

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA EDILE-ARCHITETTURA

TESI DI LAUREA

In

Architettura tecnica II

**Case di sasso nell'Appennino tosco-emiliano: tecniche di intervento
mirate al consolidamento strutturale e riqualificazione energetica**

CANDIDATO:

Lorenzo Antoniani

RELATORE:

Prof.ssa Cecilia Mazzoli

CORRELATORI:

Prof.ssa Annarita Ferrante

Ing. Andrea Guidotti

Anno Accademico [2024/2025]

Sessione III

Alla mia Famiglia

ABSTRACT.....	
1. AMBITO DI INTERVENTO: APPENNINO TOSCO-EMILIANO	1
1.1 Inquadramento.....	1
1.2 Architettura e Conservazione della Memoria.....	2
1.3 Contesto geologico.....	4
1.4 Contesto climatico.....	7
1.5 Materiali dell’edilizia storica.....	12
1.5.1 Pietra	14
1.5.2 Legname.....	20
1.5.3 Malta.....	23
1.6 Le Maestranze.	24
2. CARATTERI E TIPI DEL PATRIMONIO APPENNINICO.....	26
2.1 I tre principi dell’Architettura vitruviana.....	26
2.2 Tracciati regolatori	28
2.3 Unità di misura storiche.....	29
2.4 Dal tipo ligneo al tipo litico.....	31
2.5 La Cella elementare.....	34
2.6 Tipi edilizi.....	36
2.6.1 In linea	37
2.6.2 A spirale.....	39
2.6.3 Le case torri.....	40

3. ANALISI STRUTTURALE ED ENERGETICA DELLE COSTRUZIONI IN MURATURA.....	47
3.1 Muratura.....	47
3.1.1 Composizione.....	47
3.1.2 Caratteristiche meccaniche.....	48
3.2 Tipologie strutturali	50
3.3 Organismo edilizio.....	51
3.4 Azioni sulle costruzioni.....	52
3.5 Analisi del comportamento strutturale	55
3.5.1 Indice di qualità muraria.....	56
3.5.2 Analisi dei meccanismi locali	60
3.5.3 Analisi globale.....	61
3.6 Analisi delle prestazioni energetiche.....	62
3.6.1 Chiusure opache verticali.....	62
3.6.2 Chiusure opache orizzontali	65
3.6.3 Chiusure trasparenti	66
 4. CRITERI DI INTERVENTO PER LA RIQUALIFICAZIONE DEL PATRIMONIO ESISTENTE.....	 68
4.1 Quadro normativo vigente per gli interventi di consolidamento strutturale.....	68
4.1.1 Classificazione degli interventi	70
4.1.2 Livelli di conoscenza e fattori di confidenza	72
4.1.3 Edifici in aggregato.....	73
4.1.4 Criteri per gli interventi di consolidamento.....	75
4.2 Quadro normativo vigente per gli interventi di riqualificazione energetica.....	76
4.2.1 Normativa europea	76

4.2.2 Normativa italiana.....	77
4.2.3 Normativa della regione Emilia-Romagna.....	79
5. TECNICHE DI INTERVENTO.....	81
5.1 Tecniche di intervento mirate al consolidamento strutturale.....	81
5.1.1 Murature.....	81
5.1.2 Solai interpiano e coperture	85
5.1.3 Fondazioni.....	90
5.2 Tecniche di intervento mirate alla riqualificazione energetica.....	93
5.2.1 Soluzioni per l'isolamento interno	94
5.2.2 Soluzioni per umidità di risalita	98
5.3 Interventi proposti sulle nodalità critiche.....	100
5.3.1 Stato di fatto.....	100
5.3.2 Stato di progetto.....	101
5.4 Interventi proposti sugli elementi trasparenti di chiusura	110
5.5 Interventi proposti sugli elementi opachi di chiusura	111
6. CONSIDERAZIONI E CONCLUSIONI.....	112
APPENDICE 1: NODALITA' CRITICHE.....	115
A1 - A2	
B1.1 - B1.2 - B1.3	
B2.1 - B2.2 - B2.3	
C1.1 - C1.2	
C2.1 - C2.2	
APPENDICE 2: ELEMENTI DI CHIUSURA.....	141
D1 - D1.1 - D1.2	
E1.1 - E1.2 - E2 - E2.1	

BIBLIOGRAFIA.....	156
INDICE DELLE FIGURE.....	159

ABSTRACT

Oggetto di questa Tesi è il patrimonio edilizio storico in sasso dell'Appennino tosco-emiliano e, più precisamente, del territorio tra le province di Bologna e Forlì-Cesena, analizzato sotto il profilo statico-costruttivo ed energetico.

La Tesi vuole essere un contributo alla raccolta e sistematizzazione delle conoscenze relative agli interventi di consolidamento strutturale e riqualificazione energetica per i tipi storici di quest'area.

Il patrimonio in questione, nel suo complesso, non gode delle tutele previste per i beni di “pregio storico–testimoniale” se non per puntuali eccezioni quali borghi o insediamenti rurali. Di conseguenza, il relativo adeguamento prestazionale alle normative vigenti non prevede alcuna misura di attenuazione. Nonostante l'assenza di tali tutele, si intende proporre soluzioni di intervento orientate alla conservazione delle caratteristiche tipologiche e formali che caratterizzano l'identità architettonica di questi edifici. Gli interventi proposti, principalmente focalizzati su aspetti statico-costruttivi ed energetici, vogliono essere un mezzo attraverso cui promuovere il recupero dell'eredità storica del territorio appenninico perseguendo due principali obiettivi: da un lato la conservazione e la valorizzazione dei manufatti storici, dall'altro l'intenzione di adeguare tale patrimonio alle esigenze tecniche e funzionali contemporanee.

La Tesi si articola in sei capitoli.

I primi due capitoli sono rivolti alla definizione dell'ambito di intervento. Partendo dalla definizione dell'area geomateriale a cui si fa riferimento, vengono descritti i materiali dell'edilizia storica e le tecniche costruttive ricorrenti. In seguito, viene effettuata un'analisi sulla nascita ed evoluzione dei tipi riscontrati nell'area, ponendo l'attenzione sulle principali forme di accrescimento e aggregazione (Y. Pennacchi, luglio 2025).

Il terzo e quarto capitolo si articolano in una prima parte dedicata alle caratteristiche tecniche e meccaniche degli edifici in muratura portante, dando rilievo all'analisi del comportamento strutturale e delle prestazioni energetiche. Nella seconda parte vengono invece illustrati i criteri e le tecniche di intervento in relazione alla normativa italiana vigente in ambito di consolidamento strutturale (NTC 2018 e Circolare n.7/2019) e di riqualificazione energetica (UNI 10351:2021, UNI EN ISO 6946, UNI EN ISO 10077-1, UNI EN ISO 13370).

Negli ultimi due capitoli, di carattere progettuale, vengono applicate le nozioni precedentemente fornite sviluppando soluzioni di intervento mirate alla risoluzione delle principali nodalità critiche, con l'obiettivo di conciliare le richieste prestazionali da normativa vigente e il mantenimento delle caratteristiche formali del manufatto. In particolare, per quanto concerne l'analisi energetica e igrotermica delle stratigrafie di pareti, coperture e solai è stato utilizzato il software PAN8 di ANIT.

Oltre alle nodalità strutturali, vengono proposti anche interventi per l'efficientamento energetico di elementi di chiusura storici, opachi e trasparenti.

1.AMBITO DI INTERVENTO: APPENNINO TOSCO- EMILIANO

1.1 INQUADRAMENTO



Figura 1: Inquadramento geografico dell'area oggetto di studio, l'Alto Appennino tosco-emiliano tra le province di Bologna e Forlì-Cesena. In rosse evidenziate le province di Bologna, Ravenna e Forlì-Cesena. In nero l'area del crinale appenninico corrispondente. [<http://geoportale.regione.emilia-romagna.it>]

L'area oggetto di studio si colloca nell'Appennino tosco-emiliano, in corrispondenza del crinale appenninico fra le province di Bologna e Forlì-Cesena (**Fig. 1**). Questo contesto territoriale è caratterizzato dall'alternanza di dorsali montuose e profonde vallate con quote generalmente comprese fra i 700 e i 1900 m s.l.m. In particolare, spiccano i rilievi del Corno alle Scale (1945 m s.l.m.), il monte Spigolo (1827 m s.l.m.) e il monte Falco (1658m s.l.m.).

Dal punto di vista paesaggistico, il

territorio è caratterizzato da ampi boschi, aree di pascolo e insediamenti rurali di origine storica spesso ubicati lungo le principali vie di crinale e nei fondivalle. In questo contesto il riconoscimento del suo valore naturalistico-ambientale ha portato l'istituzione di diversi parchi protetti come il "Parco regionale del Corno alle Scale" o il "Parco Nazionale delle Foreste Casentinesi" o ancora, le zone di protezione speciale ZPS dell'alto Appennino romagnolo.

Inoltre, il patrimonio edilizio appenninico

rappresenta un elemento identitario sotto il profilo storico-culturale e testimoniale. Il millenario processo di interazione tra l'uomo e l'ambiente naturale ha contribuito alla delineazione di caratteristiche uniche del patrimonio costruito, risultato dell'equilibrio tra esigenze funzionali, risorse materiali e condizioni ambientali. In questo contesto gli interventi di consolidamento strutturale e riqualificazione energetica hanno un duplice obiettivo: recuperare il patrimonio esistente sotto l'aspetto delle prestazioni tecniche e funzionali e conservare le caratteristiche tipologiche e formali che caratterizzano l'identità architettonica di questi edifici.

1.2 ARCHITETTURA e CONSERVAZIONE DELLA MEMORIA

“Tale modello (attività edilizia di culture autoctone, riferibile a gruppi e comunità organizzate) può essere considerato l'espressione di una società che attinge al proprio specifico patrimonio di riferimenti culturali, di risorse materiali, di capacità tecnologiche e adatta continuamente alle proprie esigenze l'ambiente identificato come la propria residenza storica e proprio ambito vitale. L'opera edilizia [...] appariva prodotta da un consenso implicito che, scaturito tradizionalmente

tra la 'gente del mestiere', riguardava oltre all'utilizzazione dei materiali naturali anche il ricorso a linguaggi progettuali, soluzioni tecniche e gestualità esecutive consolidati da una prassi ricorrente”¹

L'Appennino tosco-emiliano vanta una grande varietà all'interno del suo patrimonio edilizio, spesso però ritenuto di trascurabile rilevanza poiché facente parte della cultura popolare rurale e artigianale sviluppatasi in condizioni di autonomia e contrapposizione alle società urbane e talvolta allo “Stato”. La dicotomia città-montagna o meglio ancora, centro urbano-territorio rurale ha da sempre evidenziato l'egemonia del primo sul secondo, prediligendo una visione dualistica “maggiore-minore” in relazione alle arti e all'artigianato (ma non solo). Nasce per questo la necessità di esaltare, conservare e preservare l'eredità dell'Appennino tosco-emiliano, cosicché passato presente e futuro possano coesistere in un rapporto di dialogo intergenerazionale al fine di mantenere intatta una cultura secolare e di tener vivo l'insegnamento dei nostri antenati. Al giorno d'oggi poche sono le testimonianze scritte che queste civiltà hanno tramandato, ma attraverso l'attenta e meticolosa analisi dei loro antichi segni

¹ Luigi Zordan, Alessandra Bellicoso, Gianni di Giovanni, Renato Morganti. Università degli studi dell'Aquila, Dipartimento di Architettura e

Urbanistica. “Stone House Building: Materials, Techniques, models and experimentations” Alinea Editrice, l'Aquila 2002

dell'abitare possiamo comprendere a pieno i valori e i fondamenti di queste società strettamente legate alla natura e al paesaggio. Stagioni di dispersione e cancellazione di tracce storiche combinate con le sfrenate trasformazioni edilizie degli anni '60, hanno portato all'utilizzo incondizionato di tecniche edilizie caratterizzate da malte cementizie, blocchi laterizi e la quasi totale esclusione del legno. La pietra come materiale edilizio cade così in disuso, e di conseguenza si ha la rarefazione di maestranze capaci di saperla usare in modo competente. Questa eredità materica e costruita ci trasmette a pieno quanto la realizzazione di questi insediamenti sia stata eseguita attraverso una dimensione tecnica essenziale tipica dell'edilizia spontanea, attuata da esperti delle comunità locali con il completo dominio delle tecniche costruttive e piena disponibilità dei materiali edilizi. È proprio questa la matrice e chiave di lettura attraverso il quale il progettista deve attuare la sua professione, impiegando i progressi della tecnica e subordinando ogni volontà di imprimere il proprio individuale

segno al fine di tramandare nella maniera più sincera, i segni della nostra storia.

“Il significato dei segni, dei simboli, dei mezzi espressivi utilizzati, le diversità terminologiche e lessicali nella versatilità dei dialetti, la funzionalità specifica nelle parti della casa e della sua area di pertinenza, la logica dei percorsi in relazione con gerarchie e tempi di costruzione, le grandi categorie dei materiali, fanno parte degli strumenti indispensabili per capire un'architettura e dovrebbero accompagnare, anche se non richiesti da nessun regolamento, qualsiasi azione di recupero edilizio”²

Utile approfondire brevemente il tema dello spopolamento e abbandono delle aree rurali montane, in particolar modo dell'alto crinale appenninico, fenomeno strettamente legato a problematiche ambientali, sociali ed economiche. Come reso pubblico nel Rapporto dell'Appennino bolognese³, i territori rurali, più lontani

² Da Maria Foschi e Pier Luigi Cervellati, Istituto per i Beni Culturali della regione Emilia-Romagna e Istituto per lo sviluppo economico dell'Appennino 'La fabbrica dell'Appennino: Architettura struttura e ornato' Grafis Edizioni, Bologna 1988

³ Maria Angiola Galligani, Direzione generale Servizio Studi e Statistica per la programmazione strategica della città Metropolitana di Bologna.

“Rapporto Appennino bolognese”, 21 marzo 2019. nel segmento temporale 2008-2017 la popolazione complessiva nei territori montani conferma la tendenza negativa degli anni precedenti: la variazione percentuale media annua della popolazione dell'Unione dei Comuni dell'Appennino Bolognese, in particolar modo i territori rurali più lontani dalla città di Bologna come Camugnano, Lizzano in Belvedere San e

dalla città di Bologna, sono i più esposti a tale fenomeno, accompagnati da marcata anzianità della popolazione residente e redditi medi annui tra i più bassi della Città Metropolitana. Carenze in termini di servizi, come mobilità, salute e istruzione sono cruciali nel determinare l'andamento in questione. L'abbandono del territorio determina un grave danno all'habitat montano: terrazzamenti, boschi, pascoli, alpeggi perdono il prezioso equilibrio creatosi in secoli di relazioni con l'uomo⁴. Presidiare e vivere il territorio è un atto di conservazione ambientale. Il recupero e la conservazione dell'edilizia esistente può e deve giocare un ruolo fondamentale nel ripopolamento di queste aree, in un'ottica di unione tra valorizzazione del territorio e conservazione della memoria locale.

1.3 CONTESTO GEOLOGICO

Importante nel contesto della ricerca è definire un'area uniforme sotto il profilo geologico e litologico detta area geomateriale litica. L'approvvigionamento dei materiali da costruzione dell'edilizia residenziale storica avveniva tipicamente vicino ai centri abitati o vicino al sito di

cantiere stesso, riducendo così l'utilizzo di mezzi di trasporto onerosi e diminuendo i tempi di realizzazione dell'opera.

L'organizzazione stessa del processo costruttivo era definita da parametri di vicinanza spaziale e livello di difficoltà di trasporto dei materiali: problematica ben conosciuta soprattutto in aree montane prive di reti di comunicazione efficienti. Conseguentemente a questo possiamo dire che in una stessa area geomateriale litica, l'edilizia rurale storica presente nel territorio seguirà filoni costruttivi comuni, attingendo per l'appunto dalle stesse risorse naturali. L'alto Appennino non fa eccezione: pietrame per le murature, legname, calce e inerti per le malte provengono dalle stesse cave e dagli stessi boschi, risorse naturali preziose che hanno permesso lo sviluppo di una cultura e identità locale. Il quadro geologico dell'Appennino tosco-emiliano è complesso e diversificato (**Fig. 1.1**), motivo per cui si ha avuto nella storia una

Benedetto Val di Sambro vedono percentuali negative rispettivamente del 11,29%, 8,94% e 8,12%.

⁴Alessandro Trigila, Carla Iadanza, Martina Bussetti, Barbara Lastoria: Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) "Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio" 2018

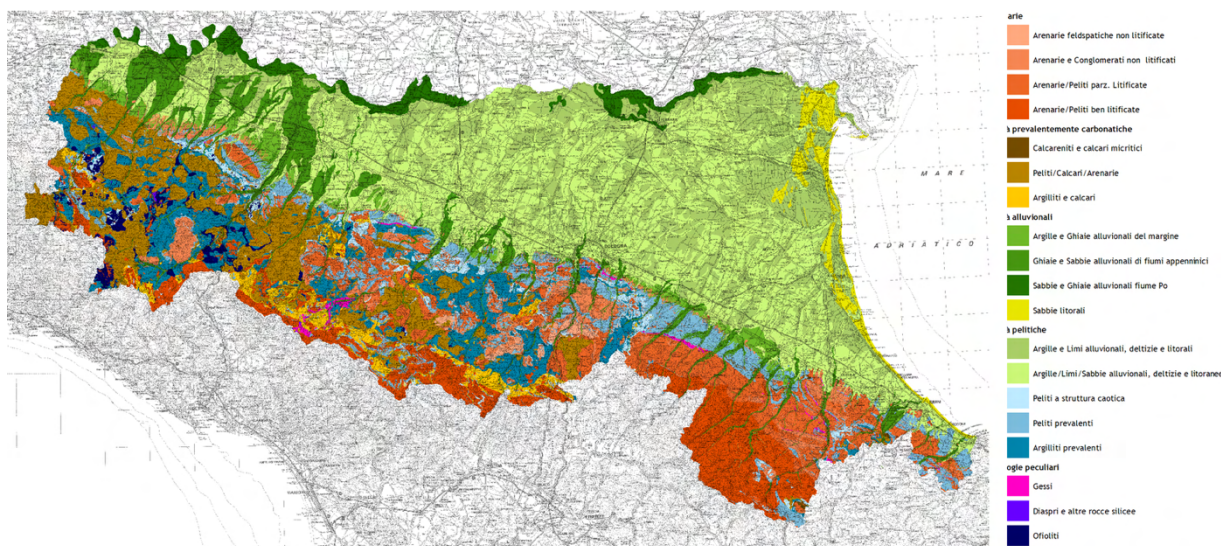


Figura 1.1: Schema geologico della Regione Emilia-Romagna (modificato da Carta Geologica d'Italia, Fogli 237 e 252, 1: 50.000,2003)

grande varietà di risultati formali e stilistici nell'edilizia rurale.

La conseguenza di due importanti fasi deformative del Cretaceo superiore e dell'Eocene inferiore, hanno scompaginato rispettivamente le Argille Scagliose (viola) e i Flysch a Elmintoidi (rosa) rappresentati da depositi silicoclastici Oligo-Miocenici. Come è possibile osservare nella **Fig. 1.2**, rappresentante lo schema geologico della montagna bolognese riconosciamo subito proprio queste due formazioni litologiche. Scoperte e battezzate col nome Argille Scagliose (AS) nel 1840 da Giovanni Giuseppe Bianconi, sono costituite in ordine di messa in posto da rocce magmatiche vulcaniche di fondo oceanico, le ofioliti (peridotiti serpentinizzate, gabbri iniettati, basalti a cuscini e brecce associate, che formano la triade di Steinman), seguite da diaspri, radiolariti,

calcari a Calpionella, argilliti nere a palombini (calcari chiari), argilliti varicolori e areniti calcaree. La componente argillitica prevale ed è caratterizzata da una tessitura a piccole scaglie o "mandorle" che le rende un miscuglio disordinato in cui non è più riconoscibile la stratificazione. Gli ammassi ofiolitici delle Argille Scagliose, a partire dalla II Guerra Mondiale, sono stati usati, e talora demoliti, come cave di prestito di materiali inerti per l'edilizia e le strade.

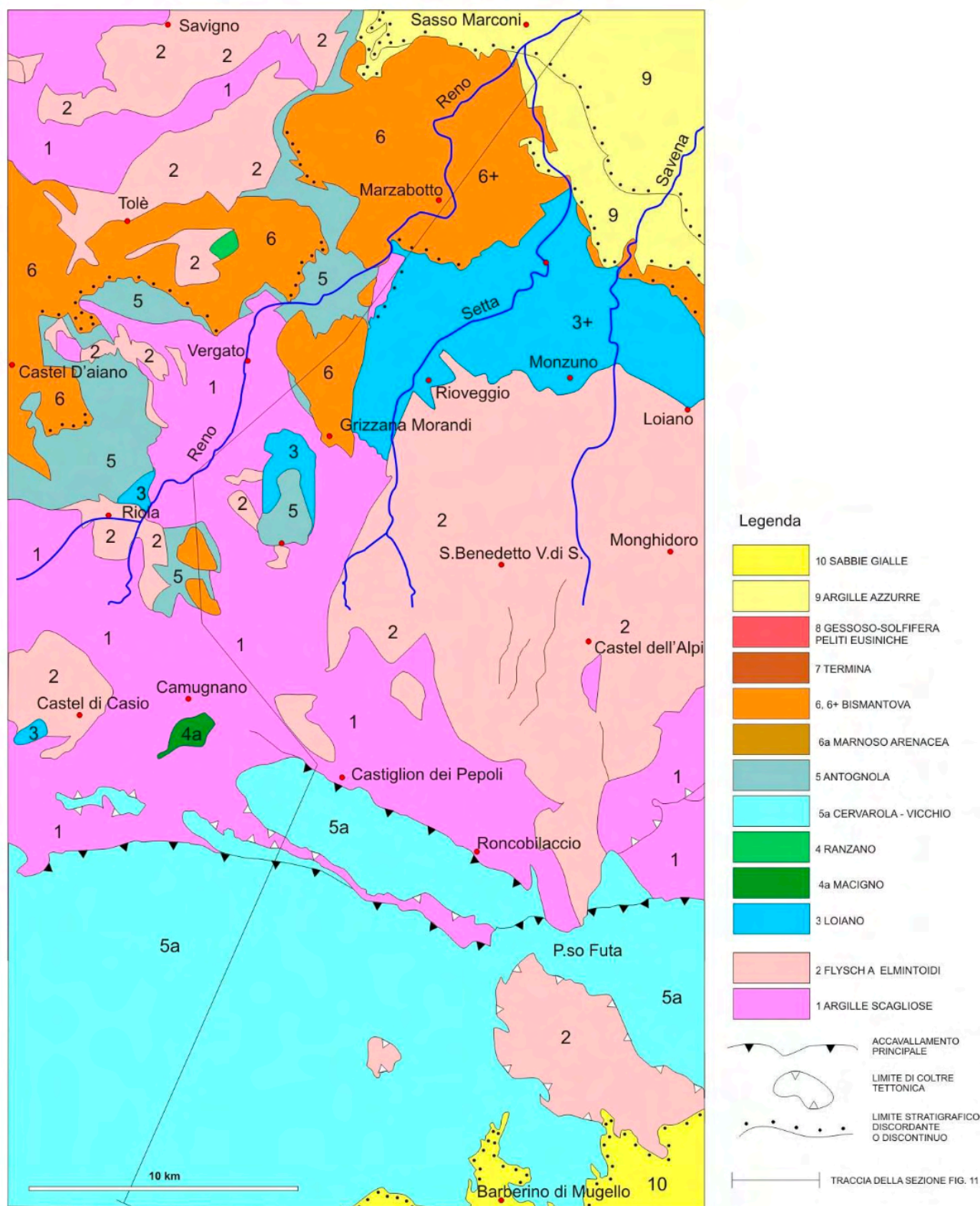


Figura 1.2: Schema geologico della montagna bolognese da Sasso Marconi a Barberino di Mugello (modificato da Carta Geologica d'Italia, Fogli 237 e 252, 1: 50.000, 2003)

1.4 CONTESTO CLIMATICO

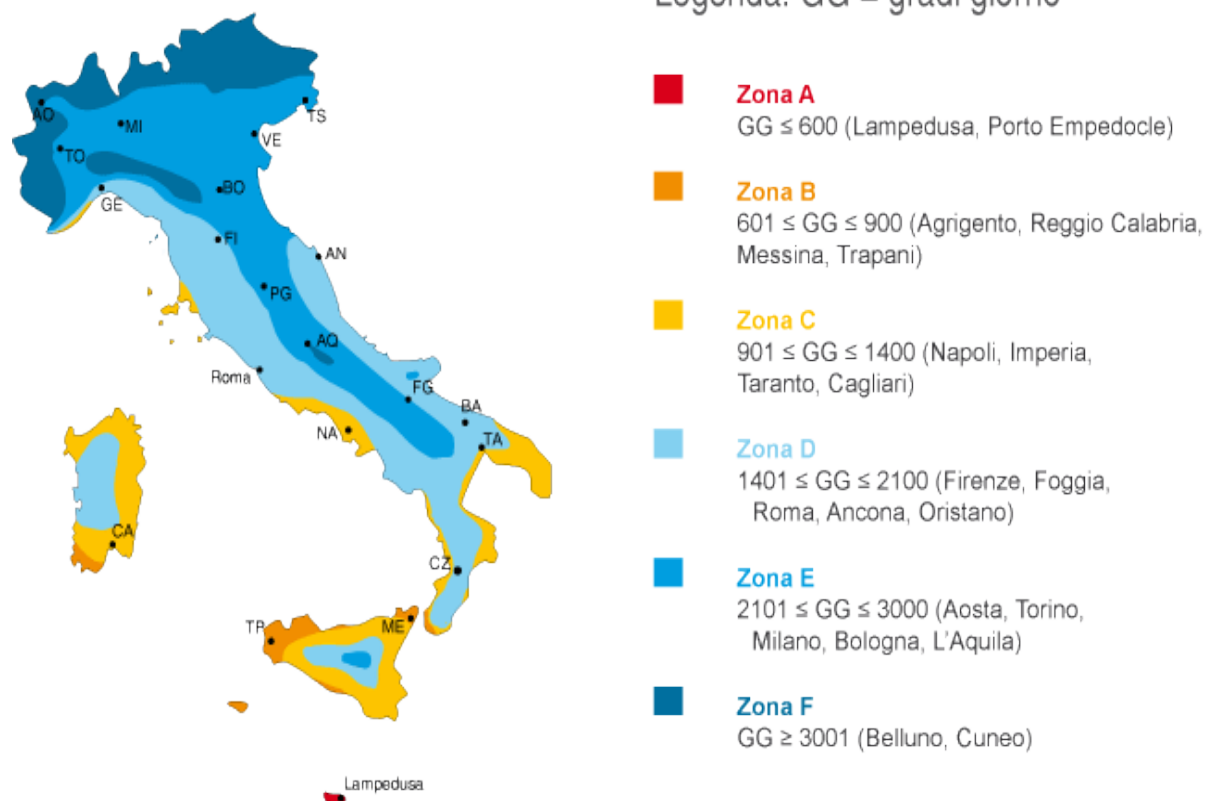


Figura 1.3: Divisione del territorio nazionale secondo le sei Zone individuate dal D.P.R. n.412 del 26 agosto 1993

Per la definizione del quadro climatico attuale, il territorio della Città Metropolitana di Bologna e le provincie di Ravenna e Forlì-Cesena ricade, secondo il D.P.R. n.412 del 26 agosto 1993, all'interno della fascia climatica 'E'. Le fasce climatiche italiane sono sei (A, B, C, D, E, F) (**Fig. 1.3**) e vengono determinate tramite intervalli definiti dai “gradi-giorno”⁵ : più è elevato questo parametro più il clima di tale territorio sarà rigido.

Osservando la divisione interna di questo territorio possiamo individuare una fascia climatica differente dalla E (gradi-giorno tra 2101 e 3000) in prossimità dei comuni a ridosso del crinale appenninico principale, quali ad esempio Lizzano in Belvedere, Loiano e Monghidoro inseriti nella fascia 'F' (gradi-giorno superiori a 3000). Possiamo classificare il clima del territorio come zona temperata settentrionale con la sua localizzazione tra

⁵ Gradi-giorno (GG o gr-g): parametro corrispondente alla somma, in tutti i giorni dell'anno, della differenza (solo quella positiva) tra

la temperatura dell'ambiente interno (fissata per convenzione a 20°C) e la temperatura media esterna giornaliera.

Appennino e Adriatico, al margine centro-meridionale della pianura padana. Il Mar Adriatico, chiuso e poco profondo, pur distando appena una trentina di chilometri dall'estremità orientale della Provincia, pare non esercitare alcuna reale azione mitigatrice sulle temperature estreme. Il crinale appenninico, diretto da Nord-ovest a Sud-est, e la successione dei contrafforti e delle valli, orientati da Sud-ovest a Nord-est, influenzano l'andamento dei venti e impediscono l'influsso mitigatore del Mar Tirreno. Si possono distinguere tre fasce altimetriche e climatiche ovvero l'area montana, l'area collinare e l'area pianeggiante. L'area montana è caratterizzata da un clima temperato fresco. Con l'aumentare della quota si ha una progressiva diminuzione della temperatura e dell'umidità, mentre si osserva un incremento graduale della nuvolosità, della ventosità, delle precipitazioni piovose e nevose, delle gelate notturne, della durata della copertura nevosa. A causa del raffreddamento notturno del fondovalle, nelle valli montane, si hanno formazioni intense e frequenti. Con l'aumento della quota di norma si ha una graduale diminuzione della temperatura media ed un aumento delle precipitazioni.

Parlare di clima come una costante temporale risulta però impreciso,

soprattutto oggi dopo decenni di studio da parte della comunità scientifica. Per cambiamento climatico si intende un processo di modifica a lungo termine delle variabili atmosferiche in parte dovuto alla naturale variabilità del clima terrestre e in parte all'azione antropica dell'uomo, il quale ha immesso in atmosfera gas (tra i più e i meno inquinanti) che hanno comportato l'alterazione dei normali equilibri chimici in atmosfera. La ormai consolidata consapevolezza sui rischi e problematiche portate dal cambiamento climatico ci impone lo studio di queste variazioni degli equilibri meteorologici in modo da poter sviluppare metodologie atte alla conservazione, prevenzione e resilienza dei nostri tessuti urbani e sociali nonché alla preservazione del patrimonio naturalistico. Le conseguenze di queste alterazioni climatiche sono molteplici, come l'aumento medio della temperatura globale atmosferica e dei mari (e conseguente acidificazione dell'ambiente marino), l'innalzamento dei livelli altimetrici dei mari, l'intensificazione di eventi climatici estremi come tempeste ed uragani ma anche fenomeni di siccità, perdita di biodiversità e rischi per la salute umana. Focalizzando l'attenzione sul territorio dell'appennino tosco-emiliano, la Città Metropolitana di Bologna ha

elaborato nel contesto del PTM⁶ ai sensi dell'articolo 17 del D.lgs. 152/2006 e dell'articolo 46 comma 7 della L.R. 24/2017 e in collaborazione con ARPAE una analisi della variabilità climatica dal 1961 al 2018⁷ e una proiezione futura dal 2021 al 2050⁸ attraverso i parametri di temperatura, precipitazioni ed eventi estremi. Partendo dal quadro conoscitivo diagnostico si definiscono i periodi 1961-1990 e 1991-2018 per la comparazione rispetto ai dati climatici. I risultati evidenziano come la temperatura media annua nel secondo periodo, delinea un aumento su tutto il territorio metropolitano. Anche i territori meno cementificati e ad altitudini maggiori come l'appennino e il territorio collinare riportano aumenti significativi (circa 1 grado Celsius). La variabilità spaziale della quantità annua di precipitazioni mostra valori compresi tra circa 600 mm/anno nella zona di collina, fino a 1850 mm/anno nelle zone di montagna. Il confronto tra i due periodi climatici 1961- 1990 e 1991-2018 mostra configurazioni abbastanza simili a livello

annuo mentre sul lungo periodo non si evidenzia un segnale di tendenza statisticamente significativo. Lo studio preliminare ha poi evidenziato, per il numero di notti tropicali, cioè il numero di notti con la temperatura minima superiore a 20 °C un aumento nel periodo 1991-2018 rispetto al periodo 1961-1990. Attraverso il grafico sulla distribuzione spaziale del numero annuo di notti tropicali, si può notare come le zone che definiscono un numero annuo di notti tropicali pari a 5 e 10 si sono ampliate dalle zone pianeggianti fino al medio appennino e nell'area collinare.

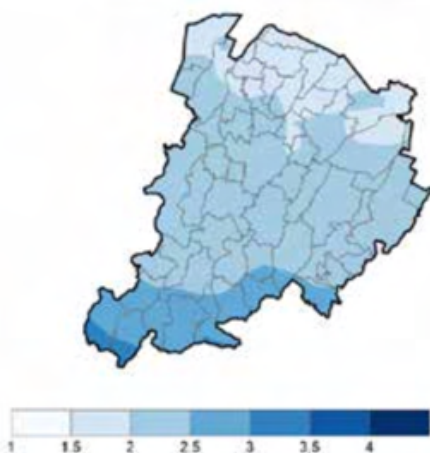
Il profilo climatico futuro viene invece analizzato confrontando i periodi 1961-1990 e 2021-2050. Viene evidenziato un peggioramento del quadro complessivo. Per quanto riguarda la temperatura media annua (**Fig. 1.4**) vi è uno spostamento dei valori da 7°C a 9°C nella fascia

⁶ Piano Territoriale Metropolitano: Strumento di pianificazione della Città Metropolitana di Bologna che raccoglie l'eredità del vecchio PTCP e che delinea gli scenari di sviluppo del territorio attraverso i principi di sostenibilità, resilienza, attrattività, e tutela dell'ambiente.

⁷ I dati climatici utilizzati per lo studio della variabilità climatica osservata sulla città metropolitana di Bologna provengono dall'archivio climatico ERG5 – Eraclito (versione 4.2)

⁸ I risultati dello studio climatologico sui cambiamenti attesi per il periodo dal 2021 al 2050 sul territorio della Città metropolitana di Bologna elaborato da ARPAE, sono stati ottenuti con lo scenario emissivo di stabilizzazione, denominato Representative Concentration Pathways (RCP) 4.5, secondo il quale, a fine secolo, sarebbero previste concentrazioni totali di gas serra equivalenti a una concentrazione di diossido di carbonio pari a 630 ppm.

Autunno - eventi di precipitazioni estreme
(osservato 1961—1990)



Autunno - eventi di precipitazioni estreme
(scenario RCP4.5 2021—2050)

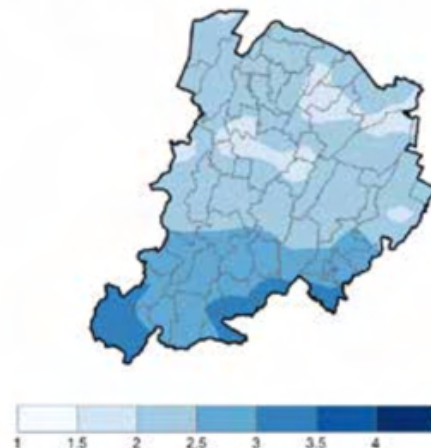
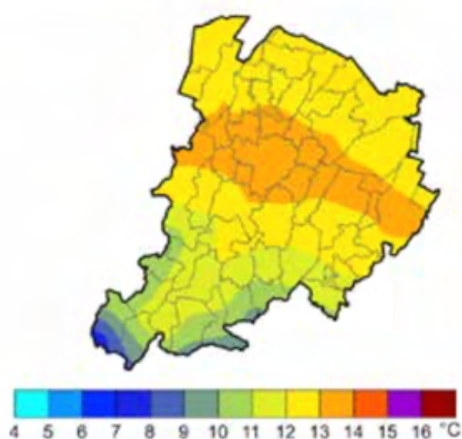


Figura 1.4: Distribuzione geografica del numero degli eventi estremi di precipitazione in autunno.

Temperatura media annua
(osservato 1961—1990)



Temperatura media annua
(scenario RCP4.5 2021—2050)

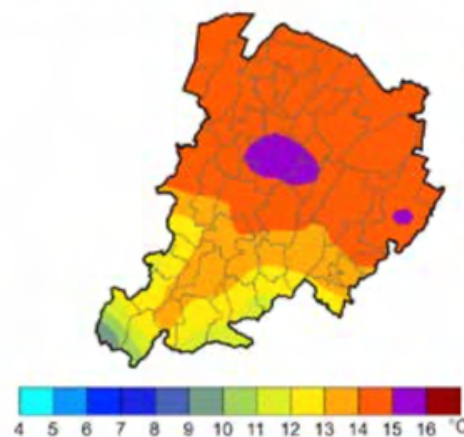


Figura 1.5: Distribuzione geografica della temperatura media annua.

appenninica e da 13°C a 15°C nella collina. Per il periodo 2021-2050 gli scenari mostrano, con un certo grado di incertezza, sul territorio della Città metropolitana una diminuzione media della quantità di precipitazione annua di circa il 10% fino alle quote di medio appennino. Per l'analisi di fenomeni estremi (**Fig. 1.5**) si sottolinea un aumento medio di otto notti

tropicali su tutto il territorio metropolitano. Per la durata delle onde di calore le proiezioni mostrano un probabile aumento sia in pianura che nelle aree collinari e montane. Altro parametro analizzato è stato il numero di giorni aventi precipitazioni con portate ritenute “a rischio”: seppur previsioni, le analisi

rivelano che questi eventi estremi andranno ad aumentare.

In conclusione, i risultati delineano un quadro critico e in costante peggioramento. Il territorio dell'appennino bolognese è sempre più esposto ad eventi e condizioni estreme, come già possiamo documentare. Ad esempio, la tempesta Boris⁹, tra i giorni 17 e 19 settembre 2024 ha portato precipitazioni record con accumuli nelle 48 ore di oltre 300 mm sull'Appennino. Il 25-27 luglio 2023 fenomeni di foehn¹⁰ appenninico con forti raffiche di vento, hanno interessato il settore centro-orientale della Regione, portando danni soprattutto su Appennino bolognese e Romagna¹¹.

Risulta quindi necessario adottare strategie per la prevenzione dei rischi dovuti ai cambiamenti climatici e per aumentare la resilienza e adattabilità, dei tessuti urbani ma anche naturali e sociali fino alla scala edilizia, elaborando strategie e tecniche per la conservazione del patrimonio edilizio esistente in un'ottica di adattamento e resilienza alle nuove condizioni ambientali. Aspetto non secondario è il

tema della riqualificazione energetica: strumento fondamentale per poter far “rivivere” l'ormai dismesso patrimonio edilizio appenninico. Attraverso la riqualificazione energetica è possibile ripristinare funzionalità e comfort energetici rendendo abitabili case che altrimenti verrebbero lasciate in rovina. È quindi necessario lo sviluppo di soluzioni che bilancino le esigenze di efficienza energetica e impatto ambientale con la tutela e la preservazione del patrimonio culturale.

La regione Emilia-Romagna mette in atto diverse strategie per la tutela del territorio in tema di clima, tra cui il ‘Documento strategico regionale per la programmazione unitaria delle politiche europee di sviluppo 2021-2027’¹² in cui vengono elaborate una serie di strategie territoriali integrate per i territori dell'Unione dei Comuni dell'Appennino bolognese, l'Unione dei Comuni Savena Idice e Alto Reno Terme. In questo documento vengono effettuate analisi delle esigenze di sviluppo e del potenziale dell'area, comprese le

⁹ Paolo Ghinassi, CNR-ISAC, 2024. ‘La tempesta Boris su Appennino e Romagna’. <https://www.isac.cnr.it/it/focus/la-tempesta-boris-su-appennino-e-romagna>

¹⁰ Foehn: un vento di caduta caldo e secco che si presenta quando una corrente d'aria, nel superare una catena montuosa, perde parte della propria umidità in precipitazioni.

¹¹ Arpa Emilia-Romagna, Struttura Idro-Meteo-Clima, 28 agosto 2023. ‘Rapporto dell'evento

Meteorologico dal 25 al 27 luglio 2023’ https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/meteo/report-meteo/rapporti-post-evento/rapporto_meteo_20230725-27.pdf&ved=2ahUKEwiP39358LeMAxXoxQIHHdPLEccQFnoECBgQAQ&usq=AOvVaw3c6r6SGWBDqgvFatcZ4R1x

¹² PR FESR e FSE+ 2021-2027 - Strategie Territoriali per le Aree Montane e Interne (STAMI)

interconnessioni economiche, sociali e ambientali sostenendo lo sviluppo di un modello che rafforzi l'attrattività turistica dei luoghi e la sostenibilità del vivere in Appennino producendo nuove forme di occupazione e di inclusione, per offrire nuove occasioni di sviluppo. La regione partecipa poi ad Arcadia, il progetto Horizon dell'Unione europea che punta a individuare azioni di contrasto e di adattamento al cambiamento climatico, di rilevanza continentale. Tra queste, anche innovativi sistemi di gestione forestale, da applicare negli ambienti dell'Appennino emiliano-romagnolo, per aumentare l'assorbimento di anidride carbonica, contrastare il dissesto idrogeologico e migliorare la produzione di legname per attivare nuove filiere di trasformazione. È stato poi firmato il progetto Torbiere nell'ambito di ricerca e studio dei cambiamenti climatici: dal 2017 è in atto una collaborazione tra Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli (SGSS) ed ARPAE-Servizio Idro-Meteo-Clima (ARPAE-SIMC), per lo studio di alcune torbiere di alta quota dell'Appennino emiliano. Questi peculiari ambienti montani sono di grande interesse come archivi naturali che, attraverso la composizione dei sedimenti

del sottosuolo, registrano ed hanno registrato gli effetti delle intense precipitazioni, tra cui quelle aventi caratteristiche di “eventi estremi”.

1.5 MATERIALI DELL'EDILIZIA STORICA

“Sotto il profilo costruttivo, alla concorrenza degli altri fattori, si sono sommate la specificità dei materiali locali e della loro lavorazione e le più ampie influenze culturali e stilistiche drenate dal pettine dei percorsi transappenninici e fissate in persistenze, con numerose sfaccettature, dal carattere conservativo e consapevole delle popolazioni montane, in continua dialettica con i centri egemoni corrispondenti agli sbocchi delle principali vallate di pianura”¹³

I materiali da costruzione locali e le tecniche costruttive associate, hanno un ruolo cruciale nella definizione della cultura e delle tradizioni architettoniche che definiscono l'identità di un luogo. La scelta di questi non è casuale, sono strettamente legati alle risorse e alle possibilità dei contesti geografici di appartenenza, in particolar modo di parametri litologici, altimetrici, climatici e

¹³ Da Maria Foschi e Pier Luigi Cervellati, Istituto per i Beni Culturali della regione Emilia-Romagna e Istituto per lo sviluppo economico

dell'Appennino 'La fabbrica dell'Appennino: Architettura struttura e ornato' Grafis Edizioni, Bologna 1988

sociali. Storicamente nelle zone escluse dalle principali vie di comunicazione e posizionate a notevoli distanze rispetto alle cave di grandi dimensioni, era necessario il reperimento dei materiali in loco o in zone limitrofe. È caso particolare quello dell'Appennino tosco-emiliano, dove non è possibile individuare materiali e criteri univoci nel costruire poiché si tratta di un "universo" estremamente frammentato caratterizzato dalla presenza di realtà singolari aventi filoni costruttori comuni. In prima battuta possiamo considerare la distinzione altimetrica e litologica tra basso e alto appennino, dove quest'ultimo presenta ad esempio una maggior presenza di argille scagliose e una intrinseca povertà dei materiali che si esterna nelle abitazioni. La predominanza della piccola proprietà rurale nelle aree montane rispetto all'edilizia proveniente da investimenti fondiari comuni da parte delle città (tipicamente presente sul territorio collinare e pianeggiante) ha delineato una maggior espressività e singolarità delle opere architettoniche.

Il materiale lapideo locale, tipicamente arenaria (molassi o arenarie-macigno), veniva impiegata in blocchi squadriati o sbazzati con dimensioni uniformate per

l'edilizia di maggior rilievo ma anche di forma irregolare e di diversa pezzatura per l'edilizia di base. Oltre a questo elemento ricorrente, troviamo la presenza di altri materiali locali e di recupero, come ciottolame derivante dalla "spietatura dei campi coltivati, e quello recuperato in alveo fluviale. Per la realizzazione delle malte dei giunti venivano utilizzate sabbie arenacee e calce aeree. I sistemi di orizzontamento delle carpenterie interpiano e di copertura venivano realizzati tramite strutture lignee di quercia e castagno. Alle quote maggiori, a sostituire le tipiche coperture dei tetti in coppo di collina e pianura, erano presenti lastre di pietra arenaria macigno costituente il manto di copertura.¹⁴

¹⁴ Da A.C. Dell'Acqua e AA.VV., *Paesaggio costruito: qualità ambientale e criteri di intervento*, Alinea Editrice, Firenze 2008

1.5.1 PIETRA

Il reperimento di materiale lapideo dipendeva da diversi fattori, tra cui i più importanti la vicinanza dai fiumi e l'altitudine del territorio. A quote più basse, era usuale l'utilizzo di sasso di fiume e ciottoli (cava di fiume), che restituiva alle costruzioni una tessitura muraria composta da elementi più arrotondati (tipico dei materiali provenienti dall'alveo fluviale), in unione al materiale estratto da cava (cava di strato). Nell'Alto Appennino era invece prassi l'utilizzo di materiale lapideo proveniente da accumuli naturali di pietrame in prossimità dei canaloni o di pendii abbastanza ripidi (cava



Figura 1.6: Paramenti murari in pietra di cava

di detrito), come nel caso del Monte della Riva tra appennino bolognese e modenese. Il materiale di accumulo più utilizzato era l'arenaria, roccia sedimentaria clastica formata da piccoli frammenti (clasti) la cui dimensione varia da 2 mm a 1/16 di millimetro, avente caratteristiche differenti a seconda della zona di provenienza ma che in linea generale presentava sempre buona compattezza superficiale e durezza, esercitando così buone caratteristiche costruttive. Ad esempio, le arenarie recuperate dalle zone collinari limitrofe la città di Bologna provenienti da terreni pliocenici-pleistocenici, erano di qualità scadente, di colore giallastro, friabili e scarsamente cementificate, quindi poco durevoli. Discreto invece il materiale che si estraeva nelle cave aperte a sud lungo la via Emilia, fin dal medioevo, come in località Varignana. Da cave aperte ancora più a sud si estraeva (e si estrae tutt'ora) la Pietra serena di notevole durezza. Queste cave si trovavano nei dintorni di Porretta, (Madonna del Ponte, Costa, Puzzola, San Rocco). Tra i minerali prevalenti in queste formazioni rocciose, si ricorda il quarzo (ossido di Silicio SiO_2) e calcite (carbonato di calcio, CaCO_3) nel "Macigno", mentre pirite e marcasite

(disolfuri di ferro, FeS_2), scodellette di aragonite dette anche scodellette o monete del Diavolo, gesso (solfato di calcio diidrato, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) nelle "Argille Scagliose". Sempre in quest'ultime è possibile trovare le septarie ovvero formazioni globulari calcareo-argillose al cui interno possono essere presenti cavità con cristalli di calcite, baritina, quarzo, gesso, aragonite e pirite.¹⁵ Le arenarie macigno sono a grana fine e si presentano in natura sedimentate in strati regolari intercalate da materiali di diversa origine. Il colore di queste ultime è in prevalenza grigio, bruno/giallastro e la resistenza a compressione varia tra 600-1000 kg/cm mentre il peso specifico è di 2500-2700 kg/m. Questi materiali lapidei devono sottostare a determinate caratteristiche tecniche e devono essere lavorati e trasformati in differenti elementi costruttivi in modo ottimale, al fine di risultare idonei agli impieghi previsti all'interno dell'organismo edilizio stesso. Fondamentale era dunque la scelta del materiale. La valutazione delle proprietà del materiale, che al giorno d'oggi è possibile codificare con specifiche

¹⁵ Michele T. Mazzucato. "La geologia e la mineralogia nell'Appennino bolognese: uno sguardo storico". Bologna, 28 agosto 2005.

valutazioni sperimentali, all'epoca veniva effettuata soltanto attraverso un'operazione visiva e alcuni semplici test di facile esecuzione. F. Milizia in "Principi di Architettura Civile"¹⁶ ci restituisce un'idea di quelle che potevano essere le buone 'procedure' attraverso cui poter scegliere il materiale naturale migliore in termini di durabilità.

"1. Una pietra sarà consistente se avrà un colore uguale, una granitura fina ed unita, un peso considerabile, senza vene, senza buchi, sonora alle percosse. 2. Se reggerà all'incostanza dell'aria e della forza del gelo; Onde lasciata allo scoperto in un terreno umido per tutto l'inverno non soffra alterazione. 3. Sei immersa per qualche tempo nell'acqua forte o in altro sciogliente non sarà intaccata né corrosa dal salso. 4. Se esposta per qualche ora all'azione del fuoco non rimarrà né fessa in alcuna parte né superficialmente calcinata. 5. Se posta nell'acqua non diviene più pesante"

Murature

Le tecniche costruttive e la loro evoluzione congiuntamente ai progressi tecnici di lavorazione, hanno facilitato l'esecuzione delle strutture murarie portando alla luce le possibilità espressive del materiale stesso.



Figura 1.7: Cantonale in pietra di cava lavorata

Nell'Alto Appennino pietra di cava e di recupero dai campi veniva selezionata e lavorata secondo la finalità costruttiva. La tessitura muraria, raramente intonacata, veniva composta da conci di dimensione e regolarità superficiale variabile dove la porzione di interfaccia tra due conci non coincidenti veniva riempita con materiale grezzo di scarto. Venivano messi in posa tramite calce molto povera o talvolta posati a secco e i conci d'angolo (**Fig. 1.7**) venivano disposti in maniera ortogonale tra

¹⁶ Francesco Milizia Francesco Milizia (Oria, 15 novembre 1725 – Roma, 7 marzo 1798) Teorico dell'architettura, storico e critico d'arte italiano.

loro per garantire il maggior ammorsamento possibile. Peculiarità era la presenza di questi ultimi di dimensione notevolmente differenziata rispetto alla rimanente pezzatura del paramento murario, generalmente in blocchi squadrati, che possono presentare diversi livelli di lavorazione. Ben noto ai maestri del tempo era la differente risposta meccanica del materiale grezzo (stratificato) al variare della direzione attraverso cui venivano applicate le sollecitazioni. Motivo per cui per parti di struttura di rilevanza statica, quali cantonali e stipiti di aperture, la naturale giacitura del materiale veniva ricomposta in modo che il peso delle strutture potesse agire in direzione perpendicolare rispetto alla originaria posizione in cava. Una volta recuperato il materiale lapideo, esso veniva frammentato per poter essere movimentato agevolmente fino in cantiere, dove subiva le lavorazioni. In primo luogo, veniva effettuata tramite punta e mazzola una “sbozzatura” in modo da eliminare le irregolarità più evidenti. La superficie dell’elemento lapideo poteva poi subire un processo di levigatura tramite martellina, scalpello e bocciarda.

Aperture

Le aperture si presentano di forma tipicamente rettangolare, sfruttando sia sistemi voltati sia architravati. I primi con soluzioni a tutto sesto o ad arco ribassato, utilizzati per aperture di luci maggiori, mentre in quelle architravate, monolitiche, si avvalevano di conci lapidei rettangolari leggermente arcuati nell’estradosso, in modo da sopportare meglio gli sforzi cui è soggetta la sezione di mezzeria. I vani delle porte vengono incorniciati sia nelle parti verticali che orizzontali da blocchi di pietra leggermente sporgenti dal filo della muratura (1,5-2cm). Le porte hanno larghezza che varia dal metro al metro e venti con altezze introno ai due metri, mantenendo tipicamente un rapporto di $\frac{1}{2}$. Nel caso delle stalle, le porte sono generalmente più larghe, a due ante, con larghezza variabile fino a due metri e mezzo per motivi prettamente funzionali. I vani per le finestre venivano riproposti in elevazione così come delineato ai piani terreni, suggerendo in linea di massima una disposizione interna degli ambienti molto simile tra un piano e l’altro. Anche le aperture delle finestre venivano formate da quattro o più blocchi di arenaria: davanzale, due stipiti paralleli ed un archetto a tutto sesto o ogivale monolitico oppure a conci finemente scolpiti. Usanza successiva al 1300 era il lavoro del



Figura 1.8: Finestre di abitazioni: nell'ultima è possibile vedere decorazioni a losanghe datate 1782

lapicida: decorazioni simboliche ed araldiche, date e monogrammi venivano scolpiti su portali e finestre, spesso per ricordare il mastro costruttore o la committenza. Caratteristica ricorrente è poi

la sagomatura ad angolo retto (3cmx3cm) sulla superficie esterna della cornice per consentire l'alloggiamento dello scuro, che si viene così ad incassare all'interno della cornice e a filo della muratura. Larghezza e altezza delle finestre si presentano con un rapporto tipicamente variabile tra 1,5 e 1,7, con valori di massima di 90cm per la prima e 143cm per la seconda. Tra gli organismi edilizi molto antichi, come per le case-torre o i manufatti agricoli di servizio, le dimensioni delle finestre erano notevolmente ridotte. Le aperture per le finestre a livello della soffitta sono normalmente di dimensioni più ridotte. (rapporto h/b 1,3-1,7). Una eccezione alla forma quadrata delle aperture è possibile



Figura 1.9: Porte dell'alta valle del Reno

osservarla nell'edificio fienile-stalla ove erano presenti finestre a 'lunetta' o a forma ellissoidale.

Manto di copertura e comignoli

Nell'Alto Appennino, in contrapposizione con il laterizio nelle forme di coppo ed embrice delle zone collinari e medio appenniniche, venivano utilizzate per il manto di copertura le 'piagne' ovvero frammenti di arenaria-macigno, di dimensione massima 60cmx60cmx5cm, ottenute tramite rottura del materiale lungo i suoi naturali piani di sedimentazione. La prassi esecutiva prevedeva la posa a secco di tali elementi, distinguendoli in tre



tipologie in base alla dimensione e alla funzione. Quelle di maggior grandezza e robustezza dette 'cmignarùl' venivano disposte sulla linea di colmo, in virtù della maggiore esposizione alle intemperie. Quelle medie invece, nella parte centrale della falda e le più piccole in corrispondenza della gronda. In quest'ultima porzione era possibile distinguere tre tipi di elementi: i sottogronda, la gronda, il coperchio. Al fine di ottenere una maggiore sporgenza di falda rispetto al filo della muratura, spesso si usava murare le piagne in corrispondenza dei muri perimetrali attraverso calce aerea, o ancora su mensole di legno sporgenti.



Figura 1.10 "manto di copertura "a piagne"

Elemento caratterizzante a seconda della tipologia edilizia è il camino. Si possono distinguere diverse tipologie di camino a seconda della forma (tipicamente squadrata) e a seconda dei materiali utilizzati che potevano essere coppo su pietra, coppo su laterizio o coppo su pietra e laterizio.

Pavimentazioni

Singolarità nell'Alto Appennino era l'utilizzo di lastre di arenaria dette "pianoni" per la composizione delle pavimentazioni, sia per gli ambienti interni sia per quelli esterni. Una volta smussate le irregolarità delle lastre esse venivano messe in posa tramite utilizzo di calce aerea.



Partendo dalle parti centrali degli ambienti del fabbricato con lastre di dimensioni maggiori, si arrivava fino alle fasce perimetrali con l'utilizzo di pianoni più piccoli. Facile reperibilità e notevole durevolezza del materiale hanno portato alla definizione di questa particolare caratteristica operativa.

1.5.2 LEGNAME

L'uso del legno nell'edilizia storica copre un ruolo fondamentale: il suo impiego era dovuto in larga parte a motivazioni di utilità, convenienza economica, e reperibilità sul territorio nonché per le sue buone caratteristiche meccaniche.

Nell'Alto appennino, nella fascia compresa tra gli 800 e i 1600m di altitudine prevale il bosco di faggio mentre nelle quote più basse della fascia montana sono diffusi i castagneti in particolar modo nei comuni di Granaglione (461 ha), Castel del Rio (455 ha), Lizzano in Belvedere (374 ha) e Castiglione dei Pepoli (289 ha). La fascia

submontana sono inoltre presenti boschi mesofili di querce e latifoglie miste, nello specifico boschi di cerro e carpino (querco-ostrieti) e di carpino nero e più raramente faggete miste termofile.¹⁷ La roverella è la specie di quercia più diffusa, appartiene alla famiglia delle fagacee, fornisce legno duro, resistente e inalterabile agli agenti atmosferici. Il castagno è un legno di media durezza, sufficientemente elastico, presenta una grana compatta ed una filatura diritta che lo rendono ampiamente adatto per molteplici usi sia in edilizia. Si lavora facilmente ed è caratterizzato da una buona resistenza agli agenti atmosferici e da un'apprezzabile durabilità. Problemi di reperimento di materiale ligneo non si ebbero mai in questo territorio, eccezione fatta agli anni intorno al 1800, quando venne vietato l'utilizzo del legname poiché doveva essere destinato unicamente a scopi industriali. In questo periodo si optò per lo "smontaggio" e riutilizzo di materiale ligneo da costruzioni ormai dismesse. Il legno veniva utilizzato in larga parte per porzioni della struttura soggette a flessione, difatti possiamo trovarlo nelle chiusure orizzontali come solai interpiano e solai di copertura. L'utilizzo e la lavorazione di questo materiale prevedeva

la produzione di pochissimi scarti: il fusto e i rami di diametro elevato erano utili per la grossa carpenteria mentre, i rami di minor sezione costituivano il tessuto della piccola carpenteria. Fondamentale anche in questo caso era la selezione e prelievo del materiale naturale: l'abbattimento degli alberi veniva eseguito nei mesi freddi, in cui la ridotta quantità di linfa all'interno del tronco permetteva di avere un materiale meno soggetto a ritiro e più resistente all'attacco di agenti parassitari. I criteri di selezione dei fusti erano semplici e facilmente applicabili: si prediligevano alberi con andamento dritto e lineare, con scarsa nodosità, e soprattutto senza insetti o parassiti. Le lavorazioni successive erano essenzialmente indirizzate al miglioramento delle prestazioni meccaniche del materiale e alla sua durabilità. Si tratta essenzialmente di 'essiccamento' e 'stagionatura'. L'essiccamento è un processo essenzialmente fisico che richiede tempistiche lunghe per evitare contrazioni volumetriche del materiale troppo elevate onde evitare fratture e deformazioni. Durante questo processo il legno perde gran parte della sua acqua, raggiungendo livelli di umidità interna tra il 10% e il

¹⁷ Piano Provinciale di Emergenza Rischio Incendi
Boschi PROVINCIA DI BOLOGNA
ASSESSORATO AMBIENTE SETTORE

15% arrivando allo stato di saturazione. La stagionatura è invece un processo chimico, dove il legno raggiunge i suoi livelli massimi di prestazioni meccaniche attraverso l'ossidazione delle sostanze albuminoidi, dell'amido e degli zuccheri.¹⁸

Solai

Gli impalcati lignei dei solai, privi di rifinitura e lasciati a vista nella maggior parte dei casi, rappresentavano la principale soluzione per le chiusure orizzontali. Venivano composti tramite un'orditura principale in travi squadrate di

circa 20x30cm con interasse variabile e una lunghezza di innesto nella muratura portante di circa $\frac{1}{2}$ dello spessore murario. L'orditura secondaria era composta da travetti anch'essi squadrate di dimensione variabile dagli 8 ai 15cm e interasse di 60-65cm. Tavolati di castagno o rovere di dimensioni 3-5x15-30cm venivano impiegati per realizzare un primo tavolato per l'irrigidimento del vano. Sono da evidenziare infine, tipiche problematiche legate all'incompatibilità chimica e fisica tra muratura e legno, in cui quest'ultimo non riesce ad avere una corretta areazione.



Figura 1.11: Chiusure orizzontali intermedie piane con solaio ligneo riscontrati nel comune di Camugnano

¹⁸ R. Filippini. "Chimica applicata ai materiali da costruzione", Calderini, Bologna 1990

Serramenti

Bisogna fare una distinzione tra serramenti in legno esterni ed interni: quelli esterni come porte, portoni e scuri, maggiormente esposti ai danni atmosferici, erano costituiti di materiali ‘forti’ come il castagno, mentre quelli interni, le finestre, potevano permettersi materiali lignei più dolci come abete e pino. Se presenti gli scuri, essi si presentavano come un doppio tavolato ligneo infissato tramite per mezzo di cardini sul massello in pietra delle cornici della finestra. La forma delle ante dei portoni può essere totalmente liscia o con uno zoccolo creato tramite sovrapposizione con un altro tavolato ligneo.

L'utilizzo degli infissi vetrati è fenomeno assai recente: spesso la piccola apertura era chiusa da un tavolato opportunamente fermato da una stanga inserita trasversalmente al muro. Tra le possibili soluzioni per avere una superficie semitrasparente era presente la ‘carta caprina’, pergamena di origine animale che restituisce l'effetto di “vetrio naturale”, come riportato in un trattato databile Quattrocento, edito in Bologna nel 1887 intitolato “Il libro dei colori”.

1.5.3 MALTA

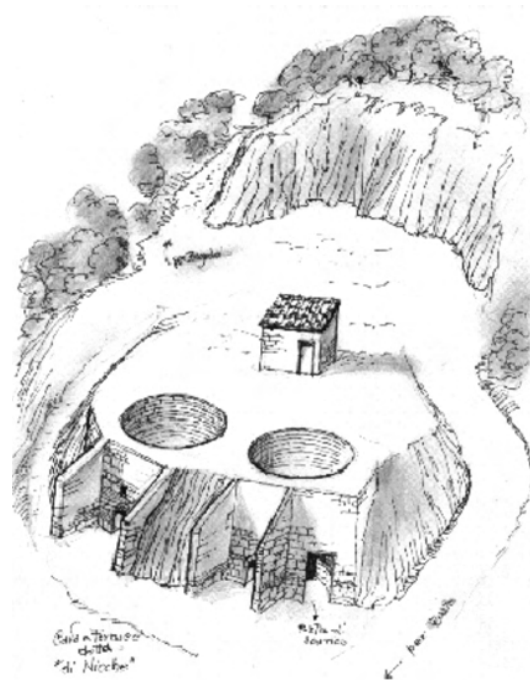


Figura 1.12: Rappresentazione di un'antica fornace

La malta, impiegata come allettamento tra i conci di arenaria e nei casi più virtuosi anche come rifinitura ad intonaco, veniva prodotta attraverso l'unione di acqua, sabbia di accumulo o di fiume e calce ottenuta attraverso la cottura nelle fornaci. L'utilizzo di quest'ultima risorsa era ridotto al minimo per motivi di onerosità in termini di impiego di risorse naturali, tempo e difficoltà di confezionamento. La sabbia è tipicamente silicea, granulosa e scevra di terra e altre sostanze eterogenee. Le sostanze componenti dovevano essere misurate tramite volume: veniva effettuata una distinzione tra le malte di prima specie per muri di fondazione (0,4m³ di calce idraulica macinata, 0,8m³ di sabbia di fiume e 1,2m³ di acqua) e le malte di

seconda specie per muri in elevazione e intonaci (0,48m³ di calce in piani, 0,72m³ di sabbia di fiume e 0,12m³ di acqua). Era una malta di discreta qualità poiché garantiva una buona presa anche tra i materiali lapidei più incoerenti e assicurava di conseguenza una buona resistenza a compressione delle murature.

Le fornaci venivano tipicamente costruite sfruttando il declivio naturale del suolo: a monte erano delimitate dal terreno, mentre a valle da un parapetto in pietra che serviva a circoscrivere la posizione del focolare e della parte alta. Il materiale da combustione veniva inserito nella parte bassa del forno, mentre nella porzione superiore, tramite una sporgenza, veniva chiusa con una volta in pietre da calcinazione. Le risorse impiegate erano notevoli: bisognava reperire le pietre calcaree a grana fine da spaccare e disporre all'interno del forno, sigillato a sua volta da altre pietre e ingenti quantità di legname per la reazione di combustione.

Il processo di cottura durava all'incirca una settimana, dopodiché bisognava aspettare che il forno si spegnesse e raffreddasse prima di estrarre la calcina così ottenuta. Veniva così prodotta la calce viva, che doveva poi essere idratata in bagni d'acqua ottenendo la calce spenta.

1.6 LE MAESTRANZE

Nell'Appennino bolognese, la diffusione della pietra nelle costruzioni è datata al XIV secolo, anni in cui si riscontra il fiorire e il diffondersi di nuove arti in capo a falegnami, fabbri, architetti e muratori. Prima di allora, nell'area emiliana erano presenti prevalentemente capanne o "tegge" a pianta rettangolare, con muratura perimetrale continua, oppure ad intervalli pilastrati, con tamponamenti in frasche intrecciate o tavolame. Tra le maestranze edili che fecero comparsa nel bolognese, di particolare rilievo sono i 'Maestri Comacini', denominazione già nota nel 643 d.C. nell'editto di Rotari e in quello di Liutprando del 713 d.C. Queste maestranze comacino-ticinesi organizzate in corporazioni di muratori, lapidici e capomastri si insediano nei territori dell'appennino emiliano verso la metà del Quattrocento, dando inizio a una secolare cultura dell'arte muraria. Questo periodo di trasformazioni politico-sociali vide un ampliarsi di spazi di intervento nelle zone montane dove la scomparsa dell'ordinamento feudale e l'avvento di nuove forme di proprietà terriera crearono le premesse per il fiorire di nuovi edifici, più solidi e ricchi di quelli precedenti. Dal XIII al XV secolo si diffusero massicce case di pietra e torri fortificate che dovevano assicurare la difesa del territorio.

Le maestranze comacine diedero un notevole contributo alla tradizione dell'arte muraria e alla diffusione delle tecniche di lavorazione della pietra arenaria. I loro interventi sono ampiamente documentati: spesso, infatti, erano presenti simboli (martellina, cazzuola, squadra, compasso e filo a piombo) o sigle su parti di manufatto che indicavano un vero e proprio sigillo di qualità che distingueva fra loro le diverse botteghe. Il loro stile decorativo evocava simboli arcaici, spesso tramandati dalle culture classiche e ispirati alle forze del mondo contadino. Era facile trovare la semisferica "mamma", segno di prosperità, oppure i "faccioni", volti dei cari deceduti che rimanevano simbolicamente accanto ai vivi. I disegni geometrici decorativi e simbolici più frequenti su architravi di porte e finestre erano quelli della rosa e della spirale radiata e del nodo "gordiano", tutti perfettamente costruibili attraverso l'utilizzo di un semplice compasso.¹⁹ Splendidi esempi di intervento sono la chiesa di Panicove il borgo di La Scola. Nel camugnanese si stabilì la famiglia Elmi, che ha lasciato molte testimonianze dell'arte comacina ancora oggi visibili, come la Torre di Berto Elmi a Roda o Casa Elmi a Carpineta. Agli Elmi sono legati anche il santuario di Montovolo e le

costruzioni del borgo di Affrico (di Gaggio Montano).

¹⁹ Comune di Pianoro, a cura di Adriano Simoncini, Case a Torre nell'Appennino bolognese dall'XI al

XVI secolo, Centro Storico Documentale "La loggia della Fornace", 2003

2. ANALISI DEI TIPI EDILIZI

Il presente capitolo nasce dal lavoro di ricerca condotto dal Dottore Yuri Pennacchi nell'ambito della nostra collaborazione.

2.1 I TRE PRINCIPI DELL'ARCHITETTURA VITRUVIANA

“In tutte queste cose che si hanno a fare deesi aver di mira la fermezza, il comodo, e la bellezza. La fermezza si conseguirà dal calare le fondamenta fino al sodo, e fare senz'avarizia una diligente scelta dei materiali di qualunque sorta. Il comodo dipenderà dall'esatta distribuzione delle parti dell'edifizio, senza che resti impedito l'uso dei luoghi, ed anzi che abbia ciascuno l'aspetto suo proprio e conveniente. La bellezza, infine, si otterrà dalla gradevole ed elegante forma dell'opera, e se le misure dei membri avranno le giuste ragioni della simmetria.”¹

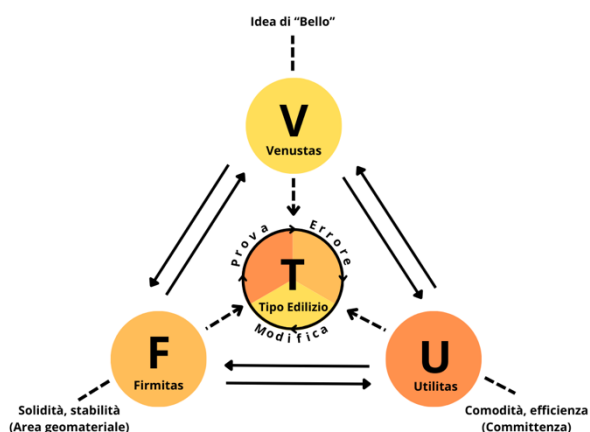


Figura 2: Tipo edilizio: sintesi tra Venustas, Firmitas e Utilitas

Il pensiero vitruviano, formulato in età classica, si configura come un modello estremamente attuale in quanto fondato su

una visione olistica e universale dell'opera costruita. Le istanze di firmitas, utilitas e venustas costituiscono infatti un modello

interpretativo che permette non soltanto di indirizzare la pratica costruttiva, ma anche di osservare e decifrare l'architettura vernacolare come esito di un bilanciamento costante tra requisiti strutturali, esigenze funzionali e valori estetici. In particolar modo la nascita e l'evoluzione del tipo edilizio può essere analizzata e interpretata come un continuo processo di sperimentazione, revisione e modifica che caratterizza tutta l'architettura storica. Ciò che possiamo osservare al giorno d'oggi, è quindi il risultato del millenario affinamento, pragmatico e sperimentale, delle volontà ed esigenze umane, delle modalità di lavorazione dei materiali, delle relative tecniche costruttive e dell'idea condivisa, non codificata di bellezza. In questo quadro interpretativo, l'architettura in sasso dell'appennino tosco-emiliano non fa eccezione, essa infatti traduce e declina i tre principi con le sue modalità, adattandosi e fondendosi con il territorio ed i suoi abitanti.

L'utilità, ovvero l'utilitas, fa riferimento alla capacità dell'organismo edilizio di rispondere alle specifiche esigenze abitative e produttive delle comunità rurali, decretate in primo luogo dalla committenza. Essa rappresenta le volontà funzionali e simboliche che guidano

¹ Marco Vitruvio Pollione "Sull' Architettura" Libro I, Capo III. Giacomo Pirola, Milano 1829

le intenzioni del progetto e ne determinano il futuro uso. Vitruvio parla di “Onestà” del costruire in termini di “Bontà col fine adeguato all’Edificatore” individuando il fine ultimo dell’opera nel sacro, nel privato o nel pubblico. Onestà, in questo senso, implica diligenza nei confronti della legge, dell’edificatore e dei vicini, e non di meno nei confronti del parere dei saggi.

Vitruvio affronta la tematica dell’utilità anche dal punto di vista della “comodità” intesa come corretta “disposizione ed uso” del costruito. L’uso si articola attraverso una componente qualitativa, dedicata all’elezione del sito e alla disposizione della luce naturale, e una componente quantitativa relativa alla giusta forma e dimensione dell’opera nei confronti del fine ultimo. La disposizione invece riguarda la collocazione delle “parti solide” e degli “spazi vuoti” assicurando fruibilità ed efficienza per gli utenti.

L’utilitas nel contesto ambientale e socioeconomico dell’appennino delinea una situazione unica nel suo genere: il committente coincideva spesso con la famiglia media contadina, la quale commissionava opere atte a soddisfare esigenze abitative e produttive elementari. Condizioni demografiche e capacità di acquisto degli abitanti diventano quindi dei parametri essenziali per comprendere a pieno l’orientamento della committenza in uno specifico contesto.

La firmitas trova espressione nella meticolosa e attenta scelta dei materiali, nella loro lavorazione in elementi specifici dell’organismo edilizio e nelle conoscenze costruttive empiriche tramandate di generazione in generazione. Vitruvio pone l’attenzione sulla stabilità come “peso reale e forza reale” intesa come corretta forma e giusto dimensionamento delle parti al fine di assicurare un’adeguata vita utile dell’opera. Questo si traduce nei casi specifici in diverse aree geomateriali, quindi aree che presentano le stesse tendenze costruttive a fronte della presenza sul territorio delle stesse risorse naturali e medesime condizioni ambientali. Nell’ambito appenninico, la firmitas si traduce in un impiego di un patrimonio materiale litico e terroso fortemente caratterizzato dalla presenza di arenarie e marne locali sfruttate per la realizzazione degli ingenti spessori murari ma anche per la produzione delle malte ed elementi di copertura. Fondamentale è anche il materiale ligneo contraddistinto da conifere e latifoglie, utilizzate per la realizzazione solai e coperture. Le tecniche costruttive locali rispondono quindi a due necessità fondamentali: da un lato il reperimento dei materiali in loco e dall’altro la capacità di garantire la giusta resistenza meccanica nei confronti delle sollecitazioni ambientali.

La venustas, riconoscibile nell’armonia, storicamente ritenuta spontanea, inconscia e diffusa, è un fattore fondamentale

nell'equilibrio reciproco delle istanze vitruviane. Secondo l'architetto romano "Il Bello" della realtà materiale deve essere ricercato nell'espressione pura e intrinseca delle cose, ovvero nella "Figura", la quale deve corrispondere "al genio del luogo, col carattere sodo, delicato e mezzano", e nella giusta "Proporzione" tra volumetrie piene e vuote. L'elemento della figurabilità risulta dunque un tassello fondamentale in questo contesto: l'esperienza umana dello spazio, seppur soggettiva, tende a privilegiare forme leggibili e strutture organizzate. Queste antiche teorie trovano conferma nei più recenti studi di Kevin Lynch, resi pubblici nel 1960 ne "L'immagine della città" dove sostiene che la qualità di uno spazio si basi sulla chiarezza delle immagini ambientali che i singoli individui (o gruppi) hanno dei differenti luoghi.

Trasponendo tali riflessioni al patrimonio edilizio appenninico, la ricerca di *venustas* si traduce nella capacità di generare immagini chiare e coerenti: volumi compatti, proporzioni definite tra pieni e vuoti e un rapporto viscerale con l'ambiente montano ne contraddistinguono l'onestà degli intenti. Sono stati infatti riconosciuti diversi tracciati regolatori, mediante i quali le maestranze dimensionavano e disponevano gli elementi essenziali del partito architettonico aderendo a precisi rapporti e relazioni proporzionali. Gli insegnamenti appenninici parlano quindi di una qualità figurativa riconoscibile ed

immediata, autentica ed umile, con elementi unici e identitari capaci di trasmettere un'immagine distintiva.

2.2 TRACCIATI REGOLATORI

I tracciati regolatori sono sistemi di proporzionamento precisi e codificati, fondati su rapporti matematici semplici o complessi necessari a guidare l'uomo nel processo progettuale. L'architetto nel relazionarsi con l'opera tramite proporzioni, ritmo, contrapposizione di pesi, varietà modulare e dimensionamento di spazi deve avvalersi di tracciati e moduli di riferimento quali strumenti fondamentali per il proprio lavoro. *"Già dividendo lo spazio di un rettangolo in due parti si causa inevitabilmente un confronto tra le due, dando luogo a una o più o meno piacevole sensazione"* sostiene Carlo Frassinelli nel trattato "Architettura tipografica" sottolineando come ogni regola compositiva, anche la più semplice, incide nell'osservatore un'impressione, che sia essa positiva o negativa. Questo modo di procedere affonda le proprie radici già in tempi antichi quando le civiltà classiche si avvalevano di sistemi di tracciamento geometrico per la risoluzione di problemi matematici complessi a cui non avevano soluzione. Emblematico è il caso della serie di *rettangoli dinamici* utilizzata dai greci, che

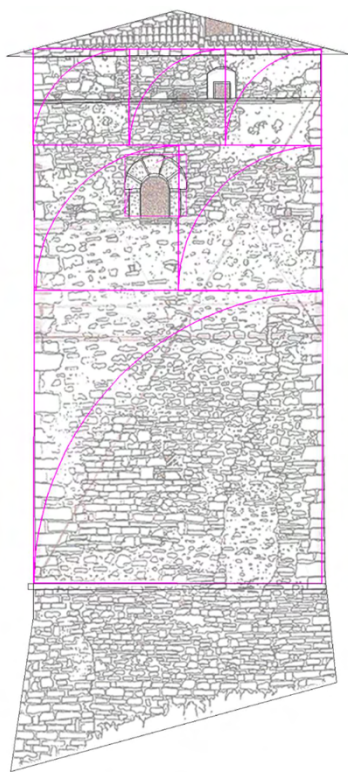


Figura 2.1: Prospetto est torre di Roda, Camugnano (BO): tracciato regolatore ad quadratum. [Yuri Pennacchi, 2025, *Forme architettoniche in area geomateriale litica nell'Appennino tra Emilia-Romagna e Toscana*]

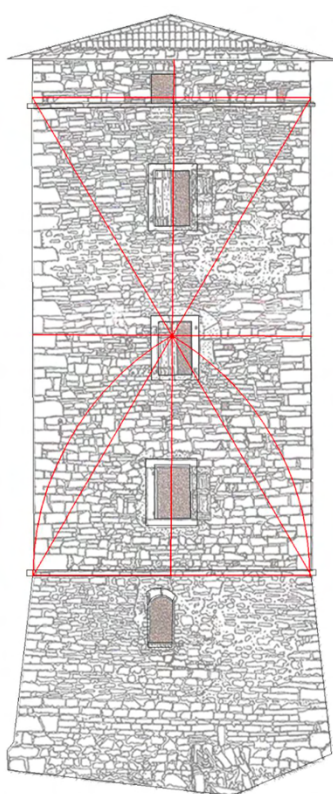


Figura 2.2: Prospetto sud Torre di Roda, Camugnano (BO): tracciato regolatore ad triangulum. [Yuri Pennacchi, 2025, *Forme architettoniche in area geomateriale litica nell'Appennino tra Emilia-Romagna e Toscana*]

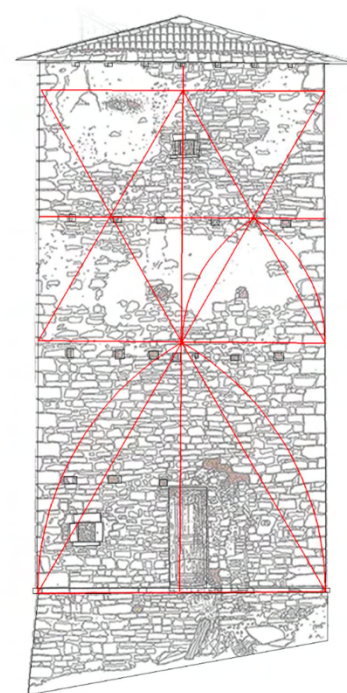


Figura 2.3: Prospetto nord torre di Roda, Camugnano (BO): tracciato regolatore ad triangulum. [Yuri Pennacchi, 2025, *Forme architettoniche in area geomateriale litica nell'Appennino tra Emilia-Romagna e Toscana*]

seppur non disponendo di una piena conoscenza dei numeri irrazionali, riuscivano a adoperare tale schema in maniera pratica. Lo studio dei tracciati regolatori adoperati nella storia dell'architettura ha messo in luce una moltitudine di schemi adottabili. Tra i più complessi vengono analizzati il quadrato e rettangolo aureo, la serie di Fibonacci e la serie di rettangoli dinamici; nelle architetture semplici risultano diffusi maggiormente sistemi basati su schemi modulari proporzionali legati alla dimensione di lati, diagonali e allineamenti ortogonali. Nel caso dell'appennino tosco-emiliano, per tutta la durata del Medioevo si diffuse la consuetudine di progettare secondo una

suddivisione ad *quadratum* (**Fig. 2.1**), la quale impostava un disegno degli alzati basato sull'accostamento proporzionato e simmetrico di quadrati. Con il sopraggiungere dell'arte gotica si diffuse nei centri cittadini anche una progettazione a *triangulum* (**Fig. 2.2 e 2.3**), a fatica però riscontrabile anche in Appennino.

2.3 UNITA' DI MISURA STORICHE

La frammentazione politica che caratterizzò la penisola italiana dopo la caduta dell'Impero Romano portò con sé la perdita di un sistema metrico condiviso. I forti scambi commerciali

che avevano caratterizzato l'impero vennero a mancare, privilegiando un'economia di scala locale. Le diverse realtà si organizzarono in maniera indipendente per realizzare le proprie unità di misura. È chiaro come questa frammentazione metrica abbia influito non solo sugli scambi commerciali ma anche sulle pratiche costruttive locali. Nelle piazze dei maggiori centri urbani vennero resi pubblici e fruibili a tutti campioni riportanti le unità di misura locali. Si trattava di spesse lastre di pietra in cui venivano incise le misure lineari con eventuali sottomultipli e talvolta anche sagome di elementi facilmente reperibili nel mercato come tegole, coppi e mattoni. Le

unità metriche utilizzate in epoca medievale vennero ideate come sistemi numerici duodecimali e pentadecimali, in modo da ottenere ulteriori sottomultipli in raggruppamenti da 3 e 4 o 3 e 5. Nel territorio dell'area geomateriale individuata è possibile affermare che l'unità storica ricorrente per le costruzioni di sasso del periodo longobardo era il piede longobardo-pavese.

		Unità di misura storiche		
		Piede [cm]	Braccio [cm]	Doppio braccio [cm]
Località	Bologna	38	63	126
	Faenza	48	64	128
	Cesena	54	62	124
	Forlì	49	/	/
	Civitella di Romagna	50	/	/
	Ravenna	32,4	64	128

- = 0.436m (un "piede di Liutprando" lombardo)
- = 0.475m (un "piede di Liutprando" pavese)
- = 0.494m (un "piede di Liutprando" pistoiese)

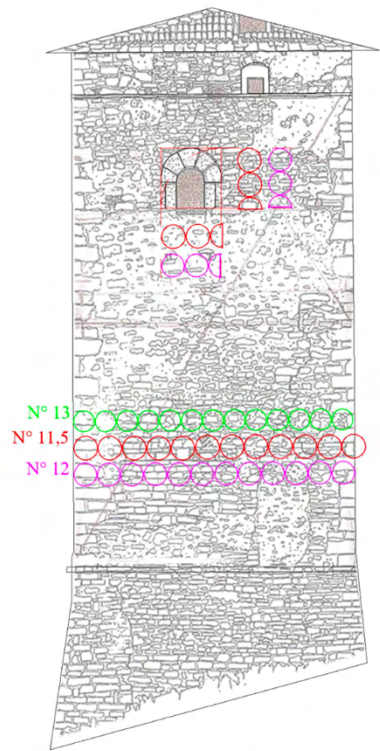


Figura 2.4: Prospetto est torre di Roda, Camugnano (BO): quote tramite unità di misura storiche. [Yuri Pennacchi, 2025, *Forme architettoniche in area geomateriale litica nell'Appennino tra Emilia-Romagna e Toscana*]

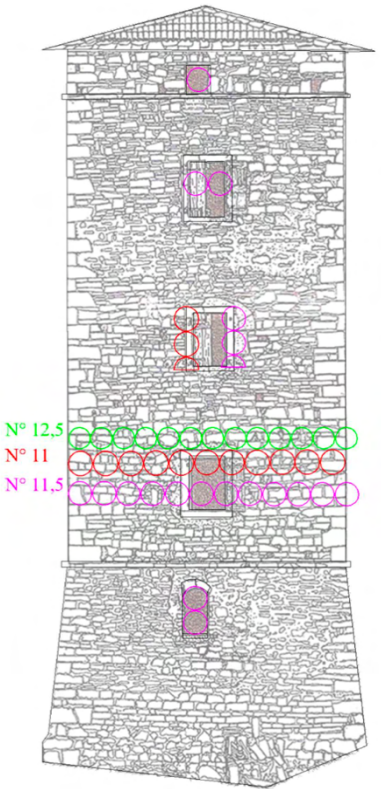


Figura 2.5: Prospetto nord torre di Roda, Camugnano (BO): quote tramite unità di misura storiche. [Yuri Pennacchi, 2025, *Forme architettoniche in area geomateriale litica nell'Appennino tra Emilia-Romagna e Toscana*]

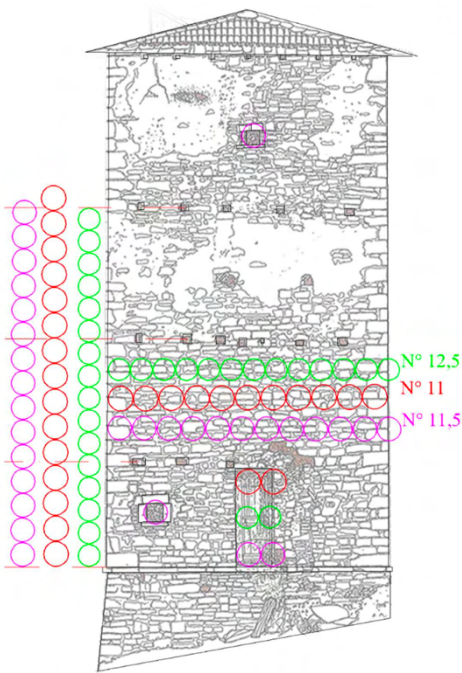


Figura 2.6: Prospetto sud Torre di Roda, Camugnano (BO): quote tramite unità di misura storiche. [Yuri Pennacchi, 2025, *Forme architettoniche in area geomateriale litica nell'Appennino tra Emilia-Romagna e Toscana*]

2.4 DAL TIPO LIGNEO AL TIPO LITICO

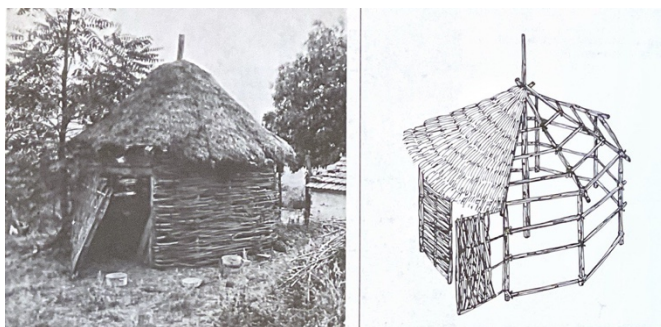


Figura 2.7: Tipica capanna circolare dell'Appennino. Il fitto intrecciato di verghe che forma la parte sovente veniva intonacato con fango

I primi tipi di edilizia rurale vengono datati antecedentemente al IV sec. a.C. quando si instaurarono nel territorio appenninico popolazioni etrusche e picenti, rispettivamente ai confini con le attuali regioni Toscana e Marche. Le testimonianze a noi giunte parlano di un'edilizia di riparo e rifugio, caratterizzata da materiali facilmente reperibili e adoperabili, quali legno, frasche e giunchi leggeri. L'interesse per queste primordiali forme abitative venne acceso per la prima volta intorno agli anni '80, quando l'Università di Firenze in collaborazione con l'Istituto per i beni culturali dell'Emilia-Romagna, condussero una campagna di rilevazioni sui manufatti rurali appenninici. Nei territori romagnoli e aretini vennero riscontrate tra le forme abitative più povere e rudimentali quelle a capanna cilindro-conica con pilastro ligneo centrale (**Fig. 2.7**). Questa forma trova diverse declinazioni in tutto il territorio appenninico: dalla versione a pianta rettangolare in Garfagnana fino ai tipici *casoni* del ravennate. Tra il Mugello e Valdarno superiore appaiono per la prima

volta capanne costruite su bassi muri a secco con tetti a falde spioventi ricoperte di paglia o tavole lignee. Lo studio evidenziò come tali forme abbiano contribuito alla definizione una prima cultura edificatoria, ponendo così le basi per i successivi sviluppi tipologici. In questo senso, il tipo ligneo viene definito come vero e proprio *archetipo* dello *stile appenninico*, destinato a consolidarsi con i consecutivi sviluppi litici.

L'instaurarsi delle popolazioni celtiche tra il X e il III sec. a.C. con i Boi in Emilia e i Senoni in Romagna portò un'ulteriore evoluzione delle pratiche edilizie ricorrenti. Fu in particolare la capanna o casa celtica a diffondersi maggiormente nell'Appennino emiliano. Si trattava di strutture più complesse rispetto a quelle precedenti, per dimensione, disposizione spaziale, tecniche costruttive e inserimento nel contesto morfologico. Era infatti comune ergere le strutture a ridosso di uno sbalzo di terreno, per consentire un uso pratico dei due piani (terra e sottotetto) come stalla e fienile. Pianta rettangolare, murature in sasso, malte di terra e tetto a gradoni contraddistinguono questo tipo di abitazioni. Singolare era la copertura "a scaglie", la quale veniva alleggerita attraverso l'uso della paglia (con scopo protettivo rispetto a freddo e umidità), in modo da non avere carichi eccessivi sul sottotetto in travi di faggio tenute insieme da

un intreccio di viticci.

Dalle competenze del costruire celtico susseguono gli sviluppi tipologici della casa rurale in muratura, ove è possibile osservare la filogenesi della struttura portante del tetto “a capriata”.

Non si ha notizia di sostanziali trasformazioni edilizie nell’area dell’Alto Appennino fino alla caduta dell’Impero Romano d’Occidente determinata dalle incursioni di popoli barbarici, principalmente goti, provenienti dal nord Europa. In un periodo di instabilità politica come questo, furono i Longobardi ad insediarsi nel territorio peninsulare italiano, fino ad arrivare nelle più remote aree dell’Appennino. In questo contesto si intrecciarono le consolidate pratiche locali con le influenze di matrice longobarda attraverso rifacimenti e ristrutturazioni di edifici esistenti. La limitata cultura costruttiva dei popoli invasori indusse infatti ad un atteggiamento ossequio e rispettoso nei confronti delle maestranze locali. Un esempio ancora oggi osservabile nel territorio di Lizzano in Belvedere è il piccolo *delubro di San Mamante*, ovvero un battistero tipico della Chiesa longobarda risalente al VIII secolo in cui è possibile osservare caratteri bizantini.

Aspetto preponderante di questo periodo storico sono dunque le maestranze che si vennero ad instaurare nel territorio. Tra le più importanti troviamo sicuramente la corporazione dei Maestri Comacini, nominati

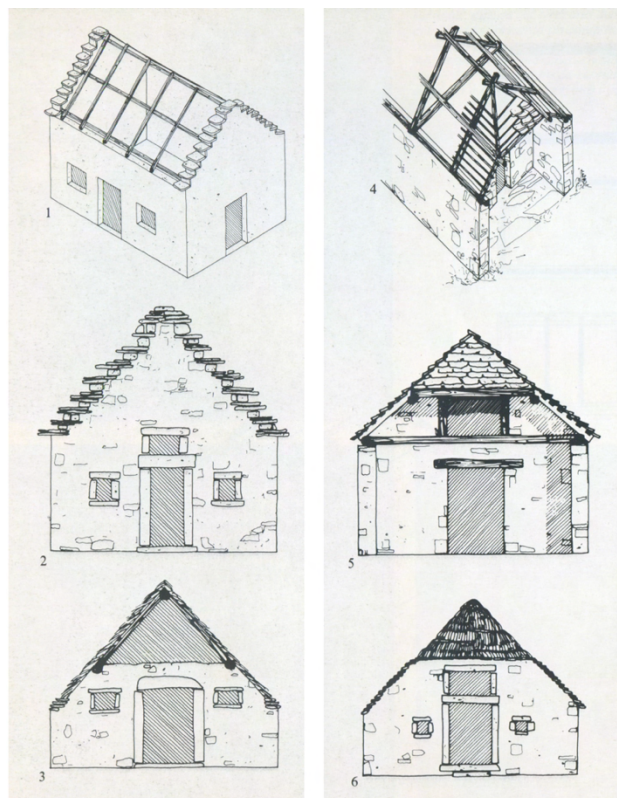


Figura 2.8: Tipologia della capanna celtica emiliana

per la prima volta nell’Editto di Rotari nel 643. Essi costituirono per diverso tempo una casta privilegiata poiché soggetti ben voluti dalle amministrazioni locali in virtù delle loro conoscenze in ambito costruttivo. I Maestri Comacini lasciarono l’impronta della loro arte e della grande abilità nella lavorazione della pietra arenaria. È certo il loro contributo nella costruzione delle strutture più rilevanti come chiese e fortezze. Poderose pietre angolari, squadrate con grande precisione, svolgono ancora perfettamente la loro funzione, a riprova di una tecnica muraria efficiente e duratura. Spesso però l’alto costo che richiedevano i maestri, portava il loro operato a porzioni ridotte come finiture di pregio e pezzi finiti da operare direttamente negli

edifici: portali, architravi, camini, mensole, lavatoi denotano una grande finezza esecutiva e una notevole specializzazione.

Più avanti, intorno al XII secolo, il Comune di Bologna portò avanti una politica di sicurezza militare all'interno delle proprie strutture fortificate. Impose all'intero territorio comunale l'abbattimento e la ricostruzione delle abitazioni con copertura in paglia al fine di evitare la propagazione di incendi ².

Conferme del lento e graduale abbandono delle coperture tradizionali, ci arrivano dall'estimo del 1385, in cui si osserva una sempre più bassa quota di abitazioni con finitura costituita da frasche e paglia.

È sempre in questo periodo che si va a definire la tipica disposizione degli ambienti della casa appenninica, costruita in pendenza, con stalla al piano inferiore e l'abitato posto al piano superiore, o in alternativa, disposti sullo stesso piano e semplicemente separati da un graticcio impastato con terra di castagno.

Tra XII e XV secolo vi furono una serie di eventi incisivi che andarono ad alterare le abitudini costruttive della popolazione montana quali conflitti bellici bolognesi, l'inizio delle ostilità fra Gran Ducato di Toscana e la Milano degli Sforza, e un alto livello di brigantaggio nelle aree appenniniche. Queste condizioni portano la

popolazione locale alla ricerca di postazioni valide per le costruzioni, come belvederi e speroni emergenti in modo da consentire un'ampia visione sul territorio. Il bisogno di sicurezza e l'esigenza sociale/agraria fanno così nascere il tipo urbanistico del borghetto ovvero un raggruppamento di abitazioni con spazi comuni interni.

Dal XVI secolo in poi, sotto il Grand Ducato di Toscana con la guida di Cosimo I De Medici, si vide un periodo di grande sviluppo e riqualificazione edilizia che si protrasse fino al 1861. Il sovrano riconobbe l'importanza di valorizzare il territorio al di fuori dei centri urbani, impostando le nuove costruzioni contadine non solo come edifici funzionali ma anche come luogo decoroso e salubre per vita dei suoi abitanti. Si venne ad assistere infatti ad un ampio recupero del patrimonio edilizio in pietra che da fortificazioni ed avamposti di sicurezza divennero caseggiati rurali in maniera spontanea, seguendo le esigenze del tempo.

Parallelamente si avviò un'intensa attività edilizia volta alla realizzazione di nuove abitazioni che, secondo il volere del sovrano, dovevano rispecchiare gli ideali compositivi del '700. Bernardino Della Porta e Giuseppe Salvetti, architetti del Gran Ducato, ottennero l'incarico di guidare la nuova espansione edilizia dell'alta collina e della bassa montagna per la classe contadina e non solo.

² Paolo Guidotti "La casa della montagna bolognese nella sua dimensione socio-politica: materiali di ricerca

di un'area appenninica tra il 13. e il 15. Secolo". Atesa Editrice, Bologna, 1977.

Santino Langè, restituisce un quadro di complessivo fermento edilizio anche nelle aree rurali del bolognese³ ove si viene a diffondere un nuovo tipo: la villa padronale. Questa nuova forma abitativa si distacca dai caratteri costruttivi del luogo, sostituendo la tipica forma a capanna con nuovi profili caratterizzati dalla presenza di un unico portone di accesso comune posizionato sull'asse centrale di simmetria. Il distintivo impiego della pietra faccia a vista si mantiene nei "casoni" dell'Alto Appennino fino agli inizi del XX secolo, mentre le ville collinari e basso montane perdono questo carattere andando ad impiegare strati di calce e intonaco.

Il patrimonio edilizio dell'Appennino rimane pressoché invariato fino al termine del secondo conflitto mondiale che vedrà nella Linea Gotica (Linea fortificata che dal mar Adriatico arriva fino al Tirreno passando per gli Appennini) un punto focale degli scontri. Diversi centri abitati vennero danneggiati o addirittura rasi al suolo, generando un vuoto nel patrimonio culturale montano. Con la fine della guerra e successivo sviluppo economico, l'Appennino conobbe una lenta dismissione del proprio sapere costruttivo. I fabbricati di nuova costruzione vennero e vengono tutt'ora plasmati da tecniche costruttive standardizzate e materiali industriali diffusi globalmente con il risultante

indebolimento del linguaggio edilizio tradizionale.

2.5 LA CELLA ELEMENTARE

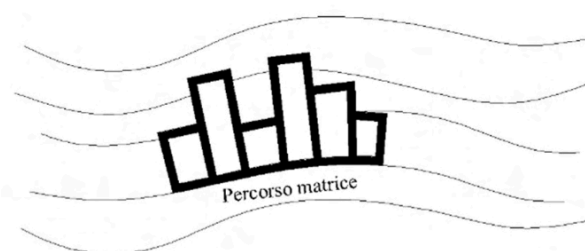


Figura 2.9: Evoluzione in linea di più sistemi edilizi

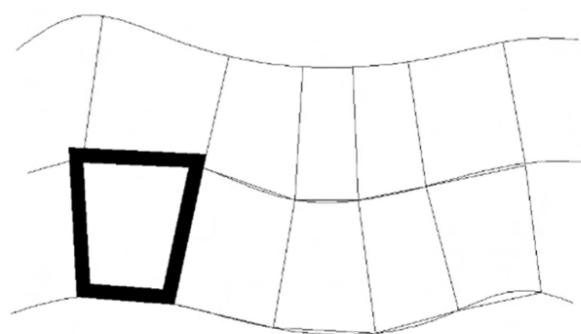


Figura 2.10: Corretta costruzione di una cella elementare che segue le curve di livello, con conseguente "deformazione" della pianta della cella.

L'evoluzione del tipo edilizio nell'appennino trova la sua matrice elementare nella cella litica, ovvero un'unità monocellulare quadrangolare sprovvista di pareti divisorie interne e larga dai 4 ai 6 metri con spessori murari nell'ordine dei 60 centimetri. Queste dimensioni non sono casuali, sono bensì determinate da condizioni pratiche. La distanza tra pareti parallele viene stabilita dalla lunghezza dei tronchi reperibili in loco e

³Santino Langè "Le case appenniniche come sedimentazione di una storia antropica nel percorso

dell'architettura"; Italia Nostra- Sezione di Bologna, Bologna, 1993

messi in opera per la realizzazione del solaio di copertura mentre lo spessore murario rappresenta il risultato di un processo empirico che ha determinato una misura ottimale, in grado di conciliare una buona risposta meccanica, un livello di isolamento termico sufficiente e il minor dispendio possibile di risorse materiali e forza lavoro. Su queste profonde pareti litiche si inseriscono aperture in numero limitato e in dimensioni ridotte al fine di scongiurare il più possibile dispersioni termiche. L'assenza di rifiniture esterne ci consente inoltre di osservare gli architravi lapidei e talvolta lignei che sormontano porte e finestre.

Il piano di calpestio composto da tavolato ligneo frequentemente lasciato allo stato grezzo veniva sorretto da un solaio a doppia orditura appoggiato all'interno dello spessore murario e composto da travi principali e orditura di travetti. Il sistema di collegamento verticale è affidato internamente a scale in legno mentre all'esterno, se presenti, scale in muratura. Questo compito viene talvolta affidato al declivio naturale del terreno andando così a determinare due varianti tipologiche della cella elementare.

È possibile distinguere una variante *di piano* e una variante *di pendio*: la variante di piano si assesta su un terreno pianeggiante e si avvale di collegamenti verticali propri mentre la variante di pendio adopera, a proprio vantaggio, l'inclinazione naturale del terreno

inserendosi ortogonalmente alle curve di livello e permettendo così un accesso diretto al piano superiore destinato ad uso abitativo.

Nel tempo, nuove forme di accrescimento e/o aggregazione si sono rese necessarie al fine di soddisfare le crescenti esigenze abitative e produttive della popolazione rispondendo alla necessità di nuovi spazi. L'accrescimento è un concetto diacronico che riguarda l'evoluzione dell'organismo edilizio. Tale processo può avvenire per iterazione, giustapposizione (modalità unidirezionale), agglomerazione (modalità bidimensionale), ampliamento e sopraelevazione. Le forme di aggregazione riguardano invece il modo in cui più celle elementari si dispongono sia nello spazio tenendo conto dell'orografia sia come si rapportano tra loro andando a fotografare in un determinato momento la configurazione tipologica. Tali aggregazioni possono avvenire *a corpi separati*, dove i fabbricati sono separati fisicamente tra loro oppure *a corpi congiunti*, dove invece il volume aggiunto sfrutta le pareti esistenti per allinearsi in maniera più o meno precisa al fabbricato esistente. Attraverso ambo queste modalità la cella elementare si configura come il nucleo generatore di tutte le successive evoluzioni tipologiche del patrimonio edilizio appenninico.

2.6 TIPI EDILIZI

“Il concetto di tipo edilizio quale processo autentico dello sviluppo organico reale [...] si apriva ad un processo produttivo praticamente infinito e continuo in due sensi complementari. All'esterno esso costituiva un principio aggregativo altamente caratterizzato nel tessuto edilizio come parte integrante dell'organismo urbano, di cui diveniva condizione, ma anche stimolo qualificante di una ulteriore individualità, base del tipo edilizio; mentre l'organismo urbano, a sua volta, si apriva ad una vita nel tempo secondo una sua ulteriore affermazione individuale - condizionata e stimolata insieme dai gradi acquisiti di personalità — e si identificava nell'ambiente urbano, come unità nella continuità, rimanendo sempre pari a se stesso, a un tempo limite e principio di sviluppo attivo.”⁴

La riflessione di Muratori nasce come critica al funzionalismo moderno e al formalismo accademico ponendo attenzione su due diverse angolazioni critiche del tipo edilizio: una di natura fenomenologica, orientata ad individuarne il carattere classificatorio, l'altra di natura ontologica volta alla valutazione del tipo, visto come elemento primordiale del “processo autentico dello sviluppo organico reale”. L'autore introduce il concetto di *semantizzazione spontanea e inconscia*, intesa come l'attitudine di un soggetto ad operare in continuità con la sostanza civile ereditata, contribuendo a determinare un sistema di

sviluppi omogenei in aderenza alla propria cultura. Nei manufatti edilizi tale processo non va inteso come esecuzione ad arte di un modello, bensì un'attitudine progettuale volta a coniugare le necessità del presente agli insegnamenti passati, risultando così propensione collettiva e graduale. Il tipo edilizio è pertanto un concetto in continuo divenire che si diversifica a seconda della posizione geografica (varianti sincroniche) e a seconda dell'evoluzione temporale (varianti diacroniche) parallelamente all'evolversi della cultura locale. La lettura tipologica che si vuole fornire vuole essere uno strumento utile ad indirizzare il lettore nella comprensione delle dinamiche che hanno unito le tradizioni costruttive all'espressione storica del linguaggio edilizio dell'Alto appennino individuando i caratteri ricorrenti e le scelte progettuali adottate. (Schemi riassuntivi **2.16, 2.17, 2.18** a fine capitolo).

⁴ Saverio Muratori “Architettura e civiltà in crisi”. Centro Studi di storia urbanistica, Roma 1963. La citazione è riportata da COSTANTINO DARDI,

«Processo architettonico e momento tipologico», in “Aspetti e problemi della tipologia edilizia”, ed. Cluva, Venezia 1964, p. 11.

2.6.1 IN LINEA

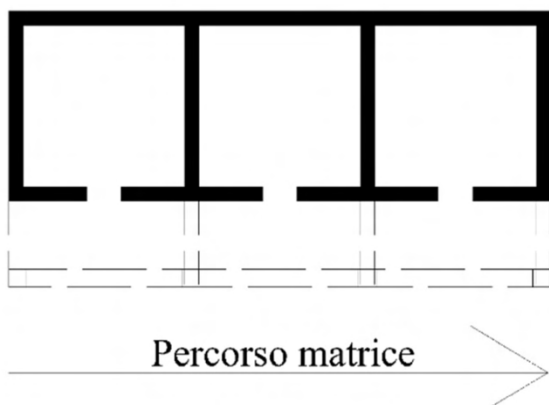


Figura 2.11: Crescita in linea di celle elementari. [Yuri Pennacchi, 2025, *Forme architettoniche in area geomateriale litica nell'Appennino tra Emilia-Romagna e*

La casa in linea si configura come forma di accrescimento basata sull'affiancamento di più celle elementari messe in opera in un'unica fase costruttiva. Essa presenta una configurazione planimetrica caratterizzata dalla presenza di murature portanti interne che si ripetono in egual maniera in tutti i piani, fino ad un'elevazione massima di 9-10 metri. Le grandi dimensioni e varietà di ambienti permettono una distribuzione funzionale unica. Era infatti comune l'utilizzo del piano terra oltre che per scopi produttivi anche per usi abitativi (cucina al piano basso e zona notte al piano superiore). Inoltre, la configurazione in linea permetteva il posizionamento della scala all'interno della struttura in modo da avere più accessi indipendenti. I prospetti risultano regolarmente scanditi da finestrate di egual dimensione ed egual livello di rifinitura, fatta eccezione per il portone di ingresso, il quale poteva presentare strutture ad arco con



Figura 2.12: Antiche case nel borghetto di Vezzano di Sopra, Loiano. Modalità di sviluppo in linea

porzioni decorate.

Le principali varianti tipologiche sono legate alla collocazione *in piano* o *in pendio* e alla presenza o meno di un vano scala. Anche in questo caso si possono riscontrare processi di accrescimento, sia in senso planimetrico sia in senso altimetrico, nonché fenomeni di aggregazione, realizzati tanto mediante corpi edilizi separati quanto attraverso giustapposizioni. Particolarmente rilevanti, in quest'ultima modalità, risultano le aggiunte di ulteriori unità abitative in linea e le connessioni con corpi destinati a stalla-fienile. Nella maggior parte dei casi, gli edifici aggregati a schiera presentano la medesima altezza e, frequentemente, anche i profili delle coperture assumono una configurazione costruttiva unitaria. Ogni unità è aderente a quella vicina per cui il fronte risulta compatto e solitamente allineato secondo un elemento primario quale può essere una strada, un passaggio, oppure un carattere topografico.

Per quello che riguarda i caratteri topografici, i promontori sono parte del territorio montano in cui è facilitata la nascita di insediamenti, soprattutto se vicini a fonti idriche naturali, questo per motivi principalmente difensivi, ma anche per una più facile costruzione degli edifici. Le isoipse indicano come varia l'altimetria del terreno, fornendo una chiara idea della pendenza. Tanto più queste curve sono vicine, tanto più rapidamente cresce la pendenza del versante. Le linee che tagliano perpendicolarmente le isoipse sono dette linee di massima pendenza e di solito si riferiscono a zone di divergenza tra due versanti (crinali o displuvi), oppure a zone di convergenza (vallate o compluvi). Lungo queste ultime si dispongono sempre i corsi d'acqua, tagliando ortogonalmente le curve di livello. Gli edifici che costituiscono i primi insediamenti venivano eretti cercando di adoperare meno risorse possibili, per questo motivo sfruttavano le zone meno pendenti seguendo le zone di uguale dislivello. L'asse più lungo degli edifici, di solito, tagliava perpendicolarmente le curve di livello; in questo modo le falde dei tetti, nella maggior parte a capanna, avrebbero scolato l'acqua piovana ai lati dell'edificio stesso che sarebbe poi scivolata a valle grazie alla naturale pendenza del terreno.

Per questo motivo si ricordano i gradi processuali della scala territoriale; tipi insediativi (elementi di base puntiformi), tessuto territoriale (strutture aggregative: aree

produttive), impianto territoriale (sistemi unitari di linee unificanti: percorsi), organismo territoriale (unità individuate di linee dividenti: confini), ci soffermiamo sui percorsi territoriali, cioè sul riconoscimento dei percorsi di origine spontanea ad andamento naturalistico in relazione alla morfologia idro-orografica del territorio; sono individuate quattro tipologie di percorso:

1. Percorsi di crinale: coincidono con le linee naturali di displuvio tra due compluvi contigui. In quanto displuvi non attraversano mai un corso d'acqua

2. Percorsi di controcrinale (o di mezzacosta): tendono a congiungere gli insediamenti di promontorio seguendo la curva di livello propria della fascia altimetrica insediativa. Sono necessari guadi o passerelle per oltrepassare i torrenti. A questi percorsi di controcrinale analitico si affiancano quelli di controcrinale sintetico che tendono a unire due insediamenti appartenenti a versanti opposti mediante un percorso ortogonale alle curve di livello.

3. Percorsi di fondovalle: tendono a risalire il bacino idrico di propria competenza secondo la direzione di scorrimento del corso d'acqua principale.

4. Percorsi di piano: generalmente rettilinei, tendono ad unire due punti mediante il tracciato geometricamente più breve. Gli edifici aggregati a schiera, quindi, possono modificare la loro matrice di cellula

elementare, adattandosi ai percorsi di controcrinale.

2.6.2 A SPIRALE

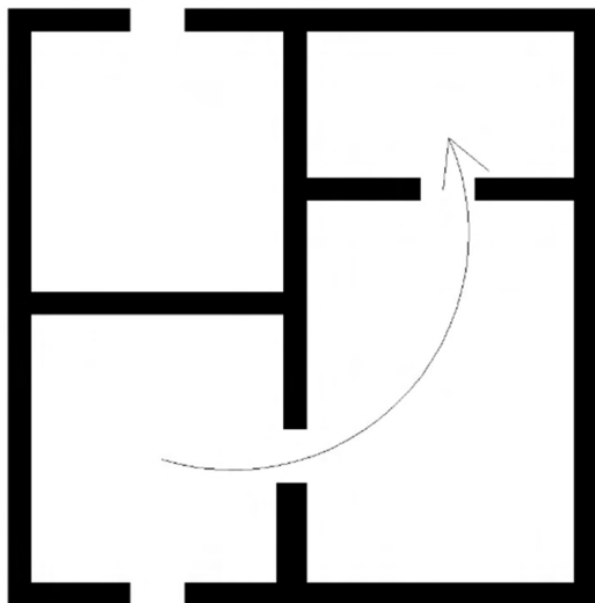


Figura 2.13: Crescita a spirale di una cella elementare. [Yuri Pennacchi, 2025, *Forme architettoniche in area geomateriale litica nell'Appennino tra Emilia-Romagna e Toscana*]

La forma di accrescimento *a spirale* si differenzia da quella in linea in quanto gli elementi aggiunti alla cella originaria seguono entrambe le direzioni, senza aver così un lato della pianta fortemente prevalente sull'altro. Il carattere bidimensionale della struttura porta a diversi vantaggi, tra cui una maggiore stabilità dei setti murari. È infatti noto il contributo positivo che portano i solai adiacenti ai setti murari originari: i vani aggiunti imprimendo un ulteriore carico, stabilizzano il setto di partenza evitando fenomeni di spanciamiento.

Uno dei possibili sviluppi di questo tipo, è la casa a torre, tipicamente sviluppata su tre o quattro piani. La divisione altimetrica dell'edificio seguiva una logica funzionale: il

piano terra dotato di accesso diretto era adibito a rustico, mentre i piani superiori erano destinati ad abitazioni, con accesso da scala esterna e collegamenti interni affidati a scale a pioli in legno.

Nel territorio dell'Alto Appennino sono rari i casi in cui questo forma di accrescimento si presenti senza volumi di aggregazione: giustapposizione semplice su uno o due lati o per inglobamento su tre o quattro fronti sono le modalità più diffuse. Gli accrescimenti, di cui si ricordano le aggiunte di porticati esterni o forme di crescita alquanto tipiche caratterizzate dall'accostamento su due lati opposti della torre di volumi più bassi coperti ad una falda. In qualche caso, sono rilevate anche le sopraelevazioni della copertura. Anche in queste forme aggregative il corpo di torre si è mantenuto riconoscibile e identificabile come edificio emergente all'interno di un insieme più complesso. In questi casi, i collegamenti interni con scale a pioli vengono a scomparire favorendo gli accessi attraverso gli edifici aggregati successivamente e inglobanti di fatto la torre.

2.6.3 LE CASE TORRI

È possibile distinguere tre sottocategorie di case a torre in base al periodo di costruzione e alla funzione che ad esse veniva attribuita: *difensiva*, *abitativa* e con *colombaia*.

I primi tipi a torre risalgono al XII secolo e vennero eretti principalmente a scopo militare e difensivo. La funzione più frequente era quella di avvistamento e segnalazione per le torri isolate mentre a scopo difensivo se inserite all'interno di un piccolo nucleo, sia esso un monastero o un borgo. In virtù del loro sviluppo verticale e la loro collocazione in posizioni elevate permettevano una visione privilegiata sulle valli e un'efficiente comunicazione visiva e uditiva tra le torri circostanti. Il sistema di avvistamento e di trasmissione dei messaggi funzionava di giorno per mezzo di campane, di notte con fuochi e segnali luminosi.

Questa caratteristica costruzione a torre presenta discrete aperture nei piani superiori per facilitare la visione circostante, mentre ai piani inferiori si riscontra l'assenza di

aperture se non per piccole feritoie. Ai piani superiori, tipicamente al terzo, è facilmente osservabile una apertura di discrete dimensioni che si presume servisse per l'accesso al ballatoio ligneo che correva tutt'intorno alla torre.

Nella maggior parte dei casi la componente strutturale era affidata unicamente agli spessi muri perimetrali, su cui andavano ad inserirsi i solai lignei. Talvolta però, gli ingenti carichi derivanti dai solai costringevano i costruttori di avvalersi di una massiccia stilata lignea centrale sulla quale andavano ad appoggiarsi le travi di prima orditura. Tale elemento



Figura 2.14: Roffeno, Castel d'Aiano: Casa-torre Poggiolo



Figura 2.15: Castel d'Aiano: Torre della Famaticcia

ligneo poggiava su un concio lapideo basamentale allo scopo di impedire la risalita di umidità dal terreno e per ottenere una buona distribuzione dei carichi.

Il particolare scopo di queste costruzioni porta alla quasi totale assenza degli ambienti tipici delle case torre come le stalle, le colombaie e i camini che si riscontrano in periodi successivi. Altro parametro attraverso cui è possibile distinguere cronologicamente i tipi a torre è la qualità dei paramenti murari. Le torri del XII e XIII secolo presentano una serie di grossi massi lapidei squadrati dettagliatamente e disposti in regolari file parallele, mentre internamente i muri erano a sacco. Ulteriore elemento architettonico che può distinguere periodi diversi è la forma del portale e, in maniera meno precisa, quella delle finestre. I portali di ingresso più antichi vengono sorretti da massicci architravi lapidei di forma rettangolare mentre le finestre venivano incorniciate ai lati da piedritti di forma irregolare e al di sopra da architravi triangolari.

Dal XII al XV secolo le torri affiancano progressivamente alla funzione abitativa quella difensiva. Il sistema costruttivo rimane sostanzialmente invariato ad eccezione di alcune importanti modifiche. Il paramento del muro a sacco del Duecento viene sostituito da una tessitura irregolare dei pannelli murari mentre i conci d'angolo rimangono regolari e sovrapposti orizzontalmente.

Per la prima volta compaiono le colombaie, tipiche feritoie di dimensioni maggiori per i piccioni e minori per rondoni o storni.

Il piano terra veniva isolato dai piani superiori e adibito a stalla mentre al di sopra i vani abitabili erano collegati da scale lignee ed erano difficilmente previste ripartizioni interne. Insieme ai portali a mensola si diffusero quelli a sesto acuto o a tutto sesto. Si riscontrano anche portali rettangolari con l'architrave direttamente poggiato sugli stipiti.

A partire dal Cinquecento le torri cedono la loro funzione abitativa ai volumi di accrescimento che vengono edificati successivamente. La casa attigua diviene la vera e propria abitazione mentre la torre viene riadattata e convertita a colombaia per assicurarsi guano, o colombina, come concime e piccioni come cibo.

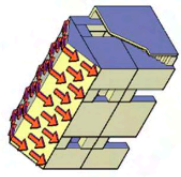



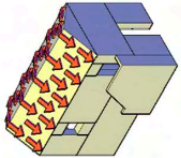
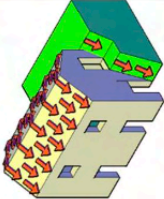
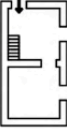
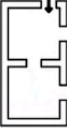

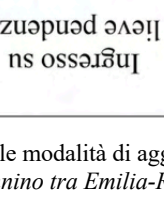
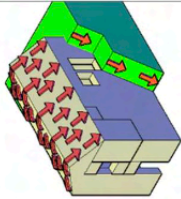



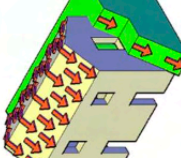
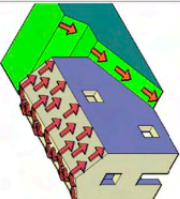


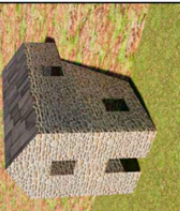
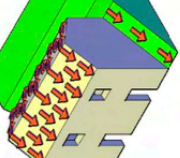
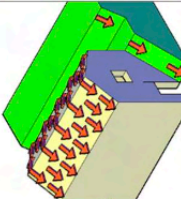



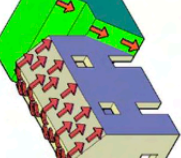





I caratteri del sapere comacino si diffondono sempre di più congiuntamente alle influenze degli elementi tipici delle colombaie di pianura. I caratteri decorativi si accentuano per qualità e quantità: alla cornice della colombaia si aggiungono diversi corsi di mattoni che in alcuni casi risultano modanati. La lunetta aumenta di dimensione e si arrotonda fino a diventare un rosone. Anche i soffitti di gronda si ornano di corsi di mattoni variamente disposti. Negli architravi e negli stipiti si diffondono le modanature con

simboli e stemmi di famiglie e casati. I portali diventano tipicamente a tutto sesto con decorazioni sulla chiave di volta e sulle cornici nell'imposta dell'arco.

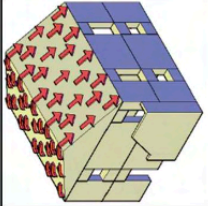
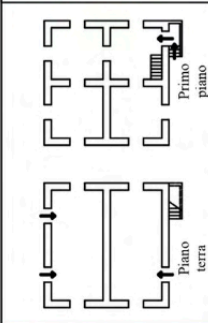

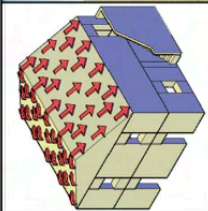
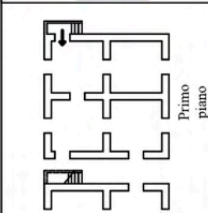

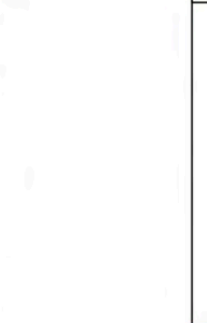
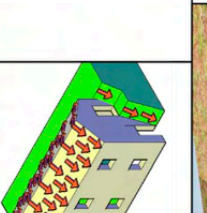
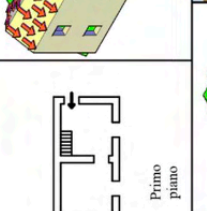
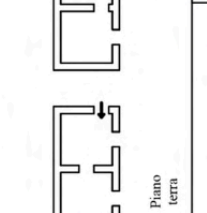
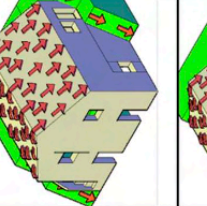
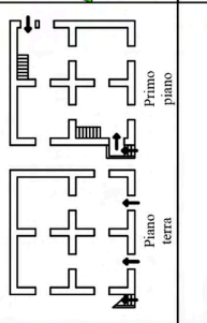
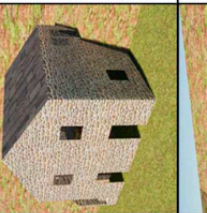
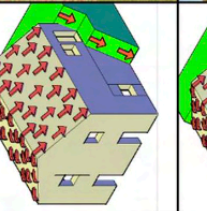
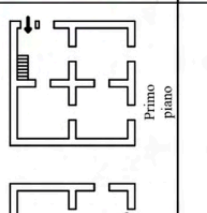
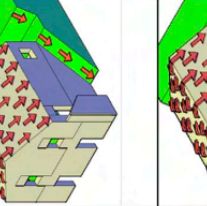
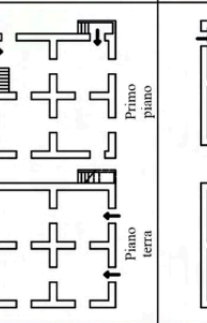
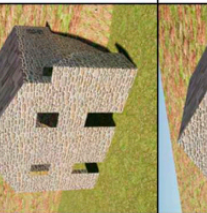
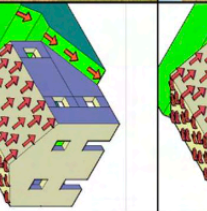
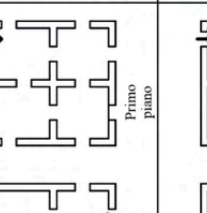
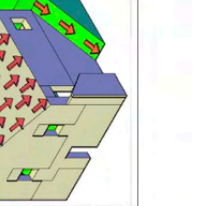
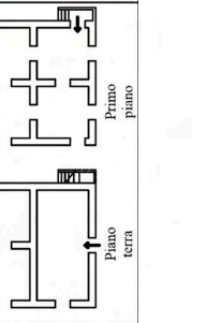

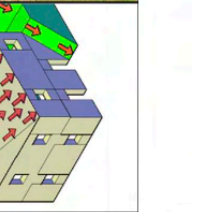
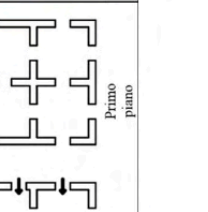
La stratificazione dei saperi costruttivi e delle istanze formali ha prodotto linguaggio architettonico, che pur essendo nato da necessità pratiche, si è gradualmente caricato di valori simbolici, fino a diventare autentica espressione dell'identità culturale del territorio.

Raddoppio verticale con sottotetto					
Raddoppio verticale					
Terreno pianeggiante	Ingresso su lieve pendenza	Ingresso su forte pendenza	Lieve pendenza laterale	Forte pendenza laterale	

Schema 2.16: Schema riassuntivo delle modalità di aggregazione di celle elementari. [Yuri Pennacchi, 2025, *Forme architettoniche in area geomateriale litica nell'Appennino tra Emilia-Romagna e Toscana*]

Raddoppio in pianta					
Terreno pianeggiante		 Primo piano	 Piano terra		
		 Primo piano	 Piano terra		
Ingresso su lieve pendenza		 Primo piano	 Piano terra		
Ingresso su forte pendenza		 Primo piano	 Piano terra		
Lieve pendenza laterale		 Primo piano	 Piano terra		
Forte pendenza laterale		 Primo piano	 Piano terra		

Schema 2.17: Schema riassuntivo delle modalità di aggregazione di celle elementari. [Yuri Pennacchi, 2025, *Forme architettoniche in area geomateriale litica nell'Appennino tra Emilia-Romagna e Toscana*]

Raddoppio della doppia cella					
Terreno pianeggiante					
Ingresso su lieve pendenza					
Ingresso su forte pendenza					
Lieve pendenza laterale					
Forte pendenza laterale					

Schema 2.18: Schema riassuntivo delle modalità di aggregazione di celle elementari. [Yuri Pennacchi, 2025, *Forme architettoniche in area geomateriale litica nell'Appennino tra Emilia-Romagna e Toscana*]

3. COSTRUZIONI IN MURATURA PORTANTE

3.1 LA MURATURA

3.1.1 COMPOSIZIONE

La costruzione muraria può definirsi come un assemblaggio, in sovrapposizione ordinata, di elementi lapidei (naturali e/o artificiali), alternati a strati più o meno cospicui di malta, disposti in modo da ottenere un complesso con una buona stabilità. Si tratta di materiali profondamente diversi sia composizione chimico-fisica sia per funzione strutturale: la pietra funge da elemento resistente, in particolare nei confronti delle sollecitazioni di compressione, mentre la malta costituisce la componente deputata alla distribuzione dei carichi. L'esperienza nel campo della scienza delle costruzioni ha delineato le specificità meccaniche delle varie tipologie di pietra e definendo in maniera generale il materiale lapideo come duttile in presenza di sforzi di compressione ma altamente fragile e con una bassissima resistenza a trazione. A fronte di bassi livelli di deformazione, la muratura presenta un comportamento elastico, seguito da una condizione di crisi per fessurazione raggiunti i valori di picco di compressione. La muratura nel suo insieme, specialmente se composta da pietra naturale, assume un comportamento anisotropo e non lineare, dunque, a seconda dell'orientamento della sollecitazione, la parete muraria risponderà meccanicamente in maniera differente. Il

comportamento della muratura può risultare alquanto variabile a seconda della classificazione tipologica, che individua quattro parametri base (Luigia Binda Maier, 1998):

- Gli elementi lapidei, identificati da forma e litotipo di appartenenza, oltre che dalla lavorazione, provenienza, dimensioni, colore, e stato di conservazione;
- Posa in opera dei paramenti: tessitura o apparecchiatura;
- La sezione, con riferimento alla tipologia costruttiva: numero di paramenti e loro spessore, tipologia di ammorsamento, presenza di diatoni, o di zeppe, distribuzione e dimensione dei vuoti;
- La malta usata per connettere gli elementi lapidei (esclusi intonaci e malte per la copertura dei giunti), individuata innanzitutto dalla sua consistenza e, secondariamente da spessore dei giunti, diametro e forma dell'aggregato.

Considerata la significativa varietà di materiali e tecniche costruttive impiegate, assume un ruolo centrale l'approfondita conoscenza della composizione degli elementi costruttivi e delle caratteristiche dei collegamenti, a partire dalla tipologia, disposizione dei materiali e dalla presenza di discontinuità.

3.1.2 CARATTERISTICHE MECCANICHE

Tipologia di muratura	f (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	- -	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	- -	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	- -	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,4-2,2	0,028-0,042	- -	900-1260	300-420	13 ÷ 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadriati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

(*) Nella muratura a conci sbozzati i valori di resistenza tabellati si possono incrementare se si riscontra la sistematica presenza di zeppe profonde in pietra che migliorano i contatti e aumentano l'ammorsamento tra gli elementi lapidei; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente pari a 1,2.

(**) Data la varietà litologica della pietra tenera, il peso specifico è molto variabile ma può essere facilmente stimato con prove dirette. Nel caso di muratura a conci regolari di pietra tenera, in presenza di una caratterizzazione diretta della resistenza a compressione degli elementi costituenti, la resistenza a compressione f_{pu} può essere valutata attraverso le indicazioni del § 11.10 delle NTC.

(***) Nella muratura a mattoni pieni è opportuno ridurre i valori tabellati nel caso di giunti con spessore superiore a 13 mm; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente riduttivo pari a 0,7 per le resistenze e 0,8 per i moduli elastici.

Tabella 3: Valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura.

Tipologia di muratura	Stato di fatto			Interventi di consolidamento			
	Malta buona	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Iniezione di miscele leganti (*)	Intonacoarmato (**)	Ristilatura armata con connessione dei paramenti (**)	Massimo coefficiente complessivo
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	1,3	1,5	2	2,5	1,6	3,5
Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo	1,4	1,2	1,5	1,7	2,0	1,5	3,0
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	1,1	1,3	1,5	1,5	1,4	2,4
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,5	1,2	1,3	1,4	1,7	1,1	2,0
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,6	-	1,2	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura a blocchi lapidei squadriati	1,2	-	1,2	1,2	1,2	-	1,4
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	(***)	-	1,3 (****)	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	1,2	-	-	-	1,3	-	1,3

Tabella 3.1: Coefficienti correttivi massimi da applicarsi in presenza di: malta di caratteristiche buone; ricorsi o listature; sistematiche connessioni

Per l'individuazione dei parametri meccanici di una specifica muratura, la circolare applicativa del 2019 prescrive quando possibile, misure dirette in-situ tramite prove di compressione o di taglio. Per un miglior grado di conoscenza dell'apparato murario, è

possibile praticare metodi di prova non distruttivi al fine di estendere le considerazioni effettuate a livello locale. La normativa fornisce inoltre una tabella comparativa non vincolante tra le tipologie di muratura più ricorrenti e i loro valori di

riferimento in termini di resistenza media a compressione (f), resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (τ), modulo elastico di Young (E), modulo di elasticità tangenziale (G) e peso specifico medio (w) (**Tab. 3**). Per ogni tipologia di muratura è possibile applicare dei coefficienti migliorativi per tenere in considerazione uno stato migliore di quello descritto in tabella (**Tab. 3.1**). Tali coefficienti sono applicabili in presenza dei seguenti fattori: malta di buone caratteristiche, presenza di ricorsi (o listature) e presenza sistematica di elementi di collegamento trasversale tra i paramenti.

La normativa riporta le indicazioni utili al fine di determinare le resistenze caratteristiche di resistenza a taglio e compressione. Si definisce *resistenza caratteristica* quella resistenza calcolata al frattile al 5% della distribuzione statistica e che dunque permette di ottenere valori della resistenza che il 95% dei provini testati supera. La resistenza di rottura a compressione di un singolo elemento viene calcolata tramite l'espressione $f_{bi} = N/A$ con N carico di rottura applicato normalmente al piano di posa e A sezione del provino normale al carico. Per ottenere un valore caratteristico di resistenza a compressione in direzione parallela a quella di carico è necessario applicare la formula sotto riportata applicata ad un numero minimo di 30 provini:

$$f_{bk} = f_{bm} (1 - 1,64\delta)$$

- f_{bm} = media aritmetica della resistenza dei singoli elementi f_{bi} ;

- δ = coefficiente di variazione (accettabile se e solo se $>0,2$)

Se invece si vuole considerare il valore di resistenza caratteristica a compressione nella direzione ortogonale ai carichi verticali e all'interno del piano della muratura è possibile dedurre tale quantità tramite f_{bm} attraverso la formula:

$$f_{bk} = 0,7 f_{bm}$$

Per quanto riguarda la determinazione sperimentale delle resistenze di taglio, la circolare applicativa 2019 introduce le prove di compressione diagonale e le prove di scorrimento lungo il giunto (UNI EN 1052-3 e UNI EN 1052-4). Qualora non fosse possibile applicare prove dirette in termini di tempi, costi e fattibilità è possibile fare riferimento alle tabelle indicate al § 3.6 della norma UNI EN 1996-1-1 (Eurocodice 6).

3.2 TIPOLOGIE STRUTTURALI

Per comprendere a pieno la concezione strutturale del patrimonio edilizio appenninico, è utile ricondursi alla classificazione degli edifici in muratura portante concepita dall'ingegnere M. Pagano¹. La suddivisione da lui proposta prende in considerazione il comportamento statico degli orizzontamenti ed il grado di connessione di questi alle murature. Questa classificazione ci consente inoltre di costruire una prima analisi indirizzata a individuare i principi strutturali tipicamente adottati nell'alto Appennino. Le prime due classi fanno riferimento a edifici in muratura storici mentre la terza considera anche edifici moderni e contemporanei.

Gli edifici di *prima classe* si caratterizzano per una struttura portante interamente in muratura, inclusi gli orizzontamenti. Questi ultimi vengono realizzati attraverso superfici curvilinee, quali archi e volte. Sono strutture bidimensionali concepite per intercettare e ridistribuire i carichi verticali dalla sommità fino ai setti murari sottostanti, lavorando a compressione. In generale si possono distinguere le volte in *semplici o composte*. Le volte semplici sono generate da una rotazione cilindrica (volta *a botte*) o sferica (volta *a vela*) mentre quelle composte sono riconducibili a strutture ottenute per intersezione tra volte a botte (volta *a*

padiglione e volta *a crociera*). Anche i collegamenti verticali possono essere realizzati tramite strutture voltate chiamate *voltine a sbalzo*.

Gli edifici di *seconda classe* sono quelli che rispecchiano al meglio la concezione strutturale dei tipi edilizi dell'Appennino. Essi non presentano più strutture voltate, bensì affidano ai solai lignei il compito di orizzontamento. Sulle pareti continue portanti, travi e travetti vengono appoggiati in apposite forature o asole, risultando così meccanicamente scollegati dalla muratura. Questa caratteristica lavora chiaramente a sfavore di sicurezza in quanto agevola il comportamento "a carciofo" della struttura tramite cui avvengono spostamenti incrementali delle murature verso l'esterno, dal piano terra fino all'ultimo. Aspetto fondamentale per questa classe, così come per la prima, è la qualità dell'ammorsamento tra pareti ortogonali. Una buona continuità materiale tra queste permette non solo di prevenire fenomeno di rotazione della facciata verso l'esterno ma anche di ottenere una risposta globale della struttura di tipo scatolare con muri portanti e muri controvento.

Gli edifici di *terza classe* vengono realizzati a partire dai primi del '900 in virtù dell'impiego di un nuovo materiali edilizio ovvero il

¹ Michele Pagano "Teoria degli edifici". Liguori Editore, Napoli, 1977.

calcestruzzo armato. Questi edifici sono costituiti da pareti in muratura mentre gli orizzontamenti sono tipicamente solai latero-cementizi con cordoli coronamento. Questa nuova modalità costruttiva è capace di gestire i problemi tipici degli edifici in muratura antichi. Gli orizzontamenti in cemento armato, grazie alla loro notevole rigidità nel piano e ai cordoli perimetrali ammortati alla muratura rendono l'edificio una struttura scatolare, impedendo il ribaltamento delle pareti perimetrali.

Nei confronti dell'azione sismica, questa classe di edifici avrà unicamente meccanismi di collasso globale e non più locale, questo poiché i cordoli in calcestruzzo armato permettono un miglior comportamento delle pareti portanti e di controvento.

3.3 ORGANISMO EDILIZIO

È necessario distinguere all'interno dell'organismo edilizio due componenti aventi funzioni differenti: *struttura portante ed elementi strutturali*. I maschi murari, insieme a fondazioni ed orizzontamenti, compongono la struttura portante vera e propria in quanto destinati a sostenere sia i carichi verticali (provenienti dalle murature sovrastanti e dai solai) sia quelli orizzontali (vento e sisma). Per maschio murario si

intende la porzione di muratura verticale continua, vincolata in basso alle fondazioni e collegata in sommità all'ultima fascia di piano². Forma, dimensione e reciproca disposizione di questi elementi risultano fattori essenziali per la progettazione in quanto la resistenza dei muri alle forze nel piano è di gran lunga superiore della resistenza alle forze agenti ortogonalmente alla parete. Da qui la necessità di un comportamento statico di tipo scatolare caratterizzato da collegamenti efficaci fra i setti murari, gli impalcati di piano e le fondazioni. Distinguiamo quindi due tipologie di muratura in rapporto all'azione a cui sono sottoposti: quelli portanti sollecitati prevalentemente ad azioni verticali e i muri di controvento che invece sono destinati ad assorbire le azioni orizzontali. Ai fini di un adeguato comportamento statico e dinamico della struttura, tutti i muri devono avere, per quanto possibile, sia la funzione portante che di controventamento.

Contributo fondamentale alla struttura portante sono poi gli orizzontamenti, che nel nostro caso, vengono realizzati tramite solai lignei composti da orditura principale, secondaria e tavolato. Essi hanno il compito di sostenere e ripartire correttamente i carichi verticali e di trasmettere le sollecitazioni orizzontali alle pareti di controvento.

² La fascia di piano è costituita dalla fascia muraria continua e orizzontale che si estende da sopra

l'architrave più alto delle forature, fino al davanzale più basso delle forature presenti superiormente.

L'efficacia con cui questi carichi vengono trasmessi dipende essenzialmente dalla rigidità del solaio stesso e dalla modalità con cui si vanno ad inserire le travi nella muratura. Nel nostro ambito il sistema statico si può assimilare ad un nodo a cerniera in quanto le connessioni vengono realizzate tramite appoggio semplice.

Per elementi strutturali si fa invece riferimento a tutte quelle componenti che pur non partecipando alla rigidità complessiva della struttura, devono essere verificati e correttamente dimensionati. Si parla dunque di architravi, scale, tiranti, balconi eccetera.

3.4 AZIONI SULLE COSTRUZIONI

Le NTC 2018 definiscono i carichi come “ogni causa o insieme di cause capace di indurre stati limite in una struttura” distinti rispetto al modo in cui si esplicano (dirette indirette e di degrado), rispetto alla risposta strutturale (statica, pseudo statica e dinamica) o ancora secondo la variazione della loro intensità nel tempo. Quest'ultima ricopre un ruolo di grande importanza nella caratterizzazione delle azioni elementari. Vengono definiti i carichi permanenti (G) tutte quelle azioni la cui variazione nel tempo è nulla o di

modesta intensità. Si parla quindi di peso proprio degli elementi strutturali (G1), peso proprio degli elementi non strutturali (G2), presollecitazioni (P), spostamenti e deformazioni impressi. Per la determinazione dei carichi permanenti strutturali la normativa fornisce una tabella riportante il peso per unità di volume [kN/m^3] dei principali materiali strutturali al fine di restituire l'effettivo carico dato degli elementi, calcolato rispetto alla geometria di progetto. Per quanto riguarda i carichi permanenti non strutturali, la normativa specifica gli elementi a cui fa riferimento, ovvero tamponature esterne, massetti, divisori interni, pavimentazioni, isolamenti e impianti. Per la stima di tali carichi, il procedimento rimane il medesimo dei carichi strutturali ma con l'aggiunta di alcune indicazioni relative agli elementi divisori interni. Questi, infatti, potranno essere eguagliati ad un carico permanente uniformemente distribuito g_2 tramite correlazione al peso proprio per unità di lunghezza nel modo seguente:

- per elementi divisorii con $G_2 < 1,00$ kN/m $g_2 = 0,40$ kN/m²;
- per elementi divisorii con $1,00 < G_2 < 2,00$ kN/m $g_2 = 0,80$ kN/m²;
- per elementi divisorii con $2,00 < G_2 < 3,00$ kN/m $g_2 = 1,20$ kN/m²;
- per elementi divisorii con $3,00 < G_2 < 4,00$ kN/m $g_2 = 1,60$ kN/m²;
- per elementi divisorii con $4,00 < G_2 < 5,00$ kN/m $g_2 = 2,00$ kN/m².

Sono successivamente definite le azioni variabili (Q) come tutte quelle azioni che agiscono con valori istantanei sensibilmente diversi tra loro nel corso della vita nominale della struttura. Rientrano in questa classificazione i sovraccarichi, le azioni del vento, della neve e della temperatura. Fattore fondamentale sono i sovraccarichi, detti anche carichi imposti. Essi comprendono i carichi legati alla destinazione d'uso della struttura (dalla categoria A alla K) e vengono riportati come carichi verticali uniformemente distribuiti (q_k) [kN/m²], carichi verticali concentrati (Q_k) [kN] e carichi orizzontali lineari H_k [kN/m].

Le azioni eccezionali (A) riguardano incendi, esplosioni, urti e impatti.

Le azioni sismiche vengono invece inserite in una categoria a sé stante etichettata con la lettera E. La normativa predispone le verifiche agli stati limite, adottando come parametro di riferimento la *pericolosità sismica di base*, funzione delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche dello specifico sito. Nel particolare, si fa riferimento a tre valori, ovvero l'accelerazione orizzontale massima al sito (a_g), valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro di accelerazione orizzontale (F_o) e valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro di accelerazione orizzontale (T_c). Per la determinazione di tali parametri è necessaria la consultazione degli allegati A e B al Decreto del Ministro delle Infrastrutture 14 gennaio 2008, pubblicato nel S.O. alla Gazzetta Ufficiale del 4 febbraio 2008, n.29. Una volta note suddette grandezze, la normativa prescrive verifiche delle prestazioni della costruzione nella sua

Categoria/Azione variabile	Ψ_{0j}	Ψ_{1j}	Ψ_{2j}
Categoria A - Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B - Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C - Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D - Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E – Aree per immagazzinamento, uso commerciale e uso industriale Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F - Rimesse , parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6

Tabella 3.2: Valori dei coefficienti di combinazione

		Coefficiente γ_F	EQU	A1	A2
Carichi permanenti G_1	Favorevoli	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali $G_2^{(1)}$	Favorevoli	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevoli	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Nel caso in cui l'intensità dei carichi permanenti non strutturali o di una parte di essi (ad es. carichi permanenti portati) sia ben definita in fase di progetto, per detti carichi o per la parte di essi nota si potranno adottare gli stessi coefficienti parziali validi per le azioni permanenti.

Nella Tab. 2.6.I il significato dei simboli è il seguente:

γ_{G1} coefficiente parziale dei carichi permanenti G_1 ;

γ_{G2} coefficiente parziale dei carichi permanenti non strutturali G_2 ;

γ_{Qi} coefficiente parziale delle azioni variabili Q.

Tabella 3.3: Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU

interezza, comprese parti strutturali, non strutturali e impianti. Agli stati limite di esercizio (SLE) vi sono descritti lo stato limite di operatività (SLO) e di danno (SLD) mentre stati limite ultimi (SLU) comprendono lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) e lo stato limite di prevenzione del collasso (SLC).

Definite le diverse categorie di azione, la normativa procede a stabilire le modalità di combinazione dei carichi sotto cui è posta la struttura. Vengono fornite una serie di espressioni di verifica agli stati limite che valutano condizioni di carico plurime tramite coefficienti di combinazione ψ_{0j} (condizione caratteristica o rara), ψ_{1j}

(condizione frequente) e ψ_{2j} (condizione quasi permanente) riportati in **Tab. 3.2**. Tali coefficienti, di valore non superiore all'unità, consentono di considerare la scarsa probabilità con cui si possono presentare contemporaneamente più condizioni di carico.

Nell'approccio agli stati limite delle NTC 2018, acquisiti e modificati dalle NTC 2008, le azioni che agiscono sulla struttura non vengono considerate in modo assoluto. Sia alle azioni sia alle resistenze vengono applicati coefficienti parziali di sicurezza (maggiorativi per i primi e riduttivi per i secondi) ottenendo così i valori di riferimento di progetto. In particolare, per gli stati limite ultimi dove la struttura viene sottoposta alle più gravose condizioni di carico, vengono riportati in **Tab. 3.3** i valori dei coefficienti parziali γ_F da assumersi per la determinazione degli effetti delle azioni nelle verifiche agli stati limite ultimi. Vedremo nel capitolo successivo un ulteriore approfondimento sulla tematica.

3.5 ANALISI DEL COMPORTAMENTO STRUTTURALE

L'analisi del comportamento strutturale delle costruzioni esistenti in muratura portante è contraddistinta da un elevato grado di insicurezza dovuto alla mancanza di dati certi e quantificabili. Il livello di conoscenza delle caratteristiche meccaniche dei materiali e della reale strutturazione spaziale della struttura incidono significativamente sul grado di conoscenza globale dell'edificio. L'osservazione dei danni rilevati sulle strutture murarie successivamente ad un evento sismico ha messo in luce come le parti strutturali più deboli siano anche quelle più vulnerabili. Spesso negli edifici in muratura storica, si rileva una condizione di assenza di connessioni tra gli elementi strutturali, motivo per cui si assiste sistematicamente ad un collasso parziale della muratura dovuto alla perdita di equilibrio di specifiche porzioni di essa. In virtù di tale condizione risulta necessario considerare, oltre al comportamento sismico globale, anche la possibilità di attivazione di meccanismi di danno locali.

Questione di primaria importanza, soprattutto per quanto riguarda i tipi dell'appennino tosco-emiliano, è la questione relativa agli edifici a cui si sono affiancate forme di accrescimento e/o aggregazione. Tali configurazioni spaziali rendono incerto il comportamento sismico globale dell'edificio poiché soggette a diverse condizioni di

vulnerabilità come la scadente qualità della tessitura muraria fra unità adiacenti e le mancate connessioni tra le componenti strutturali della costruzione stessa e quelle degli edifici contigui.

Di seguito si definiscono i livelli di studio da affrontare per una corretta valutazione delle verifiche di sicurezza dell'edificio e della progettazione degli interventi:

- Livello 0: Indice di qualità muraria
- Livello 1: Meccanismi locali
- Livello 3: Analisi globale

3.5.1 INDICE DI QUALITÀ MURARIA

È indiscutibile come la valutazione della qualità muraria sia un elemento chiave in qualsiasi analisi o ipotesi di intervento e sia di fondamentale importanza per un corretto riferimento al modello di comportamento a macroelementi. Il metodo IQM, nato nel 2000 in Umbria e perfezionato dalle modifiche introdotte dalle NTC 2018, consente di attribuire una valutazione di conformità (completa, parziale o mancata) per alcuni parametri tipici della buona pratica dell'arte muraria³. Sulla base dei giudizi rilevati si ottiene un indice numerico, variabile tra zero e dieci, correlato con la qualità muraria e

riconducibile ai parametri meccanici più significativi per le murature.

Primo aspetto da tenere in considerazione, seppur ritenuto marginale nelle NTC, sono i comportamenti di *tipo disgregativo*. Per l'analisi del patrimonio edilizio esistente, la normativa assume scontata la capacità dell'organismo edilizio di fornire risposte meccaniche alle azioni sismiche quando questa certezza non c'è. Il fenomeno disgregativo si presenta come incapacità dell'organismo di offrire una sufficiente risposta meccanica sotto l'effetto di azioni dinamiche e cicliche ed è ricorrente nelle costruzioni in muratura di scadente qualità. Paramenti scollegati, malte di scarso pregio ed elementi lapidei di dimensioni e forme variabili, sono le caratteristiche che portano alla scomposizione dei paramenti murari sotto azione sismica.

Se al contrario, la muratura riesce a fornire una adeguata risposta strutturale in virtù della coesione data dalla tessitura e della scelta della tipologia costruttiva, non presenterà problematiche legate al fenomeno disgregativo. L'integrità dell'apparato murario in caso di sisma favorisce la creazione di catene cinematiche fra gli elementi deboli della muratura quali possono essere finestre e innesti dei solai, producendo dei *meccanismi di tipo locale*. Se consideriamo in aggiunta

³ Antonio Borri, Alessandro De Maria. Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia e Servizio Rischio Sismico Regione Umbria. "Il metodo

IQM per la stima delle caratteristiche meccaniche delle murature: allineamento alla circolare n. 7/2019" Ascoli Piceno 2019

alla buona qualità muraria anche la presenza diffusa di opportuni collegamenti orizzontali, otterremo meccanismi *di tipo globale*, in cui la capacità resistente della struttura viene data dall'insieme delle sue parti. Le possibilità sopra elencate ci consentono di effettuare una prima classificazione dello stato in cui ci si presentano le strutture, al fine di individuare gli interventi prioritari che richiede l'edificio.

Il metodo IQM prevede l'individuazione di tre indici di qualità muraria distinti secondo la direzione di carico ovvero IQMNP per azioni orizzontali nel piano, IQMFP per azioni orizzontali fuori piano e IQMV per azioni verticali. Tali indici vengono valutati attraverso il grado di rispetto che la muratura ha nei confronti di diversi parametri quali **(Tab. 3.4):**

- MA. = qualità della malta / efficace contatto fra elementi / zeppe;
- P.D.= ingranamento trasversale / presenza dei diatoni;
- F.EL. = forma degli elementi resistenti;
- D.EL. = dimensione degli elementi resistenti;
- S.G. = sfalsamento dei giunti verticali / ingranamento nel piano della parete;
- OR. = orizzontalità dei filari;
- RE.EL. = resistenza degli elementi.

I giudizi parziali attribuibili ad ogni parametro possono essere: “rispettato”, “parzialmente rispettato” e “non rispettato”. Tali pareri vengono ricondotti ai valori numerici IQM attraverso una tabella

comparativa che ci consente di classificare la muratura in tre categorie: A, B e C (**Tab. 3.5**). Dalla classe A ci si può aspettare un buon comportamento strutturale, dalla C si attende una risposta meccanica insufficiente mentre la classe B si configura come comportamento intermedio fra i due. La circolare applicativa del 2019 ha introdotto due nuovi coefficienti correttivi dati dalle riduzioni imposte sui valori dei parametri meccanici delle murature ovvero “m” coefficiente correttivo per malta di pessima qualità e “g” coefficiente correttivo per giunti ampi. Tali valori vengono utilizzati nelle formule sotto riportate per il calcolo finale degli IQM.

Forma degli elementi resistenti (F.EL.)	
NR	Prevalenza di elementi di forma irregolare o arrotondata oppure ciottoli su entrambe le facce della parete.
PR	Compresenza di elementi irregolari o ciottoli e blocchi di forma squadrata o mattoni. Pareti con una faccia di blocchi di forma regolare o mattoni e l'altra faccia di ciottoli od elementi di forma irregolare. Elementi arrotondati o irregolari ma con interstizi riempiti di zeppe ben inserite.
R	Prevalenza di elementi di forma squadrata o sbazzata oppure mattoni o laterizi di forma parallelepipedica su entrambe le facce della parete.

Presenza diatoni / ingranamento trasversale (P.D.)			Orizzontalità dei filari (OR.)	
	Sezione muraria visibile¹	Sezione muraria non visibile (osservazione facce parete ed esecuzione di saggi interni)		
NR	LMT inferiore a 125 cm. Pietre di piccole dimensioni qualunque sia il valore di LMT.	Pietre piccole rispetto allo spessore del muro; assenza di pietre palesemente disposte in senso trasversale alla parete ("di testa").	NR	I tratti orizzontali sono interrotti o con evidenti sfalsamenti sull'intera facciata muraria.
PR	LMT compresa fra 155 cm e 125 cm.	Paramento ben tessuto ed ordinato almeno su una faccia; alcune pietre sono disposte "di testa"; spessore del muro non eccessivo rispetto alle dimensioni delle pietre.	PR	Situazioni intermedie fra il rispetto e il non rispetto, compreso il caso di filari orizzontali solo su una faccia della parete.
R	LMT maggiore di 155 cm	Paramento ben tessuto; blocchi o pietre di dimensione paragonabile a quella dello spessore della parete; presenza sistematica di pietre disposte "di testa".	R	Filari orizzontali su gran parte della parete, senza presentare interruzioni di continuità (per tratti lunghi circa 100 cm) e su entrambe le facce della parete. Murature listate con listature a interasse inferiore a 100 cm.

Resistenza elementi (RE.EL.)		Dimensione degli elementi (D.EL.)	
NR	Elementi degradati (> 50% del totale degli elementi). Elementi laterizi con percentuale di foratura > 70%. Mattoni in fango o argilla non cotta.	NR	Prevalenza di elementi con la loro dimensione maggiore sotto i 20 cm. Parete di soli diatoni in mattoni pieni (un solo paramento, elementi tutti in direzione trasversale).
PR	Elementi della muratura degradati (~ fra 10% e 50% del totale degli elementi). Elementi laterizi con foratura fra 70% e 55%. Elementi in tufo tenero (calcarene).	PR	Prevalenza di elementi con la loro dimensione maggiore fra 20 e 40 cm. Compresenza di elementi di dimensione variabile.
R	Pietre non degradate o poco degradate. Muratura con pochi elementi degradati (< 10%). Mattoni pieni cotti. Elementi di tufo duro (vulcanico). Elementi laterizi con foratura < 55%. Blocchi in calcestruzzo (anche forati).	R	Prevalenza di elementi con la loro dimensione maggiore sopra i 40 cm.

Qualità della malta / efficace contatto fra elementi / zeppe (MA.)	
NR/PESSIMA*	Malta scadente o degradata e polverulenta e del tutto priva di coesione. Malta assente (escluso caso previsto sotto in "R"). Giunti di malta di dimensioni eccessive, paragonabili a quelle degli elementi se la malta non è di ottima qualità. Muratura di elementi porosi (es. tufo) con scarsa aderenza fra la malta e gli stessi elementi.
PR	Malta di qualità intermedia, con giunti non eccessivamente erosi. Murature con elementi irregolari e malta degradata ma con zeppe efficacemente inserite negli spazi fra elementi.
R	Malta in buono stato e ben conservata, con giunti di dimensione non eccessiva rispetto alle pietre o ai mattoni o con giunti ampi e malta di ottima qualità. Muratura con grandi elementi squadrati e priva di malta o con strato di malta sottilissimo. In tal caso si intende "rispettato" il requisito di un efficace contatto fra le pietre.

Sfalsamento giunti verticali / Ingranamento nel piano (S.G.)		
	Metodo quantitativo²	Metodo qualitativo
NR	Parete a paramento unico: LMT < 140. Parete a doppio paramento: LMT < 140 su una faccia e LMT < 160 sull'altra faccia. Parete di soli diatoni di mattoni pieni, qualunque sia il valore di LMT. Parete con pietre di piccole dimensioni qualunque sia il valore di LMT. Evidente assenza d'ingranamento su una o più linee verticali della parete.	Giunti verticali allineati. Giunti allineati verticalmente su due o più elementi in ampie porzioni della parete. Parete di soli diatoni di mattoni pieni, anche con giunti verticali sfalsati. Evidente assenza d'ingranamento su una o più linee verticali della parete.
PR	Parete a paramento unico: LMT fra 140 e 160. Parete a doppio paramento: a) entrambi i paramenti con LMT fra 140 e 160. b) LMT rispettato su una faccia e non rispettato sull'altra faccia. c) LMT rispettato su una faccia e parzialmente rispettato sull'altra faccia.	Giunto verticale in posizione intermedia tra zona centrale dell'elemento inferiore e il suo bordo.
R	Parete a paramento unico: LMT > 160 Parete a doppio paramento: LMT > 160 su entrambe le facce.	Giunti verticali in corrispondenza della zona centrale dell'elemento inferiore (escluso il caso di parete in mattoni pieni disposti solo a diatoni).

Tabella 3.4: Giudizi attribuibili ai parametri della regola dell'arte.

Direzione azione	Categoria della muratura		
	A	B	C
IQM _V (azioni verticali)	$5 \leq \text{IQM}_V \leq 10$	$2,5 \leq \text{IQM}_V < 5$	$0 \leq \text{IQM}_V < 2,5$
IQM _{FP} (azioni ortogonali)	$7 \leq \text{IQM}_{FP} \leq 10$	$4 < \text{IQM}_{FP} \leq 7$	$0 \leq \text{IQM}_{FP} \leq 4$
IQM _{NP} (azioni complanari)	$5 < \text{IQM}_{NP} \leq 10$	$3 < \text{IQM}_{NP} \leq 5$	$0 \leq \text{IQM}_{NP} \leq 3$

Tabella 3.5: Attribuzione delle categorie murarie in base ai valori di IQM.

Le murature di tipo A e B assicurano un comportamento monolitico di intere pareti o parti di esse ed è perciò possibile individuare e analizzare i meccanismi di collasso ricorrenti dovuti all'azione sismica.⁴

Il meccanismo di collasso di primo tipo (Fig. 3.6) si presenta come rotazione totale o parziale verso l'esterno delle pareti perimetrali ed è interpretabile come perdita di equilibrio di blocchi rigidi. Tale meccanismo è caratteristico di muri d'angolo con completa assenza di ammorsamento fra le pareti ortogonali, per cui ciascuna parete si comporta come elemento isolato. L'assenza di resistenza a taglio, dovuta all'indipendenza del comportamento dei pannelli murari e alla carenza di elementi di collegamento tra elementi strutturali porta, in primo luogo, al cedimento della parete normale alla direzione dell'azione sismica. In particolare, nelle strutture che hanno subito cinematismi di questo tipo è possibile osservare lesioni verticali presenti nel piano di giunzione tra pannello ribaltante e le pareti ad essa ortogonali.

Il meccanismo di secondo modo, detto anche meccanismo di flessione fuori piano (Fig.

3.7), a fronte della stessa sollecitazione, riguarda pareti ben connesse fra loro e di buona resistenza. Per quanto riguarda il danno dato dalla flessione verticale, esso riguarda edifici aventi un buon grado di collegamento tra orizzontamento sommitale e muratura mentre presentano solai intermedi sconnessi. Questa condizione porta alla formazione di una cerniera cilindrica orizzontale in corrispondenza dei solai intermedi che consente l'innescio del cinematismo. La flessione verticale invece, è ricorrente in quegli edifici aventi un buon grado di ammorsamento fra pareti ortogonali ma con assenza di vincoli nella porzione sommitale. La risposta strutturale della parete soggetta a sisma si manifesta tramite formazione di cerniera verticale nella sua porzione centrale,

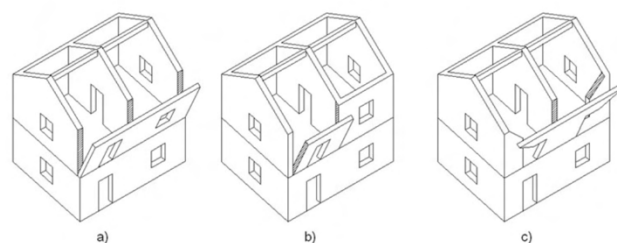


Figura 3.6: Meccanismi di collasso di primo tipo

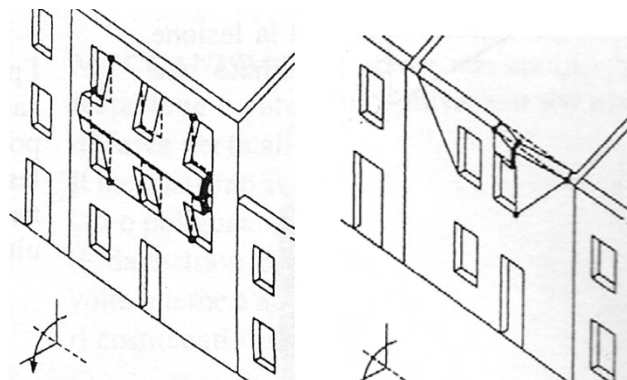


Figura 3.7: Meccanismi di collasso di secondo tipo: flessione verticale e orizzontale

⁴ G. C. Beolchini, L. Milano, E. Antonacci, Definizione di modelli per l'analisi strutturale degli

edifici in muratura: analisi dei meccanismi locali di collasso in edifici esistenti in muratura

in quanto buona parte della sollecitazione esterna viene assorbita dalle pareti parallele all'azione, mentre la restante si scarica sulla parete normale, portando ad uno spostamento maggiore in corrispondenza di questa porzione.

Piuttosto frequente è il meccanismo di danno successivo, che introduce una variante rappresentata dalla cerniera che si dispone con un'inclinazione intermedia rispetto ai casi precedenti. La novità è rappresentata dal possibile trascinarsi di una porzione cuneiforme del muro sollecitato dall'azione complanare, oltre che dalla parete stessa.

3.5.2 ANALISI DEI MECCANISMI LOCALI

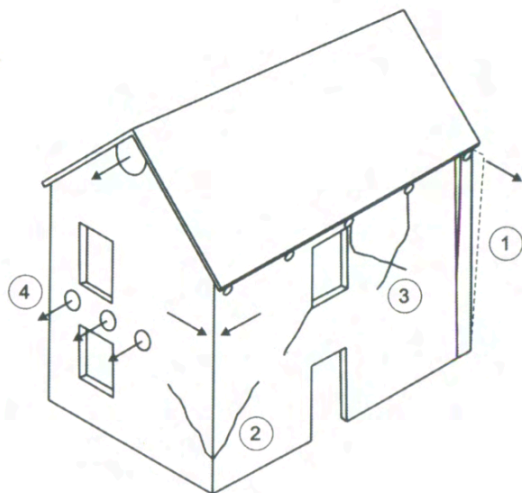


Figura 3.8: Dissesti localizzati [da: G. Menditto; Fessurazioni nelle strutture, Dario Flaccovio Editore]

I principali dissesti localizzati possono essere sintetizzati nella **Fig. 3.8** e sono:

- Distacchi e disgregazioni dovuti ad una scarsa qualità muraria
- Sconnessione tra pannelli murari ortogonali e fuori-piombo della parete (1)
- Lesioni nei cantonali d'angolo dovuto all'azione concentrata di forze ortogonali fra loro (2)
- Scorrimento dei muri d'ambito sulle fondazioni e cedimenti differenziali del terreno
- Rottura a taglio della muratura con associate lesioni diagonali ad X, sia nei maschi murari sia nelle fasce di piano (3)
- Espulsione localizzata della muratura a seguito dell'azione spingente su di essa esercitata (4)
- Sfilamento delle strutture di solaio da quelle verticali in assenza di elementi di contenimento
- Scorrimento e punzonamento dei puntoni del solaio di copertura

In generale, lo studio delle tipologie di dissesto e il grado di vulnerabilità sismica possono essere valutati in maniera semplificata tramite l'analisi di specifiche parti dell'organismo edilizio che ci consentono di suddividere la struttura in base alla propensione al dissesto delle sue singole parti. Esse sono:

- I corpi d'angolo, sensibili all'azione sismica secondo direzioni variabili;

- Pareti di facciata, sensibili all'azione sismica agente in maniera ortogonale al piano;
- Nucleo interno ottenuto per sottrazione delle parti precedenti, predisposto ad assorbire le azioni di taglio.

3.5.3 ANALISI GLOBALE

L'analisi del comportamento globale negli edifici in muratura portante richiede che l'edificio sia in grado esplicitare un comportamento scatolare. Il funzionamento unitario della scatola muraria è influenzato dalla presenza (o assenza) di tre principali fattori:

- Rigidezza dei solai nel proprio piano
- Collegamenti strutturali tra i solai e le pareti murarie
- Ammorsamento fra le pareti

Per quanto riguarda la rigidezza degli orizzontamenti nel proprio piano è possibile riscontrare tre casi: solai infinitamente rigidi, con rigidezza finita e rigidezza trascurabile. La situazione favorevole al comportamento scatolare ricade nei primi due casi, benché il primo sia unicamente destinato ai solai latero-cementizi. Un orizzontamento con buona rigidezza, se collegato efficacemente alla muratura è in grado di ripartire l'azione sismica tra le pareti in base alla resistenza, rigidezza e posizione in pianta dei setti stessi.

In questo modo non avremo spostamenti relativi tra gli elementi strutturali, evitando così che singole porzioni murarie possano ribaltarsi esternamente.

Nella categoria di solaio avente rigidezza trascurabile possono rientrare i solai in legno con tavolato ligneo e privi di soletta collaborante, riscontrati ed elaborati nel capitolo 5 di questa tesi.

Altro fattore essenziale è il collegamento strutturale fra solai e pareti. Se

l'orizzontamento è collegato a solo due lati paralleli della muratura, in presenza di azione sismica vi sarà la presenza di collasso per ribaltamento fuori dal piano della parete ortogonale all'azione sismica. Se invece, il solaio viene opportunamente collegato a tutti e quattro i lati della muratura, qualunque sia la direzione dell'azione sismica, saranno prevalentemente sollecitati le pareti parallele all'azione.

Altro aspetto da tenere in considerazione al fine di ottenere un efficace comportamento scatolare è l'ammorsamento fra le pareti. Un buon ammortamento si ottiene tramite la sfalsatura degli elementi lapidei in maniera alternata e ortogonale fra loro negli spigoli d'angolo. Questa tecnica consente alle pareti ortogonali fra loro di gestire sollecitazioni a taglio in maniera più efficace evitando il ribaltamento dei paramenti.

Allo scopo di fornire una visione più vicina alla realtà, si prende in esame una cellula

isolata di forma rettangolare articolata su un solo piano, priva di aperture e chiusa nella sua porzione superiore da soffitto ligneo. In presenza di un'azione sismica applicata in direzione parallela all'orditura delle travi principali, le pareti prive di controventamento tendono a comportarsi tramite meccanismo di primo modo ma con rilevanti alterazioni. Questo mutamento è dovuto a eventuali connessioni con i muri di controvento, alle spinte trasmesse dal solaio alla parete sottovento e dalla possibile perdita di vincolo dovuta allo sfilamento delle travi dalla loro sede. L'eventuale distacco della parete di facciata si può manifestare secondo differenti modalità di collasso. Tra queste, la più critica è rappresentata dalla completa sconnessione dei cantonali di facciata e i muri di contrasto per taglio o trazione. Il collasso si verifica per superamento della resistenza minima opposta dal meccanismo di rottura a taglio e di quello di trazione.

In questo contesto è determinante l'influenza del solaio in legno sull'evoluzione del meccanismo di collasso. L'eventuale insufficienza di connessioni tra le travi e i muri portanti comporta un funzionamento assimilabile a quello di vincoli monolaterali appoggio-appoggio. Di conseguenza, in caso di azione sismica si può osservare, da un lato, lo sfilamento delle travi e, dall'altro, il punzonamento delle stesse sulla parete. L'inefficace connessione tra travi e pareti determina quindi un incremento della forza

sismica sommitale, lavorando a sfavore di sicurezza. Soluzione efficace diventa l'ancoraggio della testata delle travi alla muratura tramite ancoraggi metallici in modo che possano funzionare da tirante-puntone. In queste condizioni i muri portanti sono obbligati a seguire oscillazioni sincrone, risultando in un reciproco smorzamento delle oscillazioni e conseguente riduzione della vulnerabilità sismica.

3.6 ANALISI DELLE PRESTAZIONI ENERGETICHE

3.6.1 CHIUSURE OPACHE VERTICALI

Dal punto di vista delle prestazioni energetiche, una parete di un elevato spessore murario (dai 50 agli 80cm), composta da una tessitura più o meno ordinata di pietre grezze di grosse dimensioni, garantisce un'ottima inerzia termica a fronte però di un coefficiente medio di conducibilità termica molto basso (1,30 - 1,75 W/mK).

Per inerzia termica si fa riferimento alla capacità del materiale di smorzare e ritardare l'onda termica incidente sull'involucro

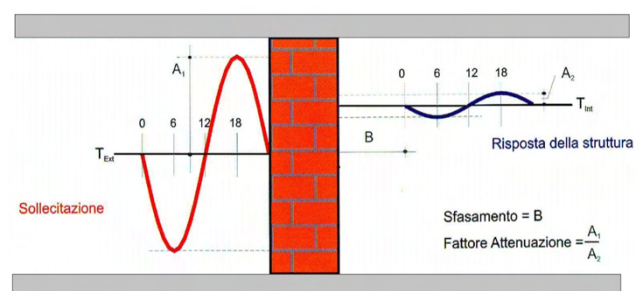


Figura 3.9: Schematizzazione di smorzamento e sfasamento di un'onda termica su parete piana in muratura

edilizio. Essa agisce quindi in termini di smorzamento o riduzione dell'ampiezza dell'onda termica in entrata e in termini di sfasamento della stessa, inteso come ritardo di tempo intercorrente tra l'impatto dell'onda sulla superficie esterna e l'uscita della stessa sulla superficie interna (**Fig.3.9**). Il grado di inerzia termica che un materiale può fornire dipende da tre parametri: spessore del materiale [m], capacità termica del materiale [J/K] e conduttività termica del materiale [W/mK].

Gli effetti positivi di un'elevata inerzia termica sulle strutture murarie garantiscono uno sfalsamento termico di oltre 20 minuti per cm⁵ e una riduzione del valore di temperatura tra esterno e interno.

Quando si guarda all'isolamento termico di una struttura è immediato il riferimento al coefficiente di conduzione termica del materiale stesso. In normativa esso viene tradotto in valori di trasmittanza (UNI 6946 e UNI 10351) (U) [W/m²K], direttamente proporzionale alla conducibilità termica, allo spessore della muratura, al numero di strati dei materiali presenti. La trasmittanza termica si definisce come il flusso di calore che attraversa la superficie unitaria sottoposta a differenza di temperatura di 1°C. La trasmittanza termica nella sua forma estesa

esplicita tutti i fenomeni di cui si compone tramite le resistenze termiche, ovvero:

$$U = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_{si} + \frac{S_i}{\lambda_i} + \frac{S_n}{\lambda_n} + R_n + R_a + R_{se}}$$

In cui:

- R_{si}: resistenza liminare della superficie interna della struttura, [m² K/W];
- S/λ: resistenza termica di uno o più strati di materiale omogeneo, [m² K/W];
- R_n=1/C: resistenza termica di strati di materiale non omogeneo, [m² K/W];
- R_a: resistenza termica di eventuali intercapedini, [m² K/W];
- R_{se}: resistenza liminare della superficie esterna della struttura, [m² K/W];
- λ: conduttività termica dei materiali, [W/mK];
- S_i: spessore strato i-esimo della parete, [m].

La rilevazione della trasmittanza può essere effettuata per via strumentale tramite centraline per acquisizione di dati, termoflussimetri, per via analitica o tramite utilizzo di software per l'analisi dei dati. La normativa UNI 10351 aggiornata al 14 novembre 2021 rielabora i valori di riferimento per conduttività termica, resistenza al passaggio del vapore e calore specifico dei materiali da costruzione in base all'epoca di installazione, nonché i valori di riferimento della trasmittanza termica a

⁵ Massimo Capolla, Indicazioni e Idee per progettare la casa a consumo zero, Maggioli, 2011.

seconda della tipologia di muratura di riferimento e il relativo spessore murario.

Esaminando in maniera più approfondita il caso preso in esame in questa tesi, è necessario considerare un pannello murario di spessore 60cm realizzato tramite accostamento di due paramenti in pietra arenaria sbozzata, legati insieme da uno strato sottile di malta in calce e sabbia. La trasmittanza del muro così analizzato risulta:

$$U = \frac{1}{R_{tot}} = 1,5 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

Tale valore non rispetta l'appendice A del Decreto interministeriale del 26 giugno 2015⁶ in vigore da gennaio 2021 dove DL 199/2021, in cui vengono forniti i valori massimi di trasmittanza accettabili a seconda della chiusura presa in considerazione e alla zona climatica in cui bisogna operare (**Tab. 3.10**). In questo caso il valore di riferimento per la trasmittanza di una struttura verticale opaca in zona climatica F è di 0,26 W/m²K; quindi, il valore ottenuto eccede la soglia limite di 5,76 volte.

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2021 ⁽²⁾
A e B	0,45	0,40
C	0,40	0,36
D	0,36	0,32
E	0,30	0,28
F	0,28	0,26

Tabella 3.10: Trasmittanza termica (U) massima delle strutture opache verticali verso l'esterno, soggette a riqualificazione

⁶ Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - Applicazione delle metodologie di calcolo delle

Altro aspetto da tenere in considerazione per un corretto comfort termoigrometrico sono i flussi di vapore acqueo che hanno luogo nello spessore murario. Tale fenomeno dipende dalle caratteristiche di permeabilità dei materiali e dalla differenza di pressione del vapore d'acqua tra interno ed esterno dell'edificio.

Le conseguenze di questo meccanismo sono molteplici: dal disagio percepito a livello fisico dagli utenti, alla possibile formazione di condensa interstiziale con conseguente riduzione del grado di isolamento dell'involucro, fino al deterioramento del materiale stesso portato da agenti chimici contenuti nell'acqua.

Il DM 26/06/2015 riporta all'allegato 1 art. 2.3 comma 2 le indicazioni da seguire per scongiurare la formazione di muffe e di condensa superficiale in conformità con la norma UNI EN ISO 13788 (e UNI 15026 per i metodi di verifica dinamici) ovvero la normativa relativa alle "Prestazioni idrotermiche dei componenti degli elementi per edilizia- Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e condensazione interstiziale" (e UNI 15026 per i metodi di verifica dinamici). Un grande aiuto viene fornito dal diagramma di Glaser, in cui viene riportato l'andamento delle temperature, delle pressioni parziali e delle pressioni sature del vapore d'acqua e permette

prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici

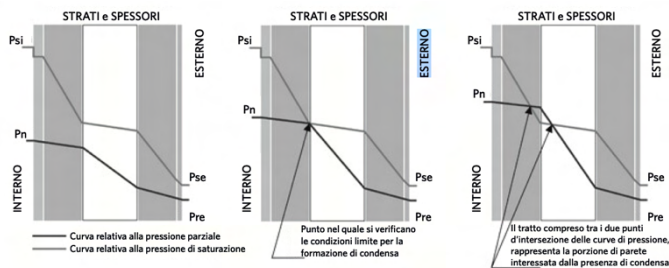


Figura 3.11: Diagramma di Glaser: confronto tra curva delle pressioni parziali (Pr) e curva delle pressioni di saturazione (Pn) con relativa condizione di condensa

di verificare direttamente la presenza di condensa o meno nello spessore murario (**Fig. 3.11**). Se la linea delle pressioni parziali rimane sempre al di sotto della linea delle pressioni sature è verificato che non si avranno fenomeni di condensa.

3.6.2 CHIUSURE OPACHE ORIZZONTALI

Le strutture opache di fondazione e copertura, insieme a quelle verticali, rivestono un ruolo primario per gli interventi di riqualificazione energetica in quanto costituiscono l'involucro di separazione tra esterno e interno della struttura e per questo motivo sono quelle soggette a maggiori fenomeni di dispersioni termica.

Per quanto concerne il solaio contro-terra, lo stato di fatto considerato in questa tesi prende in causa un pacchetto di separazione tra ambiente e terreno determinato da un vespaio costituito da ghiaia a granulometria variabile. Tale configurazione rende necessario un ulteriore approfondimento rispetto alle altre chiusure opache, poiché lo scambio termico avviene non più con l'aria, bensì col terreno.

Questa modalità di scambio viene influenzata dal perimetro e superficie esposta a contatto col terreno, la conducibilità termica del terreno (**Tab. 3.12**) e lo spessore della struttura costituente il nodo. Per tale motivo si ricorre alla norma UNI EN ISO 10211/2018, e la UNI EN ISO 13370/2018 "Prestazione termica degli edifici - Trasferimento di calore attraverso il terreno - Metodi di calcolo". Tramite questa norma è possibile ricavare il valore della trasmittanza termica equivalente dei componenti in aderenza con il terreno.

In conformità con la normativa si vuole valutare la trasmittanza termica in base alla dimensione caratteristica del pavimento B' e dello spessore equivalente totale del pavimento dt definiti come:

$$B' = \frac{A}{0,5 * P}$$

In cui:

- A = area totale del pavimento contro il terreno
- P = perimetro della superficie totale a contatto col terreno

Mentre dt:

$$dt = w + \lambda * (R_{si} + R_f + R_{se})$$

In cui:

- w = spessore totale delle pareti
- λ = conducibilità termica terreno
- Rf = resistenza termica totale del pacchetto del solaio contro terra.

Descrizione	Conduttività termica - λ_e [W/(m·K)]	Capacità termica volumetrica - $\rho \cdot c$ [J/(m³·K)]
Argilla o limo	1,5	$3,6 \cdot 10^6$
Sabbia o ghiaia	2	$2,0 \cdot 10^6$
Roccia omogenea	3,5	$2,0 \cdot 10^6$

Tabella 3.12: Valori di riferimento per conduttività termica nelle tre categorie di terreno [UNI EN ISO 9646/2018]

Per quanto riguarda le proprietà termiche del terreno è possibile fare riferimento alla **Tab.**

3.13 in cui vengono forniti i valori di conduttività termica in riferimento alla categoria di terreno (useremo il caso in categoria due).

Per calcolare poi la trasmittanza termica di base U_0 , nel caso di pavimenti non isolati (quando $0 < b_f < B'$):

$$U = U_0 = \frac{2\lambda}{\pi * B' + dt} * \ln \left(\frac{\pi * B'}{dt} + 1 \right)$$

Considerando una abitazione di 100m² otterremo una trasmittanza di 0,6 [W/m²K]. Come riportato dalla **Tab 3.8** del DL 199/2021 il valore soglia di trasmittanza da rispettare si attesta a 0,28 [W/m²K]. Il solaio contro-terra considerato in questa analisi supera dunque di 2,14 volte il valore massimo consentito.

Per quanto concerne le strutture opache di chiusura orizzontale o inclinata di copertura, esse vengono realizzate tramite sovrapposizione di orditura primaria ad interasse di 1-1,5m, orditura secondaria in *molari* di sezione 8-10cm e interasse di 50-80cm, tavolato ligneo e coppi o piagne di copertura. Lo stato di fatto non considera alcuna soluzione di regolazione dello scambio

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2021 ⁽²⁾
A e B	0,48	0,42
C	0,42	0,38
D	0,36	0,32
E	0,31	0,29
F	0,30	0,28

Tabella 3.13: Trasmittanza termica U massima delle strutture opache orizzontali di pavimento, verso l'esterno e soggette a riqualificazione

termico come potrebbero essere una buona coibentazione o intercapedini di ventilazione dell'aria.

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2021 ⁽²⁾
A e B	0,34	0,32
C	0,34	0,32
D	0,28	0,26
E	0,26	0,24
F	0,24	0,22

Tabella 3.14: Trasmittanza termica U massima delle strutture opache orizzontali di copertura, verso l'esterno e soggette a riqualificazione

La valutazione della trasmittanza termica dello stato di fatto ha attestato tale valore a 2,5 [W/m²K] superando il valore limite fornito in **Tab. 3.14** di circa 11,36 volte.

3.6.3 CHIUSURE TRASPARENTI

Per descrivere le prestazioni termiche di un infisso vetrato, è necessario calcolare la trasmittanza termica globale come media pesata tra la trasmittanza termica della vetrata, quella del telaio e un contributo aggiuntivo Ψ_g dovuto alla presenza del distanziatore tra le due componenti. La formula di riferimento

per il calcolo della trasmittanza globale U_w , contenuta nella norma la UNI EN ISO 10077-1 è:

$$U_w = \frac{A_g * U_g + A_t * U_t + l_g * \Psi_g}{A_w}$$

In cui:

- U_w = Trasmittanza termica del serramento [W/m²K];
- A_w = Area del serramento [m²];
- A_g = Area del vetro [m²];
- U_g = Trasmittanza termica del vetro [W/m²K];
- A_t = Area del serramento (telaio) [m²];
- U_t = Trasmittanza termica del telaio [W/m²K];
- l_g = il perimetro del vetro [m];
- Ψ_g = Trasmittanza termica lineare del distanziatore [W/mK]

Le chiusure trasparenti rappresentano, dal punto di vista energetico uno dei punti dell'involucro edilizio più esposto ai fenomeni di dissipazione termica. Le aperture vetrate, in virtù del loro spessore ridotto e delle caratteristiche dei materiali di cui sono composte, quali legno e vetro, presentano dei valori di trasmittanza molto alti. La problematica delle parti vetrate risiede in questo aspetto, ovvero nel conciliare requisiti energetici, meccanici, di benessere visivo e uditivo.

La normativa del DL 199/2021 ripone

importanza anche nell'efficientamento energetico degli infissi, evidenziando valori limite di trasmittanza (**Tab. 3.15**) che, seppur altri rispetto alle altre parti dell'involucro, consentono di ridurre in maniera significativa le dispersioni termiche.

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2021 ⁽²⁾
A e B	3,20	3,00
C	2,40	2,00
D	2,10	1,80
E	1,90	1,40
F	1,70	1,00

Tabella 3.15: trasmittanza termica U massima delle chiusure tecniche trasparenti e dei cassonetti, comprensivi degli infissi, verso l'esterno e verso ambienti non climatizzati

4. CRITERI DI INTERVENTO PER LA RIQUALIFICAZIONE DEL PATRIMONIO ESISTENTE

4.1 QUADRO NORMATIVO VIGENTE PER GLI INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO STRUTTURALE

I principi, le metodologie e le prestazioni richieste in ambito di consolidamento strutturale sono racchiusi in un insieme articolato di normative di livello europeo, nazionale e regionale. Il quadro normativo europeo definisce le linee guida in ambito di sicurezza e progettazione strutturale. Tali norme vengono recepite all'interno dell'ordinamento italiano tramite le NTC 2018 e declinate ulteriormente a livello regionale in strumenti attuativi e regolamenti specifici.

Gli eurocodici (EC) sono le normative europee di riferimento per la progettazione nel settore dell'ingegneria civile e delle costruzioni. Tali norme introducono concetti chiave di primaria importanza per la progettazione e l'analisi strutturale, motivo per cui ogni stato europeo deve recepirle e integrarle all'interno della normativa nazionale.

Le singole normative vengono per l'appunto raggruppate in diversi Eurocodici, dallo zero al nove, che seppur classificati in modo differente, risultano interdipendenti da loro. Gli Eurocodici dal due al sei presentano la stessa articolazione; è infatti possibile

individuare un primo documento riportante le regole di progettazione per gli edifici, comprendendo quelle specifiche del materiale considerato e quelle relative alla resistenza al fuoco. Un secondo documento che riguarda generalmente la progettazione dei ponti ed eventualmente altre parti su temi progettuali specifici.

Per quello che concerne questa tesi, gli Eurocodici principali sono:

- Eurocodice 0 (EN 1990) “Criteri generali di progettazione strutturale”;
- Eurocodice 1 (EN 1991) “Azioni sulle strutture”;
- Eurocodice 6 (EN 1996) “Progettazione delle strutture in muratura”;
- Eurocodice 7 (EN 1997) “Progettazione geotecnica”;
- Eurocodice 8 (EN 1998) “Progettazione delle strutture per la resistenza sismica”;

Le “Norme Tecniche per le Costruzioni”, decreto pubblicato il 17 gennaio 2018 dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, si configura come testo di riferimento per la progettazione nel settore delle costruzioni in Italia. La normativa disciplina i principi a cui attenersi durante la fase di progettazione, di costruzione e di collaudo, definendo le prestazioni che gli edifici devono raggiungere in termini di resistenza meccanica e stabilità.

Il sistema normativo si compone di tre articoli più un allegato contenente 12 capitoli, di cui quelli che concernono questa tesi:

- 1. Oggetto;
- 2. Sicurezza e prestazioni attese;
- 3. Azioni sulle costruzioni;
- 6. Progettazione geotecnica;
- 7. Progettazione per azioni sismiche;
- 8. Costruzioni esistenti;
- 9. Collaudo statico;
- 10. Redazione dei progetti strutturali esecutivi e delle relazioni di calcolo;
- 11. Materiali e prodotti ad uso strutturale;

Rispetto alle NTC 2008, la normativa attuale introduce una serie di aggiornamenti fondamentali in materia di progettazione strutturale. Primo fra tutti è il superamento dell'approccio tramite tensioni ammissibili, sostituito con il metodo semiprobabilistico degli stati limite. Tale tipologia di analisi considera diversi fattori aleatori al fine di fornire una serie di coefficienti di sicurezza sia per le azioni sia per le resistenze. Altre modifiche sostanziali sono le semplificazioni per gli interventi di adeguamento sismico, che vedremo in seguito, l'introduzione di nuovi materiali strutturali come i calcestruzzi fibrorinforzati e nuovi parametri per il calcolo strutturale in relazione agli edifici in muratura.

Ad illustrare con maggiore dettaglio i passaggi normativi è la circolare applicativa n7 del 2019 "Aggiornamento delle Norme

Tecniche per le Costruzioni" in cui vengono forniti opportuni chiarimenti, informazioni ed indicazioni al fine di agevolare l'utilizzo degli strumenti descritti dalla normativa del 2018.

Restringendo il campo di applicazione a suddetta tesi, la normativa italiana stabilisce i criteri generali per la valutazione della sicurezza e per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo degli interventi sulle costruzioni esistenti. La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi devono tenere conto di diversi fattori, relativi allo stato di fatto del manufatto. È infatti necessario verificare se la struttura presenta degrado e/o modifiche significative rispetto alla costruzione originaria, se in essa sono insiti dei difetti di realizzazione o ancora se essa può essere stata soggetta ad azioni eccezionali i cui effetti non risultano pienamente visibili e identificabili. Sarà dunque fondamentale il livello di approfondimento della struttura, il quale dipenderà sia dalla documentazione disponibile, sia dalla qualità ed estensione delle indagini svolte.

Dopo le analisi conoscitive viene effettuata la verifica sulla sicurezza, ovvero un procedimento quantitativo, volto a determinare l'entità delle azioni cui la struttura è in grado di sostenere. Il resoconto di tale verifica deve permettere di stabilire se la struttura in questione possa mantenere la propria destinazione d'uso senza necessità di interventi o se sia indispensabile il declassamento d'uso o ancora, se sia

necessario aumentare la sicurezza strutturale, mediante interventi. Secondo la normativa vigente la valutazione della sicurezza si rende necessaria anche solo in una delle seguenti situazioni:

- Si accertano gravi errori di progetto o di costruzione;
- Si riscontra una riduzione della capacità resistente e/o deformativa implicabile a degrado, decadimento delle caratteristiche meccaniche del materiale, eccessive deformazioni, azioni ambientali ed eccezionali;
- Si rende necessario un cambio di destinazione d'uso, dunque i valori di riferimento per i carichi permanenti varieranno;
- Si registrano opere realizzate in assenza o difformità dal titolo abilitativo;
- Si vogliono eseguire degli interventi non strutturali che però implicano direttamente la componente strutturale;

Se si riscontrano questi casi in una porzione localizzata della struttura, la valutazione sulla sicurezza potrà essere effettuata sugli elementi interessati, tenendo in considerazione la loro funzione nel complesso strutturale.

Una volta eseguita tale valutazione è richiesta l'identificazione del tipo di intervento che si vuole eseguire.

4.1.1 CLASSIFICAZIONE DEGLI INTERVENTI

Le NTC 2018 riprendono le tipologie di intervento già precedentemente indicate nella normativa del 2008 modificandone parzialmente i contenuti. Si parla di *interventi locali o di riparazione, interventi di miglioramento e interventi di adeguamento*.

Gli *interventi di riparazione* sono tutti quegli interventi che non alterano in modo significativo il comportamento globale della struttura. Al fine di rientrare in questa categoria è infatti necessario dimostrare che l'insieme degli interventi pianificati non comporti variazioni significative di rigidezza, resistenza nei confronti delle azioni sismiche e capacità di deformazione della struttura. Come evidenzia il nome, spesso si tratta di casi in cui vi sia stato un danneggiamento di una porzione precisa della struttura per cui si ritiene necessario ripristinare l'efficienza strutturale di tale elemento.

In questa categoria rientrano anche gli interventi di sostituzione o rinforzo degli elementi strutturali che si ritiene non svolgano più la loro funzione. Nello specifico si può parlare di sostituzione di travi, architravi, pannelli murari o porzioni di impalcato. La normativa fa riferimento anche alla sostituzione o miglioramento delle connessioni tra gli elementi esistenti, come ad esempio tra pareti e travi o solai.

Per questa categoria, la relazione illustrativa contenente tutti gli interventi pianificati non

necessita di valutazione della sicurezza globale dell'opera, bensì solo dell'area interessata, mentre se l'intervento riguarda il miglioramento di determinati elementi, è richiesta la valutazione della variazione di sicurezza locale.

Gli interventi di miglioramento sono invece volti al potenziamento delle prestazioni globali della struttura. Rientrano in questa categoria tutti gli interventi che pur non appartenendo all'ambito di adeguamento strutturale, modificano in modo sostanziale il comportamento globale o locale della struttura, operando tramite variazione della rigidità, resistenza o capacità deformativa. Gli interventi possono riguardare la sostituzione, il miglioramento e l'introduzione di nuovi elementi strutturali, impiegando ad esempio componenti maggiormente resistenti ed eliminando i meccanismi locali di collasso. Per questa categoria, la normativa richiede la valutazione sulla sicurezza sia in termini globali sia in termini locali.

Gli interventi di adeguamento hanno invece l'obiettivo di portare la struttura dal suo stato di fatto ad un livello di sicurezza equiparabile a quello degli edifici di nuova costruzione definiti nel § 8.4.3 delle NTC. Tali interventi si rendono obbligatori nei seguenti casi:

- Ampliamento della costruzione mediante opere ad essa collegata, tali da alterarne la risposta globale;

- Sopraelevazione della costruzione, esclusi i casi in cui si voglia realizzare un cordolo sommitale o si voglia modificare la copertura a patto di non aumentare la superficie abitabile;
- Esecuzione di interventi volti a ridefinire il sistema strutturale. Rientrano i casi in cui i nuovi elementi portanti sono soggetti ad almeno il 50% dei carichi gravitazionali complessivi;
- Variazione della destinazione d'uso che comporta un incremento dei carichi globali sulle fondazioni superiore al 10%;

Per gli edifici storici in muratura viene effettuata una precisazione. Viene infatti specificato come il comportamento della struttura sia fortemente influenzato da vicende statiche subite dalla costruzione nel tempo e perciò, la previsione della risposta alle azioni risulta estremamente incerta. Per questo motivo si ritiene conveniente limitare l'alterazione dello stato di fatto a fronte di esiti strutturali incerti, in particolar modo per i primi tre casi sopra elencati.

Anche per questa categoria è richiesta la valutazione sulla sicurezza globale e locale e verifiche dell'intera struttura post-intervento.

4.1.2 LIVELLI DI CONOSCENZA E FATTORI DI CONFIDENZA

I fattori di confidenza (FC) rappresentano coefficienti di sicurezza utilizzati per ridurre i valori dei parametri meccanici dei materiali. Tali valori vengono associati a tre livelli di conoscenza (LC) che esprimono il grado di approfondimento delle indagini condotte sulla struttura in esame. Più è elevato il grado di conoscenza della struttura, minore sarà il valore del fattore di confidenza da utilizzare, riflettendo una maggiore certezza nella previsione del comportamento strutturale. In particolare:

- LC1: si considera raggiunto il livello attraverso l'analisi storico-critica, il rilievo geometrico completo e *indagini limitate*¹ sia sui dettagli costruttivi sia sulle caratteristiche meccaniche dei materiali. Fattore di confidenza associato $FC = 1,35$;
- LC2: si considera raggiunto il livello attraverso l'analisi storico-critica, il rilievo geometrico completo e *indagini estese*² sia sui dettagli costruttivi sia sulle caratteristiche meccaniche dei materiali. Fattore di confidenza associato $FC = 1,2$;

¹ Indagini limitate: sono focalizzate su analisi visive degli elementi costruttivi di cui almeno tre facce e una testata dell'orditura primaria e secondaria, e una valutazione limitata delle nodalità strutturali.

² Indagini estese: sono incentrate su analisi visive degli elementi costruttivi e alcuni controlli strumentali per la valutazione dello stato di conservazione dei materiali e della struttura.

- LC3: si considera raggiunto il livello attraverso l'analisi storico-critica, il rilievo geometrico completo e *indagini esaustive*³ sia sui dettagli costruttivi sia sulle caratteristiche meccaniche dei materiali. Fattore di confidenza associato $FC = 1$.

Entrando nel merito delle costruzioni in muratura è possibile declinare tali parametri sulle diverse tipologie di murature indicate in tabella C8.5. II.

In questo caso, per ogni livello di conoscenza:

- LC1: viene utilizzato il valore minimo per le resistenze e i valori medi del modulo elastico fra gli intervalli riportati in tabella C8.5.I.
- LC2: viene utilizzato il valore medio sia per le resistenze sia per i valori del modulo elastico fra gli intervalli riportati in tabella C8.5.I.
- LC3: con il massimo livello di conoscenza è possibile effettuare una valutazione delle resistenze e del modulo elastico dei materiali in modo più accurato attraverso le n prove eseguite in sito. La valutazione del

³ Indagini esaustive: sono articolate con analisi visive diffuse e sistematiche affiancate da valutazioni strumentali. Sono necessarie le prove relative alla misura di umidità nel materiale, con valutazione dei fenomeni di degrado ad essa associati. Sono indicate tecniche non distruttive o parzialmente invasive per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del materiale

Metodo di prova	Parametro	κ
Prova di compressione diretta (su una porzione di parete muraria)	E	1,5
	f	1
Martinetto piatto doppio	E	1,5
	f (*)	2 (*)
Prova di compressione e taglio (su un pannello isolato nella parete muraria) – prova tipo Sheppard	G	1,5
	$\tau_0 - f_{v0}$	1
Prova di compressione diagonale	G	1,5
	τ_0	1
Prova di taglio diretto sul giunto	f_{v0}	2
Prove in laboratorio sui costituenti (**)	f_b, f_m, f_g	2

Tabella 4: Valori del coefficiente K per il calcolo del valore medio dei parametri meccanici del materiale

coefficiente medio viene utilizzata la formula:

$$\mu'' = \frac{n * X + K * \mu'}{n + K}$$

In cui:

- n = numero prove eseguite;
- X = media delle n prove;
- K = peso relativo della distribuzione a-priori rispetto alle prove. Il suo valore viene fornito in **Tab 4** in relazione alle prove sperimentali dirette più utilizzate;
- $\mu' = \frac{1}{2}(X_{min} + X_{max})$ con X parametro in **Tab. 4**.

4.1.3 EDIFICI IN AGGREGATO

Di fondamentale importanza nel contesto di analisi del comportamento strutturale dei tipi storici, è lo studio degli edifici in aggregato, intesi come insieme di più unità strutturali (US). È noto, infatti, che le forme di aggregazione che si vanno a realizzare su una precedente costruzione, determinano una rilevante modifica del comportamento

strutturale del fabbricato nel suo complesso.

Aggiungere e interconnettere una nuova massa ad un volume preesistente comporta lo spostamento del baricentro delle masse e del baricentro delle rigidezze in funzione dei materiali e delle caratteristiche strutturali adottate. Qualora si venga a determinare una certa eccentricità tra questi due punti, il verificarsi di un'azione orizzontale, può determinare l'attivazione di cinatismi di torsione, con effetti potenzialmente molto pericolosi.

In conformità con le NTC 2018 e la Circolare Applicativa, si definisce Unità Strutturale come l'insieme di elementi strutturali interconnessi tra loro e caratterizzati da un comportamento strutturale unitario nei confronti dei carichi verticali ed orizzontali.

“L'US dovrà avere continuità da cielo a terra, per quanto riguarda il flusso dei carichi verticali e, di norma, sarà delimitata o da spazi aperti, o da giunti strutturali, o da edifici contigui strutturalmente ma, almeno

tipologicamente, diversi “⁴.

Per tale motivo, oltre alle valutazioni previste per gli edifici isolati, gli edifici in aggregato devono essere verificati anche sotto l’effetto di spinte non contrastate sulle pareti condivise con le unità strutturali adiacenti, determinate da orizzontamenti sfalsati di quota. Altra valutazione necessaria è l’analisi dei possibili meccanismi locali dati da prospetti non allineati verticalmente e/o orizzontalmente. In particolare, il processo di indagine che precede la fase progettuale, prevede diversi livelli di informazioni da raccogliere:

- I rapporti tra unità strutturali in un contesto di aggregazione;
- Fonti sui principali eventi che hanno modificato il tessuto storico;
- Distinzione dei rapporti spaziali, assialità, simmetria delle cellule murarie in relazione alla data di costruzione;
- Allineamento delle pareti, con particolare attenzione ai prospetti esterni;
- Gerarchia e disposizione di scale e cortili;
- Posizione e geometria delle aperture nelle pareti;
- Rastremazione dei setti murari in relazione all’altezza dal suolo.

Consideriamo due casi.

Nel caso in cui gli orizzontamenti dell’unità strutturale risultino deformabili, è possibile procedere tramite l’analisi delle singole parti, ciascuna indipendente e soggetta a carichi verticali ed orizzontali. Se la parte oggetto di verifica risulta in continuità con l’unità strutturale adiacente, sarà necessario considerare un incremento del valore di azione sismica di progetto.

Nel caso i solai siano infinitamente rigidi o fortemente rigidi, la verifica agli stati limite può essere eseguita tramite analisi di ciascun interpiano dell’edificio. Per ogni orizzontamento vengono trascurati i cinematismi torsionali, ipotizzando che possa avvenire solo la loro traslazione.

La normativa fornisce anche le modalità attraverso cui assimilare un gruppo di unità strutturali in un unico edificio semplice. Le caratteristiche che dovrà soddisfare la struttura della fase post-intervento sono:

- Gli orizzontamenti devono svolgere la funzione di diaframma di piano, devono essere ben collegati alla muratura perimetrale e devono evitare il ribaltamento fuori piano dei setti murari;
- Gli architravi devono essere dotati di buona resistenza flessionale;

⁴ Ministero delle infrastrutture e dei trasporti “Aggiornamento delle norme tecniche per le

costruzioni”, Cap8, pg 298. Decreto del 17 gennaio 2018, Roma.

- Per tutti gli elementi spingenti devono essere previsti accorgimenti atti a equilibrare le spinte orizzontali;
- Le pareti ortogonali devono essere ben collegate fra loro;
- Devono essere eliminati gli elementi ad alta vulnerabilità;
- La qualità della muratura deve essere sufficientemente buona da impedire fenomeni disgregativi e da sostenere i carichi a cui sarà soggetta;

4.1.4 CRITERI PER GLI INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO

Dopo la fase di analisi e verifica della struttura nel suo stato di fatto e la scelta della tipologia di intervento da adottare, si passerà alla fase progettuale.

La normativa italiana fornisce i criteri e le soluzioni progettuali possibili in funzione delle carenze prestazionali presentate dalla struttura. Viene sottolineato l'obbligo di giustificare le scelte progettuali, considerando le variazioni di rigidezza a resistenza che si andranno ad instaurare una volta terminato l'intervento.

Nell'elaborato dedicato alla scelta esplicita e motivata delle tecniche di intervento e/o dei materiali utilizzati devono essere valutati e curati i seguenti criteri:

- Riduzione delle carenze prestazionali dovute ad errori nella fase di progettazione o esecuzione;

- Miglioramento dei collegamenti orizzontali tra pareti, tra pareti e solai e tra solai adiacenti;
- Riduzione delle spinte orizzontali date da coperture e volte;
- Rafforzamento delle pareti in corrispondenza di aperture;
- Rafforzamento degli elementi che costituiscono le aperture, quali sistemi voltati o sistemi trilitici;
- Miglioramento della capacità di deformazione duttile dei singoli elementi;
- Riduzione degli elementi di irregolarità planimetrica e altimetrica in termini di rigidezza e massa;
- Riduzione della deformabilità degli orizzontamenti sia nel loro piano che fuori da esso;
- Incremento della resistenza degli elementi verticali, nei confronti dei fenomeni disgregativi, di spancimento e di schiacciamento;
- Miglioramento delle prestazioni della fondazione anche in relazione alla variazione dei carichi dovuti alle opere di intervento;
- Realizzazione di giunti sismici tra unità confinanti.

Tutti questi aspetti concorrono nella determinazione delle migliori soluzioni progettuali per lo specifico caso. Attraverso le analisi condotte a livello preliminare e la scelta della tipologia di intervento, è possibile

condurre un dimensionamento preliminare dei rinforzi e degli elementi strutturali previsti. La normativa fornisce a livello indicativo alcune soluzioni tecniche relative ai criteri sopra citati, come la formazione dei diaframmi di piano e la loro connessione con le pareti perimetrali, l'inserimento di collegamenti nello spessore della parete se in presenza di paramenti multipli, il contenimento delle spinte, e incremento della capacità portante della parete. Vedremo tali tecniche di intervento in maniera più approfondita nel capitolo successivo.

In seguito, viene sintetizzato il modello strutturale dell'edificio post-intervento al fine di determinare il livello di azione sismica per la quale viene raggiunto lo SLU (se richiesto anche SLE).

4.2 QUADRO NORMATIVO VIGENTE PER GLI INTERVENTI DI RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA

4.2.1 NORMATIVA EUROPEA

La riqualificazione energetica del patrimonio esistente costituisce uno dei principali obiettivi fissati dall'Unione Europea all'interno delle sue strategie comunitarie.

Nella "Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato

economico e sociale europeo e al Comitato delle regioni" del giorno 14 ottobre 2020 viene definita una situazione in cui a fronte di un parco immobiliare composto all'85% da costruzioni antecedenti il 2001, il 40% del consumo totale di energia dell'UE e il 36% delle emissioni totali di gas serra sono da imputare all'inefficienza del patrimonio edilizio⁵. Questi dati evidenziano come l'efficientamento energetico rappresenti un ambito d'intervento prioritario al fine di ridurre sprechi termici ed energetici e diminuire le emissioni di gas serra. Il settore edilizio, in particolare, risulta uno dei comparti in cui l'impegno di miglioramento delle prestazioni energetiche risulta necessario e strategico.

In tale contesto il quadro normativo europeo ha delineato un percorso vincolante che ha l'obiettivo di portare i paesi comunitari a una situazione di neutralità climatica entro il 2050. Gli obiettivi e le modalità attraverso cui operare sono definiti dal nuovo Regolamento del Parlamento europeo e del Consiglio (UE) 2021/1119 che istituisce il quadro normativo per il conseguimento della neutralità climatica, modificando il regolamento (CE) n. 401/2009 e il regolamento (UE) 2018/1999. La normativa definisce uno step intermedio, fissando la riduzione delle emissioni di gas serra del 55% entro il 2030, rispetto ai livelli

⁵ Queste cifre includono le emissioni indirette nel settore dell'energia elettrica e termica. Si stima che il carbonio incorporato nelle costruzioni sia responsabile di circa il 10 % delle emissioni annue totali di gas a

effetto serra nel mondo. Resource Efficiency and Climate Change, 2020, e Environment Emissions Gap Report 2019 delle Nazioni Unite.

del 1990. Entro il 2050 l'obiettivo è raggiungere la neutralità climatica ovvero una condizione di equilibrio tra emissioni nette emesse e assorbite.

Coerentemente con tale regolamento e il pacchetto "Fit for 55"⁶ viene emanato il giorno 24 aprile 2024 la Direttiva UE 2024/1275 sulle prestazioni energetiche nell'edilizia. Tale direttiva mira a favorire l'innalzamento delle prestazioni energetiche degli edifici tenendo conto delle condizioni locali, delle prescrizioni relative alla qualità degli ambienti interni, delle condizioni climatiche esterne e dell'efficacia sotto il profilo dei costi. Le disposizioni riguardano principalmente:

- La definizione di un quadro comune per le metodologie di calcolo della prestazione energetica integrata degli edifici;
- L'applicazione di requisiti minimi di prestazione energetica sia per i nuovi edifici sia per gli edifici esistenti sottoposti a ristrutturazioni importanti;
- L'applicazione di requisiti minimi per i sistemi impiantistici dell'edilizia;
- La definizione degli edifici a emissioni zero;
- L'utilizzo di energia solare negli edifici;

- I piani nazionali di ristrutturazione degli edifici;
- Calcolo del potenziale di riscaldamento globale nel corso del ciclo di vita degli edifici;
- La certificazione della prestazione energetica;

I requisiti forniti da tale direttiva rappresentano dei valori minimi da utilizzare, dando la possibilità a ogni paese comunitario di adottare provvedimenti più rigorosi, necessariamente da aggiornare ogni cinque anni.

A livello Europeo, la Direttiva 2024/1275 si inserisce nel percorso avviato dalla direttiva 2010/31 EPBD con il relativo aggiornamento numero 844 del 2018 in cui venne introdotto per la prima volta il concetto di edificio a energia quasi zero (nZEB) e il principio di riqualificazione energetica.

4.2.2 NORMATIVA ITALIANA

Il quadro normativo italiano segue le linee guida e le indicazioni date dall'Unione Europea declinandoli sul proprio contesto territoriale. Il recepimento della Direttiva UE 2024/1275 viene ricondotto al Decreto "Requisiti minimi" 2015 congiuntamente all'aggiornamento delle norme tecniche UNI 10351/2021 e correlate con previsione di

⁶ È un pacchetto legislativo dell'Unione Europea presentato nel 2021. Si tratta di uno dei pilastri principali del Green Deal Europeo e contiene al suo interno molte iniziative legislative, tra cui Riforma EU

ETS (Emission Trading System), CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism), Direttiva energie rinnovabili (RED III).

aggiornamento tramite Decreto ministeriale, discusso dalla Conferenza unificata il 30 luglio 2025. Il “Requisiti minimi” 2015 fissa i nuovi standard da rispettare in caso di ristrutturazione degli edifici esistenti e costruzione di quelli nuovi. Le principali novità introdotte riguardano:

- Modifica dei valori massimi di trasmittanza termica nei casi di ristrutturazione importante di secondo livello e riqualificazione energetica di un involucro. Seguono le norme UNI 10351:2021, UNI EN ISO 6946, UNI EN ISO 10077-1, UNI EN ISO 13370.
- Nuove verifiche sul parametro $H't$, coefficiente globale di scambio termico per trasmissione;
- Allineamento alla normativa UE dei requisiti minimi per il benessere ambientale e sulla sicurezza.

Vengono inoltre definiti i requisiti, le verifiche e le prescrizioni relative alle tipologie di intervento. Tra quelle che possono interessare questa Tesi sono la *ristrutturazione importante di primo livello*, la *ristrutturazione importante di secondo livello* e la *riqualificazione energetica*.

La ristrutturazione importante di primo livello interessa gli elementi e i componenti dell'involucro edilizio delimitanti un volume a temperatura controllata con incidenza superiore al 50% della superficie disperdente lorda complessiva dell'edificio. Di

conseguenza è necessario il rifacimento dell'impianto termico per il servizio di climatizzazione.

La ristrutturazione importante di secondo livello interessa gli elementi e i componenti dell'involucro edilizio delimitanti un volume a temperatura controllata con incidenza superiore al 25% della superficie disperdente lorda complessiva dell'edificio.

Gli *interventi di riqualificazione energetica* sono tutti quegli interventi non riconducibili alle tipologie precedentemente descritte e che interessano il rifacimento della stratigrafia di coperture piane o a falde, opache o trasparenti e pareti verticali esterne. Questo tipo di intervento può riguardare anche la ristrutturazione o sostituzione degli impianti di riscaldamento e/o raffrescamento e di produzione di acqua calda sanitaria. Vengono considerati anche le sole sostituzioni o installazioni del generatore di calore.

Per gli edifici soggetti a tutela storico-architettonica, la normativa nazionale prevede deroghe e modalità di intervento compatibili con la conservazione dei valori culturali, come previsto dal Decreto legislativo 42/2004 (Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio) e dall'art. 3 del D.M. 26/06/2015. Tali edifici costituiscono un caso specifico in cui è necessario conciliare prestazioni energetiche e tutela storico-materica.

Strutture edilizie	Zone climatiche					
	A	B	C	D	E	F
Strutture opache verticali	0,4	0,4	0,36	0,32	0,28	0,26
Strutture opache orizzontali o inclinate di copertura	0,32	0,32	0,32	0,26	0,24	0,22
Strutture opache orizzontali di pavimento	0,42	0,42	0,38	0,32	0,29	0,28
Chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti, comprensivi degli infissi	3	3	2	1,8	1,4	1

Tabella 4.1: Sintesi dei valori limite di trasmittanza termica a seconda della zona climatica [W/m²K]

I decreti in materia di uso dell'energia e di risparmio energetico fanno riferimento alle zone climatiche individuate sul territorio nazionale dal DPR n°412 del 26 agosto 1993. Come precedentemente accennato nel capitolo 1, ogni comune e frazione viene classificato secondo 6 zone climatiche, dalla A alla F, identificate dal parametro "grado-giorno". A seconda della classificazione vengono definiti i requisiti minimi delle prestazioni energetiche. Nell'Appendice B (Allegato 1, Capitolo 4) dei "Requisiti specifici per gli edifici esistenti soggetti a riqualificazione energetica" vengono forniti i parametri caratteristici degli elementi edilizi e impianti tecnici. Per i primi vengono sintetizzati in **Tab. 4.1** i valori limite di riferimento per la trasmittanza termica mentre per i secondi la normativa fornisce le caratteristiche prestazionali per le pompe di calore e macchine frigorifere in termini di coefficienti di prestazione (COP).

4.2.1 NORMATIVA DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA

Il quadro normativo della regione Emilia-Romagna recepisce gli indirizzi dell'Unione Europea e le disposizioni nazionali costituendo la loro fase attuativa, promuovendo sul territorio la riqualificazione del patrimonio immobiliare.

L'Emilia-Romagna con la D.G.R. 967/2015 (modificata dalla D.G.R. 1261/2022) ha prescritto l'obbligo di rispettare i requisiti minimi degli edifici a energia quasi zero dal 2017 per gli edifici pubblici e dal 2019 per tutti gli altri edifici. Le normative regionali, oltre a stabilire i requisiti minimi di prestazione energetica per gli interventi, prevedono anche obblighi in materia di produzione di energia elettrica e termica da fonti rinnovabili.

Questi atti hanno l'obiettivo di garantire un'applicazione coerente e capillare delle politiche energetiche europee, fornendo

indicazioni esecutive sia progettisti sia ai
soggetti certificatori .

5. TECNICHE DI INTERVENTO

Il presente capitolo vuole proporre tecniche di intervento coerenti con i criteri precedentemente individuati al fine di risolvere le criticità statico-costruttive ed energetiche dei manufatti in pietra naturale.

5.1 TECNICHE DI INTERVENTO MIRATE AL CONSOLIDAMENTO STRUTTURALE

5.1.1 MURATURE

Iniezione di miscele consolidanti

L'iniezione di miscele leganti è una tecnica impiegata per trattare murature che hanno subito una perdita di coesione interna e di conseguenza, una riduzione della resistenza meccanica complessiva. Lo scopo dell'intervento è quello di ripristinare la continuità e compattezza del tessuto murario attraverso la colmatura dei vuoti e delle fessurazioni. I vantaggi di questo intervento sono molteplici. La muratura, infatti, incrementa la sua capacità di risposta alle sollecitazioni di compressione e taglio, aumentando la sua rigidità complessiva. Inoltre, questa tecnica ci consente di operare tramite un approccio non distruttivo, riuscendo quindi a preservare le caratteristiche formali e materiali del paramento murario.

D'altro canto, sono presenti numerose criticità. La miscela, se iniettata a pressioni troppo elevate o in maniera discontinua, è possibile che causi una variabilità eccessiva delle caratteristiche meccaniche tra punti diversi della stessa muratura. Altro aspetto da considerare è la reversibilità dell'intervento. Di fatto è quasi sempre irreversibile, in quanto è impossibile ritirare o sciogliere completamente il materiale iniettato.

Sequenza delle operazioni:

- 1) Analisi preliminare del manufatto e verifica della fattibilità dell'intervento in termini di capacità delle murature di assorbire e diffondere le malte iniettate con attenzione alla scelta della pressione di immissione;
- 2) Scelta della miscela con le caratteristiche fisico-chimiche meglio compatibili con la muratura. Le miscele più diffuse sono le malte fluide a base di calce aerea, idraulica o resine epossidiche e acriliche;
- 3) Preparazione della superficie e sigillatura dei giunti;
- 4) Foratura della muratura, con particolare riferimento alla maglia con cui si dispongono i fori. Diametro dei fori 15-25mm e distanza reciproca 20-40cm. Posizionamento degli iniettori;
- 5) Iniezione della miscela in modo progressivo dal basso all'alto della parete, fino al completo riempimento dei vuoti;

- 6) Pulizia finale delle superfici e stagionatura della soluzione;

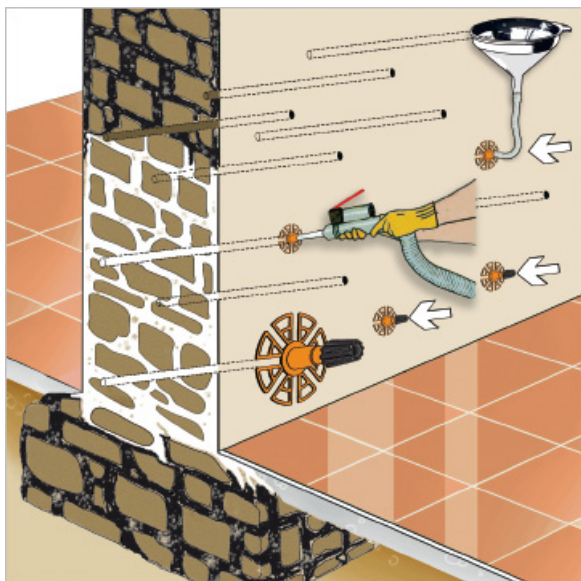


Figura 5: Iniezione di miscela consolidante nello spessore della muratura. Sono evidenziate due modalità di iniezione: a gravità e a pressione controllata

Ristilatura armata dei giunti

Il sistema di ristilatura armata rappresenta una soluzione di rinforzo strutturale per il miglioramento delle prestazioni meccaniche di murature con paramenti multipli scarsamente collegati e in presenza di malte di scadente qualità. In particolare, questo sistema migliora le resistenze a taglio e compressione e contribuisce all'aumento di duttilità della parete.

La ristilatura armata dei giunti è una tecnica che prevede l'utilizzo di trefoli, connettori barre o piattine metalliche posizionati sottofuga e messi in tensione, con l'intento di conferire unità del comportamento strutturale agli elementi lapidei componenti la muratura.

Le soluzioni più diffuse sono due. La prima prevede la ristilatura dei giunti su uno o entrambe i prospetti, mantenendo l'aspetto estetico della muratura (**Fig. 5.1**).

L'alternativa prevede l'impiego congiunto del sistema di ristilatura armata e un intonaco armato con maglie metalliche, in FRP o GFRP (**Fig. 5.2**). Questo permette di avere incrementi maggiori delle resistenze meccaniche, comportando tuttavia la perdita di una delle due facce a vista. Questo sistema consente d'altra parte di sfruttare il prospetto interno intonacato per l'inserimento di pannelli in materiali isolanti in un'ottica di efficientamento energetico dell'involucro edilizio. (Soluzione impiegata in tutte le nodalità strutturali A1-A1.1-B1-B1.1-B1.2-B2-B2.1-B2.2-C1-C1.1-C2-C2.1)

Sequenza delle operazioni:

- 1) Analisi preliminare della muratura e definizione delle malte compatibili;
- 2) Pulizia dei paramenti e rimozione dello strato di malta superficiale per 4-6 cm tramite scalpellini, spazzole o lime. Qualora fosse presente una situazione di degrado, asportare materiale fino a raggiungere uno strato coerente;
- 3) Inserimento di barre metalliche o fibre all'interno dei giunti orizzontali;
- 4) Collegamento trasversale delle maglie mediante elementi di ancoraggio per garantire collaborazione tra i due paramenti;

- 5) Riempimento accurato dei giunti con malta (preferibilmente a base di calce idraulica) con particolare attenzione ad avvolgere completamente la maglia;
- 6) Stagionatura della malta e verifica di eventuali fenomeni di fessurazione;



Figura 5.1: Sistema di ristilatura armata dei giunti su entrambe i prospetti

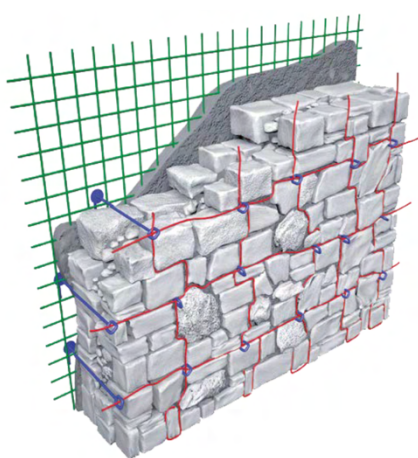


Figura 5.2: Sistema combinato di ristilatura armata e intonaco armato



Figura 5.3: Dettaglio della rondella con trefolo metallico sottofuga

Intonaco armato

Il placcaggio delle murature tramite intonaco armato è una tecnica utilizzata per trattare pareti danneggiate o incoerenti.

Vengono impiegate reti e tessuti in acciaio o materiali compositi come fibra di carbonio o vetro, opportunamente posizionati e ancorati a entrambe le facce della muratura e ricoperti da uno strato di malta.

Questa soluzione comporta l'incremento della rigidità e delle resistenze in termini di taglio e compressione. Sotto il profilo operativo, risulta una tecnica economica e di facile esecuzione, non richiedendo manodopera specializzata.

D'altra parte, questa soluzione non permette il mantenimento della parete a vista e necessita di particolari accortezze. Se inserite maglie in materiale metallico, il lato esposto agli agenti atmosferici sarà maggiormente esposto a fenomeni di corrosione. Inoltre, l'errata esecuzione dell'opera potrebbe creare squilibri nella distribuzione delle sollecitazioni orizzontali dovuti ad un eccessivo spostamento del centro di massa e delle rigidità.

Sequenza delle operazioni:

- 1) Analisi preliminare ed individuazione dei materiali maggiormente compatibili;
- 2) Rimozione dell'eventuale intonaco preesistente e pulizia per spazzolatura;

- 3) Iniezioni di malta in eventuali lesioni o vuoti che rendono irregolare la superficie;
- 4) Realizzazione della maglia dei fori per l'alloggiamento dei connettori trasversali. Devono essere circa quattro per ogni metro quadrato;
- 5) Inserimento delle barre e iniezione di malta;
- 6) Posizionamento delle maglie o dei tessuti e piegamento dei connettori a 90° per connessione alla rete;
- 7) Stesura dell'intonaco per uno spessore che varia da 1 ai 5cm a seconda del materiale utilizzato per la maglia e della superficie della muratura;



Figura 5.4: Maglia metallica su paramento in pietra

Intervento localizzato scuci-cuci

Qualora la qualità e la tipologia di muratura richiedano un intervento di ricostruzione parziale è possibile impiegare la tecnica del scuci-cuci. Tale tecnica viene attuata tramite sostituzione degli elementi danneggiati o degradati e conseguente ricostruzione locale. L'obiettivo di questa soluzione è riportare la continuità strutturale originaria ripristinando le condizioni della materia.

Un intervento localizzato permette di intervenire solo sulle parti danneggiate, perseguendo il principio di minima invasività. È inoltre una tecnica versatile e adattabile a diversi tipi di muratura.

Sequenza delle operazioni:

- 1) Valutazione accurata sulle condizioni della muratura tramite rilevamenti e individuazione dell'area e dell'entità di danno. Valutazione su malte ed elementi lapidei compatibili;
- 2) Scuci: rimozione delle porzioni danneggiate. Si procede con la scarnitura dei giunti e la rimozione dei conci originari. Questa operazione può essere eseguita attraverso uno "strappo semplice" oppure mediante uso di martinetti idraulici per sorreggere la muratura;
- 3) Pulizia e preparazione della superficie per mezzo di spazzole;
- 4) Cuci: inserimento dei nuovi elementi lapidei coerentemente con la tessitura

originaria in modo da ottenere il miglior ammorsamento possibile. Posizionamento dei conci e riempimento delle fughe con malta compatibile;

- 5) Completamento con sigillatura dei giunti fra nuovi elementi e quelli originari;

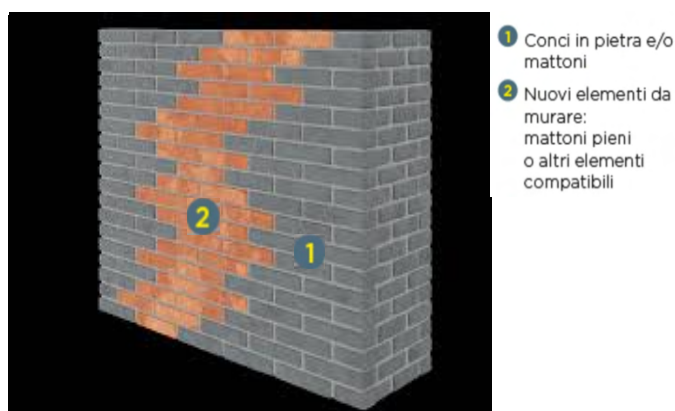


Figura 5.5: Muratura sottoposta a tecnica di scuci-cuci. (differenza cromatica per evidenziare le due porzioni)

5.1.2 SOLAI INTERPIANO E COPERTURE

Gli interventi relativi ai solai interpiano e di copertura riguardano principalmente due tipi di intervento: *la formazione di diaframmi di piano e l'incremento del grado di connessione delle pareti fra loro e con i diaframmi.*

La formazione dei diaframmi di piano risulta di primaria importanza per un comportamento strutturale unitario dell'edificio, specialmente sotto effetto di un'azione sismica. È infatti compito degli orizzontamenti trasferire le sollecitazioni orizzontali alle pareti e scongiurare l'attivazione dei meccanismi fuori piano.

Diaframma in assiti di legno

L'incremento dei valori di rigidezza di un solaio ligneo può essere ottenuto attraverso diaframmi leggeri, realizzati a secco, quali ad esempio quelli ottenuti con doppio assito ligneo incrociato (4-8cm). Sfruttando eventualmente il tavolato esistente, è possibile costituire strutture legno-legno rese opportunamente collaboranti da connettori a taglio. Soluzione ottimale per i solai di copertura.

Diaframma in pannelli multistrato

Soluzione analoga ma più costosa e di maggior complessità è l'impiego di due strati di pannelli multistrato per uso strutturale posizionati all'estradosso del tavolato originario e collegati all'orditura mediante pannello ligneo di chiusura. Il collegamento avviene tramite connettori metallici lineari inseriti all'interno dei distanziatori. Questa tecnica consente l'inserimento della rete impiantistica (elettrica e termo-sanitaria) nello spazio interposto fra i pannelli.

Diaframma in cls a soletta collaborante

La tecnica di rinforzo con soletta collaborante in cls realizza in egual modo un miglioramento della rigidezza del solaio e una miglior resistenza alle azioni verticali. Questa soluzione può essere integrata con altre tecniche per la creazione di collegamenti

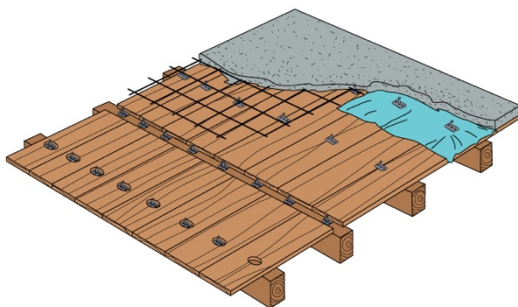


Figura 5.6: Soletta collaborante in cls su orditura lignea esistente

efficaci tra solaio e muratura, come ad esempio il sistema a diatoni artificiali. Svantaggio di tale tecnica rispetto le precedenti è l'aumento dei carichi verticali sull'orditura originaria. (Tavole B1-B1.1-B1.2-B2-B2.1-B2.2)

Le connessioni tra le pareti e gli orizzontamenti hanno lo scopo di aumentare la rigidezza delle pareti rispetto alle sollecitazioni di flessione orizzontale e verticale. Un buon grado di connessione comporta un duplice vantaggio: vengono limitati i cinematismi fuori dal piano a livello degli orizzontamenti, prevenendo lo sfilamento delle travi dalla loro sede e si riducono le aree potenzialmente esposte a fenomeni di danno locale.

Partendo dagli interventi di miglioramento relativo alle connessioni tra le pareti, sarà necessario avviare una analisi conoscitiva per verificare la quantità e la qualità dei collegamenti. In primo luogo, dovrà essere verificato il grado di ammorsamento tra pareti ortogonali. Qualora si ritenga necessario un

intervento, è possibile procedere tramite soluzioni puntuali di *scuci-cuci* o tramite *cuciture armate*. Quest'ultima tecnica prevede l'impiego di barre metalliche di lunghezza limitata e iniezioni di resine o malte. Non sempre risulta efficace in quanto è difficile garantire un adeguato ancoraggio in presenza di un nucleo interno incoerente.

Altra tecnica ampiamente utilizzata, in questo caso per il collegamento di pareti opposte, è l'impiego di *tiranti (o catene)*. Questi elementi, metallici o in altri materiali, disposti secondo le due direzioni principali dell'edificio e posizionati a livello dei solai, conferiscono alla struttura una maggiore coesione e resistenza alle azioni sismiche. In particolare, prevengono fenomeni di ribaltamento delle pareti fuori dal piano e contrastano le spinte orizzontali indotte da particolari sistemi costruttivi come, ad esempio, le coperture ad elementi spingenti. Per adempiere alla sua funzione, una catena deve essere dimensionata in base alla resistenza a trazione richiesta, e alla

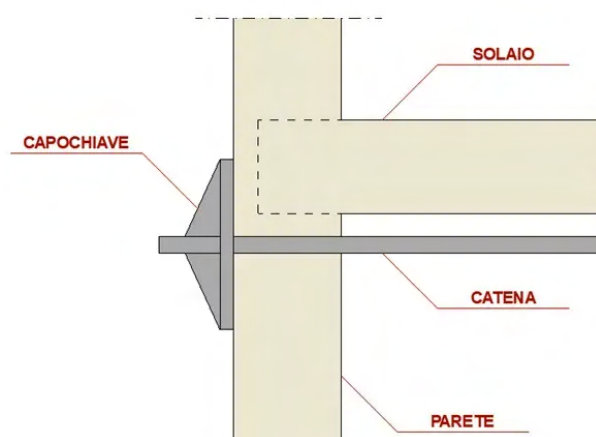


Figura 5.7: Sezione su nodo interpiano. Posizione tirante e piastra

lunghezza del tirante stesso, per assicurare una buona rigidezza. (Tavole B1-B1.1-B1.2-B2-B2.1-B2.2)

Sequenza delle operazioni:

- 1) Realizzazione di fori sulla muratura di piccole dimensioni tramite trapano o fioretto a rotazione. Successiva pulitura del foro con aria compressa;
- 2) Inserimento dei tiranti in acciaio completi di filettatura;
- 3) Iniezione di malte in pressione per ancorare i tiranti e colmare i vuoti interni;
- 4) Posa delle piastre di ancoraggio sulle nicchie predisposte;
- 5) Tesatura della catena: può avvenire tramite manicotto centrale o direttamente sul capochiave attraverso dadi e bulloni.

Passando alle modalità di connessione tra diaframmi e pareti perimetrali si esporranno di seguito una serie di tecniche finalizzate a migliorare il grado di connessione tra questi elementi.

Cuffie o scarpe metalliche

Le cuffie o scarpe sono elementi metallici che consentono di modificare il grado di vincolo dello schema statico delle travi, da vincolo appoggio-appoggio a cerniera/semincastro. La finalità di questo intervento è evitare lo

sfilamento delle orditure lignee dalla loro sede per oscillazione delle murature e consentire una corretta trasmissione dei carichi dall'orizzontamento alla muratura.

Le cuffie possono essere aperte (conformazione a "T") o chiuse (conformazione scatolare). Entrambe le soluzioni seguono diverse ragioni formali e funzionali. Le cuffie aperte vengono impiegate in soluzioni che richiedono di lasciare le travi a vista, andando a nascondere le parti metalliche. Dal punto di vista della compatibilità legno-metallo risulta una soluzione efficace nell'eliminazione dei fenomeni di degrado.

Le cuffie chiuse, in virtù della loro conformazione, impediscono la corretta areazione della testata, motivo per cui vengono tipicamente inseriti dei tasselli lignei tra trave e cuffia. A differenza della soluzione precedente non viene eseguito un intaglio sulla testata della trave, evitando così l'asportazione di materiale. (Tavole B1-B1.1-B1.2-B2-B2.1-B2.2-C2-C2.1).

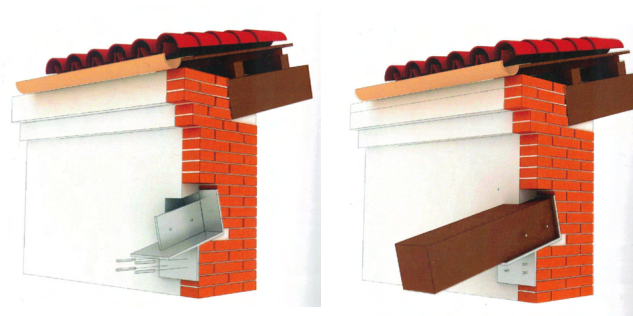


Figura 5.8: Dettaglio inserimento cuffia aperta e posizionamento trave

Cerchiature esterne

Allo scopo di favorire il funzionamento scatolare della struttura è possibile utilizzare il metodo di cerchiatura esterna in elementi metallici o materiali compositi. Viene consigliato specialmente per la sua efficacia in edifici di dimensioni in pianta ridotte. L'utilizzo profili esterni, fissati all'altezza dei solai, opportunamente ancorati alla muratura e connessi con l'orditura lignea è in grado di garantire un comportamento unitario sotto il profilo delle sollecitazioni orizzontali. Non possono essere messe in opera qualora sia necessario mantenere i caratteri faccia a vista della parete.

Cordoli

I cordoli disposti lungo le murature d'ambito alla quota dei solai sono un'ottima soluzione per conciliare i caratteri formali esterni della muratura e garantire il comportamento scatolare della struttura fungendo da elementi mediatori nella ripartizione dei carichi tra solai e murature. Nel particolare, il cordolo perimetrale assorbe le sollecitazioni assiali, le ripartisce sulle murature d'ambito e contiene i meccanismi di danno per azioni dirette fuori dal piano. In questo caso un'elevata rigidità dell'elemento "cordolo" risulta un fattore negativo per il comportamento strutturale sotto azioni dinamiche poiché potrebbe generare il martellamento dello stesso sulla muratura. A seconda del materiale, della

disposizione e della forma del cordolo avremo proprietà e caratteristiche differenti.

I cordoli in conglomerato cementizio armato soddisfano pienamente l'esigenza di assorbire gli sforzi assiali ma allo stesso tempo la loro rigidità non consente di soddisfare un'omogenea distribuzione dei carichi verticali. Altro aspetto da considerare è l'elevata invasività e irreversibilità dell'intervento.

L'utilizzo di questa soluzione viene sconsigliata per la messa in opera nei solai interpiano mentre può risultare una buona soluzione per i solai di copertura.

In quest'ultimo caso il cordolo dev'essere eseguito per un'altezza non minore dello spessore della muratura e deve essere eseguito per tutta la larghezza della muratura. Deve essere inoltre eseguito in un'unica fase e deve includere gli elementi di connessione con le orditure, almeno 4 barre longitudinali $\Phi 16$ e le staffe.

I cordoli in acciaio realizzati con profili metallici soddisfano in egual modo i criteri dei cordoli in c.a., ma in questo caso persiste il difetto dovuto ad una scarsa integrazione tra cordolo e muratura. Si necessitano quindi sistemi di connessione meccanica non sempre compatibili con le caratteristiche della muratura. Allo stesso tempo, il vantaggio di tale sistema risiede nella ridotta incidenza dei carichi aggiunti e la possibilità di integrare tale soluzione con le cuffie metalliche. Si tratta dunque di una soluzione compatibile sia

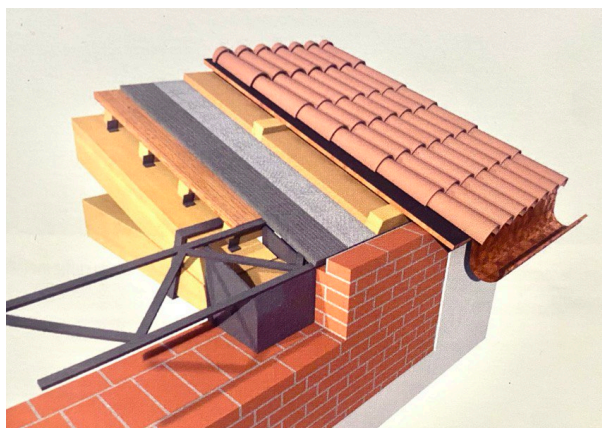


Figura 5.9: Cordolo sommitale in traliccio metallico con connessioni saldate alle cuffie metalliche di innesto dei puntoni

con i solai interpiano sia con i solai di copertura.

In particolare, i profili per i cordoli metallici più utilizzati sono quelle a C, L o U. Devono essere posizionati nella sommità delle murature d'ambito e ancorati alla muratura con barre di acciaio iniettate con resine o malte espansive. (Tavole B2-B2.1-B2.2) Soluzione ottimale per i solai di copertura sono i cordoli metallici a traliccio, composti da profili piatti in acciaio saldati a una trave reticolare e poggiati di piatto sulla sommità della muratura. La connessione all'orizzontamento e alla muratura è garantita da barre in acciaio $\Phi 12-16$ per una profondità di 20-30cm e sigillate con resine epossidiche. (Tavole C1-C1.1-C2-C2.1).

Ulteriore tipologia di cordolo è quello in muratura armata, utilizzato principalmente per gli interventi in copertura. Viene impiegata per la sua buona deformabilità verticale e poiché consente una trasmissione omogenea dei carichi sulle murature sottostanti. Il

cordolo viene realizzato mediante due file di mattoni disposti in lista e l'utilizzo di una gabbia di armatura con almeno quattro barre $\Phi 16$ e staffe $\Phi 6-8$.

La differenza sostanziale con il cordolo in c.a. riguarda la minore rigidezza della soluzione poiché non è una struttura realizzata tramite unico getto, ma bensì è un elemento strutturale realizzato a strati sovrapposti che consente di ridurre la resistenza a taglio.

Diatoni artificiali

Il sistema di diatoni artificiali in calcestruzzo armato, in profilati metallici o in altri materiali resistenti a trazione, assolve a due compiti principali. Da una parte incrementano il grado di collegamento tra paramento esterno ed interno di una stessa muratura evitando il distacco o l'innesto di fenomeni di instabilità e dall'altra parte, se si integra con le soluzioni di diaframmi di piano, fungono da elementi di ripartizione dei carichi dai solai alle murature sottostanti. I diatoni, In quest'ultima situazione, contribuiscono ad aumentare l'area di distacco necessaria all'azione sismica per l'innescio di fenomeni di espulsione della muratura. Il diatono favorisce una risposta uniforme e di tipo duttile, ritardando il raggiungimento dei livelli tensionali di collasso.

Si tratta sostanzialmente di elementi cilindrici ($\Phi 100-150$) inseriti all'interno della massa muraria secondo una maglia precisa (interasse

orizzontale 1-1,5m e interasse verticale 0,8-1,2m. (Tavole B1-B1.1-B1.2).

Sequenza delle operazioni:

- 1) Indagine preliminare sullo stato di conservazione della muratura e sulla sua stratigrafia;
- 2) Rimozione delle parti incoerenti e perforazione della parete secondo un passo regolare di 1-1,5m;
- 3) Predisposizione dei sistemi di connessione;
- 4) Ricostruzione e stilatura dei giunti;

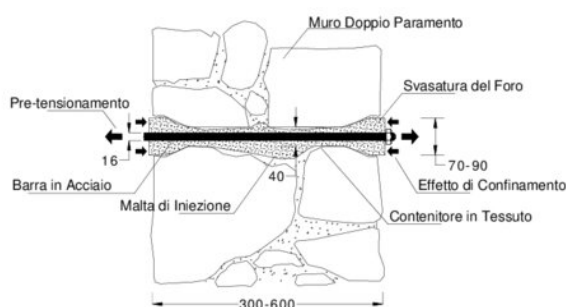


Figura 5.10: Particolare di un diatono per muratura a doppio paramento in pietra

5.1.3 FONDAZIONI

Il cedimento in fondazione di un edificio è fenomeno che generalmente si manifesta in modo lento e progressivo attraverso la comparsa di quadri fessurativi ricorrenti, salvo casi di repentine alterazioni del suolo. Le cause più comuni includono la variazione del regime idrico del suolo, il degrado del materiale e conseguente diminuzione delle

resistenze, i carichi aggiuntivi e le vibrazioni. Risulta quindi di fondamentale importanza la fase di rilievo per la valutazione dell'efficacia del sistema fondale. In particolare, sarà necessario un accurato rilievo dei quadri fessurativi e dei dissesti, nonché la comprensione dei fenomeni che hanno portato alla loro formazione, con riferimento all'evoluzione storica dell'edificio.

Sottomurazione

Un metodo tradizionalmente impiegato per soddisfare sia le vulnerabilità di dissesto dovute a una superficie di appoggio insufficiente sia i cedimenti del terreno, è la sottomurazione tramite mattoni o con soletta in c.a.. Entrambe i metodi permettono di intervenire dal lato esterno della costruzione, evitando così di compiere delle operazioni sul piano interno di calpestio.

Sequenza delle operazioni per sottomurazione in mattoni:

- 1) Si eseguono scavi al di sotto di ogni singola apertura del piano terra fino al livello della vecchia fondazione. Vanno eseguiti uno alla volta con predisposizione di puntellature di sostegno;
- 2) Viene rimosso il terreno lasciando sempre lo spazio corrispondente ad un filare di mattoni in cui verranno inserite in maniera forzata delle zeppe di legno;

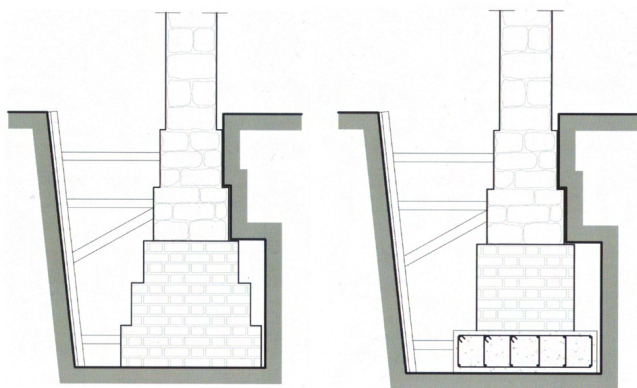


Figura 5.11: Interventi di sottomurazione in mattoni e in c.a.

- 3) Si esegue la muratura di nuova fondazione al di sotto di quella esistente;
- 4) Dopo 4-5 giorni si procede alla sostituzione dei cunei con un filare di mattoni;
- 5) Con le stesse modalità il cantiere procede per fasi successive di sotto cantieri;

Sequenza delle operazioni per sottomurazione in c.a.:

- 1) Esecuzione dei tratti di scavo nell'ordine di 1-1,5m fino al livello del terreno su cui poggierà lo stato in c.a.;
- 2) Presollecitazione del terreno mediante l'impiego di martinetti idraulici e manuali tra l'intradosso della fondazione esistente e l'estradosso della soletta armata;
- 3) Sostituzione dei martinetti con puntelli in acciaio o cemento armato;
- 4) Inserimento della maglia metallica ed esecuzione del getto di calcestruzzo;

- 5) Maturazione dell'elemento e chiusura degli scavi;

Allargamento della fondazione mediante cordolo in c.a.

Si tratta di un intervento volto ad aumentare la superficie di contatto tra muratura di fondazione e terreno col fine di decrementare le tensioni trasmesse al suolo e migliorare il comportamento globale delle fondazioni. La soluzione prevede l'impiego di elementi strutturali in c.a. posti in aderenza alla fondazione esistente. Nella maggior parte dei casi si procede tramite l'impiego di due cordoli, uno interno e uno esterno connessi tra loro e con la muratura tramite barre filettate. Ne consegue uno svantaggio dal punto di vista operativo, poiché i cantieri dovranno obbligatoriamente interessare anche l'interno della struttura.

Altro aspetto da tenere in considerazione è il meccanismo di messa in forza della nuova fondazione. Essa, infatti, inizierà a rispondere alle sollecitazioni solo a fronte di un incremento dei carichi verticali, tali da generare cedimenti sul terreno. Questo meccanismo viene dal fatto che la fondazione originaria insiste su un terreno già costipato mentre l'ampliamento poggia su superfici dello stesso terreno ma non ancora influenzate dal carico. Una soluzione a tale problema è la

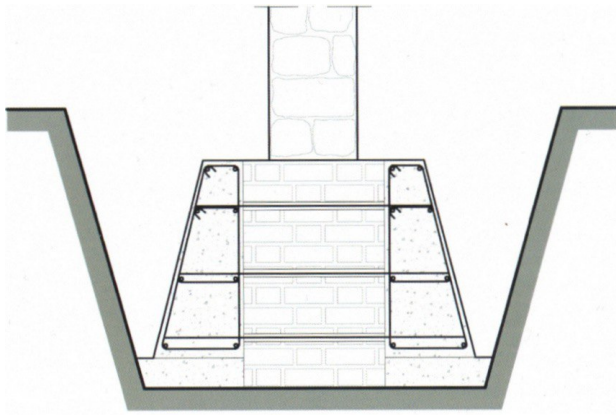


Figura 5.12: Sistema di cordoli perimetrali in c.a.

preventiva precompressione del terreno, qualora l'intervento complessivo non comporti significativo aumento dei carichi. (Tavole A1-A2)

Sequenza delle operazioni:

- 1) Scavo continuo da entrambe i lati della muratura e fino alla base della fondazione esistente;
- 2) Esecuzione di fori orizzontali (6-10 per metro quadrato)
- 3) Inserimento di barre ad aderenza migliorata $\Phi 16-22$ sporgenti per un tratto equivalente allo spessore della fondazione;
- 4) Iniezione di malta espansiva nei fori;
- 5) Esecuzione del magrone per le nuove fondazioni;
- 6) Posa delle gabbie di armatura e posizionamento delle casseforme;
- 7) Getto di calcestruzzo e vibrazione;
- 8) Maturazione e chiusura degli scavi;

Inserimento di sottofondazioni profonde

Le sottofondazioni profonde in micropali rappresentano una soluzione ottimale per gli interventi riferiti a cedimenti differenziali del terreno. La tecnica prevede l'utilizzo di pali in c.a. saldamente collegati alla fondazione esistente e inseriti nel terreno per una lunghezza variabile, al fine di trasferire i carichi a strati del terreno competenti.

Sequenza delle operazioni:

- 1) Indagini rivolte alle condizioni della fondazione esistente e alla caratterizzazione geotecnica del terreno;
- 2) Cantieri di scavo eseguiti in tratti alterni fino a livello di fondazione;
- 3) Perforazioni del terreno tramite aste rotative o roto-percussive (3-6m);
- 4) Inserimento dell'armatura in barre di acciaio o profili cilindrici;
- 5) Iniezione del calcestruzzo a pressione controllata;
- 6) Esecuzione del cordolo di collegamento tra fondazione esistente e micropali;

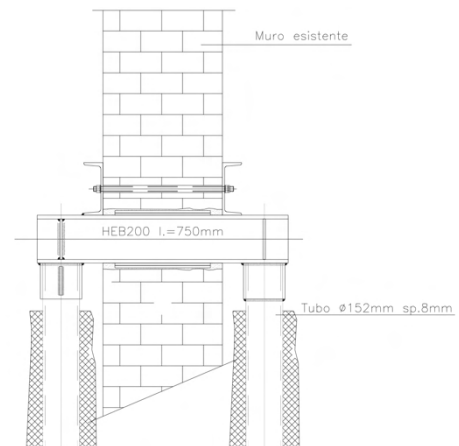


Figura 5.13: Sistema di sottofondazione in pali e cordoli per connessione alla fondazione esistente

- 7) Maturazione e riempimento dello scavo.

Consolidamento dei terreni di fondazione

Il consolidamento dei terreni è un insieme di tecniche volte ad aumentare la capacità portante e la stabilità di terreni deboli o instabili. L'esecuzione può essere effettuata tramite miscele cementizie iniettate ad alta pressione o resine poliuretaniche espandenti.

5.2 TECNICHE DI INTERVENTO MIRATE ALLA RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA

Le principali tecniche di efficientamento energetico riguardano il miglioramento delle prestazioni igrotermiche dell'involucro edilizio e la sostituzione degli impianti originari. Per quanto concerne il primo aspetto è particolarmente importante nell'ambito di questa tesi il mantenimento “a vista” delle facciate in pietra, motivo per cui non è possibile ricorrere a cappotti esterni per la coibentazione.

Ne consegue che la soluzione maggiormente compatibile risulta essere l'adozione di sistemi di isolamento interno.

L'installazione di pannelli di materiale isolante dal lato interno della muratura comporta diverse criticità:

- 1) Il sistema non è in grado di sfruttare l'elevata capacità di accumulo di

calore delle pareti in questione, dotate di grandi spessori murari e notevole inerzia termica. In particolar modo, nei mesi invernali il tempo necessario per riscaldare un ambiente dotato di cappotto interno, sarà minore rispetto un sistema esterno poiché il calore si fermerà agli strati isolanti senza raggiungere la parete. Tanto quanto si diffonde velocemente il calore, altrettanto velocemente si andrà a disperdere, non potendo contare sulla capacità termica della parete;

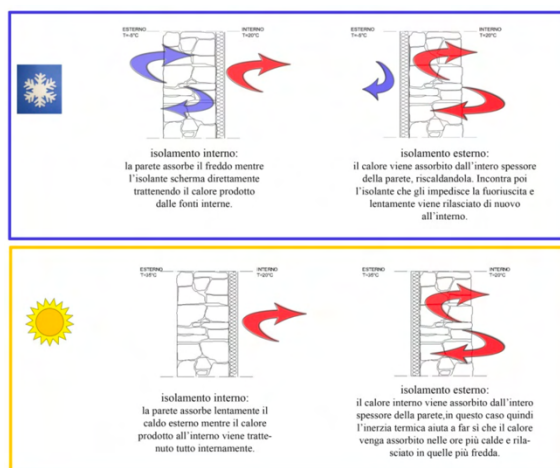


Figura 5.14: Schematizzazione in clima invernale ed estivo dell'isolamento esterno e interno.

- 2) Il sistema è soggetto a rischio di condensa interstiziale, specialmente nei periodi invernali. Le pareti esterne rimangono esposte a basse temperature mentre l'isolante presenta temperature calde lato interno e temperature fredde lato esterno a contatto con la parete. Ne consegue che, il moto del vapore prodotto dagli ambienti riscaldati incontra una zona di sbalzo termico, raggiungendo così

la temperatura di rugiada alla quale si condensa il vapore. Questo fenomeno seppur non visibile determina il degrado dei materiali lapidei e di isolamento, favorisce muffe e distacco delle malte;

- 3) Il sistema non prevede continuità nella posa dell'isolamento interno e ciò determina la comparsa di ponti termici. È infatti impossibile coprire in modo continuo tutti i punti della parete poiché l'isolante si dovrà fermare in corrispondenza dei nodi critici del sistema edilizio;
- 4) Il sistema, dipendentemente dal materiale utilizzato per la coibentazione interna, occuperà una porzione della superficie calpestabile dell'ambiente. La perdita di questo spazio risulta un fattore negativo, in particolar modo se gli ambienti interni sono già di dimensione ridotta.

5.2.1 SOLUZIONI PER L'ISOLAMENTO INTERNO

Rasatura con miscela a microsfere ceramiche

Nel contesto della Tesi, per la risoluzione delle nodalità critiche del sistema edilizio è

stato scelto un sistema di isolamento interno tramite miscele nanotecnologiche con microsfere ceramiche a granulometria variabile. Il sistema sfrutta un valore di conducibilità termica estremamente basso ($0,002\text{W/mK}$), dato dalla capacità della miscela di riflettere la radiazione termica in entrata al fine di impiegare un volume e uno spessore il più basso possibile (dai 2mm a 10mm). Per dare un confronto, 8mm di miscela equivalgono a 16 cm di EPS.

Gli studi e le applicazioni di tale materiale nell'efficientamento delle prestazioni termiche degli edifici sono fino a ora ridotte.

La Tesi vuole dunque proporre sperimentalmente l'impiego di questa soluzione in virtù delle sue ottime prestazioni in termini di compatibilità e capacità isolante negli edifici in muratura.

L'adozione della miscela come soluzione tecnica vuole anche riflettere l'interesse nei confronti delle potenzialità offerte dal materiale, auspicando ulteriori ricerche sulla tematica.

Uno studio relativo alle capacità termiche di tale materiale è stato portato avanti dalla Fondazione degli ordini degli Ingegneri della Liguria per la cultura¹.

In particolare, vengono di seguito riportati i principali risultati delle analisi svolte nel contesto di ricerca.

¹ Fossa Marco, Fondazione degli ordini degli Ingegneri della Liguria per la cultura, *Report n. 1 del 09/11/2022: Efficacia delle miscele nanotecnologiche con microsfere ceramiche a granulometria variabile*

commercializzate per l'isolamento termico a basso spessore (da 2 a 10 mm) degli edifici ai fini della riduzione dei consumi energetici, Genova 2022.

Le misure di flusso termico registrate per comprendere le caratteristiche isolanti del materiale sono state eseguite in laboratorio in regime termodinamico stazionario su tre campioni di prova: “REF” ovvero la sezione in condizioni di riferimento, quindi senza l’applicazione di materiale isolante, “PE” ovvero la sezione in cui è stato applicato uno stato di polistirene estruso e “RAS” ovvero la sezione su cui è stata impiegata la rasatura termica oggetto di studio. L’applicazione della miscela è stata effettuata tramite primer fissativo a base di silicati alcalini e stesura del rasante termico (5mm) con rete di armatura in fibra di vetro.

La procedura ha l’obiettivo di ricalcare ciò che avviene realmente negli edifici generando un flusso termico dall’interno del campione verso l’esterno. La sperimentazione si articola nelle seguenti fasi:

- 1) Predisposizione delle sezioni di prova di forma cubica con lato esterno 0,7m di spessore 10mm in pannelli di legno truciolare. Inserimento del riscaldatore interno e chiusura del coperchio superiore;
- 2) Climatizzazione dell’ambiente esterno (stanza) fino al raggiungimento di condizioni stazionarie;
- 3) Avvio del riscaldatore interno fino a temperatura stabilita;
- 4) Raggiunte le condizioni stazionarie sia internamente che esternamente il

provino viene avviata la misura del tempo;

- 5) Trascorse circa 24 ore viene registrato il tempo e il valore di energia elettrica utilizzata;
- 6) Viene calcolato il flusso termico medio in Watt e il flusso termico medio per unità di differenza di temperatura lato interno/esterno;
- 7) Analisi dei risultati ottenuti.

La conclusione della campagna di prove sperimentali ha messo in luce i valori di trasmittanza rilevati per REF e RAS, rispettivamente 12,53W/K e 11,01W/K. In sostanza non c’è stata una variazione prestazionale significativa, cosa che invece si è verificata per il sistema PE (3,78W/K).

Le considerazioni a fronte di questi risultati sono le seguenti.

Nel contesto della ricerca citata, la miscela è stata “acquistata sul mercato in modo casuale” ed è stata impiegata nelle analisi senza una verifica preliminare sulla quantità e dimensione delle microsfele ceramiche. Si può inoltre affermare che i risultati ottenuti dai test sperimentali non hanno tenuto in considerazione il possibile effetto “ponte termico” generato dalla rete in fibra di vetro (di conducibilità termica pari a 0,039W/mK), la cui dimensione seppur ridotta, potrebbe influenzare le prestazioni termiche della miscela dato il ridotto spessore (5mm). Altro aspetto da considerare è la possibile incompatibilità dei risultati con l’ambito di

questa Tesi, tenendo conto che le prestazioni della miscela potrebbero variare rispetto al materiale su cui vengono applicate. Legno e pietra, in questo caso arenaria, hanno caratteristiche fisico-chimiche molto differenti.

Nel contesto di questa Tesi si è voluto dare un marchio preciso [MANTICERAMIC] per poter fornire nel dettaglio tutte le prestazioni attese a fronte di caratteristiche di miscela

CARATTERISTICHE

Confezione: 20 lt

Resa: 1 lt /1 mq/1 mm

Spessore consigliato: 2 – 10 mm ca.

Riflettanza termica (SR %) (ASTM C1549): 88,4

Emissività termica (IE %) (EN 15976): 85,5

Indice di riflettanza termica (SRI %) (ADTM E1980): 111,5

Conducibilità termica: $\lambda_d = 0,002$ W/mK

Viscosità: 22.000 mPas

Densità: 763kg/m³

Reazione al fuoco: Euro Classe A2 S1 d0

Colore: Bianco naturale

Resistenza al flusso di vapore (equivalenza): $\mu = 6,40$

Calore specifico: 1.290 J/(kgK)

Tempo di asciugatura di ogni mano: 24 h

definite. In particolare, sono stati utilizzati tali parametri per la valutazione delle prestazioni igrotermiche tramite software di analisi PAN8. Di seguito vengono fornite le principali proprietà **Fig. 5.15**.

Per completezza si vogliono riportare ulteriori soluzioni tecniche per l'isolamento interno tramite i tradizionali materiali isolanti.

Isolamento interno in pannelli di fibra di legno

Si considera un sistema in materiale organico naturale ottenuto dal prodotto di scarto delle lavorazioni industriali con densità $d=140$ kg/m³, coefficiente di conduzione termica di $\lambda=0,038$ W/mK e permeabilità al vapore acqueo $\mu=5$.

La soluzione (**Fig.5.16**) prevede a contatto con la parete in pietra arenaria la stesura di uno strato di intonaco d'argilla su cui verranno posizionati i pannelli in fibra di legno e una guaina a diffusione igrovariabile.

Composizione	Prodotto brevettato, monocomponente e premiscelato, contenete nanomolecole ceramiche per l'isolamento termico.
Generalità	È un prodotto innovativo, con un elevata capacità isolante dovuta all'abbinamento di bassissima conducibilità e proprietà di riflettanza termica. Traspirante e certificato anti-umidità e anti-muffa.
Utilizzo	Una protezione estremamente sottile che riduce drasticamente le dispersioni termiche, proteggendo le superfici dalla corrosione e dalla formazione di nuovi funghi e muffe. Particolarmente idoneo per un efficace isolamento termico di pareti sia di edifici civili che di strutture commerciali. Applicabile su qualsiasi tipo di superficie in muratura, con fondo sano o sanificato. Attenersi alla procedura indicata sul manuale di posa.
Lavorazione	Il metodo di applicazione è quello a spatola come meglio illustrato nel manuale di posa. Evitare l'applicazione a temperature inferiori a + 5°C. Se si applica all'esterno è necessario proteggere il prodotto dalla pioggia durante le prime 48 h
Osservazioni particolari	Applicazione rapida a spatola. Atossico, inodore, a basso VOC. Prodotto riciclabile al 100%. Vedi scheda di sicurezza. L'efficienza termica ottimale avviene dopo circa 60 gg dall'installazione.

Figura 5.15: Caratteristiche del microcappotto nanotecnologico MANTICERAMIC

Si procede con l’inserimento di listelli in legno per la creazione di una camera d’aria. Poi si procede nuovamente all’intonacatura con miscela a base di argilla per una corretta traspirabilità dello spessore.

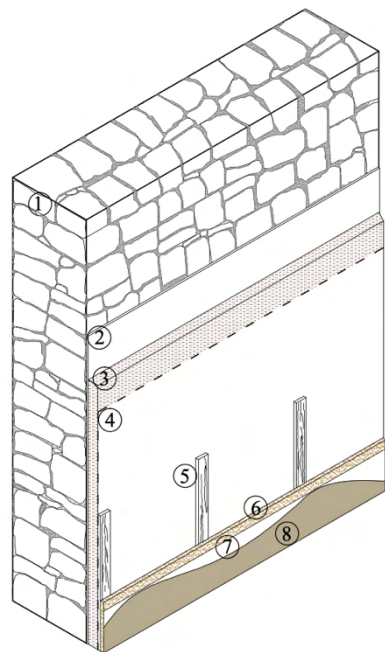


Figura 5.16: 1) Muratura in arenaria 2) Strato di fondo 3) Isolante in fibra di legno 4) Guaina 5) Listelli in legno 6-7-8) Pannello e rasatura in argilla

CALCOLO TRASMITTANZA				
Stratigrafia	Prodotto	Spessore (cm)	Conducibilità termica λ [W/mK]	Resistenza termica R (m²K/W)
Resistenza superficiale esterna				0,0430
1	Muro in conci di arenaria e malta	60	1,5	0,4620
2	Strato di fondo	1,5	0,27	0,0550
3	Isolante in fibra di legno	8	0,038	2,10
4	Guaina diffusione igrovariabile	0,02	-	-
5	Listelli legno e intercapedine d'aria	2,10	0,42	0,0500
6	Pannello in argilla	2,50	0,33	0,0750
7	Rasatura	1	0,27	0,0370
8	intonachino	0,5	0,27	0,0185
Resistenza superficiale interna				0,1250
Totale		75,62		2,97
U = 1/Rtot = 0,34 [W/m²K]				

Tabella 5.17: Calcolo trasmittanza del pacchetto stratigrafico

Isolamento interno in pannelli di silicato di calcio

In questo caso il materiale isolante è di natura minerale a base di idrati di calcio. Nello specifico le materie prime sono ossido di calcio e ossido di silicio con l’aggiunta di cellulosa. Viene classificato come materiale

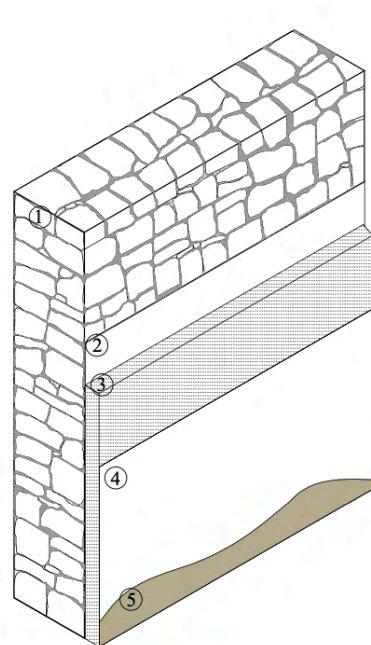


Figura 5.18: 1) Muratura in arenaria 2) Malta leggera3) Isolante in pannelli minerali 4) Rasatura in malta 5) intonachino

CALCOLO TRASMITTANZA				
Stratigrafia	Prodotto	Spessore (cm)	Conducibilità termica λ [W/mK]	Resistenza termica R (m²K/W)
Resistenza superficiale esterna				0,0430
1	Muro in conci di arenaria e malta	60	1,5	0,4620
2	Malta leggera	Ytong	0,6	0,03
3	Isolante in pannelli minerali	Ytong multipor	12	0,045
4	Rasatura in malta leggera	Ytong	0,6	0,30
5	intonachino	Ytong	0,5	0,30
Resistenza superficiale interna				0,1250
Totale		73,70		3,33
U = 1/Rtot = 0,3 [W/m²K]				

Tabella 5.19: Calcolo trasmittanza del pacchetto stratigrafico

ecocompatibile, prodotto senza l’utilizzo di materiali sintetici e con attenzione alle emissioni prodotte nel ciclo di produzione. Caratteristica del materiale oltre al basso

coefficiente di conduzione termica (0,045W/mK) è l'elevata traspirabilità. Questo permette di non dover posare un ulteriore guaina per la regolazione del flusso di vapore acqueo.

Isolamento interno in pannelli sottovuoto

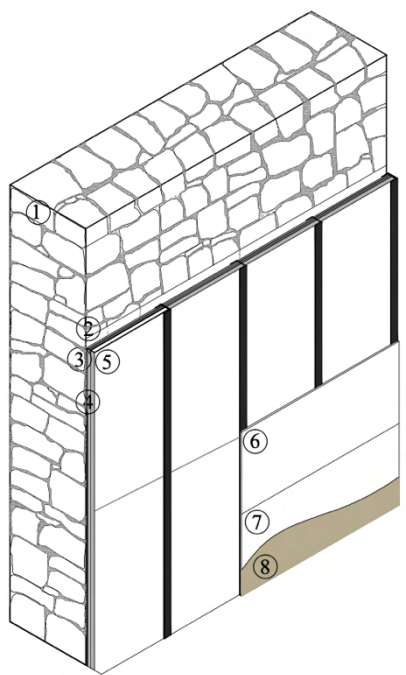


Figura 5.20: 1) Muratura in arenaria 2) Malta leggera3) Strato di protezione in polistirene 4) Nucleo pannello sottovuoto 5) Strato di protezione in polistirene 6) Lastra in cartongesso con barriera al vapore 7-8) Rasatura

CALCOLO TRASMITTANZA					
	Stratigrafia	prodotto	spessore (cm)	conducibilità termica λ [W/mK]	resistenza termica R (m²K/W)
	Resistenza superficiale esterna				0,043
1	Muro in conci di arenaria e malta	-	60	1,5	0,462
2	Malta leggera	Nordex	0,6	0,03	0,0220
3	Strato di protezione in polistirene	Nordtex	1,0	0,03	0,333
4	Nucleo pannello sottovuoto	Vacum - Nordtex	2	0,008	2,50
5	Strato di protezione in polistirene	Nordtex	3,0	0,30	1,0
6	Lastra cartongesso con barriera al vapore	Knauf	1,25	0,20	0,0625
7	Rasatura	Knauf	0,6	0,27	0,02
8	Intonachino	Knauf	0,5	0,27	0,018
	Resistenza superficiale interna				0,1250
Totale			69,85		4,56
U = 1/Rtot = 0,22 [W/m²K]					

Tabella 5.21: Calcolo trasmittanza del pacchetto stratigrafico

I pannelli sottovuoto sono composti da un involucro a tenuta stagna per il contenimento di gas o per la creazione per una camera vuota. Il nucleo viene realizzato tramite silice, costituita dal’80% di diossido di silice, dal 15% di carburo di silicio e dal 5% di altri componenti. In questo caso sarà necessario l’impiego di una pellicola per la regolazione dei flussi di vapore acqueo. La soluzione viene tipicamente racchiusa tra due strati di miscela di materiale riciclato per l’adesione dei pannelli. I pannelli così formati sono una soluzione particolarmente performante in quanto raggiungono valori di conducibilità nell’ordine di 0,0042-0,005W/mK.

5.2.2 SOLUZIONI PER UMIDITA’ DI RISALITA

L’umidità all’interno delle murature rappresenta una variante negativa sulla capacità isolante del paramento murario e una delle forme di degrado più comuni negli edifici storici in muratura. Le strutture di fondazione non prevedendo soluzioni di tenuta all’acqua sono soggette al fenomeno di risalita capillare di umidità dal terreno. Tale meccanismo viene influenzato dalla quantità di acqua nel terreno, dalla capacità assorbente dei materiali di cui è composta la fondazione, dalla differenza di potenziale elettrostatico della muratura e dai fenomeni atmosferici stagionali. La presenza di umidità all’interno della muratura

determina danni di tipo meccanico dovuti principalmente a fenomeni di cristallizzazione salina o di gelo-disgelo, danni estetici e danni alla salute dovuti allo sviluppo di muffe.

Gli interventi indicati per il risanamento della muratura nei confronti dell'umidità prevedono innanzitutto l'eliminazione della causa del problema attraverso la realizzazione in fondazione di scannafossi o barriere di tenuta all'acqua.

Vengono di seguito riportati i metodi ricorrenti per il risanamento delle murature.

Interventi chimici

Questo tipo di interventi prevede l'impiego di sostanze liquide a base di siliconi o silossani iniettate nello spessore della muratura a lenta trasfusione o con sistemi di iniezione.

Nel primo caso il prodotto viene iniettato tramite trasfusori brevettati inseriti

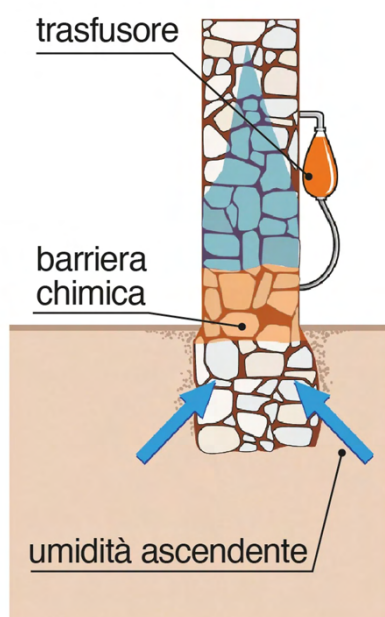


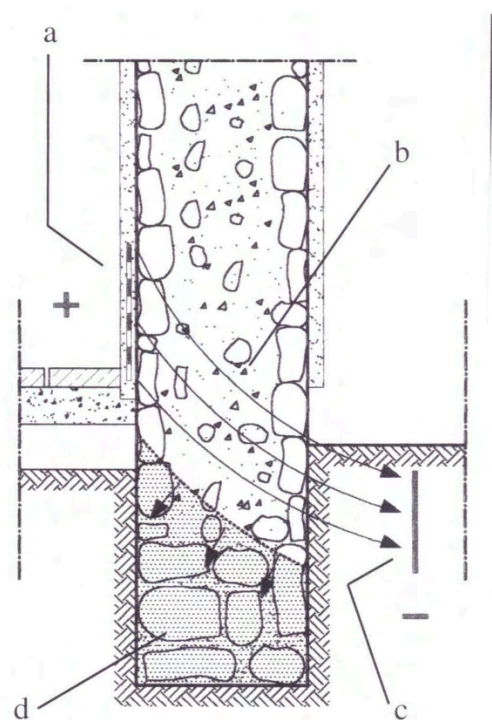
Figura 5.22: Sezione in cui viene evidenziata la porzione di muratura interessata dalla barriera chimica con applicazione di resine a pressione atmosferica

orizzontalmente per due terzi della muratura ogni 15-20cm e a 15-20cm dal piano di calpestio. Per pareti dallo spessore superiore a 45cm si consiglia l'iniezione da entrambe i lati.

Il secondo metodo prevede l'immissione del prodotto a pressione controllata (circa 6 atm) per mezzo di una pompa collegata a iniettori dotati di guarnizione ermetica.

Interventi evaporanti

Un tipo di intervento che può contribuire allo smaltimento dell'umidità dallo spessore



- a) Anodo (polo positivo)
- b) Passaggio di corrente continua a basso voltaggio
- c) Catodi di dispersione (polo negativo)
- d) Inversione nella migrazione della direzione della risalita capillare

Figura 5.23: Intervento di elettrosmosi attiva blanda

murario è l'applicazione di intonaci macro e microporosi. Tale tecnica, implementata con altre soluzioni, permette di allontanare l'umidità dalla muratura, impedendo che il vapore possa condensare nei vuoti interni.

Interventi elettrosmotici

Questo tipo di intervento sfrutta la differenza di potenziale elettrico tra terreno e muratura per invertire il moto di risalita dell'umidità. Invertendo la polarità tra i due elementi con una corrente a bassa tensione, si va a sfruttare la muratura come anodo e il terreno come catodo.

La tecnica dell'elettrosmosi può essere attiva, attiva blanda o passiva, ma in tutti e tre i casi si sono riscontrati dei livelli di efficienza bassi.

5.3 INTERVENTI PROPOSTI SULLE NODALITÀ CRITICHE

5.3.1 STATO DI FATTO

Le nodalità critiche del sistema edilizio considerate per la realizzazione degli interventi di consolidamento strutturale e riqualificazione energetica riassumono i caratteri materici costruttivi e formali descritti nei capitoli precedenti. In particolare, il sistema di fondazione (**A1_Ante, A2_Ante**) proposto si caratterizza per l'assenza di allargamento della muratura in fondazione e in assenza di soluzioni di tenuta all'acqua. Il

solaio viene composto da ghiaie di granulometria variabile, un massetto e una pavimentazione in pianoni di arenaria.

Il solaio interpiano (**B1_Ante, B2_Ante**) viene invece costituito da un orizzontamento ligneo composto da orditura principale di sezione 20x25cm e interasse 1m, orditura secondaria di sezione 10x10cm e interasse 80cm, e tavolato inchiodato. Viene poi predisposto un massetto di livellamento per il posizionamento dei pianoni in arenaria. Per quanto riguarda il solaio interpiano si è deciso di mostrare quattro sezioni del nodo: due in corrispondenza del muro perimetrale esterno (**B1.1_Ante, B2.1_Ante**) e due in corrispondenza del muro di separazione di due celle elementari contigue (**B1.2_Ante, B2.2_Ante**). In quest'ultimo caso si è voluto evidenziare la differente modalità di connessione dell'orizzontamento sulla muratura quando una sola cella o entrambe sono soggette a intervento.

Il solaio di copertura viene declinato in due tipologie differenti. La prima (**C1_Ante, C2_Ante**) prevede l'impiego di travetti a mensola con palombella e tavolato ligneo su cui andranno ad appoggiarsi i coppi in laterizio, mentre la seconda utilizza un sistema di appoggio dell'orditura secondaria tramite trave di bordo e copertura in piagne di arenaria.

In entrambe i casi l'orizzontamento si compone di orditura principale (Terzera) di sezione 25x30cm, orditura secondaria

(Molare) di sezione 12x8cm, e tavolato (Lambrecce) di copertura. La differenza sostanziale tra le due risiede nell'orditura secondaria. Nel primo caso la lunghezza dei molari è minore e la testata della trave insiste su un ritaglio scavato nella muratura mentre nel secondo caso i molari poggiano sulla trave di bordo e sulla muratura.

5.3.2 STATO DI PROGETTO

Le nodalità del sistema edilizio proposte sono state uniformate sotto alcuni aspetti chiave comuni:

- L'incremento della capacità portante delle pareti è stato perseguito tramite l'adozione del sistema di ristilatura armata con intonaco armato;
- L'isolamento termico delle pareti perimetrali è stato affidato alla miscela nanocomposita con sfere ceramiche MANTICERAMIC;
- L'adozione del sistema di climatizzazione a pavimento per solaio di fondazione e interpiano. La soluzione permette di lavorare nello spessore del solaio senza dover intervenire in aree utilizzabili diversamente. Inoltre, questa tecnica permette di avere la stessa temperatura in tutti gli ambienti a fronte di consumi energetici minori rispetto a soluzioni tradizionali.

Al_Post

La soluzione proposta per il nodo di fondazione prevede l'impiego di un sistema di cordoli e rostri perimetrali in c.a. idrofobico resi collaboranti con la fondazione esistente e connessi alla platea in c.a. da barre di armatura. Tale tecnica ci consente di aumentare la capacità resistente della muratura aumentando la superficie di contatto col terreno.

Inoltre, questa soluzione se impiegata insieme al taglio chimico, permette di realizzare un sistema ottimale di tenuta all'acqua, impedendo la risalita di umidità da sotto e da lato della fondazione. Qualora si dovesse verificare la fessurazione della platea, è stata prevista una barriera al vapore per il contenimento dell'umidità e una membrana traspirante al di sopra del materiale isolante.

Sequenza delle operazioni:

- 1) Rimozione pianoni del piano di calpestio per utilizzo successivo;
- 2) Scavo sul lato interno ed esterno fino al livello di fondazione. Scavi a tratti successivi;
- 3) Rimozione dell'ambito di muratura interessato dall'inserimento del cordolo e dei rostri. Ci si può avvalere di strumenti per mantenere appoggiata la muratura soprastante;

- 4) Livellamento e compattazione del terreno;
- 5) Getto del magrone di fondazione;
- 6) Inserimento delle gabbie di armatura con barre longitudinali e staffe per cordoli e rostri;
- 7) Predisposizione dell'armatura della soletta in c.a. e connessione tra le due armature;
- 8) Getto di calcestruzzo e formazione della platea di fondazione connessa al sistema di cordoli e rostri;
- 9) Disposizione per strati sovrapposti di barriera al vapore, pannelli isolanti in XPS, membrana traspirante;
- 10) Inserimento tubature per impianti e getto in cls alleggerito;
- 11) Stesura del sistema di climatizzazione a pavimento e rifinitura della pavimentazione con pianoni;
- 12) Taglio chimico su entrambe le facciate della muratura tramite resine;
- 13) Chiusura degli scavi;
- 14) Ristilatura armata su entrambe le facciate della parete e stesura dell'intonaco armato;
- 15) Rasatura con isolante nanotecnologico;

A2_Post

A differenza della precedente tavola, in questo caso è presente un piano totalmente interrato. La differenza principale risulta quindi il

sistema di tenuta all'acqua. Il passaggio di umidità dal terreno sottostante la fondazione viene fermato dalla platea e dai cordoli in c.a. idrofobico. Il taglio chimico in questo caso verrà eseguito al di sopra del piano di campagna per impedire la risalita del vapore. La parete sottoterra, esposta lateralmente al terreno, viene protetta da una membrana adesiva impermeabilizzante, coperta a sua volta da una guaina bugnata.

Sequenza delle operazioni:

- 1) Rimozione pianoni del piano di calpestio per utilizzo successivo;
- 2) Scavo sul lato interno ed esterno fino al livello di fondazione. Scavi a tratti successivi;
- 3) Rimozione dell'ambito di muratura interessato dall'inserimento del cordolo e dei rostri. Ci si può avvalere di strumenti per il mantenimento della muratura soprastante;
- 4) Livellamento e compattazione del terreno;
- 5) Getto del magrone di fondazione;
- 6) Inserimento delle gabbie di armatura con barre longitudinali e staffe per cordoli e rostri;
- 7) Predisposizione dell'armatura della soletta in c.a. e connessione tra le due armature;

- 8) Getto di calcestruzzo e formazione della platea di fondazione connessa al sistema di cordoli e rostri;
- 9) Disposizione per strati sovrapposti di barriera al vapore, pannelli isolanti in XPS, membrana traspirante;
- 10) Inserimento tubature per impianti e getto in cls alleggerito;
- 11) Stesura del sistema di climatizzazione a pavimento e rifinitura della pavimentazione con pianoni;
- 12) Taglio chimico su entrambe le facciate della muratura tramite resine e a livello del piano di calpestio;
- 13) Ristilatura armata su entrambe le facciate della parete e stesura dell'intonaco armato;
- 14) Rasatura con isolante nanotecnologico;
- 15) Applicazione di guaina impermeabilizzante e guaina bugnata a protezione della muratura del piano interrato;
- 16) Chiusura scavo fino a livello del piano di calpestio con ghiaie di granulometria variabile;
- 17) Disposizione e fissaggio armatura per marciapiede. Getto di calcestruzzo;

Dal punto di vista igrotermico vengono riportati in seguito la stratigrafia con le relative caratteristiche dei materiali e i parametri principali soggetti a verifica. (TAB. 5.24).

B1_Post – B1.1_Post – B1.2_Post

La prima proposta di intervento per i solai interpiano prevede la creazione di un orizzontamento rigido tramite soletta collaborante in cls, connessa ad un sistema di diatoni artificiali per la connessione alle murature e il trasferimento delle tensioni di carico. La soletta dispone di connettori semplici e a taglio per instaurare un comportamento unitario con le orditure esistenti. I diatoni, se disposti lungo le pareti perimetrali o di contatto con celle murarie non soggette ad intervento, si inseriranno nella parete per 2/3 dello spessore, mentre se il diatono viene condiviso da due celle entrambe soggette a riqualificazione, si inserirà per tutto lo spessore murario, connettendosi con gli orizzontamenti di entrambe le celle.

Per incrementare invece il grado di connessione tra pareti parallele viene implementato un sistema di tiranti disposto in entrambe le direzioni di accrescimento della struttura fissato con capochiave.

Al fine di aumentare il grado di compatibilità e connessione tra orditure e muratura sono state previste due tecniche differenti: per l'orditura principale sono state predisposte piastre metalliche di centraggio mentre per l'orditura secondaria vengono inserite delle scarpe metalliche per l'inserimento in asola.

Sequenza delle operazioni:

- 1) Valutazione preliminare sulla sostituzione di alcune parti dell'orditura lignea ritenute non in grado di assolvere alle loro funzioni;
- 2) Rimozione dei pianoni e sfilamento delle orditure dalla loro sede;
- 3) Rimozione dell'ambito di muratura interessata dall'inserimento dei diatoni artificiali;
- 4) Inserimento cuffie metalliche e fissaggio con muratura. Reinserimento delle orditure e fissaggio del tavolato;
- 5) Inserimento dei diatoni artificiali nella loro sede e iniezione di malte per il fissaggio;
- 6) Posizionamento della maglia metallica, dei connettori semplici e connettori a taglio;
- 7) Getto di calcestruzzo per tutto lo spessore della soletta;
- 8) Disposizione per strati sovrapposti del materassino acustico, del sistema di climatizzazione e della pavimentazione in pianoni;
- 9) Ristilatura armata su entrambe le facciate della parete e stesura dell'intonaco armato;
- 10) Rasatura con isolante nanotecnologico;

B2_Post – B2.1_Post – B2.2_Post

A differenza della tavola precedente, si è voluto affidare il compito di orizzontamento ad un sistema meno invasivo e più leggero. L'impiego di un cordolo perimetrale metallico ad "L", saldamente connesso con orditure, muratura e soletta collaborante in c.a., permette di operare senza la rimozione di parti di muratura e senza apportare un peso significativo sul solaio. Le barre filettate piegate a 30° per il collegamento del cordolo alla muratura, vengono sostituite da barre orizzontali per la connessione al cordolo della cella adiacente qualora l'intervento interessi entrambe gli ambienti.

Vengono inoltre utilizzati differenti tipologie di connettori semplici e a taglio per l'unione della soletta con le due orditure.

Sequenza delle operazioni:

- 1) Valutazione preliminare sulla sostituzione di alcune parti dell'orditura lignea ritenute non in grado di assolvere alle loro funzioni;
- 2) Rimozione dei pianoni e sfilamento delle orditure dalla loro sede;
- 3) Inserimento cuffie metalliche e fissaggio con muratura. Reinserimento delle orditure e fissaggio del tavolato;
- 4) Posizionamento e fissaggio del cordolo su tutti i lati della cella tramite barre filettate;
- 5) Posizionamento rete elettrosaldata e connettori;

- 6) Getto di cls per tutto lo spessore della soletta;
- 7) Disposizione per strati sovrapposti del materassino acustico, del sistema di climatizzazione e della pavimentazione in pianoni;
- 8) Ristilatura armata su entrambe le facciate della parete e stesura dell'intonaco armato;
- 9) Rasatura con isolante nanotecnologico.

Dal punto di vista igrotermico vengono riportati in seguito la stratigrafia con le relative caratteristiche dei materiali e i parametri principali soggetti a verifica. **(TAB. 5.25).**

C1_Post – C1.1_Post

L'intervento proposto per il primo solaio di copertura prevede il mantenimento del rapporto originario di gronda e il mantenimento dell'orditura e del manto di copertura esistente a fronte di un aumento delle prestazioni meccaniche e igrotermiche. L'orizzontamento è stato irrigidito tramite l'impiego di doppio tavolato ligneo incrociato, reso collaborante tramite elementi metallici di collegamento e un cordolo metallico perimetrale a traliccio. Quest'ultimo si inserisce al di sopra del tavolato, connettendolo sia all'orditura secondaria sia alla muratura.

Il miglioramento delle prestazioni igrotermiche è stato eseguito tramite l'inserimento di una stratigrafia composta dall'interno all'esterno da barriera al vapore, isolante EPS, membrana traspirante e camera di ventilazione. In questo modo la copertura risulta sufficientemente isolata e nel caso di rottura della barriera al vapore, l'umidità verrebbe smaltita grazie alla membrana traspirante, evitando la condensa all'interno del pannello isolante.

Sequenza delle operazioni:

- 1) Valutazione preliminare sulla sostituzione di elementi dell'orditura ammalorati;
- 2) Rimozione del travetto a mensola per posizionamento di 15cm in alto per mantenere il rapporto di gronda;
- 3) Fissaggio doppio tavolato;
- 4) Stesura della barriera a vapore;
- 5) Inserimento e fissaggio del cordolo metallico a traliccio;
- 6) Posizionamento dei pannelli in EPS, della membrana traspirante e dei listelli per la camera di ventilazione;
- 7) Posizionamento coppi in laterizio, gronda e rete antipassero;
- 8) Ristilatura armata su entrambe le facciate della parete e stesura dell'intonaco armato;
- 9) Rasatura con isolante nanotecnologico.

C2_Post – C2.1_Post

Le tecniche utilizzate in questa nodalità sono in generale più invasive di quelle precedenti poiché prevedono la rimozione delle orditure e l'inserimento di cuffie metalliche in corrispondenza della testa dei molari. Questa soluzione permette di avere un grado maggiore di connessione tra muratura ed elementi lignei poiché grazie a cuffia e cordolo metallico a traliccio consente la connessione della trave di bordo, i molari, il doppio tavolato e la muratura.

Anche in questo caso il miglioramento delle prestazioni igrotermiche è stato eseguito tramite l'inserimento della precedente stratigrafia.

Sequenza delle operazioni:

- 1) Valutazione preliminare sulla sostituzione di elementi dell'orditura ammalorati;
- 2) Rimozione di tutto il solaio interpiano, conservando per un futuro utilizzo le piagne, le due orditure e la trave di bordo;
- 3) Inserimento cuffia metallica nello spessore della muratura e in corrispondenza dell'appoggio dei molari;
- 4) Apporto di nuovo materiale lapideo sul lato esterno della muratura per "chiudere" la cuffia metallica;

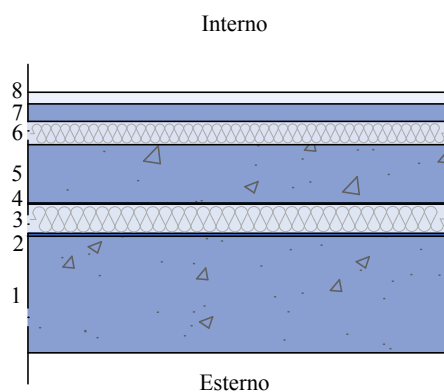
- 5) Per il mantenimento del rapporto di gronda tagliare il molare nella sua parte finale per 80cm e conservare la decorazione a palombella;
- 6) Posa dell'orditura primaria.
Inserimento dell'orditura secondaria con tavolato con particolare attenzione all'inserimento dei molari e della trave di bordo all'interno della cuffia;
- 7) Posizionamento e connessione del cordolo a traliccio tramite barre filettate;
- 8) Posizionamento pannelli di materiale isolante EPS fino al filo della parete interna;
- 9) Posizionamento travetto con palombella precedentemente conservato;
- 10) Stesura della membrana traspirante, dei listelli per la camera di ventilazione;
- 11) Posizionamento piagne in arenaria, gronda e rete antipassero;
- 12) Ristilatura armata su entrambe le facciate della parete e stesura dell'intonaco armato;
- 13) Rasatura con isolante nanotecnologico.

Dal punto di vista igrotermico vengono riportati in seguito la stratigrafia con le relative caratteristiche dei materiali e i parametri principali soggetti a verifica. **(TAB. 5.26).**

SOLAIO DI FONDAZIONE

DATI GENERALI	
Spessore	0,447 m
Massa superficiale	797,6 Kg/m ²
Resistenza totale	3,10 m ² K/W
Trasmittanza totale	0,26 W/m²K (<0,28)

PARAMETRI DINAMICI	
Fattore di attenuazione	0,02
Sfasamento	16,27h
Capacità termica areica interna	56,99 KJ/m ² K
Trasmittanza periodica	0,006 W/m ² K



VERIFICA FORMAZIONE DI MUFFE, CONDENSA SUPERFICIALE E INTERSTIZIALE			
	Rischio formazione muffa	Rischio formazione condensa superficiale	Rischio formazione condensa interstiziale
Mese critico	Gennaio	Gennaio	Gennaio
Fattore di temperatura	0,394	0,079	0,079
Resistenza minima accettabile (m ² K/W)	0,413	0,271	/
Verifica limite	verificato	verificato	verificato

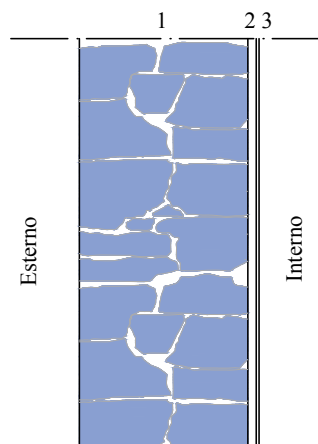
STRATIGRAFIA							
		Materiale	Spessore (m)	Massa volumica (Kg/m ³)	Capacità termica specifica (J/KgK)	Conducibilità (W/mK)	Resistenza (m ² K/W)
1	CLS	Calcestruzzo armato idrofobo	0,2	2400	1000	2,0	0,1
2	IMP	Membrana impermeabilizzante	0,005	1200	1000	0,17	0,029
3	ISO	Pannello isolante in XPS	0,05	40	1450	0,034	1,471
4	PLA	Membrana in polietilene	0,002	980	1799	0,5	0,004
5	CLS	Sottofondo in CLS	0,1	2000	1000	1,4	0,071
6	ISO	Pannello isolante in XPS	0,04	40	1450	0,034	1,176
7	CLS	Sottofondo in CLS	0,03	2000	1000	1,4	0,021
8	PAV	Pavimentazione in pietra arenaria	0,02	2300	841	1,3	0,015

Tabelle 5.24: Analisi e risultati sulle prestazioni igrotermiche della fondazione

PARETE ESTERNA

DATI GENERALI	
Spessore	0,64 m
Massa superficiale	1550 Kg/m ²
Resistenza totale	5,46 m ² K/W
Trasmittanza totale	0,183 W/m²K (< 0,26)

PARAMETRI DINAMICI	
Fattore di attenuazione	0,025
Sfasamento	18,3h
Capacità termica areica interna	4,56 KJ/m ² K
Trasmittanza periodica	0,005 W/m ² K



VERIFICA FORMAZIONE DI MUFFE, CONDENSA SUPERFICIALE E INTERSTIZIALE			
	Rischio formazione muffa	Rischio formazione condensa superficiale	Rischio formazione condensa interstiziale
Mese critico	Dicembre	Gennaio	Gennaio
Fattore di temperatura	0,704	0,543	0,547
Resistenza minima accettabile (m ² K/W)	0,845	0,547	/
Verifica limite	verificato	verificato	verificato

STRATIGRAFIA							
		Materiale	Spessore (m)	Massa volumica (Kg/m ³)	Capacità termica specifica (J/KgK)	Conducibilità (W/mK)	Resistenza (m ² K/W)
1	MUR	Muratura in pietra naturale	0,6	2500	1000	2,4	0,250
2	INT	Rasatura in malta	0,03	1400	1000	0,7	0,043
3	ISO	Microcappotto nanotecnologico Manticeramic	0,01	800	1290	0,002	5

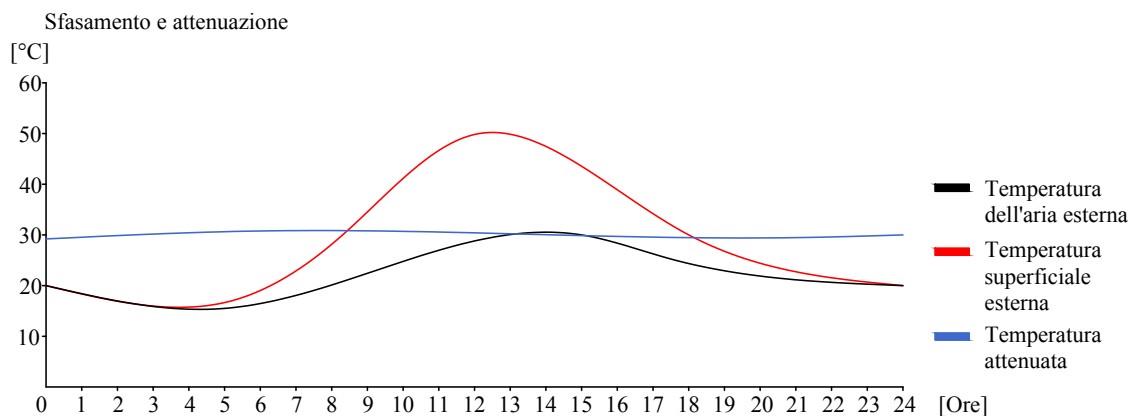
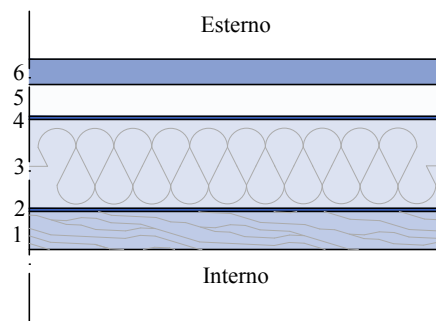


Tabelle 5.25: Analisi e risultati sulle prestazioni igrotermiche delle pareti esterne

SOLAIO DI COPERTURA

DATI GENERALI	
Spessore	0,30 m
Massa superficiale	106,7 Kg/m ²
Resistenza totale	5,08 m ² K/W
Trasmittanza totale	0,197 W/m²K (< 0,22)

PARAMETRI DINAMICI	
Fattore di attenuazione	0,591
Sfasamento	7,9h
Capacità termica areica interna	35,88 KJ/m ² K
Trasmittanza periodica	0,116 W/m ² K



VERIFICA FORMAZIONE DI MUFFE, CONDENZA SUPERFICIALE E INTERSTIZIALE			
	Rischio formazione muffa	Rischio formazione condensa superficiale	Rischio formazione condensa interstiziale
Mese critico	Dicembre	Gennaio	Gennaio
Fattore di temperatura	0,705	0,547	0,547
Resistenza minima accettabile (m ² K/W)	0,848	0,552	/
Verifica limite	verificato	verificato	verificato

STRATIGRAFIA							
		Materiale	Spessore (m)	Massa volumica (Kg/m ³)	Capacità termica specifica (J/KgK)	Conducibilità (W/mK)	Resistenza (m ² K/W)
1	LEG	Legname 500Kg/m ³	0,06	500	1598	0,13	0,462
2	IMP	Membrana impermeabilizzante	0,005	1100	1000	0,23	0,022
3	ISO	Pannello isolante in EPS	0,14	40	1402	0,032	4,375
4	IMP	Membrana traspirante	0,005	1100	1000	0,23	0,022
5	INA	Camera di ventilazione	0,05	1	1004	0,481	0,1
6	ROC	Piagne in arenaria	0,04	1500	1000	0,850	/

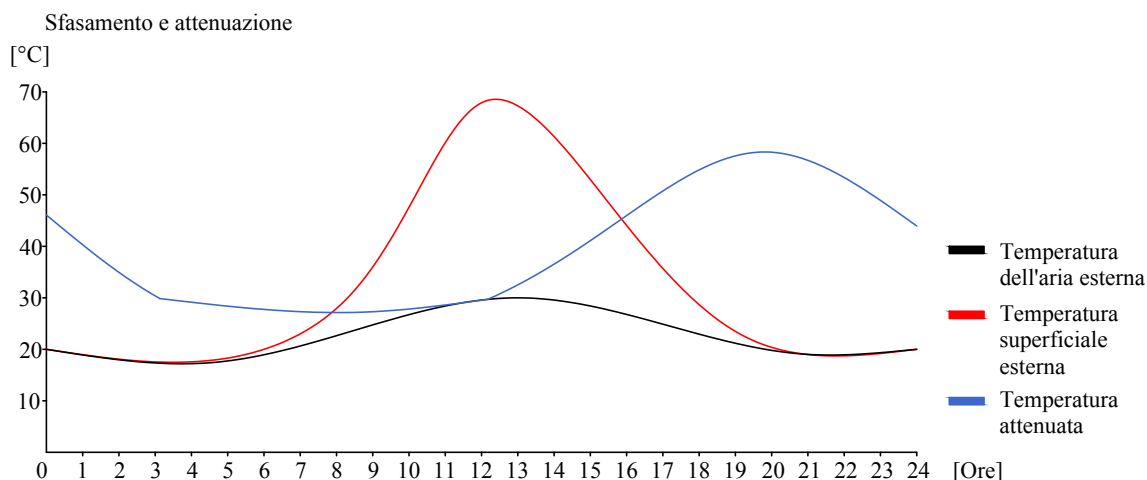


Tabelle 5.26: Analisi e risultati sulle prestazioni igrotermiche della copertura

5.4 INTERVENTI PROPOSTI SUGLI ELEMENTI TRASPARENTI DI CHIUSURA

D1-D1.1-D1.2

La struttura di chiusura trasparente presa in considerazione è un infisso vetrato storico a doppia anta in legno databile a inizio '900. L'apertura di forma rettangolare (103x180cm) viene definita da un architrave in travetti di legno, cornice in pietra e piedritti in pietra. Alloggiati qui, troviamo un telaio mobile interno in legno, composto da un vetro singolo, listelli in legno, cardini, bandelle metalliche e scuri a tagliere in legno.

Dal punto di vista delle prestazioni termiche, l'infisso presenta due criticità. La prima dovuta alla conformazione dell'apertura, poiché essa prevede la diminuzione dello spessore murario in corrispondenza degli infissi, nelle cosiddette nicchie. Secondo aspetto è la trasmittanza dell'infisso vetrato, ritenuta non conforme alla normativa vigente.

Importante nelle considerazioni eseguite per l'individuazione della soluzione di intervento ottimale è l'attenzione al mantenimento dei caratteri materici e formali degli infissi esistenti.

In questo caso si è optato per il fissaggio di un secondo infisso vetrato, con doppio vetro e telaio di spessore inferiore rispetto a quello esistente. Conservando e sfruttando il cardine esistente come unica cerniera di apertura e le bandelle metalliche, si ottiene un'unica anta composta dai due infissi collegati.

Dall'interno dell'abitazione, il nuovo infisso ci permette di osservare il telaio originale, mentre dall'esterno, scuri e infisso esistente saranno completamente visibili.

Per l'efficientamento energetico, oltre all'apporto del nuovo infisso, è stato eseguito uno scavo della nicchia per l'inserimento di materiale isolante XPS e la rasatura con miscela nanotecnologica MANTICERAMIC. I risultati del calcolo delle trasmittanze dello stato di fatto e dello stato di progetto vengono riportati nelle rispettive tavole.

5.5 INTERVENTI PROPOSTI SUGLI ELEMENTI OPACHI DI CHIUSURA

E1-E1.1

La prima struttura di chiusura opaca presa in considerazione è un portone di servizio a doppia anta in legno con sopra luce in vetro. L'apertura viene definita da piedritti e architrave in pietra mentre il sopra luce viene incorniciato da un arco ribassato in mattoni disposti a taglio.

Il portone vero e proprio si presenta a due ante composte da un doppio strato di pannelli in legno, congiunti da un sistema di bandelle sia interne che esterne e gangheri murati.

La soluzione proposta per questo intervento prevede l'impiego di sottili pannelli di materiale isolante XPS posti in adesione al portone originario e chiusi da pannelli in legno. Attraverso il mantenimento dei gangheri e l'utilizzo delle bandelle esistenti, modificate per accogliere il nuovo spessore, è possibile operare sulla struttura esistente. Questa soluzione ci consente di mettere in atto un miglioramento delle prestazioni energetiche senza alterare i caratteri formali della chiusura, sia internamente che esternamente.

E2-E2.1

La seconda struttura di chiusura opaca è un portone in legno per edificio ad uso produttivo. La struttura in legno segue la forma dell'apertura, caratterizzata da un arco ribassato in mattoni posti a taglio. Il portone

si presenta a due ante composte da doppio strato di pannelli in legno. La componente metallica in bandelle esterne e interne e i gangheri costituiscono gli elementi predisposti alla connessione con la muratura.

A differenza del caso precedente, la soluzione adottata prevede l'apporto di un nuovo infisso a doppio vetro distaccato dal portone esistente. In questo modo non si dovrà intaccare il portone originario a meno dell'inversione della direzione di apertura tramite spostamento del cardine.

Il nuovo infisso, oltre a permettere l'osservazione del portone in legno permette anche all'efficientamento della nicchia nel suo complesso.

I risultati del calcolo delle trasmittanze dello stato di fatto e dello stato di progetto vengono riportati nelle rispettive tavole.

6. CONSIDERAZIONI E CONCLUSIONI

Il percorso sviluppato da questa Tesi ha permesso di affrontare il tema della riqualificazione degli edifici storici in sasso dell'Appennino tosco-emiliano fornendo un approccio sistematico, indirizzato all'analisi conoscitiva del manufatto, alla valutazione delle vulnerabilità e all'individuazione di tecniche di intervento coerenti con i principi riportati.

In particolare, l'analisi conoscitiva ha permesso di determinare i caratteri materici, costruttivi e tipologici dell'aerea geomateriale presa in considerazione. Attraverso il modello interpretativo della triade vitruviana si è voluto comprendere il meccanismo che ha portato alla nascita ed evoluzione del tipo edilizio, traducendolo come risultato dell'interazione fra *Venustas*, *Firmitas* e *Utilitas*. I tipi individuati sono stati poi descritti sotto il punto di vista dei materiali, delle tecniche costruttive, delle soluzioni ricorrenti dell'epoca e del linguaggio architettonico.

Le informazioni individuate nella prima fase e l'insieme della letteratura tecnica-manualistica raccolta, ha successivamente dato luogo all'analisi delle prestazioni energetiche e del comportamento strutturale degli edifici in muratura. Lo studio ha fornito gli strumenti essenziali per comprendere il

funzionamento del manufatto sotto il profilo strutturale, evidenziando i meccanismi di danno locale e di comportamento globale sotto azioni orizzontali e sotto il profilo energetico, tramite l'analisi delle prestazioni igrotermiche.

Il quadro fornito ha permesso di effettuare le diagnosi relative alle vulnerabilità ricorrenti in questa tipologia di manufatto.

Successivamente sono stati messi in evidenza i criteri di intervento e i livelli prestazionali che gli edifici devono fornire, con particolare riferimento al quadro normativo vigente in materia di adeguamento sismico ed energetico.

I dati e le informazioni raccolti sono risultati fondamentali per fornire un quadro generale delle soluzioni di intervento, con i relativi vantaggi e svantaggi dal punto di vista delle prestazioni e della invasività dell'operazione. Ciò ha permesso di delineare una serie di interventi rivolti alle nodalità critiche, con l'obiettivo di fornire un approccio compatibile ed efficiente alla risoluzione delle vulnerabilità.

Un aspetto centrale ha riguardato l'impiego di tecniche e materiali innovativi come miscele nanotecnologiche per la coibentazione dell'involucro edilizio o sistemi non convenzionali per il controllo dei flussi termo-igrometrici. L'intento è stato quello di riflettere sulle potenzialità offerte dalla ricerca nel campo del recupero del patrimonio edilizio e sulle modalità di implementazione

di tali tecniche.

I risultati ottenuti evidenziano le possibilità di miglioramento delle prestazioni sotto il profilo meccanico, termico, igrometrico e di conservazione dei materiali. Il lavoro svolto risulta coerente con i principi definiti e i livelli prestazionali minimi richiesti da normativa.

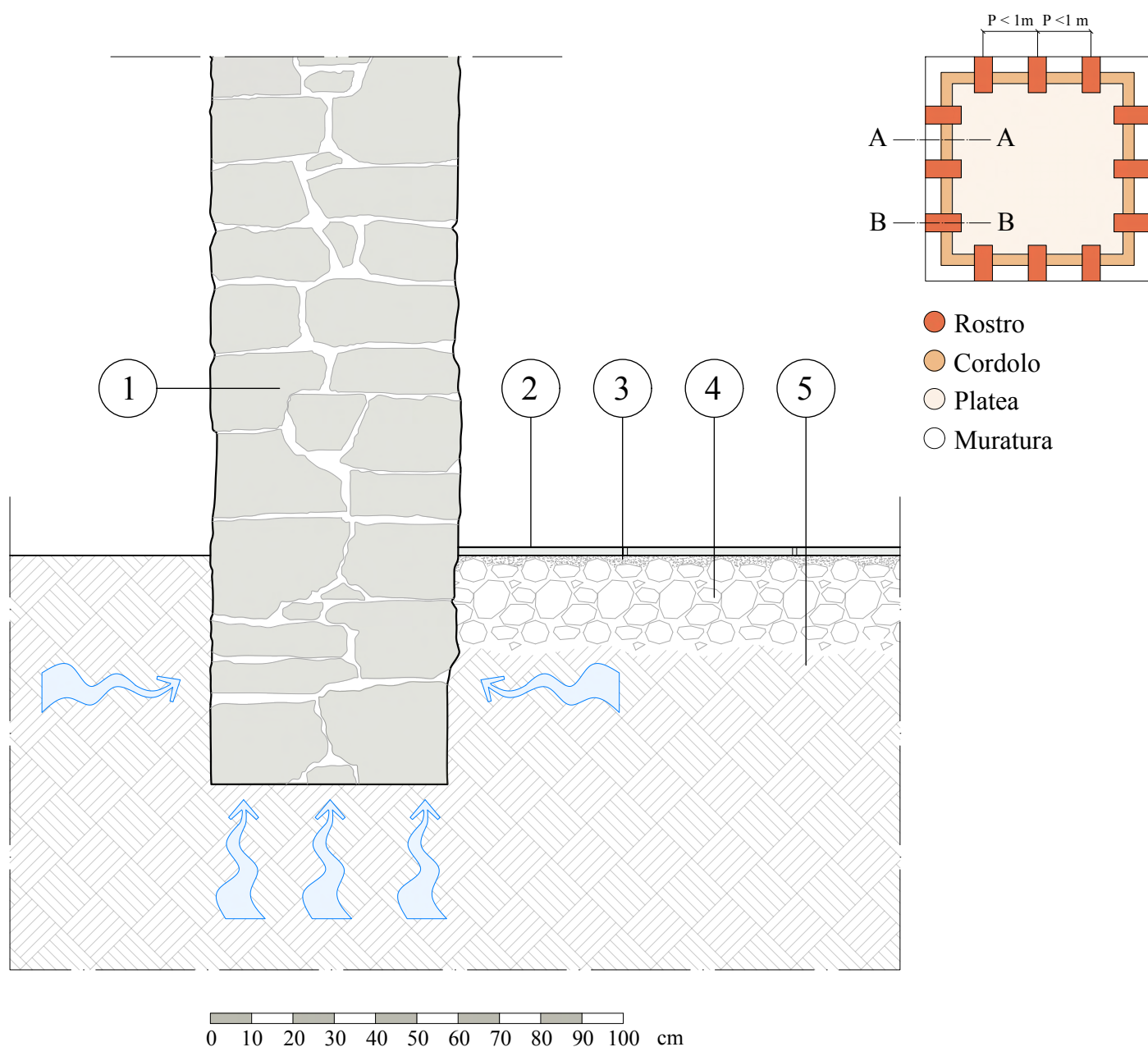
Sebbene i risultati siano soddisfacenti rimane comunque evidente la necessità di ulteriori verifiche e sperimentazioni, volte a valutare i meccanismi di funzionamento in condizioni reali, specialmente per quanto riguarda le soluzioni basate su tecniche innovative.

In questa prospettiva la Tesi intende porsi come contributo tecnico e operativo nel recupero dei manufatti in questione, fornendo un quadro metodologico prontamente utilizzabile. L'auspicio è quello di stimolare nuove riflessioni orientate ad un approccio sostenibile e indirizzato all'innovazione, nel rispetto del patrimonio locale e della sua complessità storico-testimoniale.

APPENDICE 1: NODALITA' CRITICHE

TAVOLA A1_ante

STATO DI FATTO Nodo di fondazione



Stratigrafia

01. Muratura portante in pietra naturale 60cm. Assenza di allargamento in fondazione
02. Pavimentazione in arenaria 3cm
03. Strato di allettamento in ghiaia 20 ÷ 50 mm
04. Strato di allettamento in ghiaia 50 ÷ 100 mm
05. Terreno

Inadeguatezze Prestazionali

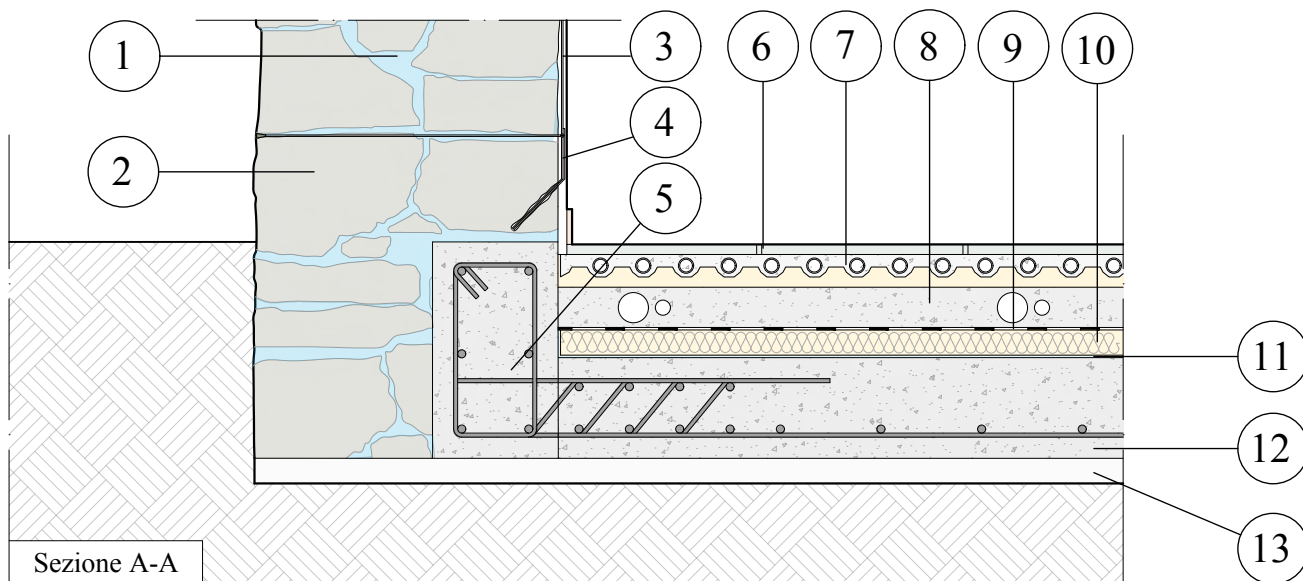
- a. Superficie della muratura a contatto col terreno insufficiente rispetto ai carichi trasmessi. Assenza di continuità strutturale e rigidità orizzontale
- b. Insufficiente capacità portante del terreno
- c. Risalita di umidità capillare
- d. Prestazioni termoigrometriche insufficienti

Soluzioni progettuali

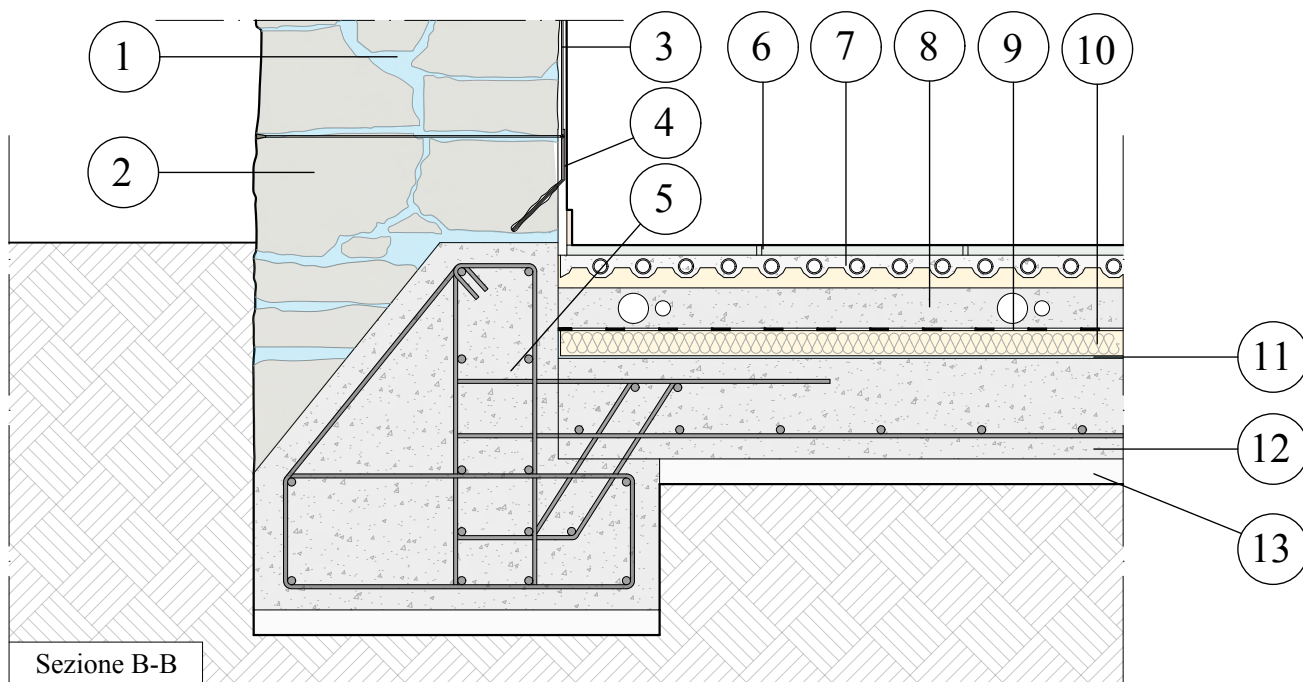
- a. Allargamento fondazione con cordolo perimetrale e rostri in cca: collaborazione tra nuova e vecchia fondazione definisce un comportamento monolitico atto a diffondere le tensioni in modo omogeneo
- b. Ristilatura armata dei giunti tramite trefoli e connettori: fornisce un efficace confinamento e migliora le resistenze meccaniche
- c. Taglio chimico e utilizzo di Cls idrofobico: impediscono risalita capillare di umidità dal terreno
- d. Membrana traspirante e barriera al vapore: favoriscono l'allontanamento di umidità dallo spessore evitando condensa interstiziale
- e. Isolante XPS e microcappotto: agevolano il corretto isolamento termico dell'involucro edilizio

TAVOLA A1_post

STATO DI PROGETTO Nodo di fondazione



0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 cm



0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 cm

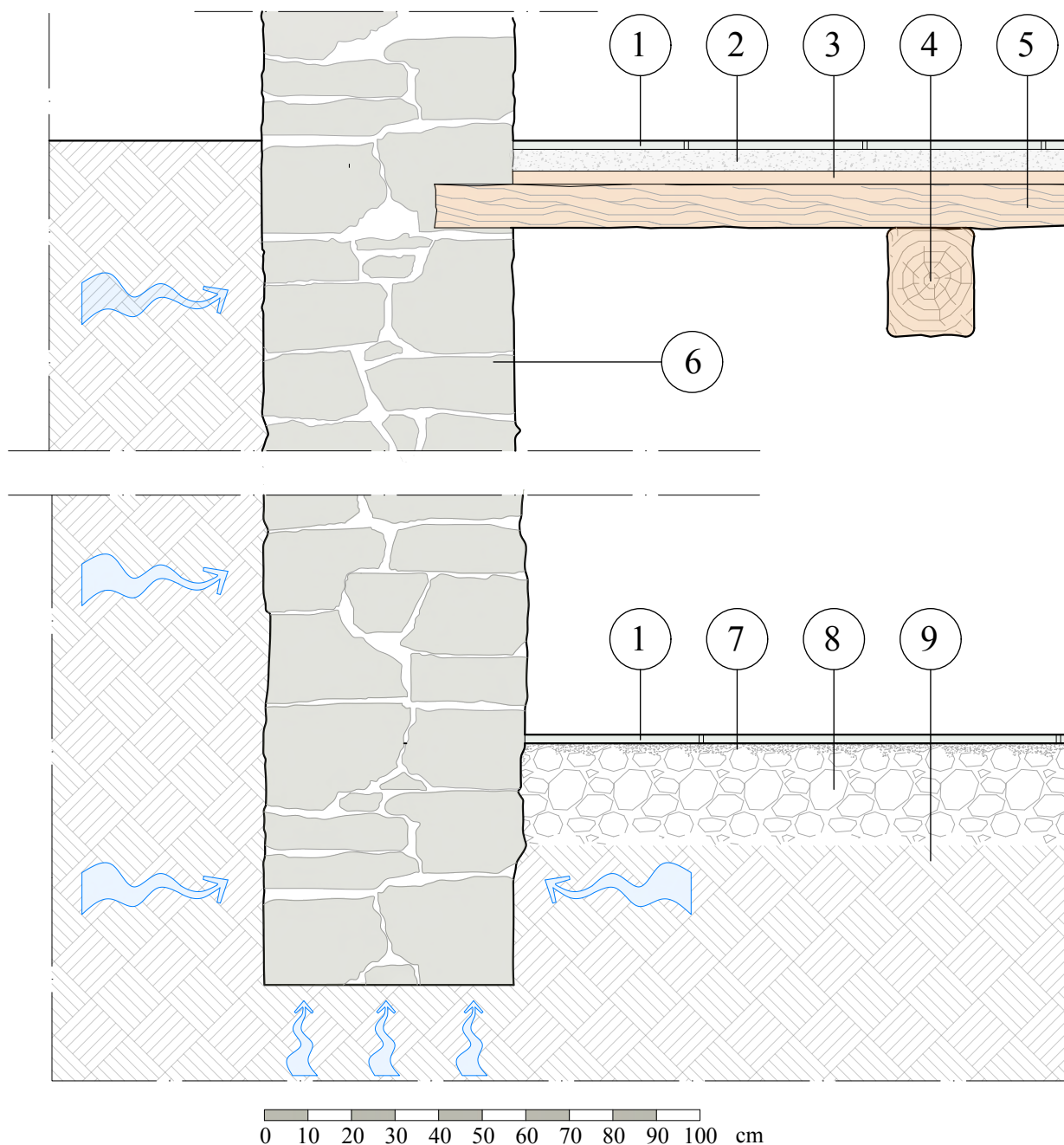
Stratigrafia

01. Taglio chimico idrorepellente in resine silossaniche
02. Muratura portante in pietra naturale 60cm
03. Ristilatura armata tramite trefolo in acciaio Inox Aisi 316 Φ 5 e connettore in acciaio Inox Aisi 316 passante filettato con anello e piastra. Stuccatura e finitura tramite microcappotto interno a media densità Manticeramic
04. Boccola troncoconica in acciaio inox per fissaggio maglia metallica
05. Cordolo perimetrale di fondazione 45x25cm in calcestruzzo armato C 35/45 idrofobico con barre longitudinali Φ 16 e staffe Φ 8 (sezione A).
Rostro in calcestruzzo armato C 35/45 idrofobico con barre longitudinali Φ 16 e staffe Φ 8 (sezione B).

06. Pavimentazione in arenaria 2cm
07. Sistema di climatizzazione radiante a pavimento con pannello isolante bugnato in polistirene espanso 7cm
08. Massetto in cls alleggerito per inserimento impianti 8cm
09. Membrana traspirante 0,5cm
10. Isolante XPS 5cm
11. Barriera al vapore 0,3cm
12. Platea di fondazione in calcestruzzo idrofobico C35 /45 20cm con rete elettrosaldata Φ 8 /20x20cm
13. Magrone di fondazione in cls 6cm

TAVOLA A2_ante

STATO DI FATTO Nodo di fondazione con piano completamente interrato



Stratigrafia

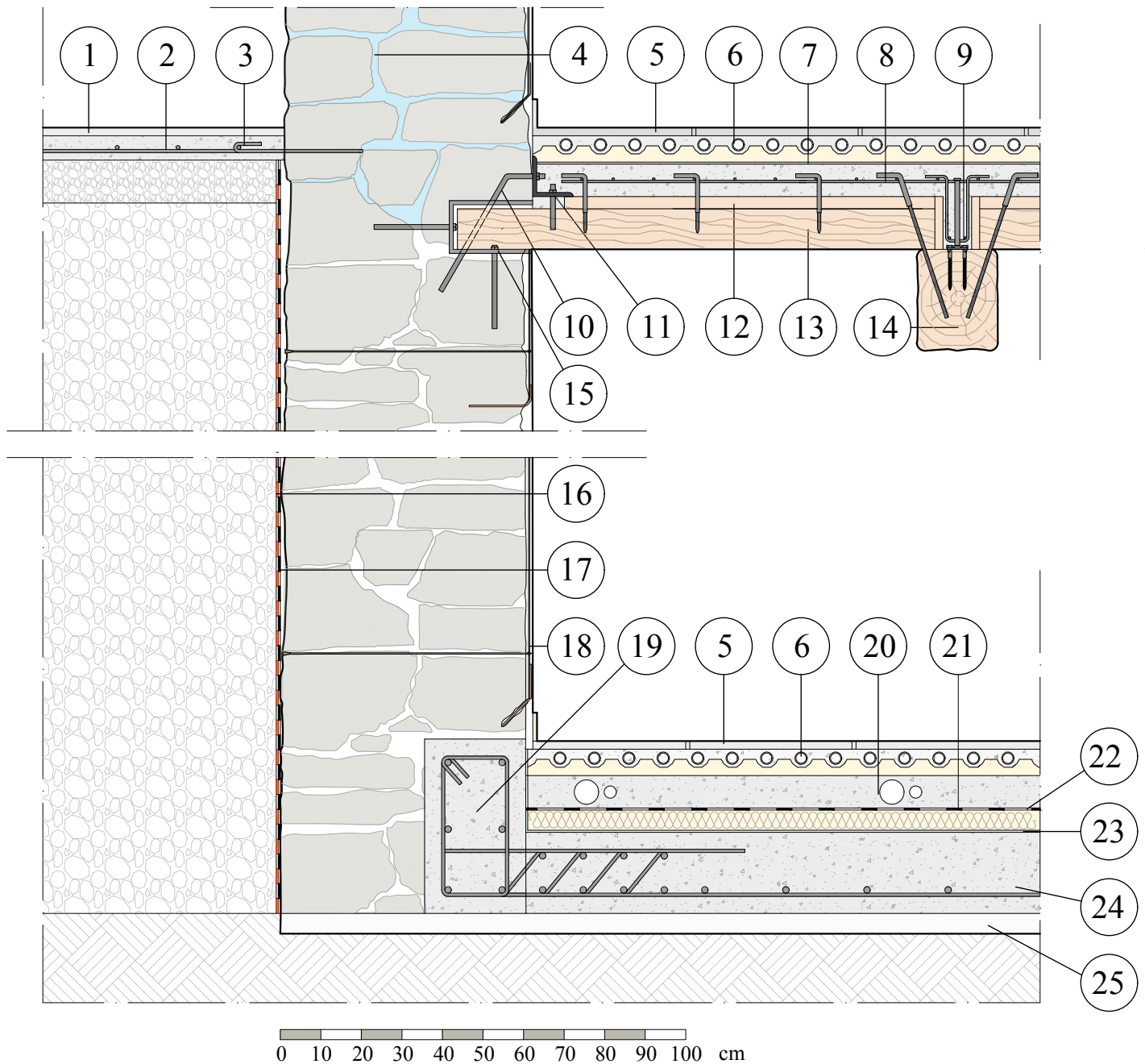
01. Pavimentazione in arenaria
02. Strato di allettamento 5cm
03. Assito in tavole lignee 3cm
04. Orditura principale in legno 20x25cm
05. Orditura secondaria in legno 10x10cm
06. Muratura portante in pietra naturale 60cm. Assenza di allargamento in fondazione
07. Strato di allettamento in ghiaia 20 ÷ 50 mm
08. Strato di allettamento in ghiaia 50 ÷ 100 mm
09. Terreno

Inadeguatezze Prestazionali

- a. Superficie della muratura a contatto col terreno insufficiente rispetto ai carichi trasmessi. Assenza di continuità strutturale e rigidità orizzontale
- b. Insufficiente capacità portante del terreno
- c. Risalita di umidità capillare
- d. Prestazioni termoigrometriche insufficienti

Soluzioni progettuali

- a. Allargamento fondazione con cordolo perimetrale e rostri in cca: collaborazione tra nuova e vecchia fondazione definisce un comportamento monolitico atto a diffondere le tensioni in modo omogeneo
- b. Ristilatura armata dei giunti tramite trefoli e connettori: fornisce un efficace confinamento e migliora le resistenze meccaniche
- c. Taglio chimico e utilizzo di Cls idrofobico: impediscono risalita capillare di umidità dal terreno
- d. Membrana traspirante e barriera al vapore: favoriscono l'allontanamento di umidità dallo spessore evitando condensa interstiziale
- e. Isolante XPS e microcappotto: agevolano il corretto isolamento termico dell'involucro edilizio

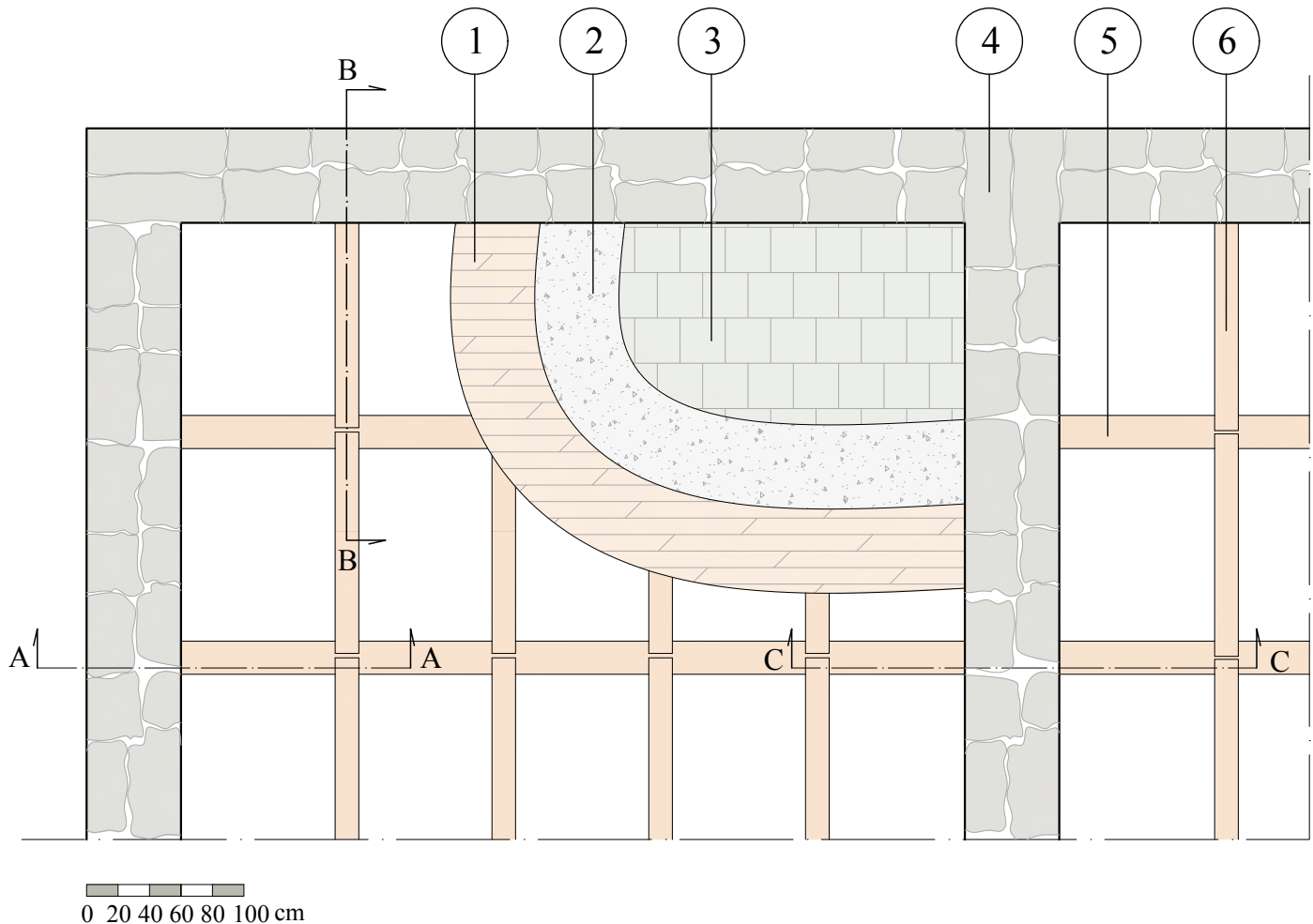


Stratigrafia

- | | |
|--|---|
| 01. Pavimentazione da esterno in cotto 3cm | 14. Orditura secondaria in legno 10x10cm |
| 02. Massetto con rete elettrosaldata 5cm | 15. Scarpa metallica sp 1cm con barre di ancoraggio $\Phi 12$ |
| 03. Connettore $\Phi 10$ | 16. Membrana bugnata antiradice 0,5cm |
| 04. Taglio chimico idrorepellente in resine silossaniche | 17. Membrana bituminosa impermeabilizzante per murature |
| 05. Pavimentazione in arenaria 3cm | 18. Ristilatura armata tramite trefolo in acciaio Inox Aisi 316 $\Phi 5$ e connettore in acciaio Inox Aisi 316 con anello e piastra. |
| 06. Sistema di climatizzazione radiante a pavimento con pannello isolante bugnato in polistirene espanso 7cm | Stuccatura e finitura tramite microcappotto interno a media densità Manticeramic |
| 07. Materassino in polietilene espanso per l'isolamento acustico a calpestio 0,5cm | 19. Cordolo perimetrale di fondazione 45x25cm in calcestruzzo armato C 35/45 idrofobico con barre longitudinali $\Phi 16$ e staffe $\Phi 8$ |
| 08. Massetto in cls con rete elettrosaldata $\Phi 6$ 10x10cm | 20. Massetto in cls alleggerito per inserimento impianti 8cm |
| 09. Connettore tecnaria CTLmaxi con viti $\Phi 10$ e staffa $\Phi 6$ con ferri reggistaffa $\Phi 8$ | 21. Membrana traspirante 0,5cm: |
| 10. Barra filettata ad aderenza migliorata per ancoraggio cordolo-muratura in acciaio B450C $\Phi 12$ piegata a 30° | 22. Isolante XPS 5cm |
| 11. Cordolo perimetrale in acciaio S275 10x10x1cm | 23. Barriera al vapore 0,3cm |
| 12. Tavolato legno lamellare 3cm | 24. Platea di fondazione in calcestruzzo idrofobico C35 /45 20cm con rete elettrosaldata $\Phi 8$ /20x20cm |
| 13. Orditura principale in legno 20x25cm | 25. Magrone di fondazione in cls 6cm |

TAVOLA B1_ante

STATO DI FATTO Nodo interpiano



Stratigrafia

01. Assito in tavole 3cm
02. Strato di allettamento 5cm
03. Pavimentazione in arenaria 3cm
04. Muratura portante in pietra naturale 60cm.
05. Orditura principale in legno 20x25cm
06. Orditura secondaria in legno 10x10cm

Inadeguatezze Prestazionali

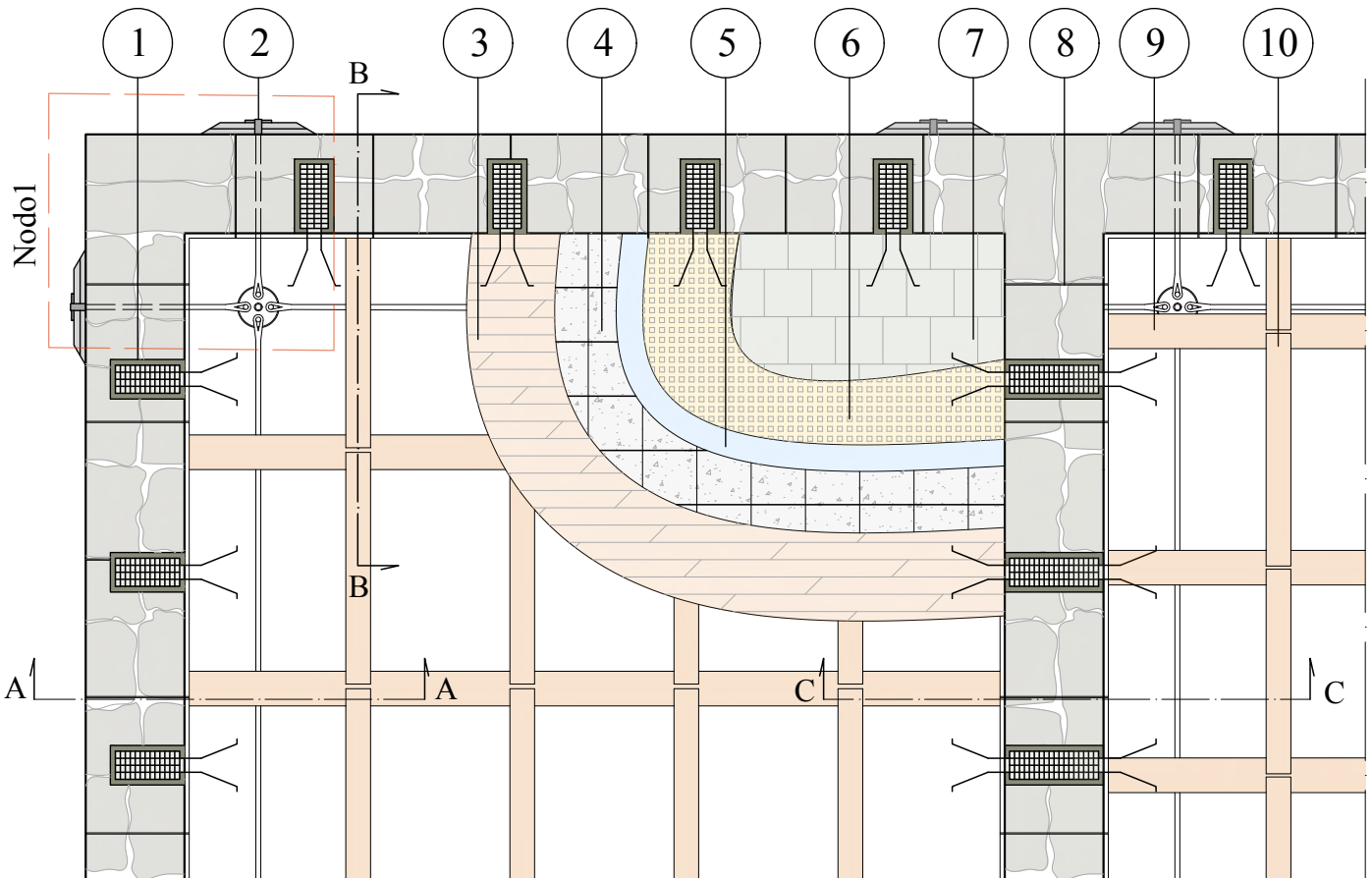
- a. Eccessiva deformabilità dell'orizzontamento ligneo
- b. Assenza di collegamenti fra elementi lignei
- c. Scarsa capacità dell'orditura di trasmettere uniformemente i crichi e rischio sfilamento delle travi dalle asole
- d. Prestazioni termo-acustiche insufficienti

Soluzioni progettuali

- a. Diatoni artificiali e soletta collaborante in cls: migliorano la rigidezza nel piano dell'orizzontamento e incrementano la collaborazione strutturale tra gli elementi
- b. Ristilatura armata dei giunti tramite trefoli e connettori: fornisce un efficace confinamento e migliora le resistenze meccaniche a taglio e compressione
- c. Tiranti e capochiavi: migliorano il grado di connessione tra pareti ortogonali e riduce la probabilità di ribaltamento fuori dal piano delle pareti
- d. Sistema di climatizzazione a pavimento con isolante in EPS, materassino anticalpestio e microcappotto: migliorano il comfort acustico e termico della struttura

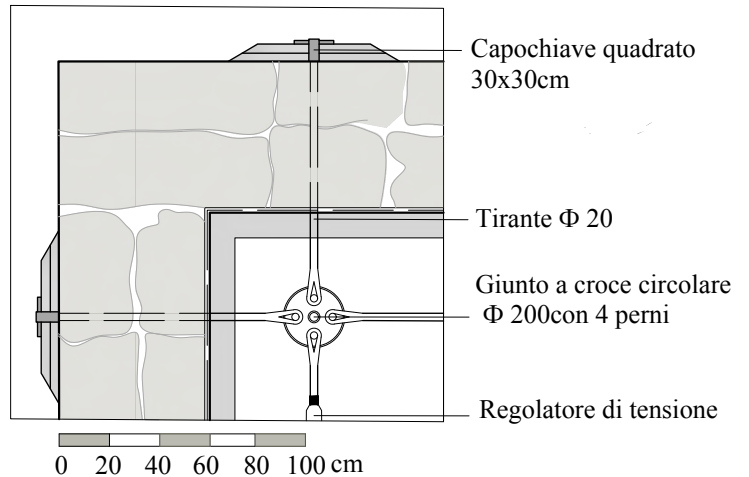
TAVOLA B1_post

STATO DI PROGETTO Nodo interpiano



0 20 40 60 80 100 cm

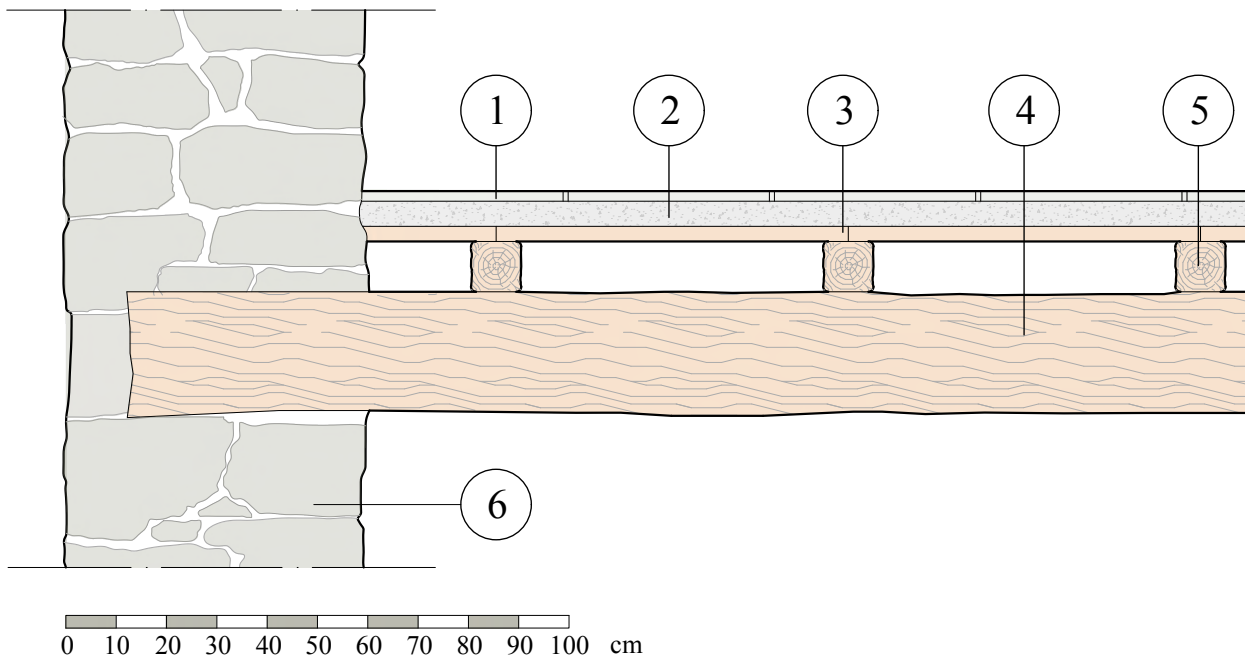
Nodo1



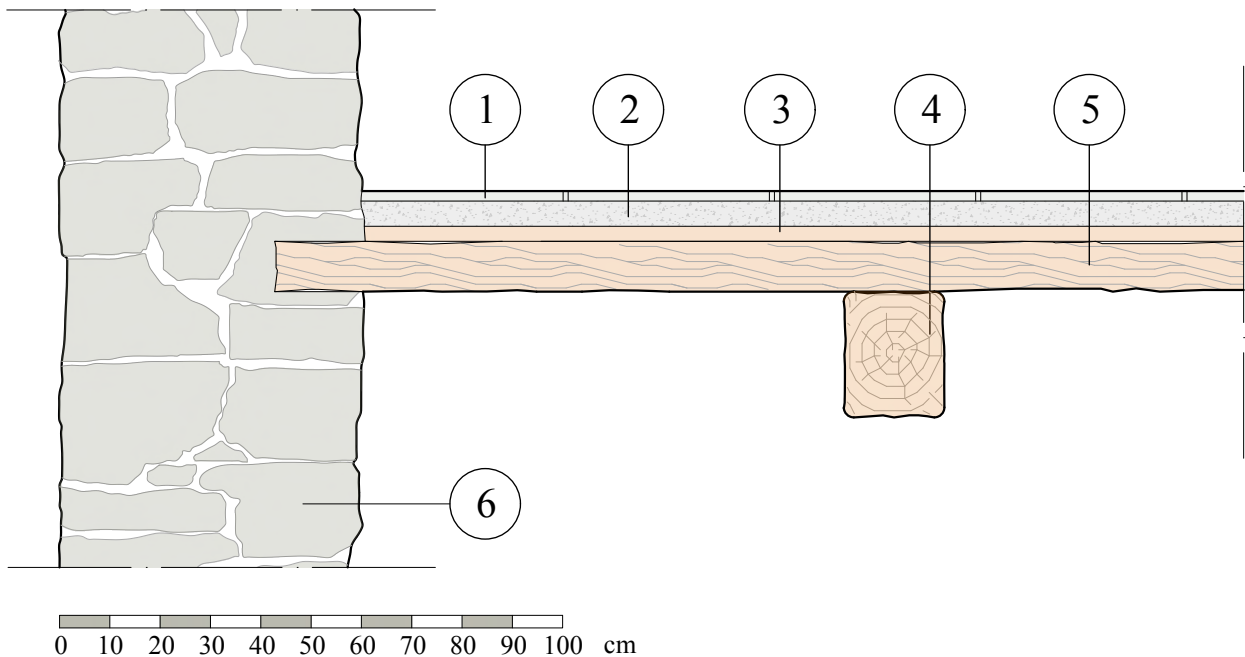
Stratigrafia

- | | |
|---|--|
| <p>01. Diatono artificiale in cca</p> <p>02. Sistema di tiranti con giunto a croce $\Phi 20$ e capochiave quadrato 30x30cm UNI EN 1090 in acciaio S275JR</p> <p>03. Tavolato ligneo 3cm</p> <p>04. Massetto collaborante in cls alleggerito con maglia metallica $\Phi 6$ 10x10cm</p> <p>05. Materassino in polietilene espanso per l'isolamento acustico a calpestio 0,5cm</p> <p>06. Sistema di climatizzazione radiante a pavimento con pannello isolante bugnato in polistirene espanso 7cm</p> <p>07. Pavimentazione in arenaria 3cm</p> | <p>08. Ristilatura armata tramite trefolo in acciaio Inox Aisi 316 $\Phi 5$ e connettore in acciaio Inox Aisi 316 con anello e piastra.</p> <p>09. Orditura principale in legno 20cmx25cm</p> <p>10. Orditura secondaria in legno 10x10</p> |
|---|--|

Sezione A-A



Sezione B-B



Stratigrafia

- 01. Pavimentazione in arenaria 3cm
- 02. Strato di allettamento 5cm
- 03. Assito in tavole lignee 3cm
- 04. Orditura principale 20x25cm
- 05. Orditura secondaria 10x10cm
- 06. Muratura portante in pietra naturale 60cm

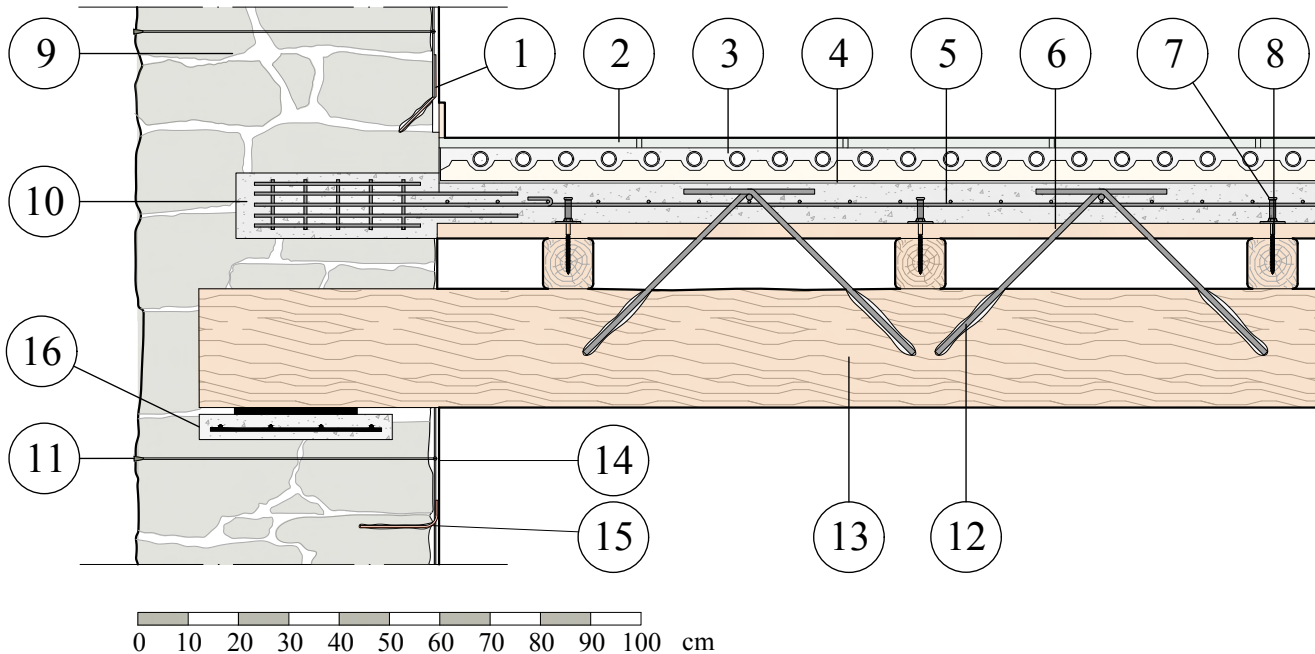
Inadeguatezze Prestazionali

- a. Eccessiva deformabilità dell'orizzontamento ligneo
- b. Assenza di collegamenti fra elementi lignei
- c. Scarsa capacità dell'orditura di trasmettere uniformemente i crichi e rischio sfilamento delle travi dalle asole
- d. Prestazioni termo-acustiche insufficienti

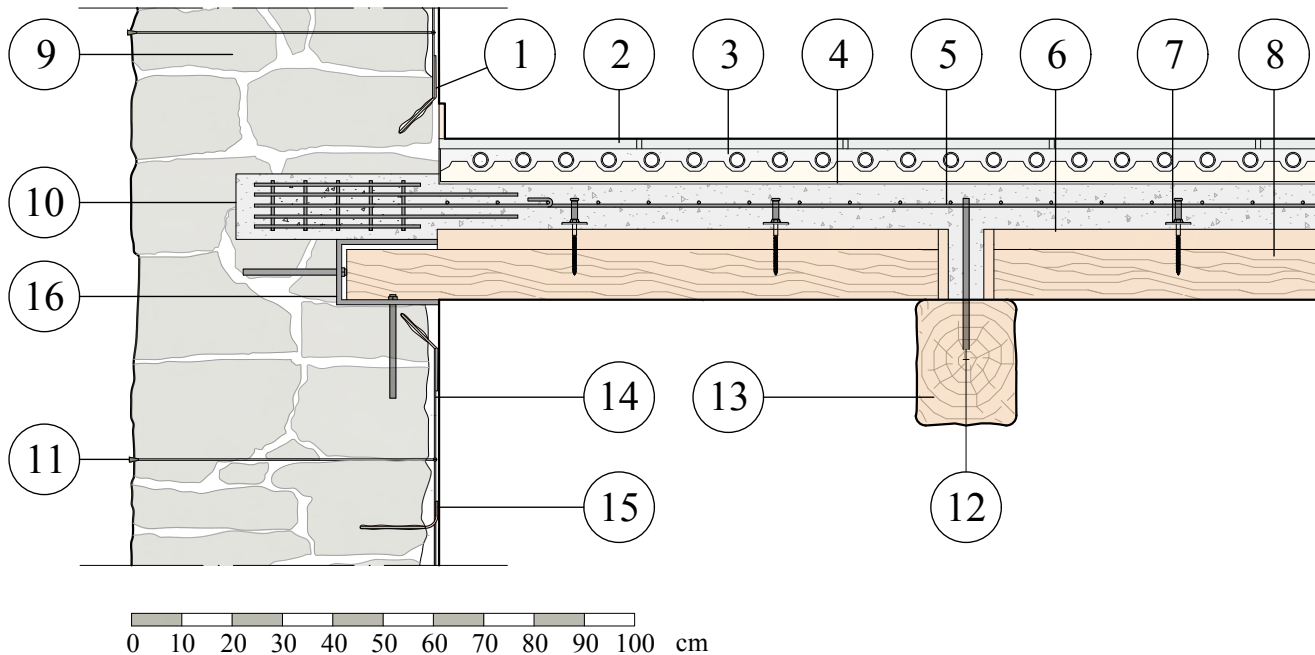
Soluzioni progettuali

- a. Diatoni artificiali e soletta collaborante in cls: migliorano la rigidità nel piano dell'orizzontamento e incrementano la collaborazione strutturale tra gli elementi
- b. Ristilatura armata dei giunti tramite trefoli e connettori: fornisce un efficace confinamento e migliora le resistenze meccaniche a taglio e compressione
- c. Tiranti e capochiavi: migliorano il grado di connessione tra pareti ortogonali e riduce la probabilità di ribaltamento fuori dal piano delle pareti
- d. Sistema di climatizzazione a pavimento con isolante in EPS, materassino anticalpestio e microcappotto: migliorano il comfort acustico e termico della struttura

Sezione A-A



Sezione B-B

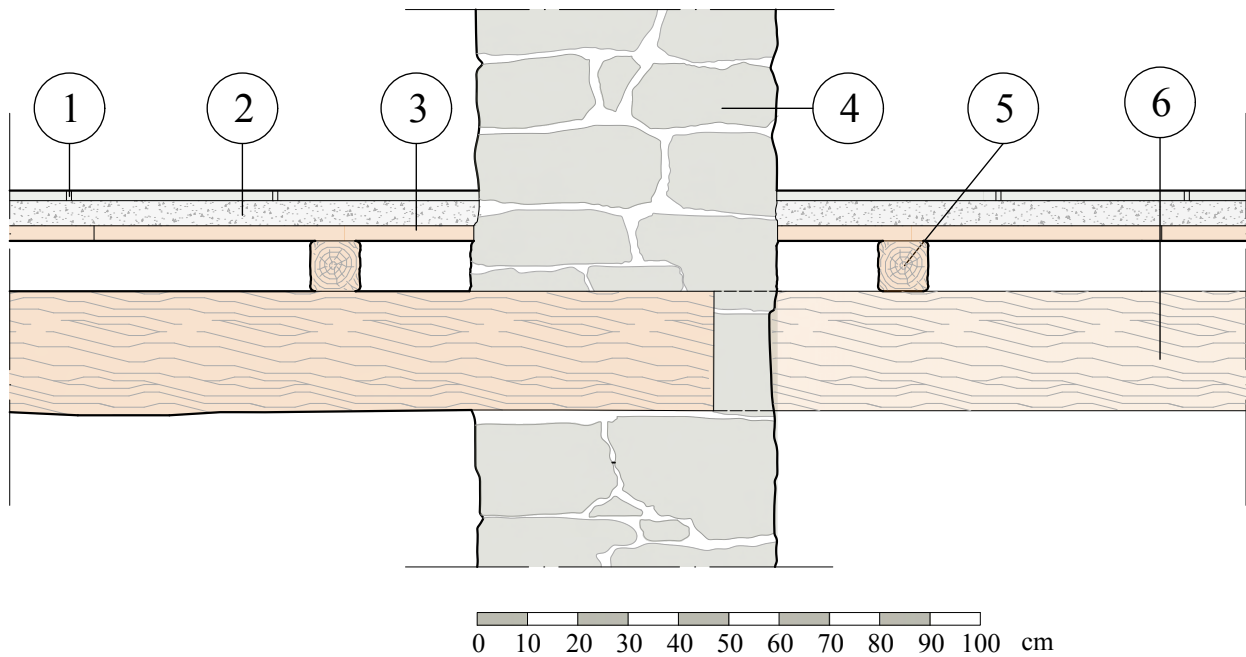


Stratigrafia

- 01. Boccola troncoconica in acciaio inox per fissaggio maglia metallica
- 02. Pavimentazione in arenaria 3cm
- 03. Sistema di climatizzazione radiante a pavimento con pannello isolante bugnato in polistirene espanso 7cm
- 04. Materassino in polietilene espanso per l'isolamento acustico a calpestio 0,5cm
- 05. Massetto in cls con rete elettrosaldata $\Phi 6$ 10x10cm
- 06. Tavolato legno lamellare 3cm
- 07. Connettore base per orditura secondaria con gambo $\Phi 10$ in acciaio
- 08. Orditura secondaria in legno 10x10cm
- 09. Muratura portante in pietra naturale 60cm
- 10. Diatono artificiale in cca 40x30x10cm con lunghezza di ancoraggio 20cm

- 11. Connettore in acciaio Inox Aisi 316 passante filettato con anello e piastra
- 12. Connettore a taglio $\Phi 12$ in foro $\Phi 16$ resinato
- 13. Orditura principale in legno 20x25cm
- 14. Ristilatura armata tramite trefolo in acciaio Inox Aisi 316 $\Phi 5$. Stuccatura e finitura tramite microcappotto interno a media densità Manticeramic ($\lambda=0,002$ W/mK)
- 15. Coinnettore a L in GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) per fissaggio ristilatura armata
- 16. Sezione A-A: Piastra metallica per centraggio orditura principale 2cm con appoggio su massetto in cls con rete elettrosaldata
Sezione B-B: scarpa metallica sp 1cm con barre di ancoraggio $\Phi 12$

Sezione C-C



Stratigrafia

- 01. Pavimentazione in arenaria 3cm
- 02. Strato di allettamento 5cm
- 03. Assito in tavole lignee 3cm
- 04. Muratura portante in pietra naturale 60cm
- 05. Orditura principale 20x25cm
- 06. Orditura secondaria 10x10cm

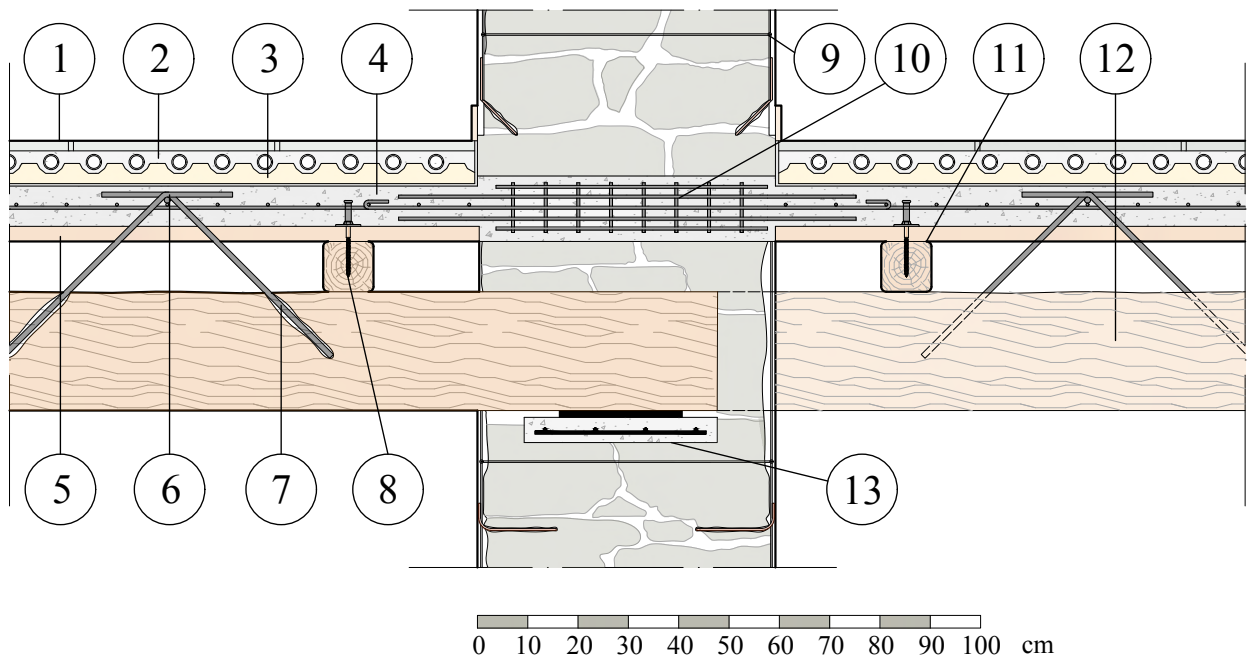
Inadeguatezze Prestazionali

- a. Eccessiva deformabilità dell'orizzontamento ligneo
- b. Assenza di collegamenti fra elementi lignei
- c. Scarsa capacità dell'orditura di trasmettere uniformemente i carichi e rischio sfilamento delle travi dalle asole
- d. Prestazioni termo-acustiche insufficienti

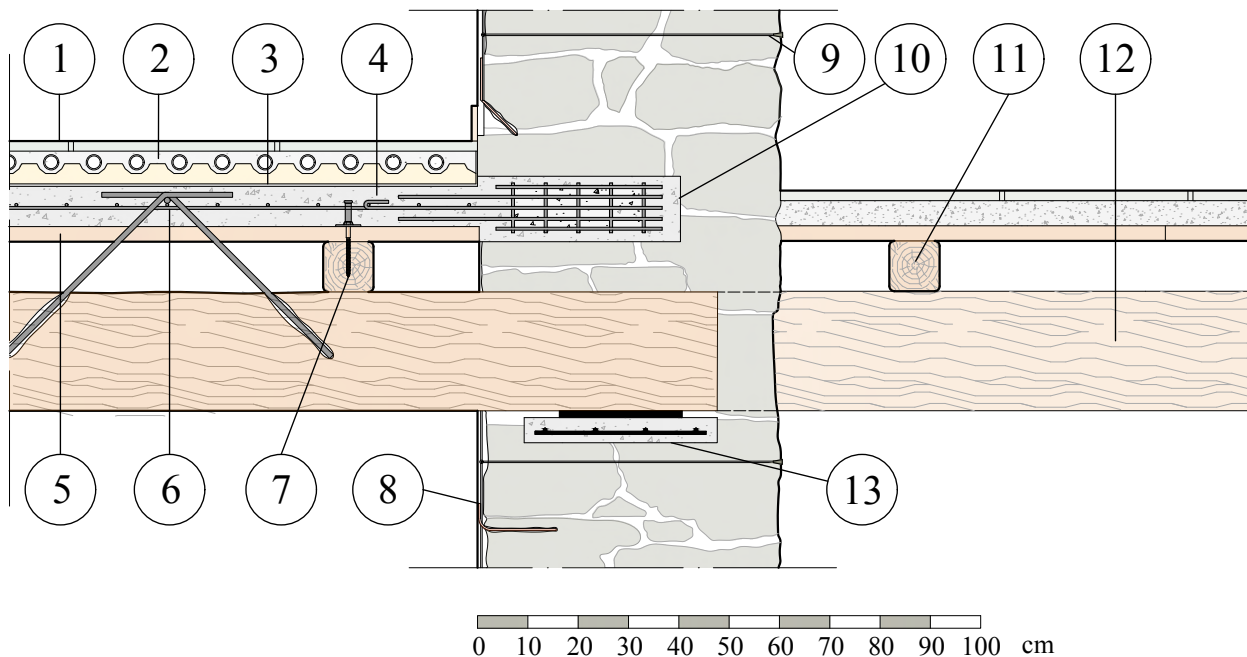
Soluzioni progettuali

- a. Diatoni artificiali e soletta collaborante in cls: migliorano la rigidità nel piano dell'orizzontamento e incrementano la collaborazione strutturale tra gli elementi
- b. Ristilatura armata dei giunti tramite trefoli e connettori: fornisce un efficace confinamento e migliora le resistenze meccaniche a taglio e compressione
- c. Tiranti e capochiavi: migliorano il grado di connessione tra pareti ortogonali e riduce la probabilità di ribaltamento fuori dal piano delle pareti
- d. Sistema di climatizzazione a pavimento con isolante in EPS, materassino anticalpestio e microcappotto: migliorano il comfort acustico e termico della struttura

Sezione C-C (1): entrambe le celle elementari soggette a riqualificazione



Sezione C-C (2): una cella elementare soggetta a riqualificazione

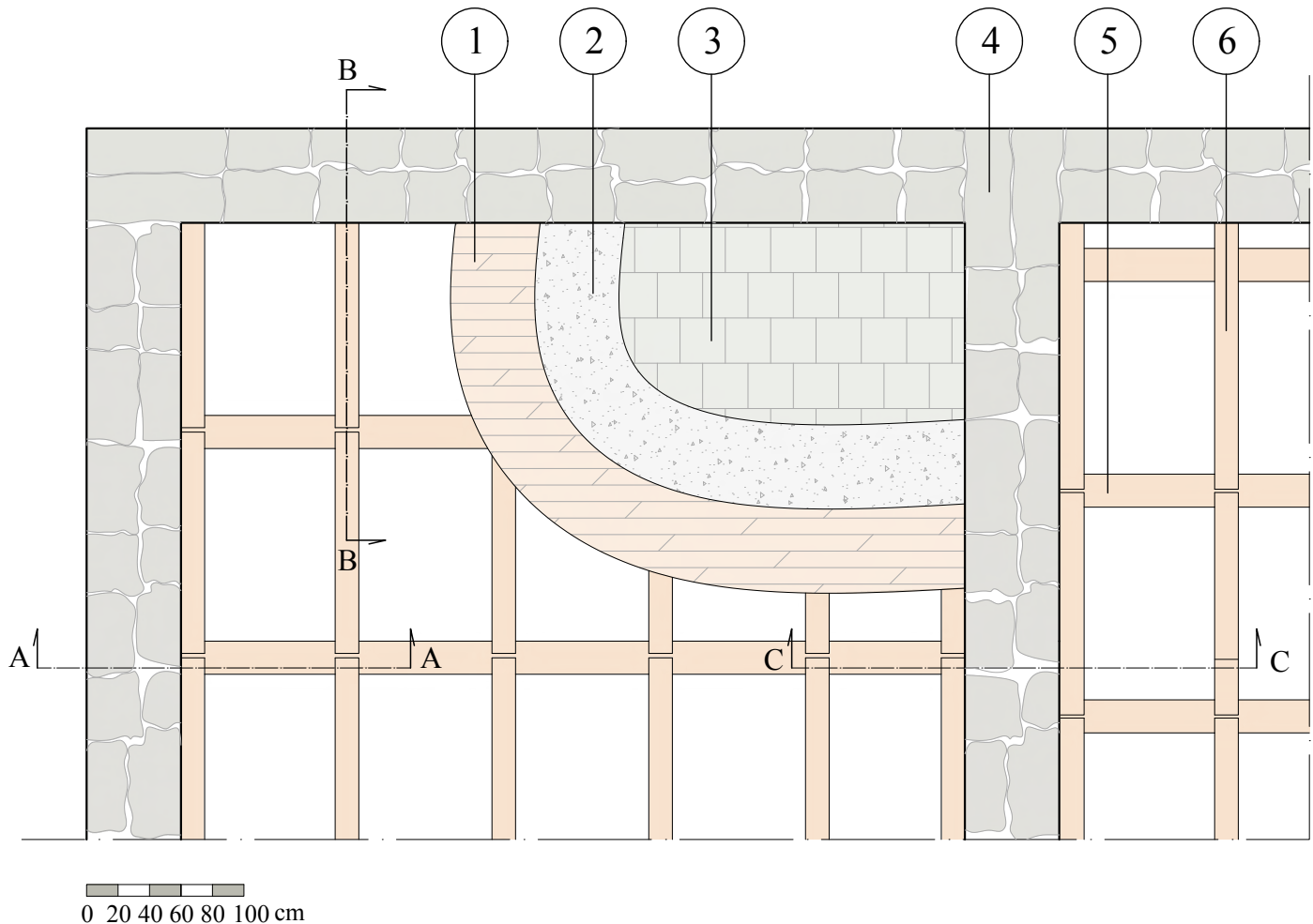


Stratigrafia

- | | |
|--|--|
| 01. Pavimentazione in arenaria 3cm | 09. Ristilatura armata tramite trefolo in acciaio Inox Aisi 316 Φ 5. Stuccatura e finitura tramite microcappotto interno a media densità Manticeramic |
| 02. Sistema di climatizzazione radiante a pavimento con pannello isolante bugnato in polistirene espanso 7cm | 10. (1)Diatono artificiale doppio in cca 60x30x10cm con lunghezza di ancoraggio 20cm |
| 03. Materassino in polietilene espanso per l'isolamento acustico a calpestio 0,5cm | (2)Diatono artificiale in cca 40x30x10cm con lunghezza di ancoraggio 20cm |
| 04. Massetto in cls con rete elettrosaldata Φ 6 10x10cm | 11. Orditura secondaria in legno 10x10cm |
| 05. Tavolato legno lamellare 3cm | 12. Orditura principale in legno 20x25cm |
| 06. Connettore a taglio Φ 12 in foro Φ 16 resinato | 13. Piastra metallica per centraggio orditura principale 2cm con appoggio su massetto in cls con rete elettrosaldata |
| 07. Connettore base per orditura secondaria con gambo Φ 10 in acciaio | |
| 08. Coinnettore a L in GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) per fissaggio ristilatura armata | |

TAVOLA B2_ante

STATO DI FATTO Nodo interpiano



Stratigrafia

01. Assito in tavole 3cm
02. Strato di allettamento 5cm
03. Pavimentazione in arenaria 3cm
04. Muratura portante in pietra naturale 60cm.
05. Orditura principale in legno 20x25cm
06. Orditura secondaria in legno 10x10cm

Inadeguatezze Prestazionali

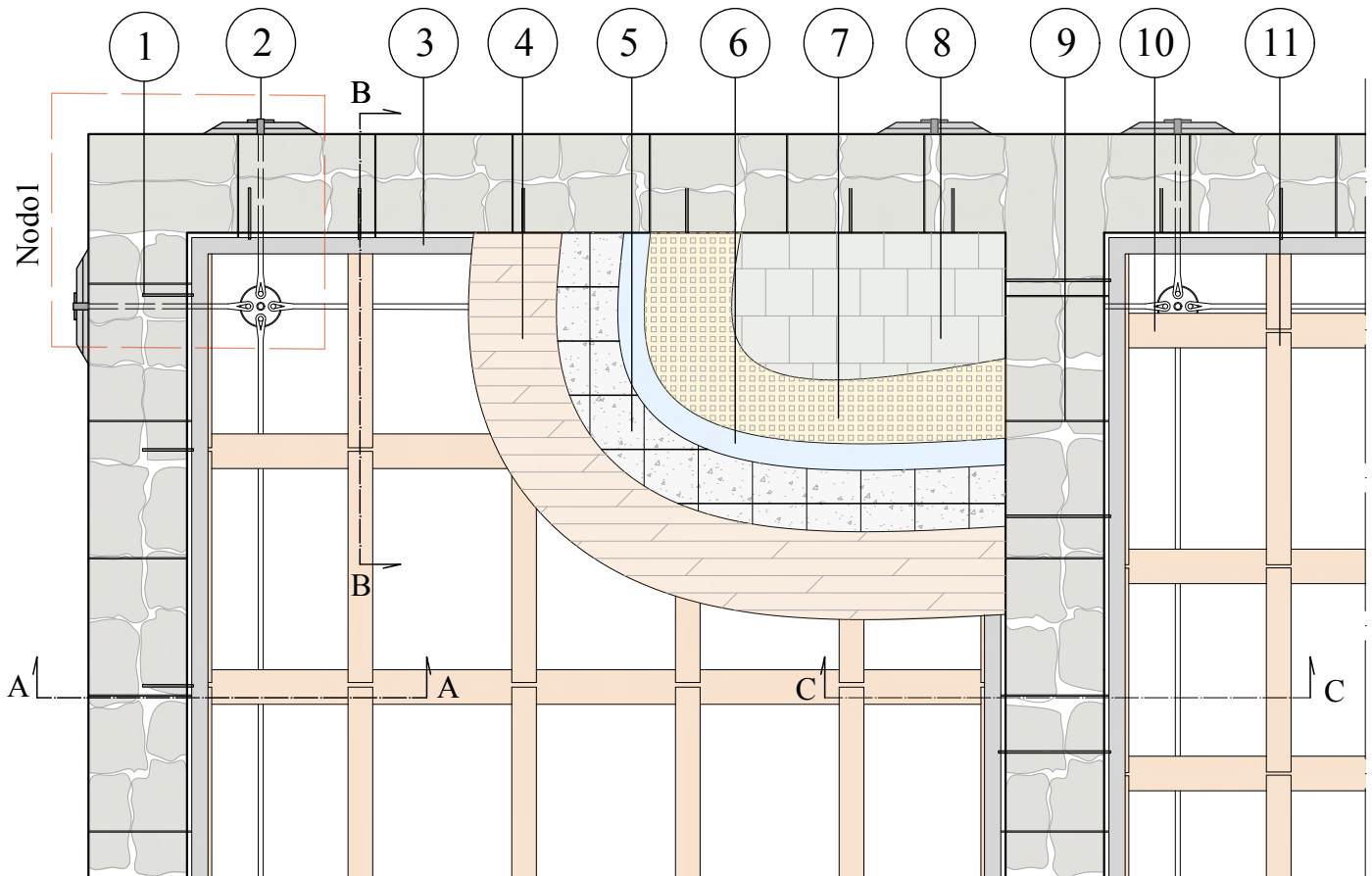
- a. Eccessiva deformabilità dell'orizzontamento ligneo
- b. Assenza di collegamenti fra elementi lignei
- c. Scarsa capacità dell'orditura di trasmettere uniformemente i crichi e rischio sfilamento delle travi dalle asole
- d. Prestazioni termo-acustiche insufficienti

Soluzioni progettuali

- a. Cordolo a "L" in acciaio, soletta collaborante in cls e connettori semplici e a taglio : migliorano la rigidità nel piano dell'orizzontamento e incrementano la collaborazione strutturale tra gli elementi
- b. Ristilatura armata dei giunti tramite trefoli e connettori: fornisce un efficace confinamento e migliora le resistenze meccaniche a taglio e compressione
- c. Tiranti e capochiavi: migliorano il grado di connessione tra pareti ortogonali e riduce la probabilità di ribaltamento fuori dal piano delle pareti
- d. Sistema di climatizzazione a pavimento con isolante in EPS , materassino anticalpestio e microcappotto: migliorano il confort acustico e termico della struttura

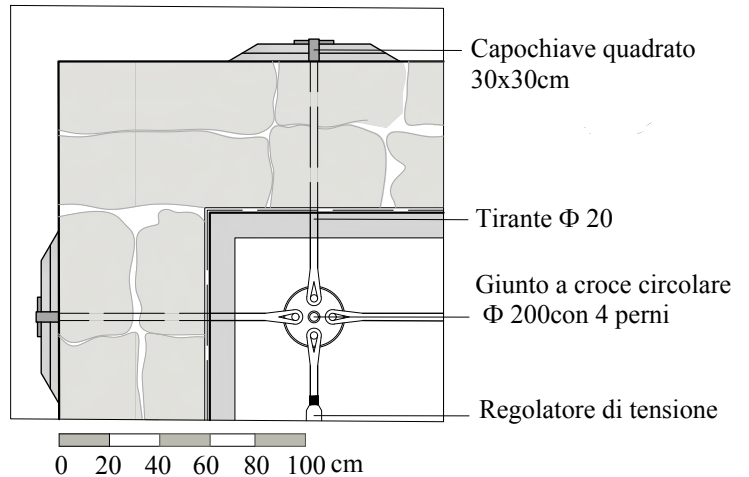
TAVOLA B2_post

STATO DI PROGETTO Nodo interpiano



0 20 40 60 80 100 cm

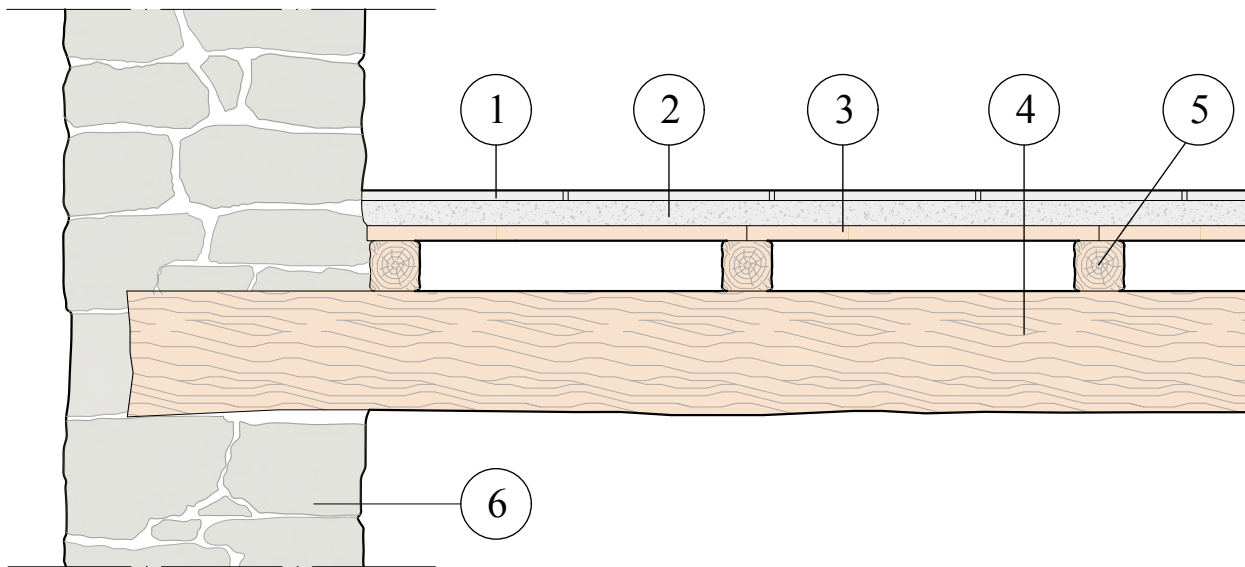
Nodo1



Stratigrafia

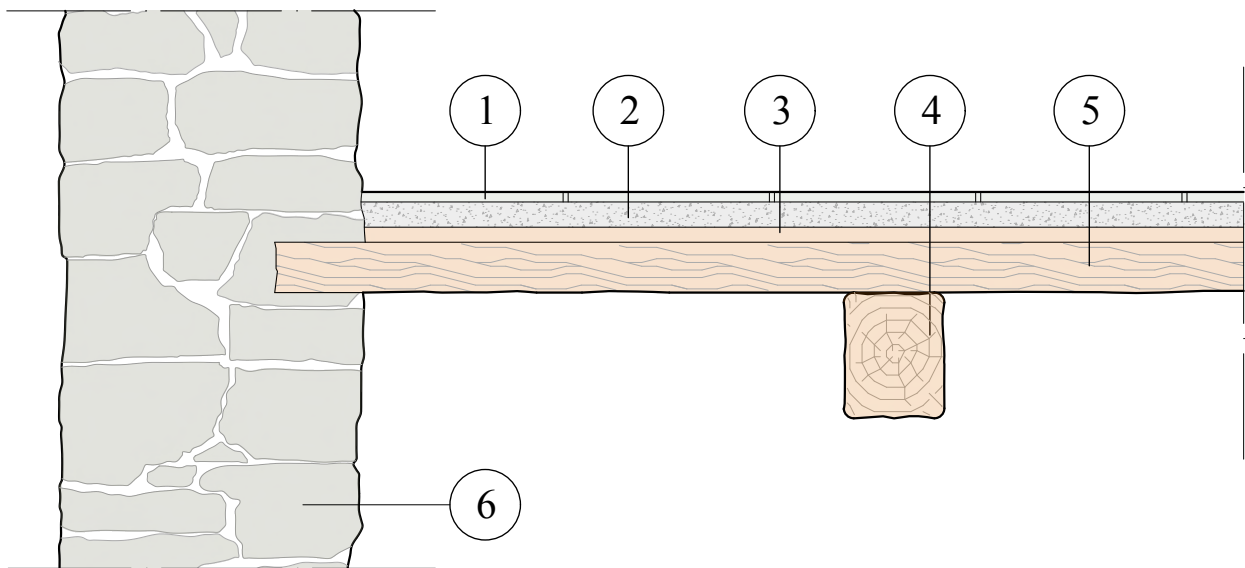
- | | |
|--|--|
| 01. Barra filettata ad aderenza migliorata per ancoraggio cordolo-muratura in acciaio B450C $\Phi 12$ piegata a 30° | 08. Pavimentazione in arenaria 3cm |
| 02. Sistema di tiranti con giunto a croce e capochiave quadrato 30x30cm UNI EN 1090 in acciaio S275JR | 09. Ristilatura armata tramite trefolo in acciaio Inox Aisi 316 $\Phi 5$ e connettore in acciaio Inox Aisi 316 con anello e piastra. |
| 03. Cordolo perimetrale in acciaio S275 10x10x1cm | 10. Orditura principale in legno 20cmx25cm |
| 04. Tavolato ligneo 3cm | 11. Orditura secondaria in legno 10x10 |
| 05. Massetto collaborante in cls alleggerito con maglia metallica $\Phi 6$ 10x10cm | |
| 06. Materassino in polietilene espanso per l'isolamento acustico a calpestio 0,5cm | |
| 07. Sistema di climatizzazione radiante a pavimento con pannello isolante bugnato in polistirene espanso 7cm | |

Sezione A-A



0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 cm

Sezione B-B



0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 cm

Stratigrafia

01. Pavimentazione in arenaria 3cm
02. Strato di allettamento 5cm
03. Assito in tavole lignee 3cm
04. Orditura principale 20x25cm
05. Orditura secondaria 10x10cm
06. Muratura portante in pietra naturale 60cm

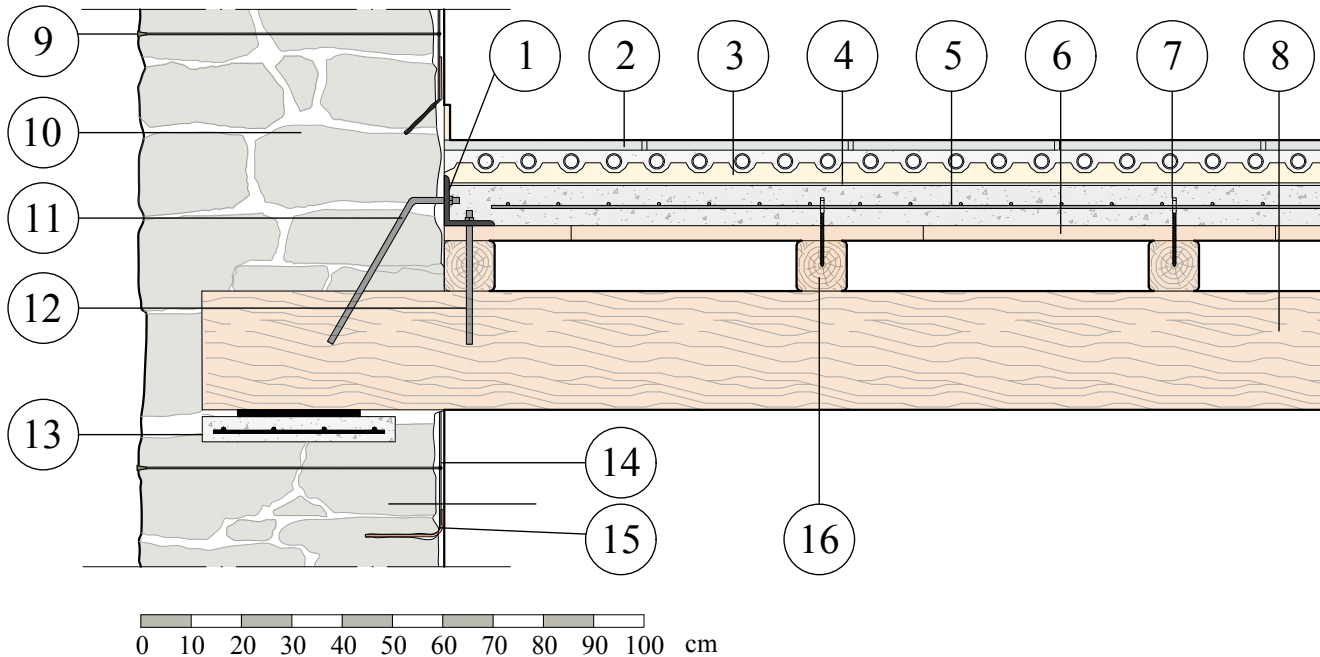
Inadeguatezze Prestazionali

- a. Eccessiva deformabilità dell'orizzontamento ligneo
- b. Assenza di collegamenti fra elementi lignei
- c. Scarsa capacità dell'orditura di trasmettere uniformemente i crichi e rischio sfilamento delle travi dalle asole
- d. Prestazioni termo-acustiche insufficienti

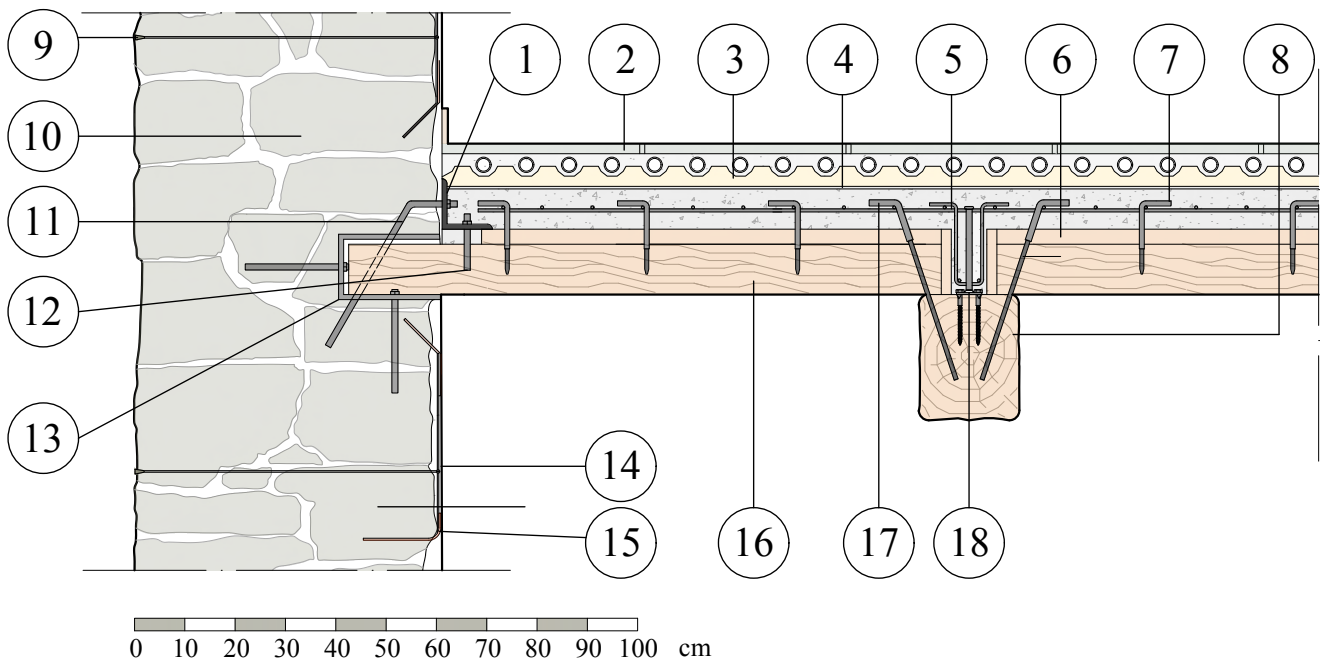
Soluzioni progettuali

- a. Cordolo a "L" in acciaio, soletta collaborante in cls e connettori semplici e a taglio : migliorano la rigidità nel piano dell'orizzontamento e incrementano la collaborazione strutturale tra gli elementi
- b. Ristilatura armata dei giunti tramite trefoli e connettori: fornisce un efficace confinamento e migliora le resistenze meccaniche a taglio e compressione
- c. Tiranti e capochiavi: migliorano il grado di connessione tra pareti ortogonali e riduce la probabilità di ribaltamento fuori dal piano delle pareti
- d. Sistema di climatizzazione a pavimento con isolante in EPS , materassino anticalpestio e microcappotto: migliorano il confort acustico e termico della struttura

Sezione A-A



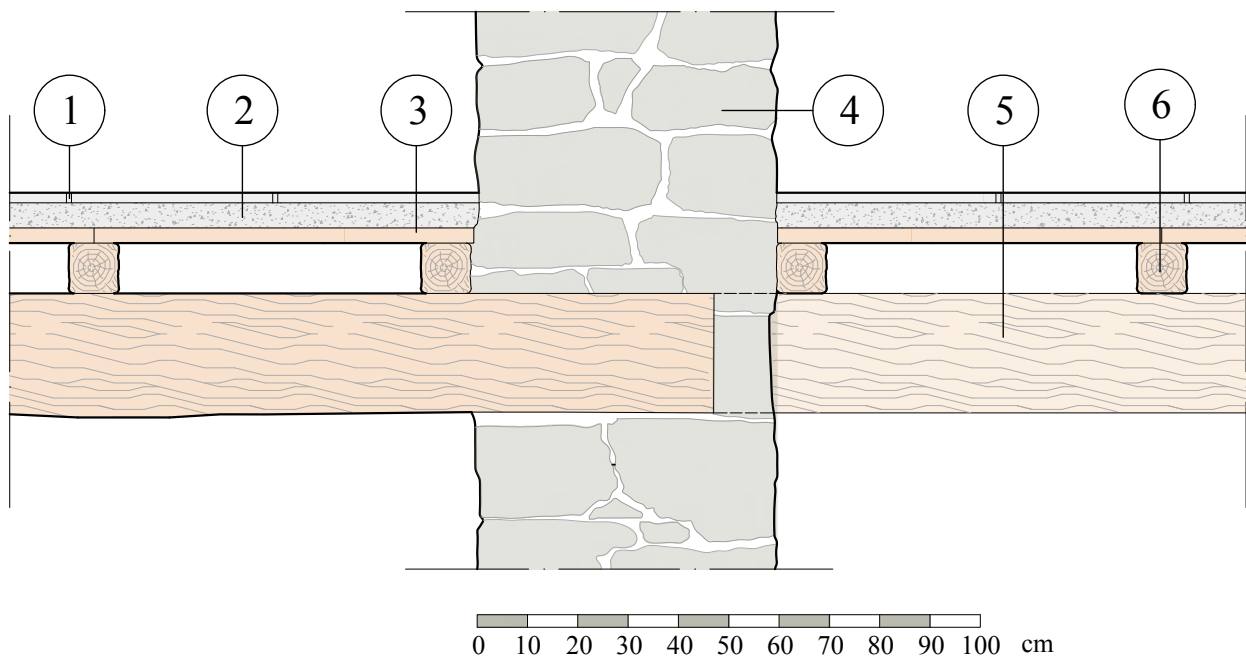
Sezione B-B



Stratigrafia

- 01. Cordolo perimetrale in acciaio S275 10x10x1cm
- 02. Pavimentazione in arenaria 3cm
- 03. Sistema di climatizzazione radiante a pavimento con pannello isolante bugnato in polistirene espanso 7cm
- 04. Materassino in polietilene espanso per l'isolamento acustico a calpestio 0,5cm
- 05. Massetto in cls con rete elettrosaldata $\Phi 6$ 10x10cm
- 06. Tavolato legno lamellare 3cm
- 07. Connettore a taglio in acciaio $\Phi 10$
- 08. Orditura principale in legno 20x25cm
- 09. Connettore in acciaio Inox Aisi 316 passante con anello e piastra
- 10. Muratura portante in pietra naturale 60cm
- 11. Barra filettata ad aderenza migliorata per ancoraggio cordolo-muratura in acciaio B450C $\Phi 12$ piegata a 30°

- 12. Barra di ancoraggio cordolo-orditura lignea in acciaio $\Phi 12$
- 13. Sezione A-A: Piastra metallica per centraggio orditura principale 2cm con appoggio su massetto in cls con rete elettrosaldata
Sezione B-B: scarpa metallica sp 1cm con barre di ancoraggio $\Phi 12$
- 14. Ristilatura armata tramite trefolo in acciaio Inox Aisi 316 $\Phi 5$. Stuccatura e finitura tramite microcappotto interno a media densità Manticeramic
- 15. Coinnettore a L in GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) per fissaggio ristilatura armata
- 16. Orditura secondaria in legno 10x10cm
- 17. Connettore in acciaio $\Phi 12$
- 18. Connettore tecnica CTLmaxi con viti $\Phi 10$ e staffa $\Phi 6$ con ferri reggistaffa $\Phi 8$



Stratigrafia

- 01. Pavimentazione in arenaria 3cm
- 02. Strato di allettamento 5cm
- 03. Assito in tavole lignee 3cm
- 04. Muratura portante in pietra naturale 60cm
- 05. Orditura principale 20x25cm
- 06. Orditura secondaria 10x10cm

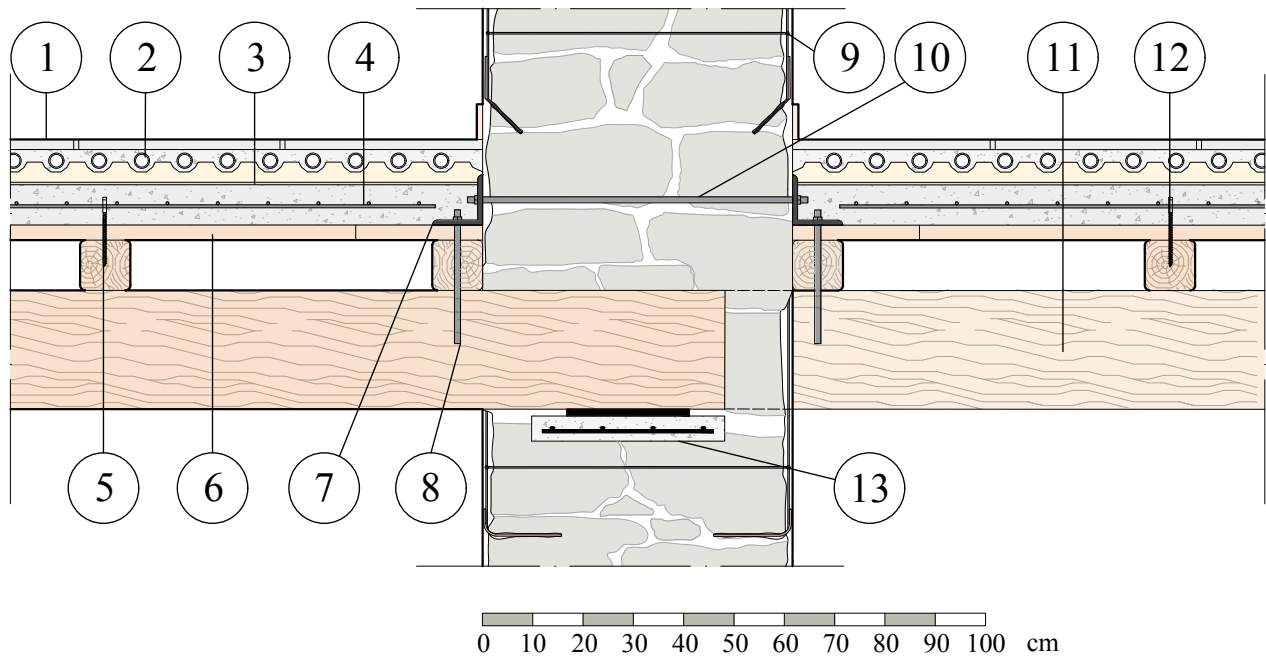
Inadeguatezze Prestazionali

- a. Eccessiva deformabilità dell'orizzontamento ligneo
- b. Assenza di collegamenti fra elementi lignei
- c. Scarsa capacità dell'orditura di trasmettere uniformemente i crichi e rischio sfilamento delle travi dalle asole
- d. Prestazioni termo-acustiche insufficienti

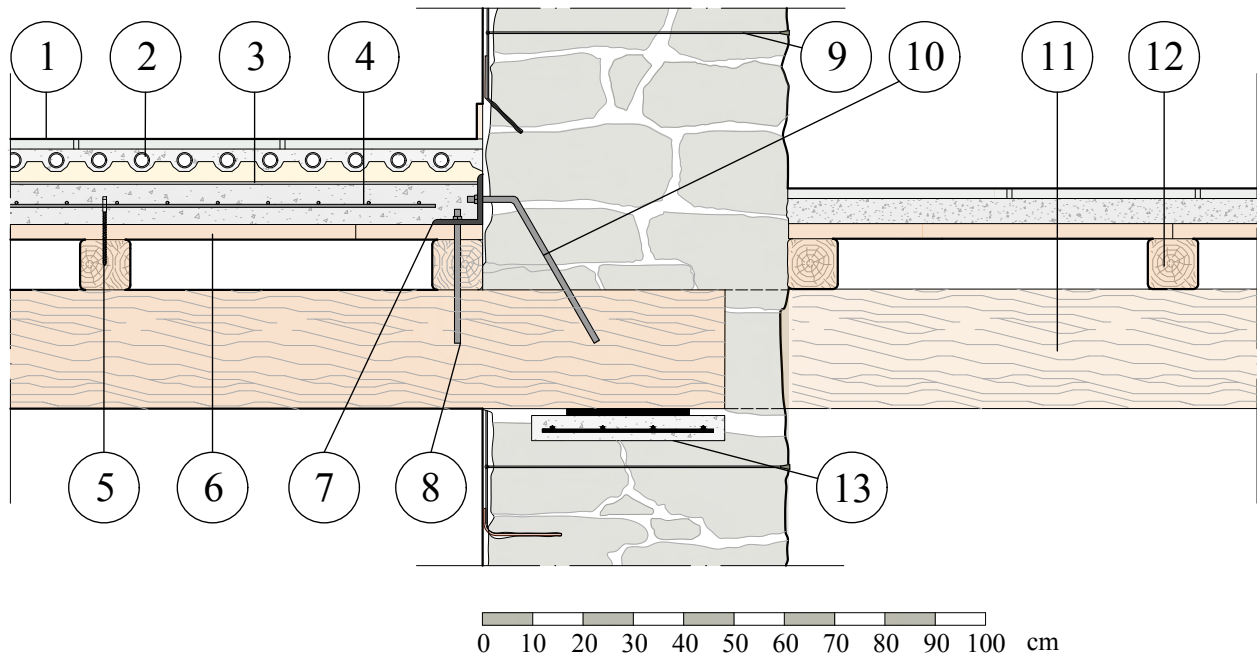
Soluzioni progettuali

- a. Cordolo a "L" in acciaio, soletta collaborante in cls e connettori semplici e a taglio : migliorano la rigidità nel piano dell'orizzontamento e incrementano la collaborazione strutturale tra gli elementi
- b. Ristilatura armata dei giunti tramite trefoli e connettori: fornisce un efficace confinamento e migliora le resistenze meccaniche a taglio e compressione
- c. Tiranti e capochiavi: migliorano il grado di connessione tra pareti ortogonali e riduce la probabilità di ribaltamento fuori dal piano delle pareti
- d. Sistema di climatizzazione a pavimento con isolante in EPS , materassino anticalpestio e microcappotto: migliorano il confort acustico e termico della struttura

Sezione C-C (1): entrambe le celle elementari soggette a riqualificazione



Sezione C-C (2): una cella elementare soggetta a riqualificazione



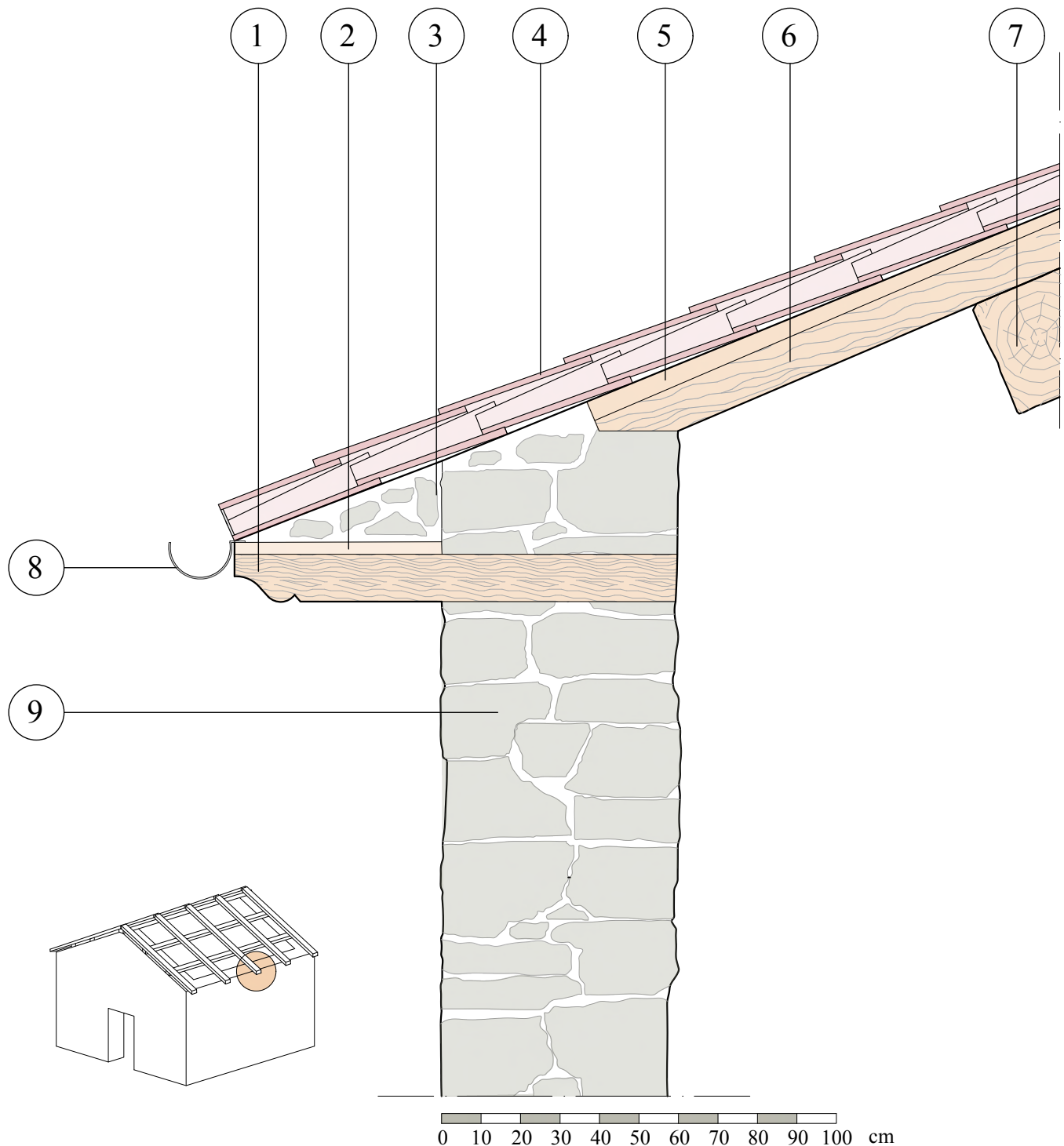
Stratigrafia

01. Pavimentazione in arenaria 3cm
02. Sistema di climatizzazione radiante a pavimento con pannello isolante bugnato in polistirene espanso 7cm
03. Materassino in polietilene espanso per l'isolamento acustico a calpestio 0,5cm
04. Massetto in cls con rete elettrosaldata $\Phi 6$ 10x10cm
05. Connettore a taglio in acciaio $\Phi 10$
06. Tavolato legno lamellare 3cm
07. Cordolo perimetrale in acciaio S275 10x10x1cm
08. Barra di ancoraggio cordolo-orditura lignea in acciaio $\Phi 12$
09. Ristilatura armata tramite trefolo in acciaio Inox Aisi 316 $\Phi 5$.
Stuccatura e finitura tramite microcappotto interno a media densità Manticeramic

10. (1) Barra filettata ad aderenza migliorata per ancoraggio cordolo-muratura-cordolo in acciaio B450C $\Phi 12$
(2) Barra filettata ad aderenza migliorata per ancoraggio cordolo-muratura in acciaio B450C $\Phi 12$ piegata a 30°
11. Orditura principale in legno 20x25cm
12. Orditura secondaria in legno 10x10cm
13. Piastra metallica per centraggio orditura principale 2cm con appoggio su massetto in cls con rete elettrosaldata

TAVOLA C1_ante

STATO DI FATTO Nodo di copertura in legno con coppi



Stratigrafia

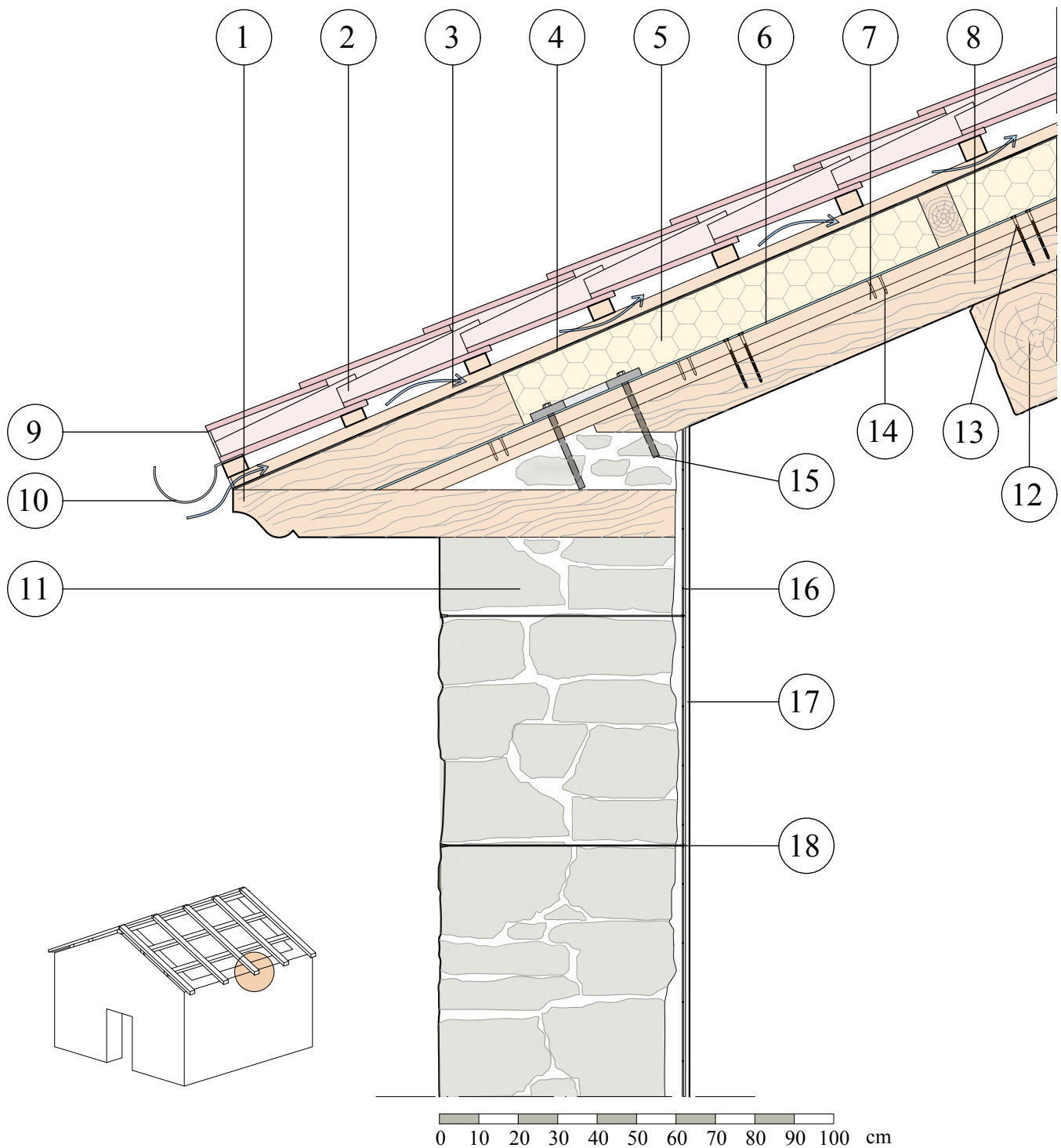
- 01. Travetto a mensola con palombella
- 02. Tavolato sp 3cm
- 03. Muratura non strutturale di riempimento
- 04. Manto di copertura in coppi
- 05. Assito in tavole
- 06. Orditura secondaria 12x8cm
- 07. Trave portante (Arcareccio) 25x30cm
- 08. Canale di gronda
- 09. Muratura portante in pietra naturale sp. 60cm

Inadeguatezze Prestazionali

- a. Scarsa connessione tra gli elementi lignei
- b. Solaio costituito da assito deformabile sul piano
- c. Scarsa resistenza del pannello murario a taglio e compressione
- d. Prestazioni termoigrometriche insufficienti

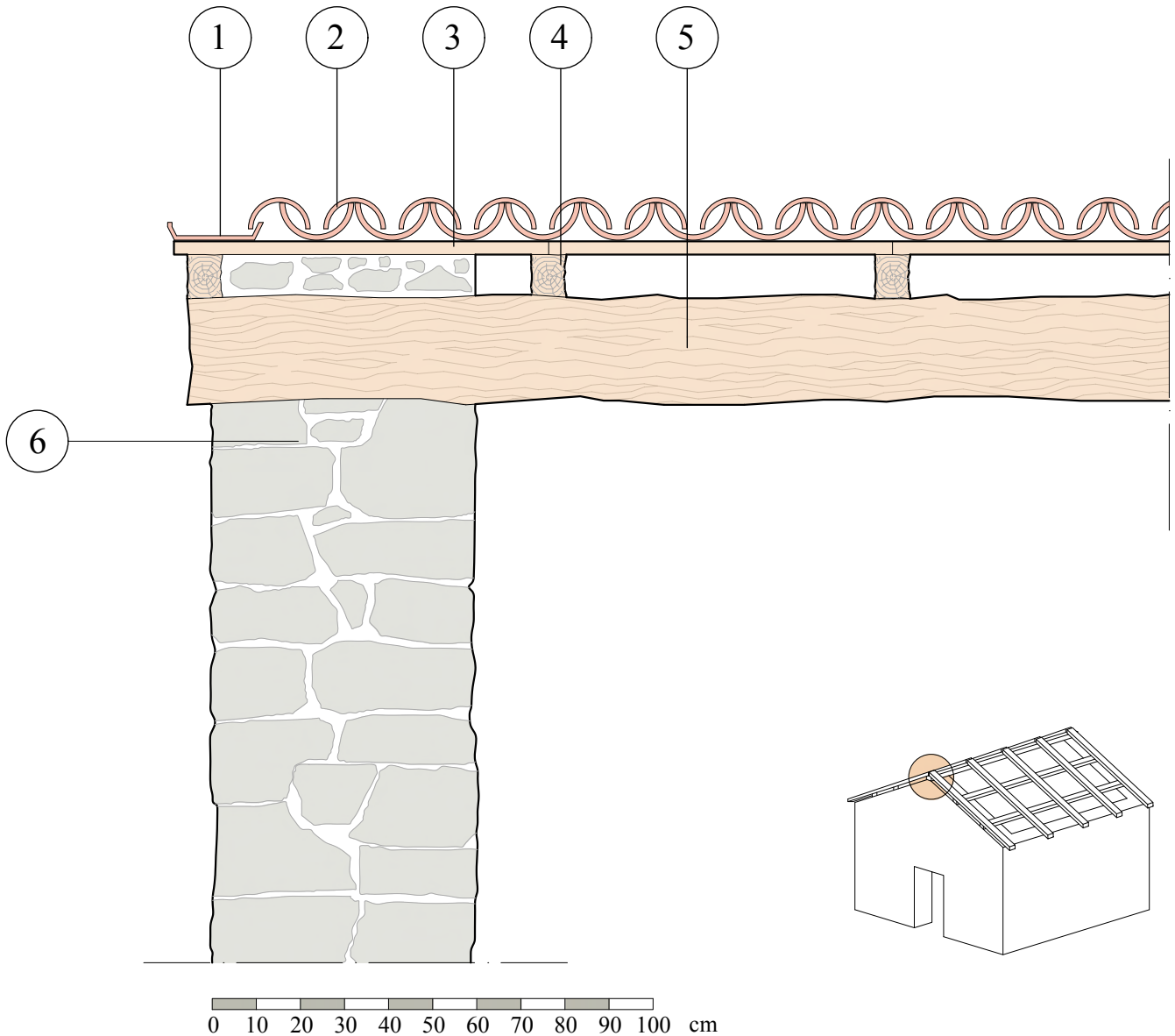
Soluzioni progettuali

- a. Doppio tavolato: conferisce all'orizzontamento maggior rigidità nel piano quando ben inchiodato alla travatura
- b. Ristilatura armata dei giunti tramite trefoli e connettori: fornisce un efficace confinamento e migliora le resistenze meccaniche a taglio e compressione
- c. Cordolo metallico a traliccio: migliora grado di connessione di pareti ortogonali, riduce probabilità di ribaltamento fuori piano della parete e distribuisce le sollecitazioni sismiche tra i setti
- d. Membrana traspirante e barriera al vapore: favoriscono l'allontanamento di umidità dallo spessore evitando condensa interstiziale
- e. Isolante EPS e microcappotto: agevolano il corretto isolamento termico dell'involucro edilizio



Stratigrafia

- | | |
|---|---|
| 01. Travetto a mensola con palombella | 11. Muratura portante in pietra naturale sp. 60cm |
| 02. Manto di copertura in Coppi | 12. Orditura principale 25x30cm |
| 03. Listelli in legno per ventilazione sotto tegola 3cm+3cm | 13. Viti per ancoraggio doppio tavolato-arcareccio DIN571 6x110 |
| 04. Membrana traspirante 0,5cm: | 14. Viti per fissaggio doppio tavolato DIN571 6x55 |
| a. Strato protettivo in PP idrorepellente, stabilizzato ai raggi UV | 15. Cordolo a traliccio in acciaio strutturale S275JR con bullonature di fissaggio Φ 16 |
| b. Film microporoso in PP | 16. Ristilatura armata tramite trefolo in acciaio Inox Aisi 316 Φ 5 |
| c. Strato protettivo in PP | 17. Microcappotto interno a media densità Manticeramic con microsferi ceramiche ($\lambda=0,002$ W/mK) |
| 05. Isolante EPS 14cm | 18. Connettore in acciaio Inox Aisi 316 passante filettato con anello e piastra |
| 06. Barriera al vapore 0,3cm | |
| 07. Doppio tavolato ligneo incrociato 3cm+3cm | |
| 08. Orditura secondaria 12x8cm | |
| 09. Griglia antipassero in PP | |
| 10. Canale di gronda | |



Stratigrafia

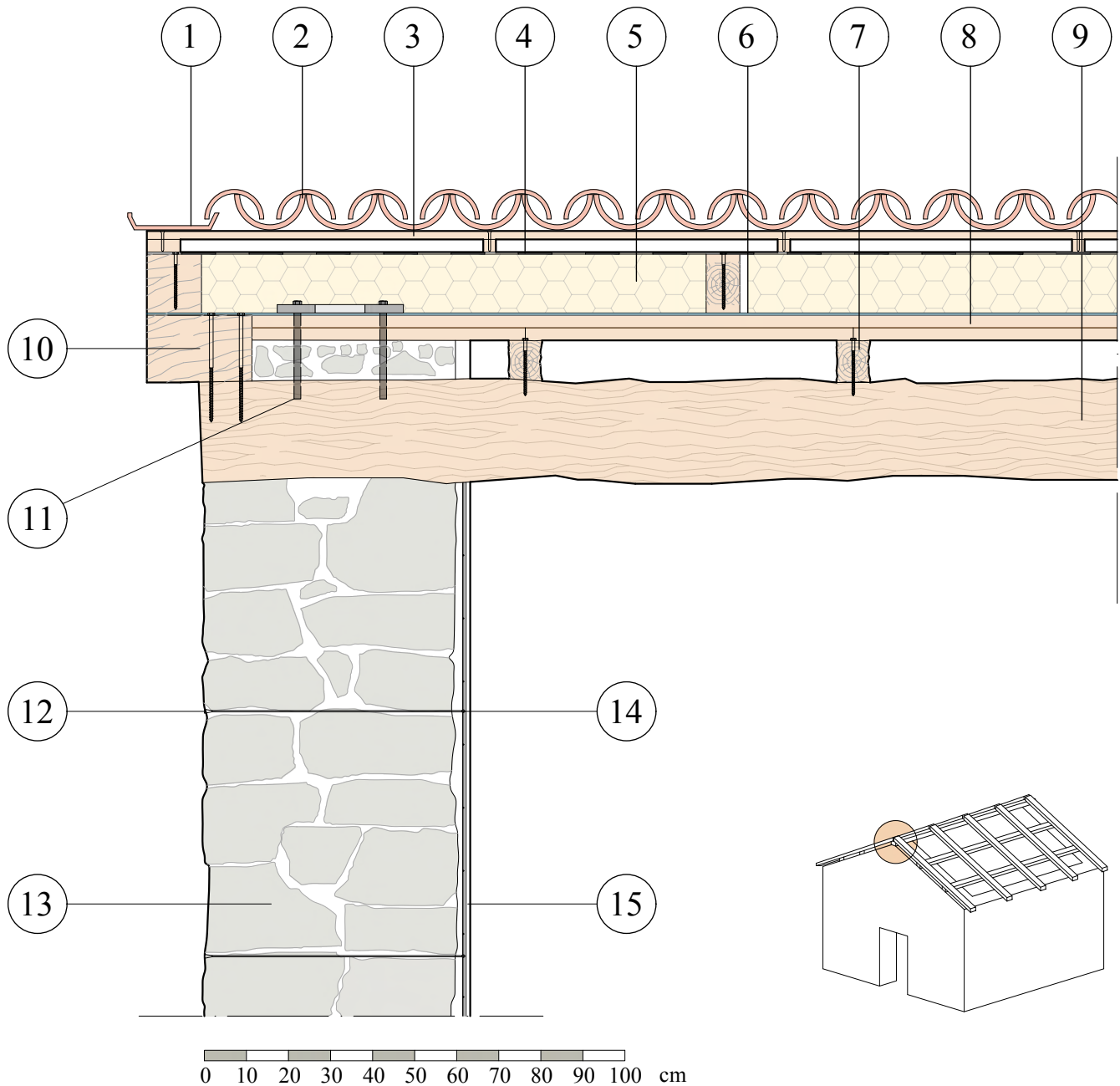
- 01. Embrice
- 02. Manto di copertura in coppi
- 03. Assito in tavole lignee 12x8cm
- 04. Orditura secondaria 12x8cm
- 05. Orditura principale 25x30cm
- 06. Muratura portante in pietra naturale sp. 60cm

Inadeguatezze Prestazionali

- a. Scarsa connessione tra gli elementi lignei
- b. Solaio costituito da assito deformabile sul piano
- c. Scarsa resistenza del pannello murario a taglio e compressione
- d. Prestazioni termoigrometriche insufficienti

Soluzioni progettuali

- a. Doppio tavolato: conferisce all'orizzontamento una maggior rigidità nel piano quando ben inchiodato alla travatura
- b. Ristilatura armata dei giunti tramite trefoli e connettori: fornisce un efficace confinamento e miglioramento delle resistenze meccaniche a taglio e compressione
- c. Cordolo metallico a traliccio: migliora grado di connessione di pareti ortogonali, riduce probabilità di ribaltamento fuori piano della parete e distribuisce le sollecitazioni sismiche tra i setti
- d. Membrana traspirante e barriera al vapore: favoriscono l'allontanamento di umidità dallo spessore evitando condensa interstiziale
- e. Isolante EPS e microcappotto: agevolano il giusto isolamento termico dell'involucro edilizio

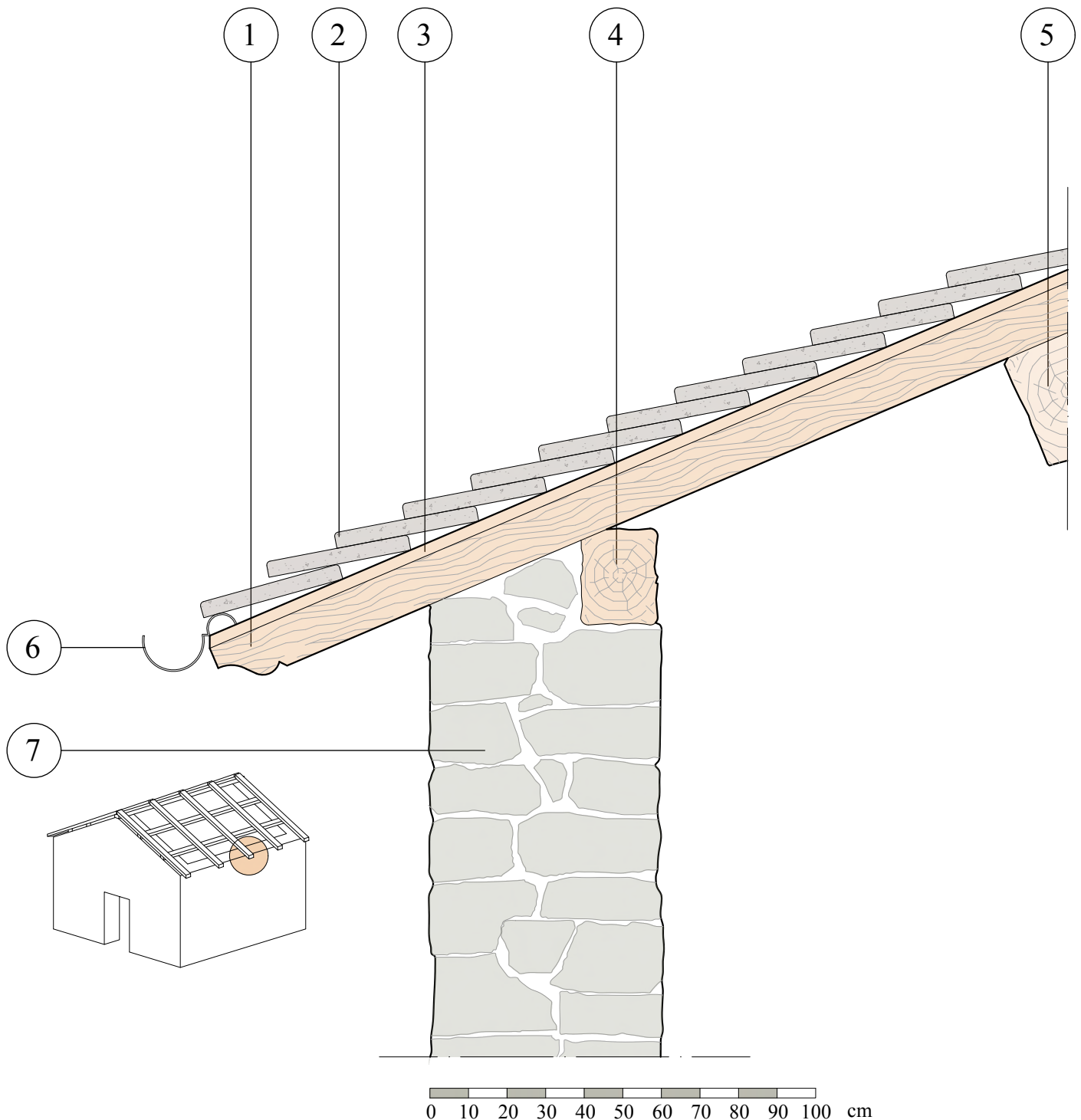


Stratigrafia

- | | |
|---|--|
| 01. Embrice | 11. Cordolo a traliccio in acciaio strutturale S275JR con bullonature di fissaggio Φ 16 |
| 02. Manto di copertura in Coppi | 12. Connettore in acciaio sistema Retivola Inox Aisi 316 passante filettato con anello e piastra |
| 03. Listelli in legno per ventilazione sotto tegola 3cm+3cm | 13. Muratura portante in pietra naturale sp. 60cm |
| 04. Membrana traspirante 0,5cm: | 14. Ristilatura armata tramite trefolo in acciaio Inox Aisi 316 Φ 5 |
| a. Strato protettivo in PP idrorepellente, stabilizzato ai raggi UV | 15. Microcappotto interno a media densità Manticeramic con microsferiche ceramiche ($\lambda=0,002$ W/mK) |
| b. Film microporoso in PP | |
| c. Strato protettivo in PP | |
| 05. Isolante EPS 14cm | |
| 06. Barriera al vapore 0,3cm | |
| 07. Orditura secondaria 12x8cm | |
| 08. Doppio tavolato ligneo incrociato 3cm+3cm | |
| 09. Orditura principale 25x30cm | |
| 10. Elemento ligneo terminale per ricomposizione rapporto di gronda | |

TAVOLA C2_ante

STATO DI FATTO Nodo di copertura in legno con piagne



Stratigrafia

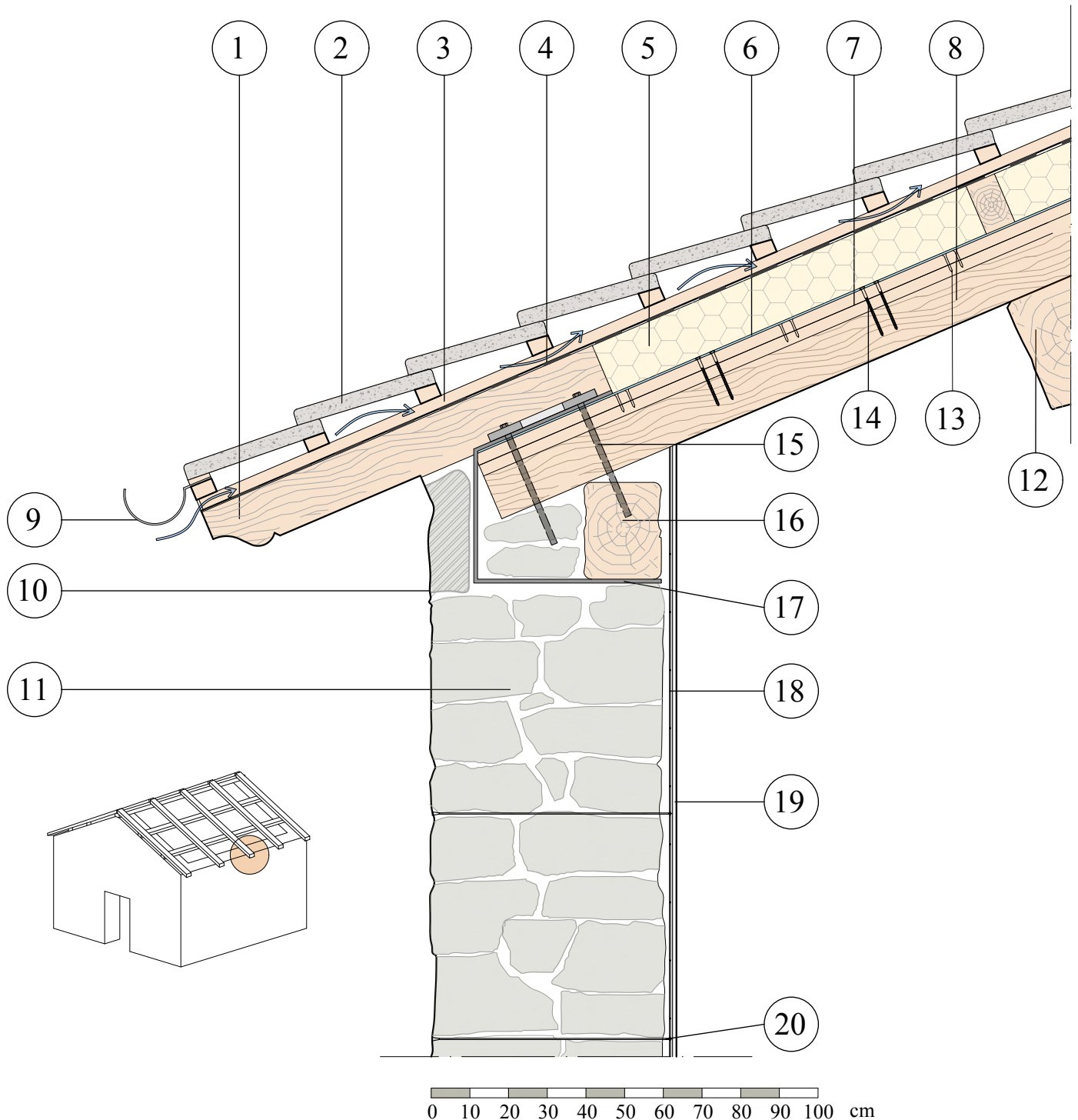
- 01. Orditura secondaria 12x8cm con finitura a palombella
- 02. Manto di copertura in piagne
- 03. Tavolato 3cm
- 04. Trave di bordo 20x25cm
- 05. Orditura principale 25x30cm
- 06. Canale di gronda
- 07. Muratura portante in pietra naturale sp. 60cm

Inadeguatezze Prestazionali

- a. Scarsa connessione tra gli elementi lignei
- b. Solaio costituito da assito deformabile sul piano
- c. Scarsa resistenza del pannello murario a taglio e compressione
- d. Prestazioni termoigrometriche insufficienti

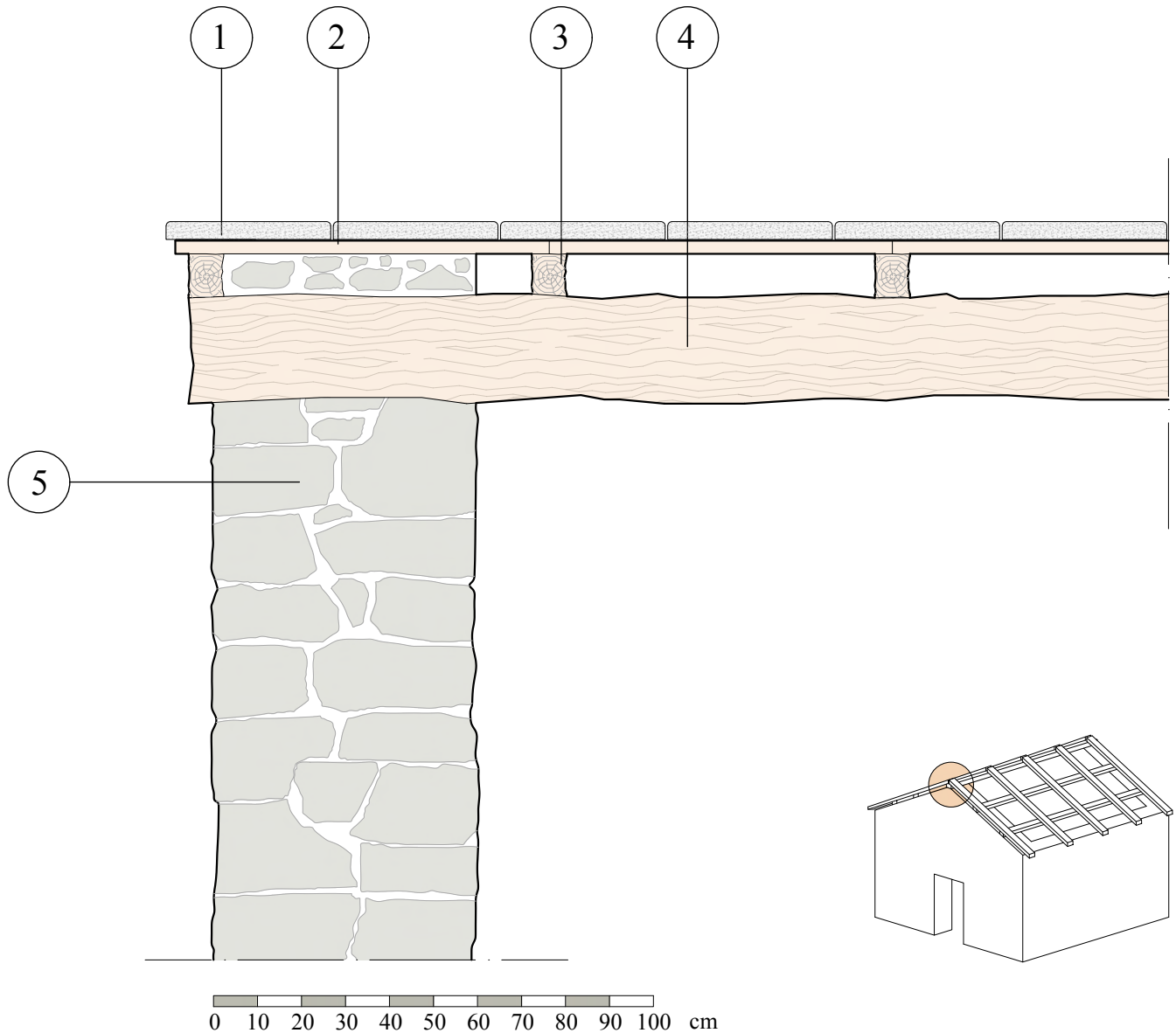
Soluzioni progettuali

- a. Doppio tavolato: conferisce all'orizzontamento una maggior rigidità nel piano quando ben inchiodato alla travatura
- b. Ristilatura armata dei giunti tramite trefoli e connettori: fornisce un efficace confinamento e migliora le resistenze meccaniche a taglio e compressione
- c. Cordolo metallico a traliccio e scarpa metallica: migliora grado di connessione di pareti ortogonali, riduce probabilità di ribaltamento fuori piano della parete e distribuisce le sollecitazioni sismiche tra i setti
- d. Membrana traspirante e barriera al vapore: favoriscono l'allontanamento di umidità dallo spessore evitando condensa e.
- Isolante EPS e microcappotto: agevolano il giusto isolamento termico dell'involucro edilizio



Stratigrafia

- | | |
|---|---|
| 01. Travetto con palombella rialzato per mantenere rapporto di gronda | 14. Viti per ancoraggio doppio tavolato-orditura secondaria DIN571 6x110 |
| 02. Manto di copertura in piagne | 15. Cordolo a traliccio in acciaio strutturale S275JR con bullonature di fissaggio Φ 16 |
| 03. Listelli in legno per ventilazione sotto tegola 3cm+3cm | 16. Trave di bordo 20x25cm |
| 04. Membrana traspirante 0,5cm: | 17. Scarpa metallica per orditura secondaria sp 1cm |
| 05. Isolante EPS 14cm | 18. Ristilatura armata tramite trefolo in acciaio Inox Aisi 316 Φ 5 |
| 06. Barriera al vapore 0,3cm | 19. Microcappotto interno a media densità Manticeramic con microsfere ceramiche ($\lambda=0,002$ W/mK) |
| 07. Doppio tavolato ligneo incrociato 3cm+3cm | 20. Connettore in acciaio Inox Aisi 316 passante filettato con anello e piastra |
| 08. Orditura secondaria 12x8cm | |
| 09. Canale di gronda | |
| 10. Elemento lapideo inserito per alzare la muratura | |
| 11. Muratura portante in pietra naturale sp. 60cm | |
| 12. Orditura principale 25x30cm | |
| 13. Viti per fissaggio doppio tavolato DIN571 6x55 | |



Stratigrafia

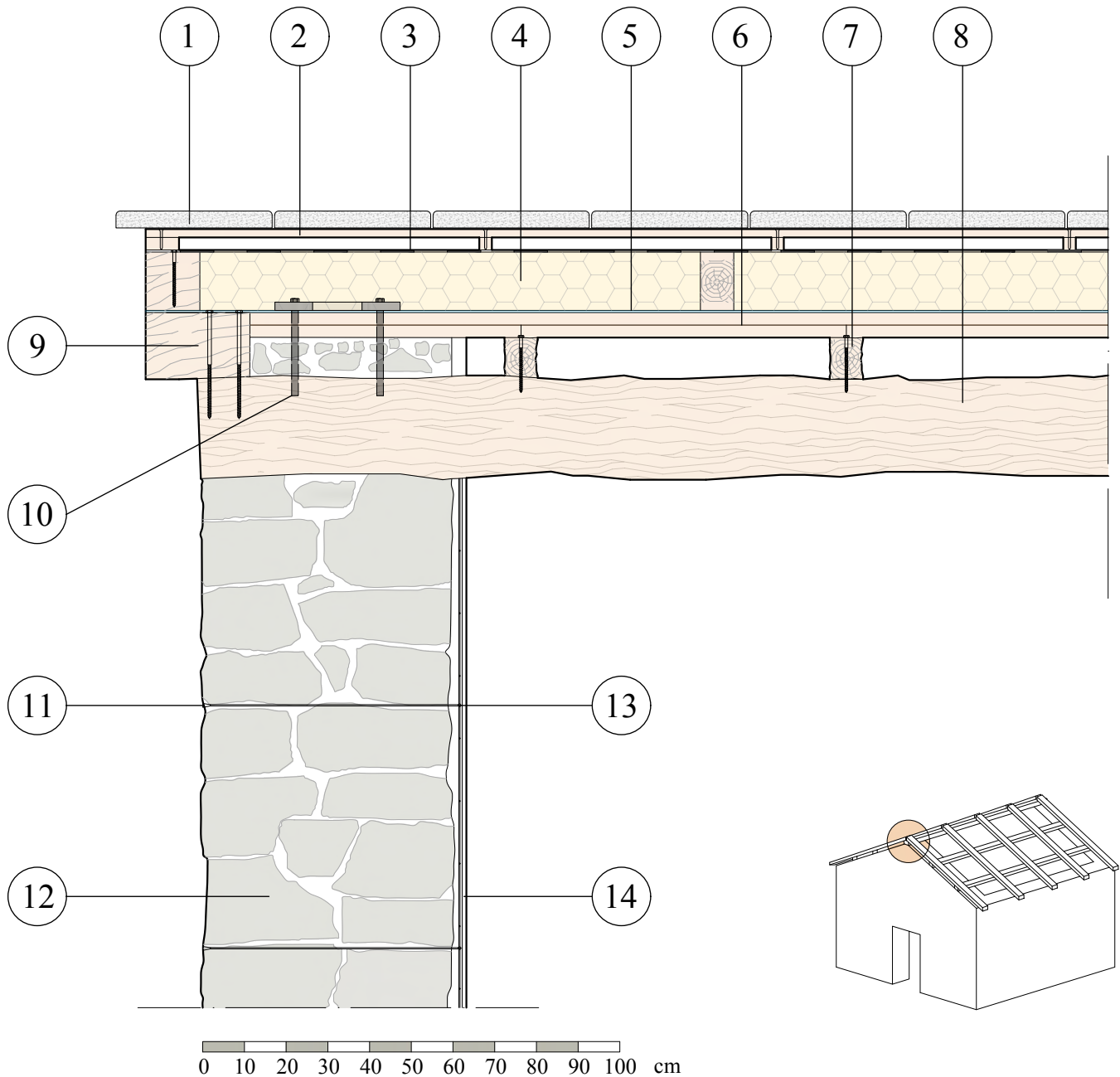
- 01. Manto di copertura in piagne
- 02. Assito in tavole lignee 3cm
- 03. Orditura secondaria 12x8cm
- 04. Orditura principale 25x30cm
- 05. Muratura portante in pietra naturale sp. 60cm

Inadeguatezze Prestazionali

- a. Scarsa connessione tra gli elementi lignei
- b. Solaio costituito da assito deformabile sul piano
- c. Scarsa resistenza del pannello murario a taglio e compressione
- d. Prestazioni termoigrometriche insufficienti

Soluzioni progettuali

- a. Doppio tavolato: conferisce all'orizzontamento una maggior rigidità nel piano quando ben inchiodato alla travatura
- b. Ristilatura armata dei giunti tramite trefoli e connettori: fornisce un efficace confinamento e miglioramento delle resistenze meccaniche a taglio e compressione
- c. Cordolo metallico a traliccio e cuffia metallica: migliora grado di connessione di pareti ortogonali, riduce probabilità di ribaltamento fuori piano della parete e distribuisce le sollecitazioni sismiche tra i setti
- d. Membrana traspirante e barriera al vapore: favoriscono l'allontanamento di umidità dallo spessore evitando condensa e.
- e. Isolante EPS e microcappotto: agevolano il giusto isolamento termico dell'involucro edilizio



Stratigrafia

- | | |
|---|--|
| 01. Manto di copertura in piagne | 10. Cordolo a traliccio in acciaio strutturale S275JR con bullonature di fissaggio Φ 16 |
| 02. Listelli in legno per ventilazione sotto tegola 3cm+3cm | 11. Connettore in acciaio Inox Aisi 316 passante filettato con anello e piastra |
| 03. Membrana traspirante 0,5cm: | 12. Muratura portante in pietra naturale sp. 60cm |
| a. Strato protettivo in PP idrorepellente, stabilizzato ai raggi UV | 13. Ristilatura armata tramite trefolo in acciaio Inox Aisi 316 Φ 5 |
| b. Film microporoso in PP | 14. Microcappotto interno a media densità Manticeramic con microsferre ceramiche ($\lambda=0,002$ W/mK) |
| c. Strato protettivo in PP | |
| 04. Isolante EPS 14cm | |
| 05. Barriera al vapore 0,3cm | |
| 06. Doppio tavolato ligneo incrociato 3cm+3cm | |
| 07. Orditura secondaria 12x8cm | |
| 08. Orditura principale 25x30cm | |
| 09. Elemento ligneo terminale per ricomposizione rapporto di gronda | |

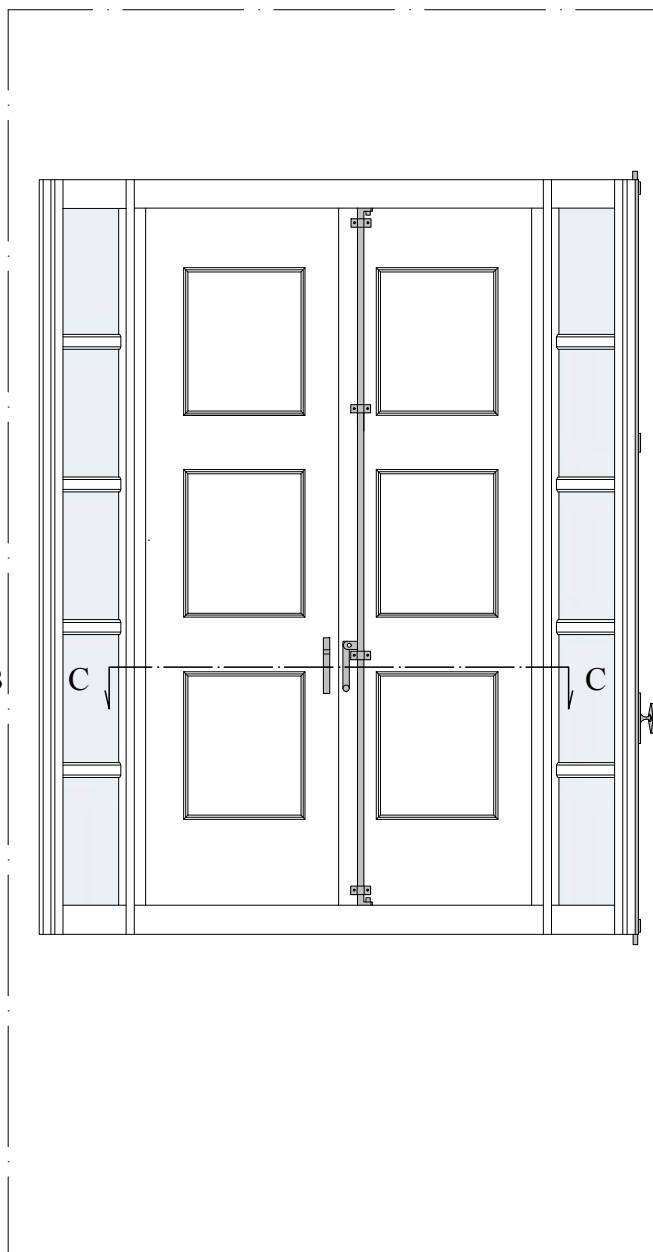
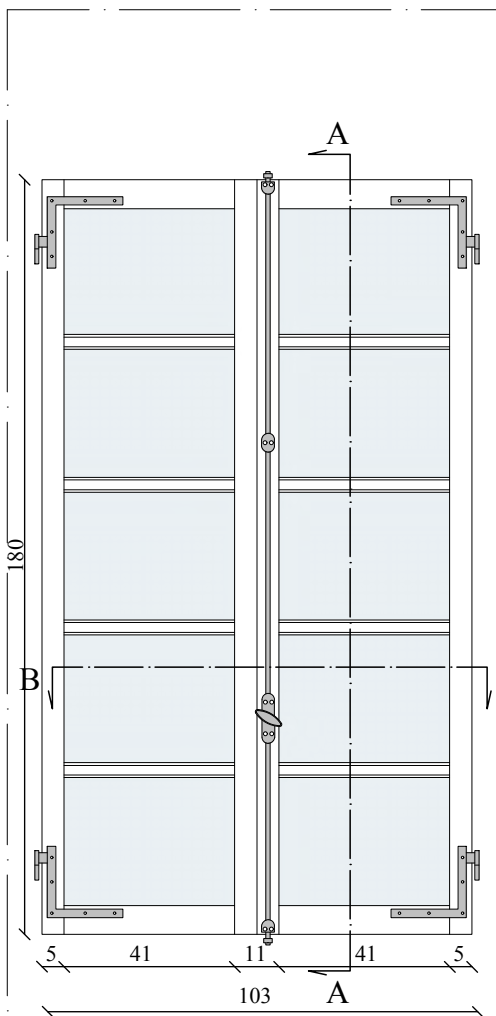
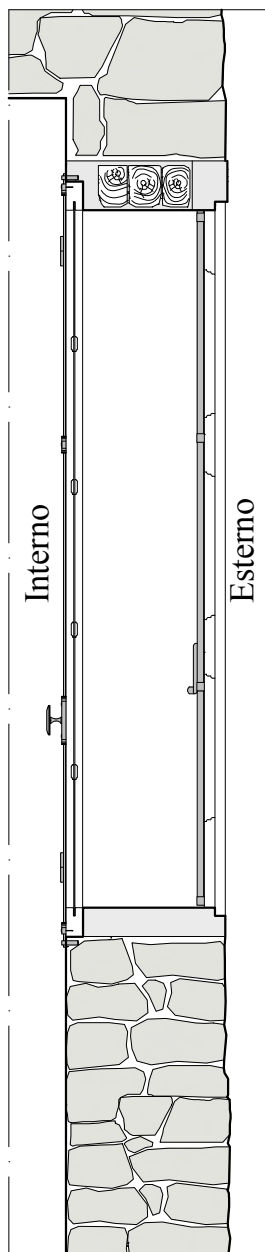
APPENDICE 2: ELEMENTI DI CHIUSURA

TAVOLA
D1_ante

STATO DI FATTO
Infisso storico inizi del 900

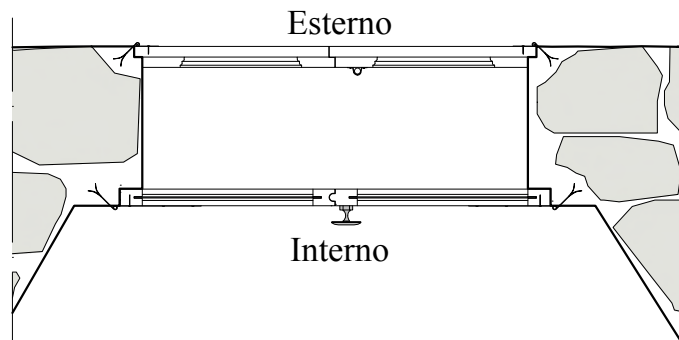
Sezione A-A

Prospetti



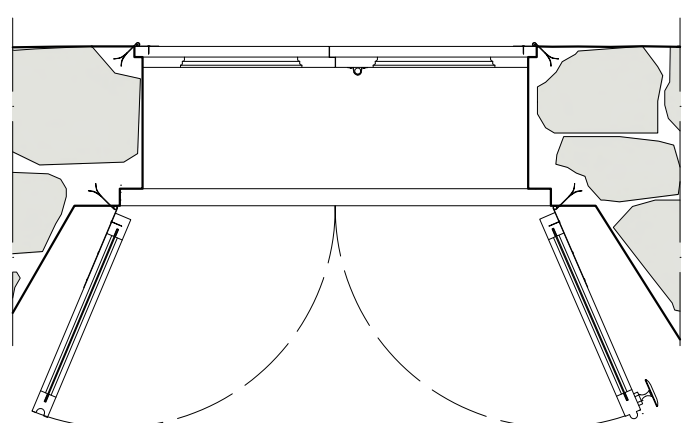
0 20 40 60 80 cm

Sezione B-B



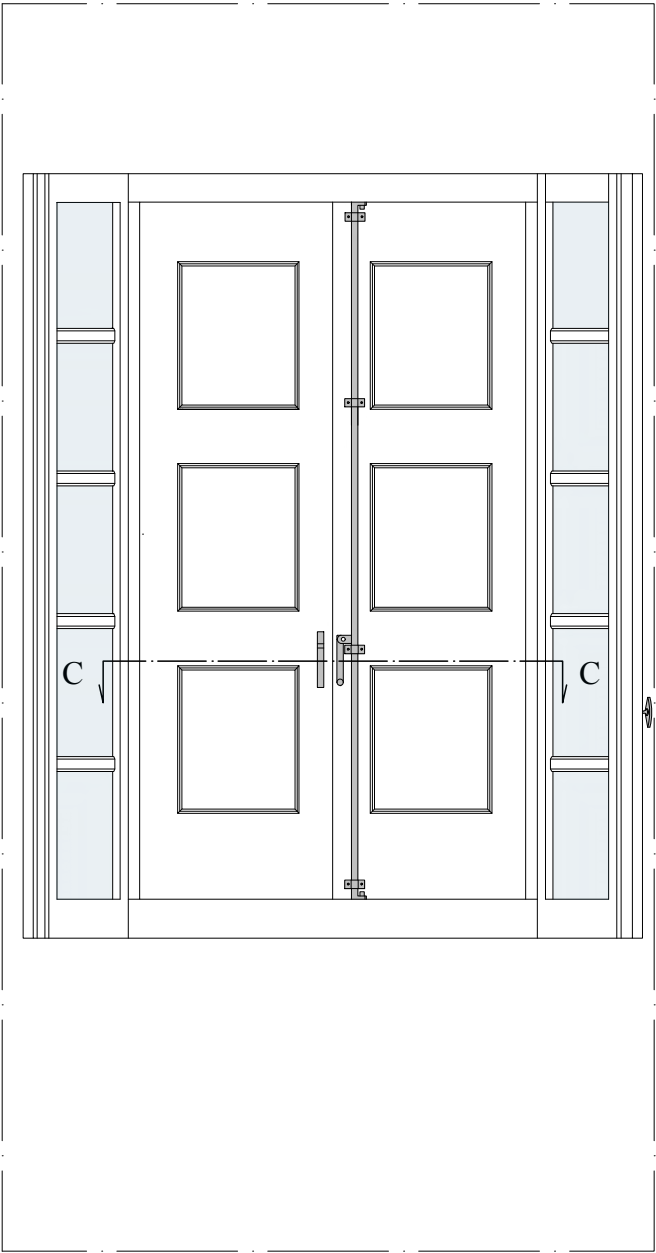
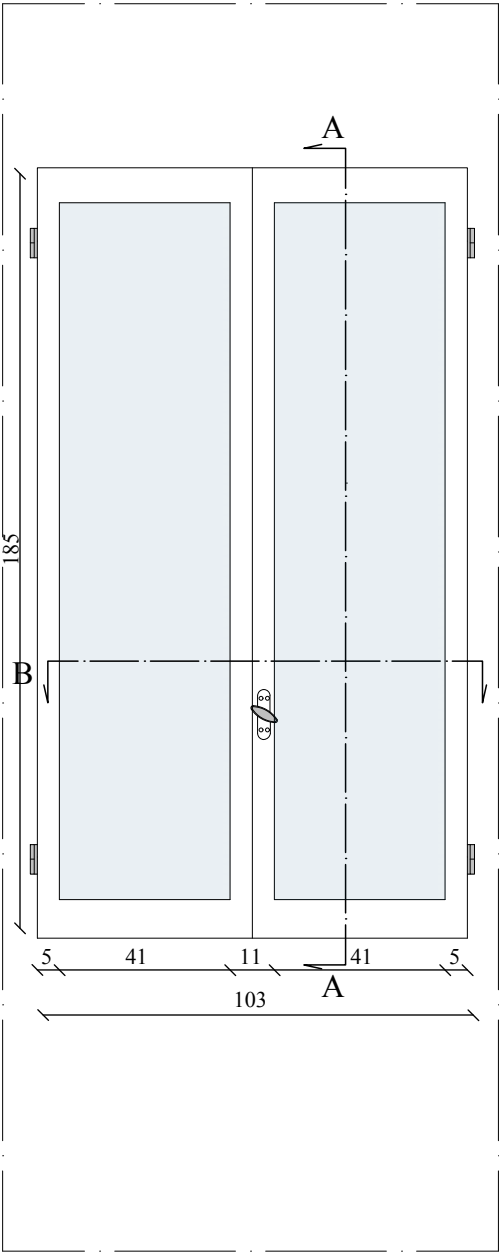
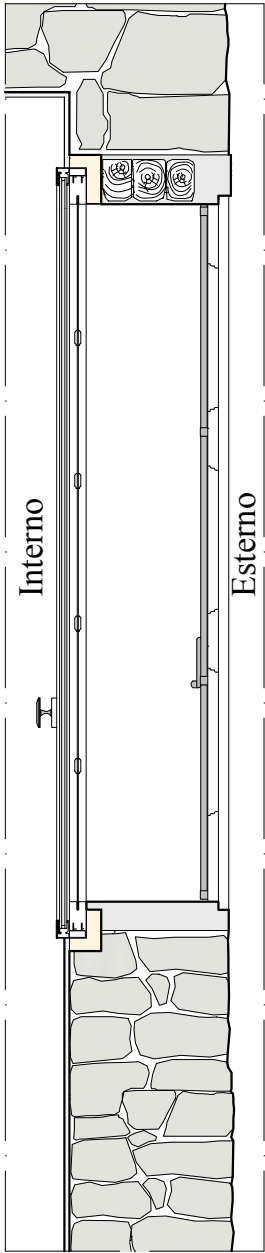
0 20 40 60 80 cm

Sezione C-C



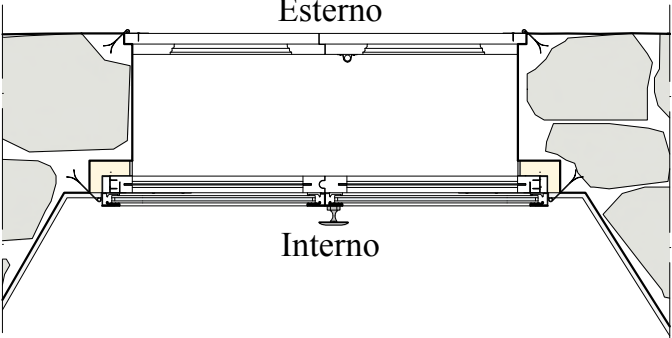
Sezione A-A

Prospetti



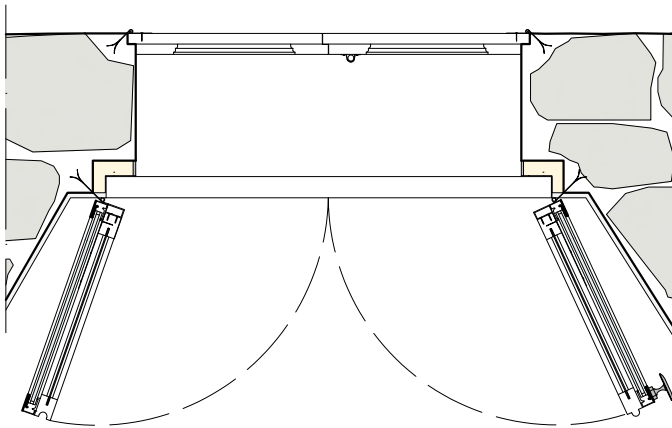
0 20 40 60 80 cm

Sezione B-B

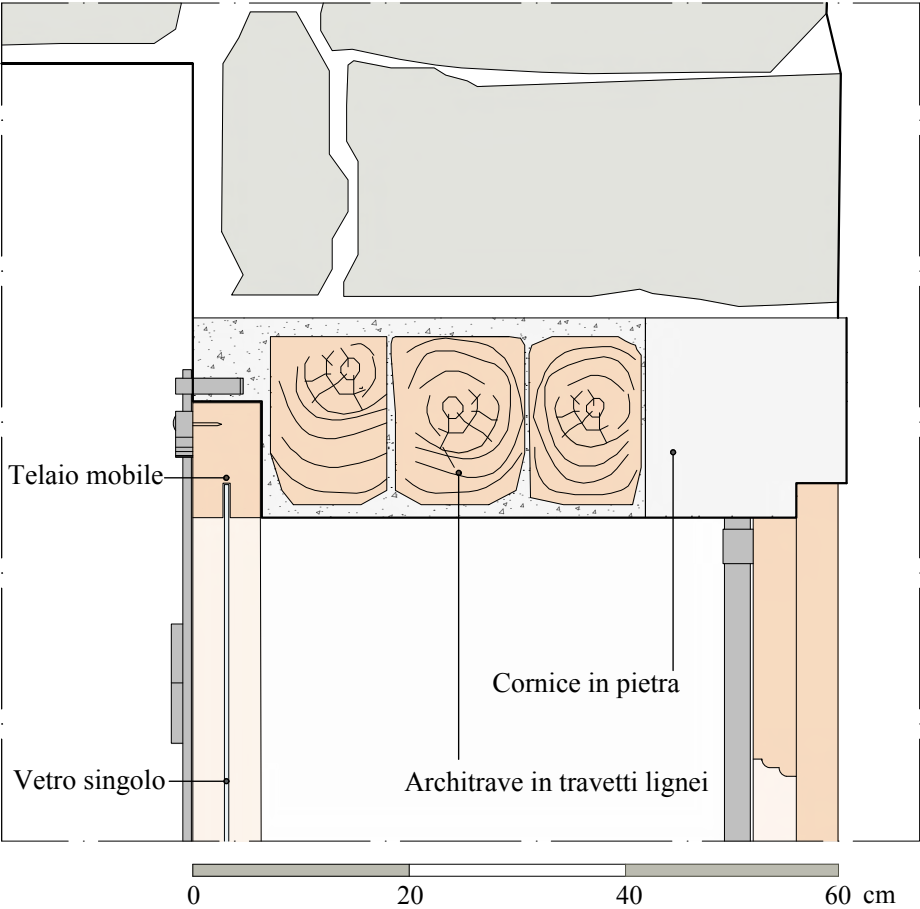


0 20 40 60 80 cm

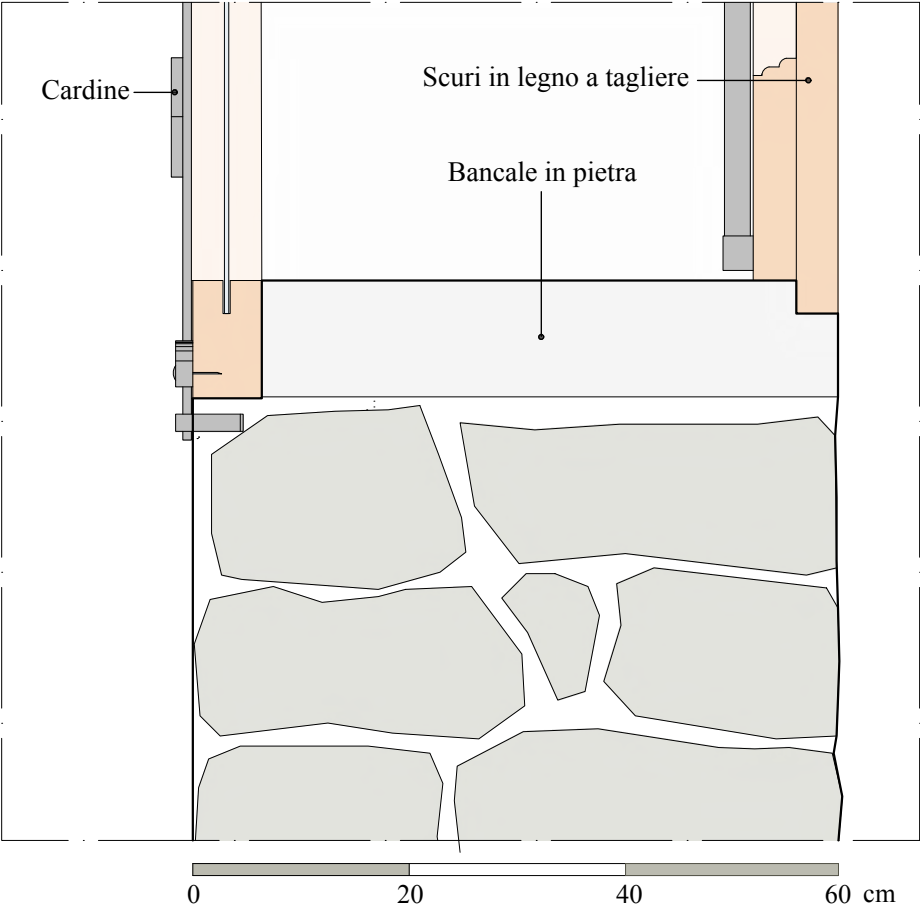
Sezione C-C



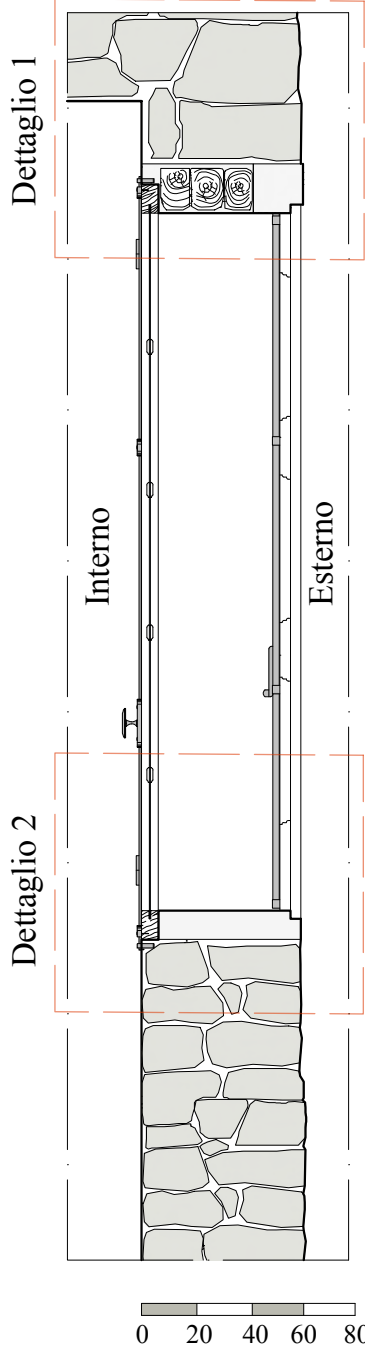
Dettaglio 1



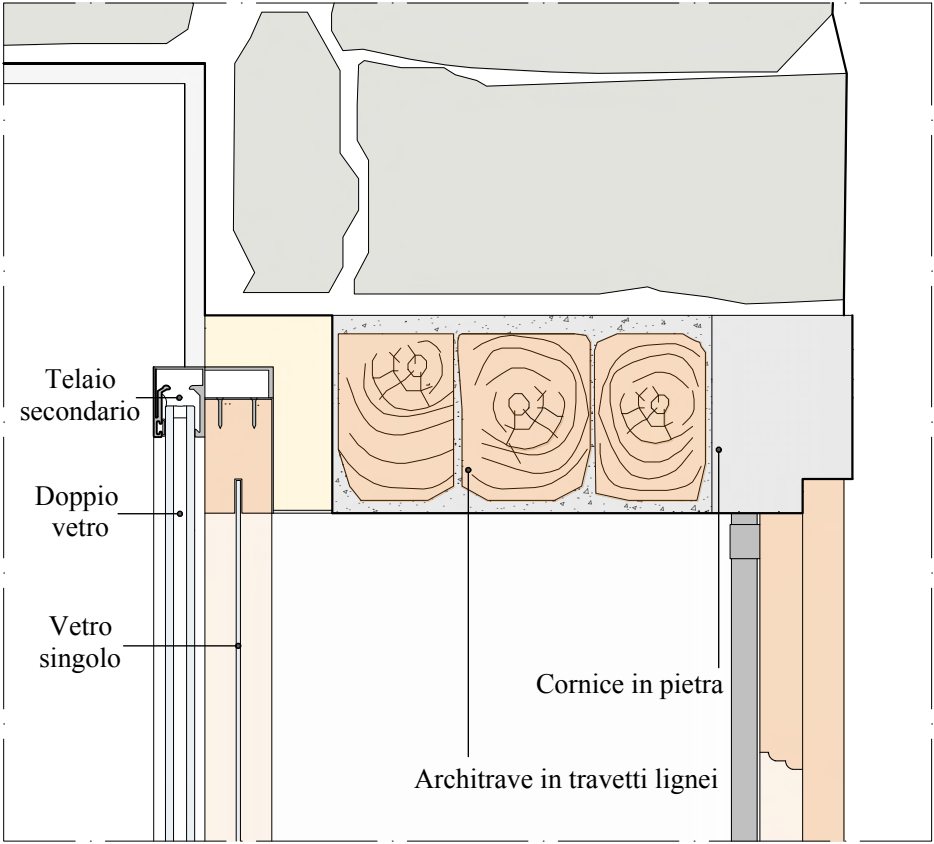
Dettaglio 2



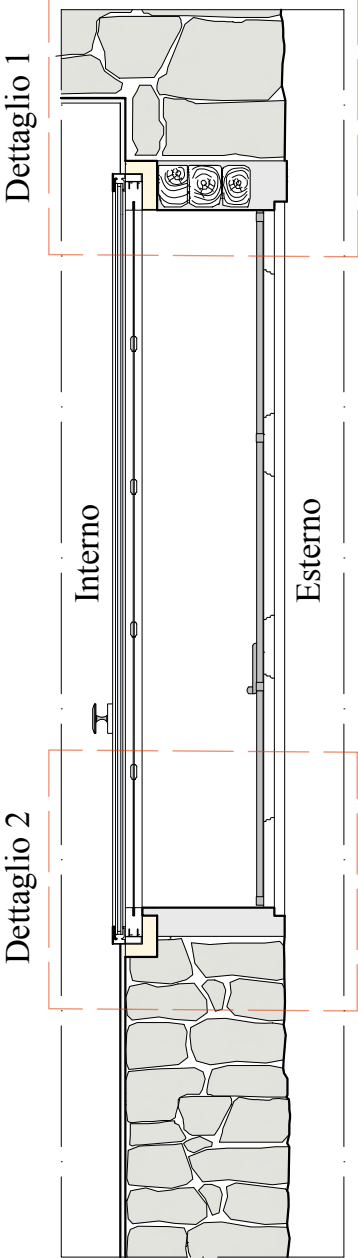
Sezione A-A



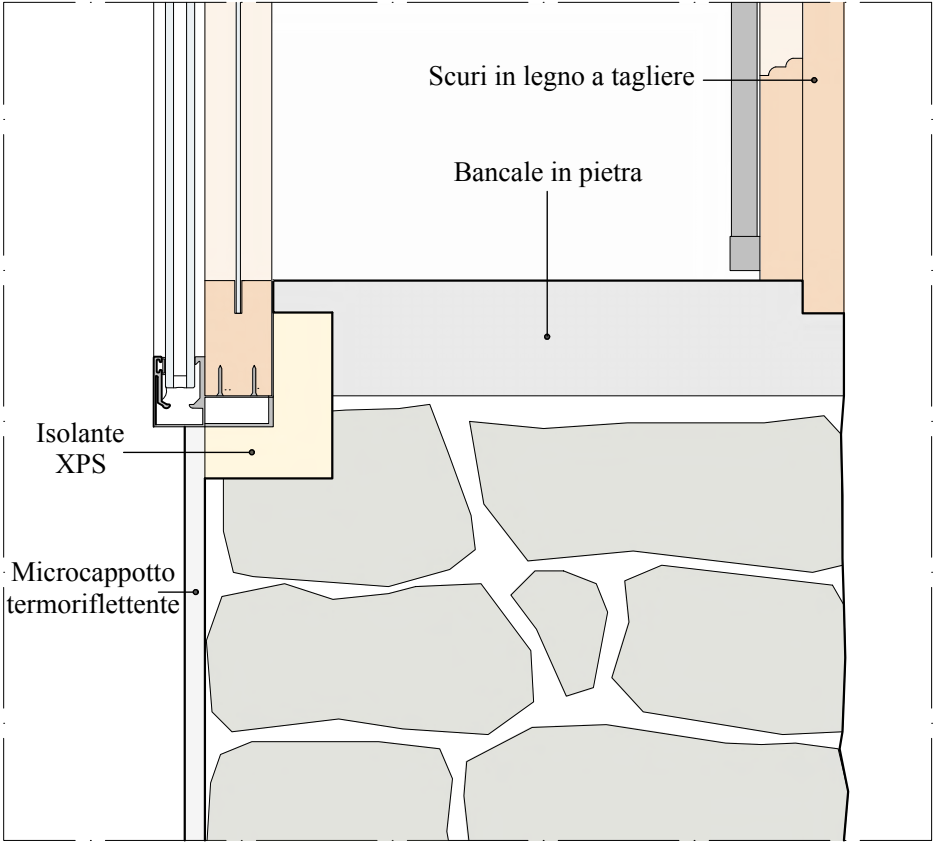
Dettaglio 1



Sezione A-A



Dettaglio 2



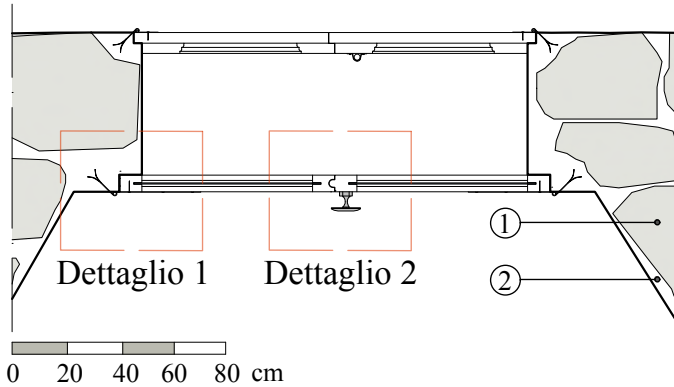
0 20 40 60 80 cm

0 20 40 60 cm

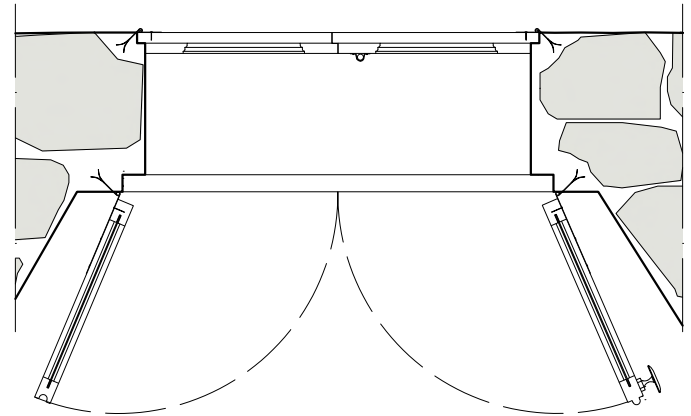
TAVOLA D1.2_ante

STATO DI FATTO Infisso storico inizi del 900

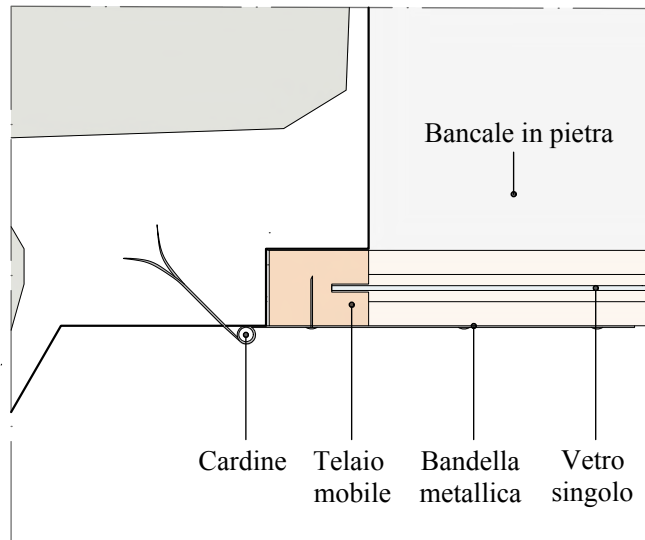
Sezione B-B



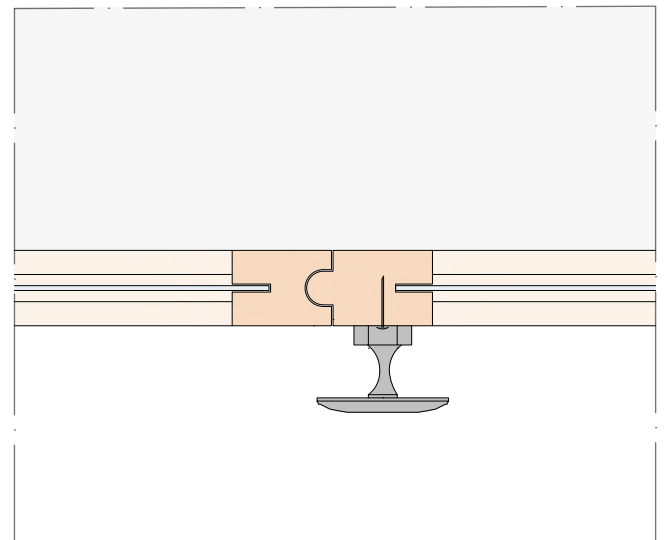
Sezione C-C



Dettaglio 1



Dettaglio 2



Calcolo trasmittanza infisso vetrato

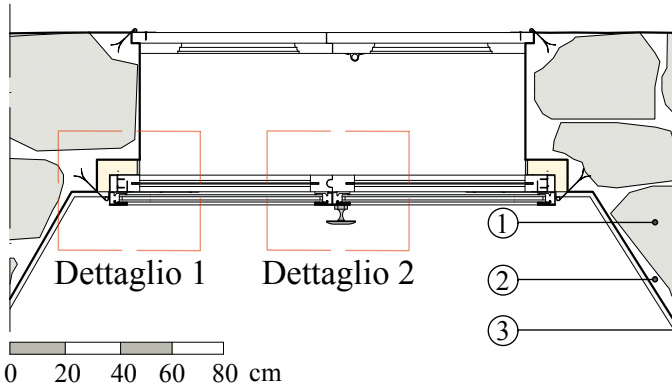
Ag: Area vetro [m ²]	1,22
Af: Area telaio [m ²]	0.616
Ig: Perimetro del vetro [m]	14,00
Ug: Trasmittanza vetro [W/m ² K]	5,70
Uf: Trasmittanza telaio [W/m ² K]	2,40
ψg: Trasmittanza distanziatore [W/m ² K]	-
Ug: Trasmittanza globale infisso vetrato [W/m²K]	4,60

Calcolo trasmittanza nicchia

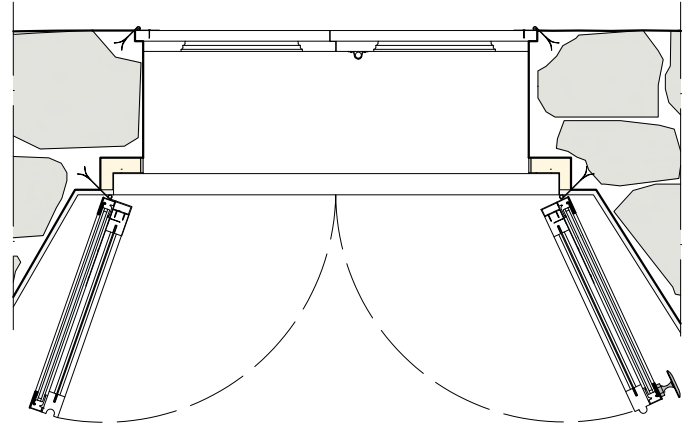
	Stratigrafia	Spessore [cm]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [m ² K/W]
	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,043
1	Parete in conci di arenaria e malta	40	1,5	0,26
2	Rasatura e intonachino	1	0,27	0,022
	Resistenza superficiale Interna	-	-	0,125
	Totale	41	-	0,48

Ug: Trasmittanza globale nicchia [W/m²K] = 2,2

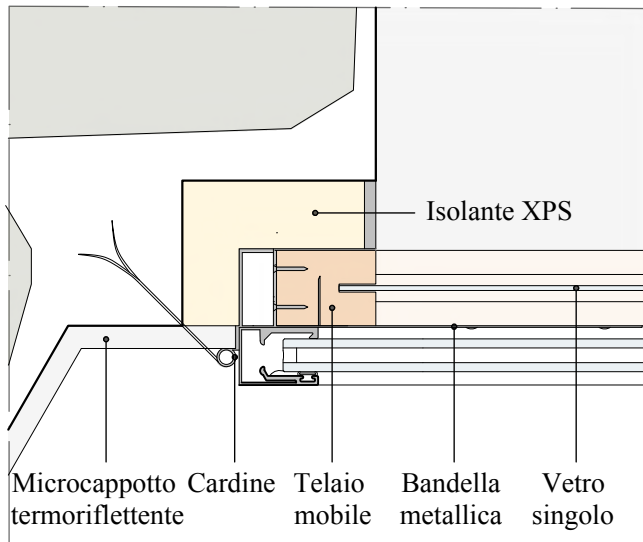
Sezione B-B



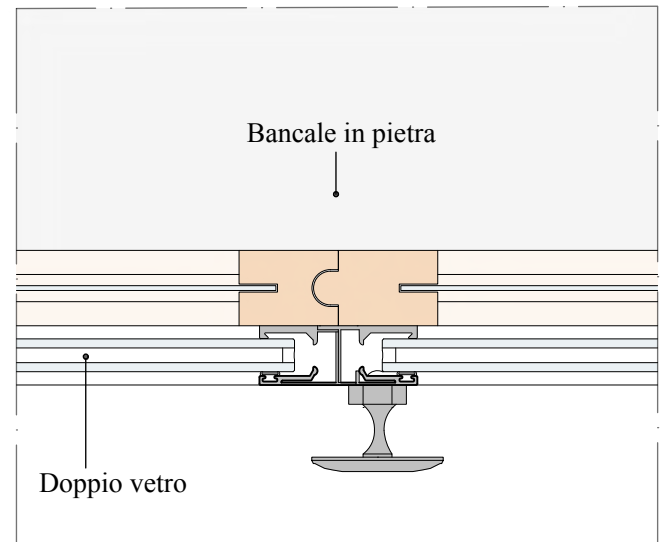
Sezione C-C



Dettaglio 1



Dettaglio 2



Calcolo trasmittanza infisso vetrato

Ag: Area vetro [m ²]	1,22
Af: Area telaio [m ²]	0.616
Ig: Perimetro del vetro [m]	14,00
Ug: Trasmittanza vetro [W/m ² K]	1,1
Uf: Trasmittanza telaio [W/m ² K]	2
ψg: Trasmittanza distanziatore [W/m ² K]	0,08
Ug: Trasmittanza globale infisso vetrato [W/m²K]	0,80

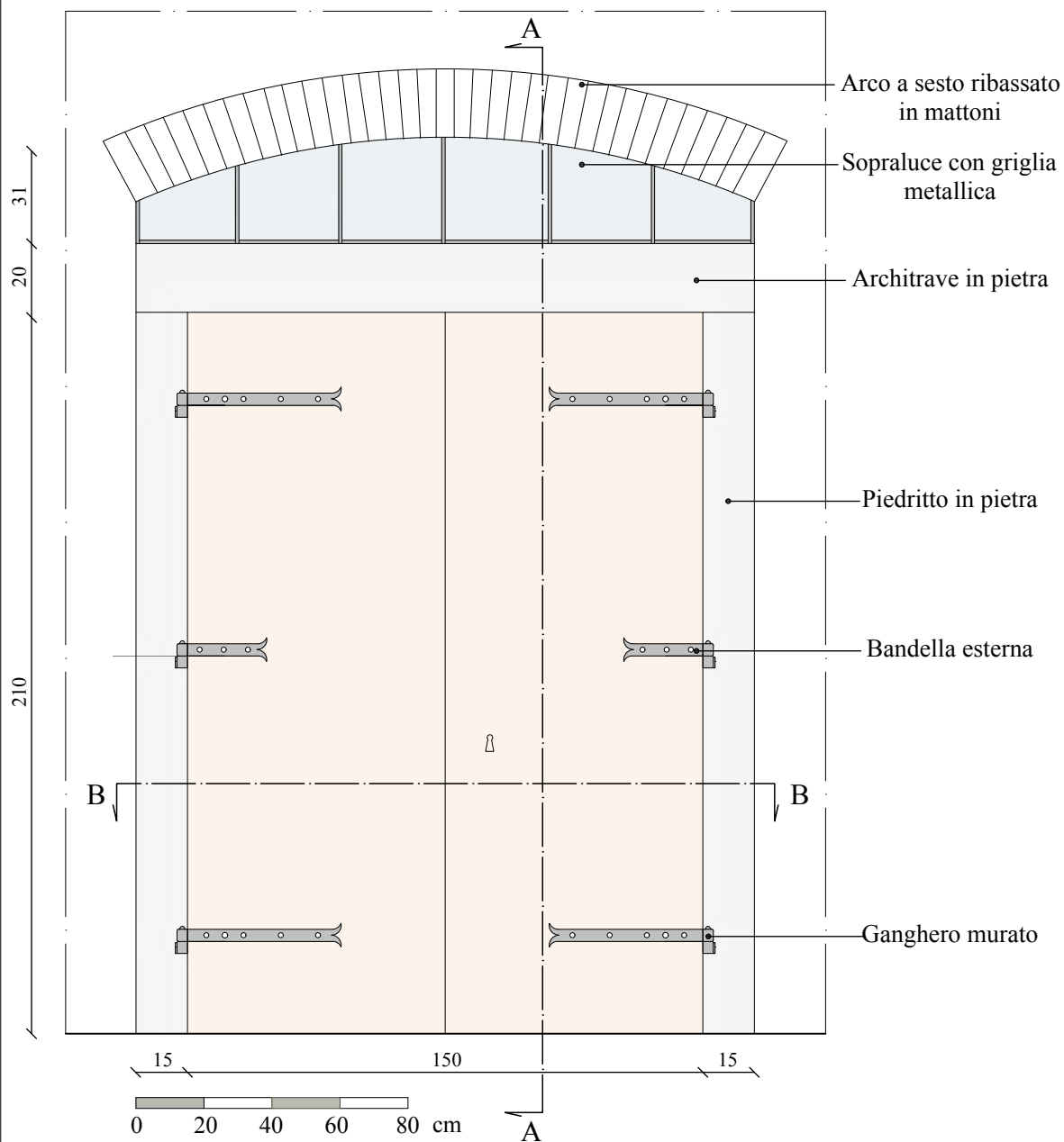
Calcolo trasmittanza nicchia

Stratigrafia		Spessore [cm]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [m ² K/W]
	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,043
1	Parete in conci di arenaria e malta	40	1,5	0,26
2	Rasatura e intonachino	1	0,27	0,022
3	Microcappotto termoriflettente	1,5	0,002	0,75
	Resistenza superficiale Interna	-	-	0,125
Totale		42	-	1,20
Ug: Trasmittanza globale nicchia [W/m²K] = 0,83				

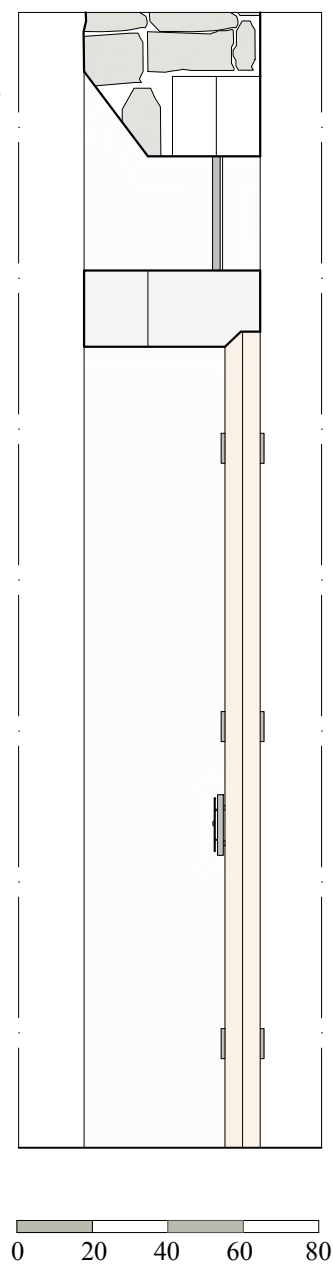
TAVOLA
E1_ante

STATO DI FATTO
Portone di servizio

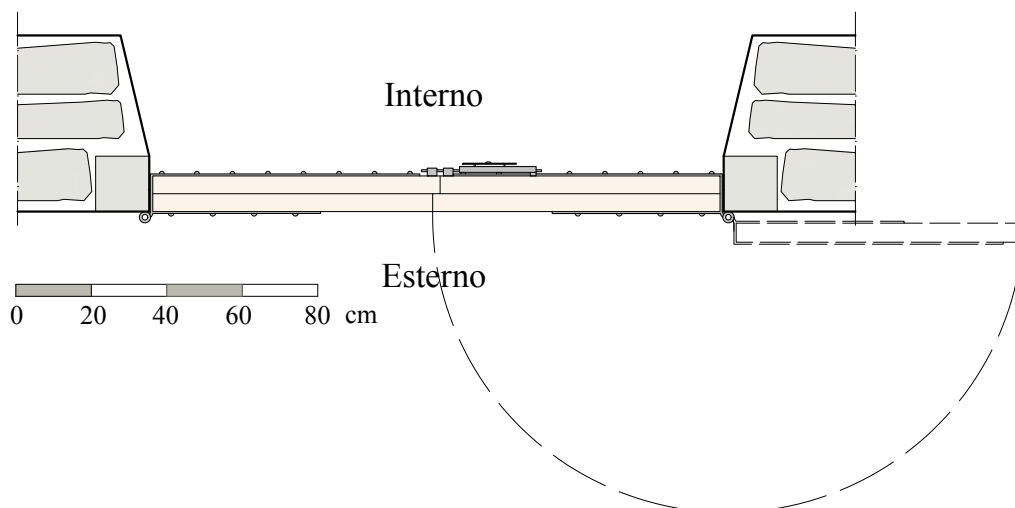
Prospetto esterno



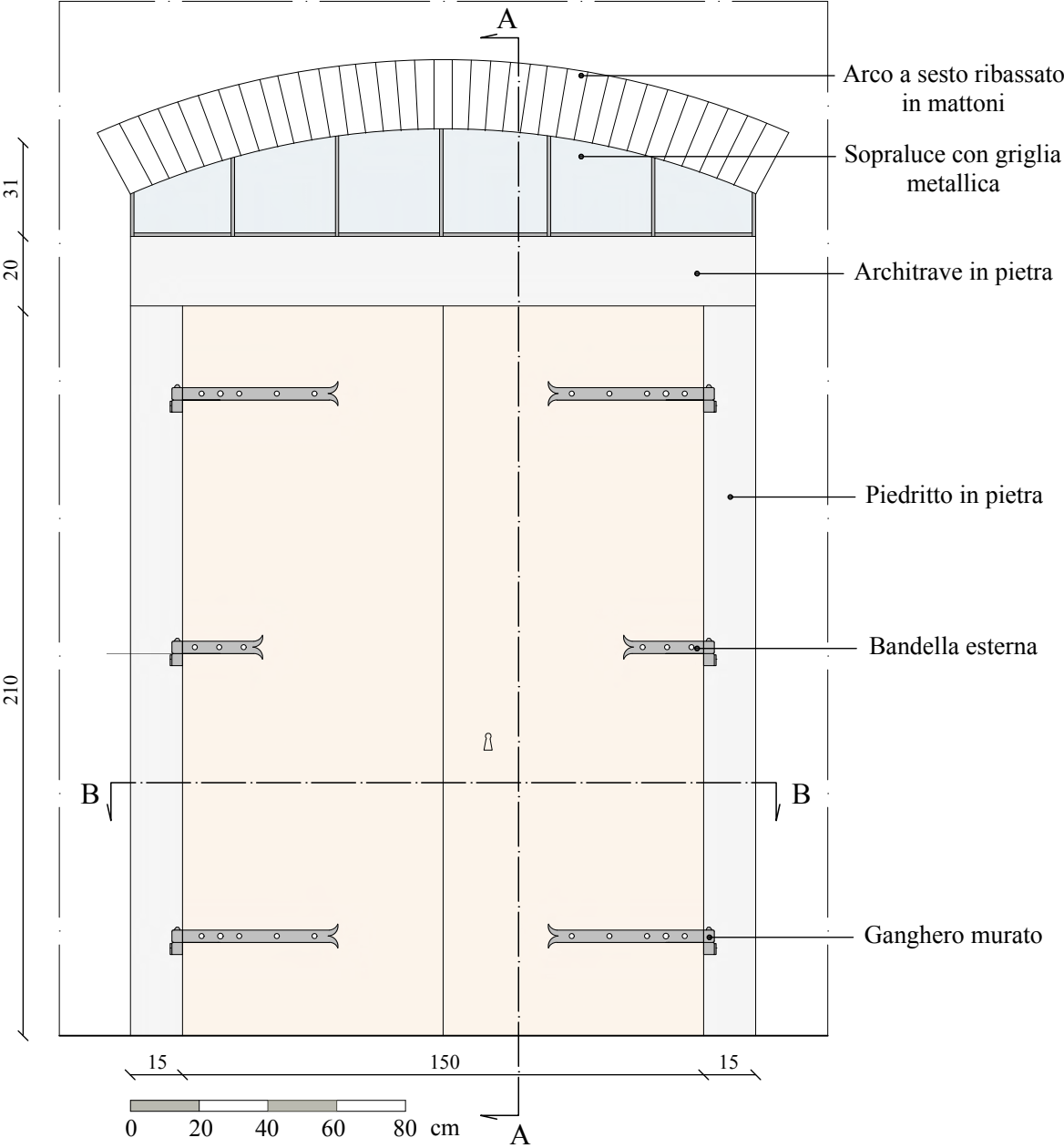
Sezione A-A



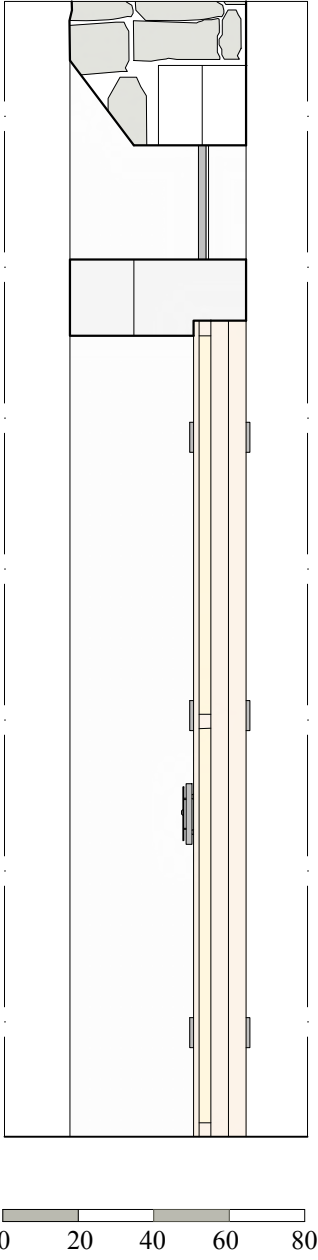
Sezione B-B



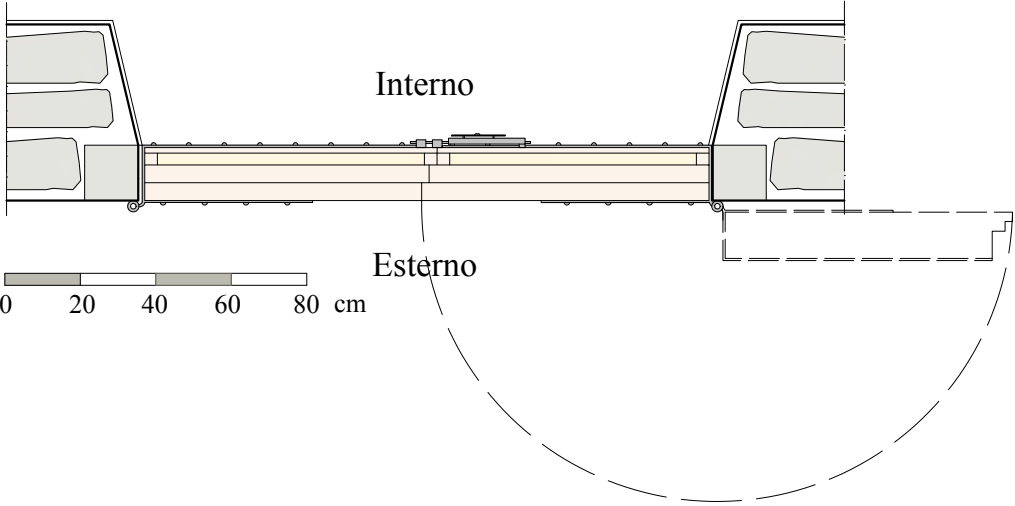
Prospetto esterno



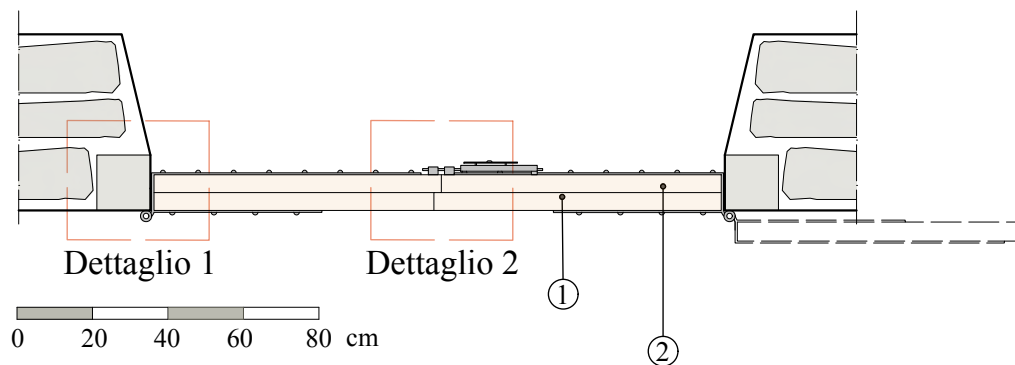
Sezione A-A



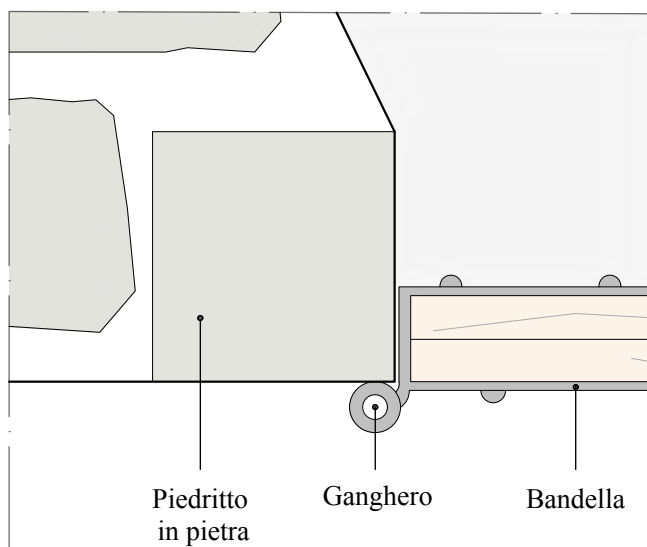
Sezione B-B



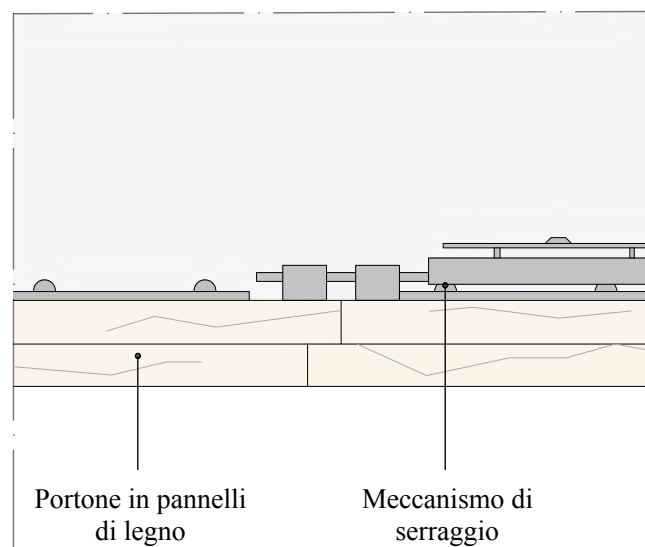
Sezione B-B



Dettaglio 1



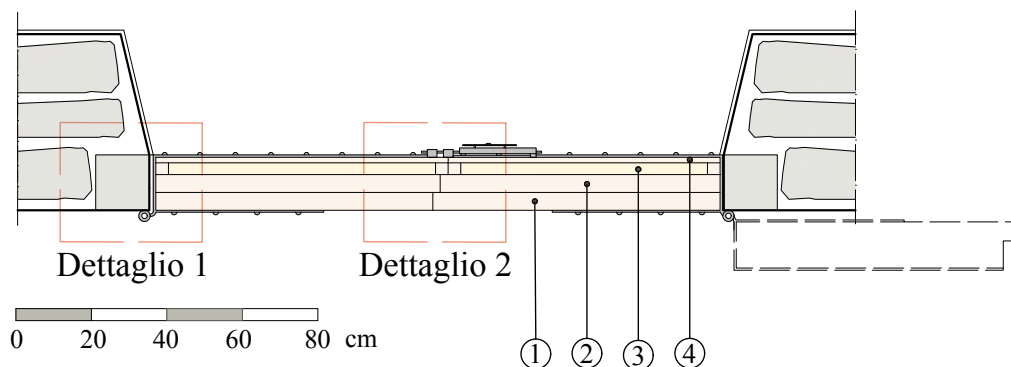
Dettaglio 2



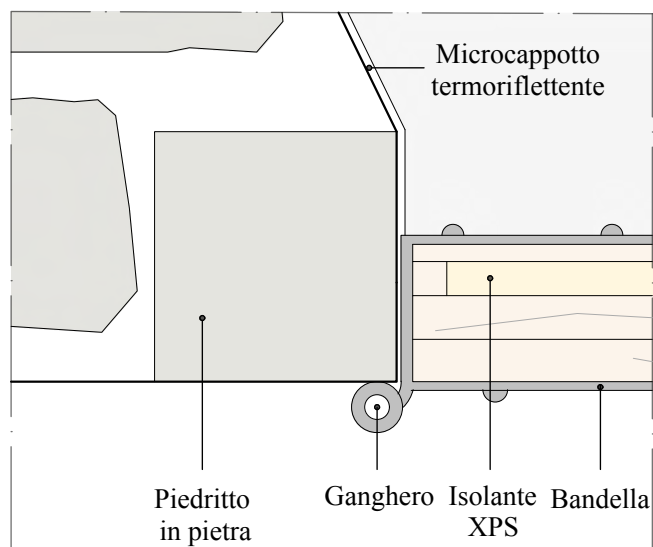
Calcolo trasmittanza portone

	Stratigrafia	Spessore [cm]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [m2K/W]
	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,043
1	Pannello esterno in legno	5	1,14	0,044
2	Pannello interno in legno	5	1,14	0,044
	Resistenza superficiale Interna	-	-	0,125
Totale		10	-	0,256
Ug: Trasmittanza globale portone[W/m2K] = 3,9				

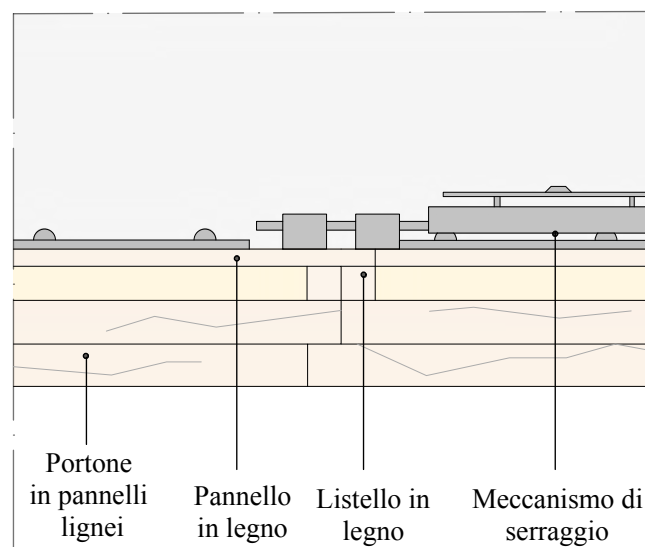
Sezione B-B



Dettaglio 1



Dettaglio 2



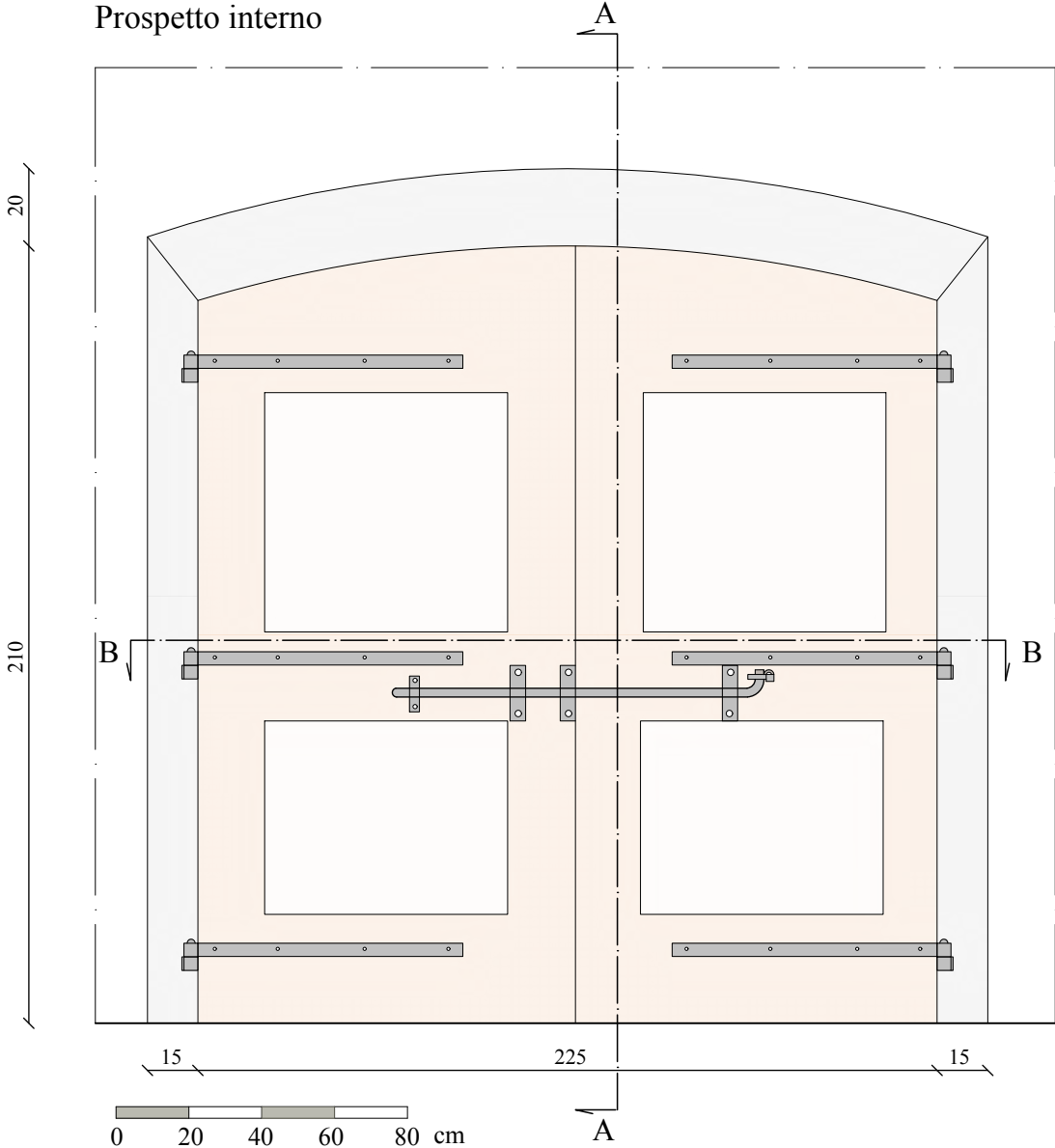
Calcolo trasmittanza portone

Stratigrafia		Spessore [cm]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [m2K/W]
	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,043
1	Pannello esterno in legno	5	1,14	0,044
2	Pannello interno in legno	5	1,14	0,044
3	Pannello in isolante XPS	4	0,035	1,142
4	Pannello di chiusura in legno	2	1,14	0,017
	Resistenza superficiale Interna	-	-	0,125
Totale		16	-	1,415
Ug: Trasmittanza globale portone [W/m2K] = 0,71				

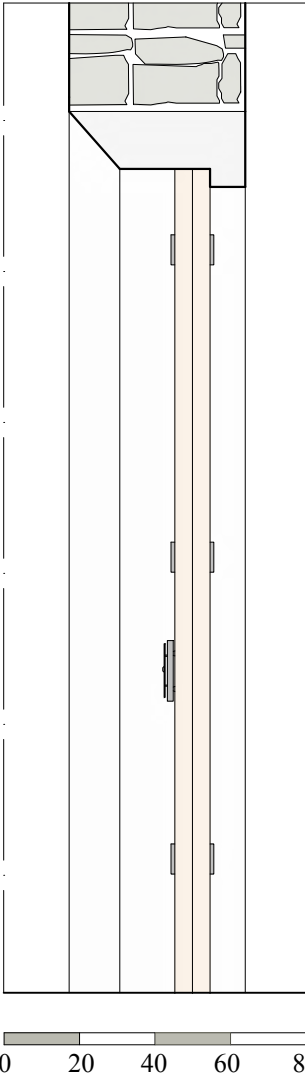
TAVOLA
E2_ante

STATO DI FATTO
Portone per edificio ad uso produttivo

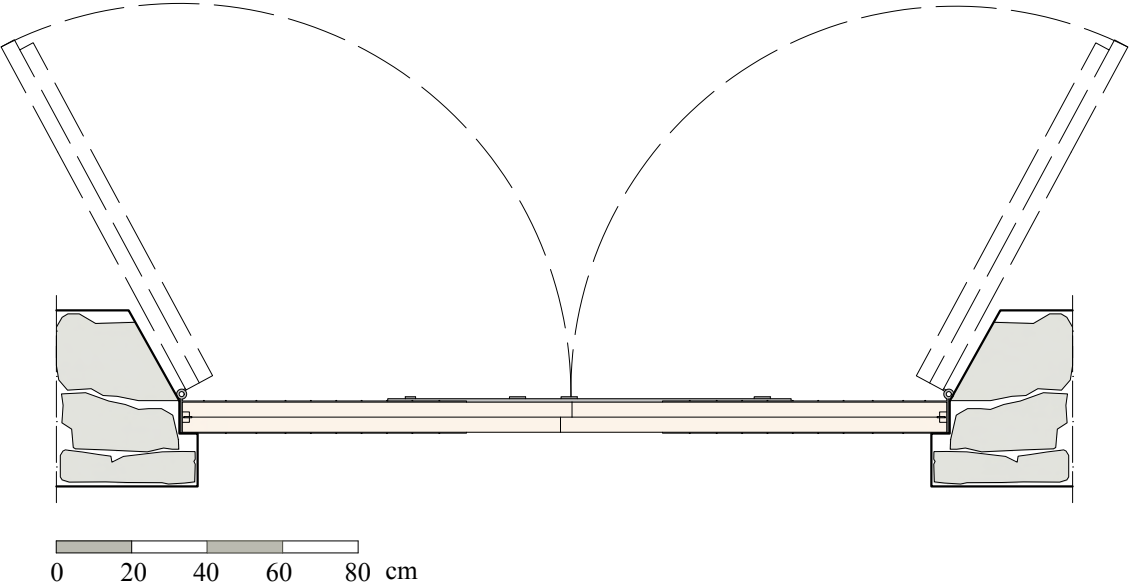
Prospetto interno



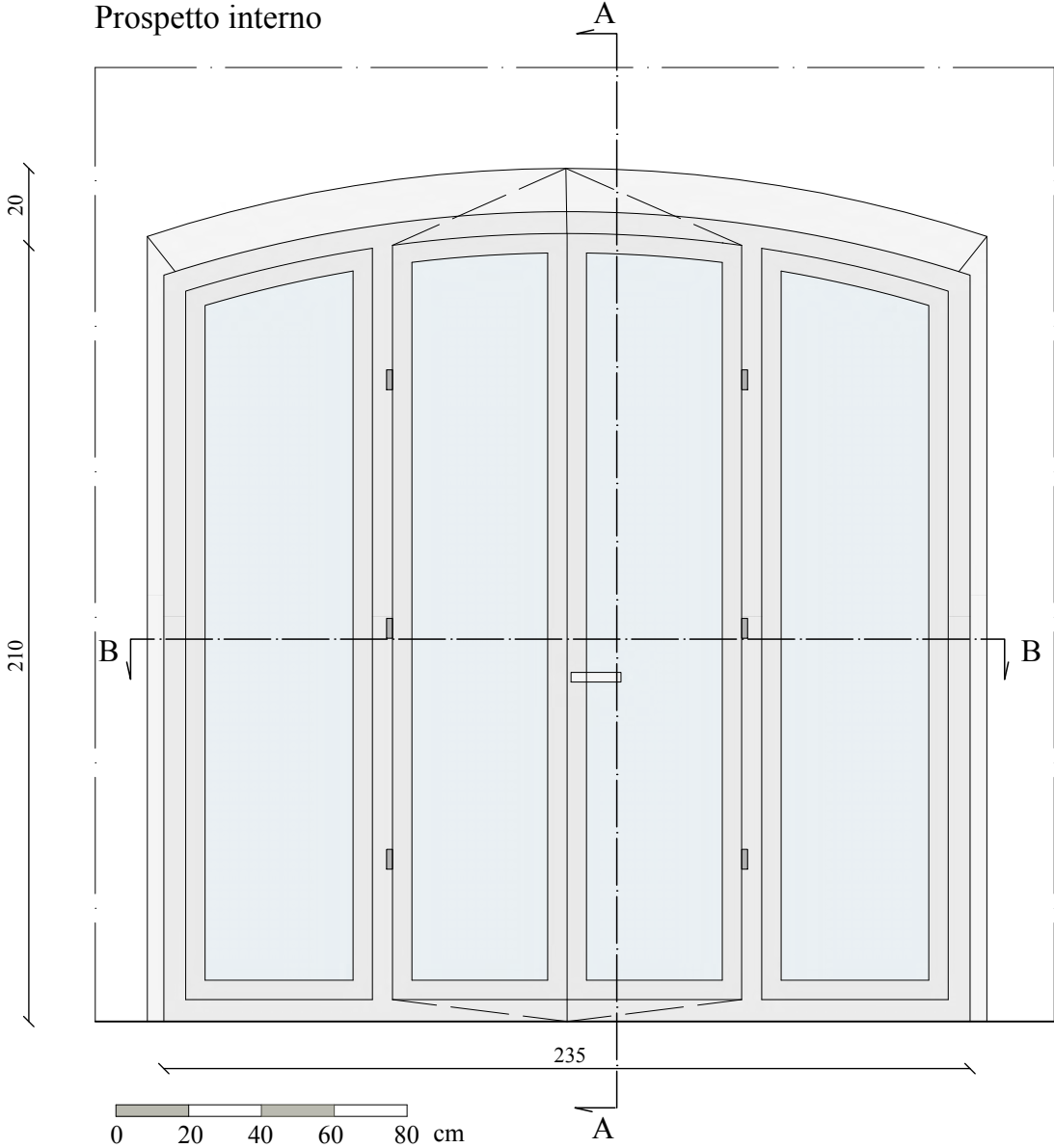
Sezione A-A



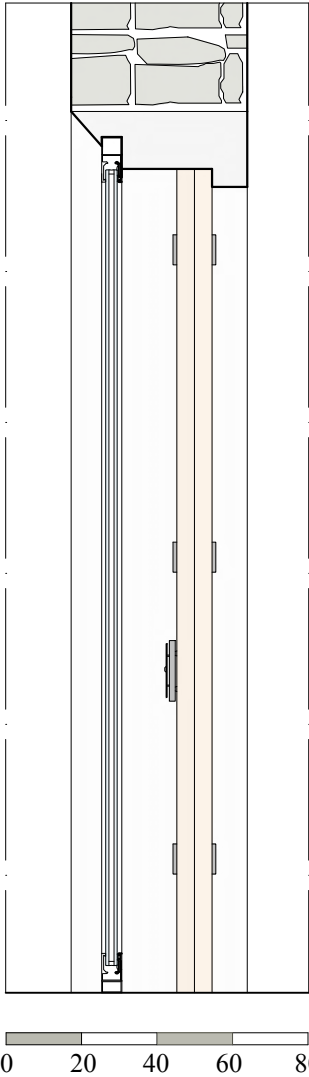
Sezione B-B



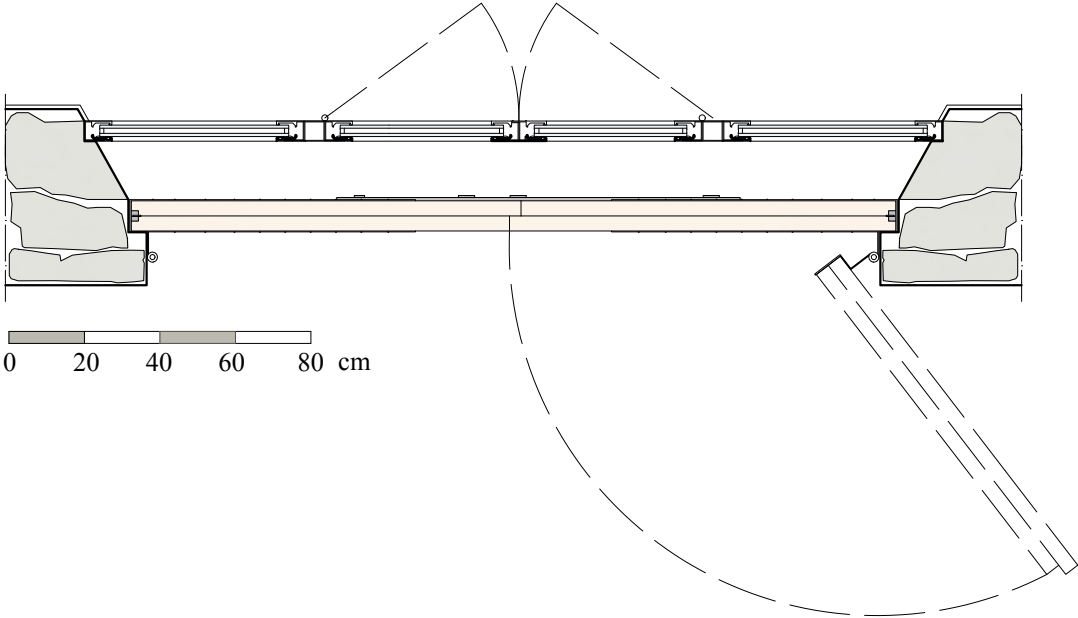
Prospetto interno



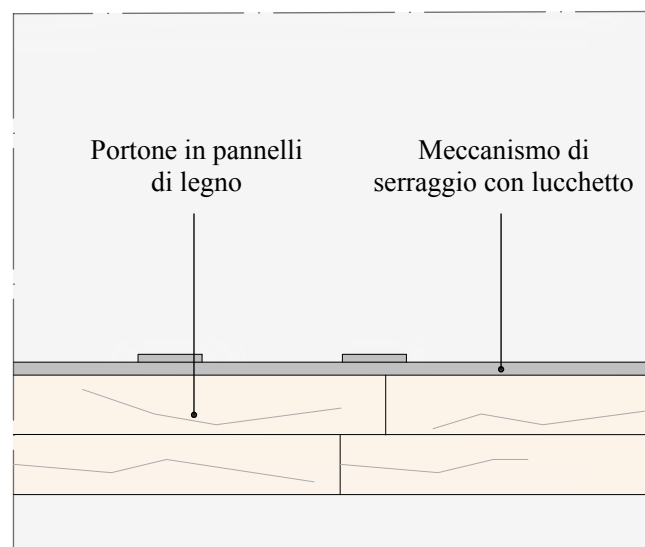
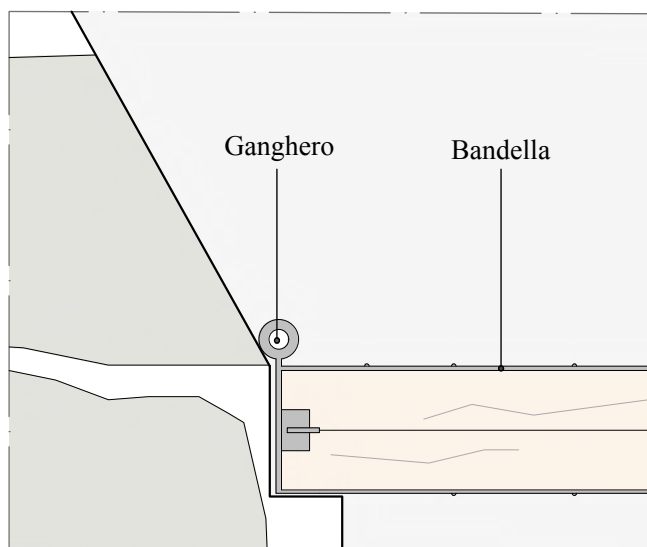
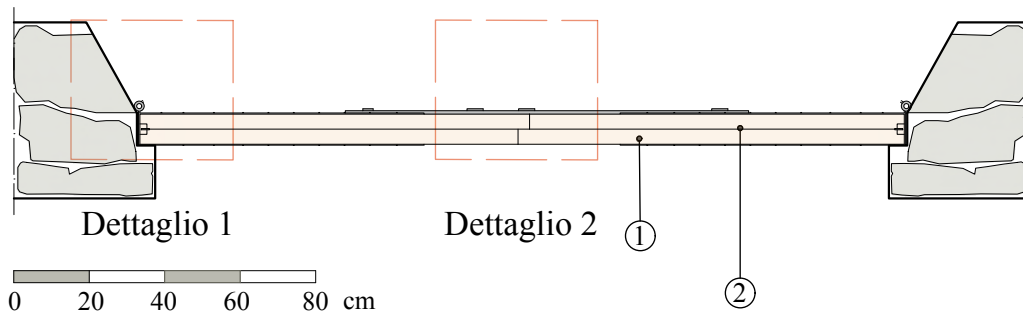
Sezione A-A



Sezione B-B

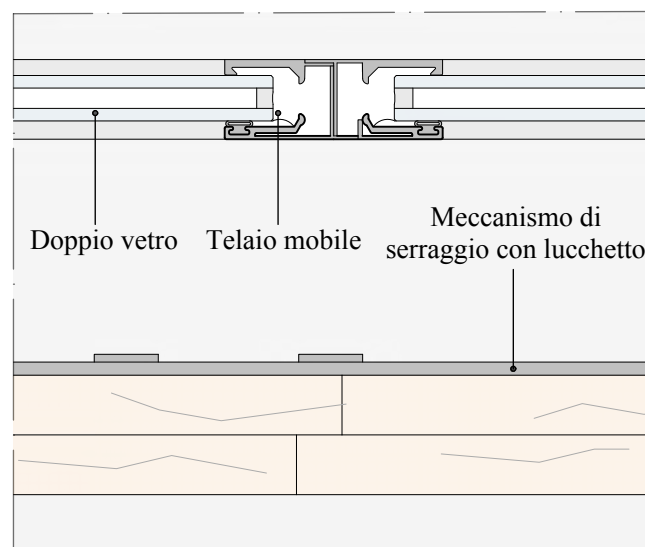
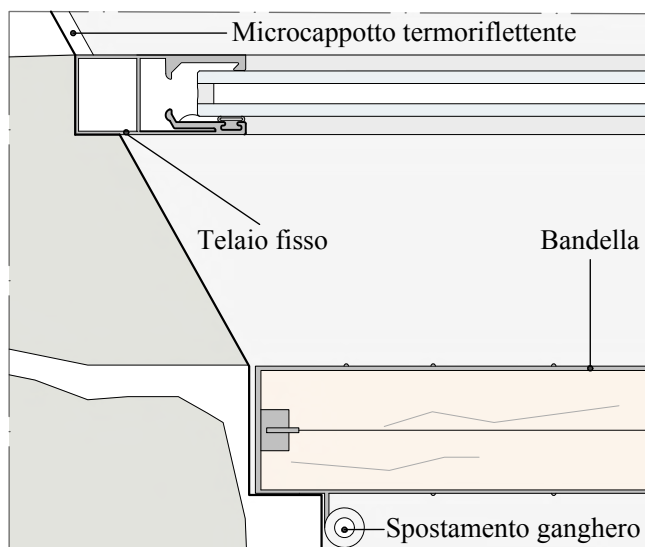
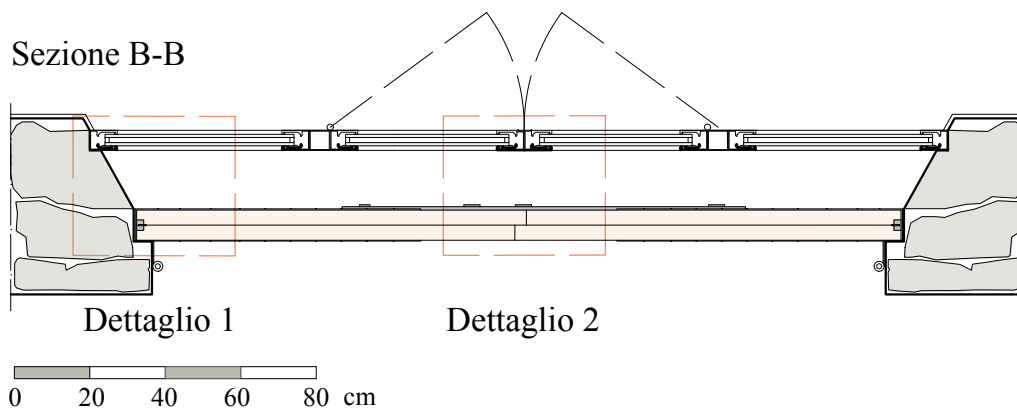


Sezione B-B



Calcolo trasmittanza portone

	Stratigrafia	Spessore [cm]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [m2K/W]
	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,043
1	Pannello esterno in legno	5	1,14	0,044
2	Pannello interno in legno	5	1,14	0,044
	Resistenza superficiale Interna	-	-	0,125
	Totale	10	-	0,256
Ug: Trasmittanza globale portone[W/m2K] = 3,9				



Calcolo trasmittanza portone

	Stratigrafia	Spessore [cm]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [m2K/W]
	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,043
1	Pannello esterno in legno	5	1,14	0,044
2	Pannello interno in legno	5	1,14	0,044
3	Porta vetrata con doppio vetro e argon	5	0,030	1,432
	Resistenza superficiale Interna	-	-	0,125
	Totale	15	-	1,688
Ug: Trasmittanza globale portone [W/m2K] = 0,59				

Bibliografia strutturata

Caratteri e tipi del patrimonio costruito in sasso

- Abatantuono Michelangelo, Dalle Donne Giancarlo, Zanolì Elisa, *Vivere e abitare la montagna dal Medioevo all'Età moderna. Forme e strutture dell'edilizia rurale nella collina bolognese tra XIII e XVIII secolo*, Gruppo di studi "Progetto 10 righe", Sasso Marconi 2006
- Bellicoso Alessandra, De Berardinis Pierluigi, Di Giovanni Gianni, Zordan Luigi, *La tradizione del costruire in pietra: materiali, tecniche, modelli e sperimentazioni*, Università degli Studi dell'Aquila, Dipartimento di Architettura e Urbanistica, Alinea Editrice, Aquila 2009
- Castagnoli Alessandro, *Morfologia e rendimento dei tessuti urbani: metodologia critico operativa per una valutazione tipologica degli interventi edilizi*, Clueb Casa Editrice, Bologna 2006
- Foschi Marina, *Case di pietra. Il recupero del patrimonio edilizio nel demanio forestale*, Azienda Regionale delle foreste, Istituto Beni culturali della Regione Emilia-Romagna, Bologna 1991
- Guccini Anna Maria, *Tipologie edilizie rurali storiche dell'Appennino bolognese: persistenze ed evoluzioni formali e volumetriche ricorrenti*, Assessorato Pianificazione territoriale, Provincia di Bologna 2008
- Istituto per i beni culturali della Regione Emilia-Romagna, Istituto per lo sviluppo economico dell'Appennino, *La fabbrica dell'Appennino. Architettura, storia e ornato*, Grafis Edizioni, Bologna 1988
- Italia Nostra, *Le case appenniniche come sedimentazione di una storia antropica nel percorso dell'architettura*, Clueb Casa Editrice, Bologna 1993
- Pennacchi Yuri, *Forme architettoniche in area geomateriale litica nell'Appennino tra Emilia-Romagna e toscana*, Università di Bologna, Dipartimento di Architettura, Bologna 2025
- Simoncini Adriano, *Case a Torre nell'Appennino bolognese dall'XI al XVI secolo*, Centro storico documentale "La loggia della Fornace", Pianoro (Bologna) 2003
- Vai Gian Battista, *Guida geologica all'Altro Appennino bolognese*, Bologna 2023
- Vitruvio Pollione Marco, *Sull'Architettura*, Giacomo Pirola, Milano 1829

Costruzioni in muratura portante: analisi, principi e tecniche di intervento

- Benedetti Anna Chiara, Costantino Carlo, Predari Giorgia, *Il manuale del recupero di San Giovanni Lipioni*, Dipartimento di Architettura dell'Università di Bologna, con l'Associazione di promozione Sociale (APS) "Nessuno Escluso" e il Gruppo di Azione Locale "Maiella Verde", Edicom Edizioni, Roma 2024
- Benedetti Cristina, *Risanare l'esistente: soluzioni per il comfort e l'efficienza energetica*, BuPress, Bolzano, 2011

- Boeri Andrea, *Tecnologie per il Recupero degli edifici rurali. Esperienze in Emilia-Romagna*, Minerva Edizioni, Bologna 2001
- Borri Antonio, De Maria Alessandro, *Il metodo IQM per la stima delle caratteristiche meccaniche delle murature allineamento alla circolare n. 7/2019*, Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia e Servizio Rischio Sismico Regione Umbria Ascoli Piceno 2019
- Caleca Luigi, De Vecchi Antonio, *Tecnologie di consolidamento delle strutture murarie*, Flaccovio Dario, Palermo, 1999
- Cattaneo Sara, D'Antino Tommaso, Pisani Marco Andrea, *Consolidamento delle strutture: guida ai criteri, ai materiali e alle tecniche più utilizzati*, Hoepli, Milano, 2019
- Cigni Giuseppe, *Il consolidamento murario. Tecniche d'intervento*, Edizioni Kappa Editore, Roma, 1978
- Conti Michele, Fabbri Kristian, *Progettazione energetica dell'architettura*, Roma, Dei, 2008
- Desogus Giuseppe, *Riqualificare, integrare, sostituire: il miglioramento della prestazione energetica del patrimonio costruito*, Edicom, Monfalcone, 2018
- Ditri Federica, Silva Maria Pia, Tubi, Norberto, *Gli edifici in pietra: recupero e costruzione, murature e solai, analisi bioclimatica e ambientale*, Sistemi editoriali, Napoli 2009
- Fossa Marco, Fondazione degli ordini degli Ingegneri della Liguria per la cultura, *Report n. 1 del 09/11/2022: Efficacia delle miscele nanotecnologiche con microsfele ceramiche a granulometria variabile commercializzate per l'isolamento termico a basso spessore (da 2 a 10 mm) degli edifici ai fini della riduzione dei consumi energetici*, Genova 2022.
- Gabriella Caterina, *Il recupero degli infissi*, Torino, UTET, 1995.
- Gulli Riccardo, *Recupero e conservazione degli edifici. Tutela e prevenzione in ambito sismico*, Edicom Edizioni, Roma 2018
- Marchi Laura, *Tipi edilizi nei comuni dell'Alta Valle del Reno: tecniche di intervento mirate alla riqualificazione energetica*, Università di Bologna, Dipartimento di Architettura, Bologna 2011
- Monari Margherita, *Tipi edilizi storici nei comuni dell'Alta Valle del Reno: Tecniche di intervento mirate al consolidamento strutturale*, Università di Bologna, Dipartimento di Architettura, Bologna 2012
- Nicchiarelli Federica, Rocchi Paolo, Turlo Anna Rita, *Manuale del risanamento: la difesa dall'umidità nella pratica edificatoria: le metodologie di intervento*, Kappa Editori, Roma 2000
- Rocchi Paolo, *Progettare il consolidamento: impostazione metodologica del progetto di consolidamento di costruzioni in muratura soggette a rischio sismico*, KappaEditori, Roma, 1989

Riferimenti normativi

- CEN (Comité Européen de Normalisation), *Structural Design Standards (EN 1990-1999)*, Brussels 2010

- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Aggiornamento delle *Norme tecniche per le costruzioni* Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018 (GU n.42 del 20-02-2018, Suppl. ord. n.8).
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *Istruzioni per l'applicazione dell'“Aggiornamento delle ‘Norme tecniche per le costruzioni’”* di cui al D.M. 17 gennaio 2018, Circolare 21 gennaio 2019 n. 7 C.S.LL.PP. (GU n.35 dell'11-02-2019, Suppl. ord. n.5).
- Ministero dello Sviluppo Economico, *Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici ; Schemi e modalità di riferimento per la compilazione della relazione tecnica di progetto ai fini dell'applicazione delle prescrizioni e dei requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici*; *Adeguamento del decreto del Ministro dello sviluppo economico, 26 giugno 2009, Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici*, Decreti ministeriali, 26 giugno 2015
- UNI 10351:2021, *Materiali e prodotti per edilizia: Proprietà termoigrometriche. Procedura di selezione dei valori di progetto*. Ente Italiano di Normazione, Milano.
- UNI EN ISO 6946, *Componenti ed elementi per edilizia. Resistenza termica e trasmittanza termica. Metodo di calcolo*. UNI, Milano.
- UNI EN ISO 10077-1, *Prestazione termica di finestre, porte e chiusure. Calcolo della trasmittanza termica. Parte 1: Metodo semplificato*. UNI, Milano.
- UNI EN ISO 13370, *Prestazione termica degli edifici. Trasmissione del calore per terreno* *Metodi di calcolo*. UNI, Milano.

Sitografia

- Progetto Alto Reno Toscano 2005, *Avanzi longobardi e germanici in alto reno e nel pistoiese*, <http://kenoms3.altervista.org/altoarenotoscano3/longobardismi.htm> , 13 maggio 2025
- Città Metropolitana di Bologna, *Storia economia società*, https://www.cittametropolitana.bo.it/appennino/Territorio/Storia_societa_economia , 20 maggio 2025

INDICE DELLE IMMAGINI

CAPITOLO 1:

- *Figura 1:* Inquadramento geografico dell'area oggetto di studio, l'Alto Appennino tosco-emiliano tra le province di Bologna e Forlì-Cesena. In rosse evidenziate le province di Bologna, Ravenna e Forlì-Cesena. In nero l'area del crinale appenninico corrispondente. [Regione Emilia-Romagna, 2024, Geoportale <http://geoportale.regione.emilia-romagna.it>];
- *Figura 1.1:* Schema geologico della Regione Emilia-Romagna (modificato da Carta Geologica d'Italia, Fogli 237 e 252, 1: 50.000) [Regione Emilia-Romagna, 2024, Geologia, suoli e sismica <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/geologia/risorse-estrattive/le-risorse-estrattive>];
- *Figura 1.2:* Schema geologico della montagna bolognese da Sasso Marconi a Barberino di Mugello (modificato da Carta Geologica d'Italia, Fogli 237 e 252, 1: 50.000). [Vai Gian Battista, 2023, *Guida geologica all'Altro Appennino bolognese*. https://www.researchgate.net/publication/368302128_Guida_geologica_all%27alto_Appennino_bolognese];
- *Figura 1.3:* Divisione del territorio nazionale secondo le sei Zone individuate dal D.P.R. n.412 del 26 agosto 1993. [D.P.R. 412/1993, aggiornato al 24.10.2018, allegato A];
- *Figura 1.4:* Distribuzione geografica del numero degli eventi estremi di precipitazione in autunno. [ARPARE e Città Metropolitana di Bologna, 202, *Proiezioni climatiche nella Città metropolitana di Bologna*. <https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/clima/previsioni-e-proiezioni/proiezioni-climatiche/proiezioni-climatiche-nella-citta-metropolitana-di-bologna>];
- *Figura 1.5:* Distribuzione geografica della temperatura media annua. [ARPARE e Città Metropolitana di Bologna, 202, *Proiezioni climatiche nella Città metropolitana di Bologna*. <https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/clima/previsioni-e-proiezioni/proiezioni-climatiche/proiezioni-climatiche-nella-citta-metropolitana-di-bologna>];
- *Figura 1.6:* Paramenti murari in pietra di cava [Istituto per i beni culturali della Regione Emilia-Romagna, Istituto per lo sviluppo economico dell'Appennino, *La fabbrica dell'Appennino. Architettura, storia e ornato*, Grafis Edizioni, Bologna 1988];
- *Figura 1.7:* Cantonale in pietra di cava lavorata. [Istituto per i beni culturali della Regione Emilia-Romagna, Istituto per lo sviluppo economico dell'Appennino, *La fabbrica dell'Appennino. Architettura, storia e ornato*, Grafis Edizioni, Bologna 1988];
- *Figura 1.8:* Finestre di abitazioni: nell'ultima è possibile vedere decorazioni a losanghe datate 1782. [Istituto per i beni culturali della Regione Emilia-Romagna, Istituto per lo sviluppo economico dell'Appennino, *La fabbrica dell'Appennino. Architettura, storia e ornato*, Grafis Edizioni, Bologna 1988];
- *Figura 1.9:* Porte dell'Alta valle del Reno. [Istituto per i beni culturali della Regione Emilia-Romagna, Istituto per lo sviluppo economico dell'Appennino, *La fabbrica dell'Appennino. Architettura, storia e ornato*, Grafis Edizioni, Bologna 1988];

- *Figura 1.10*: Manto di copertura in piagne [Istituto per i beni culturali della Regione Emilia-Romagna, Istituto per lo sviluppo economico dell'Appennino, *La fabbrica dell'Appennino. Architettura, storia e ornato*, Grafis Edizioni, Bologna 1988];
- *Figura 1.11*: Chiusure orizzontali intermedie piane con solaio ligneo riscontrati nel comune di Camugnano [Foschi Marina, *Case di pietra. Il recupero del patrimonio edilizio nel demanio forestale*, Azienda Regionale delle foreste, Istituto Beni culturali della Regione Emilia-Romagna, Bologna 1991];

CAPITOLO 2:

- *Figura 2*: Tipo edilizio: sintesi tra Venustas, Firmitas, Utilitas. [Elaborazione grafica di Lorenzo Antoniani formulata tramite consultazione di: Marco Vitruvio Pollione "Sull'Architettura" Libro I, Capo III. Giacomo Pirola, Milano 1829];
- *Figura 2.1 - 2.2 - 2.3*: Prospetto est-sud-nord torre di Roda, Camugnano (BO): tracciato regolatore ad quadratum e *ad triagulum*. [Yuri Pennacchi, 2025, *Forme architettoniche in area geomateriale litica nell'Appennino tra Emilia-Romagna e Toscana*];
- *Figura 2.4 - 2.5 - 2.6*: Prospetto est-sud-nord torre di Roda, Camugnano (BO): Quote tramite unità di misura storiche [Yuri Pennacchi, 2025, *Forme architettoniche in area geomateriale litica nell'Appennino tra Emilia-Romagna e Toscana*];
- *Figura 2.7*: Tipica capanna circolare dell'Appennino. Il fitto intrecciato di verghe che forma la parte sovente veniva intonacata con fango. [Guccini Anna Maria, *Tipologie edilizie rurali storiche dell'Appennino bolognese: persistenze ed evoluzioni formali e volumetriche ricorrenti*, Assessorato Pianificazione territoriale, Provincia di Bologna 2008];
- *Figura 2.8*: Tipologia della capanna celtica emiliana. [Guccini Anna Maria, *Tipologie edilizie rurali storiche dell'Appennino bolognese: persistenze ed evoluzioni formali e volumetriche ricorrenti*, Assessorato Pianificazione territoriale, Provincia di Bologna 2008];
- *Figura 2.9*: Evoluzione in linea di più sistemi edilizi. [Yuri Pennacchi, 2025, *Forme architettoniche in area geomateriale litica nell'Appennino tra Emilia-Romagna e Toscana*];
- *Figura 2.10*: Corretta costruzione di una cella elementare che segue le curve di livello, con conseguente "deformazione" della pianta della cella. [Yuri Pennacchi, 2025, *Forme architettoniche in area geomateriale litica nell'Appennino tra Emilia-Romagna e Toscana*];
- *Figura 2.11*: Crescita in linea di celle elementari. [Yuri Pennacchi, 2025, *Forme architettoniche in area geomateriale litica nell'Appennino tra Emilia-Romagna e Toscana*];
- *Figura 2.12*: Antiche case nel borghetto di Vezzano di Sopra, Loiano. Modalità di sviluppo in linea. [Guccini Anna Maria, *Tipologie edilizie rurali storiche dell'Appennino bolognese: persistenze ed evoluzioni formali e volumetriche ricorrenti*, Assessorato Pianificazione territoriale, Provincia di Bologna 2008];
- *Figura 2.13*: Crescita a spirale di una cella elementare. [Yuri Pennacchi, 2025, *Forme architettoniche in area geomateriale litica nell'Appennino tra Emilia-Romagna e Toscana*];
- *Figura 2.14*: Roffeno, Castel d'Aiano: Casa-torre Poggiolo. [Guccini Anna Maria, *Tipologie edilizie rurali storiche dell'Appennino bolognese: persistenze ed evoluzioni formali e volumetriche ricorrenti*, Assessorato Pianificazione territoriale, Provincia di Bologna 2008];

- *Figura 2.15: Castel d'Aiano: Torre della Famaticcia.* [Guccini Anna Maria, *Tipologie edilizie rurali storiche dell'Appennino bolognese: persistenze ed evoluzioni formali e volumetriche ricorrenti*, Assessorato Pianificazione territoriale, Provincia di Bologna 2008];
- *Schema 2.16-2.17-2.18: Schema riassuntivo delle modalità di aggregazione di celle elementari.* [Yuri Pennacchi, 2025, *Forme architettoniche in area geomateriale litica nell'Appennino tra Emilia-Romagna e Toscana*];

CAPITOLO 3:

- *Tabella 3:* Valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura. [Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Aggiornamento delle *Norme tecniche per le costruzioni* Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018 (GU n.42 del 20-02-2018, Suppl. ord. n.8)];
- *Tabella 3.1:* Coefficienti correttivi massimi da applicarsi in presenza di: malta di caratteristiche buone; ricorsi o listature; sistematiche connessioni. [Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Aggiornamento delle *Norme tecniche per le costruzioni* Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018 (GU n.42 del 20-02-2018, Suppl. ord. n.8)];
- *Tabella 3.2:* Valori dei coefficienti di combinazione. [Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Aggiornamento delle *Norme tecniche per le costruzioni* Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018 (GU n.42 del 20-02-2018, Suppl. ord. n.8)];
- *Tabella 3.3:* Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU. [Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Aggiornamento delle *Norme tecniche per le costruzioni* Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018 (GU n.42 del 20-02-2018, Suppl. ord. n.8)];
- *Tabella 3.4:* Giudizi attribuibili ai parametri della regola dell'arte. [Borri Antonio, De Maria Alessandro, *Il metodo IQM per la stima delle caratteristiche meccaniche delle murature allineamento alla circolare n. 7/2019*, Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia e Servizio Rischio Sismico Regione Umbria Ascoli Piceno 2019];
- *Tabella 3.5:* Attribuzione delle categorie murarie in base ai valori di IQM. [Borri Antonio, De Maria Alessandro, *Il metodo IQM per la stima delle caratteristiche meccaniche delle murature allineamento alla circolare n. 7/2019*, Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia e Servizio Rischio Sismico Regione Umbria Ascoli Piceno 2019];
- *Figura 3.6:* Meccanismi di collasso di primo tipo. [Margherita Monari, 2012, *Tecniche di intervento mirate al consolidamento strutturale*];
- *Figura 3.7:* Meccanismi di collasso di secondo tipo: flessione verticale e orizzontale. [Margherita Monari, 2012, *Tecniche di intervento mirate al consolidamento strutturale*];
- *Figura 3.8:* Dissesti localizzati [da: G. Menditto; *Fessurazioni nelle strutture*];
- *Figura 3.9:* Schematizzazione di smorzamento e sfalsamento di un'onda termica su parete piana in muratura. [Fornaciscan, 2020, *Comportamento termico delle murature e zone climatiche*];
- *Tabella 3.10-3.13-3.14-3.15:* Trasmittanza termica (U) massima delle strutture opache verticali e orizzontali, strutture opache e trasparenti di chiusura. [appendice A del Decreto interministeriale del 26 giugno 2015 in vigore da gennaio 2021 come DL 199/2021];

- *Figura 3.11*: Diagramma di Glaser: confronto tra curva delle pressioni parziali (Pr) e curva delle pressioni di saturazione (Pn) con relativa condizione di condensa. [Sole 24ore, *Condensa e muffe, quali le cause e i possibili rimedi* https://i2.res.24o.it/docs/Editrice/ILSOLE24ORE/QUOTIDIANO_CONDOMINIO/Online/_Oggetti_Correlati/Documenti/2019/05/30/muffe.pdf] ;
- *Tabella 3.12*: Valori di riferimento per conduttività termica nelle tre categorie di terreno [UNI EN ISO 9646/2018];

CAPITOLO 4:

- *Tabella 4*: Valori del coefficiente K per il calcolo del valore medio dei parametri meccanici del materiale [Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Aggiornamento delle *Norme tecniche per le costruzioni* Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018 (GU n.42 del 20-02-2018, Suppl. ord. n.8)];

CAPITOLO 5:

- *Figura 5*: Iniezione di miscela consolidante nello spessore della muratura. [Inietta&Consolida, <https://www.tecnored.it/consolidamento-murature/>]
- *Figura 5.1-5.2*: Sistema di ristilatura armata dei giunti su entrambe i prospetti e Sistema combinato di ristilatura armata e intonaco armato. [FibreNet, <https://fibrenet.it/edilizia/reticola-ristilatura-armata/>]
- *Figura 5.3*: Dettaglio della rondella con trefolo metallico sottofuga. [Ing. A. Guidotti, Ing. B.I. Vicini, 2007, *Edificio ex-rurale in area geomateriale litica*]
- *Figura 5.4*: Maglia metallica su paramento in pietra. [Ing. A. Guidotti, Ing. B.I. Vicini, 2007, *Edificio ex-rurale in area geomateriale litica*]
- *Figura 5.5*: Muratura sottoposta a tecnica di scuci-cuci. (differenza cromatica per evidenziare le due porzioni). [Gulli Riccardo, *Recupero e conservazione degli edifici. Tutela e prevenzione in ambito sismico*, Edicom Edizioni, Roma 2018];
- *Figura 5.6*: Soletta collaborante in cls su orditura lignea esistente. [Mega, 2023, *Consolidamento solaio in legno*];
- *Figura 5.7*: Sezione su nodo interpiano. Posizione tirante e piastra. [BiBlus, 2024, *Tiranti e catene nelle murature: progettazione e funzioni*]
- *Figura 5.8*: Dettaglio inserimento cuffia aperta e posizionamento trave. [Gulli Riccardo, *Recupero e conservazione degli edifici. Tutela e prevenzione in ambito sismico*, Edicom Edizioni, Roma 2018];
- *Figura 5.9*: Cordolo sommitale in traliccio metallico con connessioni saldate alle cuffie metalliche di innesto dei puntoni [Gulli Riccardo, *Recupero e conservazione degli edifici. Tutela e prevenzione in ambito sismico*, Edicom Edizioni, Roma 2018];
- *Figura 5.10*: Particolare di un diatono per muratura a doppio paramento in pietrame
- *Figura 5.11*: Interventi di sottomurazione in mattoni e in c.a. [Gulli Riccardo, *Recupero e conservazione degli edifici. Tutela e prevenzione in ambito sismico*, Edicom Edizioni, Roma 2018];

- *Figura 5.12*: Sistema di cordoli perimetrali in c.a. [Gulli Riccardo, *Recupero e conservazione degli edifici. Tutela e prevenzione in ambito sismico*, Edicom Edizioni, Roma 2018];
- *Figura 5.13*: Sistema di sottofondazione in pali e cordoli per connessione alla fondazione esistente. [Ingegno, Consolidamento delle fondazioni dall'esterno o dall'interno dell'edificio tramite pali di piccolo diametro, <https://www.ingegno-web.it/articoli/consolidamento-delle-fondazioni-dall-esterno-o-dall-interno-dell-edificio-tramite-pali-di-piccolo-diametro/>]
- *Figura 5.14*: Schematizzazione in clima invernale ed estivo dell'isolamento esterno e interno. interno [Laura Marchi, 2012, *Tipi edilizi storici nei comuni dell'alta valle del Reno. Tecniche di intervento mirate alla riqualificazione energetica*];
- *Figura 5.15*: Caratteristiche del microcappotto nanotecnologico MANTICERAMIC. [MANTICERAMIC, scheda tecnica del prodotto];
- *Figura 5.16-5.18-5.20*: Stratigrafie per soluzioni di isolamento interno [Laura Marchi, 2012, *Tipi edilizi storici nei comuni dell'alta valle del Reno. Tecniche di intervento mirate alla riqualificazione energetica*];
- *Tabella 5.17-5.19-5.21*: Calcolo trasmittanza del pacchetto stratigrafico. interno [Laura Marchi, 2012, *Tipi edilizi storici nei comuni dell'alta valle del Reno. Tecniche di intervento mirate alla riqualificazione energetica*];
- *Figura 5.22*: Sezione in cui viene evidenziata la porzione di muratura interessata dalla barriera chimica con applicazione di resine a pressione atmosferica. [CoseCasa, 2013, *L'umidità nei muri per risalita capillare*];
- *Figura 5.23*: Intervento di elettrosmosi attiva blanda. [Margherita Monari, 2012, *Tecniche di intervento mirate al consolidamento strutturale*];
- *Tabella 5.24-5.25-5.26*: Analisi e risultati sulle prestazioni igrotermiche del solaio di copertura, solaio di fondazione e pareti esterne. [Sintesi di Lorenzo Antoniani].