed,max} = 32.22 \text{ kNm}$;
- Taglio massimo di calcolo (agli appoggi): $V_{Ed,max} = 20.9 \text{ kN}$.

Considerando il peso proprio e il pacchetto di copertura ($G_1 = 0.84 \text{ kN/m}^2$, $G_2 = 1.62 \text{ kN/m}^2$), i valori risultanti sono:

- Momento flettente massimo di calcolo: $M_{Ed,max} = 22.0 \text{ kNm}$;
- Taglio massimo agli appoggi: $V_{Ed,max} = 14.3 \text{ kN}$.

TENSIONE NORMALE A FLESSIONE

La tensione normale massima viene determinata considerando la rigidezza flessionale effettiva del pannello e il modulo elastico medio delle lamelle longitudinali:

$$\sigma_{d,max} = \frac{M_{max}}{K_{XLAM}} \frac{h}{2} \cdot E_{0,mean}$$

Applicando i valori ottenuti dall'analisi dei carichi e le proprietà del pannello, ovvero $E_{0,mean} = 11000 \text{ MPa}$, $K_{XLAM} = 5.808 \cdot 10^{12} \text{ MPa}$, $h = 200 \text{ mm}$, si ottengono i valori riferiti ai due solai:

$$\sigma_{d,max,interpiano} = 6.0970 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{d,max,copertura} = 4.1631 \text{ MPa}$$

TENSIONE TANGENZIALE MASSIMA (ASSE BARICENTRICO)

La tensione tangenziale massima, misurata in corrispondenza dell'asse baricentrico, viene calcolata come:

$$\tau_{d,max} = \frac{V_{max} \cdot \sum(S_m \cdot E_m)}{K_{XLAM} \cdot b}$$

Dalle verifiche condotte nel foglio di calcolo, considerando il contributo statico degli strati ($S_m = 4224000 N$) ed $E_m = E_{0,mean} = 11000MPa$, si ottengono i seguenti valori riferiti ai due solai:

$$\tau_{d,max,interpiano,asse} = 0.1670 MPa$$

$$\tau_{d,max,copertura,asse} = 0.1140 MPa$$

TENSIONE TANGENZIALE MASSIMA (STRATI TRASVERSALI)

Infine, si è proceduto alla determinazione della tensione tangenziale massima all'interno degli strati trasversali del pannello (rolling shear). Questa verifica è di fondamentale importanza per il CLT, poiché la resistenza al taglio per rotolamento delle fibre è significativamente inferiore rispetto a quella longitudinale. Viene calcolata considerando il contributo statico degli strati ($S_m = 4224000 N$) ed $E_m = E_{90,mean} = 370 MPa$ per entrambi i solai:

$$\tau_{d,max,interpiano,trasv} = 0.0056 MPa$$

$$\tau_{d,max,copertura,trasv} = 0.0038 MPa$$

Ai fini della verifica di sicurezza, il rapporto tra la tensione di calcolo e la relativa resistenza deve risultare inferiore o uguale a 1, come prescritto dal CTE DB-SE-M.

VERIFICA A FLESSIONE (σ_d)

$$\frac{\sigma_{d,max,interpiano}}{f_{m,d,XLAM}} = \frac{6.0970}{14.57} = 0.42 < 1$$

$$\frac{\sigma_{d,max,copertura}}{f_{m,d,XLAM}} = \frac{4.5146}{14.57} = 0.29 < 1$$

VERIFICA A TAGLIO LONGITUDINALE ($\tau_{d,max,asse}$)

$$\frac{\tau_{d,max,interpiano,asse}}{f_{v,d,XLAM}} = \frac{0.2618}{2.21} = 0.08 < 1$$

$$\frac{\tau_{d,max,copertura,asse}}{f_{v,d,XLAM}} = \frac{0.1939}{2.21} = 0.05 < 1$$

VERIFICA A TAGLIO PER ROTOLAMENTO (ROLLING SHEAR) ($\tau_{d,max,trasv}$)

$$\frac{\tau_{d,max,interpiano,trasv}}{f_{r,d,XLAM}} = \frac{0.0088}{0.61} = 0.01 < 1$$

$$\frac{\tau_{d,max,coertura,trasv}}{f_{r,d,XLAM}} = \frac{0.0065}{0.61} = 0.01 < 1$$

7.5.2.3 Verifica della deformabilità allo Stato Limite di Esercizio (SLE)

Per il calcolo delle deformazioni (freccie), oltre al contributo del momento flettente, è stato considerato il contributo della deformazione per effetto del taglio, come richiesto per i pannelli strutturali in CLT (modello di Timoshenko). La freccia istantanea per i carichi permanenti è calcolata come:

$$u_{G,ist} = \frac{5}{384} \cdot \frac{G_k \cdot l^4}{K_{XLAM}} + \frac{G_k \cdot l^2}{8 \cdot S_{XLAM}}$$

La freccia finale, che tiene conto dei fenomeni viscosi del legno nel lungo periodo, è definita secondo il CTE DB-SE-M tramite il coefficiente di deformazione K_{def} :

$$u_{G,fin} = u_{G,ist} \cdot (1 + K_{def})$$

Con i dati di progetto ($L = 6.17 \text{ m}$) e un coefficiente $K_{def} = 0.8$, si ottengono i seguenti valori:

$$u_{G,ist} = 11.10 \text{ mm} \leq \frac{l}{300} = 20.57 \text{ mm}$$

$$u_{G,fin} = 19.97 \text{ mm} \leq \frac{l}{200} = 30.85 \text{ mm}$$

Le condizioni di deformabilità risultano ampiamente verificate.

7.5.2.4 Analisi del comfort vibrazionale (SLE)

Dato che il solaio presenta una luce libera superiore a 6 metri, è stata condotta una verifica specifica nei confronti delle vibrazioni per garantire il comfort degli occupanti, in conformità con i requisiti prestazionali del CTE.

Mentre la freccia riguarda l'estetica e i danni ai tramezzi, la vibrazione riguarda il comfort umano. Se un solaio è troppo leggero o poco rigido, ogni volta che qualcuno ci cammina sopra, chi è seduto sente il pavimento "molleggiare" o i bicchieri sul tavolo tintinnare.

Perché un solaio sia considerato confortevole, deve superare 2 test:

- Frequenza fondamentale (f_1): per evitare che la vibrazione entra in risonanza con il passo umano, il solaio viene verificato seguendo le indicazioni della guida *ArcelorMittal/Design Guide for Floor Vibrations*;

- Rigidezza statica (w): applicando una forza concentrata di 1 kN (circa 100 kg) nel mezzo, il solaio non deve abbassarsi più di un limite (solitamente 1 mm o 2 mm a seconda della categoria).

La valutazione del comportamento vibrazionale di un solaio in XLAM richiede un approccio che tenga conto dell'anisotropia intrinseca del materiale. Sebbene il pannello sia composto da strati di legno massiccio incrociati, esso viene modellato come una piastra ortotropica a causa della marcata differenza di rigidezza tra la direzione parallela alle fibre degli strati esterni (asse forte, Y) e quella perpendicolare (asse debole, X). Il calcolo è stato effettuato secondo le indicazioni contenute nella guida *ArcelorMittal/Design Guide for Floor Vibrations*.

La rigidezza totale EI_y (direzione principale) ed EI_x (direzione secondaria) è data dalla somma delle rigidezze dei singoli strati attivi in quella specifica direzione, rimandando alla Tabella 42.

$$EI_y (\text{strato 1} + \text{strato 3} + \text{strato 5}) = 5.808 \cdot 10^{12} \frac{\text{Nmm}^2}{\text{mm}} = 5808000 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}$$

$$EI_x (\text{strato 2} + \text{strato 4}) = 5.13 \cdot 10^{10} \frac{\text{Nmm}^2}{\text{mm}} = 51306.67 \frac{\text{Nm}^2}{\text{m}}$$

Per le vibrazioni, la norma suggerisce di considerare i carichi permanenti e una quota dei variabili (solitamente $\psi_{12} = 0.3$ per abitazioni/uffici). La massa viene, quindi, calcolata come:

$$m = G_1 + G_2 + 0.3Q_k = 386.748 \text{ kg/m}^2$$

La procedura si conclude applicando la formulazione per piastre ortotrope semplicemente appoggiate sui quattro lati. La formula integra le caratteristiche geometriche della stanza (luce $l = 6.17\text{ m}$ e larghezza $b = 3.17\text{ m}$) con le proprietà meccaniche del materiale:

$$f_1 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EI_y}{m \cdot l^4}} \cdot \sqrt{1 + \left[2 \left(\frac{b}{l}\right)^2 + \left(\frac{b}{l}\right)^4 \right] \left(\frac{EI_x}{EI_y}\right)} = 5.658 \text{ Hz}$$

Il primo termine della formula rappresenta la frequenza di una trave monodimensionale di luce l . Il secondo termine è un fattore correttivo di piastra che quantifica l'incremento di rigidezza dovuto all'appoggio sui bordi trasversali e alla collaborazione dell'asse debole.

Secondo il manuale, lo smorzamento totale D è la somma di tre componenti:

- D_1 : Smorzamento strutturale;
- D_2 : Smorzamento dovuto agli arredi (mobili, librerie che assorbono l'energia);
- D_3 : Smorzamento dovuto alle finiture (controsoffitti, pavimenti galleggianti).

Tabella 42: Determinazione dello smorzamento, guida ArcelorMittal/Design Guide for Floor Vibrations

Type	Damping (% of critical damping)
Structural Damping D_1	
Wood	6%
Concrete	2%
Steel	1%
Composite (steel-concrete)	1%
Damping due to furniture D_2	
Traditional office for 1 to 3 persons with separation walls	2%
Paperless office	0%
Open plan office	1%
Library	1%
Houses	1%
Schools	0%
Gymnastic	0%
Damping due to finishes D_3	
Ceiling under the floor	1%
Free floating floor	0%
Swimming screed	1%
Total Damping $D = D_1 + D_2 + D_3$	

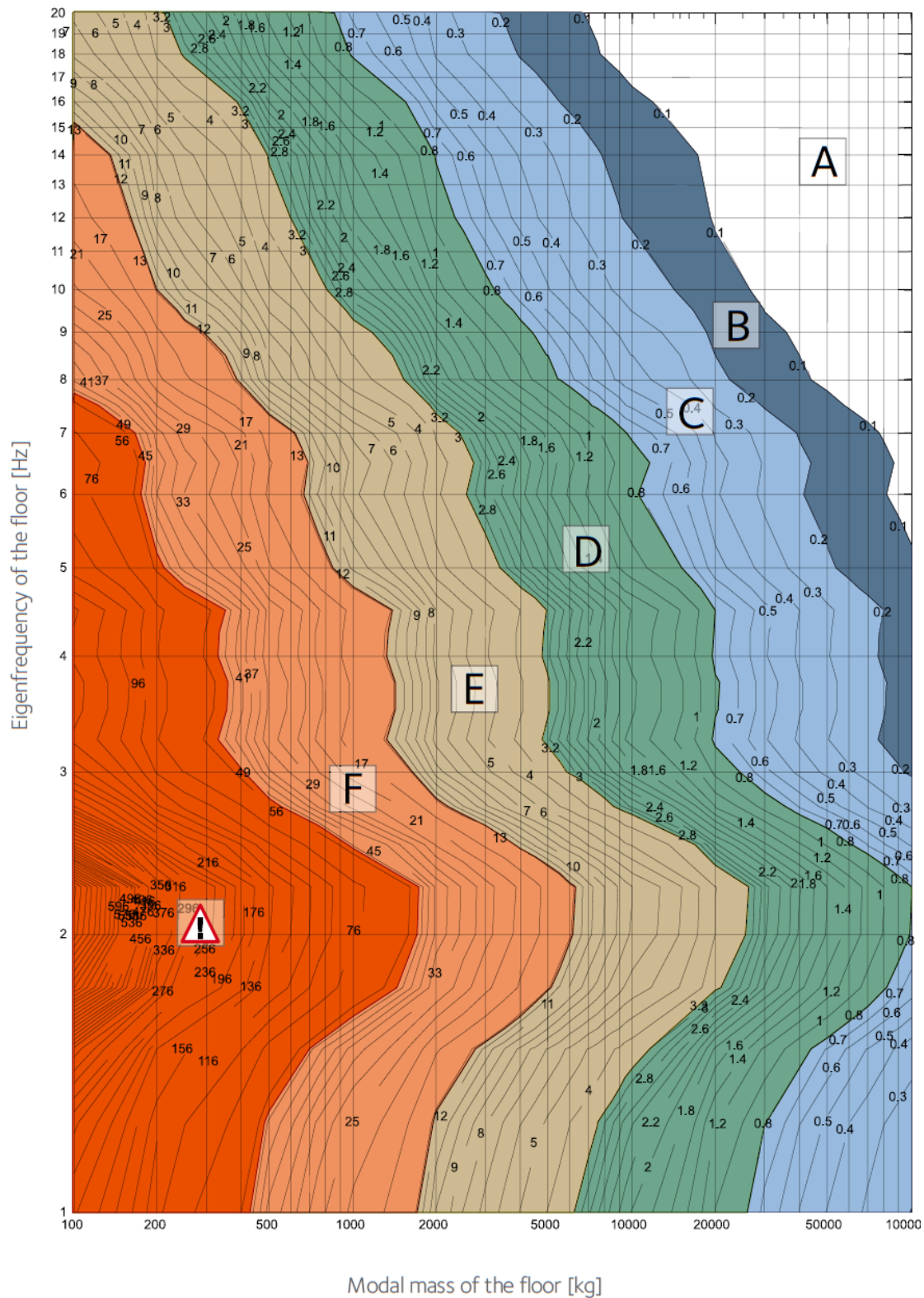
Lo smorzamento D risulta essere:

$$D = D_1 + D_2 + D_3 = 6\% + 1\% + 1\% = 8\%$$

Per completare l'analisi, bisogna utilizzare il grafico che mette in relazione frequenza, massa e smorzamento per determinare la classe di vibrazione del solaio.

Tabella 43: Classe di vibrazione del solaio con smorzamento all'8%, guida ArcelorMittal/Design Guide for Floor Vibrations

Classification based on a damping ratio of 8%

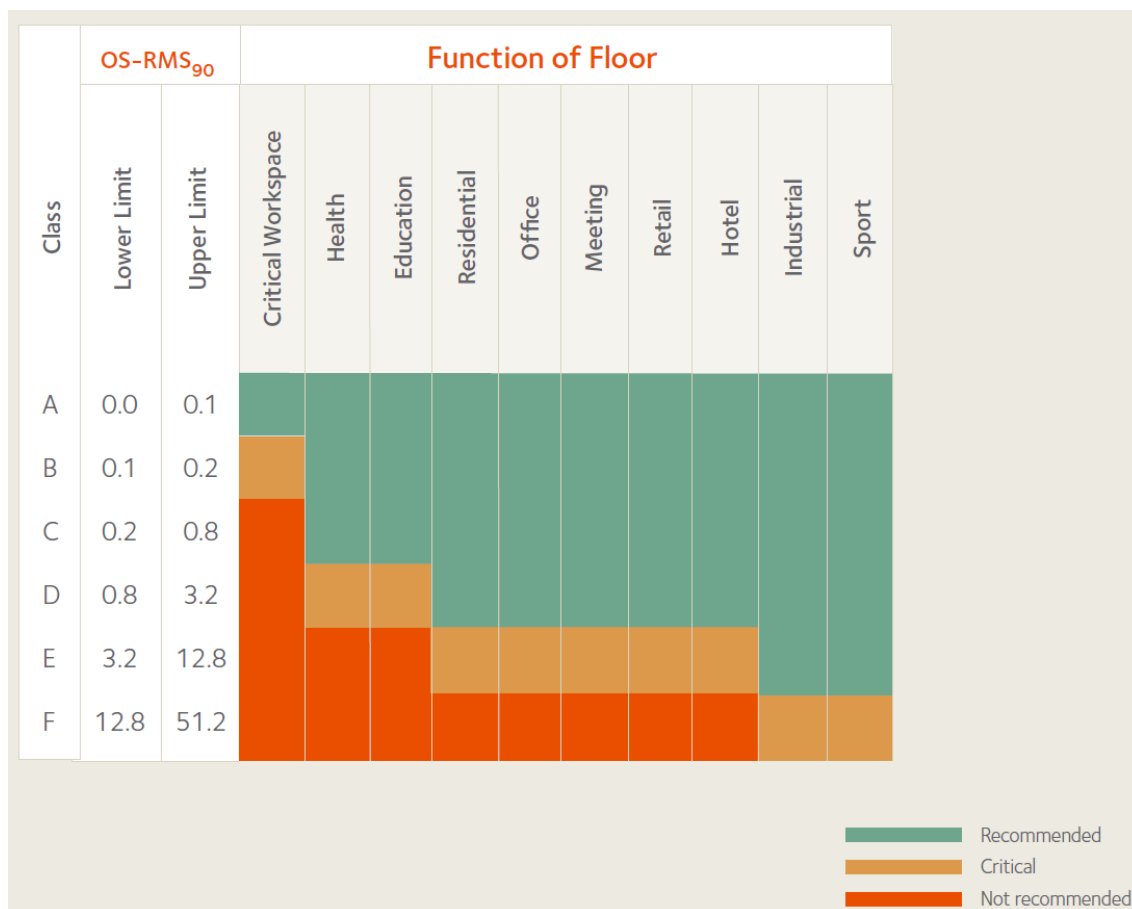


Per una piastra appoggiata su 4 lati, la massa modale è generalmente definita come:

$$M = m \cdot \frac{l \cdot b}{4} = 1789.95 \text{ kg}$$

Avendo ricavato la frequenza [Hz] e la massa modale M [kg], è possibile entrare nel grafico associato allo smorzamento dell'8%. Si osserva che si ricade nella classe C.

Tabella 44: Classificazione del suolo sulla base della classe e della funzione, guida ArcelorMittal/Design Guide for Floor Vibrations



Secondo la classificazione proposta, la Classe C definisce un solaio pienamente compatibile con le esigenze di un edificio residenziale standard.

La dicitura OS-RMS90 [mm/s] (velocità RMS a un passo) viene utilizzata per classificare la risposta del pavimento.

Il solaio è lento (frequenza bassa < 8 Hz) e, in questo caso, il comfort si misura anche con la rigidità locale.

Questo è stato uno dei principali motivi per cui si è optato per un pannello XLAM di spessore 200 mm per i solai, rispetto ai 140 mm scelti per le pareti verticali:

- Aumentando la massa, un solaio più pesante è più difficile da mettere in oscillazione;
- Aumentando la rigidità flessionale (EI) (col cubo dello spessore), si alza drasticamente la frequenza naturale del solaio.

La verifica si sposta sul criterio della rigidità statica puntuale, che garantisce che il pavimento non affondi in modo percepibile sotto il peso di una persona (carico concentrato di 1 kN).

Si applica una forza concentrata $F = 1000 \text{ N}$ nel punto più sfavorevole della campata. L'abbassamento puntuale w deve risultare inferiore al limite di 1.0 mm.

$$w = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot EI} = 0.84 \text{ mm}$$

Il valore di abbassamento elastico puntuale risulta pari a 0.84 mm, inferiore al limite normativo. Pertanto, la rigidità locale del pannello da 200 mm garantisce l'assenza di fastidio percepito dagli occupanti, verificando il requisito di comfort vibrazionale.

7.5.3 Analisi dei carichi

7.5.3.1 Elementi strutturali

Il presente capitolo espone la definizione dei carichi agenti sulla struttura. L'analisi è stata condotta attraverso la scomposizione dei pacchetti tecnologici di solai e pareti, valutando per ogni elemento stratigrafico il contributo dei pesi propri strutturali (G_1) dei carichi permanenti non strutturali (G_2) e dei sovraccarichi di esercizio (Q_k). Essendo già state riportate precedentemente le stratigrafie e i valori corrispondenti di carichi permanenti, di seguito vengono riportate le tabelle riepilogative con i valori d'interesse per la seguente trattazione.

Tabella 45: Analisi dei carichi permanenti e variabili del solaio interpiano, su Excel

SOLAIO INTERPIANO	t [m]	G1 [kN/m ²]	G2 [kN/m ²]	Q [kN/m ²]
STRUTTURALE	0.2			
NON STRUTTURALE	0.292			
TOTALE	0.492	0.84	2.354	2

Tabella 46: Analisi dei carichi permanenti e variabili del solaio di copertura, su Excel

SOLAIO COPERTURA	t [m]	G1 [kN/m ²]	G2 [kN/m ²]	Q [kN/m ²]
STRUTTURALE	0.2			
NON STRUTTURALE	0.382			
TOTALE	0.582	0.84	1.6235	1

Tabella 47: Analisi dei carichi permanenti e variabili delle pareti portanti esterne, su Excel

PARETI PORTANTI XLAM esterne	t [m]	h [m]	γ [kN/m ³]	G1 [kN/m]	G2 [kN/m]
STRUTTURALE	0.14	2.508	4.2	1.475	
NON STRUTTURALE	0.267	2.508			1.347
TOTALE	0.407	2.508		1.475	1.347

Tabella 48: Analisi dei carichi permanenti e variabili delle pareti non portanti esterne, su Excel

PARETI NON PORTANTI XLAM esterne	t [m]	h [m]	γ [kN/m ³]	G1 [kN/m]	G2 [kN/m]
STRUTTURALE	0.06	2.508	4.2	0.632	
NON STRUTTURALE	0.267	2.508			1.347
TOTALE	0.327	2.508		0.632	1.347

Tabella 49: Analisi dei carichi permanenti e variabili delle pareti portanti interne, su Excel

PARETI PORTANTI XLAM interne	t [m]	h [m]	γ [kN/m ³]	G1 [kN/m]	G2 [kN/m]
STRUTTURALE	0.14	2.508	4.2	1.475	
NON STRUTTURALE	0.042	2.508			0.670
TOTALE	0.182	2.508		0.500	0.670

Tabella 50: Analisi dei carichi permanenti e variabili della parete non portante interna, su Excel

PARETE NON PORTANTE XLAM interna (BAGNI)	t [m]	h [m]	γ [kN/m ³]	G1 [kN/m]	G2 [kN/m]
STRUTTURALE	0.06	2.508	4.2	0.632	
NON STRUTTURALE	0.230	2.508			0.989
TOTALE	0.290	2.508		0.632	0.989

Tabella 51: Analisi dei carichi permanenti e variabili della scala interna, su Excel

SCALE	t [m]	γ [kN/m ³]	G1 [kN/m ²]	G2 [kN/m ²]	Q [kN/m ²]
STRUTTURALE	0.14	7.85	1.099		
NON STRUTTURALE	0.060	18.04		1.21	4.00
TOTALE	0.200		1.099	1.21	4.00

7.5.3.2 Carico della neve

In Spagna il calcolo del carico della neve per gli edifici è regolato dal documento CTE DB-SE-AE – *Acciones en la Edificación* al Capitolo 3.

La distribuzione e l'intensità del carico di neve su un edificio, in particolare su una copertura, dipendono dal clima del luogo, dal tipo di precipitazione, dal rilievo dell'ambiente circostante, dalla forma dell'edificio o della copertura, dagli effetti del vento e dagli scambi termici delle superfici esterne.

I modelli di carico del presente paragrafo riguardano esclusivamente i casi di deposito naturale della neve, tenendo in considerazione le eventuali condizioni che ne favoriscono l'accumulo, non essendo stata progettata una copertura accessibile a persone o veicoli.

Il valore del carico di neve per unità di superficie in proiezione orizzontale q_n può essere assunto:

$$q_n = \mu \cdot s_k$$

Dove:

- μ : coefficiente di forma della copertura [-] secondo il punto 3.5.3;
- s_k : valore caratteristico del carico di neve su terreno orizzontale [kN/m^2] secondo il punto 3.5.2.

Per il calcolo degli elementi sporgenti della copertura di edifici situati a quote superiori a 1000 m, oltre al carico superficiale della neve deve essere considerato un carico lineare p_n sul bordo dell'elemento, dovuto alla formazione di ghiaccio. Essendo Moya una località con altitudine pari a circa 1150 m s.l.m., tale carico deve essere valutato con la seguente espressione (con $k = 3 m$):

$$p_n = k \cdot \mu^2 \cdot s_k$$

Il valore del "sovraccarico di neve su terreno orizzontale s_k " nei capoluoghi di provincia e nelle città autonome può essere assunto dalla Tabella 52, riportata di seguito.

Tabella 52: Sovraccarico di neve nei capoluoghi di provincia e città autonome, CTE DB-SE-AE

Capital	Altitud m	s_k kN/m ²	Capital	Altitud m	s_k kN/m ²	Capital	Altitud m	s_k kN/m ²
Albacete	690	0,6	Guadalajara	680	0,6	Pontevedra	0	0,3
Alicante / Alacant	0	0,2	Huelva	0	0,2	Salamanca	780	0,5
Almería	0	0,2	Huesca	470	0,7	SanSebas- tián/Donostia	0	0,3
Ávila	1.130	1,0	Jaén	570	0,4	Santander	1.000	0,3
Badajoz	180	0,2	León	820	1,2	Segovia	10	0,7
Barcelona	0	0,4	Lérida / Lleida	150	0,5	Sevilla	1.090	0,2
Bilbao / Bilbo	0	0,3	Logroño	380	0,6	Soria	0	0,9
Burgos	860	0,6	Lugo	470	0,6	Tarragona	0	0,4
Cáceres	440	0,4	Madrid	660	0,7	Tenerife	950	0,2
Cádiz	0	0,2	Málaga	0	0,6	Teruel	550	0,9
Castellón	0	0,2	Murcia	40	0,2	Toledo	0	0,5
Ciudad Real	640	0,2	Orense / Ourense	130	0,4	Valencia/València	690	0,2
Córdoba	100	0,6	Oviedo	230	0,5	Valladolid	520	0,4
Coruña / A Coruña	0	0,2	Palencia	740	0,4	Vitoria / Gasteiz	650	0,7
Cuenca	1.010	0,3	Palma de Mallorca	0	0,4	Zamora	210	0,4
Gerona / Girona	70	1,0	Palmas, Las	0	0,2	Zaragoza	0	0,5
Granada	690	0,4	Pamplona/Iruña	450	0,2	Ceuta y Melilla	0	0,7
		0,5			0,7			0,2

In una falda delimitata inferiormente da cornicioni o linee di colmo secondarie, nella quale non vi sia impedimento allo scorrimento della neve, il coefficiente di forma della copertura assume valore $\mu = 1$ per coperture con inclinazione minore o uguale a 30° .

La struttura è situata nella provincia di La Cuenca, indicata ad una altitudine di 1010 m s.l.m.: con queste informazioni il valore di riferimento del carico della neve al suolo è pari a $s_k = 1.0 \text{ kN/m}^2$. Siccome la copertura è a 2 falde inclinate, si considera una sola condizione di carico neve coefficiente di forma pari a $\mu = 1$. Da indicazione riportata precedentemente, viene assunto il valore $k = 3 \text{ m}$.

Il valore del carico di neve per unità di superficie in proiezione orizzontale q_n viene assunto:

$$q_n = \mu \cdot s_k = 1 \cdot 1.0 \text{ kN/m}^2 = 1.0 \text{ kN/m}^2$$

Il carico lineare p_n sul bordo dell'elemento viene assunto:

$$p_n = k \cdot \mu^2 \cdot s_k = 3 \text{ m} \cdot 1^2 \cdot 1.0 \text{ kN/m}^2 = 3.0 \text{ kN/m}^2$$

7.5.3.3 Azione del vento

In Spagna il calcolo dell'azione del vento per gli edifici è regolato dal documento CTE DB-SE-AE – *Acciones en la Edificación* al Capitolo 2.

La distribuzione e il valore delle pressioni esercitate dal vento su un edificio e le forze risultanti dipendono dalla forma e dalle dimensioni della costruzione, dalle caratteristiche e dalla permeabilità della sua superficie, nonché dalla direzione, dall'intensità e dalla rafficosità del vento.

Non essendo l'edificio situato ad una altitudine superiore a 2000 m, possono essere utilizzate le indicazioni contenute nel Codice Tecnico, analogamente a quanto utilizzato per il calcolo del carico della neve (in caso contrario, sarebbe necessario determinare le pressioni del vento sulla base dei dati empirici disponibili). Inoltre, gli edifici ordinari non sono sensibili agli effetti dinamici del vento.

L'azione del vento può essere vista come una forza perpendicolare alla superficie in ogni punto esposto, quindi considerata come una pressione statica q_e espressa come:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p$$

Dove:

- q_b : pressione dinamica del vento [kN/m^2];

- c_e : coefficiente di esposizione, variabile con l'altezza del punto considerato, in funzione del grado di rugosità dell'ambiente in cui è situata la costruzione. È determinato in conformità a quanto stabilito al punto 3.3.3;
- c_p : coefficiente eolico o di pressione, dipendente dalla forma e dall'orientamento della superficie rispetto al vento e, eventualmente, dalla posizione del punto rispetto ai bordi della superficie stessa; un valore negativo indica aspirazione. Il suo valore è stabilito ai punti 3.3.4 e 3.3.5.

Gli edifici devono essere verificati nei confronti dell'azione del vento in tutte le direzioni, indipendentemente dall'esistenza di costruzioni contigue in aderenza, anche se generalmente è sufficiente considerare due direzioni qualsiasi sensibilmente ortogonali. Per ciascuna direzione devono essere considerati entrambi i sensi di azione. Se si procede con un coefficiente eolico globale, l'azione deve essere considerata applicata con un'eccentricità in pianta pari al 5 % della dimensione massima dell'edificio nel piano perpendicolare alla direzione del vento considerata, dal lato sfavorevole.

L'azione del vento genera inoltre forze tangenziali parallele alla superficie. Esse si calcolano come il prodotto della pressione esterna per il coefficiente di attrito, pari a 0.01 se la superficie è molto liscia (ad esempio acciaio o alluminio), 0.02 se è rugosa come nel caso del calcestruzzo, e 0.04 se è molto rugosa, come nel caso di presenza di onde, nervature o pieghe. Sulle superfici sopravento e sottovento non è necessario tenere conto dell'azione di attrito se il suo valore non supera il 10 % della forza perpendicolare dovuta all'azione del vento.

In forma semplificata, come valore valido in qualsiasi punto del territorio spagnolo, la pressione dinamica del vento può essere assunta pari a $q_b = 0.5 \text{ kN/m}^2$.

Per edifici urbani fino a 8 piani può essere assunto un valore costante per il coefficiente di esposizione, indipendente dall'altezza, pari a $c_e = 2.0 [-]$.

Negli edifici multipiano, con solai che collegano tutte le facciate a intervalli regolari, con aperture o finestre di piccole dimensioni, apribili o ermetiche, e con compartimentazione interna, per l'analisi globale della struttura è sufficiente considerare coefficienti eolici globali per il lato sopravento e sottovento, applicando l'azione del vento alla superficie di proiezione del volume edificato su un piano perpendicolare alla direzione del vento. Come coefficienti eolici globali possono essere adottati quelli riportati nella Tabella 53:

Tabella 53: Coefficienti eolici di pressione e aspirazione in funzione della snellezza della struttura nel piano parallelo al vento, CTE DB-SE-AE

Snellezza nel piano parallelo al vento	< 0.25	0.5	0.75	1	1.25	≥ 5.00
Coeff. Eolico di pressione c_p	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8
Coeff. Eolico di aspirazione c_s	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7

Viene indicata la dipendenza dalla snellezza nel piano parallelo al vento, che è considerato sempre ≥ 5.00 tenendo conto della lunghezza e degli spessori delle pareti in XLAM costituenti la struttura. Di conseguenza, il valore del coefficiente eolico di pressione è assunto come $c_p = 0.8 [-]$ e il valore del coefficiente eolico di aspirazione $c_s = -0.7 [-]$.

La pressione statica q_e viene calcolata come:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p = 0.5 \text{ kN/m}^2 \cdot 2.0[-] \cdot 0.8[-] = 0.8 \text{ kN/m}^2$$

7.5.3.4 Azione sismica

In Spagna, la progettazione sismica è attualmente disciplinata dalla NCSE-02 (*Norma de Construcción Sismorresistente*). Sebbene il panorama tecnico internazionale si stia progressivamente allineando agli Eurocodici (EN 1998) e ai relativi Annessi Nazionali spagnoli, la NCSE-02 rimane il pilastro normativo integrato nel *Documento Básico de Seguridad Estructural* (CTE DB-SE-AE).

La conformità a tali standard è un requisito imprescindibile in fase di progettazione: ogni relazione tecnica deve includere una sezione dedicata alle azioni sismiche, necessaria per l'ottenimento dei visti professionali, delle licenze comunali e delle autorizzazioni amministrative.

La definizione dell'azione sismica parte dall'identificazione della pericolosità del sito, espressa principalmente attraverso la mappa di pericolosità nazionale contenuta nell'Allegato 1 della norma.

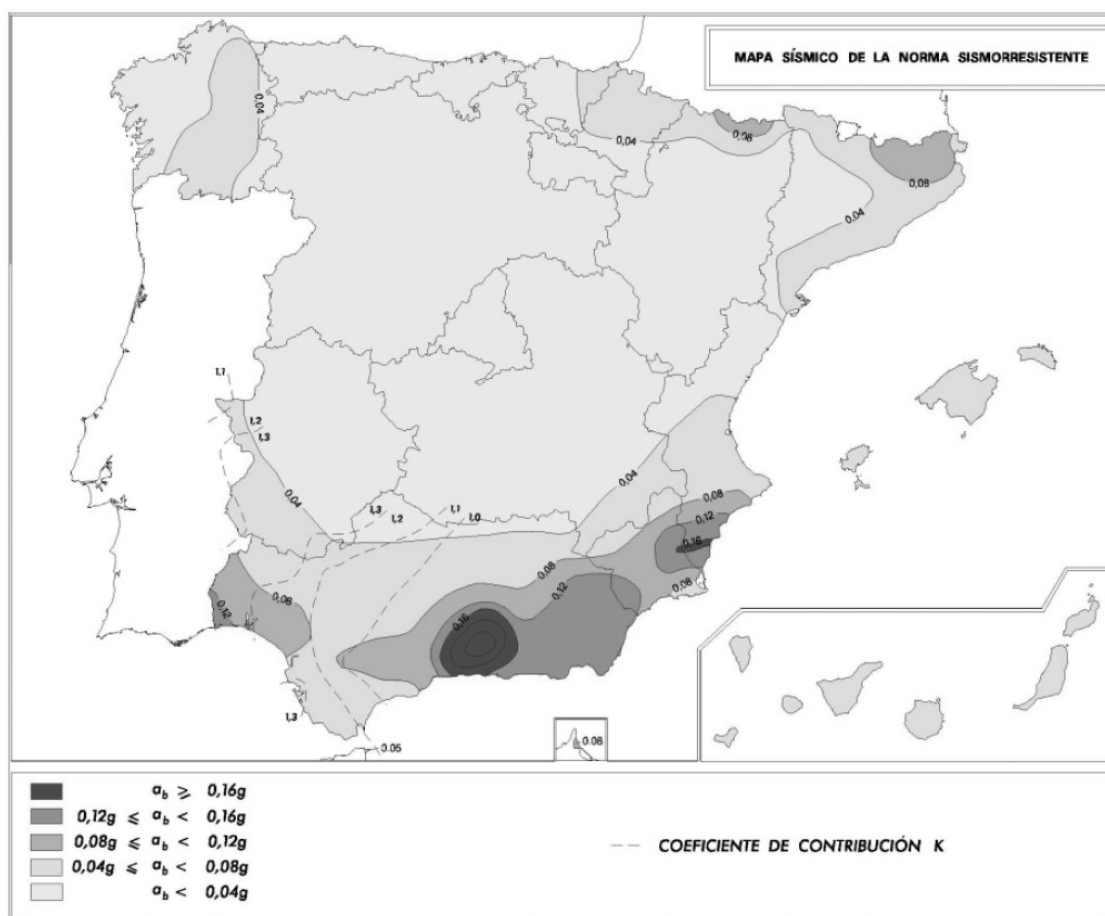


Figura 62: Mappa della pericolosità sismica in Spagna, capitolo 2 NCSE-02

Per il comune di Moya (Castilla-La Mancha), i parametri fondamentali estratti dalla cartografia ufficiale sono:

- Accelerazione sismica di base: $a_b = 0.04g$;
- Coefficiente di contribuzione: $K = 1.0$.

L'accelerazione sismica di calcolo (a_c) utilizzata per determinare le forze agenti sulla struttura, è derivata dal prodotto dell'accelerazione sismica di base per fattori correttivi che tengono conto dell'importanza dell'opera e delle caratteristiche geotecniche:

$$a_c = a_b \cdot \rho \cdot S$$

Dove:

- ρ [-]: coefficiente di rischio: è correlato alla probabilità di superamento dell'evento sismico durante la vita utile dell'edificio.

Si distinguono due classi principali:

- Costruzioni di importanza normale ($\rho = 1.0$): edifici residenziali o commerciali standard;

- Costruzioni di importanza speciale ($\rho = 1.3$): strutture strategiche come ospedali, caserme o centri di protezione civile.
- S: coefficiente di amplificazione del terreno; infatti, il terreno gioca un ruolo cruciale nella modifica delle onde sismiche in superficie. L'amplificazione è funzione del coefficiente del terreno (C), il quale dipende dalla stratigrafia e dalle proprietà geotecniche delle fondazioni (classificate da Tipo I a Tipo IV).

- Se $\rho \cdot a_b \leq 0.1g$, allora $S = \frac{C}{1.25}$

- Se $0.1g < \rho \cdot a_b < 0.4g$, allora $S = \frac{C}{1.25} + 3.33(\rho \cdot \frac{a_b}{g} - 0.1) \cdot (1 - \frac{C}{1.25})$

- Se $0.4g \leq \rho \cdot a_b$, allora $S = 1.0$

Secondo la norma NCSE-02, l'influenza delle condizioni locali sulla risposta sismica superficiale è determinata dalla natura dei primi 30 metri di profondità del sottosuolo. Il comportamento del terreno viene quantificato attraverso il coefficiente del terreno (C), il quale dipende dalla velocità di propagazione delle onde di taglio (v_s) o, in assenza di prove geofisiche dirette, dalla descrizione litologica e dalle proprietà meccaniche degli strati.

La normativa definisce quattro categorie principali:

- TIPO I ($v_s > 750 \text{ m/s}$): roccia compatta, terreno cementato o granulare molto denso. Rappresenta la condizione di "bedrock" sismico con amplificazione minima;
- TIPO II ($400 \text{ m/s} < v_s < 750 \text{ m/s}$): roccia altamente fratturata, terreni granulari densi o terreni coesivi duri;
- TIPO III ($200 \text{ m/s} < v_s < 400 \text{ m/s}$): terreni granulari di media compattezza o terreni coesivi di consistenza media;
- TIPO IV ($v_s < 200 \text{ m/s}$): terreni sabbiosi sciolti, terreni coesivi soffici o argille molli.

Il coefficiente C non viene assegnato in modo arbitrario basandosi solo sullo strato superficiale, ma è il risultato di una media ponderata sugli spessori dei diversi tipi di terreno individuati nei primi 30 metri sotto il piano di posa delle fondazioni. La formula di calcolo è la seguente:

$$C = \frac{\sum C_i \cdot e_i}{\sum e_i} = \frac{C_1 e_1 + C_2 e_2 + C_3 e_3 + C_4 e_4}{30}$$

Dove:

- C_i : coefficiente specifico per ogni tipo di terreno;
- e_i : spessore espresso in metri dello strato appartenente alla categoria i .

Tabella 54: Coefficienti del tipo di terreno (Tabella 2.1 della norma)

TIPO DE TERRENO	COEFICIENTE C
I	1,0
II	1,3
III	1,6
IV	2,0

L'indagine del profilo stratigrafico per il progetto situato a Moya ha permesso di individuare due unità principali:

- Unità superficiale (Livello 0): terreno alterato

Si tratta di una coltre superficiale di spessore esiguo, pari a circa 0.60 m, costituita da sabbie argillose e materiale organico derivante dal degrado della roccia sottostante. In termini sismici, tali materiali presentano velocità di propagazione delle onde d'urto tipicamente basse ($v_s < 200 \text{ m/s}$), riconducibili al TIPO IV. Tuttavia, data l'esiguità dello spessore, questo strato risulta trascurabile ai fini del calcolo globale e, nella pratica costruttiva, verrà rimosso durante le operazioni di sbancamento per permettere alle fondazioni di attestarsi sugli strati più portanti.

- Unità profonda (Livello 1): formazione calcarea

Il corpo principale del sottosuolo è costituito da una formazione di calcari e calcari dolomitici. La descrizione geologica evidenzia la presenza di sezioni brecciate e intercalazioni marnose. Sebbene il calcare sia intrinsecamente una roccia rigida, lo stato di fratturazione e la presenza di lenti marnose (più tenere) impediscono la classificazione come roccia massiva (Tipo I). Pertanto, questa unità viene correttamente inquadrata nel TIPO II, con una velocità $750 \text{ m/s} < v_s < 400 \text{ m/s}$.

Data la netta prevalenza della formazione calcarea fratturata nei primi 30 metri di profondità, la classificazione finale del sito di Moya viene assunta come TERRENO DI TIPO II.

Alla luce di queste considerazioni, è possibile definire il coefficiente di amplificazione del terreno S:

$$\rho \cdot a_b = 1 \cdot 0.04g = 0.04g \leq 0.1g$$

$$S = \frac{C}{1.25} = \frac{1.3}{1.25} = 1.04$$

Di conseguenza, l'accelerazione sismica di calcolo (a_c) utilizzata per determinare le forze agenti sulla struttura, è

$$a_c = a_b \cdot \rho \cdot S = 0.04g \cdot 1 \cdot 1.04 = 0.0416g$$

La norma NCSE-02 definisce uno spettro normalizzato di risposta elastica $\alpha(T)$ riferito a un oscillatore lineare semplice con uno smorzamento del 5% rispetto a quello critico.

Lo spettro è composto da tre rami principali definiti in funzione del periodo proprio della struttura:

1. Ramo ascendente ($T < T_A$):

$$\alpha(T) = 1 + 1.5 \frac{T}{T_A}$$

2. Plateau di massima accelerazione ($T_A \leq T \leq T_B$):

$$\alpha(T) = 2.5$$

3. Ramo decrescente ($T > T_B$):

$$\alpha(T) = K \cdot \frac{C}{T}$$

Dove:

- $\alpha(T)$: valore dell'accelerazione spettrale normalizzata;
- T : periodo proprio della struttura in secondi, parametro che permette di accoppiare la rigidità dell'edificio alla sollecitazione sismica.

I periodi che delimitano il plateau dipendono strettamente dal coefficiente di contribuzione K e dal coefficiente del terreno C individuato per il sito.

$$T_A = \frac{K \cdot C}{10} = 0.13 \text{ s}$$

$$T_B = \frac{K \cdot C}{2.5} = 0.52 \text{ s}$$

L'applicazione di queste formule permette di ottenere l'accelerazione spettrale di progetto S_a , che è data dal prodotto dell'accelerazione di calcolo a_c per l'ordinata spettrale normalizzata:

$$S_a = a_c \cdot \alpha(T)$$

Ai fini della progettazione strutturale, i parametri normativi sono stati implementati in un modello di calcolo per generare gli spettri di risposta elastici e anelastici. Tale procedura ha permesso di quantificare l'azione sismica per i diversi Stati Limite previsti dalle moderne pratiche di ingegneria sismica, in linea con i requisiti del CTE e della NCSE-02.

Il calcolo ha prodotto una serie di curve accelerometriche (spettri di risposta) che mettono in relazione l'accelerazione spettrale S_a (espressa in frazioni di g) con il periodo proprio T :

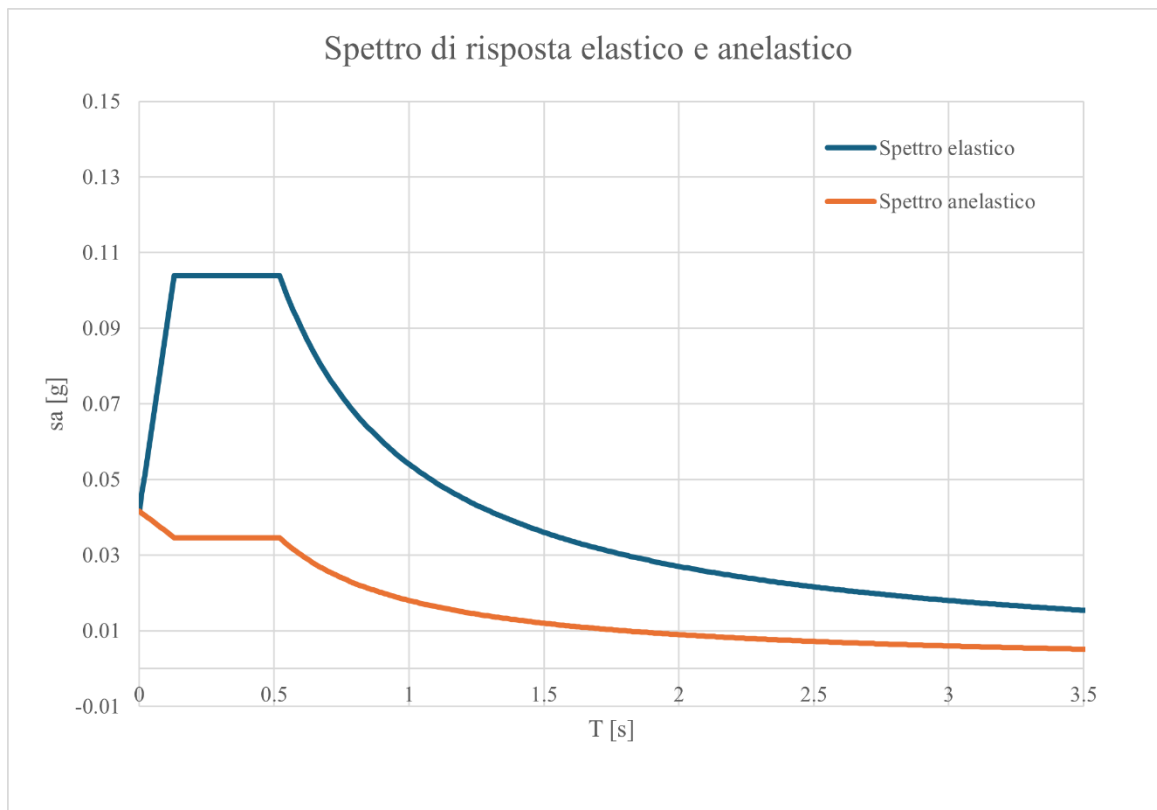


Figura 63: Spettri di risposta elastico e anelastico secondo la norma NCSE-02, su Excel

1. Spettro Elastico (SLV - Stato Limite di salvaguardia della Vita): rappresenta la sollecitazione massima attesa per un evento con periodo di ritorno di 475 anni (probabilità di superamento del 10% in 50 anni).
Come visibile dal plateau calcolato, l'accelerazione massima normalizzata raggiunge il valore di 0.104g nell'intervallo tra T_A e T_B .
2. Spettro di Progetto (anelastico): per tener conto della capacità di dissipazione energetica della struttura (duttilità), è stato introdotto un fattore di struttura corrispondente a una classe di duttilità media (CD"B"). Questo spettro riduce le forze elastiche teoriche a valori di progetto realistici (S_d), con un picco di accelerazione pari a circa 0.052g.

Il passaggio dallo Spettro Elastico (quello blu) allo Spettro di Progetto (quello arancione) avviene dividendo l'ordinata spettrale per d :

$$S_d(T) = \frac{S_a(T)}{d}$$

Il parametro d (spesso indicato come “coefficiente di risposta” nella normativa spagnola NCSE-02 o come “fattore di comportamento q ” nell'Eurocodice 8) rappresenta la capacità di una struttura di dissipare energia attraverso il comportamento plastico (duttilità) senza crollare.

Nel caso dell'XLAM, il fattore di struttura non è una proprietà del legno in sé, ma della carpenteria metallica che tiene insieme i pannelli. A differenza delle strutture in cemento armato, dove la duttilità è data dalla plasticizzazione dell'acciaio d'armatura all'interno delle sezioni, nel sistema XLAM il pannello di legno è considerato un elemento rigido e quasi-fragile. La dissipazione dell'energia sismica avviene esclusivamente nei collegamenti meccanici.

Per l'edificio in esame, è stata adottata la classe di duttilità "B" (DCM - duttilità media), con un valore di $d = 3.0$: questa scelta rappresenta un approccio prudentiale in accordo con la pratica comune spagnola per edifici di importanza normale in zone a bassa sismicità, garantendo una robustezza intrinseca superiore senza sovraccaricare i dettagli costruttivi richiesti per classi di duttilità superiori.

7.5.4 Combinazioni

La combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli Stati Limite Ultimi (SLU) per situazioni persistenti o transitorie, è definita dalla seguente espressione:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Ai fini delle verifiche statiche secondo il CTE DB SE, le combinazioni utilizzate sono le seguenti:

A. Sovraccarico d'uso come azione variabile dominante:

$$1.35 \cdot G_k + 1.5 \cdot Q_k + 1.5 \cdot \sum \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

B. Azione del vento come azione variabile dominante:

$$1.35 \cdot G_k + 1.5 \cdot Q_{wind} + 1.5 \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

C. Azione del vento come azione dominante, con limitazione dei carichi verticali:

$$1.0 \cdot G_k + 1.5 \cdot Q_{wind}$$

La tabella seguente riporta i valori γ stabiliti dal CTE DB SE per le situazioni persistenti o transitorie, distinguendo tra verifiche di resistenza e di stabilità.

Tabella 55: Coefficienti parziali di sicurezza per le azioni in situazioni persistenti o transitorie (Fonte: CTE DB SE, Tabla 4.1)

Tabla 4.1 Coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones

Tipo de verificación ⁽¹⁾	Tipo de acción	Situación persistente o transitoria	
		desfavorable	favorable
Resistencia	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,35	0,80
	Empuje del terreno	1,35	0,70
	Presión del agua	1,20	0,90
	Variable	1,50	0
Estabilidad		desestabilizadora	estabilizadora
	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,10	0,90
	Empuje del terreno	1,35	0,80
	Presión del agua	1,05	0,95
	Variable	1,50	0

⁽¹⁾ Los coeficientes correspondientes a la verificación de la resistencia del terreno se establecen en el DB-SE-C

Per la corretta definizione dei carichi nelle diverse combinazioni di progetto, vengono impiegati i coefficienti di simultaneità ψ . Tali parametri riducono i valori caratteristici delle azioni variabili in base alla probabilità che esse agiscano contemporaneamente, secondo le categorie d'uso e le condizioni ambientali previste dal CTE DB SE.

Tabella 56: Coefficienti di simultaneità per le diverse categorie di sovraccarico e azioni ambientali (Fonte: CTE DB SE, Tabla 4.2)

Tabla 4.2 Coeficientes de simultaneidad (ψ)

	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecarga superficial de uso (Categorías según DB-SE-AE)			
• Zonas residenciales (Categoría A)	0,7	0,5	0,3
• Zonas administrativas (Categoría B)	0,7	0,5	0,3
• Zonas destinadas al público (Categoría C)	0,7	0,7	0,6
• Zonas comerciales (Categoría D)	0,7	0,7	0,6
• Zonas de tráfico y de aparcamiento de vehículos ligeros con un peso total inferior a 30 kN (Categoría E)	0,7	0,7	0,6
• Cubiertas transitables (Categoría F)		⁽¹⁾	
• Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento (Categoría G)	0	0	0
Nieve			
• para altitudes > 1000 m	0,7	0,5	0,2
• para altitudes ≤ 1000 m	0,5	0,2	0
Viento			
	0,6	0,5	0
Temperatura			
	0,6	0,5	0
Acciones variables del terreno			
	0,7	0,7	0,7

⁽¹⁾ En las cubiertas transitables, se adoptarán los valores correspondientes al uso desde el que se accede.

7.5.5 Azioni ordinarie

7.5.5.1 Azioni assiali

Per poter effettuare le verifiche richieste dalla normativa di riferimento, si è reso necessario effettuare il calcolo dell'azione assiale gravante su ogni muro.

Il solaio in XLAM, in virtù della sua natura bidimensionale, risponde strutturalmente come una piastra. La distribuzione effettiva dei carichi verticali verso gli elementi di elevazione dipende strettamente dal grado di vincolo (rigidezza rotazionale) offerto dalle pareti di supporto. In fase di modellazione, è possibile idealizzare il comportamento di una fascia di solaio come una trave continua: in tale configurazione, la rigidezza dei vincoli determina una ripartizione delle sollecitazioni non uniforme, deviando una quota maggiore di carico verso gli appoggi più rigidi (tipicamente gli incastri) rispetto a quelli più flessibili (semplici appoggi).

Nell'analisi pratica, è consuetudine differenziare le condizioni di vincolo:

- Appoggi di estremità: in corrispondenza delle pareti perimetrali, il collegamento viene generalmente modellato come un appoggio a cerniera;
- Appoggi di continuità: in corrispondenza dei muri portanti interni, la continuità della piastra impone un vincolo rotazionale significativo, che viene assimilato a un incastro.

Per definire le aree di influenza (o aree di carico) sulle pareti, si adotta il metodo geometrico basato sulle linee di rottura:

1. Si tracciano linee a 45° a partire dai vertici dell'impalcato;
2. Nei punti di convergenza tra vincoli di diversa natura (cerniere e incastri), la ripartizione del carico non è simmetrica: per riflettere la maggiore capacità portante degli appoggi più rigidi, la geometria di ripartizione viene adattata incrementando l'influenza angolare sul vincolo rigido (fino a 60°) a discapito di quello più flessibile (ridotto a 30°);
3. Le linee di separazione vengono estese fino al loro incontro, delineando i poligoni di influenza definitivi.

Infine, in presenza di aperture (come fori per infissi o vani scala), la ripartizione viene semplificata mediante il criterio della luce netta: il carico gravante sulle pareti adiacenti all'apertura viene ripartito dividendo la campata a metà e attribuendo la relativa area di influenza al vincolo più prossimo.

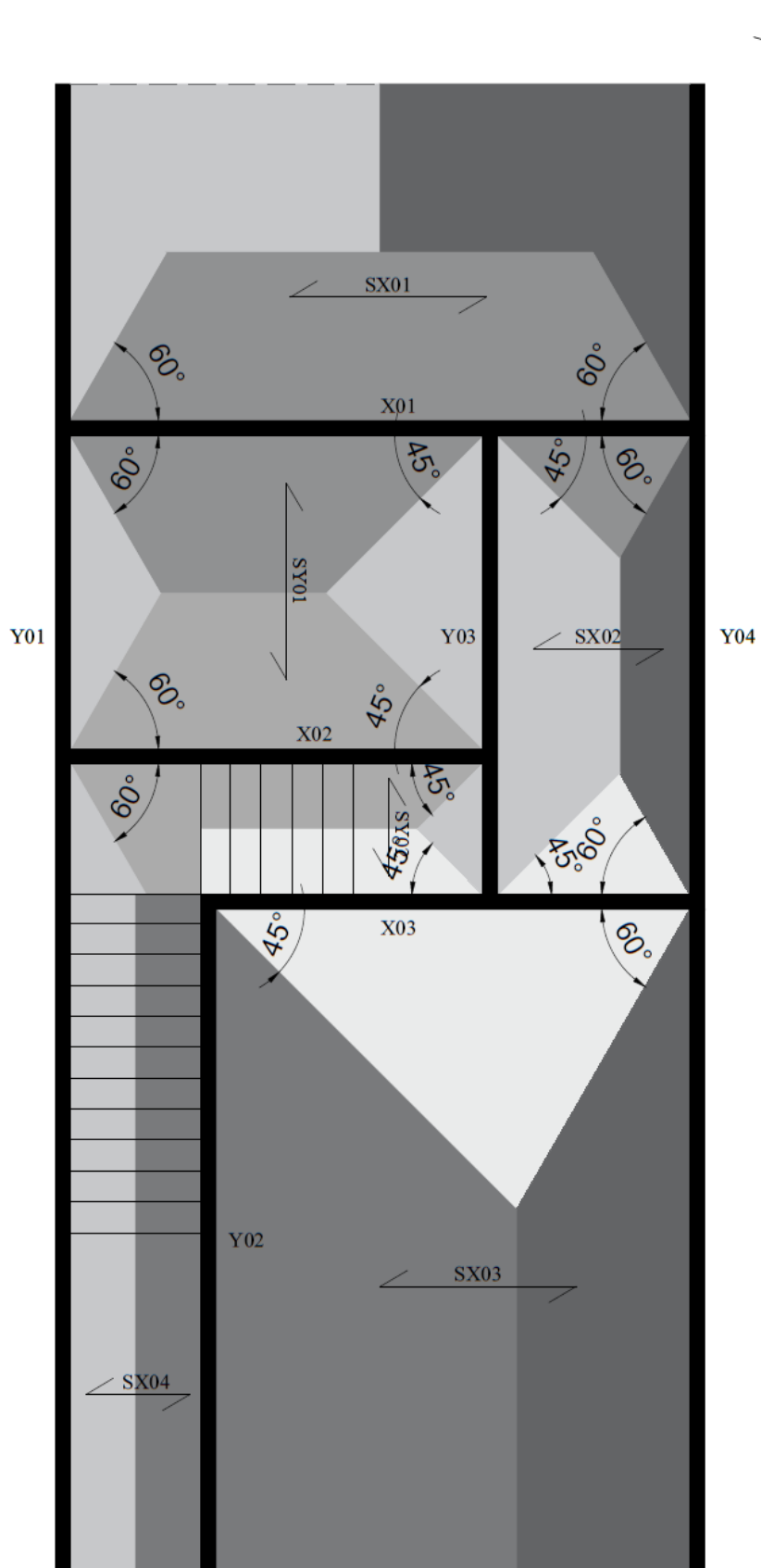


Figura 64: Aree d'influenza, su Autocad (elaborazione a cura dell'autrice)

Il calcolo delle azioni assiali totali alla base di ciascun setto murario è stato condotto seguendo una gerarchia di carico discendente (dalla copertura alla fondazione). Per ogni parete è stata definita l'azione assiale alla base come segue:

$$N_{base} = N_{sommità} + N_{parete}$$

Dove:

- $N_{sommità}$: rappresenta il carico trasmesso dagli impalcati superiori (copertura) e dalle parti di pareti sovrastanti;
- N_{parete} : è il peso proprio del pannello in XLAM considerato, calcolato in funzione dell'altezza interpiano (h), della lunghezza (l) e dello spessore (b) del setto.

Nella determinazione di $N_{sommità}$, si è tenuto conto della distinzione tra i carichi provenienti da "destra" (N_{dx}) e "sinistra" (N_{sx}) rispetto all'asse della parete, fondamentale per la successiva valutazione delle eccentricità di carico.

Di seguito, è riportato a titolo esemplificativo il calcolo del carico verticale che agisce sul muro Y04, ovvero la parete che risulta maggiormente sollecitata. Per l'elenco completo di tutte le pareti e i relativi carichi assiali, si rimanda all'Allegato B (cfr. C.10).

I dati geometrici della parete Y04 sono:

- Lunghezza (l) = 14.78 m;
- Spessore strutturale (b): 0.18 m;
- Area della parete in pianta: 2.69 m²;
- Altezza della parete (strutturale): 2.90 m.

Per questa parete al piano primo P1 l'area d'influenza d'interesse, sulla base della configurazione progettata, prevede gravante l'aliquota della copertura "sx", ovvero in pianta collocata a sinistra della parete perimetrale considerata rispetto al riferimento scelto. Questa viene ricavata utilizzando il comando AREA di Autocad:

- Area copertura sx: 16.26 m²

Considerando la combinazione A, si ottiene:

$$P_{parete} = 1.35 \cdot G_1 + 1.5 \cdot G_2 = 15.81 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{copertura} = 1.35 \cdot G_1 + 1.5 \cdot G_2 + 0.75 \cdot S = 4.40 \text{ kN/m}^2$$

Dove:

- P_{parete} : peso del setto;

- $P_{copertura}$: peso delle falde di copertura.

Il passaggio successivo riguarda l'effettiva determinazione dei carichi assiali N agenti sulla parete considerata. Di conseguenza:

$$N_{base,P1} = N_{sommità,P1} + N_{parete,P1} = N_{sx} + N_{dx} + N_{parete,P1} = 114.04 \text{ kN}$$

Dove:

$$N_{sx} = P_{copertura} \cdot A_{copertura,sx} = 71.52 \text{ kN}$$

$$N_{dx} = P_{copertura} \cdot A_{copertura,dx} = 0 \text{ kN}$$

$$N_{parete,P1} = P_{parete} \cdot A_{parete,in\ pianta} = 42.52 \text{ kN}$$

Nel calcolo dell'azione assiale per la medesima parete al piano terra PT le considerazioni sono analoghe, aggiungendo il peso derivante dal piano primo appena calcolato e il peso derivante dal solaio interpiano. Di conseguenza:

$$N_{base,PT} = N_{sommità,PT} + N_{parete,PT} = N_{sx} + N_{dx} + N_{parete,PT} + N_{base,P1} = 262.62 \text{ kN}$$

7.5.5.2 Centro di massa

Per la determinazione della posizione del centro di massa, si è proceduto al calcolo del baricentro dei pesi di tutti gli elementi strutturali e non strutturali afferenti a ciascun piano.

Il sistema di riferimento globale è stato impostato con l'origine ($X = 0; Y = 0$) nell'angolo in basso a sinistra della struttura, in corrispondenza dell'incrocio degli interassi principali. Le coordinate del centro di massa per ciascun livello sono state calcolate mediante le seguenti espressioni:

$$X_M = \frac{\sum_i (N_i \cdot x_i)}{\sum_i N_i}$$

$$Y_M = \frac{\sum_i (N_i \cdot y_i)}{\sum_i N_i}$$

Il calcolo viene effettuato per tutte le pareti, sia del piano terra sia del piano primo. Si ottengono 2 coppie di valori distinte:

$$X_M(\text{piano terra}) = 3.349 \text{ m}$$

$$Y_M(\text{piano terra}) = 7.203 \text{ m}$$

$$X_M(\text{piano primo}) = 3.359 \text{ m}$$

$$Y_M(\text{piano primo}) = 7.245 \text{ m}$$

Il valore del centro di massa è assunto come il massimo tra le coordinate X e le coordinate Y.

I calcoli per le singole pareti, che portano alla definizione dell'univoca coppia di coordinate del CM, sono riportati nell'Allegato C (cfr. C.10).

7.5.5.3 Forze orizzontali dovute al vento

L'analisi del comportamento globale del fabbricato sotto azioni orizzontali (vento) richiede la determinazione della rigidità traslazionale di ciascun setto in XLAM e la successiva individuazione del centro di rigidità del piano. Tale procedura è fondamentale per valutare la distribuzione delle forze tra le pareti e l'insorgere di eventuali effetti torsionali.

Le forze concentrate sono state determinate moltiplicando la superficie di ciascuna regione per l'azione tangenziale del vento, considerata al netto del coefficiente di forma.

Di seguito, si riportano i valori ottenuti per le forze concentrate:

Tabella 57: Pressione su superficie verticale del piano terra e del piano primo, su Excel

	PT	P1	
pressione su sup. verticale	640	640	[N/m2]
depressione su sup. verticale	320	320	[N/m2]

Tabella 58: Caratteristiche geometriche delle pareti, su Excel

Altezza totale	7.66	[m]
Lunghezza in X	6.98	[m]
Lunghezza in Y	14.78	[m]
Superficie totale in X	53.49	[m ²]
Superficie totale in Y	113.26	[m ²]
H1 (piano terra)	2.93	[m]
H2 (piano primo)	3.00	[m]

In una fase preliminare si è proceduto alla determinazione delle altezze equivalenti della struttura, parametro necessario per la modellazione a mensola delle pareti. Tale grandezza viene calcolata mediante la seguente relazione:

$$h_{eq} = \frac{F_i \cdot z_i}{\sum F_i \cdot z_i}$$

Dove:

- F_i : forze orizzontali applicate a diversi livelli;
- z_i : quota relativa alle forze orizzontali.

Considerato che l'azione del vento interessa la struttura lungo entrambe le direzioni principali, l'analisi è stata condotta separatamente per gli assi X e Y.

Di seguito viene riportata la tabella contenente i calcoli per la determinazione delle altezze equivalenti:

Tabella 59: Risultati finalizzati al calcolo delle altezze equivalenti delle pareti, su Excel

Combo	F1x [kN]	F2x [kN]	F1y [kN]	F2y [kN]	Xc [m]	Yc [m]	Fx,tot [kN]	Fy,tot [kN]	heq,x [m]	heq,y [m]
A	17.88	9.05	37.86	19.15	3.49	7.23	26.93	57.02	3.94	3.94
B-C	29.80	15.08	63.10	31.92	3.49	7.23	44.88	95.03	3.94	3.94

7.5.5.4 Rigidezza delle pareti

La determinazione della rigidezza traslazionale K_i di ciascun setto è stata condotta adottando un modello a deformabilità distribuita. In un sistema costruttivo in XLAM, infatti, la rigidezza globale non dipende esclusivamente dalle proprietà elastiche del materiale ligneo, ma è fortemente condizionata dalla flessibilità dei collegamenti meccanici alla base, in quanto l'elemento in XLAM è significativamente più rigido delle connessioni.

Per ogni parete, la rigidezza totale è stata calcolata come l'inverso dello spostamento totale (Δ_{tot}) prodotto da una forza unitaria applicata in sommità, modellando il sistema come una serie di molle corrispondenti ai diversi meccanismi deformativi. La rigidezza delle pareti deve quindi essere valutata tenendo in considerazione tutte le deformazioni che ne influenzano lo spostamento finale. Quest'ultimo è dato dalla somma dei seguenti contributi:

$$\Delta_{tot} = \Delta_B + \Delta_S + \Delta_T + \Delta_R$$

Dove:

- Δ_B : spostamento dato dal contributo flessionale del pannello;
- Δ_S : spostamento dato dal contributo a taglio del pannello;
- Δ_T : spostamento dato dal contributo di scorrimento delle connessioni;
- Δ_R : spostamento dato dal contributo di rotazione delle connessioni.

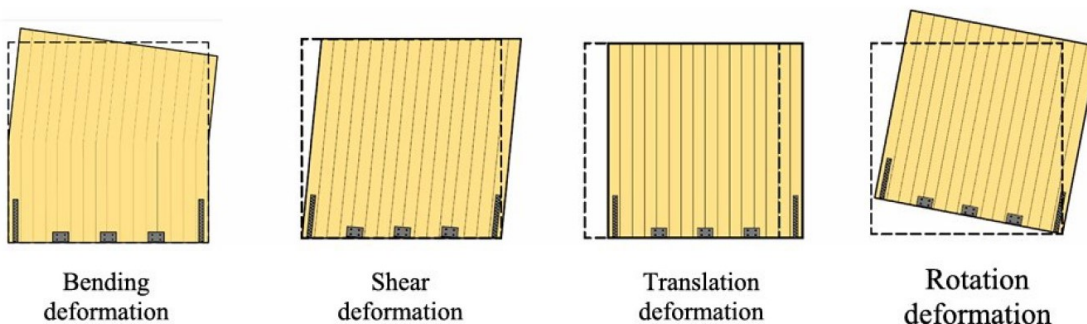


Figura 65: Contributi allo spostamento laterale di una parete XLAM

$$\Delta_B = \frac{H^3}{3EI_{net}}$$

$$\Delta_S = \frac{H}{G_{eff} \cdot A}$$

$$\Delta_T = \frac{1}{n_{ang} \cdot k_{ser,ang}}$$

$$\Delta_R = \frac{H^2}{L^2 \cdot k_{ser,HD}}$$

Le formule riportate considerano l'azione tagliante V unitaria e il momento M pari all'altezza della parete. Questi 4 valori dipendono solo dalla geometria della parete e dai connettori.

Ai fini del calcolo delle rigidezze traslazionali, è stata ipotizzata una configurazione standard dei collegamenti meccanici basata sulle indicazioni costruttive e sulle dimensioni geometriche dei setti (nello specifico, hold-down posti alle estremità di ogni parete e un interasse costante per le squadrette a taglio).

Si precisa che tale configurazione rappresenta un pre-dimensionamento basato sulla rigidezza desiderata per la corretta ripartizione delle forze orizzontali. La verifica di resistenza di tali connessioni, volta ad accertare che la capacità dei connettori scelti sia superiore alle sollecitazioni derivanti dal calcolo (taglio e momento), è riportata nel dettaglio nel Capitolo 8. Qualora le sollecitazioni risultanti dovessero richiedere un numero superiore di connettori, la rigidezza è aggiornata iterativamente per garantire la congruenza tra il modello di calcolo e l'effettiva posa in opera.

La rigidezza per ogni parete è calcolata come:

$$K_i = \frac{1}{\Delta_{tot}}$$

Tale approccio permette di ottenere valori di rigidezza realistici e coerenti con la natura semi-rigida delle connessioni meccaniche, garantendo che la successiva ripartizione delle azioni orizzontali rifletta l'effettivo comportamento dell'edificio.

Tutti i calcoli effettuati per ricavare le rigidezze di ogni parete sono contenuti nell'Allegato D (cfr. C.10).

Una volta note le rigidezze traslazionali di ogni setto ($K_{x,i}$ e $K_{y,i}$), le coordinate del centro di rigidezza (X_R, Y_R) sono calcolate come la media pesata delle posizioni dei baricentri delle pareti rispetto alle loro rigidezze:

$$X_R = \frac{\sum K_{y,i} \cdot x_i}{\sum K_{y,i}}$$

$$Y_R = \frac{\sum K_{x,i} \cdot y_i}{\sum K_{x,i}}$$

Dove:

- x_i, y_i : coordinate del baricentro della parete i-esima;
- $K_{y,i}, K_{x,i}$: rigidezze traslazionali relative alla parete i-esima.

Di seguito, vengono riportate le coordinate ottenute dal calcolo del centro di rigidezza del piano primo:

$$X_R = 3.35 \text{ m}$$

$$Y_R = 8.84 \text{ m}$$

Vengono riportate anche le coordinate ottenute dal calcolo del centro di rigidezza del piano terra:

$$X_R = 3.35 \text{ m}$$

$$Y_R = 8.84 \text{ m}$$

7.5.5.5 Forze interne

Una volta noti i parametri di rigidezza e le coordinate del centro di rigidezza, è stato possibile calcolare le sollecitazioni di taglio e il momento flettente agenti sulle pareti, sia alla base sia alla sommità della struttura.

L'analisi delle azioni orizzontali è stata eseguita adottando il *metodo di Benjamin*, che consente di ripartire le sollecitazioni tra le pareti in funzione della rigidezza, sotto l'assunzione di solai infinitamente rigidi nel piano. In tal modo è possibile definire l'entità delle azioni trasmesse a ciascuna parete a partire dalla rigidezza propria e dall'azione orizzontale complessiva.

Tale procedura di calcolo è stata applicata sistematicamente sia per la combinazione A (azione del vento come variabile principale) sia per la combinazione B-C (azioni concomitanti di vento e neve), al fine di individuare per ogni singolo elemento strutturale la condizione di carico più gravosa ai fini delle verifiche di sicurezza.

Le forze di taglio al piano terra sono calcolate mediante la seguente relazione:

$$V_{\{xi\}} = \frac{(k_{\{xi\}} \cdot V_{\{tot,x\}})}{k_{\{tot,x\}}} - \frac{(M_{\{tot,x\}} \cdot K_{\{xi\}} \cdot (y_i - Y_R))}{J_{\{p,tot\}}}$$

$$V_{\{yi\}} = \frac{(k_{\{yi\}} \cdot V_{\{tot,y\}})}{k_{\{tot,y\}}} - \frac{(M_{\{tot,y\}} \cdot K_{\{yi\}} \cdot (x_i - X_R))}{J_{\{p,tot\}}}$$

Dove:

- $M_{\{tot,x\}}, M_{\{tot,y\}}$: momenti torcenti di piano, definiti dal prodotto tra il taglio totale di piano e la distanza tra il punto di applicazione e il centro di rigidezza;
- $J_{\{p,tot\}}$: rigidezza torsionale totale del piano, calcolata come:

$$J_{\{p,tot\}} = \sum K_{\{x,i\}} \cdot (y_i - Y_R)^2 + \sum K_{\{y,i\}} \cdot (x_i - X_R)^2$$

- Y_R, X_R : coordinate del centro di rigidezza;
- $V_{\{tot,x\}}, V_{\{tot,y\}}$: azioni totali del vento.

Per le forze di taglio relative al piano primo si utilizza la seguente formula:

$$V_{\{i,x,P1\}} = V_{\{i,x,PT\}} \cdot \left(\frac{F_{\{x,P1\}}}{V_{\{tot,x\}}} \right)$$

$$V_{\{i,y,P1\}} = V_{\{i,y,PT\}} \cdot \left(\frac{F_{\{y,P1\}}}{V_{\{tot,y\}}} \right)$$

Una volta noti i valori del taglio si possono calcolare quelli del momento, per il piano terra e primo:

$$M_{\{i,x,PT\}} = V_{\{i,x,1P\}} \cdot z_2 + (V_{\{i,x,PT\}} - V_{\{i,x,P1\}}) \cdot z_1$$

$$M_{\{i,y,PT\}} = V_{\{i,y,1P\}} \cdot z_2 + (V_{\{i,y,PT\}} - V_{\{i,y,P1\}}) \cdot z_1$$

$$M_{\{i,x,P1\}} = V_{\{i,x,P1\}} \cdot (z_2 - z_1)$$

$$M_{\{i,y,P1\}} = V_{\{i,y,P1\}} \cdot (z_2 - z_1)$$

Dove:

- z_1 : distanza da terra al punto di applicazione della forza di taglio al primo piano;
- z_2 : distanza tra il punto di applicazione delle forze di taglio del primo piano e di quello sotto la copertura.

Il metodo di Benjamin distribuisce le forze orizzontali in proporzione alla rigidezza delle pareti e si dimostra particolarmente efficace nella valutazione della risposta reale della struttura alle azioni orizzontali.

Le sollecitazioni di ciascun muro sono riportate nell'Allegato E (cfr. C.10).

7.5.6 Verifiche azioni statiche

7.5.6.1 Verifica a taglio e torsione

Il comportamento a taglio dei pannelli in CLT presenta una complessità legata alla loro natura ortotropa e stratificata. L'applicazione di una sollecitazione tagliante nel piano del pannello non induce soltanto tensioni tangenziali nelle lamelle longitudinali, ma genera simultaneamente uno stato tensionale torsionale in corrispondenza delle interfacce di incollaggio tra gli strati incrociati. Questa condizione biassiale di sollecitazione può condurre alla crisi dell'elemento secondo due distinti meccanismi di rottura, che devono essere verificati indipendentemente:

1. Rottura per taglio delle lamelle: crisi per superamento della resistenza a taglio del legno parallelamente alla fibra nelle zone non incollate;
2. Rottura per torsione degli incroci: crisi per delaminazione torsionale nelle aree di incollaggio tra strati longitudinali e trasversali.

A titolo esemplificativo, si valuta la capacità portante a taglio e torsione della parete Y04 e si procede alla determinazione degli spessori ideali resistenti basati sulla geometria reale del pannello.

Considerando che gli strati del pannello XLAM per la parete verticale misurano nell'ordine 30 mm + 20 mm + 40 mm + 20 mm + 30 mm, si definiscono le seguenti grandezze efficaci:

- Spessore ideale degli strati esterni: $t_A^* = \min(2t_1; t_2) = 20 \text{ mm}$;
- Spessore ideale degli strati interni: $t_B^* = \min(t_3; t_4) = 20 \text{ mm}$.

Lo spessore totale ideale della lastra è ricavato come:

$$t_{tot}^* = \sum_i^n t_i^* = t_A^* + t_B^* = 40 \text{ mm}$$

Per procedere alla verifica, si definisce una tensione di taglio ideale di riferimento (τ_0^*) calcolata rapportando il valore di progetto della forza tagliante (V_{Ed}) alla geometria resistente della parete:

$$\tau_0^* = \frac{n_{xy}}{t_{tot}^*} = \frac{V_{Ed}}{a \cdot t_{tot}^*}$$

Dove

- a : lunghezza della parete;
- t_{tot}^* : spessore ideale complessivo derivato dalla somma degli spessori ideali degli strati esterni t_A^* e interni t_B^* .

Per la parete in esame, con una sollecitazione V_{Ed} derivata dal metodo di Benjamin, si ottengono due distinte tensioni τ_0^* , essendo necessario effettuare la verifica a taglio e torsione per ciascun muro sia al primo piano che al piano terra (per completezza, vengono analizzate tre sezioni per ciascuna parete di ciascun piano: sezione in sommità, sezione centrale, sezione alla base).

I valori ottenuti per la parete Y04 sono:

$$\tau_{0,PT}^* = 0.0797 \text{ MPa}$$

$$\tau_{0,P1}^* = 0.0268 \text{ MPa}$$

Quindi, è possibile procedere alla verifica della resistenza per i due meccanismi in modo separato, considerando la tensione più sfavorevole.

La tensione tangenziale massima di progetto per il meccanismo di scorrimento delle lamelle è calcolata come il doppio della tensione ideale:

$$\begin{aligned} \tau_{v,d,PT} &= 2 \cdot \tau_{0,PT}^* \leq f_{v,d,XLAM} \\ 0.1594 \text{ MPa} &\leq 2.21 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Il secondo meccanismo riguarda la resistenza torsionale dei singoli nodi di incollaggio. La tensione di progetto è verificata se:

$$\begin{aligned} \tau_{T,d,PT} &= 3 \cdot \tau_{0,PT}^* \cdot \frac{\min(t_A^*, t_B^*)}{a} \leq f_{T,d,XLAM} \\ 0.0005 \text{ MPa} &\leq 0.61 \text{ MPa} \end{aligned}$$

La verifica è stata estesa sistematicamente a tutti i setti portanti dell'edificio, sia al piano terra che al primo piano, come riportato nel dettaglio nell'Allegato F (cfr. C.10).

I risultati confermano che lo spessore dei pannelli e la qualità dell'incollaggio garantiscono la totale integrità strutturale sotto le spinte del vento previste dal CTE.

7.5.6.2 Verifica dei carichi assiali

La valutazione della sicurezza dei setti verticali soggetti a compressione richiede un'analisi dettagliata della stratigrafia del pannello XLAM. La distribuzione delle tensioni interne deve riflettere la natura ortotropa del materiale. Nel calcolo strutturale, a causa della marcata differenza tra il modulo elastico degli strati disposti parallelamente alla sollecitazione e quelli trasversali, si

adotta un approccio cautelativo che considera reagenti solo gli strati con fibre orientate nella direzione del carico, trascurando il contributo degli strati ortogonali.

Di seguito, viene illustrata la procedura analitica di verifica applicata alla parete Y04, assunta come caso studio rappresentativo.

La geometria resistente è definita dalla "sezione efficace" (A_y). Tale superficie è calcolata come la somma delle aree delle lamelle longitudinali lungo lo sviluppo della parete.

Sulla base della stratigrafia del pannello (5 strati), gli spessori degli strati orientati in direzione y sono pari a $t_1 = 30 \text{ mm}$, $t_3 = 40 \text{ mm}$, $t_5 = 30 \text{ mm}$. La superficie efficace risulta quindi:

$$A_y = \sum t_{iy} \cdot l = (30 + 40 + 30) \text{ mm} \cdot 14780 \text{ mm} = 1478000 \text{ mm}^2$$

Per calcolare A_y , si sommano gli spessori degli strati che hanno le fibre orientate parallelamente all'asse y; questi sono "strati portanti", ovvero quelli che assorbono lo sforzo normale.

L'azione assiale di progetto alla base della parete N_{Ed} , derivata dalle combinazioni di carico allo Stato Limite Ultimo (SLU) per la sezione più sollecitata (P1-3, ovvero la sezione alla base della parete Y04 al piano terra PT), è pari a 262.62 kN.

La tensione di compressione agente $\sigma_{y,c,d}$ è determinata dal rapporto tra lo sforzo normale e l'area efficace precedentemente individuata:

$$\sigma_{y,c,d} = \frac{N_{Ed}}{A_y} = \frac{262.62 \cdot 10^3 \text{ N}}{1478000 \text{ mm}^2} = 0.18 \text{ MPa}$$

La validazione strutturale del setto Y04 è stata completata confrontando le tensioni indotte dalle combinazioni di carico SLU con le resistenze di progetto del materiale XLAM. Le verifiche sono state estese sia alla condizione di compressione parallela alla fibra, sia alla condizione di trazione, al fine di coprire tutte le possibili sollecitazioni derivanti dalle combinazioni di carico, incluse quelle indotte da eventuali effetti di ribaltamento.

$$\sigma_{y,c,d} = 0.18 \text{ MPa} \leq f_{c,d,XLAM} = 11.59 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y,c,d} = 0.18 \text{ MPa} \leq f_{t,d,XLAM} = 7.72 \text{ MPa}$$

Per una completa caratterizzazione della risposta strutturale del pannello XLAM, la medesima procedura di calcolo è stata applicata alla sezione orientata nella direzione secondaria (direzione x rispetto al piano locale del setto). In questa configurazione, la capacità portante è affidata esclusivamente agli strati 2 e 4, le cui fibre risultano ortogonali a quelle degli strati superficiali.

Per la parete Y04, la superficie efficace A_x è stata determinata sommando gli spessori delle lamelle trasversali t_{ix} . Nel caso specifico, il pannello presenta due strati interni da 20 mm ciascuno, portando al seguente calcolo della sezione resistente:

$$A_x = \sum t_{ix} \cdot l = (20 + 20)mm \cdot 14780 mm = 591200 mm^2$$

Nonostante la sezione ridotta rispetto alla direzione principale, le tensioni agenti derivanti dai carichi verticali e dalle azioni del vento risultano ampiamente sostenibili. Assumendo lo sforzo normale di progetto N_{Ed} , si ottiene una tensione agente $\sigma_{x,c,d}$ pari a:

$$\sigma_{x,c,d} = \frac{N_{Ed}}{A_x} = \frac{262.62 \cdot 10^3 N}{591200 mm^2} = 0.05 MPa$$

I risultati del confronto con le resistenze di progetto, sia a compressione sia a trazione, confermano la sicurezza dell'elemento:

$$\sigma_{x,c,d} = 0.05 MPa \leq f_{c,d,XLAM} = 11.59 MPa$$

$$\sigma_{x,c,d} = 0.05 MPa \leq f_{t,d,XLAM} = 7.72 MPa$$

In conclusione, la parete Y04 risulta pienamente verificata in entrambe le direzioni di orditura delle fibre. L'analisi degli strati 2 e 4 dimostra che, sebbene la funzione primaria di tali lamelle sia quella di garantire la rigidità torsionale e il collegamento tra gli strati portanti, esse possiedono una riserva di resistenza sufficiente a contribuire alla stabilità globale del setto sotto l'azione dei carichi gravitazionali e delle spinte orizzontali.

L'analisi estesa a tutti i setti portanti dell'edificio, riportata integralmente nell'Allegato G (cfr. C.10), conferma che il dimensionamento adottato garantisce la stabilità strutturale sotto le azioni verticali previste, mantenendo tassi di sfruttamento del materiale estremamente contenuti.

7.5.6.3 Verifica a pressoflessione nel piano

Diversamente dalla compressione pura, la pressoflessione tiene conto della contemporanea azione dello sforzo normale (N_{Ed}), derivante dai carichi gravitazionali permanenti e accidentali, e del momento flettente (M_{Ed}), generato principalmente dalle azioni trasversali come il vento o dalle eccentricità di carico involontarie.

In un pannello XLAM, la resistenza a questa sollecitazione combinata è affidata esclusivamente agli strati le cui fibre sono orientate parallelamente alla direzione del carico verticale (solitamente gli strati dispari 1, 3 e 5). Gli strati trasversali, pur non contribuendo direttamente alla resistenza

flessionale, garantiscono il collegamento meccanico e la stabilità locale, impedendo fenomeni di instabilità prematura delle lamelle portanti.

Il criterio di resistenza adottato segue le indicazioni delle normative tecniche, verificando che la tensione massima combinata non superi la capacità resistente del materiale. La formula di interazione utilizzata è:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

Dove:

- $\sigma_{c,0,d}$: è la tensione di compressione parallela alla fibratura, calcolata sulla sezione efficace composta dagli strati verticali;
- $\sigma_{m,d}$: è la tensione di flessione indotta dal momento flettente fuori piano;
- $f_{c,0,d}$ e $f_{m,d}$: sono le resistenze di progetto a compressione e flessione, corrette mediante il coefficiente k_m per tenere conto della durata del carico e della classe di servizio.

Per la verifica della parete Y04, si è proceduto alla determinazione delle proprietà inerziali della sezione ideale, considerando uno spessore efficace pari alla somma degli spessori degli strati verticali:

$$t_{iy} = t_0^* + t_0^* + t_0^* = (30 + 40 + 30) \text{ mm} = 100 \text{ mm}$$

Il momento d'inerzia J e il modulo di resistenza W sono calcolati come segue:

$$J = \frac{t_{iy} \cdot l^3}{12} = 2.69 \cdot 10^{13} \text{ mm}^4$$

$$W = J \cdot \frac{2}{l} = 3.64 \cdot 10^9 \text{ mm}^3$$

Per la sezione P1-3, si determinano le tensioni di progetto:

1. Tensione di compressione parallela:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} = \frac{262.62 \cdot 10^3 \text{ N}}{(100 \text{ mm} \cdot 14780 \text{ mm})} = 0.18 \text{ MPa}$$

2. Tensione di flessione:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{Ed}}{W} = \frac{103.69 \cdot 10^6 \text{ Nmm}}{3.64 \cdot 10^9 \text{ mm}^3} = 0.04 \text{ MPa}$$

Le resistenze del materiale sono:

Riqualficazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya, (Castilla-La Mancha, Spagna)

- Resistenza a compressione di progetto: $f_{c,0,d} = 11.59 \text{ MPa}$;
- Resistenza a flessione di progetto: $f_{m,d} = 14.57 \text{ MPa}$.

La verifica viene eseguita applicando la formula di interazione prevista dall'Eurocodice 5. Dato che la parete è soggetta a possibili instabilità per carico critico, la formula mette in relazione i rapporti di sfruttamento quadratici per la compressione e lineari per la flessione:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

$$0.000235 + 0.001837 \leq 1$$

$$0.002072 \leq 1$$

Il valore di 0.002072 (pari allo 0.2072% della capacità portante) indica che la parete lavora in un regime di sforzo estremamente contenuto.

- Il termine pari a 0.000235, evidenzia come lo sforzo normale incida minimamente sulla stabilità globale;
- Il termine relativo alla flessione, 0.001837, pur essendo superiore a quello di compressione, conferma l'ampia rigidità del pannello da 140 mm nei confronti delle spinte orizzontali.

La verifica è stata condotta per tutte le pareti portanti della struttura, risultando verificate. I calcoli svolti sono contenuti nell'Allegato H (cfr. C.10).

7.5.6.4 Verifica a pressoflessione fuori piano

In prossimità degli appoggi delle pareti, la trasmissione dei carichi verticali può generare fenomeni di schiacciamento ortogonale alla fibratura. Tale condizione è critica per i pannelli in CLT, in quanto la resistenza a compressione del legno perpendicolarmente alle fibre è significativamente inferiore rispetto a quella parallela.

Affinché la verifica risulti soddisfatta, la tensione sollecitante di progetto deve essere inferiore o uguale alla resistenza di progetto del materiale, secondo la relazione:

$$\sigma_{c,90,d} \leq f_{c,90,d}$$

Dove la tensione sollecitante $\sigma_{c,90,d}$ è calcolata come:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_{Ed}}{A_{rif}}$$

- N_{Ed} : è lo sforzo normale di progetto agente alla base della parete (o nel punto di appoggio considerato);
- A_{rif} : è l'area di riferimento dell'impronta di carico. Nel caso di pareti in CLT, questa corrisponde generalmente all'area di contatto tra il pannello e l'elemento di appoggio;
- $f_{c,90,d}$: è la resistenza di progetto a compressione ortogonale, calcolata applicando i coefficienti correttivi alla resistenza caratteristica $f_{c,90,k}$ del pannello.

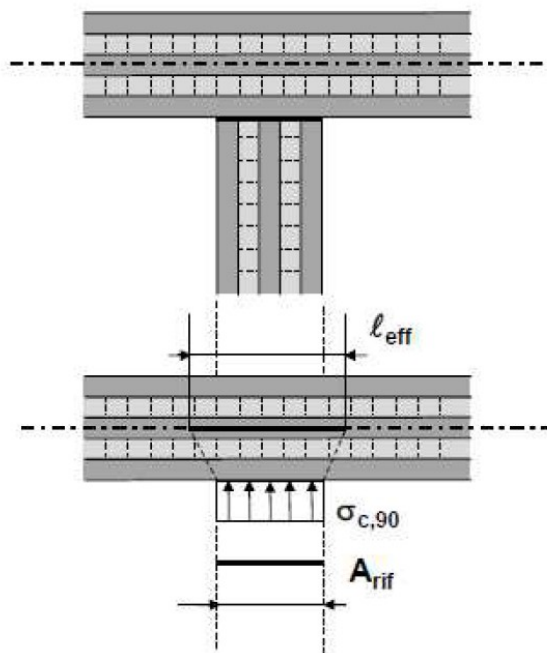


Figura 66: Compressione perpendicolare alla fibratura agli appoggi sezione a 5 strati

Per la parete Y04, si procede alla verifica della pressione trasversale considerando il carico verticale di progetto e la superficie di impronta all'appoggio.

Dall'analisi dei carichi e dalle proprietà geometriche della sezione P1-3, si ricavano i seguenti valori:

- Sforzo normale di progetto: $N_{Ed} = 262.62 \text{ kN}$;
- Lunghezza della parete: $a = 14780 \text{ mm}$;
- Stratigrafia: pannello da 140 mm (30+20+40+20+30).

L'area di riferimento viene calcolata come:

$$A_{rif} = a \cdot (t_0^* + t_{90}^* + t_0^* + t_{90}^* + t_0^*) = 2069200 \text{ mm}^2$$

Può essere ora calcolata la tensione sollecitante:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_{Ed}}{A_{rif}} = \frac{262.62 \cdot 10^3 \text{ N}}{2069200 \text{ mm}^2} = 0.127 \text{ MPa}$$

La verifica risulta soddisfatta:

$$\sigma_{c,90,d} \leq f_{c,90,d}$$
$$0.127 \text{ MPa} < 1.379 \text{ MPa}$$

La medesima verifica viene ora condotta considerando nell'area di riferimento la somma degli strati 2,3 e 4.

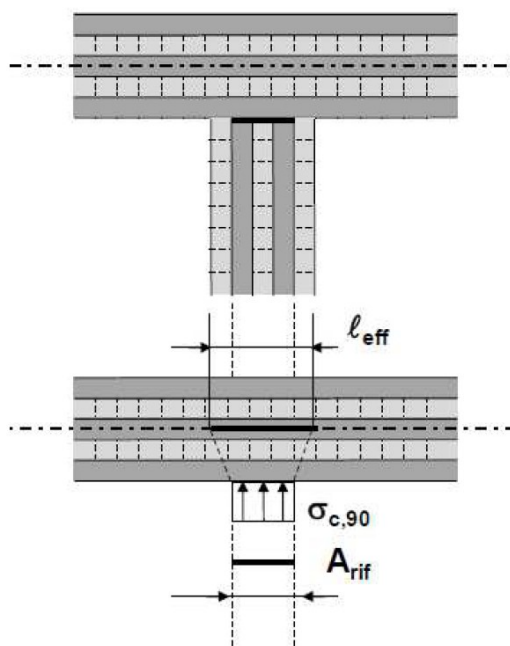


Figura 67: Compressione perpendicolare alla fibratura agli appoggi sezione a 3 strati

La scelta di effettuare una seconda verifica su un'area ridotta, limitata agli strati centrali, è motivata dalla natura meccanica del pannello CLT e dalle modalità di contatto all'appoggio:

- Diffusione del carico: come mostrato nella Figura 67, il carico verticale non si distribuisce immediatamente su tutta la larghezza del pannello, ma si diffonde con un certo angolo partendo dagli strati verticali esterni verso l'interno. Considerare solo gli strati centrali (2, 3 e 4) rappresenta una condizione cautelativa in cui si assume che gli strati esterni (1 e 5) non partecipino pienamente alla resistenza allo schiacciamento all'interfaccia con l'appoggio;
- Contributo degli strati trasversali: sebbene gli strati 2 e 4 abbiano fibre ortogonali al carico (quindi meno rigide), essi fungono da nucleo del pannello; verificare questa porzione centrale garantisce che, anche in caso di un parziale distacco o minore efficacia

degli strati superficiali (dovuta a tolleranze di posa o degrado localizzato), il cuore del pannello sia in grado di sopportare la pressione senza superare $f_{c,90,d}$.

L'area di riferimento viene calcolata come:

$$A_{rif} = a \cdot (t_{90}^* + t_0^* + t_{90}^*) = 1182400 \text{ mm}^2$$

Può essere ora calcolata la tensione sollecitante:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_{Ed}}{A_{rif}} = \frac{262.62 \cdot 10^3 \text{ N}}{1182400 \text{ mm}^2} = 0.222 \text{ MPa}$$

La verifica risulta soddisfatta:

$$\begin{aligned} \sigma_{c,90,d} &\leq f_{c,90,d} \\ 0.222 \text{ MPa} &< 1.379 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Le medesime verifiche sono state condotte con esito positivo per tutte le restanti pareti del complesso. Le relative tabelle di calcolo, che attestano il rispetto dei limiti normativi per ogni sezione, sono contenute nell'Allegato I (cfr. C.10).

7.5.6.5 Verifica della stabilità

Le verifiche di instabilità per le pareti in CLT sono state condotte in conformità al paragrafo §6.3.2 della norma UNI EN 1995-1-1 (Eurocodice 5). L'analisi considera un tratto di parete di lunghezza unitaria come un pilastro soggetto a sbandamento nella direzione perpendicolare al proprio piano medio.

La condizione di sicurezza da soddisfare, che tiene conto dell'interazione tra sforzo normale e momento flettente fuori piano, è definita dalla seguente espressione:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

$$0.0175 \leq 1$$

Dove k_c è il coefficiente di instabilità (o sbandamento), che riduce la resistenza a compressione del legno per tenere conto del rischio di sbandamento laterale (buckling).

Per la parete Y04 sono stati determinati i parametri di snellezza necessari al calcolo del coefficiente k_c .

- Snellezza: $\lambda_y = 0.01$;
- Snellezza relativa: $\lambda_{rel,y} = 0.00$;

- Coefficiente di sbandamento: $k_c = 1.03$

L'ottenimento di un valore di k_c superiore a 1 (o prossimo all'unità) indica che la parete ha una snellezza trascurabile rispetto alla sua altezza e sezione; di conseguenza, non vi è un rischio significativo di instabilità per carico critico.

Tutte le pareti risultano verificate e i calcoli sono riportati nell'Allegato L (cfr. C.10).

7.5.7 Forze statiche equivalenti sismiche

Data l'elevata rigidezza del sistema costruttivo in XLAM, i periodi fondamentali di vibrazione nelle due direzioni principali sono stati calcolati come:

- Direzione x: $T_{1x} = 0.28$ s;
- Direzione y: $T_{1y} = 0.16$ s.

Entrambi i valori ricadono nel tratto di massima amplificazione dello spettro di risposta (plateau), dove l'accelerazione spettrale di progetto risulta:

$$S_d(T_1) = 0.035g$$

Il taglio alla base totale F_h è stato determinato considerando il peso sismico complessivo della struttura, pari a $W = 1243.37$ kN. Applicando un fattore di struttura $d = 3$ (coerente con una classe di duttilità media per edifici in XLAM), si ottiene:

$$F_h = \lambda \cdot S_d(T_1) \cdot W = 1.0 \cdot 0.052 \cdot 1243.37 = 43.10 \text{ kN}$$

Il taglio alla base è stato distribuito lungo l'altezza dell'edificio proporzionalmente alle quote z_i e ai pesi W_i di ciascun impalcato.

Tabella 60: Forze sismiche all'i-esimo impalcato, direzione x e y, su Excel

F _{tx} [kN]	F _{lx} [kN]	F _{x tot} [kN]
17.1	26.0	43.1

F _{ty} [kN]	F _{ly} [kN]	F _{y tot} [kN]
17.1	26.0	43.1

7.5.8 Eccentricità di piano

Al fine di considerare gli effetti torsionali indotti dalla componente orizzontale dell'azione sismica, è stata determinata la distanza tra il centro di massa (CM) e il centro di rigidezza (CR) per ogni impalcato.

Dall'analisi geometrica e meccanica delle pareti in XLAM, sono stati ottenuti i seguenti valori:

- Eccentricità strutturale in direzione x: $e_x = 0.01 \text{ m}$
- Eccentricità strutturale in direzione y: $e_y = 1.60 \text{ m}$

Mentre l'edificio presenta una distribuzione delle rigidzze quasi perfettamente simmetrica rispetto all'asse X, si riscontra una significativa eccentricità in direzione Y. Questo è giustificato avendo pareti molto lunghe e rigide concentrate in direzione Y.

Per tenere conto delle asimmetrie strutturali e delle incertezze nella distribuzione dei carichi, sono state definite le eccentricità totali di progetto. Tali valori governano l'insorgere di momenti torcenti di piano durante l'evento sismico.

$$e_{ax} = 0.05 \cdot L_x = 0.05 \cdot 6.98 \text{ m} = 0.35 \text{ m}$$

$$e_{ay} = 0.05 \cdot L_y = 0.05 \cdot 14.78 \text{ m} = 0.74 \text{ m}$$

L'azione sismica è stata quindi applicata in punti opportunamente traslati rispetto al CM per massimizzare gli effetti torsionali su ogni singola parete.

Viene riportato il calcolo delle eccentricità totali di progetto, che includono sia la sfasatura reale tra masse e rigidzze sia l'incertezza normativa (quella accidentale):

$$e_{tot} = e_{statica} \pm e_{acc}$$

Tabella 61: Eccentricità di progetto, direzione x e y, su Excel

	(+ e _{ax})	(- e _{ay})	
e _{x fin}	0.36	-0.34	[m]
e _{y fin}	2.34	0.86	[m]

L'analisi strutturale deve considerare l'involuppo di queste condizioni per garantire che ogni parete in XLAM sia verificata per lo scenario torsionale più gravoso.

7.5.9 Sollecitazioni sismiche e combinazioni di carico

Analogamente a quanto fatto per la distribuzione delle azioni dovute al vento, anche per il caso sismico si è utilizzato il metodo di Benjamin al fine di determinare la quota di taglio assorbita da ciascun setto murario.

Per rappresentare in maniera esaustiva gli effetti dell'azione sismica sull'edificio, si sono considerate tutte le direzioni e i versi possibili, adattando di volta in volta le forze in funzione dell'orientamento analizzato.

In accordo con la norma spagnola NCSE-02 (o Eurocodice 8 con annesso nazionale spagnolo), l'azione sismica viene applicata integralmente (100%) lungo una direzione principale, mentre nella direzione ortogonale si assume contemporaneamente una componente ridotta pari al 30%. Questo approccio porta a otto diverse combinazioni di carico, che vengono poi utilizzate per le verifiche agli Stati Limite di Salvaguardia della Vita (SLV) e agli Stati Limite di Danno (SLD):

$$\begin{aligned}
 &G_1 + G_2 + 0.3 \cdot Q + 1 \cdot e_x + 0.3 \cdot e_y \\
 &G_1 + G_2 + 0.3 \cdot Q + 1 \cdot e_x - 0.3 \cdot e_y \\
 &G_1 + G_2 + 0.3 \cdot Q - 1 \cdot e_x + 0.3 \cdot e_y \\
 &G_1 + G_2 + 0.3 \cdot Q - 1 \cdot e_x - 0.3 \cdot e_y \\
 &G_1 + G_2 + 0.3 \cdot Q + 0.3 \cdot e_x + 1 \cdot e_y \\
 &G_1 + G_2 + 0.3 \cdot Q + 0.3 \cdot e_x - 1 \cdot e_y \\
 &G_1 + G_2 + 0.3 \cdot Q - 0.3 \cdot e_x + 1 \cdot e_y \\
 &G_1 + G_2 + 0.3 \cdot Q - 0.3 \cdot e_x - 1 \cdot e_y
 \end{aligned}$$

È necessario tenere in considerazione anche la variabilità spaziale del moto sismico e le incertezze a essa collegate.

Si considerano le quattro differenti posizioni del centro di massa rispetto al centro di rigidità ricavate precedentemente (cfr. Tabella 61). Poiché le forze d'inerzia generate dal sisma si applicano proprio al centro di massa, a ciascuna posizione corrispondono le otto combinazioni sismiche già previste per le due direzioni principali. Ne consegue che il numero totale di combinazioni da considerare risulta pari a 32, sia per lo SLV sia per lo SLD.

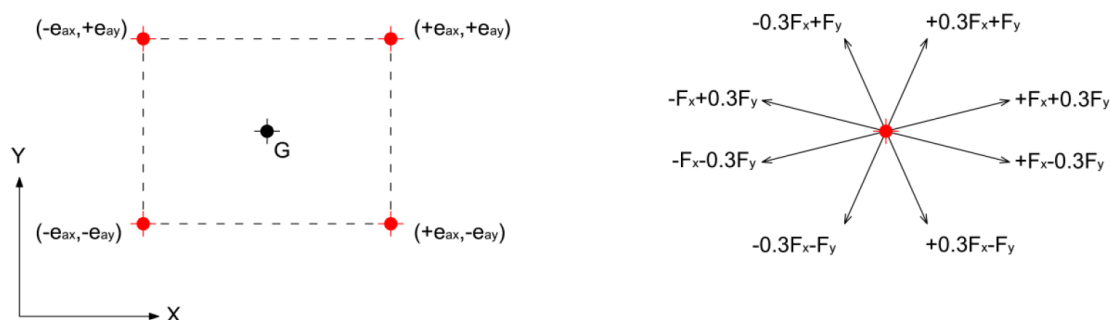


Figura 68: Posizioni del centro di massa rispetto al centro di rigidità e le otto combinazioni sismiche

La forza tagliante e il momento flettente su ogni singola parete sono stati calcolati considerando due contributi principali:

1. Contributo traslazionale: la quota parte di forza sismica che la parete assorbe in base alla

sua rigidezza traslazionale rispetto alla rigidezza totale dell'impalcato;

2. Contributo torsionale: l'incremento (o decremento) di forza dovuto al momento torcente di piano, causato dal disallineamento tra il punto di applicazione della forza (centro di massa traslato) e il centro di rigidezza (CR).

Disponendo dei dati necessari, si procede al calcolo delle sollecitazioni di taglio e dei momenti flettenti nelle pareti di entrambi i piani.

Per l'azione del taglio dei muri al piano terra si utilizzano:

$$V_{xi} = \frac{K_{xi}}{\sum_i K_{xi}} \cdot F_x - \frac{K_{xi} \cdot (y_i - Y_R)}{K_{rot}} \cdot (-F_x \cdot e_{y,finale} + 0.3 \cdot F_y \cdot e_{x,finale})$$

$$V_{xi} = \frac{K_{xi}}{\sum_i K_{xi}} \cdot 0.3 \cdot F_x - \frac{K_{xi} \cdot (y_i - Y_R)}{K_{rot}} \cdot (-0.3 \cdot F_x \cdot e_{y,finale} + F_y \cdot e_{x,finale})$$

$$V_{yi} = \frac{K_{yi}}{\sum_i K_{yi}} \cdot 0.3 \cdot F_y - \frac{K_{yi} \cdot (x_i - X_R)}{K_{rot}} \cdot (-F_x \cdot e_{y,finale} + 0.3 \cdot F_y \cdot e_{x,finale})$$

$$V_{yi} = \frac{K_{yi}}{\sum_i K_{yi}} \cdot F_y - \frac{K_{yi} \cdot (x_i - X_R)}{K_{rot}} \cdot (-0.3 \cdot F_x \cdot e_{y,finale} + F_y \cdot e_{x,finale})$$

La ripartizione tiene conto della rigidezza torsionale globale dell'impalcato K_{rot} , calcolata come segue:

$$K_{rot} = \sum K_{xi} \cdot (y_i - Y_R)^2 + \sum K_{yi} \cdot (x_i - X_R)^2 = 1.94 \cdot 10^6 \text{ kNm}$$

Questa grandezza permette di determinare l'incremento di taglio su ogni parete dovuto alla rotazione d'impalcato indotta dalle eccentricità di progetto.

Per l'azione del taglio del piano primo, invece, si utilizzano:

$$V_{i,x,P1} = V_{i,x,PT} \cdot \frac{F_{x,P1}}{V_{tot,x}}$$

$$V_{i,y,P1} = V_{i,y,PT} \cdot \frac{F_{y,P1}}{V_{tot,y}}$$

Si riportano anche le formulazioni utilizzate per il calcolo dei momenti rispettivamente del piano terra e del piano primo:

$$M_{i,x,PT} = V_{i,x,P1} \cdot Z_{P1} + (V_{i,x,PT} - V_{i,x,P1}) \cdot Z_{PT}$$

$$M_{i,y,PT} = V_{i,y,P1} \cdot Z_{P1} + (V_{i,y,PT} - V_{i,y,P1}) \cdot Z_{PT}$$

$$M_{i,x,P1} = V_{i,x,P1} \cdot (Z_{P1} - Z_{PT})$$

$$M_{i,y,P1} = V_{i,y,P1} \cdot (Z_{P1} - Z_{PT})$$

L'analisi è stata condotta considerando sistematicamente tutte le combinazioni di carico previste dalla normativa, includendo gli effetti delle eccentricità accidentali e della reversibilità dell'azione. I risultati dettagliati relativi a tali sollecitazioni gravanti su ogni parete in direzione x e y sono riportati integralmente nell'Allegato M (cfr. C.10).

In merito alle verifiche degli elementi strutturali e delle connessioni meccaniche, si è scelto di procedere assumendo come azione orizzontale di progetto quella derivante dal vento (combinazione SLU), omettendo le verifiche puntuali per l'azione sismica (SLV).

Dall'analisi comparativa tra le azioni orizzontali di progetto, si osserva che l'azione del vento risulta ampiamente dominante rispetto all'azione sismica. In particolare, il taglio alla base totale per il vento (combo B-C) è pari a 95.03 kN, mentre il taglio alla base sismico (SLV) si attesta a 27.38 kN. Vengono riportate le tabelle riassuntive:

Tabella 62: Azioni orizzontali dovute al vento, rispettivamente per la combo A e combo B-C, su Excel

AZIONE DEL VENTO						
Piano	Fx [kN]	Fy [kN]		Piano	Fx [kN]	Fy [kN]
Terra	17.88	37.86		Terra	29.80	63.10
1	9.05	19.15		1	15.08	31.92
Totale				Totale		
26.93				44.88		
57.02				95.03		

Tabella 63: Azioni orizzontali dovute al sisma, combo S, su Excel

AZIONE DEL SISMA		
Piano	Fx [kN]	Fy [kN]
Terra	9.94	9.94
1	17.44	17.44
Totale		27.38
		27.38

Poiché il vento sollecita la struttura con un'intensità oltre tre volte superiore a quella del sisma, il dimensionamento delle connessioni e degli elementi resistenti è stato condotto sulla base delle combinazioni del vento. Tale approccio garantisce una robustezza strutturale tale da ritenere le verifiche sismiche implicitamente soddisfatte per sovrabbondanza di capacità resistente.

La capacità dissipativa della struttura è comunque garantita dall'adozione di dettagli costruttivi coerenti con la classe di duttilità media (DCM), assicurando un comportamento strutturale sicuro anche in presenza di azioni sismiche, nonostante queste risultino non determinanti ai fini del dimensionamento.

8. SISTEMI DI CONNESSIONE

8.1 Introduzione al comportamento strutturale delle connessioni

Nelle costruzioni in legno, la realizzazione di connessioni ad incastro non rappresenta la soluzione preferenziale; sebbene tale approccio sia perseguibile nel legno lamellare, esso viene solitamente evitato per i setti. Quando un solido presenta due dimensioni prevalenti rispetto allo spessore, risulta staticamente più efficace sfruttare la resistenza nel piano dell'elemento piuttosto che ricercare l'isostaticità mediante incastri alle estremità. Le strutture in XLAM, infatti, fondano il proprio rendimento sul comportamento scatolare, raggiungendo la massima efficienza attraverso la realizzazione di orizzontamenti molto rigidi.

In tale contesto, il ruolo delle connessioni diviene fondamentale per definire il comportamento statico e dinamico dell'intero organismo edilizio. A differenza delle strutture massive tradizionali (come il calcestruzzo gettato in opera), dove la continuità è garantita dalla natura stessa del materiale, le strutture in XLAM sono costituite da elementi bidimensionali discreti. La capacità dell'edificio di reagire come un'unità "scatolare" dipende, quindi, esclusivamente dall'efficacia dei collegamenti posti ai bordi dei pannelli.

All'interno del sistema CLT, le connessioni rappresentano i cosiddetti "punti molli": a fronte di un pannello estremamente rigido, le giunzioni hanno il compito di tenere uniti i volumi della struttura e di dissipare energia. Tali collegamenti assolvono prioritariamente il trasferimento degli sforzi di taglio e trazione, mentre le sollecitazioni di compressione sono affidate, nella maggior parte dei casi, al contatto diretto tra le superfici lignee. Questo meccanismo di trasferimento per contatto presuppone che le lavorazioni di bordo siano eseguite con precisione millimetrica.

8.2 Lavorazioni di bordo e configurazioni geometriche

I pannelli in XLAM, originariamente prodotti in formati rettangolari, sono sottoposti a successive fasi di taglio e finitura per assumere la configurazione geometrica finale. Tali lavorazioni vengono eseguite mediante frese integrate in macchine a controllo numerico (CNC), che consentono di declinare i bordi in numerose varianti.

Nella pratica cantieristica si prediligono geometrie che agevolino le operazioni di montaggio. Tra queste si distinguono:

- Taglio dritto: soluzione più semplice, dove i pannelli vengono accostati; spesso richiede l'impiego di una banchina di base o di piastre esterne per garantire l'allineamento;
- Scanalature per tavole coprigiunto, atte a ospitare elementi di collegamento intermedi;
- Tagli a mezzo legno, che permettono di creare superfici "in battuta".

Queste configurazioni sono finalizzate a garantire la complanarità dei pannelli, assicurando un allineamento preciso delle superfici. Al contrario, i tagli diagonali vengono generalmente evitati, sia per le difficoltà operative in fase di posa, sia per i limiti intrinseci di fattibilità dei macchinari.

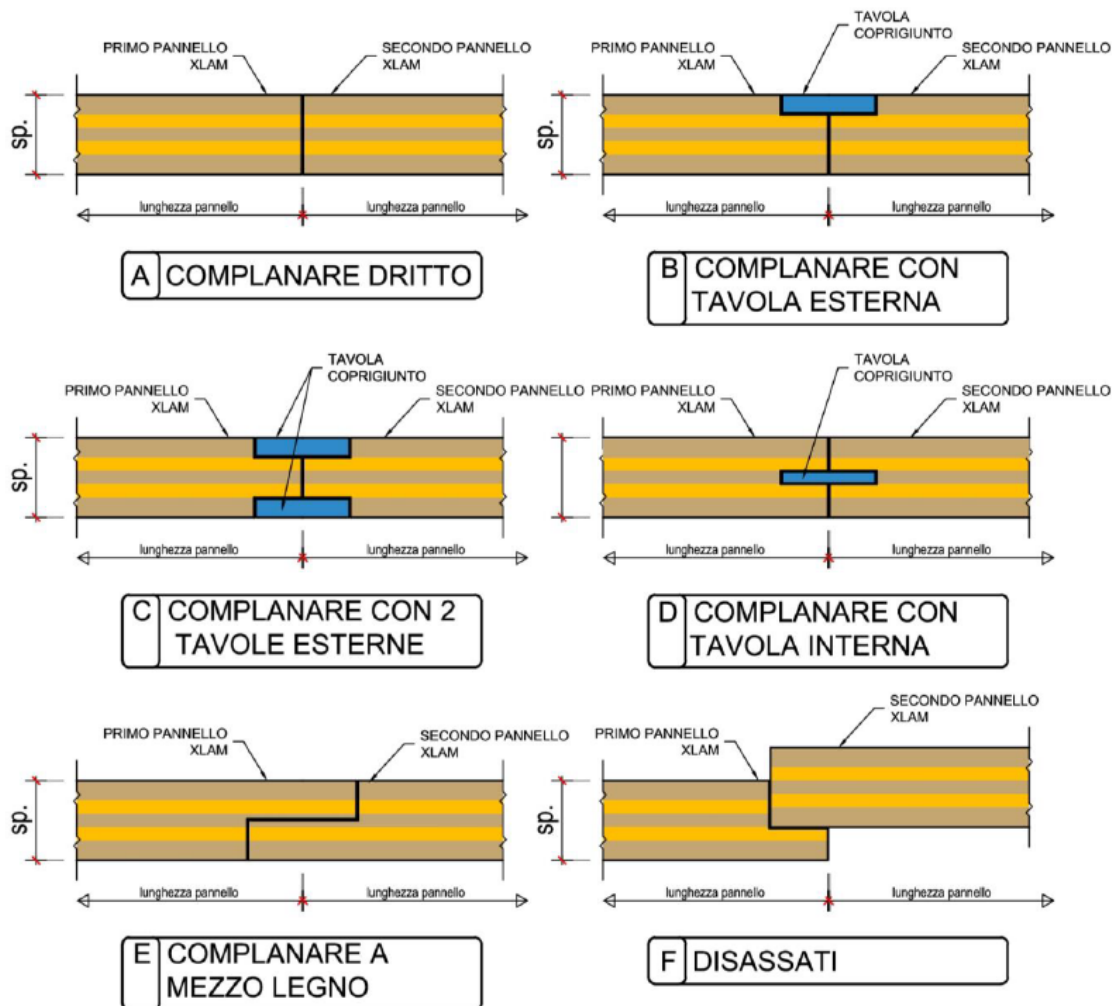


Figura 69: Tipiche lavorazioni di bordo dei pannelli XLAM

L'analisi delle connessioni d'angolo evidenzia come le soluzioni più diffuse prevedano superfici prive di scansi. Tuttavia, esistono applicazioni meno immediate che, pur richiedendo lavorazioni supplementari, offrono vantaggi in termini di velocità di assemblaggio che vanno valutati in fase progettuale.

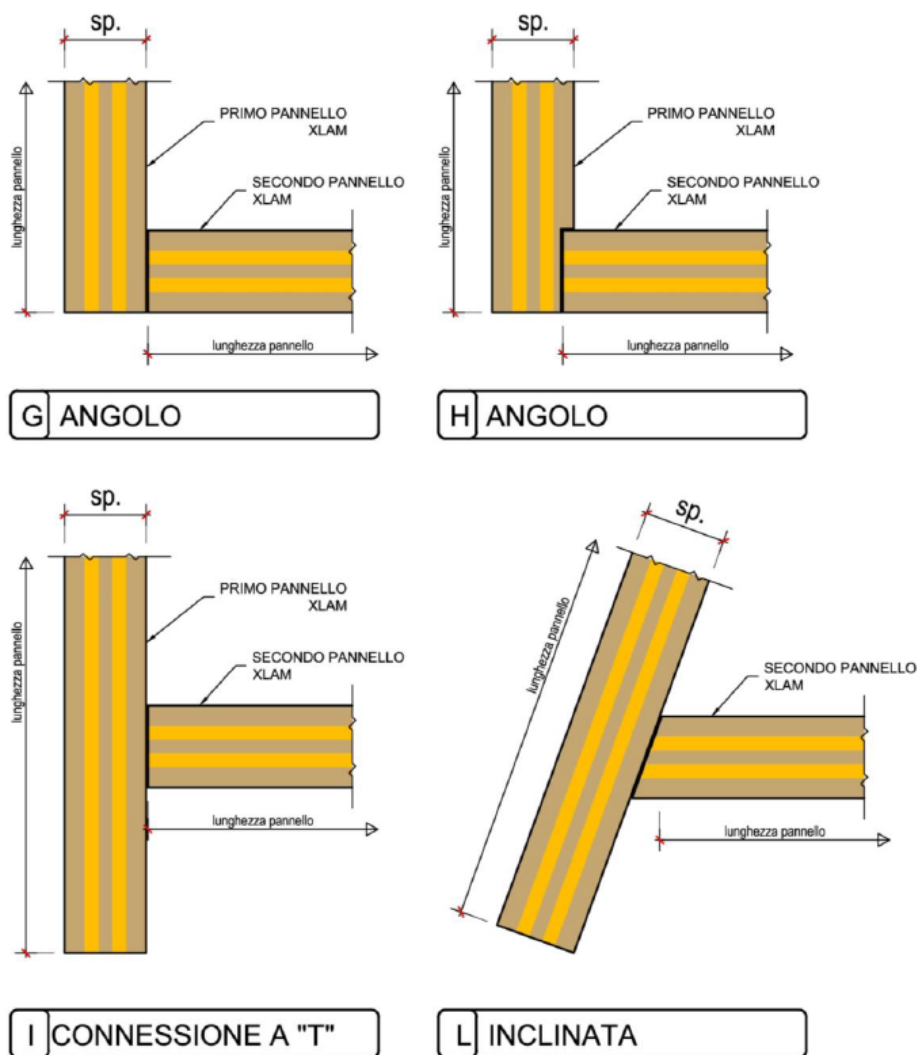


Figura 70: Lavorazioni d'angolo tra setti di parete

Per quanto concerne l'interfaccia tra solai e setti, si riscontrano differenti approcci costruttivi:

- Interposizione di banchine a giacitura orizzontale tra gli elementi;
- Contatto diretto tra setto e solaio.

Sotto il profilo della discesa dei carichi gravitazionali, la prosecuzione del solaio oltre il setto verticale risulta strutturalmente preferibile. In tale configurazione, la trasmissione degli sforzi nell'area di contatto assume un andamento triangolare, con il picco di pressione localizzato in corrispondenza del lato interno; la sporgenza del pannello orizzontale consente quindi di ridurre l'eccentricità del carico rispetto all'asse neutro della parete. Si segnala, infine, la crescente diffusione dello schema statico che prevede il solaio appeso al setto verticale.

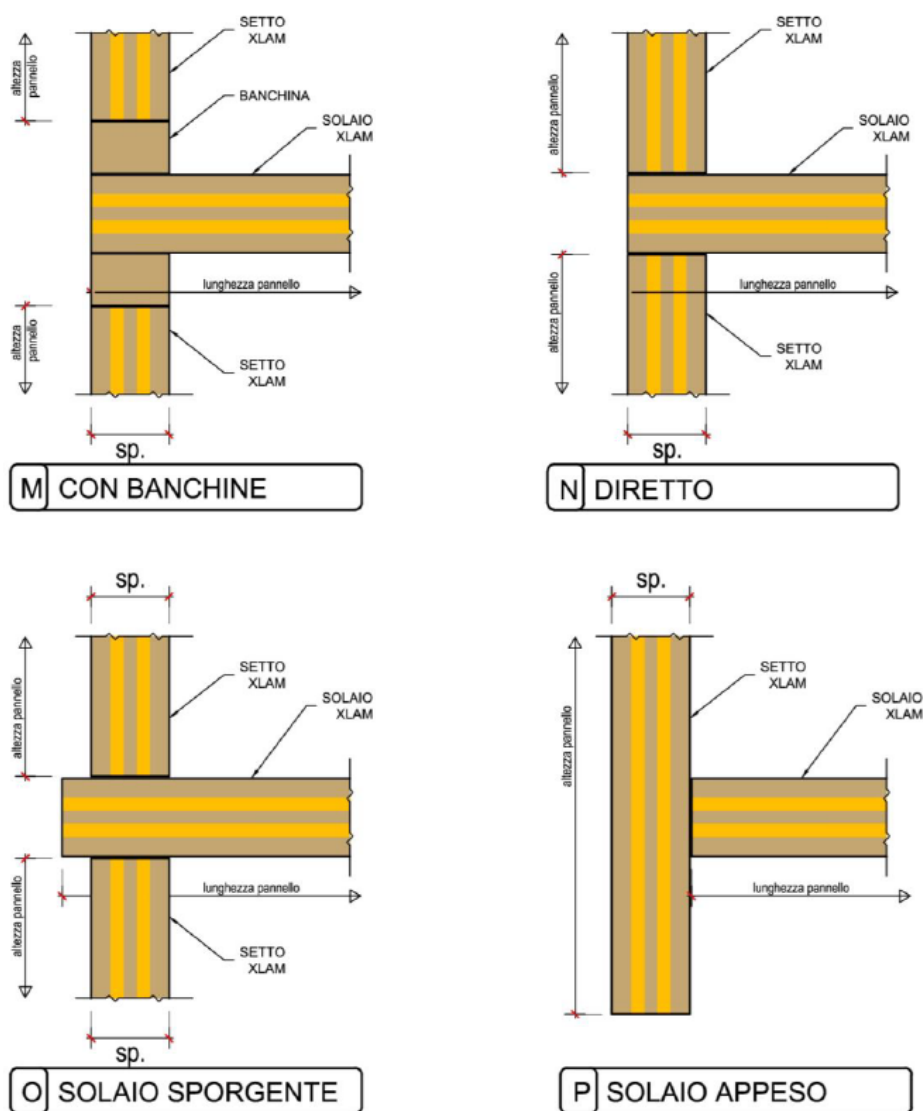


Figura 71: Zona di interfaccia tra solai e setti

8.3 Tipologie di collegamento in funzione della sollecitazione

La progettazione delle connessioni nel sistema XLAM deve necessariamente differenziare i dispositivi di fissaggio in base alla natura dello sforzo che sono chiamati ad assorbire. Tale distinzione assume un rilievo critico in zona sismica, dove la capacità di dissipazione energetica dell'intera struttura è affidata quasi esclusivamente alla plasticizzazione degli elementi metallici di collegamento, data la natura elasto-fragile del legno strutturale.

8.4 Collegamenti complanari e d'angolo

I collegamenti tra pannelli adiacenti giacenti sullo stesso piano (parete-parete o solaio-solaio) sono finalizzati a garantire la continuità della "lastra". Nelle giunzioni d'angolo (configurazioni a

"L" o a "T"), la connessione deve gestire il trasferimento di forze ortogonali tra i setti. Questo avviene frequentemente mediante l'impiego di viti a tutto filetto, la cui inclinazione specifica è studiata per massimizzare la resistenza combinata ad estrazione e taglio.

Le connessioni possono essere classificate in puntuali o diffuse, utilizzando elementi a gambo cilindrico (viti, chiodi, bulloni) o piastre metalliche

8.5 Sistemi di connessione a gambo cilindrico: viti e chiodi

Partendo dai sistemi più tradizionali, i chiodi e le viti rappresentano i connettori fondamentali, disponibili oggi in numerose varianti geometriche (punte, teste e filettature parziali o totali) le cui peculiarità meccaniche ne determinano l'idoneità allo specifico ruolo strutturale.



Figura 72: Alcuni chiodi e viti Rothoblaas

Un aspetto tecnico di rilievo nelle viti a filetto semplice riguarda la geometria della testa: una testa larga, rispetto a una standard, può incrementare la resistenza a taglio mediamente del 15% grazie all'attivazione del cosiddetto "effetto fune". L'impiego di una distribuzione diffusa di connettori di piccolo diametro lungo le interfacce permette di accedere a consistenti riserve di duttilità. Sotto azione sismica, la formazione di cicli di isteresi all'interno dei singoli connettori consente l'abbattimento delle forze d'inerzia, a patto di rispettare una corretta gerarchia delle resistenze che individui chiaramente le zone duttili rispetto a quelle fragili.

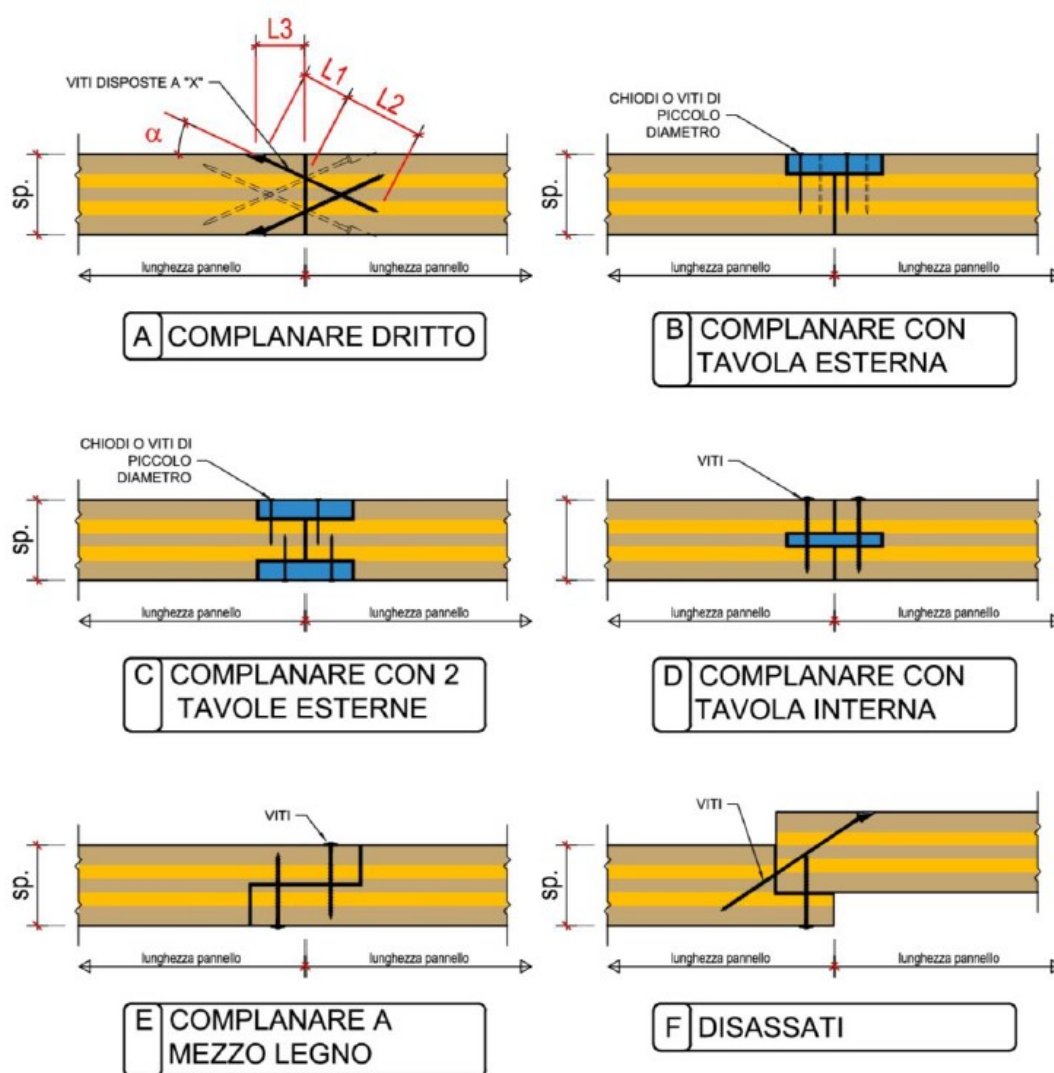


Figura 73: Connessioni con soli chiodi e viti su pannelli complanari

Osservando la Figura 73:

A – Collegamento **COMPLANARE DRITTO** (senza eccentricità): trasferisce bene il taglio, ma bisogna porre attenzione alla corretta posa delle viti, in particolar modo alla distanza della testa dal bordo e alla corretta angolatura di ingresso delle stesse;

B – Collegamento **COMPLANARE CON TAVOLA ESTERNA** (asimmetrico): il trasferimento delle sollecitazioni avviene solo su un lato; è comunque molto utilizzato, ma bisogna porre attenzione al corretto posizionamento dei chiodi ad aderenza migliorata, dovendo rispettare la distanza dai bordi e la loro muta distanza reciproca in funzione anche del tipo di materiale che funge da tavola coprigiunto. Inoltre, la tavola coprigiunto va verificata a taglio. In cantiere richiede maggiore attenzione ed è utile segnare prima della posa dove andranno infissi i chiodi;

C e D – Collegamento COMPLANARE CON TAVOLE (ESTERNE O INTERNE) (senza eccentricità): bisogna porre sempre attenzione alle distanze tra i connettori; inoltre, le tavole coprigiunto vanno verificate a taglio;

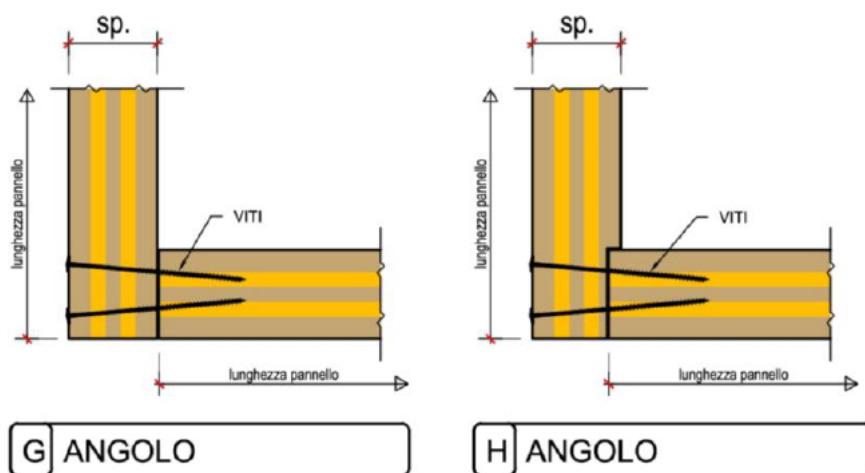
E – Collegamento COMPLANARE A MEZZO LEGNO (senza eccentricità): risulta necessario verificare la resistenza della sezione ridotta di pannello; vanno controllate le distanze tra le viti, la loro angolatura e la corretta posa in opera delle stesse;

F – Collegamento DISASSATO (asimmetrico): richiede una valutazione tanto più attenta tanto più sono alte le forze in gioco, con attenzione al posizionamento delle viti.

In tutti i casi la resistenza dei connettori deve essere valutata in funzione del materiale, dell'angolo di infissione α , della mutua distanza tra connettori e dello spessore degli strati attraversati; deve essere verificato, inoltre, che sia garantita la profondità minima di infissione della punta L_2 e la minima distanza dal bordo L_3 (Figura 73.a).

Per il calcolo della resistenza delle singole connessioni, le spaziature e le distanze minime si può far riferimento al CNR DT 206 R1/2018. Tuttavia, in molti casi l'ETA consente di derogare da interassi e spaziature minime da norma.

In generale, nel modello FEM non si tiene conto del disassamento delle connessioni rispetto al piano medio del pannello.



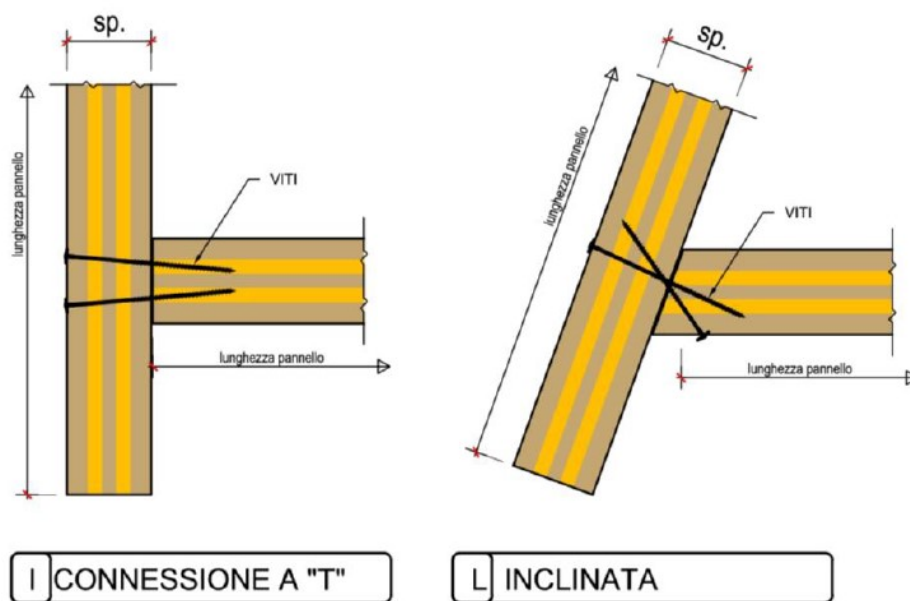


Figura 74: Connessioni con soli chiodi e viti per pannelli d'angolo

Nelle giunzioni ortogonali tra pannelli, le configurazioni denominate G, H, I e L identificano tipologie di collegamento sostanzialmente prive di eccentricità, caratterizzate da un'ottima capacità di trasferimento delle sollecitazioni di taglio. Anche in questi casi, l'efficienza meccanica dell'unione è subordinata alla precisione della posa in opera: particolare attenzione deve essere posta nel garantire la corretta distanza della testa del connettore dal bordo del pannello e nel rispettare l'angolatura di ingresso prevista in fase di progetto.

In tali nodi strutturali, i pannelli d'angolo possono essere soggetti a sollecitazioni di trazione che tendono a provocare l'allontanamento reciproco dei due setti. In questa specifica condizione, le medesime viti di collegamento possono essere dimensionate per assolvere a una doppia funzione, resistendo contemporaneamente a taglio e trazione.

Per la validazione strutturale di questi elementi sotto carico biassiale, è necessario procedere alla verifica combinata, facendo riferimento analitico alla formula 8.46 contenuta nel CNR DT 206 R1/2018, la quale disciplina l'interazione tra le diverse componenti di sollecitazione nei mezzi di unione a gambo cilindrico.

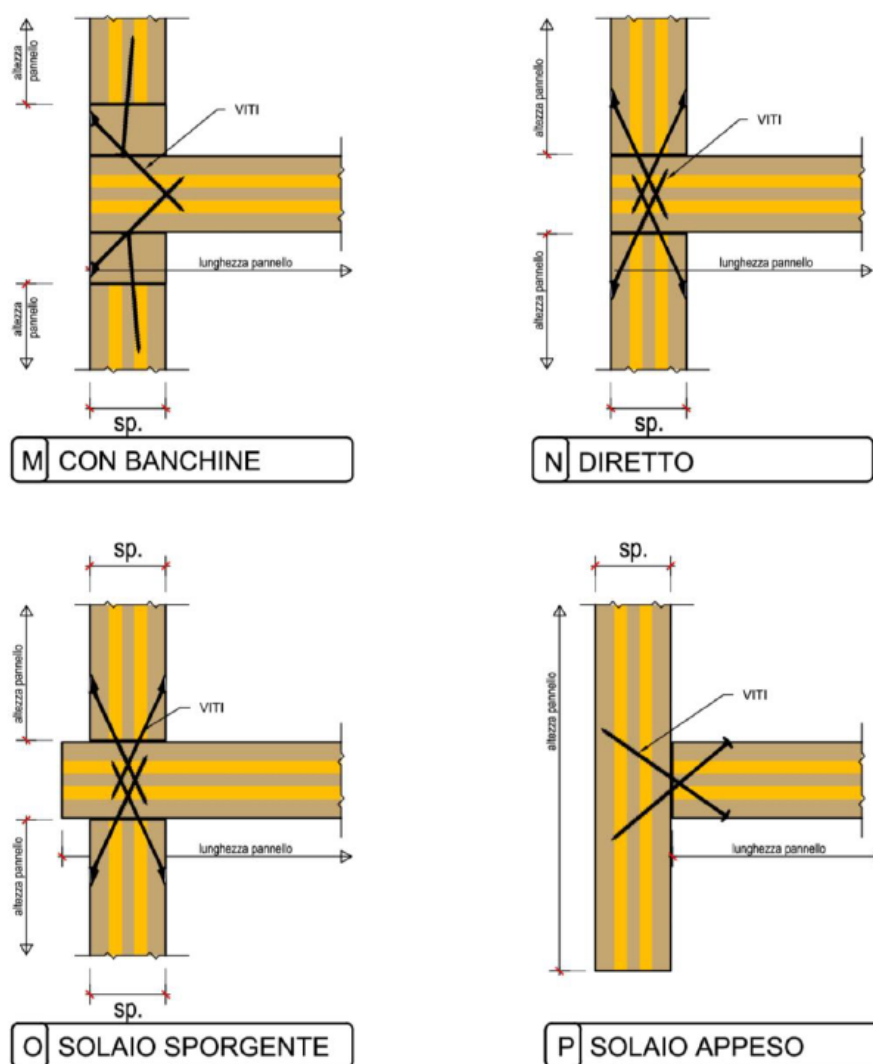


Figura 75: Connessioni con soli chiodi e viti per la zona di interfaccia tra solai e setti

Le configurazioni illustrate nella Figura 75 (M, N, O e P) descrivono collegamenti tra elementi orizzontali e verticali caratterizzati da un'assenza sostanziale di eccentricità, garantendo un'efficace trasmissione delle sollecitazioni di taglio. Anche in questi nodi, la corretta esecuzione tecnica è vincolata al rispetto delle distanze minime della testa del connettore dal bordo del pannello e alla precisione dell'angolo di inserimento delle viti. In tali contesti, mentre il taglio è assorbito dai connettori a gambo cilindrico, le azioni di trazione pura (sollevamento) vengono affidate a dispositivi meccanici specifici, comunemente denominati hold-down.

La scelta della tipologia di connessione deve essere necessariamente validata in funzione dell'accessibilità dei lati dei pannelli durante le fasi di montaggio. È fondamentale che il progettista valuti a priori la sequenza costruttiva per evitare l'adozione di giunzioni non realizzabili in opera.

Durante la fase di cantiere, l'impresa esecutrice potrebbe proporre l'impiego di sistemi di fissaggio (chiodi o viti) differenti da quelli previsti nel progetto originario. Tale evenienza può scaturire da:

- Difficoltà nel reperimento oggettivo del prodotto specifico;
- Logiche di ottimizzazione dei costi;
- Disponibilità limitata di attrezzature specifiche (chiodatrici) all'interno del parco macchine della ditta.

In tali circostanze, spetta al progettista e alla Direzione Lavori valutare la validità tecnica delle alternative proposte, verificandone la compatibilità con le prestazioni strutturali richieste.

Per garantire la conformità strutturale e la precisione geometrica, si raccomanda la tracciatura preventiva delle posizioni dei connettori direttamente sulla superficie del pannello XLAM, mediante l'utilizzo di matite o tracciatori a filo.

Una prassi operativa efficace consiste nel "puntare" preventivamente tutte le viti nelle sedi individuate, procedendo all'infissione completa e al serraggio finale solo in un secondo momento. Tale procedura permette di effettuare controlli intermedi, ad esempio da parte della Direzione Lavori, prima che la connessione diventi definitiva e non più ispezionabile.

8.6 Sistemi di connessione tramite piastre metalliche

L'evoluzione dei sistemi di giunzione nell'XLAM si avvale ampiamente dell'impiego di connettori metallici a piastra, distinguibili in base alla loro specifica funzione statica. Si possono individuare tre macrocategorie principali: dispositivi progettati esclusivamente per il taglio, sistemi dedicati al contrasto del sollevamento e, infine, le soluzioni cosiddette ibride, capaci di integrare una resistenza duale.

- Piastre per il trasferimento del taglio: queste componenti possono presentare una geometria piana o a sezione angolare ("a L"), ottimizzata per il collegamento di pannelli in configurazione complanare o disposti ortogonalmente (90°). Il loro impiego è finalizzato a contrastare le forze di scorrimento laterale tra gli elementi;
- Sistemi ibridi (taglio e sollevamento): questi dispositivi rappresentano un'evoluzione tecnica caratterizzata da connettori di dimensioni e capacità portanti superiori. Essi permettono una gestione integrata dei carichi, agendo sia come elementi di ritegno contro il ribaltamento sia come organi di trasmissione del taglio.

Riqualficazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya, (Castilla-La Mancha, Spagna)

Per contestualizzare l'ordine di grandezza delle prestazioni meccaniche di tali sistemi (basate sui valori di resistenza caratteristica dichiarati dai produttori), si possono citare alcuni standard di riferimento nel settore:

- Le piastre specificamente ottimizzate per il taglio raggiungono capacità caratteristiche dell'ordine di 28-42 kN;
- I sistemi ibridi (ad esempio, le serie *Titan*) mostrano capacità di resistenza sensibilmente più elevate, arrivando a supportare circa 100 kN in trazione e 60 kN in taglio.

È bene precisare che i suddetti valori rappresentano resistenze caratteristiche; la determinazione della capacità di progetto deve sempre essere condotta seguendo le metodologie di calcolo analitico normate, applicando i coefficienti parziali di sicurezza previsti per il materiale e per il collegamento.

TITAN PLATE T TIMBER
PIASTRE PER FORZE DI TAGLIO



A - PIASTRA PIANA

TITAN F
ANGOLARE PER FORZE DI TAGLIO



B - PIASTRA A "L"

TITAN V
ANGOLARE PER FORZE DI TAGLIO E TRAZIONE



C - PIASTRA A "L"

Figura 76: Alcune piastre a taglio e a taglio e sollevamento della Rothoblaas

Tra queste, le connessioni maggiormente attenzionate sono le cosiddette “angle brackets” o “squadrette a taglio”: disposte lungo lo sviluppo della parete, contrastano lo scorrimento orizzontale del pannello rispetto alla base.

Di seguito, si analizzano alcuni esempi di piastre ad L finalizzate a trasferire solo sollecitazioni taglianti:

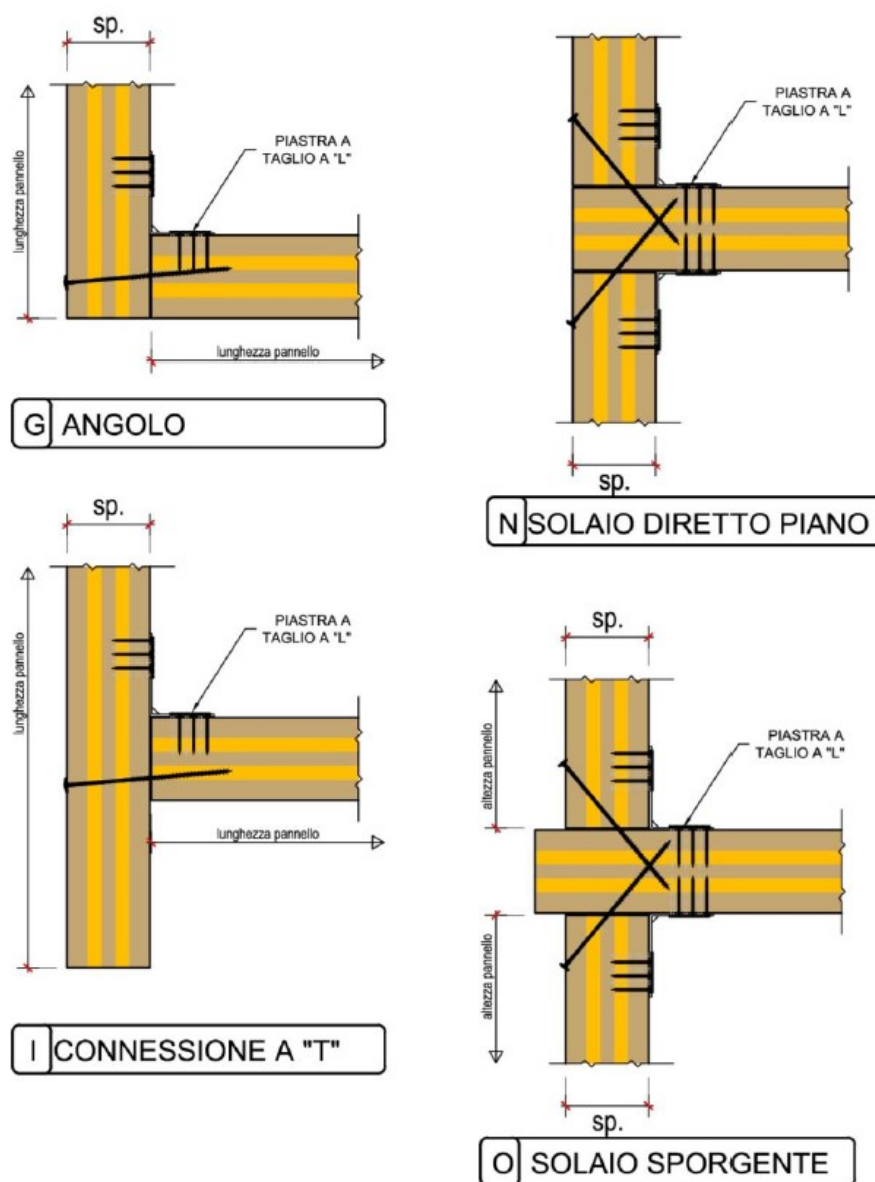


Figura 77: Posizionamento piastre a taglio

- Nodi d'angolo tra pareti (Configurazioni G e I): l'utilizzo di una singola piastra a "L" per connettere due setti ortogonali genera intrinsecamente un collegamento eccentrico. Sotto il profilo teorico, tale disposizione è deputata al solo trasferimento degli sforzi di taglio. Nella configurazione G è prassi comune integrare la giunzione con viti aggiuntive, che assolvono sia a una funzione di ausilio durante il montaggio, sia di rinforzo strutturale. L'eccentricità può essere efficacemente annullata mediante l'applicazione di una piastra speculare sul lato opposto del pannello. Questa disposizione "gemella" simmetrizza il flusso delle tensioni, rendendo il nodo staticamente più equilibrato;

- Interfacce parete-solaio (Configurazioni N e O): nel nodo di collegamento tra elementi verticali e orizzontali, la stabilità dell'organismo edilizio dipende dalla continuità del vincolo. È pertanto necessario prevedere l'installazione di piastre metalliche sia sul lembo superiore che su quello inferiore del solaio; l'assenza di uno dei due ordini di fissaggio comprometterebbe la rigidità del nodo, introducendo potenziali labilità nella struttura. Anche in questo caso, l'inserimento di viti supplementari funge da presidio cautelativo per le fasi di cantiere e da incremento della capacità portante complessiva.

Analizzando la Figura 77, si possono evidenziare le peculiarità delle piastre a doppia funzione (taglio-sollevamento). Sebbene morfologicamente simili ai dispositivi progettati per il solo taglio, queste componenti si distinguono per l'integrazione di connettori di sezione maggiorata.

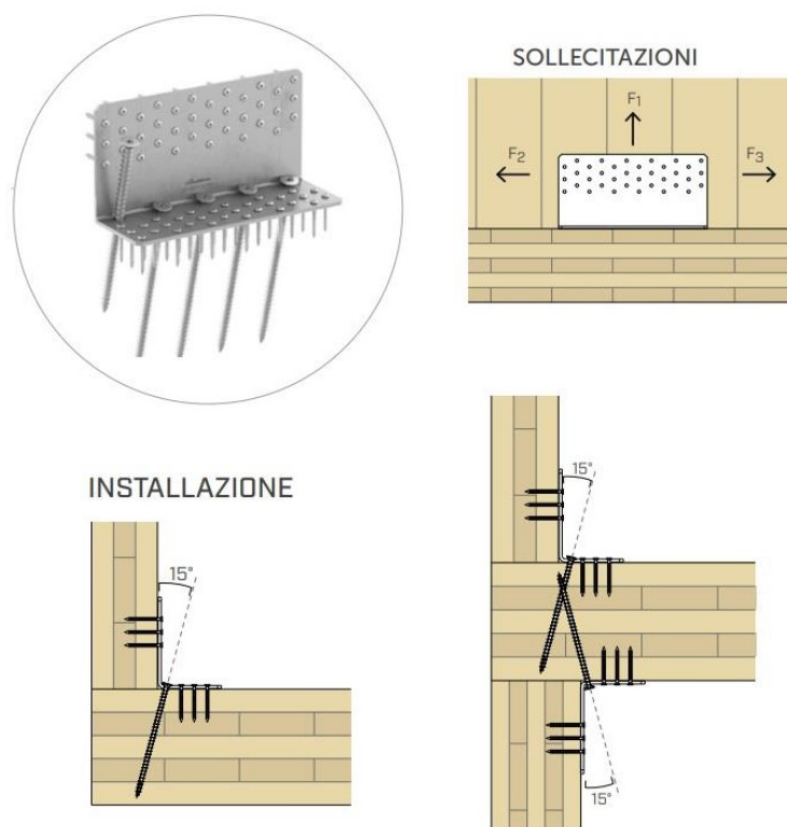


Figura 78: Piastra a taglio e sollevamento della Rothoblaas

Tale configurazione consente di assorbire non solo le sollecitazioni tangenziali (F_2 e F_3), ma anche carichi assiali diretti lungo l'asse della vite, contrastando efficacemente le azioni di sollevamento (F_1).

La valutazione della capacità portante di tali giunzioni può seguire due strade complementari:

- Calcolo analitico: condotto dal progettista sulla base delle geometrie e dei materiali;

Riqualficazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya, (Castilla-La Mancha, Spagna)

- Dati sperimentali: molti produttori forniscono domini di resistenza derivati da prove di laboratorio, spesso più accurati nel descrivere l'interazione tra le diverse componenti di forza.

Un ruolo centrale è ricoperto dalla certificazione ETA (*European Technical Assessment*), documento essenziale che riporta sia i valori di resistenza che i moduli di scorrimento.

8.7 Conessioni alla base: Hold-down

Il fissaggio delle pareti alla fondazione o ai solai sottostanti rappresenta il punto critico per la stabilità globale. Posizionati alle estremità dei setti, gli hold-down sono ancoraggi a trazione che hanno il compito di contrastare il momento ribaltante derivante dalle azioni orizzontali (vento o sisma), impedendo il sollevamento del pannello.



Figura 79: Piastra a sollevamento della Rothoblaas

Si presentano generalmente con geometrie allungate e sezioni sottili, realizzabili in configurazione piana o angolare ("a L").

La loro installazione può avvenire secondo diverse logiche costruttive, in funzione dell'intensità delle sollecitazioni attese:

- Configurazioni singole: è possibile utilizzare esclusivamente piastre piane (ancorate esternamente alla struttura) o piastre angolari;
- Configurazioni integrate: per gestire carichi di trazione elevati, si ricorre all'uso combinato di piastre piane e angolari, posizionate rispettivamente all'estradosso e all'intradosso del solaio. In questi casi, la continuità del vincolo è assicurata da una barra filettata passante che collega le piastre.

Questa modalità di installazione non è solo finalizzata ad aumentare la capacità portante del nodo, ma risponde a un'esigenza di ottimizzazione strutturale: l'impiego simmetrico dei connettori permette infatti di ridurre drasticamente l'eccentricità dell'azione resistente rispetto all'asse neutro del pannello di parete, garantendo un trasferimento dei carichi più lineare e prevedibile.

8.8 Sistemi di connessione puntuale ad alte prestazioni

Per completare la panoramica sui sistemi di giunzione, è necessario analizzare tra i connettori puntuali delle soluzioni ingegnerizzate che permettono di concentrare il trasferimento delle sollecitazioni in punti specifici dell'interfaccia, garantendo al contempo elevate prestazioni meccaniche e una ridotta invasività estetica.

- Sistema SLOT (trasferimento delle sollecitazioni di taglio): funzionamento basato sull'incasso di una piastra metallica direttamente all'interno dello spessore del pannello XLAM, in corrispondenza della zona di interfaccia. Tale configurazione permette di sfruttare una superficie di contrasto interna al legno, ottimizzando la ripartizione degli sforzi tangenziali.

SLOT
CONNETTORE PER PANNELLI STRUTTURALI



Figura 80: Trasferimento puntuale tramite SLOT

- Sistema XRAD: è in grado di gestire un regime di sollecitazioni completo, trasferendo carichi di taglio, trazione e compressione in modo rigorosamente puntuale. Grazie alla sua capacità di assorbire azioni multi-assiali, questo connettore semplifica notevolmente lo schema statico dei nodi complessi.

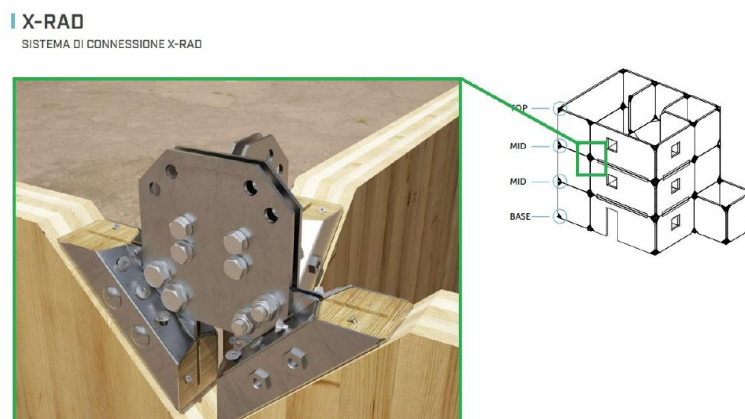


Figura 81: Trasferimento puntuali tramite X-RAD

8.9 Caso studio: dimensionamento dei collegamenti

A fronte di quanto presentato, le connessioni fondamentali da dimensionare e verificare sono tre:

- Hold-down (connettori a trazione) agli angoli delle pareti;
- Angolari a taglio lungo tutta la base della parete, distribuiti uniformemente;
- Viti tra pannello e pannello.

8.9.1 Progettazione dei collegamenti di fondazione

8.9.1.1 Dimensionamento hold-down al piano terra

L'obiettivo è determinare la forza di trazione H necessaria per ogni ancoraggio, bilanciando il momento ribaltante (causato da vento, in quanto azione orizzontale più sfavorevole) con il momento stabilizzante (dato dal peso proprio della parete stessa).

Viene utilizzata la configurazione standard con due ancoraggi alle estremità, per cui la formula di equilibrio alla rotazione è:

$$M_{base} - N_{base} \cdot \frac{L}{2} - H \cdot L = 0$$

Risolvendo per l'incognita H :

$$H = \frac{M_{base} - N_{base} \cdot \frac{L}{2}}{L}$$

Dove:

- M_{base} : momento alla base, derivato dalla combinazione di carico B-C;
- N_{base} : carico assiale stabilizzante, derivato dalla combinazione di carico B-C per operare in condizioni di massima sicurezza cautelativa;
- L : lunghezza della parete considerata.

A titolo esemplificativo, vengono riportati i calcoli per la parete X03:

Dove:

- $M_{base} = 102.58 \text{ kNm}$;
- $N_{base} = 286.28 \text{ kN}$;
- $L = 5.0 \text{ m}$.

Si ottiene:

$$H = -122.63 \text{ kN}$$

ovvero, un risultato negativo. Matematicamente, la forza di gravità e i carichi permanenti sono talmente incidenti da neutralizzare la spinta ribaltante. In termini teorici, la parete resterebbe aderente alla fondazione anche senza ancoraggi.

Tuttavia, la progettazione non può prescindere dalla loro installazione, per cui si dimensionano con un approccio estremamente cautelativo che non considera il peso proprio della parete.

Di conseguenza, la trazione sul singolo hold-down è:

$$H = \frac{M_{base}}{L} = 20.52 \text{ kN}$$

con L lunghezza totale come braccio della coppia, assegnando l'intera forza di trazione a un singolo dispositivo per lato.

Il calcolo è stato effettuato considerando l'obbligo di inserire almeno 2 hold-down su ogni singola parete; questo si fa per tre motivi normativi e costruttivi:

- Duttilità sismica: in caso di terremoto, gli hold-down devono essere presenti per garantire che la struttura possa dissipare energia senza crolli fragili;
- Prescrizioni minime: le normative tecniche impongono un ancoraggio minimo agli spigoli delle pareti XLAM per garantire l'integrità della scatola strutturale;
- Fissaggio durante il montaggio: servono a garantire la posizione della parete durante le fasi di cantiere.

Per il progetto situato a Moya (Spagna), si è scelto di uniformare la componentistica utilizzando soluzioni Rothoblaas. I vantaggi strategici includono:

- Supporto locale: presenza radicata nel territorio iberico e facilità di approvvigionamento logistico nella zona di Cuenca;
- Validazione tecnica: certificazioni ETA e piena compatibilità con i software di calcolo strutturale più diffusi;

Riqualificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya, (Castilla-La Mancha, Spagna)

- Ecosistema completo: possibilità di gestire con un unico fornitore sia la statica (hold-down e squadrette a taglio) che la protezione dell'involucro (membrane e sigillanti).

Per le connessioni di trazione, si è optato per l'adozione del sistema di ancoraggio WHT340 di Rothoblaas nella sua configurazione completa. L'efficacia del nodo non è infatti affidata alla singola piastra, ma alla sinergia dei componenti del kit:

- Corpo connettore: hold-down WHT340 in acciaio al carbonio con protezione tramite zincatura galvanica;
- Elemento di ripartizione (WASHER WHT): questa rondella rettangolare permette una distribuzione omogenea delle tensioni sulla base dell'angolare, prevenendo deformazioni localizzate e consentendo il raggiungimento della resistenza caratteristica dell'acciaio pari a 70 kN;
- Fissaggio alla struttura in XLAM: la connessione al pannello ligneo è realizzata mediante l'infissione di 30 viti LBS Ø 5 x 70 mm, la cui disposizione e quantità assicurano il trasferimento del carico secondo i parametri certificati;
- Ancoraggio alla sottostruttura: il collegamento al basamento in calcestruzzo è affidato a un sistema di fissaggio chimico (quale il VINYL-PRO di Rothoblaas), accoppiato a una barra filettata M16 con lunghezza 250 mm, garantendo così la massima rigidità all'intero complesso di ancoraggio.

Le 30 viti LBS trasferiscono la forza di sollevamento dal legno all'acciaio del WHT340. L'hold-down trasferisce la forza alla barra filettata tramite il dado e la rondella WASHER. La barra filettata scarica tutto nel peso della fondazione grazie alla resina.

Per tutte le pareti ne sono stati previsti 2, uno per ciascuna estremità, ad eccezione delle pareti Y01 ed Y04, dove ne sono stati previsti 4. Questa scelta è motivata da esigenze di trasporto: una parete di 14.78 m non può essere realizzata come blocco unico, ma viene previsto sia assemblata da almeno 2 pannelli distinti. Ogni singolo pannello deve essere ancorato a terra e contribuire a resistere al ribaltamento.

8.9.1.2 Verifica hold-down al piano terra

La capacità portante di progetto R_d degli hold-down è definita attraverso l'individuazione del meccanismo di collasso più critico. L'analisi prevede la valutazione comparativa di tre diverse modalità di rottura:

- Componente lignea: cedimento dei connettori a contatto con il pannello;

- Componente metallica: snervamento o rottura della piastra in acciaio;
- Componente cementizia: sfilamento o rottura dell'ancoraggio nel calcestruzzo.

La resistenza effettiva viene assunta pari al valore minimo tra i tre parametri calcolati (metodo del “*minimo della catena*”) e, successivamente, validata mediante il confronto diretto con le massime sollecitazioni di trazione e taglio derivanti dalle analisi.

Anche in questa trattazione, vengono riportate a titolo esemplificativo le verifiche per la parete X03:

- Resistenza Lato Legno

Questa formula valuta la capacità dei connettori a gambo cilindrico (le 30 viti LBS 5x70 previste dal sistema WHT 340) di trasmettere lo sforzo di trazione tra la flangia dell'hold-down e le fibre del pannello in XLAM:

$$R_{t,d} = \frac{k_{mod} \cdot R_{1,k}}{\gamma_M} = \frac{0.8 \cdot 73.3 \text{ kN}}{1.5} = 39.09 \text{ kN}$$

Dove:

- $R_{1,k}$: resistenza caratteristica del gruppo di viti, determinata in base alla densità del legno e alla geometria della chiodatura (secondo ETA-11/0086);
- k_{mod} : coefficiente correttivo che riduce la resistenza in funzione della durata del carico e della classe di servizio (umidità);
- γ_M : coefficiente parziale di sicurezza specifico per le connessioni nei sistemi in legno.

Il valore $R_{t,d}$ rappresenta il limite superiore di carico prima che si verifichi lo sfilamento o il rifollamento dei connettori nel legno.

- Resistenza Lato Acciaio

Si analizza la resistenza strutturale della componente metallica, nello specifico la capacità della piastra piegata e della rondella rettangolare (WASHER) di sopportare lo sforzo di trazione senza subire snervamenti o rotture fragili:

$$R_{s,d} = \frac{R_{s,k}}{\gamma_{M2}} = \frac{70.0 \text{ kN}}{1.25} = 56.0 \text{ kN}$$

Dove:

- $R_{s,k}$: resistenza caratteristica dell'acciaio costituente l'hold-down e la relativa rondella di rinforzo;
- γ_{M2} : coefficiente di sicurezza per la verifica delle sezioni tese e della carpenteria metallica.

Il valore di $R_{s,d}$ dimostra che la componente in acciaio risulta sovradimensionata rispetto a quella in legno, garantendo una migliore risposta plastica del nodo.

- Resistenza Lato Calcestruzzo

L'ultima fase della verifica riguarda il trasferimento delle forze dall'hold-down alla fondazione tramite la barra filettata M16 classe 5.8:

$$F_{t,Rd} = \frac{0.9 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \cdot 500 \text{ N/mm}^2 \cdot 157 \text{ mm}^2}{1.25} = 56.52 \text{ kN}$$

Dove:

- f_{tb} : tensione di rottura ultima dell'acciaio della barra filettata;
- A_{res} : area resistente della sezione netta della barra (diametro nominale ridotto dal passo del filetto);
- 0.9 : fattore riduttivo per tenere conto della distribuzione delle tensioni sulla parte filettata;
- γ_{M2} : fattore di sicurezza.

Il risultato di $F_{t,Rd}$ è il più elevato dei tre, indicando che la barra filettata e l'ancoraggio nel cemento armato offrono la massima riserva di sicurezza. Se l'edificio dovesse mai subire uno sforzo eccessivo, si romperebbe prima il legno piuttosto che spezzarsi di colpo il bullone nel cemento, secondo il principio della “gerarchia delle resistenze”.

Il valore di progetto della connessione viene assunto pari al minimo dei risultati ottenuti:

$$R_d = \min(R_{t,d}; R_{s,d}; F_{t,Rd}) = 39.09 \text{ kN}$$

Tale capacità viene infine confrontata con la sollecitazione agente di progetto T_{Ed} , calcolata per ogni parete:

$$T_{Ed} \leq R_d$$

Dall'analisi delle calcoli svolti, riportati nell'Allegato N (cfr. C.10), si evince che per ogni setto (direzioni X e Y) al piano terra la condizione di verifica è pienamente soddisfatta, garantendo la stabilità globale contro il ribaltamento.

8.9.1.3 Dimensionamento angle brackets al piano terra

Per contrastare le azioni tangenziali alla base delle pareti, è stato previsto l'impiego di squadrette metalliche ad alta resistenza; a differenza degli hold-down, il compito di questi elementi è impedire lo scivolamento orizzontale dei pannelli XLAM rispetto alla fondazione.

Per uniformità tecnologica con il cantiere e per garantire una superiore stabilità torsionale grazie alla doppia foratura della base, si è optato per l'impiego delle squadrette angolari Rothoblaas TITAN TTN240.

Il dimensionamento si basa sui valori di taglio alla base V_{base} estratti dalle combinazioni di carico più gravose (Combo B-C).

A titolo esemplificativo, vengono riportati i calcoli effettuati per la parete X03.

La sollecitazione di progetto risulta:

$$V_{base} = 26.05 \text{ kN}$$

La capacità portante di una singola squadretta TTN240, installata con viti LBS 5 x 50 su legno e due ancoranti su calcestruzzo, viene calcolata derivando il valore caratteristico $R_{v,k}$ (dalla tabella del produttore) secondo i coefficienti normativi:

$$R_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot R_{v,k}}{\gamma_M} = \frac{0.8 \cdot 36.3 \text{ kN}}{1.5} = 19.36 \text{ kN}$$

Il numero minimo di connettori necessari per ogni setto murario è determinato dal rapporto tra l'azione orizzontale e la resistenza del singolo elemento, arrotondato all'unità superiore:

$$n_{sq} \geq \frac{V_{base}}{R_{v,d}} = \frac{26.05 \text{ kN}}{19.36 \text{ kN}} = 1.346 [-]$$

Il numero minimo di squadrette da posizionare per la parete X03 è 2.

La disposizione delle squadrette a taglio deve seguire regole installative precise per garantire la corretta trasmissione degli sforzi:

- Distribuzione uniforme: gli elementi non vanno raggruppati, ma ripartiti lungo l'intero sviluppo lineare della parete;
- Interasse di posa: si consiglia una spaziatura indicativa di circa 80-100 cm;
- Presidio minimo: indipendentemente dalle risultanze del calcolo, ogni setto murario deve essere vincolato con almeno 2 squadrette per assicurarne il corretto posizionamento e la rigidità nel piano.

Sulla base di queste regole operative, considerando che la lunghezza della parete X03 è di 5 m e l'interasse di posa è assunto di 1 m, verranno posizionate 5 squadrette a taglio.

8.9.1.4 Verifica angle brackets al piano terra

La capacità di progetto della connessione a taglio, necessaria per impedire lo scorrimento dei pannelli alla base, è determinata dall'involuppo minimo delle resistenze dei componenti che costituiscono il nodo. Per la squadretta TITAN TTN240, la verifica si articola come segue:

1. Resistenza Lato Legno

Questa verifica valuta la tenuta della chiodatura (o avvitamento) sul pannello in XLAM. Utilizzando una configurazione a 36 viti LBS 5 x 50, si ottiene:

$$R_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot R_{v,k}}{\gamma_M} = \frac{0.8 \cdot 36.3 \text{ kN}}{1.5} = 19.36 \text{ kN}$$

Dove:

- $R_{v,k}$: resistenza caratteristica certificata dal produttore per il "full pattern";
- k_{mod} : coefficiente correttivo che riduce la resistenza in funzione della durata del carico e della classe di servizio (umidità);
- γ_M : coefficiente parziale di sicurezza specifico per le connessioni nei sistemi in legno.

2. Resistenza Lato Acciaio

Si analizza la resistenza allo snervamento della piastra TITAN: l'area resistente netta della piastra A_v viene calcolata sottraendo i fori alla sezione lorda:

$$V_{c,Rd} = \frac{A_v \cdot f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 75.59 \text{ kN}$$

Questa componente rappresenta la robustezza intrinseca della squadretta e risulta essere molto superiore alla resistenza lato legno.

3. Resistenza Lato Calcestruzzo

La resistenza è affidata alla barra filettata barra filettata M16 classe 5.8 soggetta a taglio, fissata nel cordolo di base. Considerando le 2 barre per ogni squadretta TITAN:

$$F_{v,Rd} = n_{barre} \cdot \frac{0.6 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}} = 2 \cdot \frac{0.6 \cdot 500 \text{ N/mm}^2 \cdot 157 \text{ mm}^2}{1.25} = 75.36 \text{ kN}$$

Dove:

- f_{tb} : resistenza ultima dell'ancorante;
- A_{res} : area resistente della barra M16.

La resistenza di progetto della connessione singola R_d è il valore minimo dei tre precedenti:

$$R_d = \min(R_{v,d}, V_{c,Rd}, F_{v,Rd}) = 19.36 \text{ kN}$$

Il sistema risulta verificato se la somma delle resistenze delle n_c squadrette installate è superiore al taglio massimo di progetto V_{Ed} :

$$V_{Ed} \leq R_{d,tot} = R_d \cdot n_c$$
$$26.05 \text{ kN} \leq 2 \cdot 19.36 \text{ kN} = 38.72 \text{ kN}$$

Dall'analisi dei calcoli effettuati, riportati nell'Allegato O (cfr. C.10), si evince che per ogni setto (direzioni X e Y) al piano terra la condizione di verifica è pienamente soddisfatta, garantendo la stabilità globale allo scorrimento.

Considerando l'applicazione pratica di questo progetto, che va oltre la sola trattazione a fini didattici, il numero effettivo di squadrette che andranno posizionate per la parete X03 è 5. Si tiene conto, infatti, che operativamente deve essere mantenuto un interasse di 80-100 cm tra ogni squadretta lungo tutto lo sviluppo longitudinale della parete.

8.9.2 Progettazione dei collegamenti interpiano

8.9.2.1 Dimensionamento hold-down al piano primo

Si procede alla determinazione degli hold-down da posizionare in prossimità del solaio intermedio. La procedura è analoga a quella riportata per gli hold-down del piano terra.

Viene utilizzata la configurazione standard con due ancoraggi alle estremità, per cui la formula di equilibrio alla rotazione è:

$$M_1 - N_1 \cdot \frac{L}{2} - H \cdot L = 0$$

Risolvendo per l'incognita H :

$$H = \frac{M_1 - N_1 \cdot \frac{L}{2}}{L}$$

Dove:

- M_1 : momento alla base della parete del piano primo, derivato dalla combinazione di carico B-C;
- N_1 : carico assiale stabilizzante, derivato dalla combinazione di carico B-C per operare in condizioni di massima sicurezza cautelativa;
- L : lunghezza della parete considerata.

A titolo esemplificativo, vengono riportate le formule per la parete X03:

Dove:

- $M_1 = 61.55 \text{ kNm}$;
- $N_1 = 139.74 \text{ kN}$;
- $L = 5.0 \text{ m}$.

Si ottiene:

$$H = -57.56 \text{ kN}$$

Anche in questo caso, la forza di gravità e i carichi permanenti sono talmente incidenti da neutralizzare la spinta ribaltante.

Non considerando il peso proprio in un approccio estremamente cautelativo, la trazione sul singolo hold down è:

$$H = \frac{M_1}{L} = 12.31 \text{ kN}$$

con L lunghezza totale come braccio della coppia, assegnando l'intera forza di trazione a un singolo dispositivo per lato.

Rispetto ai calcoli effettuati per la parete del piano terra, si nota un valore di H più piccolo (ed è così per ogni parete).

Per il collegamento a trazione tra le pareti portanti del piano primo e quelle del piano terra, si è scelto di utilizzare soluzioni Rothoblaas modello WHT PLATE 440: questa piastra agisce come un elemento di giunzione unico e continuo, realizzata in acciaio al carbonio con zincatura galvanica, di lunghezza pari a 440 mm, progettata per scavalcare lo spessore del solaio interpiano e collegare direttamente i due setti in XLAM.

La configurazione del nodo è così semplificata:

- Corpo connettore: singola piastra WHT PLATE 440 posizionata esternamente al pannello, a cavallo del giunto interpiano;
- Fissaggio alla struttura in XLAM: la connessione è affidata a 22 viti totali (11 viti sulla parete del piano primo e 11 viti sulla parete del piano terra) modello LBS Ø 5 x 70 mm, sfalsate in 3 colonne con rispettivamente 4+3+4 fori.

Per tutte le pareti ne sono stati previsti 2, uno per ciascuna estremità, ad eccezione delle pareti Y01 ed Y04, dove ne sono stati previsti 4, in continuità con quanto previsto per il piano sottostante.

8.9.2.2 Verifica hold-down al piano primo

La capacità portante di progetto R_d degli hold-down è definita attraverso l'individuazione del meccanismo di collasso più critico. L'analisi prevede la valutazione comparativa di due diverse modalità di rottura:

- Componente lignea: cedimento dei connettori a contatto con il pannello;
- Componente metallica: snervamento o rottura della piastra in acciaio.

La resistenza effettiva viene assunta pari al valore minimo tra i tre parametri calcolati (metodo del “*minimo della catena*”) e, successivamente, validata mediante il confronto diretto con le massime sollecitazioni di trazione e taglio derivanti dalle analisi.

Anche in questa trattazione, vengono riportate a titolo esemplificativo le verifiche per la parete X03:

1. Resistenza Lato Legno (parete)

Questa formula valuta la capacità dei connettori a gambo cilindrico (le 11 viti LBS 5 x 70 previste dal sistema WHT PLATE 440) di trasmettere lo sforzo di trazione tra la flangia dell'hold-down e le fibre del pannello in XLAM:

$$R_{t,d} = \frac{k_{mod} \cdot R_{1,k}}{\gamma_M} = \frac{0.8 \cdot 35 \text{ kN}}{1.5} = 18.67 \text{ kN}$$

Dove:

- $R_{1,k}$: resistenza caratteristica del gruppo di viti, determinata in base alla densità del legno e alla geometria della chiodatura (secondo ETA-11/0086);
- k_{mod} : coefficiente correttivo che riduce la resistenza in funzione della durata del carico e della classe di servizio (umidità);
- γ_M : coefficiente parziale di sicurezza specifico per le connessioni nei sistemi in legno.

Il valore $R_{t,d}$ rappresenta il limite superiore di carico prima che si verifichi lo sfilamento o il rifollamento dei connettori nel legno.

2. Resistenza Lato Acciaio

Si verifica la capacità della sezione d'acciaio di "tenere" il tiro senza deformarsi plasticamente (snervamento) o spezzarsi (rottura). La piastra viene "tirata" dalle due estremità. Il punto più sollecitato è la sezione trasversale centrale, dove l'area dell'acciaio è minima perché non ci sono viti che aiutano, ma passa tutto il carico.

$$R_{s,d} = \frac{0.9 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \cdot 235 \text{ N/mm}^2 \cdot 180 \text{ mm}^2}{1.25} = 30.46 \text{ kN}$$

Dove:

- f_{tb} : tensione di snervamento dell'acciaio;
- A_{res} : area netta della piastra nel punto centrale, dove non ci sono fori;
- 0.9: fattore riduttivo per tenere conto della distribuzione delle tensioni sulla parte filettata;
- γ_{M2} : fattore di sicurezza.

Il risultato di $F_{t,Rd}$ è il più elevato dei tre, indicando che la barra filettata e l'ancoraggio nel cemento armato offrono la massima riserva di sicurezza.

Il valore di progetto della connessione viene assunto pari al minimo dei risultati ottenuti:

$$R_d = \min(R_{t,d}; R_{s,d}) = 18.67 \text{ kN}$$

Tale capacità viene infine confrontata con la sollecitazione agente di progetto T_{Ed} , calcolata per ogni parete:

$$T_{Ed} \leq R_d$$

Dall'analisi dei calcoli effettuati, riportati nell'Allegato P (cfr. C.10), si evince che per ogni setto (direzioni X e Y) al piano primo la condizione di verifica è pienamente soddisfatta.

8.9.2.3 Dimensionamento angle brackets al piano primo

Il dimensionamento si basa sui valori di taglio V_1 estratti dalle combinazioni di carico più gravose (Combo B-C), e, per garantire una superiore stabilità torsionale grazie alla doppia foratura della base, si è optato per l'impiego delle squadrette angolari Rothoblaas TITAN TTN160.

A titolo esemplificativo, vengono riportati i calcoli effettuati per la parete X03.

La sollecitazione di progetto risulta:

$$V_1 = 8.75 \text{ kN}$$

La capacità portante di una singola squadretta TTN160, installata con 20 viti LBS 5 x 50 su legno e due viti per legno ad alte prestazioni VGS 11 x 100, viene calcolata derivando il valore caratteristico $R_{v,k}$ (dalla tabella del produttore) secondo i coefficienti normativi:

$$R_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot R_{v,k}}{\gamma_M} = \frac{0.8 \cdot 2.60 \text{ kN}}{1.5} \cdot 20 = 27.73 \text{ kN}$$

Il numero minimo di connettori necessari per ogni setto murario è determinato dal rapporto tra l'azione orizzontale e la resistenza del singolo elemento, arrotondato all'unità superiore:

$$n_{sq} \geq \frac{V_{base}}{R_{v,d}} = \frac{8.88 \text{ kN}}{27.73 \text{ kN}} = 0.316 [-]$$

Il numero minimo di squadrette da posizionare per la parete X03 è 1.

La disposizione delle squadrette a taglio deve seguire regole installative precise per garantire la corretta trasmissione degli sforzi. Sulla base delle regole operative, considerando che la lunghezza della parete X03 è di 5 m e l'interasse di posa è assunto di 1 m, verranno posizionate 5 squadrette a taglio.

8.9.2.4 Verifica angle brackets al piano primo

La capacità di progetto della connessione a taglio, necessaria per impedire lo scorrimento dei pannelli alla base del piano primo, è determinata dall'involuppo minimo delle resistenze dei componenti che costituiscono il nodo. Per la squadretta TITAN TTN160, la verifica si articola come segue:

- Resistenza Lato Legno (parete)

Questa verifica valuta la tenuta della chiodatura (o avvitamento) sul pannello in XLAM. Utilizzando una configurazione a 20 viti LBS 5 x 50, si ottiene:

$$R_{v,d,parete} = \frac{k_{mod} \cdot R_{v,k}}{\gamma_M} = \frac{0.8 \cdot 2.60 \text{ kN}}{1.5} \cdot 20 = 27.73 \text{ kN}$$

Dove:

- $R_{v,k}$: resistenza caratteristica certificata dal produttore per la singola vite LBS 5 x 50;
- k_{mod} : coefficiente correttivo che riduce la resistenza in funzione della durata del carico e della classe di servizio (umidità);
- γ_M : coefficiente parziale di sicurezza specifico per le connessioni nei sistemi in legno.

2. Resistenza Lato Acciaio

Si analizza la resistenza allo snervamento della piastra TITAN: l'area resistente netta della piastra A_v viene calcolata sottraendo i fori alla sezione lorda:

$$V_{c,Rd} = \frac{A_v \cdot f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 54.40 \text{ kN}$$

Questa componente rappresenta la robustezza intrinseca della squadretta e risulta essere molto superiore alla resistenza lato legno.

3. Resistenza Lato Legno (Solaio)

La resistenza è affidata a 2 viti per legno VGS 11x100. Considerando le 2 barre per ogni squadretta TITAN:

$$R_{v,d,solaio} = \frac{k_{mod} \cdot R_{v,k}}{\gamma_M} = \frac{0.8 \cdot 20 \text{ kN}}{1.5} = 12.8 \text{ kN}$$

Dove:

- $R_{v,k}$: resistenza caratteristica certificata dal produttore per le 2 viti VGS 11 x 100;
- k_{mod} : coefficiente correttivo che riduce la resistenza in funzione della durata del carico e della classe di servizio (umidità);
- γ_M : coefficiente parziale di sicurezza specifico per le connessioni nei sistemi in legno.

La resistenza di progetto della connessione singola R_d è il valore minimo dei tre precedenti:

$$R_d = \min(R_{v,d,parete}, V_{c,Rd}, R_{v,d,solaio}) = 12.8 \text{ kN}$$

Il sistema risulta verificato se la somma delle resistenze delle n_c squadrette installate è superiore al taglio massimo di progetto V_{Ed} :

$$V_{Ed} \leq R_{d,tot} = R_d \cdot n_c$$
$$8.75 \text{ kN} \leq 12.80 \text{ kN}$$

Dall'analisi dei calcoli effettuati, riportati nell'Allegato Q (cfr. C.10), si evince che per ogni setto (direzioni X e Y) per il piano primo la condizione di verifica è pienamente soddisfatta, garantendo la stabilità globale contro lo scorrimento.

8.9.3 Progettazione delle connessioni puntuali

Nella progettazione di edifici in XLAM, la trasmissione delle azioni orizzontali (sisma e vento) alle fondazioni non dipende esclusivamente dai singoli dispositivi di ancoraggio come hold-down e squadrette a taglio. Sebbene questi siano fondamentali, la reale efficienza della struttura risiede nella sua capacità di comportarsi come un corpo scatolare unitario.

In quest'ottica, i collegamenti tra i pannelli (giunti verticali parete-parete e giunti orizzontali parete-solaio) assumono un ruolo che va oltre il semplice calcolo numerico della sollecitazione. Essi assicurano la continuità strutturale necessaria affinché il flusso delle forze possa distribuirsi coerentemente tra i diversi setti controventanti e i diaframmi di piano. In assenza di tali collegamenti, l'ipotesi stessa di "struttura" verrebbe meno, trasformando l'edificio in un insieme di elementi isolati e cinematicamente instabili.

L'analisi strutturale evidenzia spesso che in alcune zone i collegamenti tra pannelli risultano sollecitati da forze di entità ridotta. Tuttavia, seguendo un principio analogo a quello dell'armatura minima nel cemento armato, non è lecito omettere tali connessioni.

È stato pertanto previsto l'inserimento sistematico di connessioni di continuità costruttiva. Tali giunti assicurano una prestazione minima che garantisce l'integrità della scatola strutturale anche in presenza di deformazioni impreviste o azioni locali non esplicitamente modellate, garantendo che ogni giunto sia attivato correttamente nel trasferimento del flusso di forze.

8.9.3.1 Collegamento complanare parete-parete

Per garantire la continuità strutturale dell'edificio, sono previste connessioni puntuali tra i pannelli XLAM costituenti il medesimo setto, necessari dove le esigenze di trasporto e montaggio impongano la scomposizione della parete in più elementi.

Tra le diverse strategie di giunzione, si è optato per il collegamento complanare dritto (comunemente definito *butt joint*). Tale soluzione rappresenta l'approccio più lineare dal punto di vista della carpenteria, poiché non richiede lavorazioni CNC invasive o asportazioni di materiale, ma necessita di accortezze specifiche per assicurare una corretta trasmissione delle azioni di taglio e trazione.

Il vantaggio principale rispetto al giunto a mezzo legno risiede nel mantenimento dell'intera sezione resistente; non essendoci riduzioni di spessore, non è necessaria la verifica della parte di legno residua; il pannello conserva integralmente la propria inerzia e capacità portante fino all'estremo lembo del bordo. Poiché tale configurazione risulta estremamente sensibile alle tolleranze di posa, dove un gap di soli 1-2 mm comprometterebbe la trasmissione degli sforzi per contatto, l'impiego di viti a tutto filetto risulta fondamentale. Queste agiscono tirando i pannelli l'uno contro l'altro durante l'infissione, sigillando il giunto e garantendo il comportamento monolitico della parete.

Quindi, l'efficienza del sistema è affidata esclusivamente alla disposizione delle viti. Qualora venissero posizionate perpendicolarmente al piano di giunto, le viti lavorerebbero a taglio puro, offrendo una rigidità molto ridotta. L'adozione di una configurazione a viti incrociate con inclinazione a 45° permette invece di attivare un "effetto traliccio": lo sforzo di taglio tra i pannelli viene convertito in sollecitazioni di trazione e compressione assiale lungo l'asse delle viti, sfruttando la massima rigidità del connettore.

Per la cucitura dei pannelli sono state selezionate viti Rothoblaas VGS Ø8 mm con lunghezza 160 mm in funzione dello spessore del pannello. Tale lunghezza è dimensionata per garantire che la

punta attraversi lo strato superficiale e interessi almeno 3 strati del pannello adiacente, massimizzando la superficie di aderenza del filetto.

Secondo l'Eurocodice 5, la lunghezza della parte filettata nel secondo pannello deve soddisfare la condizione:

$$l_{eff,min} = 6 \cdot d = 6 \cdot 8 \text{ mm} = 48 \text{ mm}$$

Partendo con un pre-invito a circa 8 cm dal bordo, la vite percorre circa 113 mm nel primo elemento. Nel secondo pannello la lunghezza è:

$$l_{eff} = 180 \text{ mm} - 113 \text{ mm} = 67 \text{ mm}$$

La verifica è ampiamente soddisfatta, con 67 mm di morso nel secondo pannello.

La vite da 180 mm è spesso preferita in cantiere per un motivo pratico di tolleranza d'errore: con la vite da 200 mm, se l'operatore sbaglia l'angolo di pochi gradi o parte troppo vicino al giunto, la punta rischia di uscire dalla faccia opposta del secondo pannello (rovinando l'estetica se il legno è a vista); inoltre, una lunghezza di 180 mm offre un ottimo ancoraggio, ma lascia un margine di sicurezza dalla faccia opposta, rendendo la posa più veloce e meno rischiosa.

Sotto il profilo normativo e costruttivo, per garantire l'effetto diaframma e la collaborazione tra i setti, è stato adottato un passo costante di 30-40 cm, indipendentemente dall'esiguità degli sforzi di calcolo.

Questa tipologia di giunzione rappresenta dunque il miglior compromesso tra semplicità esecutiva e affidabilità strutturale, assicurando la necessaria ridondanza e duttilità al sistema globale.

8.9.3.2 Collegamento ad angolo parete-parete

In corrispondenza degli angoli dell'edificio e delle intersezioni a T, la continuità strutturale è affidata a connessioni puntuali con viti a tutto filetto Rothoblaas VGS Ø8 mm con lunghezza 200 mm.

A differenza delle giunzioni complanari, in questo nodo i connettori vengono disposti orizzontalmente, attraversando lo spessore del pannello passante (140 mm) per ancorarsi nella testa del pannello ortogonale. Per garantire il rispetto dei minimi normativi di infissione ($l_{eff,min} = 6 \cdot d = 6 \cdot 8 \text{ mm} = 48 \text{ mm}$), è stata adottata una lunghezza di 200 mm, che assicura una penetrazione efficace di 60 mm nel secondo elemento.

Le viti d'angolo impediscono il distacco dei setti sotto l'azione delle pressioni del vento e garantiscono la ripartizione delle forze sismiche tra le pareti disposte lungo le due direzioni principali (X e Y), rendendo l'intera struttura solidale e ridondante.

La posa delle viti VGS Ø8 x 200 mm non deve avvenire in modo unidirezionale, bensì secondo uno schema di ammorsamento alternato. Tale accorgimento tecnico prevede che i connettori vengano inseriti alternativamente: una vite attraversa il pannello A per ancorarsi nella testa del pannello B, mentre la vite successiva segue il percorso inverso, attraversando il pannello B per ancorarsi nella testa del pannello A.

Questa configurazione permette di legare i due setti ortogonali in entrambe le direzioni principali, garantendo che il nodo sia in grado di assorbire con la stessa efficacia sia le spinte (pressioni) che le suzioni (depressioni) del vento, indipendentemente dalla direzione di provenienza del carico. L'alternanza evita di sovraccaricare un'unica faccia del pannello e riduce il rischio di fessurazioni localizzate lungo la linea dei connettori, migliorando la durabilità del nodo.

8.9.3.3 Collegamento parete-copertura

Il collegamento tra la copertura in XLAM (spessore 200 mm) e le pareti portanti verticali (spessore 140 mm) è stato risolto mediante l'impiego di viti a tutto filetto Rothoblaas VGS Ø8 x 300 mm. La parete finisce dritta e il tetto ci poggia sopra totalmente, richiedendo un taglio inclinato sulla testa della parete.

La scelta di una lunghezza di 300 mm è dettata dall'esigenza di superare l'importante spessore del pannello di falda e garantire, al contempo, una profondità di infissione nella testa della parete sottostante non inferiore a 70 mm. Tale ancoraggio assicura il rispetto dei minimi normativi di legge ($l_{eff,min} = 6 \cdot d = 6 \cdot 8 \text{ mm} = 48 \text{ mm}$) e permette di assorbire efficacemente le azioni di trazione derivanti dalla suzione del vento (lift-off) e le spinte tangenziali di falda.

Per contrastare lo scivolamento della copertura, le viti sono state disposte secondo uno schema a viti incrociate, inclinate a 45° rispetto al piano di appoggio. Questa configurazione attiva un meccanismo a traliccio che conferisce al nodo un'elevata rigidità, assicurando la perfetta collaborazione tra il diaframma di copertura e i setti di controvento verticali, completando così il comportamento scatolare dell'intero organismo strutturale.

Data l'estensione lineare del collegamento (circa 15 m del setto su cui si collega la copertura), l'interasse di posa delle viti VGS 8 x 300 mm è stato fissato a 40 cm. Tale scelta non risponde solo alla verifica degli stati limite ultimi (SLU) per le azioni di taglio e sollevamento, ma assolve alla funzione di garantire una rigidità distribuita ed uniforme lungo tutto il perimetro di appoggio. In corrispondenza degli spigoli dell'edificio, dove le azioni del vento risultano maggiormente concentrate, l'interasse viene cautelativamente ridotto a 30 cm per aumentare la densità dei connettori in linea con i criteri di robustezza strutturale.

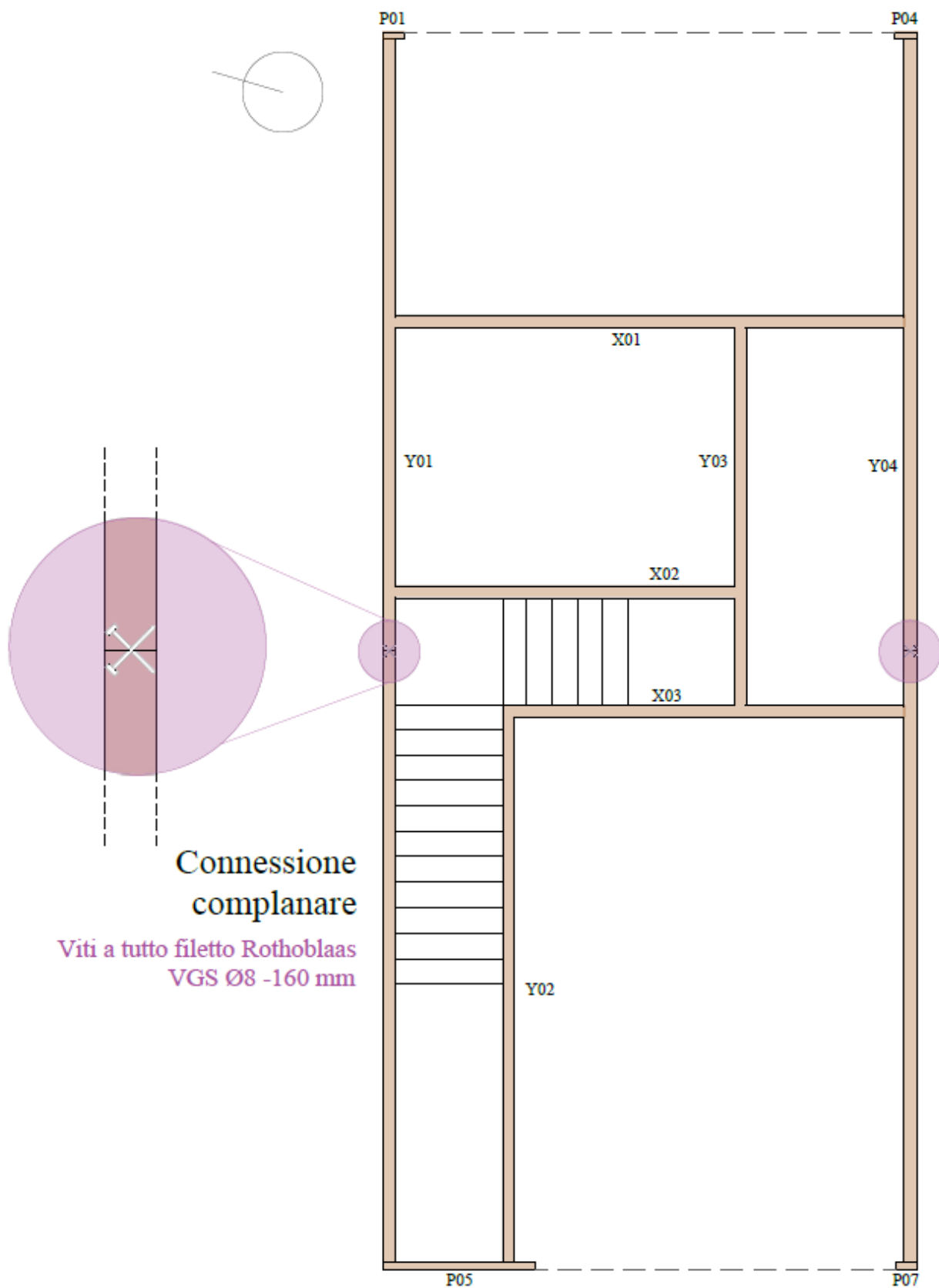


Figura 82: Pareti portanti XLAM con indicazione delle connessioni complanari progettate (schema puramente illustrativo con dimensioni fuori scala), su Autocad (elaborazione a cura dell'autrice)

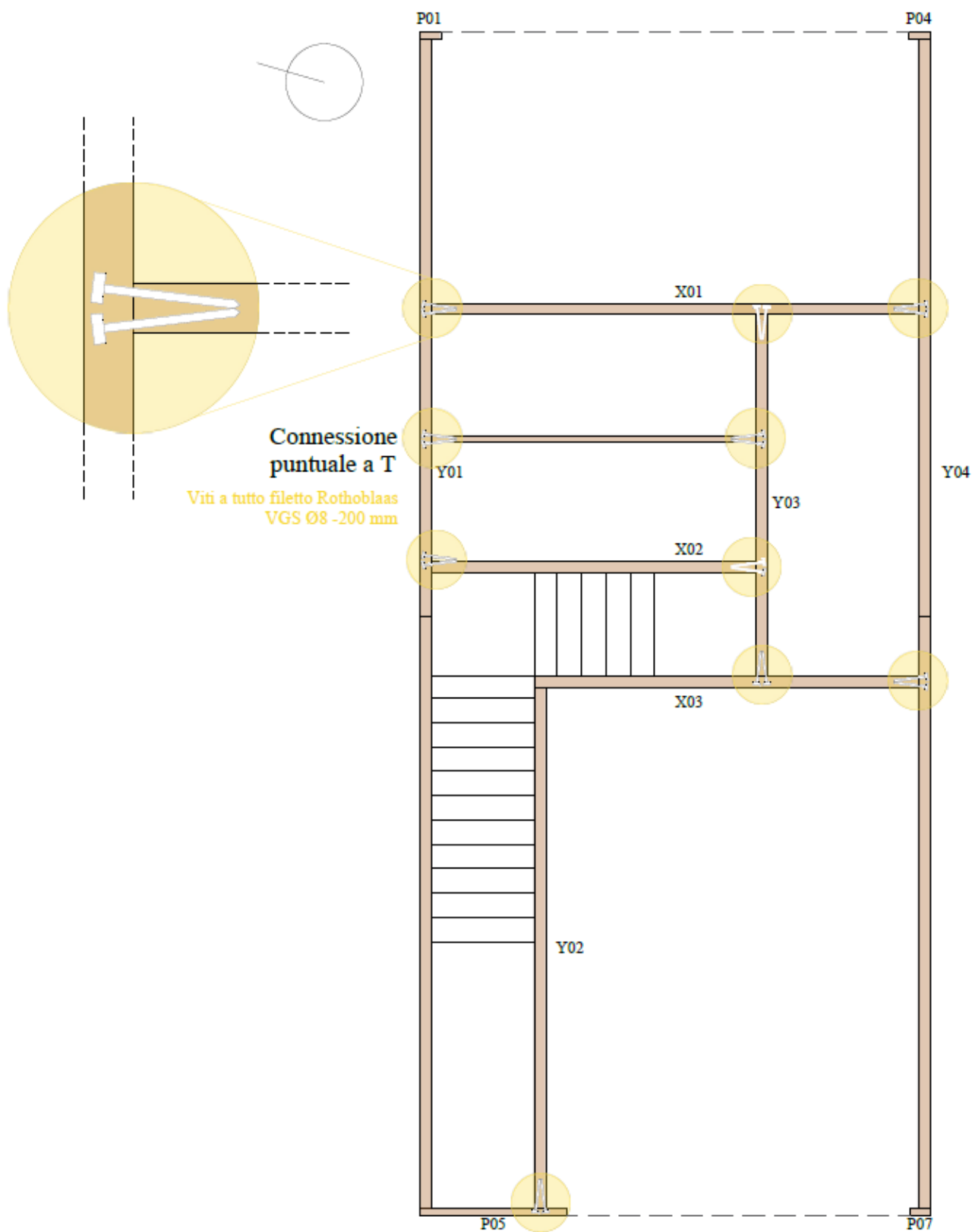


Figura 83: Pareti portanti XLAM con indicazione delle connessioni a T progettate (schema puramente illustrativo con dimensioni fuori scala), su Autocad (elaborazione a cura dell'autrice)

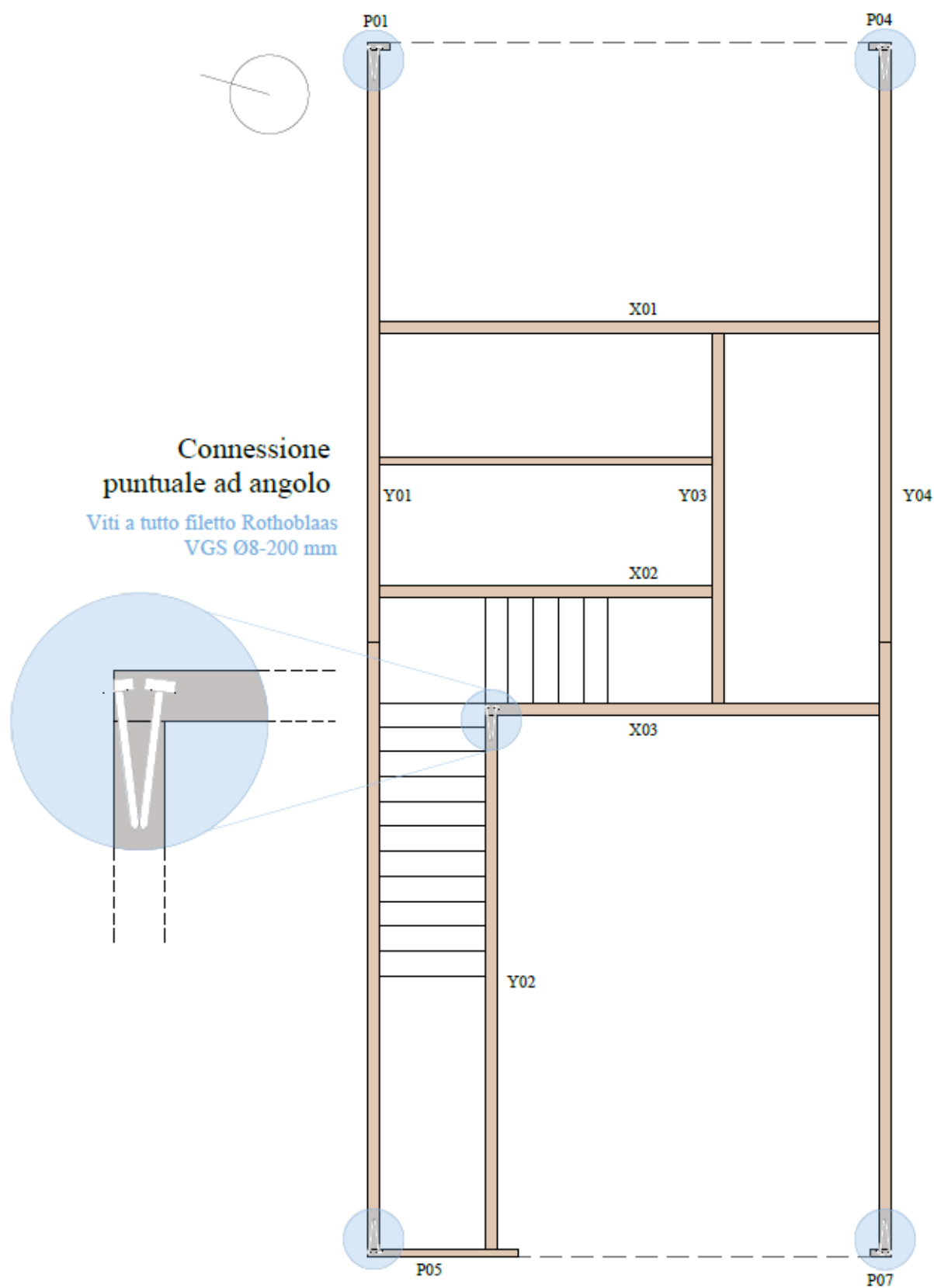


Figura 84: Pareti portanti XLAM con indicazione delle connessioni ad angolo progettate (schema puramente illustrativo con dimensioni fuori scala), su Autocad (elaborazione a cura dell'autrice)

8.10 Resistenza al fuoco

L'attenta considerazione della resistenza al fuoco dei collegamenti è necessaria nella misura in cui sono proprio le parti della struttura realizzate con elementi metallici a rappresentare il vero punto di debolezza di una struttura lignea esposta al fuoco, in quanto:

- Sono elementi di trasmissione del calore anche all'interno della massa lignea;
- Sono caratterizzate da una repentina caduta delle proprietà meccaniche ad alte temperature.

La protezione degli elementi metallici di base (hold-down e squadrette) è affidata al rivestimento (chiamato in gergo "carter") in abete bianco (*Pinus Sylvestris*) da 15 mm, incollato con Sikaflex-221. Sebbene lo spessore del rivestimento sia contenuto, esso agisce come primo schermo termico, ritardando l'innalzamento della temperatura della piastra d'acciaio:

$$d_{char} = \beta_0 \cdot t$$

Dove:

- β_0 : velocità di carbonizzazione; per l'abete bianco (*Pinus Sylvestris*) è convenzionalmente pari a 0.67 mm/min (secondo EC5).

Ai fini del calcolo della resistenza al fuoco, tale spessore garantisce una protezione integrale per i primi 22 minuti di esposizione. Per raggiungere classi di resistenza superiori (R30/R60), la strategia progettuale prevede l'integrazione del carter con l'incasso della ferramenta all'interno della massa del pannello XLAM principale.

La colla Sikaflex-221 assicura in questa fase la sigillatura ermetica del giunto, impedendo l'effetto camino e il passaggio di fumi caldi sul retro della connessione, preservando la capacità portante dei connettori a gambo cilindrico. Il Sikaflex-221 è un ottimo sigillante poliuretano, ma non è un adesivo strutturale per alte temperature; la sua funzione è di sigillatura e posizionamento, mentre la stabilità meccanica del pannello da 15 mm durante l'incendio dovrebbe essere aiutata da piccoli chiodini o viti a scomparsa, così che il legno di protezione non si stacchi non appena la colla si scalda. Per le viti Rothoblaas VGS utilizzate nei giunti della struttura in esame, la strategia di protezione adottata si basa sul principio del "coprifermo ligneo", appena descritto.

Nel caso dei collegamenti complanari e d'angolo, la protezione è intrinseca alla tipologia di posa: le viti VGS, essendo a tutto filetto e con testa cilindrica o svasata, vengono infisse in profondità nel pannello. Successivamente, per garantire il requisito di resistenza, la testa della vite viene incassata per alcuni centimetri rispetto alla superficie del pannello. Il foro risultante viene sigillato con un tassello in legno (o "tappo") di essenza analoga al pannello.

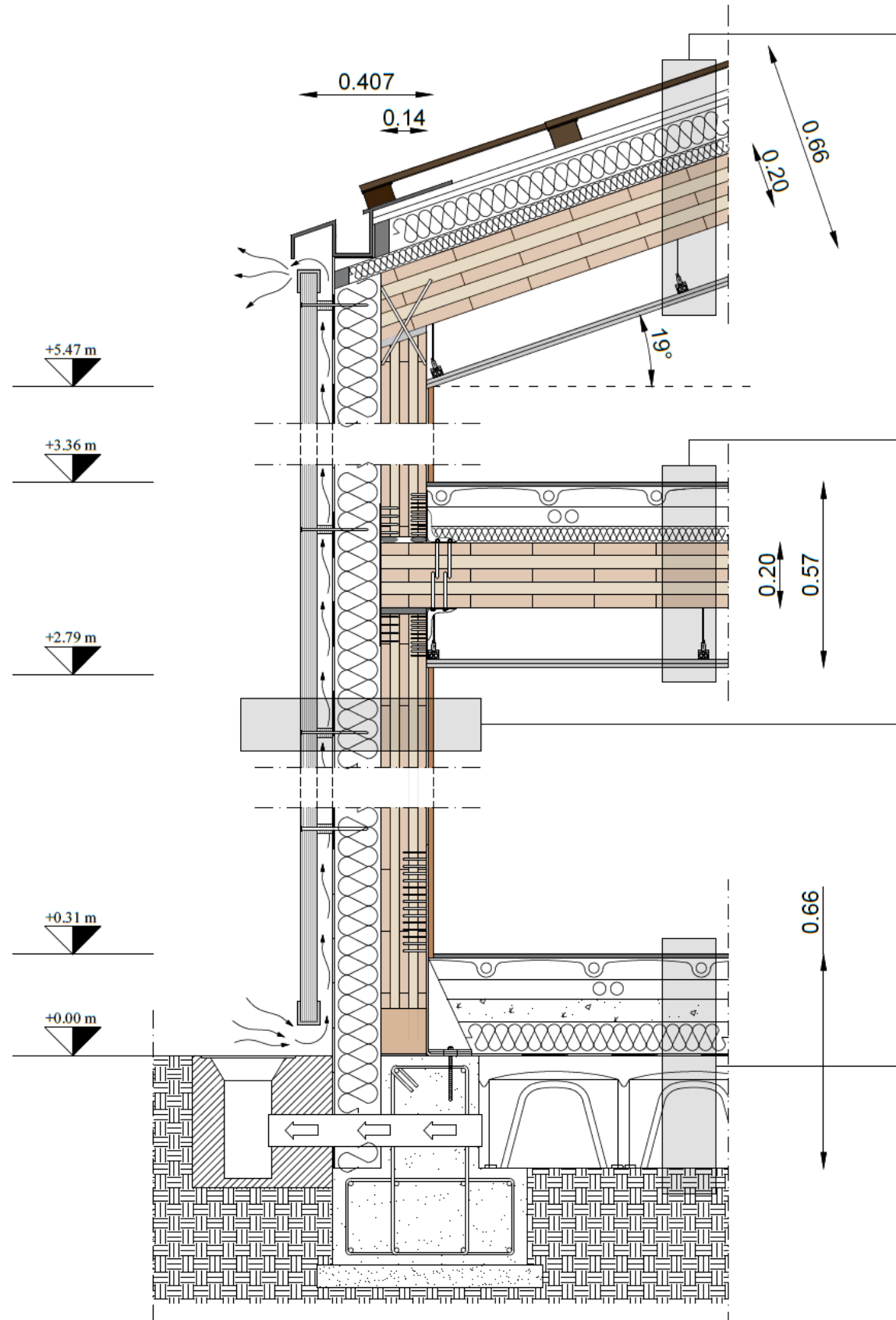


Figura 85: Sezione costruttiva terra-cielo, su Autocad (elaborazione a cura dell'autrice)

CHIUSURA ORIZZONTALE DI COPERTURA

Manto di copertura composto da doghe lisce in abete/cedro (25 mm spessore), impregnate in autoclave per lisciatura superficiale e resistenza UV (ditta Incofusta, Valencia)

Serie di listelli portategola in legno (60 mm)

Membrana sottogola antivapore traspirante tipo Fibertherm Multi UDB, 3 strati rinforzati in polipropilene (1mm)

Pannello CementoLegno tipo Betonwood N (spessore 22 mm, dimensioni 1220 x 520 mm)

Pannelli in fibra di legno naturale tipo Fibertherm Isorel (spessore 19 mm, dimensioni 2500 x 1200 mm)

Isolante Rockwool Tectum (100 mm)

Isolante acustico: Rockwool Rockmur (50 mm)

Pannello XLAM EGOIN CLT 200 - 5 strati Certificato ETA-12/0358 (200 mm)

Pendino con occhiolo aperto e gancio in acciaio con molla per profili a C tipo KnaufD112

Profilo con orditura metallica zincata a C per controsoffitti autoportanti tipo Knauf

CHIUSURA ORIZZONTALE INTERPIANO

Gres porcellanato: 10+2 mm fughe (12 mm)

Massetto radiante: Uponor Minitemp argilla espansa + tubi radianti PEX 16x2 (65 mm)

Passaggio impianti: Scatole 50x50x60 mm + Canali 80x40 mm (60 mm)

Isolante acustico: Rockwool Rockmur (50 mm)

Pannello XLAM EGOIN CLT 200 - 5 strati Certificato ETA-12/0358 (200 mm)

Pendino con occhiolo aperto e gancio in acciaio con molla per profili a C tipo KnaufD112

Profilo con orditura metallica zincata a C per controsoffitti autoportanti tipo Knauf

PARETE VERTICALE PORTANTE ESTERNA

Rivestimento di facciata in tavole di legno per esterno - Garabandal Madera (Asturie):

Doghe larice siberiano termotrattato 27x148 mm - spessore 50 mm.

Fissaggio su listelli 28x58 mm (interasse 60 cm)

Intercapedine areata (50 mm)

Guaina traspirante permeabile al vapore certificata CTE - Delta Membranas Ibérica (Madrid): Delta-Vent S (Sd=0,15 m) (5 mm)

Cappotto isolante esterno - Rockwool "Rainscreen Duo Slab (145 mm)

Pannello XLAM EGOIN CLT 140 - 5 strati Certificato ETA-12/0358 (140 mm)

Rivestimento interno: 6mm colla Sikaflex®221 di Sika España (Poliuretano modificato (MS Polymer), elastico, resistente a umidità e vibrazioni)

Pannello lamellare in abete bianco (Pinus sylvestris) CL24h di Derque Maderas (15 mm)

CHIUSURA ORIZZONTALE CONTROTERRA

Gres porcellanato: 10+2 mm fughe (12 mm)

Massetto radiante: Uponor Minitemp argilla espansa + tubi radianti PEX 16x2 (65 mm)

Passaggio impianti: Scatole 50x50x60 mm + Canali 80x40 mm (60 mm)

Massetto di sottofondo in calcestruzzo (70 mm)


Isolante Rockwool Tectum (100 mm)

Guaina impermeabilizzante: Soprema Proteguarda (5 mm)

Magrone (50 mm)

Igloo areato: Daliform Iglù (300 mm)

Legenda dei materiali

 TERRENO	 LARICE
 MAGRONE (CLS)	 POLIURETANO (COLLA)
 LEGNO	 ABETE BIANCO
 GRES PORCELLANATO	 ABETE/CEDRO

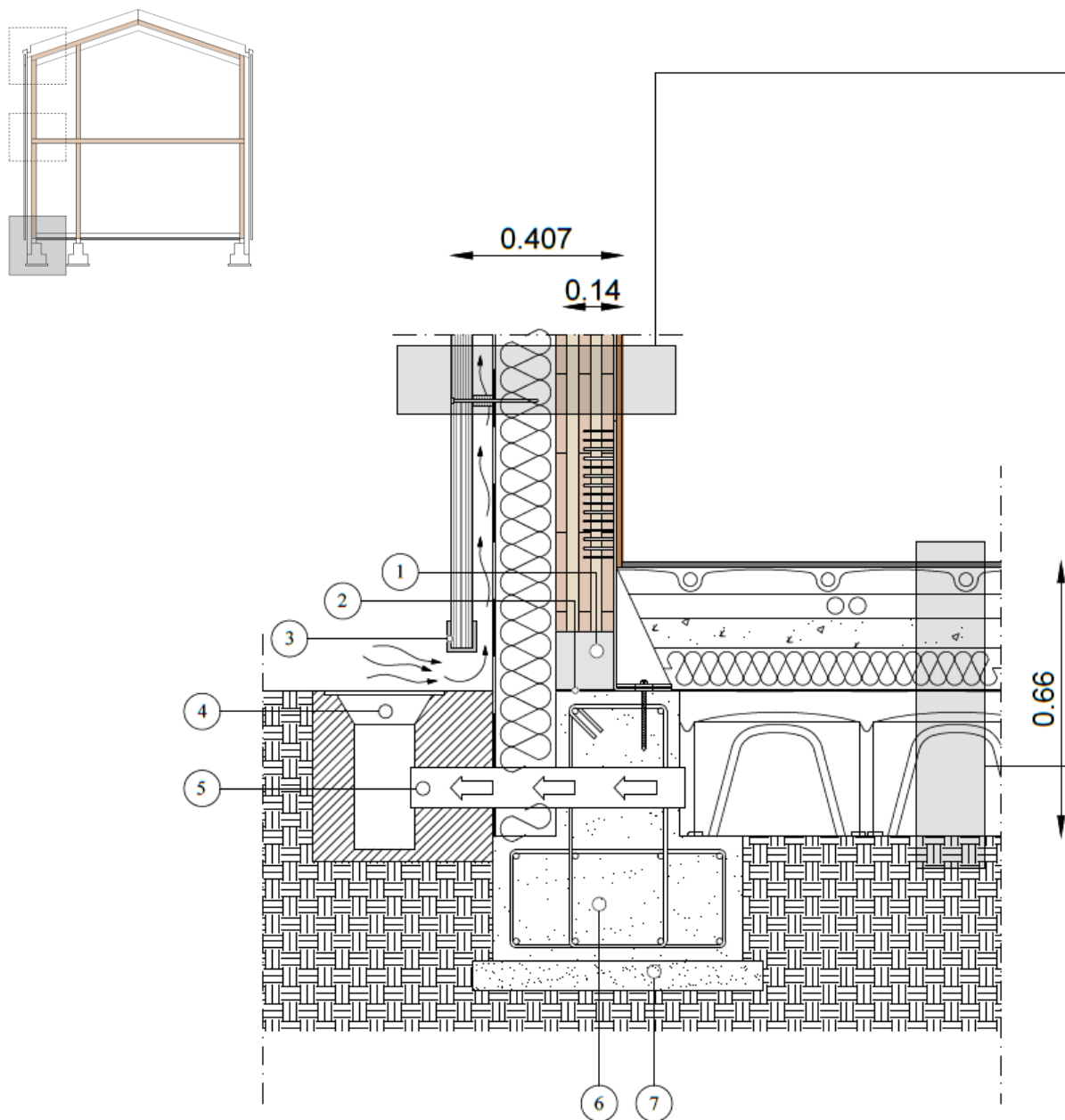


Figura 86: Dettaglio costruttivo del nodo controterra, con indicazione delle stratigrafie e materiali impiegati, su Autocad (elaborazione a cura dell'autrice)

PARETE VERTICALE PORTANTE ESTERNA

Rivestimento di facciata in tavole di legno per esterno - Garabandal Madera (Asturie):

Doghe larice siberiano termotrattato 27×148 mm - spessore 50 mm.

Fissaggio su listelli 28×58 mm (interasse 60 cm)

Intercapedine areata (50 mm)

Guaina traspirante permeabile al vapore certificata CTE - Delta Membranas Ibérica (Madrid): Delta-Vent S (Sd=0,15 m) (5 mm)

Cappotto isolante esterno - Rockwool "Rainscreen Duo Slab (145 mm)

Pannello XLAM EGOIN CLT 140 - 5 strati Certificato ETA-12/0358 (140 mm)

Rivestimento interno: 6mm colla Sikaflex®-221 di Sika España (Poliuretano modificato (MS Polymer), elastico, resistente a umidità e vibrazioni)

Pannello lamellare in abete bianco (*Pinus sylvestris*) CL24h di Derque Maderas (15 mm)

Legenda dei materiali



TERRENO



LARICE



MAGRONE (CLS)



POLIURETANO (COLLA)



GRES PORCELLANATO



LEGNO



ABETE BIANCO

CHIUSURA ORIZZONTALE CONTROTERRA

Gres porcellanato: 10+2 mm fughe (12 mm)

Massetto radiante: Uponor Minitemp argilla espansa + tubi radianti PEX 16x2 (65 mm)

Passaggio impianti: Scatole 50x50x60 mm + Canali 80x40 mm (60 mm)

Massetto di sottofondo in calcestruzzo (70 mm)

Isolante Rockwool Tectum (100 mm)

Guaina impermeabilizzante: Soprema Proteguarda (5 mm)

Magrone (50 mm)

Igloo areato: Daliform Iglù (300 mm)

- ① Domiente di banchina (cordolo di rialzo): Elemento in cls per il sollevamento dell'XLAM dal piano di fondazione a protezione dai ristagni d'acqua (140 mm x 140 mm)
- ② Guaina taglia-muro: Strato bituminoso tra cemento e legno per interrompere la risalita capillare (5 mm)
- ③ Profilo metallico di zoccolatura ad U (spessore 10 mm)
- ④ Bocca di lupo (presa d'aria): elemento prefabbricato per l'ingresso dell'aria nel vespaio aerato
- ⑤ Tubo di ventilazione: condotto di collegamento tra l'esterno e il sistema a Igloo
- ⑥ Trave rovescia di fondazione a T in C.A. con armatura longitudinale 4+4 Ø14, armatura di posizionamento Ø14, staffatura di contenimento Ø8/20 cm (B450C)
- ⑦ Magrone di sottofondazione: calcestruzzo magro di classe C10 per la regolarizzazione del piano di posa (spessore 10 cm)

Riquilificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya,
(Castilla-La Mancha, Spagna)

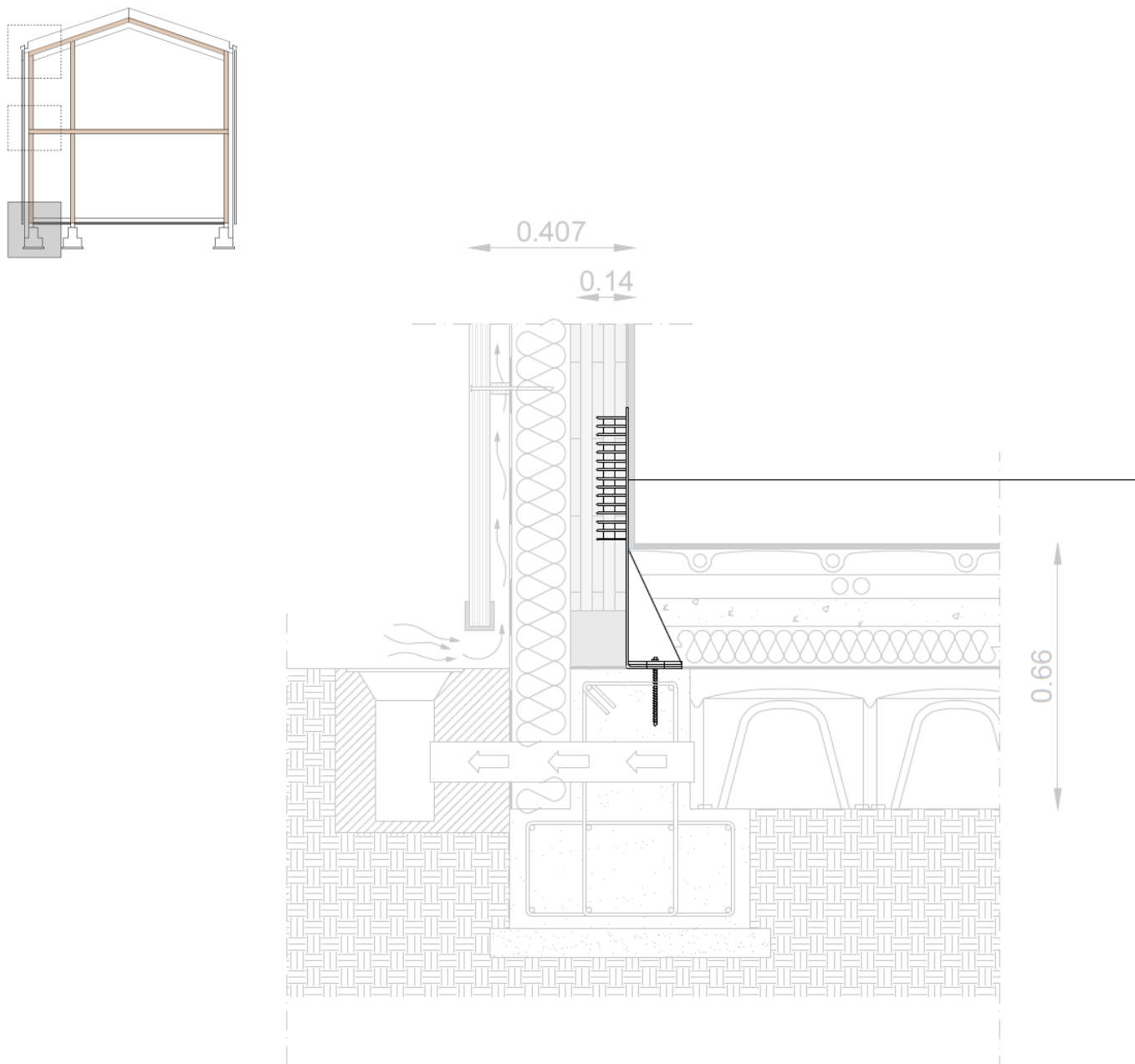


Figura 87: Dettaglio costruttivo del nodo controterra, con indicazione delle connessioni dimensionate, su Autocad
(elaborazione a cura dell'autrice)

PIANO TERRA - SISTEMA DI CONNESSIONE

Fissaggio meccanico della parete XLAM alla fondazione tramite sistemi combinati Rothoblaas:

Connettore a trazione Rothoblaas WHT340 in acciaio al carbonio con zincatura galvanica, per il trasferimento delle forze di trazione dalla parete in XLAM alla fondazione, completo di:

- Fissaggio lato legno: n. 30 viti tipo LBS 5x70 mm ad alta resistenza
- Ripartizione del carico: Rondella rettangolare (Washer) in acciaio per l'ottimizzazione della resistenza a compressione del legno
- Ancoraggio lato calcestruzzo: Barra filettata M16 classe 5.8 (lunghezza 250 mm) inserita nel cordolo di base mediante ancorante chimico bi-componente ad alte prestazioni (tipo Vynil Pro)

Connessione a taglio (non visibile in sezione): Squadrette TITAN TTN240 ad alta capacità di carico, posizionate ad interasse di progetto e fissate con:

- Fissaggio lato legno: n. 36 viti LBS 5x50 ad alta resistenza
- Ancoraggio lato calcestruzzo: n. 2 ancoranti meccanici o chimici ad alte prestazioni (secondo specifica strutturale)

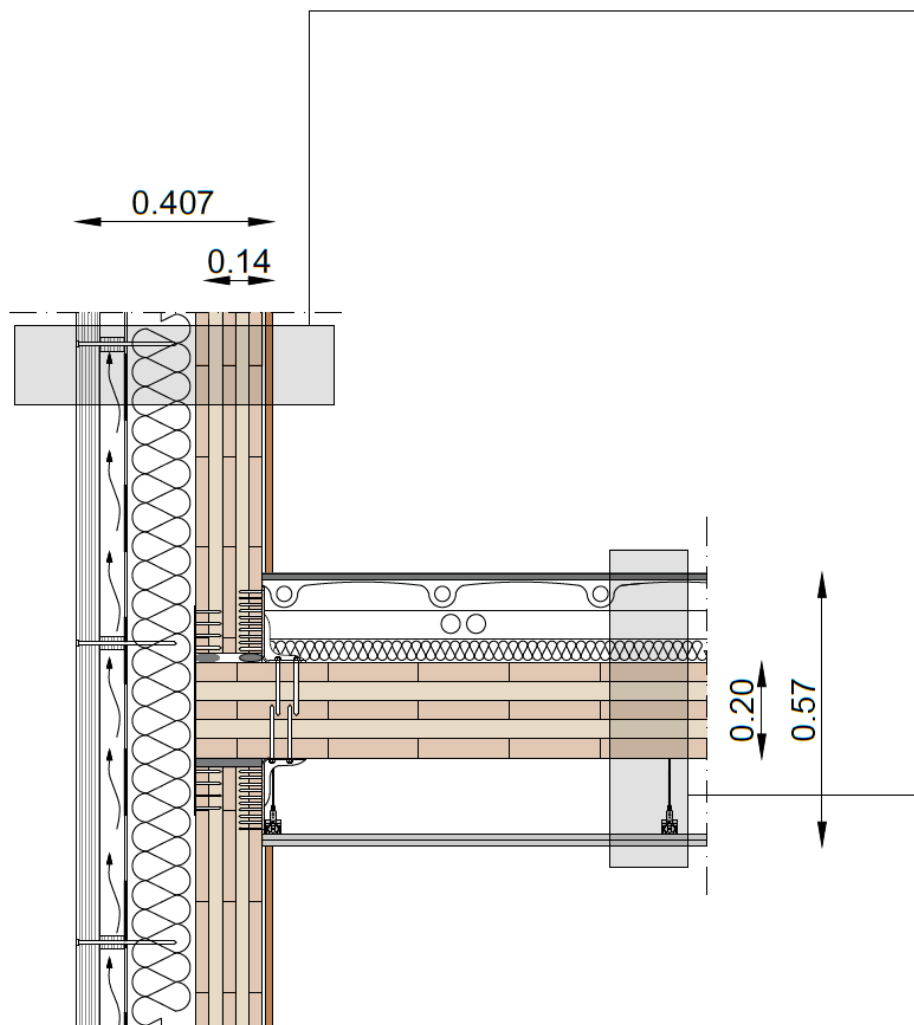
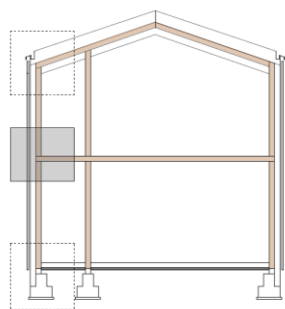


Figura 88: Dettaglio costruttivo del nodo interpiano, con indicazione delle stratigrafie e materiali impiegati, su Autocad (elaborazione a cura dell'autrice)

PARETE VERTICALE PORTANTE ESTERNA

Rivestimento di facciata in tavole di legno per esterno - Garabandal Madera (Asturie):

Doghe larice siberiano termotrattato 27×148 mm - spessore 50 mm.

Fissaggio su listelli 28×58 mm (interasse 60 cm)

Intercapedine areata (50 mm)

Guaina traspirante permeabile al vapore certificata CTE - Delta Membranas Ibérica (Madrid): Delta-Vent S (Sd=0,15 m) (5 mm)

Cappotto isolante esterno - Rockwool "Rainscreen Duo Slab (145 mm)

Pannello XLAM EGOIN CLT 140 - 5 strati Certificato ETA-12/0358 (140 mm)

Rivestimento interno: 6mm colla Sikaflex®-221 di Sika España (Poliuretano modificato (MS Polymer), elastico, resistente a umidità e vibrazioni)

Pannello lamellare in abete bianco (Pinus sylvestris) CL24h di Derque Maderas (15 mm)

Legenda dei materiali



GRES PORCELLANATO



LARICE



METALLO



POLIURETANO (COLLA)



LEGNO



ABETE BIANCO

CHIUSURA ORIZZONTALE INTERPIANO

Gres porcellanato: 10+2 mm fughe (12 mm)

Massetto radiante: Uponor Minitemp argilla espansa + tubi radianti PEX 16x2 (65 mm)

Passaggio impianti: Scatole 50x50x60 mm + Canali 80x40 mm (60 mm)

Isolante acustico: Rockwool Rockmur (50 mm)

Pannello XLAM EGOIN CLT 200 - 5 strati Certificato ETA-12/0358 (200 mm)

Pendino con occhiolo aperto e gancio in acciaio con molla per profili a C tipo Knauf D112

Profilo con orditura metallica zincata a C per controsoffitti autoportanti tipo Knauf

Riqualificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya,
(Castilla-La Mancha, Spagna)

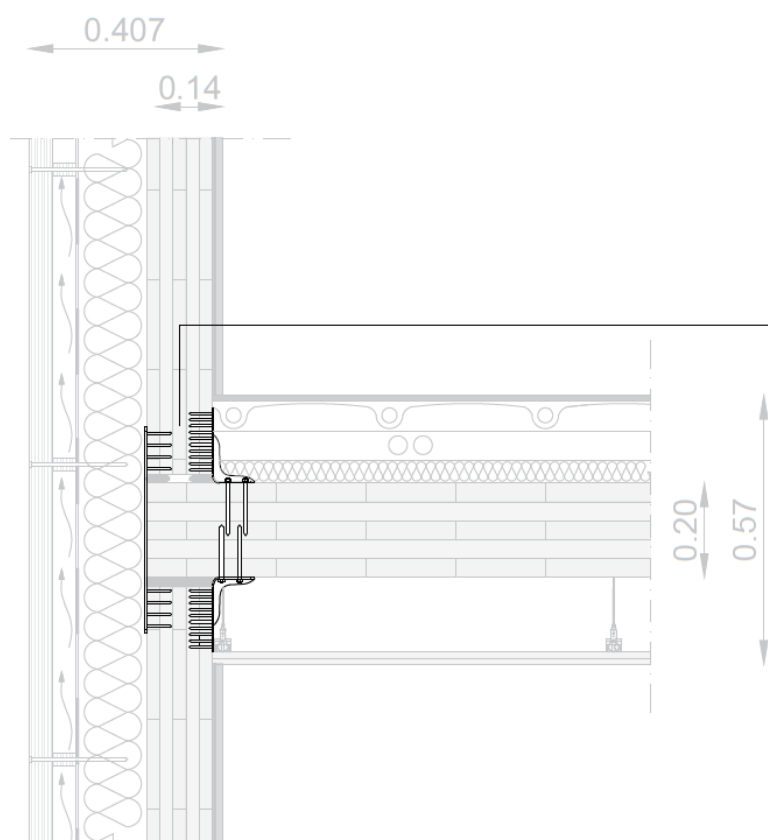
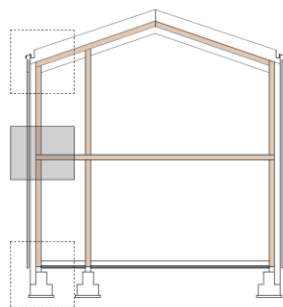


Figura 89: Dettaglio costruttivo del nodo interpiano, con indicazione delle connessioni dimensionate, su Autocad (elaborazione a cura dell'autrice)

PIANO PRIMO - SISTEMA DI CONNESSIONE

Fissaggio meccanico della parete XLAM al solaio interpiano tramite sistemi combinati Rothoblaas:

Connettore Rothoblaas WHT PLATE 440 in acciaio S355 con zincatura galvanica, installato in configurazione esterna a cavallo del giunto interpiano per la trasmissione delle sollecitazioni di trazione tra le pareti XLAM sovrapposte-

Configurazione di fissaggio: La connessione è affidata a un totale di 22 viti LBS Ø 5 x 70 mm ad alta resistenza, ripartite simmetricamente rispetto al giunto:

- Pannello superiore (Piano 1°): n. 11 viti disposte su 3 colonne (schema 4+3+4)
- Pannello inferiore (Piano Terra): n. 11 viti disposte su 3 colonne (schema 4+3+4)

Connessione a taglio: Squadrette Rothoblaas TTN160 ad alta capacità di carico, posizionate ad interasse di progetto e fissate con:

- Fissaggio su legno (superiore): n. 20 viti LBS 5 x 50 mm
- Fissaggio su legno (inferiore): n. 2 viti ad alte prestazioni VGS 11 x 100 mm

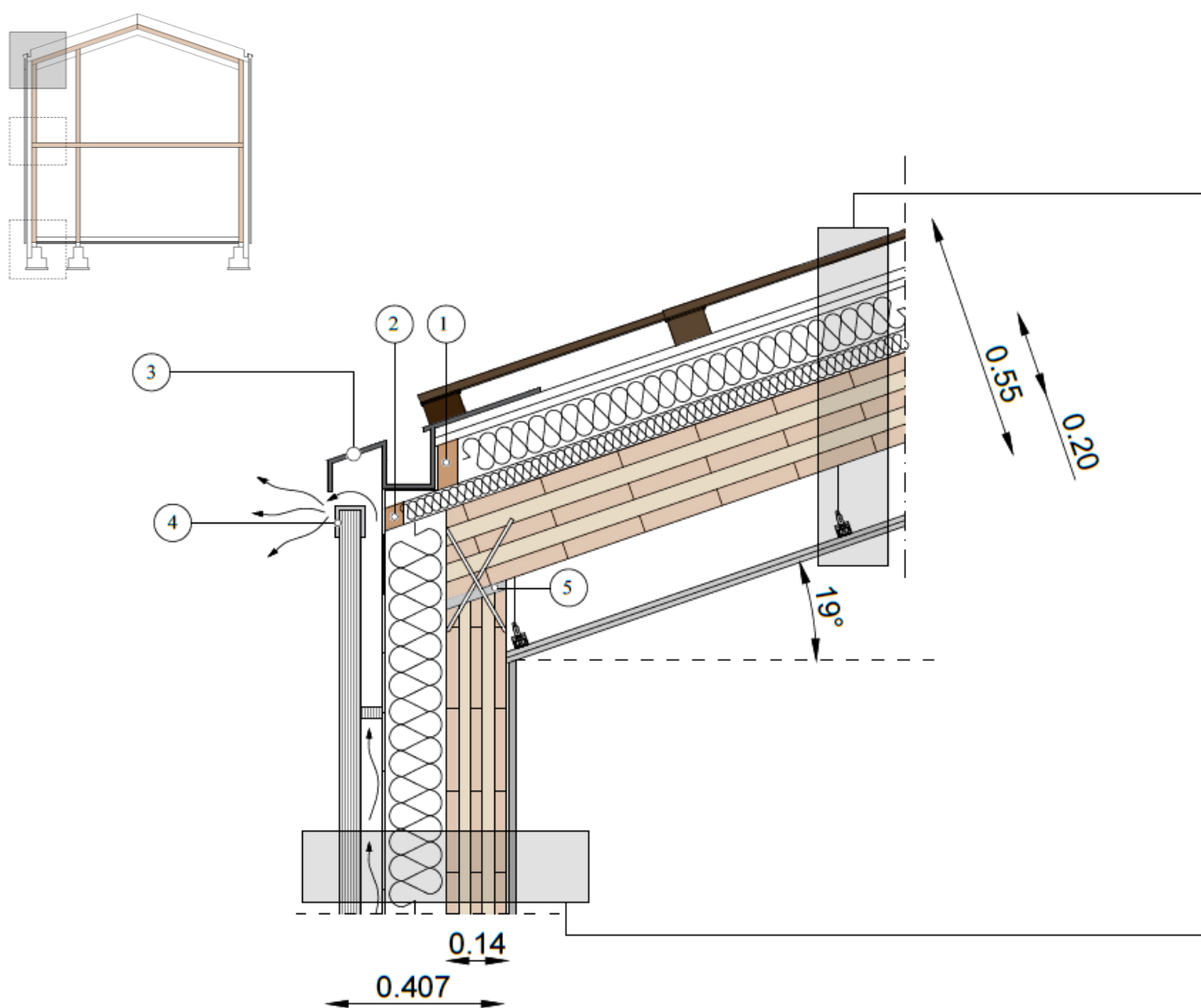


Figura 90: Dettaglio costruttivo del nodo di copertura, con indicazione delle stratigrafie e materiali impiegati, su Autocad (elaborazione a cura dell'autrice)

CHIUSURA ORIZZONTALE DI COPERTURA

Manto di copertura composto da doghe lisce in abete/cedro (25 mm spessore), impregnate in autoclave per lisciatura superficiale e resistenza UV (ditta Incofusta, Valencia)

Serie di listelli portategola in legno (60 mm)

Membrana sottogola antivapore traspirante tipo Fibertherm Multi UDB, 3 strati rinforzati in polipropilene (1mm)

Pannello CementoLegno tipo Betonwood N (spessore 22 mm, dimensioni 1220 x 520 mm)

Pannelli in fibra di legno naturale tipo Fibertherm Isorel (spessore 19 mm, dimensioni 2500 x 1200 mm)

Isolante Rockwool Tectum (100 mm)

Isolante acustico: Rockwool Rockmur (50 mm)

Pannello XLAM EGOIN CLT 200 - 5 strati Certificato ETA-12/0358 (200 mm)

Pendino con occhio aperto e gancio in acciaio con molla per profili a C tipo Knauf D112

Profilo con orditura metallica zincata a C per controsoffitti autoportanti tipo Knauf

Legenda dei materiali

	ABETE/CEDRO		LARICE
	LEGNO		POLIURETANO (COLLA)
	METALLO		ABETE BIANCO

PARETE VERTICALE PORTANTE ESTERNA

Rivestimento di facciata in tavole di legno per esterno - Garabandal Madera (Asturie):

Doghe larice siberiano termotrattato 27x148 mm - spessore 50 mm.

Fissaggio su listelli 28x58 mm (interasse 60 cm)

Intercapedine areata (50 mm)

Guaina traspirante permeabile al vapore certificata CTE - Delta Membranas Ibérica (Madrid): Delta-Vent S (Sd=0,15 m) (5 mm)

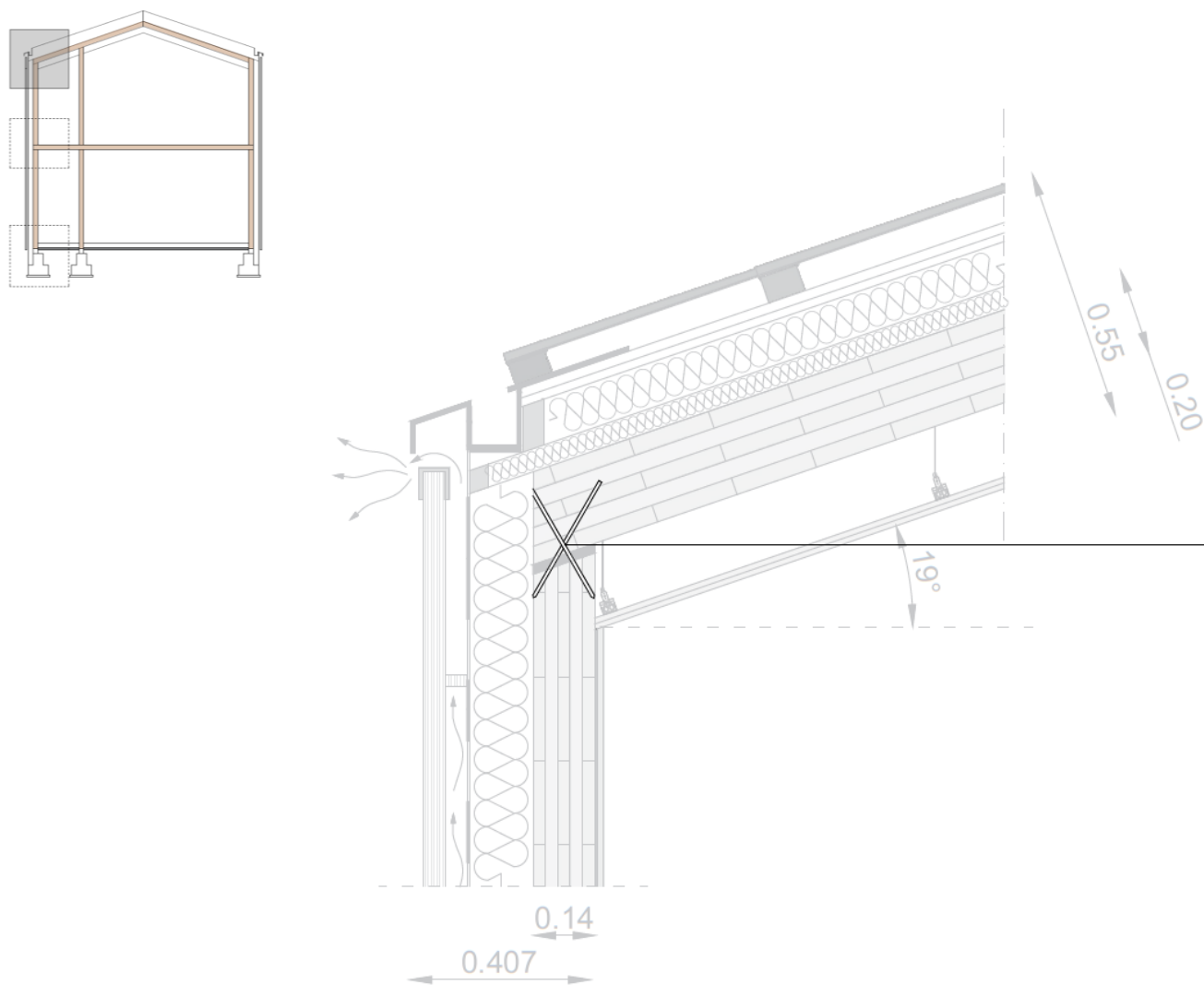
Cappotto isolante esterno - Rockwool "Rainscreen Duo Slab (145 mm)

Pannello XLAM EGOIN CLT 140 - 5 strati Certificato ETA-12/0358 (140 mm)

Rivestimento interno: 6mm colla Sikaflex®-221 di Sika España (Poliuretano modificato (MS Polymer), elastico, resistente a umidità e vibrazioni)

Pannello lamellare in abete bianco (Pinus sylvestris) CL24h di Derque Maderas (15 mm)

- 1 Fermo in legno antiscivolamento dell'isolante acustico Rockwool Tectum dalla copertura (100 mm)
- 2 Fermo in legno antiscivolamento dell'isolante acustico Rockwool Rockmur dalla copertura (50 mm)
- 3 Canale di gronda (integrato)
- 4 Profilo metallico scossalina ad U a protezione dalle intemperie (spessore 10 mm)
- 5 Appoggio contro la propagazione del suono



*Figura 91: Dettaglio costruttivo del nodo di copertura, con indicazione delle connessioni dimensionate, su Autocad
(elaborazione a cura dell'autrice)*

PARETE-COPERTURA - SISTEMA DI CONNESSIONE

Fissaggio meccanico della parete XLAM alla copertura tramite sistemi combinati Rothoblaas:

Connessioni puntuali: viti a tutto filetto Rothoblaas VGS Ø8 mm in acciaio al carbonio con zincatura galvanica, lunghezza L=200 mm, inserite con inclinazione di progetto per massimizzare la resistenza all'estrazione e al taglio (effetto tirante)

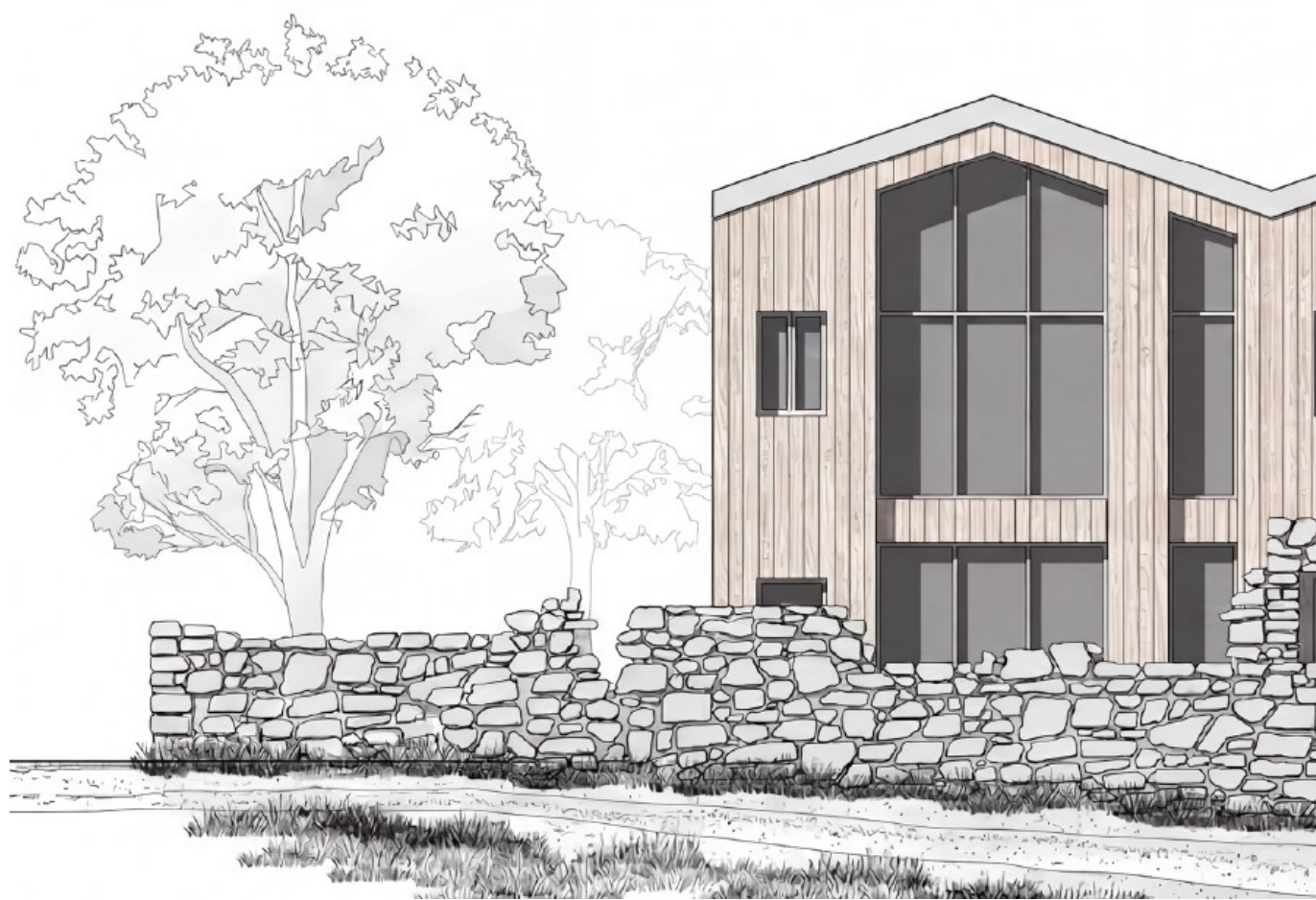




Figura 92: Prospetto della facciata frontale orientata a ovest, indicazione cinta muraria, su Autocad, Photoshop, Firefly (elaborazione a cura dell'autrice)





Figura 93: Prospetto della facciata sul retro orientata a est, su Autocad, Photoshop, Firefly (elaborazione a cura dell'autrice)

9. CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha inteso dimostrare come la riqualficazione del patrimonio edilizio esistente in contesti rurali ad elevato valore storico, come il borgo di Moya in Spagna, non debba necessariamente passare attraverso il ripristino mimetico delle strutture originarie, ma possa essere concepito con l'integrazione di sistemi costruttivi contemporanei in XLAM.

L'efficacia della strategia di recupero è stata validata attraverso un approccio integrato che ha coniugato la visione architettonica, la scelta tecnologica e la verifica della sicurezza strutturale.

1. L'approccio architettonico e la rifunzionalizzazione: l'albergo diffuso

Attraverso l'adozione della strategia "box-in-the-box", è stato possibile preservare la memoria materica della cinta muraria lapidea, delegandola a funzione di guscio architettonico ed estetico, mentre la risposta strutturale e tecnologica è stata affidata a volumi indipendenti in legno XLAM. La scelta della destinazione d'uso ricettiva, declinata nella tipologia dell'albergo diffuso, è scaturita da un'analisi delle esigenze funzionali e del contesto socioeconomico del borgo. Tale soluzione si pone l'obiettivo di coniugare la conservazione del patrimonio storico con l'attivazione di nuovi flussi economici.

2. L'analisi tecnologica e il legame con il territorio spagnolo

Dal punto di vista tecnologico, il progetto ha perseguito i massimi standard di sostenibilità ambientale attraverso soluzioni tecnico-costruttive mirate:

- Definizione delle stratigrafie e analisi energetica: la modellazione condotta mediante il software CE3X ha convalidato il raggiungimento della Classe Energetica A, con indici di consumo di energia primaria non rinnovabile ampiamente inferiori ai limiti fissati per gli edifici NZEB (Nearly Zero Energy Buildings). Tale performance è il risultato di una progettazione accurata dell'involucro, caratterizzata dalla bassa trasmittanza del sistema ligneo accoppiato a materiali isolanti biocompatibili;
- Valorizzazione della filiera locale: un pilastro della strategia progettuale è stato il focus sulla bioeconomia spagnola. La scelta di impiegare pannelli in XLAM e componenti tecnici di produttori nazionali mira a ridurre l'impronta di carbonio derivante dai trasporti e a valorizzare le risorse forestali della penisola iberica, in piena coerenza con i criteri di accesso ai fondi per la rigenerazione territoriale;
- Sostenibilità e ottimizzazione della cantierizzazione: l'adozione di un sistema costruttivo prefabbricato a secco risponde efficacemente alle criticità logistiche proprie dei borghi

storici. Questa scelta permette una drastica riduzione dei tempi di costruzione e dell'impatto ambientale del cantiere, assicurando al contempo la totale reversibilità dell'intervento.

3. La progettazione strutturale: analisi e verifica del sistema XLAM

L'analisi strutturale, condotta in conformità agli Eurocodici e al Código Técnico de la Edificación (CTE), ha confermato la validità del modello a comportamento scatolare del sistema in XLAM:

- Caratterizzazione del pannello di legno massiccio: è stata effettuata una ricerca approfondita sul comportamento meccanico del Cross Laminated Timber (CLT), analizzando la risposta ortotropa del materiale e l'interazione meccanica tra i singoli strati incrociati che compongono l'elemento strutturale;
- Risposta meccanica e sistemi di connessione: la fase di verifica si è concentrata sul dimensionamento delle connessioni metalliche (angolari a taglio e hold-down a trazione), fondamentali per garantire la necessaria duttilità e stabilità globale del sistema. Le verifiche agli Stati Limite Ultimi (SLU) e di Esercizio (SLE) hanno dimostrato come l'elevato rapporto rigidezza-peso dell'XLAM rappresenti una soluzione ottimale per l'intervento, garantendo sicurezza strutturale e fattibilità costruttiva.

Il lavoro svolto dimostra come l'integrazione tra la diagnostica dell'esistente e l'innovazione tecnologica del legno massiccio stratificato possa costituire un modello metodologico di riferimento per il recupero dei borghi in stato di abbandono. Tale approccio non solo garantisce la sicurezza strutturale e la conservazione della memoria materica, ma si allinea coerentemente alle attuali politiche comunitarie e nazionali spagnole volte alla rigenerazione urbana e alla promozione della bioeconomia forestale.

È doveroso sottolineare come il presente lavoro non si configuri come un mero esercizio teorico, ma si inserisca in un progetto reale e concreto, attualmente in fase di avviamento. Il lavoro è, infatti, parte integrante del progetto di recupero del borgo di Moya, ufficialmente affidato all'Universitat Politècnica de València, nell'ambito del quale è stata sviluppata una collaborazione internazionale con il Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura dell'Università degli Studi di Pavia (DICAR).

L'aver lavorato all'interno di un incarico reale ha permesso di operare su un caso di studio emblematico, trasformando l'analisi di un sito caratterizzato da un avanzato degrado strutturale in una proposta progettuale concreta. Per questo, è stata garantita la massima aderenza delle scelte tecniche alle reali necessità del territorio e alle linee guida fissate dall'Ateneo di Valencia per la

rinascita di Moya, rendendo la tesi un contributo operativo e funzionale alla futura esecuzione degli interventi.

Il lavoro svolto apre la strada a ulteriori approfondimenti necessari per il passaggio dalla fase di fattibilità tecnico-economica a quella esecutiva e realizzativa.

– Sviluppi alla scala di edificio

In merito all'oggetto specifico della tesi, si individuano due direttrici principali di approfondimento:

- Integrazione impiantistica di dettaglio: sebbene l'analisi energetica condotta con il software CE3X abbia validato le prestazioni dell'involucro, uno sviluppo futuro essenziale riguarda la progettazione esecutiva dei sistemi impiantistici.

Risulta fondamentale l'integrazione architettonica di impianti alimentati da fonti rinnovabili (quali il solare termico o il fotovoltaico a basso impatto visivo) che rispettino i vincoli paesaggistici del sito. Inoltre, il dimensionamento accurato dei sistemi di Ventilazione Meccanica Controllata (VMC) rappresenterebbe un completamento necessario per ottimizzare i ricambi d'aria e il comfort termo-igrometrico all'interno dei moduli in XLAM;

- Analisi globale dei costi e Life Cycle Costing (LCC): un'analisi economica esaustiva permetterebbe di quantificare con precisione i vantaggi competitivi della prefabbricazione a secco, sia in termini di riduzione dei tempi di cantiere, sia di riduzione degli oneri di gestione e manutenzione. Tale valutazione risulta cruciale per il bilancio economico finale legata ai fondi europei e per definire il piano di gestione atto ad attrarre potenziali partner privati.

– Sviluppi alla scala di borgo e territorio

L'approccio metodologico proposto è scalabile all'intero complesso di Moya, configurandosi come un progetto pilota per la rigenerazione integrale del sito storico:

- Recupero dei volumi esistenti: una naturale prosecuzione della ricerca riguarda lo studio di soluzioni di copertura innovative per i resti di grandi dimensioni, con particolare riferimento al "Convento de la Concepción". L'impiego di sistemi strutturali leggeri in legno potrebbe restituire questi spazi alla fruizione collettiva, trasformandoli in poli culturali o auditorium complementari alla funzione ricettiva analizzata;
- Diversificazione delle destinazioni d'uso: oltre alla funzione turistico-alberghiera, il borgo presenta le potenzialità per accogliere nuove forme di residenzialità e servizi, quali

hub per lo *smart-working* o residenze d'artista. La definizione di scenari d'uso differenziati garantirebbe una vitalità costante del nucleo urbano durante l'intero arco annuale, contrastando efficacemente i fenomeni di stagionalità.

In definitiva, la metodologia costruttiva sviluppata si configura come un sistema aperto e versatile: tale approccio risulta scalabile e declinabile su diverse tipologie edilizie e organismi architettonici presenti nell'intero nucleo di Moya.

Nonostante l'assenza di una procedura di calcolo standardizzata e di riferimenti normativi stringenti per il calcolo e la verifica di strutture in XLAM, il progetto nel suo complesso risulta pienamente verificato sia sotto il profilo strutturale che prestazionale. Si è dimostrata la fattibilità tecnica e la validità strutturale del sistema costruttivo impiegato, proponendolo come nuova e affidabile tecnologia realizzativa per l'ingegneria civile contemporanea.

10. ALLEGATI

- Allegato A: *Certificado de eficiencia energética de edificios* (Report analitico elaborato tramite il software CE3X) (cfr. C.6.7.3.3)
- Allegato B: Calcolo dei carichi assiali agenti sugli elementi strutturali (cfr. C.7.5.5.1)
- Allegato C: Determinazione delle coordinate del centro di massa (cfr. C.7.5.5.2)
- Allegato D: Valutazione della rigidezza dei setti in XLAM e analisi della risposta strutturale (cfr. C.7.5.5.4)
- Allegato E: Analisi delle sollecitazioni (Tagli e Momenti) derivanti dalle combinazioni di carico ordinarie (cfr. C.7.5.5.5)
- Allegato F: Verifiche di resistenza a taglio e torsione sotto combinazioni di carico ordinarie (cfr. C.7.5.6.1)
- Allegato G: Verifiche di resistenza ai carichi assiali sotto combinazioni di carico ordinarie (cfr. C.7.5.6.2)
- Allegato H: Verifiche di resistenza a pressoflessione nel piano del pannello sotto azioni ordinarie (cfr. C.7.5.6.3)
- Allegato I: Verifiche di resistenza a pressoflessione fuori piano (perpendicolare al pannello) sotto azioni ordinarie (cfr. C.7.5.6.4)
- Allegato L: Verifiche di stabilità globale sotto azioni ordinarie (cfr. C.7.5.6.5)
- Allegato M: Analisi delle sollecitazioni (Tagli e Momenti) derivanti dalle combinazioni di carico sismiche (cfr. C.7.5.9)
- Allegato N: Dimensionamento e verifiche di resistenza dei collegamenti a trazione (hold-down) al piano terra (cfr. C.8.9.1.1 – C.8.9.1.2)
- Allegato O: Dimensionamento e verifiche di resistenza dei collegamenti a taglio (angle brackets / squadrette) al piano terra (cfr. C.8.9.1.3 – C.8.9.1.4)
- Allegato P: Dimensionamento e verifiche di resistenza dei collegamenti a trazione (hold-down) al piano primo (cfr. C.8.9.2.1 – C.8.9.2.2)
- Allegato Q: Dimensionamento e verifiche di resistenza dei collegamenti a taglio (angle brackets / squadrette) al piano primo (cfr. C.8.9.2.3 – C.8.9.2.4)

CERTIFICADO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DE EDIFICIOS

IDENTIFICACIÓN DEL EDIFICIO O DE LA PARTE QUE SE CERTIFICA:

Nombre del edificio	Certificazione energetica Moya		
Dirección	Conjunto historico Moya		
Municipio	Cuenca	Código Postal	16338
Provincia	Cuenca	Comunidad Autónoma	Castilla - La Mancha
Zona climática	D2	Año construcción	2026
Normativa vigente (construcción / rehabilitación)	CTE 2013		
Referencia/s catastral/es	16144A04200255		

Tipo de edificio o parte del edificio que se certifica:

<input type="radio"/> Edificio de nueva construcción	<input checked="" type="radio"/> Edificio Existente
<input checked="" type="radio"/> Vivienda <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> Unifamiliar <input checked="" type="radio"/> Bloque <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> Bloque completo <input checked="" type="radio"/> Vivienda individual 	<input type="radio"/> Terciario <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> Edificio completo <input type="radio"/> Local

DATOS DEL TÉCNICO CERTIFICADOR:

Nombre y Apellidos	Giulia Mutti	NIF(NIE)	29173818C
Razón social	Giulia Mutti	NIF	29173818C
Domicilio	Camino de Vera s/n		
Municipio	Valencia	Código Postal	46022
Provincia	Valencia	Comunidad Autónoma	Comunidad Valenciana
e-mail:	giulia.mutti03@universitadipavia.it	Teléfono	609148998
Titulación habilitante según normativa vigente	Arquitecta técnica		
Procedimiento reconocido de calificación energética utilizado y versión:	CEXv2.3		

CALIFICACIÓN ENERGÉTICA OBTENIDA:

CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/m ² año]	EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO [kgCO ₂ / m ² año]

El técnico abajo firmante declara responsablemente que ha realizado la certificación energética del edificio o de la parte que se certifica de acuerdo con el procedimiento establecido por la normativa vigente y que son ciertos los datos que figuran en el presente documento, y sus anexos:

Fecha: 04/04/2026

Firma del técnico certificador

Anexo I. Descripción de las características energéticas del edificio.

Anexo II. Calificación energética del edificio.

Anexo III. Recomendaciones para la mejora de la eficiencia energética.

Anexo IV. Pruebas, comprobaciones e inspecciones realizadas por el técnico certificador.



Registro del Órgano Territorial Competente:

ANEXO I DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DEL EDIFICIO

En este apartado se describen las características energéticas del edificio, envolvente térmica, instalaciones, condiciones de funcionamiento y ocupación y demás datos utilizados para obtener la calificación energética del edificio.

1. SUPERFICIE, IMAGEN Y SITUACIÓN

Superficie habitable [m ²]	130.4
--	-------

Imagen del edificio	Plano de situación
	

2. ENVOLVENTE TÉRMICA

Cerramientos opacos

Nombre	Tipo	Superficie [m ²]	Transmitancia [W/m ² ·K]	Modo de obtención
Cubierta con aire - a 2 aguas	Cubierta	103.5	0.14	Conocidas
Muro de fachada Y01	Fachada	87.96	0.15	Conocidas
Muro de fachada Y04	Fachada	87.96	0.15	Conocidas
Muro de fachada P01	Fachada	15.14	0.15	Conocidas
Muro de fachada P02	Fachada	19.24	0.15	Conocidas
Suelo con terreno	Suelo	102.33	0.27	Por defecto

Huecos y lucernarios

Nombre	Tipo	Superficie [m ²]	Transmitancia [W/m ² ·K]	Factor solar	Modo de obtención. Transmitancia	Modo de obtención. Factor solar
Hueco 1	Hueco	5.06	1.05	0.19	Conocido	Conocido
Hueco 2	Hueco	18.55	1.05	0.19	Conocido	Conocido
Hueco 3	Hueco	5.06	1.05	0.19	Conocido	Conocido
Hueco 4	Hueco	5.06	1.05	0.19	Conocido	Conocido
Hueco 5	Hueco	18.55	1.05	0.19	Conocido	Conocido
Hueco 6	Hueco	0.96	1.05	0.19	Conocido	Conocido

3. INSTALACIONES TÉRMICAS

Generadores de calefacción

Nombre	Tipo	Potencia nominal [kW]	Rendimiento Estacional [%]	Tipo de Energía	Modo de obtención
Calefacción y refrigeración	Bomba de Calor		152.9	Electricidad	Estimado
TOTALES	Calefacción				

Generadores de refrigeración

Nombre	Tipo	Potencia nominal [kW]	Rendimiento Estacional [%]	Tipo de Energía	Modo de obtención
Calefacción y refrigeración	Bomba de Calor		170.9	Electricidad	Estimado
TOTALES	Refrigeración				

Instalaciones de Agua Caliente Sanitaria

Demanda diaria de ACS a 60° (litros/día)	224.0
--	-------

Nombre	Tipo	Potencia nominal [kW]	Rendimiento Estacional [%]	Tipo de Energía	Modo de obtención
Equipo ACS	Caldera Condensación		98.0	Electricidad	Conocido
TOTALES	ACS				

6. ENERGÍAS RENOVABLES

Térmica

Nombre	Consumo de Energía Final, cubierto en función del servicio asociado [%]			Demanda de ACS cubierta [%]
	Calefacción	Refrigeración	ACS	
Contribuciones energéticas	-	-	80.0	-
TOTAL	-	-	80.0	-

Eléctrica

Nombre	Energía eléctrica generada y autoconsumida [kWh/año]
Contribuciones energéticas	3500.0
TOTAL	3500.0

ANEXO II CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO

Zona climática	D2	Uso	Residencial
----------------	----	-----	-------------

1. CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO EN EMISIONES

INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES			
	7.5 A	CALEFACCIÓN		ACS	
		<i>Emisiones calefacción</i> [kgCO ₂ /m ² año]	C	<i>Emisiones ACS</i> [kgCO ₂ /m ² año]	E
		10.72		3.32	
		REFRIGERACIÓN		ILUMINACIÓN	
<i>Emisiones globales</i> [kgCO ₂ /m ² año]	<i>Emisiones refrigeración</i> [kgCO ₂ /m ² año]	D	<i>Emisiones iluminación</i> [kgCO ₂ /m ² año]	-	
	2.37		-		

La calificación global del edificio se expresa en términos de dióxido de carbono liberado a la atmósfera como consecuencia del consumo energético del mismo.

	kgCO ₂ /m ² año	kgCO ₂ /año
<i>Emisiones CO₂ por consumo eléctrico</i>	7.53	981.83
<i>Emisiones CO₂ por otros combustibles</i>	0.00	0.00

2. CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO EN CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE

Por energía primaria no renovable se entiende la energía consumida por el edificio procedente de fuentes no renovables que no ha sufrido ningún proceso de conversión o transformación.

INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES			
	44.4 B	CALEFACCIÓN		ACS	
		<i>Energía primaria calefacción</i> [kWh/m ² año]	C	<i>Energía primaria ACS</i> [kWh/m ² año]	E
		63.28		19.62	
		REFRIGERACIÓN		ILUMINACIÓN	
<i>Consumo global de energía primaria no renovable</i> [kWh/m ² año]	<i>Energía primaria refrigeración</i> [kWh/m ² año]	F	<i>Energía primaria iluminación</i> [kWh/m ² año]	-	
	14.00		-		

3. CALIFICACIÓN PARCIAL DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN

La demanda energética de calefacción y refrigeración es la energía necesaria para mantener las condiciones internas de confort del edificio.

DEMANDA DE CALEFACCIÓN		DEMANDA DE REFRIGERACIÓN			
	49.5 D		12.2 E		
				<i>Demanda de calefacción</i> [kWh/m ² año]	<i>Demanda de refrigeración</i> [kWh/m ² año]

El indicador global es resultado de la suma de los indicadores parciales más el valor del indicador para consumos auxiliares, si los hubiera (sólo ed. terciarios, ventilación, bombeo, etc...). La energía eléctrica autoconsumida se descuenta únicamente del indicador global, no así de los valores parciales

ANEXO III
RECOMENDACIONES PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Apartado no definido

**ANEXO IV
PRUEBAS, COMPROBACIONES E INSPECCIONES REALIZADAS POR EL
TÉCNICO CERTIFICADOR**

Se describen a continuación las pruebas, comprobaciones e inspecciones llevadas a cabo por el técnico certificador durante el proceso de toma de datos y de calificación de la eficiencia energética del edificio, con la finalidad de establecer la conformidad de la información de partida contenida en el certificado de eficiencia energética.

Fecha de realización de la visita del técnico certificador	04/04/2026
---	-------------------

COMENTARIOS DEL TÉCNICO CERTIFICADOR

ALLEGATO B

TABELLA MURI PIANO PRIMO

MURI IN DIREZIONE X

Pareti X	b [m]	l [m]	Area muro P1 [m2]	h P1 [m]	Area muro + [m2]	h + [m]	Area copertura SX (sopra) [m2]	Area copertura DX (sotto) [m2]
X01	0.18	6.57	1.20	2.90	1.20	1.17	9.00	4.97
X02	0.18	4.27	0.78	2.90	0.78	0.82	3.82	2.65
X03	0.18	5.00	0.91	2.90	0.91	1.02	2.54	6.60

MURI IN DIREZIONE Y

Pareti Y	b [m]	l [m]	Area muro [m2]	h [m]	Area muro + [m2]	h + [m]	Area copertura SX [m2]	Area copertura DX [m2]
Y01	0.18	14.78	2.69	2.90	2.69		0.00	11.72
Y02	0.18	6.33	1.15	2.90	1.15	0.56	3.62	13.57
Y03	0.18	4.75	0.86	2.90	0.86	0.84	2.24	3.76
Y04	0.18	14.78	2.69	2.90	2.69		16.26	0.00

TABELLA MURI PIANO TERRA

MURI IN DIREZIONE X

Elemento	b [m]	l [m]	Area muro [m2]	h [m]	Area scala SX (sopra) [m2]	Area scala DX (sotto) [m2]	Area solaio SX (sopra) [m2]	Area solaio DX (sotto) [m2]
X01	0.18	6.57	1.20	2.67			9.00	4.97
X02	0.18	4.27	0.78	2.67		2.65	3.82	
X03	0.18	5.00	0.91	2.67	1.41		1.13	6.60

MURI IN DIREZIONE Y

Elemento	b [m]	l [m]	A [m2]	h [m]	Area scala SX (sopra) [m2]	Area scala DX (sotto) [m2]	Area solaio SX [m2]	Area solaio DX [m2]
Y01	0.18	14.78	2.69	2.67		4.37	0.00	7.38
Y02	0.18	6.33	1.15	2.67	3.62		0.00	13.57
Y03	0.18	4.75	0.86	2.67	0.36		1.88	3.76
Y04	0.18	14.78	2.69	2.67			16.26	0.00

Riquilificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya,
(Castilla-La Mancha, Spagna)

TABELLA MURI PIANO PRIMO

P Parete /m2]	P parete + [KN/m2]	P Copertura [KN/m2]	P scala [KN/m2]	N Parete [KN]	N SX [KN]	N DX [KN]	N sommità [KN]	N base [KN]	Mv [KNm]
15.81	6.39	4.40	7.44	26.53	39.59	21.86	61.45	87.98	
15.81	4.48	4.40	7.44	15.76	16.80	11.66	28.46	44.22	
15.81	5.57	4.40	7.44	19.45	11.17	29.03	40.20	59.66	

191.85

P Parete /m2]	P parete + [KN/m2]	P Copertura [KN/m2]	P scala [KN/m2]	N Parete [KN]	N SX [KN]	N DX [KN]	N sommità [KN]	N base [KN]	Mv [KNm]
15.81	0.00	4.40	7.44	42.52	0.00	51.55	51.55	94.07	24.94
15.81	3.06	4.40	7.44	21.73	15.92	59.69	75.61	97.34	
15.81	4.59	4.40	7.44	17.63	9.85	16.54	26.39	44.02	
15.81	0.00	4.40	7.44	42.52	71.52	0.00	71.52	114.04	24.94

349.48

TABELLA MURI PIANO TERRA

P Parete [N/m2]	P Solaio [KN/m2]	P scala [KN/m2]	N Parete [KN]	N SX [KN]	N DX [KN]	N sommità [KN]	N base [KN]	Mv [KNm]
14.59	6.72	7.44	17.44	60.51	33.41	181.90	199.34	
14.59	6.72	7.44	11.34	25.68	19.73	89.63	100.97	
14.59	6.72	7.44	13.28	18.09	44.37	122.12	135.40	

42.07

104.28

97.51

435.71

P Parete [N/m2]	P Solaio [KN/m2]	P scala [KN/m2]	N Parete [KN]	N SX [KN]	N DX [KN]	N sommità [KN]	N base [KN]	Mv [KNm]
14.59	6.72	7.44	39.26	0.00	82.14	176.22	215.47	24.94
14.59	6.72	7.44	16.81	26.95	91.23	215.52	232.34	
14.59	6.72	7.44	12.62	15.32	25.28	84.62	97.24	
14.59	6.72	7.44	39.26	109.32	0.00	223.36	262.62	24.94

107.95

151.58

198.65

807.66

ALLEGATO C

PIANO PRIMO

PARETI X	b [m]	l [m]	A [m ²]	Xi [m]	Yi [m]	Ntot [kN]	N*Xi [kNm]	N*Yi [kNm]
X01	0.18	6.57	1.20	3.49	11.08	87.98	307.04	974.77
X02	0.18	4.27	0.78	2.34	7.93	44.22	103.48	350.68
X03	0.18	5.00	0.91	4.09	6.33	59.66	243.99	377.62

PARETI Y	b [m]	l [m]	A [m ²]	Xi [m]	Yi [m]	Ntot [kN]	N*Xi [kNm]	N*Yi [kNm]
Y01	0.18	14.78	2.69	0.21	7.39	94.07	18.47	695.19
Y02	0.18	6.33	1.15	1.79	3.06	97.34	174.25	297.88
Y03	0.18	4.75	0.86	4.49	8.7	44.02	197.66	382.99
Y04	0.18	14.78	2.69	6.78	7.39	114.04	773.20	842.76

CENTRO DI MASSA

Xm [m]	Ym [m]
3.359	7.245

PIANO TERRA

PARETI X	b [m]	l [m]	A [m ²]	Xi [m]	Yi [m]	Ntot [kN]	N*Xi [kNm]	N*Yi [kNm]
X01	0.18	6.57	1.20	3.49	11.08	199.34	695.69	2208.68
X02	0.18	4.27	0.78	2.34	7.93	100.97	236.27	800.71
X03	0.18	5.00	0.91	4.09	6.33	135.40	553.79	857.09

PARETI Y	b [m]	l [m]	A [m ²]	Xi [m]	Yi [m]	Ntot [kN]	N*Xi [kNm]	N*Yi [kNm]
Y01	0.18	14.78	2.69	0.21	7.39	215.47	45.25	1592.36
Y02	0.18	6.33	1.15	1.79	3.06	232.34	415.88	710.95
Y03	0.18	4.75	0.86	4.49	8.7	97.24	436.59	845.95
Y04	0.18	14.78	2.69	6.78	7.39	262.62	1780.53	1940.73

CENTRO DI MASSA

Xm [m]	Ym [m]
3.349	7.203

ALLEGATO D

PIANO PRIMO

PARETI X	b [mm]	l [mm]	A [mm ²]	H [mm]	Gmenan [N/mm ²]	E0mean [N/mm ²]	Inet [mm ⁴]	Nang [-]	kang N/mm	nHD [-]	kHD N/mm
X01	100	6567	656700	3000.00	690	11000	2.36E+12	7	7500	2	22000
X02	100	4270	427000	3000.00	690	11000	6.49E+11	5	7500	2	22000
X03	100	5000	500000	3000.00	690	11000	1.04E+12	5	7500	2	22000

PARETI Y	b [mm]	l [mm]	A [mm ²]	H [mm]	Gmenan [N/mm ²]	E0mean [N/mm ²]	Inet [mm ⁴]	Nang [-]	kang N/mm	nHD [-]	kHD N/mm
Y01	100	14780.00	1478000	3000.00	690	11000	2.69E+13	15	7500	4	22000
Y02	100	6330.00	633000	3000.00	690	11000	2.11E+12	7	7500	2	22000
Y03	100	4750.00	475000	3000.00	690	11000	8.93E+11	5	7500	2	22000
Y04	100	14780.00	1478000	3000.00	690	11000	2.69E+13	15	7500	4	22000

PIANO PRIMO

PARETI X	ΔB [mm]	ΔS [mm]	ΔT [mm]	ΔR [mm]	Ki [kN/m]=[N/mm]
X01	3.47E-07	6.62E-06	1.9E-05	9.49E-06	2.82E+04
X02	1.26E-06	1.02E-05	2.67E-05	2.24E-05	1.65E+04
X03	7.85E-07	8.7E-06	2.67E-05	1.64E-05	1.90E+04

PARETI Y	ΔB [mm]	ΔS [mm]	ΔT [mm]	ΔR [mm]	Ki [kN/m]=[N/mm]
Y01	3.04E-08	2.94E-06	8.89E-06	1.87E-06	7.28E+04
Y02	3.87E-07	6.87E-06	1.9E-05	1.02E-05	2.74E+04
Y03	9.16E-07	9.15E-06	2.67E-05	1.81E-05	1.82E+04
Y04	3.04E-08	2.94E-06	8.89E-06	1.87E-06	7.28E+04

PIANO TERRA

PARETI X	b [mm]	l [mm]	A [mm ²]	H [mm]	Gmenan [N/mm ²]	E0mean [N/mm ²]	Inet [mm ⁴]	Nang [-]	kang N/mm	nHD [-]	kHD N/mm
X01	100	6567	656700	2930.00	690	11000	2.36E+12	7	7500	2	22000
X02	100	4270	427000	2930.00	690	11000	6.49E+11	5	7500	2	22000
X03	100	5000	500000	2930.00	690	11000	1.04E+12	5	7500	2	22000

PARETI Y	b [mm]	l [mm]	A [mm ²]	H [mm]	Gmenan [N/mm ²]	E0mean [N/mm ²]	Inet [mm ⁴]	Nang [-]	kang N/mm	nHD [-]	kHD N/mm
Y01	100	14780.00	1478000	2930.00	690	11000	2.69E+13	15	7500	4	22000
Y02	100	6330.00	633000	2930.00	690	11000	2.11E+12	7	7500	2	22000
Y03	100	4750.00	475000	2930.00	690	11000	8.93E+11	5	7500	2	22000
Y04	100	14780.00	1478000	2930.00	690	11000	2.69E+13	15	7500	4	22000

Riquilificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya,
(Castilla-La Mancha, Spagna)

PIANO TERRA

PARETI X	ΔB [mm]	Δs [mm]	ΔT [mm]	ΔR [mm]	Ki [kN/m]=[N/mm]
X01	3.23E-07	6.47E-06	1.9E-05	9.05E-06	2.87E+04
X02	1.17E-06	9.94E-06	2.67E-05	2.14E-05	1.69E+04
X03	7.32E-07	8.49E-06	2.67E-05	1.56E-05	1.94E+04

PARETI Y	ΔB [mm]	Δs [mm]	ΔT [mm]	ΔR [mm]	Ki [kN/m]=[N/mm]
Y01	2.83E-08	2.87E-06	8.89E-06	1.79E-06	7.37E+04
Y02	3.61E-07	6.71E-06	1.9E-05	9.74E-06	2.79E+04
Y03	8.53E-07	8.94E-06	2.67E-05	1.73E-05	1.86E+04
Y04	2.83E-08	2.87E-06	8.89E-06	1.79E-06	7.37E+04

PIANO PRIMO

PARETI IN X

PARETI X	b [m]	l [m]	A [m ²]	Xi [m]	Yi [m]	Kxi [kN/m]=[N/mm]	Kxi*yi [kN]	Kxi*(Yi - Yr) ² [kNm]	Kxi / $\sum Kxi + Kxi*(Yi - Yr)*ey / Jp,tot$ [-]
X01	0.41	6.57	2.67	3.49	11.08	2.82E+04	3.12E+05	1.41E+05	0.07
X02	0.41	4.27	1.74	2.34	7.93	1.65E+04	1.31E+05	1.38E+04	0.35
X03	0.41	5.00	2.03	4.09	6.33	1.90E+04	1.21E+05	1.20E+05	0.58
						6.37E+04		2.75E+05	

PARETI IN Y

PARETI Y	b [m]	l [m]	A [m ²]	Xi [m]	Yi [m]	Kyi [kN/m]=[N/mm]	Kyi*xi [kN]	Kyi*(Xi - Xr) ² [kNm]	Kyi / $\sum Kyi + Kyi*(Xi - Xr)*ex / Jp,tot$ [-]
Y01	0.41	14.78	6.01	0.21	7.39	7.28E+04	1.53E+04	7.16E+05	0.39
Y02	0.41	6.33	2.57	1.79	3.06	2.74E+04	4.90E+04	6.63E+04	0.14
Y03	0.41	4.75	1.93	4.49	8.7	1.82E+04	8.18E+04	2.39E+04	0.09
Y04	0.41	14.78	6.01	6.78	7.39	7.28E+04	4.94E+05	8.59E+05	0.37
						1.91E+05		1.66E+06	

PIANO TERRA

PARETI IN X

PARETI X	b [m]	l [m]	A [m ²]	Xi [m]	Yi [m]	Kxi [kN/m]=[N/mm]	Kxi*yi [kN]	Kxi*(Yi - Yr) ² [kNm]	Kxi / $\sum Kxi + Kxi*(Yi - Yr)*ey / Jp,tot$ [-]
X01	0.41	6.57	2.67	3.49	11.08	2.87E+04	3.18E+05	1.43E+05	0.07
X02	0.41	4.27	1.74	2.34	7.93	1.69E+04	1.34E+05	1.41E+04	0.35
X03	0.41	5.00	2.03	4.09	6.33	1.94E+04	1.23E+05	1.23E+05	0.58
						6.50E+04		2.80E+05	

PARETI IN Y

PARETI Y	b [m]	l [m]	A [m ²]	Xi [m]	Yi [m]	Kyi [kN/m]=[N/mm]	Kyi*xi [kN]	Kyi*(Xi - Xr) ² [kNm]	Kyi / $\sum Kyi + Kyi*(Xi - Xr)*ex / Jp,tot$ [-]
Y01	0.41	14.78	6.01	0.21	7.39	7.37E+04	1.55E+04	7.24E+05	0.39
Y02	0.41	6.33	2.57	1.79	3.06	2.79E+04	4.99E+04	6.75E+04	0.15
Y03	0.41	4.75	1.93	4.49	8.7	1.86E+04	8.35E+04	2.44E+04	0.10
Y04	0.41	14.78	6.01	6.78	7.39	7.37E+04	4.99E+05	8.69E+05	0.37
						1.94E+05		1.68E+06	

ALLEGATO E

COMBINAZIONE A

PARETI X	$K_{xi} / \sum K_{xi} + K_{xi} * (Y_i - Y_r) * e_y / J_{p,tot}$ [-]	V base [kN]	V1 [kN]	V2 [kN]	M base [kNm]	M1 [kNm]	M2 [kNm]
X01	0.07	1.93	1.93	0.65	7.59	1.94	0.00
X02	0.35	9.37	9.37	3.15	36.90	9.44	0.00
X03	0.58	15.63	15.63	5.25	61.55	15.75	0.00

PARETI Y	$K_{yi} / \sum K_{yi} + K_{yi} * (X_i - X_r) * e_x / J_{p,tot}$ [-]	V base [kN]	V1 [kN]	V2 [kN]	M base [kNm]	M1 [kNm]	M2 [kNm]
Y01	0.39	22.17	22.17	7.45	87.30	22.34	0.00
Y02	0.14	8.25	8.25	2.77	32.49	8.32	0.00
Y03	0.09	5.39	5.39	1.81	21.23	5.43	0.00
Y04	0.37	21.20	21.20	7.12	83.50	21.37	0.00

COMBINAZIONE B-C

PARETI X	$K_{xi} / \sum K_{xi} + K_{xi} * (Y_i - Y_r) * e_y / J_{p,tot}$ [-]	V base [kN]	V1 [kN]	V2 [kN]	M base [kNm]	M1 [kNm]	M2 [kNm]
X01	0.07	3.21	3.21	1.08	12.65	3.24	0.00
X02	0.35	15.62	15.62	5.25	61.50	15.74	0.00
X03	0.58	26.05	26.05	8.75	102.58	26.25	0.00

PARETI Y	$K_{yi} / \sum K_{yi} + K_{yi} * (X_i - X_r) * e_x / J_{p,tot}$ [-]	V base [kN]	V1 [kN]	V2 [kN]	M base [kNm]	M1 [kNm]	M2 [kNm]
Y01	0.39	36.95	36.95	12.41	145.50	37.24	0.00
Y02	0.14	13.75	13.75	4.62	54.15	13.86	0.00
Y03	0.09	8.99	8.99	3.02	35.39	9.06	0.00
Y04	0.37	35.34	35.34	11.87	139.17	35.62	0.00

ALLEGATO F

PARETI X	SEZIONE	V _{Ed} [kN]	a [mm]	t ₀ [°] [mm]	t ₉₀ [°] [mm]	t ₀ [°] [mm]	t ₉₀ [°] [mm]	t ₀ [°] [mm]	t ₉₀ [°] [mm]	t _a [*] [mm]	t _b [*] [mm]	t _{tot} [*] [mm]	τ _{0,d} [MPa]	τ _{T,d} [MPa]	f _{vd} [MPa]	f _{Td} [MPa]	τ _{V,d} ≤ f _{V,d,XLAM}
X01	P2-1	1.08	6567	30	20	40	20	30	20	20	20	40	0.0055	0.0110	2.21	0.61	VERIFICATO
	P2-2	1.08	6567	30	20	40	20	30	20	20	20	40	0.0055	0.0110	2.21	0.61	VERIFICATO
	P2-3	1.08	6567	30	20	40	20	30	20	20	20	40	0.0055	0.0110	2.21	0.61	VERIFICATO
	P1-1	3.21	6567	30	20	40	20	30	20	20	20	40	0.0163	0.0326	2.21	0.61	VERIFICATO
	P1-2	3.21	6567	30	20	40	20	30	20	20	20	40	0.0163	0.0326	2.21	0.61	VERIFICATO
	P1-3	3.21	6567	30	20	40	20	30	20	20	20	40	0.0163	0.0326	2.21	0.61	VERIFICATO
X02	P2-1	5.25	4270	30	20	40	20	30	20	20	20	40	0.0410	0.0819	2.21	0.61	VERIFICATO
	P2-2	5.25	4270	30	20	40	20	30	20	20	20	40	0.0410	0.0819	2.21	0.61	VERIFICATO
	P2-3	5.25	4270	30	20	40	20	30	20	20	20	40	0.0410	0.0819	2.21	0.61	VERIFICATO
	P1-1	15.62	4270	30	20	40	20	30	20	20	20	40	0.1219	0.2438	2.21	0.61	VERIFICATO
	P1-2	15.62	4270	30	20	40	20	30	20	20	20	40	0.1219	0.2438	2.21	0.61	VERIFICATO
	P1-3	15.62	4270	30	20	40	20	30	20	20	20	40	0.1219	0.2438	2.21	0.61	VERIFICATO
X03	P2-1	8.75	5000	30	20	40	20	30	20	20	20	40	0.0583	0.1167	2.21	0.61	VERIFICATO
	P2-2	8.75	5000	30	20	40	20	30	20	20	20	40	0.0583	0.1167	2.21	0.61	VERIFICATO
	P2-3	8.75	5000	30	20	40	20	30	20	20	20	40	0.0583	0.1167	2.21	0.61	VERIFICATO
	P1-1	26.05	5000	30	20	40	20	30	20	20	20	40	0.1737	0.3473	2.21	0.61	VERIFICATO
	P1-2	26.05	5000	30	20	40	20	30	20	20	20	40	0.1737	0.3473	2.21	0.61	VERIFICATO
	P1-3	26.05	5000	30	20	40	20	30	20	20	20	40	0.1737	0.3473	2.21	0.61	VERIFICATO

PARETI Y	SEZIONE	N _{Ed} [kN]	b [mm]	t ^{0°} [mm]	t ^{90°} [mm]	t ^{0°} [mm]	t ^{90°} [mm]	t ^{0°} [mm]	t ^{90°} [mm]	t _{ty} [mm]	A _y [mm ²]	σ _{y,c,d} [MPa]	f _{c,0,d} [MPa]	f _{t,0,d} [MPa]	σ _{c,0,d} ≤ f _{c,0,d}	σ _{c,0,d} ≤ f _{t,0,d}
Y01	P2-1	51.55	14780	30	20	40	20	30	20	100	IE+06	0.03	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P2-2	72.81	14780	30	20	40	20	30	20	100	IE+06	0.05	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P2-3	94.07	14780	30	20	40	20	30	20	100	IE+06	0.06	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-1	176.22	14780	30	20	40	20	30	20	100	IE+06	0.12	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-2	195.85	14780	30	20	40	20	30	20	100	IE+06	0.13	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-3	215.47	14780	30	20	40	20	30	20	100	IE+06	0.15	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
Y02	P2-1	75.61	6330	30	20	40	20	30	20	100	633000	0.12	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P2-2	86.48	6330	30	20	40	20	30	20	100	633000	0.14	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P2-3	97.34	6330	30	20	40	20	30	20	100	633000	0.15	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-1	215.52	6330	30	20	40	20	30	20	100	633000	0.34	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-2	223.93	6330	30	20	40	20	30	20	100	633000	0.35	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-3	232.34	6330	30	20	40	20	30	20	100	633000	0.37	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
Y03	P2-1	26.39	4750	30	20	40	20	30	20	100	475000	0.06	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P2-2	35.21	4750	30	20	40	20	30	20	100	475000	0.07	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P2-3	44.02	4750	30	20	40	20	30	20	100	475000	0.09	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-1	84.62	4750	30	20	40	20	30	20	100	475000	0.18	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-2	90.93	4750	30	20	40	20	30	20	100	475000	0.19	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-3	97.24	4750	30	20	40	20	30	20	100	475000	0.20	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
Y04	P2-1	71.52	14780	30	20	40	20	30	20	100	IE+06	0.05	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P2-2	92.78	14780	30	20	40	20	30	20	100	IE+06	0.06	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P2-3	114.04	14780	30	20	40	20	30	20	100	IE+06	0.08	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-1	223.36	14780	30	20	40	20	30	20	100	IE+06	0.15	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-2	242.99	14780	30	20	40	20	30	20	100	IE+06	0.16	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-3	262.62	14780	30	20	40	20	30	20	100	IE+06	0.18	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO

PARETI Y	SEZIONE	N _{Ed} [kN]	b [mm]	t ₀ [°] [mm]	t ₉₀ [°] [mm]	t ₀ [°] [mm]	t ₉₀ [°] [mm]	t ₀ [°] [mm]	t ₉₀ [°] [mm]	t _{ix} [mm]	A _x [mm ²]	σ _{x,c,d} [MPa]	f _{c,0,d} [MPa]	f _{t,0,d} [MPa]	σ _{c,0,d} ≤ f _{c,0,d}	σ _{c,0,d} ≤ f _{t,0,d}
Y01	P2-1	51.55	14780	30	20	40	20	30	100	40	591200	0.05	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P2-2	72.81	14780	30	20	40	20	30	100	40	591200	0.05	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P2-3	94.07	14780	30	20	40	20	30	100	40	591200	0.05	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-1	176.22	14780	30	20	40	20	30	100	40	591200	0.05	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-2	195.85	14780	30	20	40	20	30	100	40	591200	0.05	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-3	215.47	14780	30	20	40	20	30	100	40	591200	0.05	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
Y02	P2-1	75.61	6330	30	20	40	20	30	100	40	253200	0.12	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P2-2	86.48	6330	30	20	40	20	30	100	40	253200	0.12	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P2-3	97.34	6330	30	20	40	20	30	100	40	253200	0.12	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-1	215.52	6330	30	20	40	20	30	100	40	253200	0.12	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-2	223.93	6330	30	20	40	20	30	100	40	253200	0.12	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-3	232.34	6330	30	20	40	20	30	100	40	253200	0.12	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
Y03	P2-1	26.39	4750	30	20	40	20	30	100	40	190000	0.16	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P2-2	35.21	4750	30	20	40	20	30	100	40	190000	0.16	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P2-3	44.02	4750	30	20	40	20	30	100	40	190000	0.16	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-1	84.62	4750	30	20	40	20	30	100	40	190000	0.16	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-2	90.93	4750	30	20	40	20	30	100	40	190000	0.16	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-3	97.24	4750	30	20	40	20	30	100	40	190000	0.16	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
Y04	P2-1	71.52	14780	30	20	40	20	30	100	40	591200	0.05	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P2-2	92.78	14780	30	20	40	20	30	100	40	591200	0.05	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P2-3	114.04	14780	30	20	40	20	30	100	40	591200	0.05	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-1	223.36	14780	30	20	40	20	30	100	40	591200	0.05	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-2	242.99	14780	30	20	40	20	30	100	40	591200	0.05	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO
	P1-3	262.62	14780	30	20	40	20	30	100	40	591200	0.05	11.59	7.72	VERIFICATO	VERIFICATO

ALLEGATO H

PARETI X	SEZIONE	M [kNm]	Mv [kNm]	MEd [kNm]	b [mm]	l [mm]	ty [mm]	J [mm ⁴]	W [mm ³]	σ _{m,d} [MPa]	f _{m,d} [MPa]	σ _{c,0,d} [MPa]	f _{c,0,d} [MPa]	$\frac{(\sigma_{c,0,d}/f_{c,0,d})^2}{2}$	km*(σ _{m,d} /f _{m,d})	σ _{c,0,d} ≤ f _{c,0,d}
X01	P2-1	0.00		0.00	140.00	6567.00	100	2.36E+12	7.19E+08	0.00	14.57	0.09	11.59	0.0000652	0.00000	VERIFICATO
	P2-2	1.62		1.62	140.00	6567.00	100	2.36E+12	7.19E+08	0.00	14.57	0.11	11.59	0.0000964	0.00011	VERIFICATO
	P2-3	3.24		3.24	140.00	6567.00	100	2.36E+12	7.19E+08	0.00	14.57	0.13	11.59	0.0001337	0.00022	VERIFICATO
	P1-1	3.24		3.24	140.00	6567.00	100	2.36E+12	7.19E+08	0.00	14.57	0.28	11.59	0.0005715	0.00022	VERIFICATO
	P1-2	7.94		7.94	140.00	6567.00	100	2.36E+12	7.19E+08	0.01	14.57	0.29	11.59	0.0006276	0.00053	VERIFICATO
	P1-3	12.65		12.65	140.00	6567.00	100	2.36E+12	7.19E+08	0.02	14.57	0.30	11.59	0.0006864	0.00085	VERIFICATO
X02	P2-1	0.00		0.00	140.00	4270.00	100	6.49E+11	3.04E+08	0.00	14.57	0.07	11.59	0.0000331	0.00000	VERIFICATO
	P2-2	7.87		7.87	140.00	4270.00	100	6.49E+11	3.04E+08	0.03	14.57	0.09	11.59	0.0000540	0.00124	VERIFICATO
	P2-3	15.74		15.74	140.00	4270.00	100	6.49E+11	3.04E+08	0.05	14.57	0.10	11.59	0.0000799	0.00249	VERIFICATO
	P1-1	15.74		15.74	140.00	4270.00	100	6.49E+11	3.04E+08	0.05	14.57	0.21	11.59	0.0003282	0.00249	VERIFICATO
	P1-2	38.62		38.62	140.00	4270.00	100	6.49E+11	3.04E+08	0.13	14.57	0.22	11.59	0.0003711	0.00611	VERIFICATO
	P1-3	61.50		61.50	140.00	4270.00	100	6.49E+11	3.04E+08	0.20	14.57	0.24	11.59	0.0004165	0.00973	VERIFICATO
X03	P2-1	0.00		0.00	140.00	5000.00	100	1.04E+12	4.17E+08	0.00	14.57	0.08	11.59	0.0000482	0.00000	VERIFICATO
	P2-2	13.13		13.13	140.00	5000.00	100	1.04E+12	4.17E+08	0.03	14.57	0.10	11.59	0.0000743	0.00151	VERIFICATO
	P2-3	26.25		26.25	140.00	5000.00	100	1.04E+12	4.17E+08	0.06	14.57	0.12	11.59	0.0001060	0.00303	VERIFICATO
	P1-1	26.25		26.25	140.00	5000.00	100	1.04E+12	4.17E+08	0.06	14.57	0.24	11.59	0.0004444	0.00303	VERIFICATO
	P1-2	64.42		64.42	140.00	5000.00	100	1.04E+12	4.17E+08	0.15	14.57	0.26	11.59	0.0004940	0.00743	VERIFICATO
	P1-3	102.58		102.58	140.00	5000.00	100	1.04E+12	4.17E+08	0.25	14.57	0.27	11.59	0.0005463	0.01183	VERIFICATO

Riqualificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya,
(Castilla-La Mancha, Spagna)

PARETI Y	SEZIONE	M [kNm]	Mv [kNm]	MEd [kNm]	b [mm]	l [mm]	ty [mm]	J [mm ⁴]	W [mm ³]	σm,d [MPa]	fmd [MPa]	σc,0,d [MPa]	fc,0,d [MPa]	$(\sigma_{c,0,d}/f_{c,0,d})^2$	km*(σm,d/fm,d)	σc,0,d ≤ fc,0,d
Y01	P2-1	0.00		0.00	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.00	14.57	0.03	11.59	0.000009	0.000000	VERIFICATO
	P2-2	18.62	24.94	43.56	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.01	14.57	0.05	11.59	0.000018	0.000575	VERIFICATO
	P2-3	37.24		37.24	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.01	14.57	0.06	11.59	0.000030	0.000492	VERIFICATO
	P1-1	37.24		37.24	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.01	14.57	0.12	11.59	0.000106	0.000492	VERIFICATO
	P1-2	91.37	24.94	116.31	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.03	14.57	0.13	11.59	0.000131	0.001535	VERIFICATO
	P1-3	145.50		145.50	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.04	14.57	0.15	11.59	0.000158	0.001921	VERIFICATO
Y02	P2-1	0.00		0.00	140.00	6330.00	100	2.11E+12	6.68E+08	0.00	14.57	0.12	11.59	0.000106	0.000000	VERIFICATO
	P2-2	6.93	0	6.93	140.00	6330.00	100	2.11E+12	6.68E+08	0.01	14.57	0.14	11.59	0.000139	0.000499	VERIFICATO
	P2-3	13.86		13.86	140.00	6330.00	100	2.11E+12	6.68E+08	0.02	14.57	0.15	11.59	0.000176	0.000997	VERIFICATO
	P1-1	13.86		13.86	140.00	6330.00	100	2.11E+12	6.68E+08	0.02	14.57	0.34	11.59	0.000864	0.000997	VERIFICATO
	P1-2	34.01	0	34.01	140.00	6330.00	100	2.11E+12	6.68E+08	0.05	14.57	0.35	11.59	0.000932	0.002447	VERIFICATO
	P1-3	54.15		54.15	140.00	6330.00	100	2.11E+12	6.68E+08	0.08	14.57	0.37	11.59	0.001004	0.003897	VERIFICATO
Y03	P2-1	0.00		0.00	140.00	4750.00	100	8.93E+11	3.76E+08	0.00	14.57	0.06	11.59	0.000023	0.000000	VERIFICATO
	P2-2	4.53	0	4.53	140.00	4750.00	100	8.93E+11	3.76E+08	0.01	14.57	0.07	11.59	0.000041	0.000579	VERIFICATO
	P2-3	9.06		9.06	140.00	4750.00	100	8.93E+11	3.76E+08	0.02	14.57	0.09	11.59	0.000064	0.001157	VERIFICATO
	P1-1	9.06		9.06	140.00	4750.00	100	8.93E+11	3.76E+08	0.02	14.57	0.18	11.59	0.000236	0.001157	VERIFICATO
	P1-2	22.22	0	22.22	140.00	4750.00	100	8.93E+11	3.76E+08	0.06	14.57	0.19	11.59	0.000273	0.002840	VERIFICATO
	P1-3	35.39		35.39	140.00	4750.00	100	8.93E+11	3.76E+08	0.09	14.57	0.20	11.59	0.000312	0.004523	VERIFICATO
Y04	P2-1	0.00		0.00	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.00	14.57	0.05	11.59	0.000017	0.000000	VERIFICATO
	P2-2	17.81	24.94	42.75	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.01	14.57	0.06	11.59	0.000029	0.000564	VERIFICATO
	P2-3	35.62		35.62	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.01	14.57	0.08	11.59	0.000044	0.000470	VERIFICATO
	P1-1	35.62		35.62	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.01	14.57	0.15	11.59	0.000170	0.000470	VERIFICATO
	P1-2	87.39	24.94	112.33	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.03	14.57	0.16	11.59	0.000201	0.001483	VERIFICATO
	P1-3	139.17		139.17	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.04	14.57	0.18	11.59	0.000235	0.001837	VERIFICATO

ALLEGATO I

PARETI X	SEZIONE	N _{Ed} [kN]	l [mm]	t ₀ [°] [mm]	t ₉₀ [°] [mm]	t ₀ [°] [mm]	t ₉₀ [°] [mm]	t ₀ [°] [mm]	t ₉₀ [°] [mm]	A _{rif} [mm ²]	σ _{c,90,d} [MPa]	f _{c,90,d} [MPa]	σ _{c,90,d} ≤ f _{c,90,d}	A _{rif} [mm ²]	σ _{c,90,d} [MPa]	f _{c,90,d} [MPa]	σ _{c,90,d} ≤ f _{c,90,d}
X01	P2-1	61.45	6567.00	30	20	40	20	30	20	919380	0.067	1.379	VERIFICATO	525360	0.117	1.379	VERIFICATO
	P2-2	74.71	6567.00	30	20	40	20	30	20	919380	0.081	1.379	VERIFICATO	525360	0.142	1.379	VERIFICATO
	P2-3	87.98	6567.00	30	20	40	20	30	20	919380	0.096	1.379	VERIFICATO	525360	0.167	1.379	VERIFICATO
	P1-1	181.90	6567.00	30	20	40	20	30	20	919380	0.198	1.379	VERIFICATO	525360	0.346	1.379	VERIFICATO
	P1-2	190.62	6567.00	30	20	40	20	30	20	919380	0.207	1.379	VERIFICATO	525360	0.363	1.379	VERIFICATO
	P1-3	199.34	6567.00	30	20	40	20	30	20	919380	0.217	1.379	VERIFICATO	525360	0.379	1.379	VERIFICATO
X02	P2-1	28.46	4270.00	30	20	40	20	30	20	597800	0.048	1.379	VERIFICATO	341600	0.083	1.379	VERIFICATO
	P2-2	36.34	4270.00	30	20	40	20	30	20	597800	0.061	1.379	VERIFICATO	341600	0.106	1.379	VERIFICATO
	P2-3	44.22	4270.00	30	20	40	20	30	20	597800	0.074	1.379	VERIFICATO	341600	0.129	1.379	VERIFICATO
	P1-1	89.63	4270.00	30	20	40	20	30	20	597800	0.150	1.379	VERIFICATO	341600	0.262	1.379	VERIFICATO
	P1-2	95.30	4270.00	30	20	40	20	30	20	597800	0.159	1.379	VERIFICATO	341600	0.279	1.379	VERIFICATO
	P1-3	100.97	4270.00	30	20	40	20	30	20	597800	0.169	1.379	VERIFICATO	341600	0.296	1.379	VERIFICATO
X03	P2-1	40.20	5000.00	30	20	40	20	30	20	700000	0.057	1.379	VERIFICATO	400000	0.101	1.379	VERIFICATO
	P2-2	49.93	5000.00	30	20	40	20	30	20	700000	0.071	1.379	VERIFICATO	400000	0.125	1.379	VERIFICATO
	P2-3	59.66	5000.00	30	20	40	20	30	20	700000	0.085	1.379	VERIFICATO	400000	0.149	1.379	VERIFICATO
	P1-1	122.12	5000.00	30	20	40	20	30	20	700000	0.174	1.379	VERIFICATO	400000	0.305	1.379	VERIFICATO
	P1-2	128.76	5000.00	30	20	40	20	30	20	700000	0.184	1.379	VERIFICATO	400000	0.322	1.379	VERIFICATO
	P1-3	135.40	5000.00	30	20	40	20	30	20	700000	0.193	1.379	VERIFICATO	400000	0.339	1.379	VERIFICATO

Riqualificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya,
(Castilla-La Mancha, Spagna)

PARETI Y	SEZIONE	N _{Ed} [kN]	a [mm]	t ₀ [°] [mm]	t ₉₀ [°] [mm]	t ₀ [°] [mm]	t ₉₀ [°] [mm]	t ₀ [°] [mm]	t ₉₀ [°] [mm]	Arif [mm ²]	σ _{c,90,d} [MPa]	f _{c,90,d} [MPa]	σ _{c,90,d} ≤ f _{c,90,d}
Y01	P2-1	51.55	14780.00	30	20	40	20	20	20	2069200	0.025	1.379	VERIFICATO
	P2-2	72.81	14780.00	30	20	40	20	20	20	2069200	0.035	1.379	VERIFICATO
	P2-3	94.07	14780.00	30	20	40	20	20	20	2069200	0.045	1.379	VERIFICATO
Y02	P1-1	176.22	14780.00	30	20	40	20	20	20	2069200	0.085	1.379	VERIFICATO
	P1-2	195.85	14780.00	30	20	40	20	20	20	2069200	0.095	1.379	VERIFICATO
	P1-3	215.47	14780.00	30	20	40	20	20	20	2069200	0.104	1.379	VERIFICATO
Y03	P2-1	75.61	6330.00	30	20	40	20	20	20	886200	0.085	1.379	VERIFICATO
	P2-2	86.48	6330.00	30	20	40	20	20	20	886200	0.098	1.379	VERIFICATO
	P2-3	97.34	6330.00	30	20	40	20	20	20	886200	0.110	1.379	VERIFICATO
Y04	P1-1	215.52	6330.00	30	20	40	20	20	20	886200	0.243	1.379	VERIFICATO
	P1-2	223.93	6330.00	30	20	40	20	20	20	886200	0.253	1.379	VERIFICATO
	P1-3	232.34	6330.00	30	20	40	20	20	20	886200	0.262	1.379	VERIFICATO
Y03	P2-1	26.39	4750.00	30	20	40	20	20	20	665000	0.040	1.379	VERIFICATO
	P2-2	35.21	4750.00	30	20	40	20	20	20	665000	0.053	1.379	VERIFICATO
	P2-3	44.02	4750.00	30	20	40	20	20	20	665000	0.066	1.379	VERIFICATO
Y04	P1-1	84.62	4750.00	30	20	40	20	20	20	665000	0.127	1.379	VERIFICATO
	P1-2	90.93	4750.00	30	20	40	20	20	20	665000	0.137	1.379	VERIFICATO
	P1-3	97.24	4750.00	30	20	40	20	20	20	665000	0.146	1.379	VERIFICATO
Y04	P2-1	71.52	14780.00	30	20	40	20	20	20	2069200	0.035	1.379	VERIFICATO
	P2-2	92.78	14780.00	30	20	40	20	20	20	2069200	0.045	1.379	VERIFICATO
	P2-3	114.04	14780.00	30	20	40	20	20	20	2069200	0.055	1.379	VERIFICATO
Y04	P1-1	223.36	14780.00	30	20	40	20	20	20	2069200	0.108	1.379	VERIFICATO
	P1-2	242.99	14780.00	30	20	40	20	20	20	2069200	0.117	1.379	VERIFICATO
	P1-3	262.62	14780.00	30	20	40	20	20	20	2069200	0.127	1.379	VERIFICATO

ALLEGATO L

PARETI X	SEZIONE	M [kNm]	Mv [kNm]	MEd [kNm]	b [mm]	l [mm]	tiy [mm]	J [mm ⁴]	W [mm ³]	σ _{m,d} [MPa]	f _{m,d} [MPa]	σ _{c,0,d} [MPa]	f _{c,0,d} [MPa]	A _y [mm ²]
X01	P2-1	0.00		0.00	140.00	6567.00	100	2.36E+12	7.19E+08	0.00	14.57	0.09	11.59	14000
	P2-2	1.62		1.62	140.00	6567.00	100	2.36E+12	7.19E+08	0.00	14.57	0.11	11.59	14000
	P2-3	3.24		3.24	140.00	6567.00	100	2.36E+12	7.19E+08	0.00	14.57	0.13	11.59	14000
	P1-1	3.24		3.24	140.00	6567.00	100	2.36E+12	7.19E+08	0.00	14.57	0.28	11.59	14000
	P1-2	7.94		7.94	140.00	6567.00	100	2.36E+12	7.19E+08	0.01	14.57	0.29	11.59	14000
	P1-3	12.65		12.65	140.00	6567.00	100	2.36E+12	7.19E+08	0.02	14.57	0.30	11.59	14000
X02	P2-1	0.00		0.00	140.00	4270.00	100	6.49E+11	3.04E+08	0.00	14.57	0.07	11.59	14000
	P2-2	7.87		7.87	140.00	4270.00	100	6.49E+11	3.04E+08	0.03	14.57	0.09	11.59	14000
	P2-3	15.74		15.74	140.00	4270.00	100	6.49E+11	3.04E+08	0.05	14.57	0.10	11.59	14000
	P1-1	15.74		15.74	140.00	4270.00	100	6.49E+11	3.04E+08	0.05	14.57	0.21	11.59	14000
	P1-2	38.62		38.62	140.00	4270.00	100	6.49E+11	3.04E+08	0.13	14.57	0.22	11.59	14000
	P1-3	61.50		61.50	140.00	4270.00	100	6.49E+11	3.04E+08	0.20	14.57	0.24	11.59	14000
X03	P2-1	0.00		0.00	140.00	5000.00	100	1.04E+12	4.17E+08	0.00	14.57	0.08	11.59	14000
	P2-2	13.13		13.13	140.00	5000.00	100	1.04E+12	4.17E+08	0.03	14.57	0.10	11.59	14000
	P2-3	26.25		26.25	140.00	5000.00	100	1.04E+12	4.17E+08	0.06	14.57	0.12	11.59	14000
	P1-1	26.25		26.25	140.00	5000.00	100	1.04E+12	4.17E+08	0.06	14.57	0.24	11.59	14000
	P1-2	64.42		64.42	140.00	5000.00	100	1.04E+12	4.17E+08	0.15	14.57	0.26	11.59	14000
	P1-3	102.58		102.58	140.00	5000.00	100	1.04E+12	4.17E+08	0.25	14.57	0.27	11.59	14000

Riqualificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya,
(Castilla-La Mancha, Spagna)

PARETI X	SEZIONE	$i_{y,0,ef}$	λ_y	$\lambda_{rel,y}$	k_y	k_c	$\sigma_{c,0,d}/(k_c \cdot f_{c,0,d})$	$\sigma_{m,d}/f_{m,d}$	
X01	P2-1	12983.62	0.02	0.00	0.49	1.03	0.008	0.00000	VERIFICATO
	P2-2	12983.62	0.02	0.00	0.49	1.03	0.010	0.00015	VERIFICATO
	P2-3	12983.62	0.02	0.00	0.49	1.03	0.011	0.00031	VERIFICATO
	P1-1	12983.62	0.02	0.00	0.49	1.03	0.023	0.00031	VERIFICATO
	P1-2	12983.62	0.02	0.00	0.49	1.03	0.024	0.00076	VERIFICATO
	P1-3	12983.62	0.02	0.00	0.49	1.03	0.025	0.00121	VERIFICATO
X02	P2-1	6807.49	0.04	0.01	0.49	1.03	0.006	0.00000	VERIFICATO
	P2-2	6807.49	0.04	0.01	0.49	1.03	0.007	0.00178	VERIFICATO
	P2-3	6807.49	0.04	0.01	0.49	1.03	0.009	0.00356	VERIFICATO
	P1-1	6807.49	0.04	0.01	0.49	1.03	0.018	0.00356	VERIFICATO
	P1-2	6807.49	0.04	0.01	0.49	1.03	0.019	0.00872	VERIFICATO
	P1-3	6807.49	0.04	0.01	0.49	1.03	0.020	0.01389	VERIFICATO
X03	P2-1	8625.82	0.03	0.01	0.49	1.03	0.007	0.00000	VERIFICATO
	P2-2	8625.82	0.03	0.01	0.49	1.03	0.008	0.00216	VERIFICATO
	P2-3	8625.82	0.03	0.01	0.49	1.03	0.010	0.00433	VERIFICATO
	P1-1	8625.82	0.03	0.01	0.49	1.03	0.020	0.00433	VERIFICATO
	P1-2	8625.82	0.03	0.01	0.49	1.03	0.022	0.01061	VERIFICATO
	P1-3	8625.82	0.03	0.01	0.49	1.03	0.023	0.01690	VERIFICATO

PARETI Y	SEZIONE	M	Mv	MEd	b	l	tiy	J	W	σm,d	f _{m,d}	σ _{c,0,d}	f _{c,0,d}	A _y
		[kNm]	[kNm]	[kNm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ⁴]	[mm ³]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm ²]
Y01	P2-1	0.00		0.00	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.00	14.57	0.03	11.59	14000
	P2-2	18.62	24.94	43.56	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.01	14.57	0.05	11.59	14000
	P2-3	37.24		37.24	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.01	14.57	0.06	11.59	14000
Y02	P1-1	37.24		37.24	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.01	14.57	0.12	11.59	14000
	P1-2	91.37	24.94	116.31	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.03	14.57	0.13	11.59	14000
	P1-3	145.50		145.50	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.04	14.57	0.15	11.59	14000
Y03	P2-1	0.00		0.00	140.00	6330.00	100	2.11E+12	6.68E+08	0.00	14.57	0.12	11.59	14000
	P2-2	6.93	0	6.93	140.00	6330.00	100	2.11E+12	6.68E+08	0.01	14.57	0.14	11.59	14000
	P2-3	13.86		13.86	140.00	6330.00	100	2.11E+12	6.68E+08	0.02	14.57	0.15	11.59	14000
Y04	P1-1	13.86		13.86	140.00	6330.00	100	2.11E+12	6.68E+08	0.02	14.57	0.34	11.59	14000
	P1-2	34.01	0	34.01	140.00	6330.00	100	2.11E+12	6.68E+08	0.05	14.57	0.35	11.59	14000
	P1-3	54.15		54.15	140.00	6330.00	100	2.11E+12	6.68E+08	0.08	14.57	0.37	11.59	14000
Y03	P2-1	0.00		0.00	140.00	4750.00	100	8.93E+11	3.76E+08	0.00	14.57	0.06	11.59	14000
	P2-2	4.53	0	4.53	140.00	4750.00	100	8.93E+11	3.76E+08	0.01	14.57	0.07	11.59	14000
	P2-3	9.06		9.06	140.00	4750.00	100	8.93E+11	3.76E+08	0.02	14.57	0.09	11.59	14000
Y04	P1-1	9.06		9.06	140.00	4750.00	100	8.93E+11	3.76E+08	0.02	14.57	0.18	11.59	14000
	P1-2	22.22	0	22.22	140.00	4750.00	100	8.93E+11	3.76E+08	0.06	14.57	0.19	11.59	14000
	P1-3	35.39		35.39	140.00	4750.00	100	8.93E+11	3.76E+08	0.09	14.57	0.20	11.59	14000
Y04	P2-1	0.00		0.00	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.00	14.57	0.05	11.59	14000
	P2-2	17.81	24.94	42.75	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.01	14.57	0.06	11.59	14000
	P2-3	35.62		35.62	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.01	14.57	0.08	11.59	14000
Y04	P1-1	35.62		35.62	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.01	14.57	0.15	11.59	14000
	P1-2	87.39	24.94	112.33	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.03	14.57	0.16	11.59	14000
	P1-3	139.17		139.17	140.00	14780.00	100	2.69E+13	3.64E+09	0.04	14.57	0.18	11.59	14000

PARETI	SEZIONE	$i_{y,0,ef}$	λ_y	$\lambda_{rel,y}$	k_y	k_c	$\sigma_{c,0,d}/(k_c \cdot f_{c,0,d})$	$\sigma_{m,d}/f_{m,d}$	
Y01	P2-1	43838.63	0.01	0.00	0.49	1.03	0.003	0.00000	VERIFICATO
	P2-2	43838.63	0.01	0.00	0.49	1.03	0.004	0.00082	VERIFICATO
	P2-3	43838.63	0.01	0.00	0.49	1.03	0.005	0.00070	VERIFICATO
	P1-1	43838.63	0.01	0.00	0.49	1.03	0.010	0.00070	VERIFICATO
	P1-2	43838.63	0.01	0.00	0.49	1.03	0.011	0.00219	VERIFICATO
	P1-3	43838.63	0.01	0.00	0.49	1.03	0.012	0.00274	VERIFICATO
	P2-1	12287.14	0.02	0.00	0.49	1.03	0.010	0.00000	VERIFICATO
	P2-2	12287.14	0.02	0.00	0.49	1.03	0.011	0.00071	VERIFICATO
	P2-3	12287.14	0.02	0.00	0.49	1.03	0.013	0.00142	VERIFICATO
Y02	P1-1	12287.14	0.02	0.00	0.49	1.03	0.029	0.00142	VERIFICATO
	P1-2	12287.14	0.02	0.00	0.49	1.03	0.030	0.00350	VERIFICATO
	P1-3	12287.14	0.02	0.00	0.49	1.03	0.031	0.00557	VERIFICATO
	P2-1	7987.04	0.04	0.01	0.49	1.03	0.005	0.00000	VERIFICATO
	P2-2	7987.04	0.04	0.01	0.49	1.03	0.006	0.00083	VERIFICATO
	P2-3	7987.04	0.04	0.01	0.49	1.03	0.008	0.00165	VERIFICATO
	P1-1	7987.04	0.04	0.01	0.49	1.03	0.015	0.00165	VERIFICATO
	P1-2	7987.04	0.04	0.01	0.49	1.03	0.016	0.00406	VERIFICATO
	P1-3	7987.04	0.04	0.01	0.49	1.03	0.017	0.00646	VERIFICATO
Y03	P2-1	43838.63	0.01	0.00	0.49	1.03	0.004	0.00000	VERIFICATO
	P2-2	43838.63	0.01	0.00	0.49	1.03	0.005	0.00081	VERIFICATO
	P2-3	43838.63	0.01	0.00	0.49	1.03	0.006	0.00067	VERIFICATO
	P1-1	43838.63	0.01	0.00	0.49	1.03	0.013	0.00067	VERIFICATO
	P1-2	43838.63	0.01	0.00	0.49	1.03	0.014	0.00212	VERIFICATO
	P1-3	43838.63	0.01	0.00	0.49	1.03	0.015	0.00262	VERIFICATO
	P2-1	12287.14	0.02	0.00	0.49	1.03	0.010	0.00000	VERIFICATO
	P2-2	12287.14	0.02	0.00	0.49	1.03	0.011	0.00071	VERIFICATO
	P2-3	12287.14	0.02	0.00	0.49	1.03	0.013	0.00142	VERIFICATO
Y04	P1-1	12287.14	0.02	0.00	0.49	1.03	0.029	0.00142	VERIFICATO
	P1-2	12287.14	0.02	0.00	0.49	1.03	0.030	0.00350	VERIFICATO
	P1-3	12287.14	0.02	0.00	0.49	1.03	0.031	0.00557	VERIFICATO
	P2-1	7987.04	0.04	0.01	0.49	1.03	0.005	0.00000	VERIFICATO
	P2-2	7987.04	0.04	0.01	0.49	1.03	0.006	0.00083	VERIFICATO
	P2-3	7987.04	0.04	0.01	0.49	1.03	0.008	0.00165	VERIFICATO
	P1-1	7987.04	0.04	0.01	0.49	1.03	0.015	0.00165	VERIFICATO
	P1-2	7987.04	0.04	0.01	0.49	1.03	0.016	0.00406	VERIFICATO
	P1-3	7987.04	0.04	0.01	0.49	1.03	0.017	0.00646	VERIFICATO

ALLEGATO M

(+eax; +eay)

$e_{x_{fin}}$	0.37	[m]
$e_{y_{fin}}$	2.32	[m]

COMBINAZIONE 1: +0.3 F_x + F_y

PARETI X	Y _i [m]	K _{xi} [kN/m]	V _{1x} [kN]	M _{1x} [kNm]	V _{tx} [kN]	M _{tx} [kNm]
X01	11.08	28168.16	3.73	10.92	5.06	26.11
X02	7.93	16516.10	1.96	5.74	2.73	13.91
X03	6.33	19043.48	2.12	6.22	3.00	15.22
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 1: +0.3F_x + F_y

PARETI Y	X _i [m]	K _{yi} [kN/m]	V _{1y} [kN]	M _{1y} [kNm]	V _{ty} [kN]	M _{ty} [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	10.91	31.96	14.76	76.25
Y02	1.79	2.74E+04	3.91	11.47	5.35	27.52
Y03	4.49	1.82E+04	2.39	7.00	3.33	16.99
Y04	6.78	7.28E+04	8.82	25.83	12.52	63.40
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 2: +F_x + 0.3 F_y

PARETI X	Y _i [m]	K _{xi} [kN/m]	V _{1x} [kN]	M _{1x} [kNm]	V _{tx} [kN]	M _{tx} [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	13.37	39.19	18.45	94.55
X02	7.93	1.65E+04	6.30	18.45	8.71	44.57
X03	6.33	1.90E+04	6.36	18.62	8.80	45.03
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 2: +F_x + 0.3 F_y

PARETI Y	X _i [m]	K _{yi} [kN/m]	V _{1y} [kN]	M _{1y} [kNm]	V _{ty} [kN]	M _{ty} [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	9.75	28.57	13.38	68.71
Y02	1.79	2.74E+04	2.38	6.98	3.28	16.81
Y03	4.49	1.82E+04	0.12	0.37	0.18	0.91
Y04	6.78	7.28E+04	-4.45	-13.04	-6.05	-31.19
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 3: +Fx - 0.3 Fy

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	13.56	39.74	18.64	95.67
X02	7.93	1.65E+04	6.25	18.32	8.66	44.31
X03	6.33	1.90E+04	6.21	18.20	8.66	44.18
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 3: +Fx - 0.3 Fy

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	4.49	13.15	8.34	38
Y02	1.79	2.74E+04	0.27	0.80	1.71	6
Y03	4.49	1.82E+04	-1.43	-4.18	-0.48	-6
Y04	6.78	7.28E+04	-11.14	-32.65	-7.44	-55
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 4: +0.3 Fx - Fy

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	4.35	12.76	6.10	31.07
X02	7.93	1.65E+04	1.81	5.29	2.48	12.72
X03	6.33	1.90E+04	1.65	4.83	2.21	11.46
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 4: +0.3 Fx - Fy

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	-6.64	-19.45	-8.86	-46.02
Y02	1.79	2.74E+04	-3.12	-9.13	-4.25	-21.88
Y03	4.49	1.82E+04	-2.78	-8.14	-3.87	-19.75
Y04	6.78	7.28E+04	-13.49	-39.54	-18.99	-96.51
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 5: -0.3 Fx - Fy

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	-3.73	-10.92	-5.06	-26.11
X02	7.93	1.65E+04	-1.96	-5.74	-2.73	-13.91
X03	6.33	1.90E+04	-2.12	-6.22	-3.00	-15.22
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 5: -0.3 Fx - Fy

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	-10.91	-31.96	-14.76	-76.25
Y02	1.79	2.74E+04	-3.91	-11.47	-5.35	-27.52
Y03	4.49	1.82E+04	-2.39	-7.00	-3.33	-16.99
Y04	6.78	7.28E+04	-8.82	-25.83	-12.52	-63.40
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 6: -Fx - 0.3 Fy

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	-13.37	-39.19	-18.45	-94.55
X02	7.93	1.65E+04	-6.30	-18.45	-8.71	-44.57
X03	6.33	1.90E+04	-6.36	-18.62	-8.80	-45.03
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 6: -Fx - 0.3 Fy

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	-9.75	-28.57	-13.38	-68.71
Y02	1.79	2.74E+04	-2.38	-6.98	-3.28	-16.81
Y03	4.49	1.82E+04	-0.12	-0.37	-0.18	-0.91
Y04	6.78	7.28E+04	4.45	13.04	6.05	31.19
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 7: $-F_x + 0.3 F_y$

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	-13.56	-39.74	-18.77	-96.04
X02	7.93	1.65E+04	-6.25	-18.32	-8.63	-44.22
X03	6.33	1.90E+04	-6.21	-18.20	-8.57	-43.90
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 7: $-F_x + 0.3 F_y$

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	-4.49	-13.15	-6.29	-32.03
Y02	1.79	2.74E+04	-0.27	-0.80	-0.40	-1.99
Y03	4.49	1.82E+04	1.43	4.18	1.98	10.11
Y04	6.78	7.28E+04	11.14	32.65	15.50	79.16
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 8: $-0.3 F_x + F_y$

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	-4.35	-12.76	-6.10	-31.07
X02	7.93	1.65E+04	-1.81	-5.29	-2.48	-12.72
X03	6.33	1.90E+04	-1.65	-4.83	-2.21	-11.46
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 8: $-0.3 F_x + F_y$

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	8.91	26.11	12.63	63.99
Y02	1.79	2.74E+04	3.54	10.38	4.95	25.23
Y03	4.49	1.82E+04	2.57	7.54	3.53	18.11
Y04	6.78	7.28E+04	11.00	32.24	14.86	76.83
		1.91E+05				

(+eax; -eay)

e_{x_fin}	0.37	[m]
e_{y_fin}	0.85	[m]

COMBINAZIONE 1: +0.3 Fx + Fy

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	3.35	9.82	4.69	23.89
X02	7.93	1.65E+04	2.05	6.00	2.82	14.45
X03	6.33	1.90E+04	2.41	7.06	3.29	16.91
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 1: +0.3Fx + Fy

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	9.55	27.98	13.40	68.19
Y02	1.79	2.74E+04	3.66	10.72	5.10	26.01
Y03	4.49	1.82E+04	2.51	7.36	3.45	17.73
Y04	6.78	7.28E+04	10.30	30.19	14.01	72.22
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 2: +Fx + 0.3 Fy

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	12.13	35.53	16.73	85.71
X02	7.93	1.65E+04	6.60	19.33	9.12	46.69
X03	6.33	1.90E+04	7.31	21.41	10.11	51.75
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 2: +Fx + 0.3 Fy

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	5.22	15.30	7.12	36.68
Y02	1.79	2.74E+04	1.54	4.51	2.11	10.83
Y03	4.49	1.82E+04	0.54	1.58	0.75	3.84
Y04	6.78	7.28E+04	0.51	1.49	0.80	3.90
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 3: +F_x - 0.3 F_y

PARETI X	Y _i [m]	K _{xi} [kN/m]	V _{1x} [kN]	M _{1x} [kNm]	V _{tx} [kN]	M _{tx} [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	12.31	36.08	17.04	87.20
X02	7.93	1.65E+04	6.55	19.20	9.05	46.34
X03	6.33	1.90E+04	7.16	20.99	9.88	50.62
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 3: +F_x - 0.3 F_y

PARETI Y	X _i [m]	K _{yi} [kN/m]	V _{1y} [kN]	M _{1y} [kNm]	V _{ty} [kN]	M _{ty} [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	-0.04	-0.12	0.04	0.00
Y02	1.79	2.74E+04	-0.57	-1.67	-0.77	-3.99
Y03	4.49	1.82E+04	-1.01	-2.97	-1.41	-7.19
Y04	6.78	7.28E+04	-6.19	-18.12	-8.65	-44.07
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 4: +0.3 F_x - F_y

PARETI X	Y _i [m]	K _{xi} [kN/m]	V _{1x} [kN]	M _{1x} [kNm]	V _{tx} [kN]	M _{tx} [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	3.98	11.66	5.58	28.41
X02	7.93	1.65E+04	1.90	5.56	2.60	13.36
X03	6.33	1.90E+04	1.93	5.66	2.60	13.47
		6.37E+04			35.97	

COMBINAZIONE 4: +0.3 F_x - F_y

PARETI Y	X _i [m]	K _{yi} [kN/m]	V _{1y} [kN]	M _{1y} [kNm]	V _{ty} [kN]	M _{ty} [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	-7.99	-23.43	-10.74	-55.63
Y02	1.79	2.74E+04	-3.37	-9.87	-4.60	-23.67
Y03	4.49	1.82E+04	-2.66	-7.78	-3.70	-18.87
Y04	6.78	7.28E+04	-12.01	-35.18	-16.93	-85.98
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 5: -0.3 Fx - Fy

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	-3.35	-9.82	-4.55	-23.46
X02	7.93	1.65E+04	-2.05	-6.00	-2.85	-14.55
X03	6.33	1.90E+04	-2.41	-7.06	-3.39	-17.24
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 5: -0.3 Fx - Fy

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	-9.55	-27.98	-12.88	-66.64
Y02	1.79	2.74E+04	-3.66	-10.72	-5.00	-25.72
Y03	4.49	1.82E+04	-2.51	-7.36	-3.50	-17.87
Y04	6.78	7.28E+04	-10.30	-30.19	-14.58	-73.93
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 6: -Fx - 0.3 Fy

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	-12.13	-35.53	-16.73	-85.71
X02	7.93	1.65E+04	-6.60	-19.33	-9.12	-46.69
X03	6.33	1.90E+04	-7.31	-21.41	-10.11	-51.75
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 6: -Fx - 0.3 Fy

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	-5.22	-15.30	-7.12	-36.68
Y02	1.79	2.74E+04	-1.54	-4.51	-2.11	-10.83
Y03	4.49	1.82E+04	-0.54	-1.58	-0.75	-3.84
Y04	6.78	7.28E+04	-0.51	-1.49	-0.80	-3.90
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 7: $-F_x + 0.3 F_y$

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	-12.31	-36.08	-17.04	-87.20
X02	7.93	1.65E+04	-6.55	-19.20	-9.05	-46.34
X03	6.33	1.90E+04	-7.16	-20.99	-9.88	-50.62
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 7: $-F_x + 0.3 F_y$

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	0.04	0.12	-0.04	0.00
Y02	1.79	2.74E+04	0.57	1.67	0.77	3.99
Y03	4.49	1.82E+04	1.01	2.97	1.41	7.19
Y04	6.78	7.28E+04	6.19	18.12	8.65	44.07
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 8: $-0.3 F_x + F_y$

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	-3.98	-11.66	-5.58	-28.41
X02	7.93	1.65E+04	-1.90	-5.56	-2.60	-13.36
X03	6.33	1.90E+04	-1.93	-5.66	-2.60	-13.47
		6.37E+04			-35.97	

COMBINAZIONE 8: $-0.3 F_x + F_y$

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	6.64	19.45	8.86	46.02
Y02	1.79	2.74E+04	3.12	9.13	4.25	21.88
Y03	4.49	1.82E+04	2.78	8.14	3.87	19.75
Y04	6.78	7.28E+04	13.49	39.54	18.99	96.51
		1.91E+05				

Riquilificazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya,
(Castilla-La Mancha, Spagna)

(-e_{ax}; -e_{ay})

e _x _{fin}	-0.33	[m]
e _y _{fin}	0.85	[m]

COMBINAZIONE 1: +0.3 F_x + F_y

PARETI X	Y _i [m]	K _{xi} [kN/m]	V _{1x} [kN]	M _{1x} [kNm]	V _{tx} [kN]	M _{tx} [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	3.94	11.55	5.52	28.12
X02	7.93	1.65E+04	1.91	5.58	2.62	13.43
X03	6.33	1.90E+04	1.96	5.74	2.65	13.70
		6.37E+04			35.97	

COMBINAZIONE 1: +0.3F_x + F_y

PARETI Y	X _i [m]	K _{yi} [kN/m]	V _{1y} [kN]	M _{1y} [kNm]	V _{ty} [kN]	M _{ty} [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	11.69	34.25	16.43	83.52
Y02	1.79	2.74E+04	4.06	11.89	5.66	28.87
Y03	4.49	1.82E+04	2.32	6.79	3.18	16.33
Y04	6.78	7.28E+04	7.96	23.33	10.70	55.43
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 2: +F_x + 0.3 F_y

PARETI X	Y _i [m]	K _{xi} [kN/m]	V _{1x} [kN]	M _{1x} [kNm]	V _{tx} [kN]	M _{tx} [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	12.30	36.04	17.02	87.11
X02	7.93	1.65E+04	6.55	19.20	9.05	46.36
X03	6.33	1.90E+04	7.17	21.01	9.89	50.69
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 2: +F_x + 0.3 F_y

PARETI Y	X _i [m]	K _{yi} [kN/m]	V _{1y} [kN]	M _{1y} [kNm]	V _{ty} [kN]	M _{ty} [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	5.86	17.18	8.19	41.74
Y02	1.79	2.74E+04	1.66	4.86	2.31	11.78
Y03	4.49	1.82E+04	0.48	1.41	0.66	3.37
Y04	6.78	7.28E+04	-0.19	-0.57	-0.36	-1.65
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 3: +Fx - 0.3 Fy

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	12.14	35.56	16.80	85.97
X02	7.93	1.65E+04	6.59	19.32	9.10	46.63
X03	6.33	1.90E+04	7.30	21.38	10.06	51.56
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 3: +Fx - 0.3 Fy

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	-0.68	-2.00	-1.02	-5.07
Y02	1.79	2.74E+04	-0.69	-2.02	-0.97	-4.93
Y03	4.49	1.82E+04	-0.95	-2.79	-1.31	-6.72
Y04	6.78	7.28E+04	-5.48	-16.06	-7.49	-38.52
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 4: +0.3 Fx - Fy

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	3.39	9.93	4.61	23.76
X02	7.93	1.65E+04	2.04	5.97	2.83	14.48
X03	6.33	1.90E+04	2.38	6.97	3.35	17.01
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 4: +0.3 Fx - Fy

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	-10.13	-29.69	-14.28	-72.52
Y02	1.79	2.74E+04	-3.77	-11.04	-5.26	-26.82
Y03	4.49	1.82E+04	-2.46	-7.21	-3.37	-17.33
Y04	6.78	7.28E+04	-9.67	-28.32	-13.05	-67.48
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 5: -0.3 Fx - Fy

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	-3.94	-11.55	-5.52	-28.12
X02	7.93	1.65E+04	-1.91	-5.58	-2.62	-13.43
X03	6.33	1.90E+04	-1.96	-5.74	-2.65	-13.70
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 5: -0.3 Fx - Fy

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	-11.69	-34.25	-16.43	-83.52
Y02	1.79	2.74E+04	-4.06	-11.89	-5.66	-28.87
Y03	4.49	1.82E+04	-2.32	-6.79	-3.18	-16.33
Y04	6.78	7.28E+04	-7.96	-23.33	-10.70	-55.43
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 6: -Fx - 0.3 Fy

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	-12.30	-36.04	-17.02	-87.11
X02	7.93	1.65E+04	-6.55	-19.20	-9.05	-46.36
X03	6.33	1.90E+04	-7.17	-21.01	-9.89	-50.69
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 6: -Fx - 0.3 Fy

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	-5.86	-17.18	-8.19	-41.74
Y02	1.79	2.74E+04	-1.66	-4.86	-2.31	-11.78
Y03	4.49	1.82E+04	-0.48	-1.41	-0.66	-3.37
Y04	6.78	7.28E+04	0.19	0.57	0.36	1.65
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 7: $-F_x + 0.3 F_y$

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	-12.14	-35.56	-16.75	-85.80
X02	7.93	1.65E+04	-6.59	-19.32	-9.12	-46.67
X03	6.33	1.90E+04	-7.30	-21.38	-10.10	-51.68
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 7: $-F_x + 0.3 F_y$

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	0.68	2.00	1.02	5.07
Y02	1.79	2.74E+04	0.69	2.02	0.97	4.93
Y03	4.49	1.82E+04	0.95	2.79	1.31	6.72
Y04	6.78	7.28E+04	5.48	16.06	7.49	38.52
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 8: $-0.3 F_x + F_y$

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	-3.39	-9.93	-4.61	-23.76
X02	7.93	1.65E+04	-2.04	-5.97	-2.83	-14.48
X03	6.33	1.90E+04	-2.38	-6.97	-3.35	-17.01
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 8: $-0.3 F_x + F_y$

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	10.13	29.69	14.28	72.52
Y02	1.79	2.74E+04	3.77	11.04	5.26	26.82
Y03	4.49	1.82E+04	2.46	7.21	3.37	17.33
Y04	6.78	7.28E+04	9.67	28.32	13.05	67.48
		1.91E+05				

Riqualficazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya,
(Castilla-La Mancha, Spagna)

(-e_x; +e_y)

e _x _fin	-0.33	[m]
e _y _fin	2.32	[m]

COMBINAZIONE 1: +0.3 F_x + F_y

PARETI X	Y _i [m]	K _{xi} [kN/m]	V _{1x} [kN]	M _{1x} [kNm]	V _{tx} [kN]	M _{tx} [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	4.32	12.65	6.04	30.77
X02	7.93	1.65E+04	1.82	5.32	2.49	12.80
X03	6.33	1.90E+04	1.68	4.91	2.26	11.68
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 1: +0.3F_x + F_y

PARETI Y	X _i [m]	K _{yi} [kN/m]	V _{1y} [kN]	M _{1y} [kNm]	V _{ty} [kN]	M _{ty} [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	13.05	38.23	18.30	93.13
Y02	1.79	2.74E+04	4.31	12.64	6.01	30.67
Y03	4.49	1.82E+04	2.19	6.43	3.01	15.45
Y04	6.78	7.28E+04	6.47	18.97	8.65	44.91
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 2: +F_x + 0.3 F_y

PARETI X	Y _i [m]	K _{xi} [kN/m]	V _{1x} [kN]	M _{1x} [kNm]	V _{tx} [kN]	M _{tx} [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	13.55	39.70	18.75	95.95
X02	7.93	1.65E+04	6.25	18.33	8.64	44.24
X03	6.33	1.90E+04	6.22	18.23	8.58	43.97
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 2: +F_x + 0.3 F_y

PARETI Y	X _i [m]	K _{yi} [kN/m]	V _{1y} [kN]	M _{1y} [kNm]	V _{ty} [kN]	M _{ty} [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	10.39	30.45	14.44	73.78
Y02	1.79	2.74E+04	2.50	7.33	3.47	17.75
Y03	4.49	1.82E+04	0.07	0.19	0.08	0.45
Y04	6.78	7.28E+04	-5.15	-15.10	-7.21	-36.73
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 3: +Fx - 0.3 Fy

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	13.39	39.22	18.47	94.64
X02	7.93	1.65E+04	6.29	18.44	8.70	44.55
X03	6.33	1.90E+04	6.35	18.60	8.79	44.96
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 3: +Fx - 0.3 Fy

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	3.85	11.27	5.23	26.97
Y02	1.79	2.74E+04	0.15	0.45	0.20	1.05
Y03	4.49	1.82E+04	-1.37	-4.01	-1.88	-9.65
Y04	6.78	7.28E+04	-10.44	-30.59	-14.34	-73.61
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 4: +0.3 Fx - Fy

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	3.76	11.03	5.13	26.41
X02	7.93	1.65E+04	1.95	5.71	2.71	13.84
X03	6.33	1.90E+04	2.10	6.14	2.95	15.00
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 4: +0.3 Fx - Fy

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	-8.77	-25.71	-12.40	-62.91
Y02	1.79	2.74E+04	-3.52	-10.30	-4.91	-25.03
Y03	4.49	1.82E+04	-2.58	-7.57	-3.55	-18.21
Y04	6.78	7.28E+04	-11.15	-32.68	-15.11	-78.01
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 5: -0.3 Fx - Fy

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	-4.32	-12.65	-6.04	-30.77
X02	7.93	1.65E+04	-1.82	-5.32	-2.49	-12.80
X03	6.33	1.90E+04	-1.68	-4.91	-2.26	-11.68
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 5: -0.3 Fx - Fy

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	-13.05	-38.23	-18.30	-93.13
Y02	1.79	2.74E+04	-4.31	-12.64	-6.01	-30.67
Y03	4.49	1.82E+04	-2.19	-6.43	-3.01	-15.45
Y04	6.78	7.28E+04	-6.47	-18.97	-8.65	-44.91
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 6: -Fx - 0.3 Fy

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	-13.55	-39.70	-18.75	-95.95
X02	7.93	1.65E+04	-6.25	-18.33	-8.64	-44.24
X03	6.33	1.90E+04	-6.22	-18.23	-8.58	-43.97
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 6: -Fx - 0.3 Fy

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	-10.39	-30.45	-14.44	-73.78
Y02	1.79	2.74E+04	-2.50	-7.33	-3.47	-17.75
Y03	4.49	1.82E+04	-0.07	-0.19	-0.08	-0.45
Y04	6.78	7.28E+04	5.15	15.10	7.21	36.73
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 7: $-F_x + 0.3 F_y$

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	-13.39	-39.22	-18.47	-94.64
X02	7.93	1.65E+04	-6.29	-18.44	-8.70	-44.55
X03	6.33	1.90E+04	-6.35	-18.60	-8.79	-44.96
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 7: $-F_x + 0.3 F_y$

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	-3.85	-11.27	-5.23	-26.97
Y02	1.79	2.74E+04	-0.15	-0.45	-0.20	-1.05
Y03	4.49	1.82E+04	1.37	4.01	1.88	9.65
Y04	6.78	7.28E+04	10.44	30.59	14.34	73.61
		1.91E+05				

COMBINAZIONE 8: $-0.3 F_x + F_y$

PARETI X	Yi [m]	Kxi [kN/m]	V1x [kN]	M1x [kNm]	Vtx [kN]	Mtx [kNm]
X01	11.08	2.82E+04	-3.76	-11.03	-5.13	-26.41
X02	7.93	1.65E+04	-1.95	-5.71	-2.71	-13.84
X03	6.33	1.90E+04	-2.10	-6.14	-2.95	-15.00
		6.37E+04				

COMBINAZIONE 8: $-0.3 F_x + F_y$

PARETI Y	Xi [m]	Kyi [kN/m]	V1y [kN]	M1y [kNm]	Vty [kN]	Mty [kNm]
Y01	0.21	7.28E+04	8.77	25.71	12.40	62.91
Y02	1.79	2.74E+04	3.52	10.30	4.91	25.03
Y03	4.49	1.82E+04	2.58	7.57	3.55	18.21
Y04	6.78	7.28E+04	11.15	32.68	15.11	78.01
		1.91E+05				

ALLEGATO N

Pareti X	l [m]	h PT [m]	h P1 [m]	Mbase [kNm]	Nbase [kN]	Mstab,pp [kNm]	H [kN]	TEd [kN]	Ted, senza pp [kN]	Hold Down scelto	nc [-]
X01	6.57	2.67	4.07	12.65	451.77	2966.79	-223.96	0.00	1.93	WHT 340	2
X02	4.27	2.67	3.72	61.50	191.05	815.80	-81.12	0.00	14.40	WHT 340	2
X03	5.00	2.67	3.92	102.58	286.28	1431.41	-122.63	0.00	20.52	WHT 340	2

Pareti X	Ted, senza pp [kN]	Hold Down scelto	nc [-]	Rt,d [kN]	Rs,d [kN]	Ft,Rd [kN]	Resistenza di progetto connessione singola [kN]	Rd > TEd
X01	1.93	WHT 340	2	39.09	56	56.52	39.09	VERIFICATO
X02	14.40	WHT 340	2	39.09	56	56.52	39.09	VERIFICATO
X03	20.52	WHT 340	2	39.09	56	56.52	39.09	VERIFICATO

Pareti Y	l [m]	h P T [m]	h P 1 [m]	Mbase [kNm]	Nbase [kN]	Mstab,pp [kNm]	H [kN]	T _{Ed} [kN]	T _{Ed} , senza pp [kN]	Hold Down scelto	nc [-]
Y01	14.78	2.67	2.90	145.50	383.29	5664.97	-85.98	0.00	9.84	WHT 340	4
Y02	6.33	2.67	3.46	54.15	506.30	3204.90	-244.60	0.00	8.56	WHT 340	2
Y03	4.75	2.67	3.74	35.39	202.01	959.54	-93.55	0.00	7.45	WHT 340	2
Y04	14.78	2.67	2.90	139.17	556.43	8224.01	-129.69	0.00	9.42	WHT 340	4

Pareti Y	T _{Ed} , senza pp [kN]	Hold Down scelto	nc [-]	R _{t,d} [kN]	R _{s,d} [kN]	F _{t,Rd} [kN]	Resistenza di progetto connessione singola [kN]	R _d > T _{Ed}
Y01	9.84	WHT 340	4	39.09	56	56.52	39.09	VERIFICATO
Y02	8.56	WHT 340	2	39.09	56	56.52	39.09	VERIFICATO
Y03	7.45	WHT 340	2	39.09	56	56.52	39.09	VERIFICATO
Y04	9.42	WHT 340	4	39.09	56	56.52	39.09	VERIFICATO

ALLEGATO O

Pareti X	l [m]	h PT [m]	h P1 [m]	Vbase [kN]	Angle-Brackets scelto	R _{v,d} [kN]	nsq, min [-]	nsq
X01	6.57	2.67	4.07	3.21	TITAN TTN240	19.36	0.166	1
X02	4.27	2.67	3.72	15.62	TITAN TTN240	19.36	0.807	1
X03	5.00	2.67	3.92	26.05	TITAN TTN240	19.36	1.346	2

Pareti X	Angle-Brackets scelto	R _{v,d} [kN]	nsq [-]	V _{c,Rd} [kN]	F _{v,Rd} [kN]	Resistenza di progetto connessione singola [kN]	Resistenza di progetto tutte le connessioni [kN]	R _{d,tot} > TEd	Interasse effettivo [m]	nsq,effettivo [-]
X01	TITAN TTN240	19.36	1	75.59	75.36	19.36	19.36	VERIFICATO	1	7
X02	TITAN TTN240	19.36	1	75.59	75.36	19.36	19.36	VERIFICATO	1	5
X03	TITAN TTN240	19.36	2	75.59	75.36	19.36	38.72	VERIFICATO	1	5

Pareti Y	l [m]	h PT [m]	h P1 [m]	Vbase [kN]	Angle-Brackets scelto	R _{v,d} [kN]	nsq,min [-]	nsq [-]
Y01	14.78	2.67	2.90	36.95	TITAN TTN240	19.36	1.90854935	2
Y02	6.33	2.67	3.46	13.75	TITAN TTN240	19.36	0.71035147	1
Y03	4.75	2.67	3.74	8.99	TITAN TTN240	19.36	0.46417556	1
Y04	14.78	2.67	2.90	35.34	TITAN TTN240	19.36	1.82547156	2

Pareti Y	Angle-Brackets scelto	R _{v,d} [kN]	nsq [-]	V _{c,Rd} [kN]	F _{v,Rd} [kN]	Resistenza di progetto connessione singola [kN]	Resistenza di progetto tutte le connessioni [kN]	R _{d,tot} > TE _d	Interasse effettivo [m]	nsq,effettivo [-]
Y01	TITAN TTN240	19.36	2	75.59	75.36	19.36	38.72	VERIFICATO	1	15
Y02	TITAN TTN240	19.36	1	75.59	75.36	19.36	19.36	VERIFICATO	1	7
Y03	TITAN TTN240	19.36	1	75.59	75.36	19.36	19.36	VERIFICATO	1	5
Y04	TITAN TTN240	19.36	2	75.59	75.36	19.36	38.72	VERIFICATO	1	15

ALLEGATO P

Pareti X	l [m]	h PT [m]	h P I [m]	M I [kNm]	N I [kN]	M stab [kNm]	H [kN]	T Ed [kN]	T ed, senza pp [kN]	Hold Down scelto	nc [-]
X01	6.57	2.67	4.07	7.59	210.38	690.77	-104.03	0.00	1.16	WHT PLATE 440	2
X02	4.27	2.67	3.72	36.90	100.91	215.44	-41.81	0.00	8.64	WHT PLATE 440	2
X03	5.00	2.67	3.92	61.55	139.74	349.34	-57.56	0.00	12.31	WHT PLATE 440	2

Pareti X	T ed, senza pp [kN]	Hold Down scelto	nc [-]	R t,d [kN]	R s,d [kN]	Resistenza di progetto connessione singola [kN]	R d > T ed
X01	1.16	WHT PLATE 440	2	18.67	30.456	18.67	VERIFICATO
X02	8.64	WHT PLATE 440	2	18.67	30.456	18.67	VERIFICATO
X03	12.31	WHT PLATE 440	2	18.67	30.456	18.67	VERIFICATO

Pareti Y	l [m]	h PT [m]	h P1 [m]	M1 [kNm]	N1 [kN]	Mstab [kNm]	H [kN]	T _{Ed} [kN]	T _{ed, senza pp} [kN]	Hold Down scelto	nc [-]
Y01	14.78	2.67	2.90	87.30	196.76	1454.04	-43.28	0.00	5.91	WHT PLATE 440	4
Y02	6.33	2.67	3.46	32.49	247.96	784.79	-118.85	0.00	5.13	WHT PLATE 440	2
Y03	4.75	2.67	3.74	21.23	96.59	229.40	-43.83	0.00	4.47	WHT PLATE 440	2
Y04	14.78	2.67	2.90	83.50	256.51	1893.57	-58.48	0.00	5.65	WHT PLATE 440	4

Pareti Y	T _{ed, senza pp} [kN]	Hold Down scelto	nc [-]	R _{t,d} [kN]	R _{s,d} [kN]	Resistenza di progetto connessione singola [kN]	R _d > T _{Ed}
Y01	5.91	WHT PLATE 440	4	18.67	30.456	18.67	VERIFICATO
Y02	5.13	WHT PLATE 440	2	18.67	30.456	18.67	VERIFICATO
Y03	4.47	WHT PLATE 440	2	18.67	30.456	18.67	VERIFICATO
Y04	5.65	WHT PLATE 440	4	18.67	30.456	18.67	VERIFICATO

ALLEGATO Q

Pareti X	l [m]	h PT [m]	h PI [m]	V1 [kN]	Angle-Brackets scelto	R _{v,d,parete} [kN]	nsq,min [-]	nsq [-]
X01	6.57	2.67	4.07	1.08	TITAN TTN160	27.73	0.039	1
X02	4.27	2.67	3.72	5.25	TITAN TTN160	27.73	0.189	1
X03	5.00	2.67	3.92	8.75	TITAN TTN160	27.73	0.316	1

Pareti X	Angle-Brackets scelto	R _{v,d,parete} [kN]	nsq,min [-]	nsq [-]	V _{c,Rd} [kN]	R _{v,d,solaio} [kN]	Resistenza di progetto connessione singola [kN]	Resistenza di progetto tutte le connessioni [kN]	R _{d,tot} > T _{Ed}	Interasse effettivo [m]	nsq,effettivo [-]
X01	TITAN TTN160	27.73	0.039	1	54.40	12.8	12.80	12.80	VERIFICATO	1	7
X02	TITAN TTN160	27.73	0.189	1	54.40	12.8	12.80	12.80	VERIFICATO	1	5
X03	TITAN TTN160	27.73	0.316	1	54.40	12.8	12.80	12.80	VERIFICATO	1	5

Pareti Y	l [m]	h PT [m]	h P1 [m]	V1 [kN]	Angle-Brackets scelto	R _{v,d,parete} [kN]	nsq,min [-]	nsq [-]
Y01	14.78	2.67	2.90	12.41	TITAN TTN160	27.73	0.448	1
Y02	6.33	2.67	3.46	4.62	TITAN TTN160	27.73	0.167	1
Y03	4.75	2.67	3.74	3.02	TITAN TTN160	27.73	0.109	1
Y04	14.78	2.67	2.90	11.87	TITAN TTN160	27.73	0.428	1

Pareti Y	Angle-Brackets scelto	R _{v,d,parete} [kN]	nsq,min [-]	nsq [-]	V _{c,Rd} [kN]	R _{v,d,solaio} [kN]	Resistenza di progetto connessione singola [kN]	Resistenza di progetto tutte le connessioni [kN]	R _{d,tot} > T _{Ed}	Interasse effettivo [m]	nsq,effettivo [-]
Y01	TITAN TTN160	27.73	0.448	1	54.40	12.8	12.80	12.80	VERIFICATO	1	15
Y02	TITAN TTN160	27.73	0.167	1	54.40	12.8	12.80	12.80	VERIFICATO	1	7
Y03	TITAN TTN160	27.73	0.109	1	54.40	12.8	12.80	12.80	VERIFICATO	1	5
Y04	TITAN TTN160	27.73	0.428	1	54.40	12.8	12.80	12.80	VERIFICATO	1	15

11. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

11.1. Quadro Normativo Spagnolo

- Ministerio de Vivienda, *CTE DB-SE-AE: Acciones en la Edificación* (Cap. 2 per il vento, Cap. 3 per la neve)
- Ministerio de Vivienda, *CTE DB-SE-M: Seguridad Estructural - Madera* (Recepimento Eurocodice 5)
- Ministerio de Vivienda, *CTE DB-HE: Ahorro de Energía* (Sezioni HE0 per il fabbisogno e HE1 per la trasmittanza)
- Ministerio de Vivienda, *CTE DB-HS: Higiene, Salud y Protección del Medio Ambiente* (Sezione HS3 per qualità dell'aria e VMC, HS4 per salubrità, HS5 per evacuazione acque)
- Ministerio de Vivienda, *CTE DB-SUA: Seguridad de Utilización y Accesibilidad* (Normativa per il calcolo delle scale)
- Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, *Decreto 351/2007: Ordenanzas Turísticas de Castilla-La Mancha* (Regolamento per strutture ricettive e ventilazione naturale)

11.2. Quadro Normativo Europeo (Eurocodici e Norme EN/UNE)

- UNI EN 1995-1-1 (Eurocodice 5): Progettazione delle strutture di legno
- UNI EN 1998 (Eurocodice 8): Progettazione delle strutture per la resistenza sismica
- NCSE-02: *Norma de Construcción Sismorresistente* (Spagna)
- UNE-EN 16351: Legno lamellare a strati incrociati (XLAM) - Requisiti di produzione
- UNE-EN 338: Legno strutturale - Classi di resistenza
- UNE-EN 14081: Legno strutturale con sezione rettangolare classificato secondo la resistenza
- UNI EN 15804: Dichiarazioni ambientali di prodotto (EPD) per il settore delle costruzioni
- UNE-EN 15425: Adesivi per strutture portanti in legno (incollaggio strati)
- UNE-EN 12831: Impianti di riscaldamento negli edifici - Metodo di calcolo del carico termico di progetto

11.3. Bibliografia tecnica

- ArcelorMittal, *Design Guide for Floor Vibrations*, Guida tecnica per l'analisi del comportamento vibrazionale dei solai
- Bernasconi, A., *Il calcolo dell'XLAM: Basi, normative, progettazione, applicazione*, Documento tecnico promo_legno, 2011
- Bernasconi, A., *Pareti in XLAM: come funzionano gli elementi verticali nella struttura scatolare*, Teknoring, 2016
- Berta, L., Bovati, M., *Progettare con il legno*, Maggioli Editore, 2007
- Borgström, E., Fröbel, J., *The CLT Handbook, CLT Structures – Facts and Planning*, Swedish Wood, 2019. ISBN 978-91-983214-4-3
- Calderoni, B., Giubileo, C., Sandoli, A., *Criteri di progettazione strutturale edifici in legno a pannelli XLAM*, Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Napoli
- Piazza, M., Tomasi, R., Modena, C., *Strutture in legno. Materiale, calcolo e progetto secondo le nuove normative europee*, Hoepli Editore, 2005
- Presutti, A., Evangelista, P., *Edifici multipiano in legno a pannelli portanti in XLAM*, Dario Flaccovio Editore, 2014
- Tomasi, R., *Connessioni e collegamenti: principi ed applicazioni*, Documento tecnico promo_legno
- ETA (European Technical Assessment): Documentazione tecnica specifica del produttore per la marcatura CE dei pannelli XLAM

11.4. Portali Istituzionali e ricerca territoriale

- Catastro de España, *Consultazione dati catastali e cartografici di Moya (Cuenca)*: www1.sedecatastro.gob.es (visitato in data 02 aprile 2026)
- Cultura Castilla-La Mancha, *Catalogo del Patrimonio Culturale: Conjunto Histórico de Moya*: cultura.castillalamancha.es (visitato in data 02 aprile 2026)
- Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, *Portale Tributario: Benefici fiscali per comuni a rischio spopolamento (Art. 12 bis)* (visitato in data 02 aprile 2026)

Riqualficazione del patrimonio edilizio esistente: progettazione di sistemi modulari in XLAM a Moya, (Castilla-La Mancha, Spagna)

- Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), *Archivo cartografico e storico della Comunità di Castilla-La Mancha* (visitato in data 02 aprile 2026)

11.5. Supporto tecnico e software

- COACM (Colegio Oficial de Arquitectos de Castilla-La Mancha), *Manuale tecnico per l'analisi climatica nel software CE3X*: rehabilitacion.coacm.es (visitato in data 02 aprile 2026)
- Ministerio para la Transición Ecológica, *Software CE3X v. 2.3* (Strumento ufficiale per la certificazione energetica spagnola) (visitato in data 02 aprile 2026)
- Rothoblaas, *Manuali tecnici per sistemi di connessione, fissaggio e impermeabilizzazione del legno*: www.rothoblaas.it (visitato in data 02 aprile 2026)
- Ediltecnico, *Approfondimenti sulla concezione strutturale degli edifici in XLAM*: ediltecnico.it (visitato in data 02 aprile 2026)

11.6. Sistemi costruttivi e produttori consultati

- Daliform Group, *Sistemi Iglù® per la realizzazione di vespai ventilati*: www.daliform.com (visitato in data 28 marzo 2026)
- Soprema Italia, *Soluzioni per l'impermeabilizzazione sintetica e membrane TPO*: www.soprema.it (visitato in data 28 marzo 2026)
- Uponor, *Sistemi radianti a bassa inerzia per il comfort termico*: www.uponor.com (visitato in data 28 marzo 2026)
- Sika España, *Adesivi strutturali e sigillanti Sikaflex per costruzioni in legno*
- Global Building, *Sistemi di protezione passiva al fuoco per controsoffitti a membrana*
- Subissati, *Tecnologie costruttive e nodi per sistemi a pannelli XLAM*
- Valentina Bertolutti, *Tutti i modi possibili per collegare tra loro i pannelli XLAM*