UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELL'AQUILA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE-ARCHITETTURA E AMBIENTALE

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile, Edile – Architettura e Ambientale

Curriculum Ingegneria Edile-Architettura

XXXVIII ciclo

Tesi di Dottorato in

PROTOCOLLO DI CANTIERE PER LA RIMOZIONE DI OPERE PROVVISIONALI IN SICUREZZA, ANCHE MEDIANTE L'IMPIEGO DI APPROCCIO BIM

SSD: CEAR-08/B

Dottorando

Giulia D'Alberto

_____

Coordinatore del corso

Prof. Federico De Matteis

_____

Supervisore

Prof. ssa Marianna Rotilio

_____

Co-supervisore

Prof. Angelo Di Egidio

_____

a.a. 2024/2025

Protocollo di cantiere per la rimozione di opere provvisionali in sicurezza, anche mediante l'impiego di approccio BIM

Giulia D'Alberto
Prof.ssa Marianna Rotilio

Protocollo di cantiere per la rimozione di opere provvisionali in sicurezza, anche mediante l’impiego di approccio BIM

Giulia D’Alberto
289588
Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile - Architettura e Ambientale
DICEAA
Università degli Studi dell'Aquila

Copyright © 2025, Giulia D’Alberto. Tutti i diritti sono riservati.

Il materiale di cui l'autore è proprietario non può essere utilizzato senza il permesso dell'autore. Il permesso di riprodurre il materiale coperto da copyright non si estende a qualsiasi materiale protetto dal copyright di terze parti; l'autorizzazione per riprodurre tale materiale deve essere ottenuta dai proprietari del copyright interessato.

Sito web: http://diceaa.univaq.it/

ABSTRACT (Inglese)

Temporary shoring systems play a fundamental role in post-earthquake interventions, particularly in historic urban contexts characterized by masonry buildings and complex structural aggregates. While the design and installation of provisional works are widely addressed in technical practice and scientific literature, the dismantling phase remains poorly regulated and is often managed through experience-based approaches, leading to significant safety and risk-management issues. This PhD research addresses this gap by proposing a construction site protocol for the safe removal of temporary works, developed through a critical review of the existing literature, an analysis of masonry collapse mechanisms, and a systematic investigation of the most common shoring typologies adopted in post-seismic scenarios. The protocol is conceived as a guided decision-making process, structured into sequential steps that allow the assessment of masonry conditions, verification of consistency with the reconstruction design, quantification of safety levels through a dedicated safety coefficient calculation tool, and definition of corrective technical prescriptions prior to dismantling operations. To support its practical implementation, the research develops complementary operational tools, including structured context sheets for the systematic collection of building and damage data, technical dismantling sheets defining controlled removal sequences and safety measures, and an environmental control sheet aimed at guiding post-removal material management decisions. A key innovative aspect of the research is the integration of environmental assessment into the dismantling protocol. By applying the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, the study evaluates the environmental impacts associated with different post-removal management strategies—reuse, recycling, and disposal—considering alternative materials and operational configurations. This approach extends the evaluation beyond structural safety, embedding sustainability within the decision-making framework. The proposed protocol has been validated through its application to real post-earthquake case studies in the Italian context. Within the validation phase, Building Information Modeling (BIM) was employed to represent and visualize the dismantling sequences in a three-dimensional environment, enhancing process clarity, coordination among construction activities, and traceability of decision-making steps. The results demonstrate that a structured and quantitative approach to the removal of temporary works can significantly improve operational safety, enhance coordination with strengthening and reconstruction phases, and support environmentally responsible choices. Although the validation was conducted on a limited number of case studies, and further applications are required to confirm the generalizability of the findings across different structural and regulatory contexts, the research contributes to advancing current practice by providing a replicable, traceable, and multidisciplinary tool for the safe and sustainable management of temporary works in post-seismic construction sites.

Keywords: temporary shorings; post-earthquake shoring; dismantling protocol; safety index; Building Information Modeling (BIM); Life Cycle Assessment (LCA).

ABSTRACT (Italiano)

La gestione delle opere provvisionali rappresenta una fase cruciale negli interventi post-sismici, in particolare nei contesti caratterizzati da edifici storici e aggregati murari complessi. Sebbene l'installazione dei puntellamenti sia ampiamente trattata nella pratica operativa e nella letteratura tecnico-scientifica, la fase di rimozione risulta ancora oggi scarsamente normata e prevalentemente affidata all'esperienza degli operatori, con evidenti ricadute in termini di sicurezza, gestione del rischio e coordinamento con le fasi di ricostruzione. La presente ricerca affronta tale lacuna proponendo un Protocollo di cantiere per la rimozione in sicurezza delle opere provvisionali, sviluppato a partire da un'analisi critica della letteratura, dall'osservazione dei principali meccanismi di collasso delle murature e dallo studio sistematico delle tipologie ricorrenti di puntellamento impiegate negli scenari post-sismici. Il protocollo è strutturato come un percorso decisionale guidato, articolato in passaggi consequenziali che consentono di valutare preliminarmente le condizioni della muratura, verificare la coerenza con il progetto di ricostruzione e determinare il livello di rischio associato alla rimozione. Cuore operativo del sistema è lo strumento di calcolo del coefficiente di sicurezza, sviluppato sotto forma di foglio di calcolo parametrico, che consente di stimare in modo oggettivo il margine di stabilità residua della porzione muraria una volta rimosso il presidio provvisionale, classificando il risultato in classi di rischio e orientando le eventuali prescrizioni correttive. A supporto dell'applicazione in cantiere sono state predisposte ulteriori tool a disposizione del Protocollo: una scheda di contesto, finalizzata a raccogliere in modo strutturato le informazioni relative alla configurazione edilizia, allo stato di danno e alle interferenze operative; schede tecniche di smontaggio, che definiscono la sequenza controllata delle operazioni, le misure di sicurezza da adottare e le modalità di monitoraggio durante il disarmo; e una scheda di controllo ambientale, concepita per orientare la gestione post-rimozione dei materiali attraverso una valutazione comparativa basata su principi di Life Cycle Assessment (LCA). Nell'ambito della validazione su casi studio reali riferiti a interventi post-sismici nel contesto italiano, le fasi operative previste dal protocollo sono state rappresentate mediante modellazione informativa BIM, utilizzata per strutturare e visualizzare tridimensionalmente le sequenze di smontaggio e migliorare il coordinamento tra le lavorazioni, rafforzando la tracciabilità del processo decisionale. I risultati evidenziano come un approccio strutturato alla rimozione delle opere provvisionali consenta di ridurre i rischi operativi, migliorare l'integrazione con le fasi di consolidamento e orientare le scelte anche secondo criteri di sostenibilità. La ricerca presenta tuttavia alcuni limiti, legati principalmente alla validazione su un numero circoscritto di casi studio e alla necessità di ulteriori applicazioni in contesti differenti per consolidarne la generalizzabilità, aprendo prospettive di sviluppo future. Nel complesso, il lavoro contribuisce a colmare una lacuna significativa nel panorama tecnico-scientifico, proponendo uno strumento metodologicamente strutturato che integra sicurezza, sostenibilità e gestione informativa nel processo di disarmo delle opere provvisionali post-sisma.

Parole chiave: opere provvisionali; puntellamenti post-sisma; protocollo di rimozione; coefficiente di sicurezza; Building Information Modeling (BIM); Life Cycle Assessment (LCA).

Sommario

INTRODUZIONE 6

1 STUDIO DELLO STATO DELL'ARTE E IDENTIFICAZIONE DEL RESEARCH GAP 10

1.1 REVISIONE SISTEMATICA DELLA LETTERATURA SUI SISTEMI DI PUNTELLAMENTO: SICUREZZA, GESTIONE E SOSTENIBILITA' 10

1.1.1 Puntelli: tipologie classificazione 21

1.1.2 Norme e linee guida 23

1.1.3 Smontaggio: lacune e problematiche 26

1.1.4 Sostenibilità Ambientale e Life Cycle Assessment 29

1.1.5 Casi reali 30

1.2 CONCLUSIONI E GAP DI RICERCA 32

1.3 OBIETTIVI DELLA RICERCA 34

1.4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 35

2 QUADRO CONOSCITIVO E TECNICO PER LA DEFINIZIONE DEL PROTOCOLLO DI RIMOZIONE 38

2.1 LE OPERE PROVVISIONALI POST-SISMA 38

2.1.1 Puntellatura di ritegno 40

2.1.2 Puntellatura di contrasto 43

2.1.3 Puntellatura di sostegno e sbadacchiature 45

2.1.4 Puntellatura di sostegno a balconi e solai 46

2.1.5 Centinature di confinamento 47

2.1.6 Incamiciatura della parete 49

2.1.7 Cerchiature 51

2.1.8 Tirantature 53

2.2 I MECCANISMI DI COLLASSO 56

2.2.1 Ribaltamento semplice 57

2.2.2 Ribaltamento composto 58

2.2.3 Flessione verticale 59

2.2.4 Flessione orizzontale 60

2.3 ANALISI LINEARE DEI MECCANISMI DI COLLASSO . 60

2.3.1 Ribaltamento semplice 62

2.3.2 Ribaltamento composto 62
2.3.3 Flessione verticale 63
2.3.4 Flessione orizzontale 63
2.4 RELAZIONE TRA MECCANISMI DI COLLASSO, TIPOLOGIA DI PUNTELLO E TIPOLOGIE EDILIZIE. 64
2.4.1 Ribaltamento semplice e puntellatura di ritegno 64
2.4.2 Flessione verticale e puntellature di sostegno 64
2.4.3 Flessione orizzontale e cerchiature o tirantature 65
2.4.4 Ribaltamento composto e interventi integrativi..... 65
2.4.5 Matrice di correlazione 65
2.5 ANALISI ED INTERVENTI SULLE MURATURE 69
2.5.1 Indagini sulle murature 69
2.5.2 Interventi atti ad incrementare la resistenza delle murature 73
2.6 VALUTAZIONE DELLA SOSTENIBILITA' AMBIENTALE ORIENTATA AL CICLO DI VITA 80
2.7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 85
3 PROTOCOLLO DI CANTIERE PER LA RIMOZIONE DI OPERE PROVVISIONALI IN SICUREZZA 88
3.1 FASE 00_ IPOTESI ALLA BASE DEL PROTOCOLLO 91
3.2 FASE 01_ ANALISI PRELIMINARI 91
3.3 FASE 02_ RISCONTRO CON L'ATTIVITA' PROGETTUALE 92
3.4 FASE 03_ CALCOLO COEFFICIENTE λ 93
3.4.1 Sviluppo dello strumento di calcolo 94
3.4.2 Modalità d'uso dello strumento di calcolo del coefficiente 103
3.5 FASE 04_ ATTUAZIONE DELLE PRESCRIZIONI 106
3.6 FASE 05_ SMONTAGGIO DEI PUNTELLI 110
3.6.1 Scheda di rimozione 01_ Puntellatura di contrasto 113
3.6.2 Scheda di rimozione 02_ Puntellatura di ritegno..... 114
3.6.3 Scheda di rimozione 03_ Puntellatura di sostegno e sbadacchiatura 114

3.6.4 Scheda di rimozione 04_ Puntellatura di sostegno solai e balconi 115
3.6.5 Scheda di rimozione 05_ Opere di centinatura 116
3.6.6 Scheda di rimozione 06_ Opere di tirantatura 117
3.6.7 Scheda di rimozione 07_ Opere di cerchiatura 117
3.6.8 Scheda di rimozione 08_ Opere di incamiciatura 118
3.7 FASE 06_ VALUTAZIONE AMBIENTALE DEL FINE VITA 119
3.7.1 Struttura metodologica dell'approccio.....119
3.7.2 Valutazione ambientale 122
3.7.3 Valutazione economica semplificata..... 138
3.7.4 Integrazione dei risultati nel Protocollo..... 141
3.8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI..... 150
4 VALIDAZIONE DELL'APPLICABILITA' DEL PROTOCOLLO DI CANTIERE..... 152
4.1 AGGREGATO SITO A MONTEREALE #1, L'AQUILA ... 154
4.1.1 Inquadramento 154
4.1.2 Oggetto della validazione e configurazione iniziale..... 154
4.1.3 Fase 01: Analisi preliminari..... 155
4.1.4 Fase 02: Riscontro con l'attività progettuale 155
4.1.5 Fase 03: Calcolo del coefficiente di sicurezza λ..... 155
4.1.6 Fase 04: Attuazione delle prescrizioni 155
4.1.7 Fase 05: Smontaggio dei puntelli..... 155
4.1.8 Fase 06: Valutazione ambientale del fine vita..... 159
4.2 AGGREGATO SITO A MONTEREALE #2, L'AQUILA ... 160
4.2.1 Inquadramento 160
4.2.2 Oggetto della validazione e configurazione iniziale..... 160
4.2.3 Fase 01: Analisi preliminari..... 160
4.2.4 Fase 02: Riscontro con l'attività progettuale 161
4.2.5 Fase 03: Calcolo del coefficiente di sicurezza λ..... 161
4.2.6 Fase 04: Attuazione delle prescrizioni 161
4.2.7 Fase 05: Smontaggio dei puntelli..... 161
4.2.8 Fase 06: Valutazione ambientale del fine vita..... 163

4.3 CONVITTO NAZIONALE, L'AQUILA 163
4.3.1 Inquadramento 163
4.3.2 Oggetto della validazione e configurazione iniziale 164
4.3.3 Fase 01: Analisi preliminari 165
4.3.4 Fase 02: Riscontro con l'attività progettuale 165
4.3.5 Fase 03: Calcolo del coefficiente di sicurezza λ 165
4.3.6 Fase 04: Attuazione delle prescrizioni 165
4.3.7 Fase 05: Smontaggio dei puntelli 165
4.3.8 Fase 06: Valutazione ambientale del fine vita 170
4.4 AGGREGATO SITO IN VIA DELLE BONE NOVELLE, L'AQUILA 170
4.4.1 Inquadramento 170
4.4.2 Oggetto della validazione e configurazione iniziale 171
4.4.3 Fase 01: Analisi preliminari 171
4.4.4 Fase 02: Riscontro con attività progettuale 171
4.4.5 Fase 03: Calcolo del coefficiente di sicurezza λ 171
4.4.6 Fase 04: Attuazione delle prescrizioni 171
4.4.7 Fase 05: Smontaggio dei puntelli 172
4.4.8 Fase 06: Valutazione ambientale del fine vita 175
4.5 PALAZZO CARLI, L'AQUILA 176
4.5.1 Inquadramento 176
4.5.2 Oggetto della validazione e configurazione iniziale 176
4.5.3 Fase 01: Analisi preliminari 177
4.5.4 Fase 02: Riscontro con l'attività progettuale 177
4.5.5 Fase 03: Calcolo del coefficiente di sicurezza λ 177
4.5.6 Fase 04: Attuazione delle prescrizioni 177
4.5.7 Fase 05: Smontaggio dei puntelli 177
4.5.8 Fase 06: Valutazione ambientale del fine vita 181
5 DISCUSSIONE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI 183
5.1 DISCUSSIONE DEI RISULTATI E CONTRIBUTO SCIENTIFICO 183
5.1.1 Sintesi trasversale dei casi di studio 183

5.1.2 Integrazione tra sicurezza, sostenibilità e strumenti digitali 186
5.1.3 Confronto con la letteratura e avanzamento scientifico 187
5.2 LIMITI DELLA RICERCA 189
5.3 SVILUPPI FUTURI 190
5.3.1 Estensione metodologica 190
5.3.2 Evoluzione verso un sistema decisionale multi-obiettivo 191
5.3.3 Integrazione digitale avanzata 191
5.4 CONSIDERAZIONI FINALI 192
6 BIBLIOGRAFIA 193
7 ALLEGATI 198

INTRODUZIONE

L'Italia è uno dei Paesi europei più esposti al rischio sismico, per via della sua posizione geografica e delle numerose faglie attive che attraversano il territorio. Come evidenziato nelle ricostruzioni storico-sismologiche dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e nei rapporti ufficiali del Dipartimento della Protezione Civile, anche terremoti di magnitudo moderata hanno prodotto effetti devastanti sul patrimonio edilizio e sul tessuto sociale ed economico delle comunità colpite. Eventi come il terremoto di Messina del 28 dicembre 1908, documentato nelle analisi storico-sismologiche dell'INGV, il sisma del Friuli del 1976 e quello dell'Irpinia del 1980, ampiamente descritti nei rapporti del Dipartimento della Protezione Civile, fino agli eventi più recenti dell'Umbria-Marche del 1997, dell'Aquila del 2009 e dell'Italia centrale del 2016, hanno messo in evidenza la vulnerabilità strutturale di interi centri storici italiani. Come indicato nella Direttiva del Presidente del Consiglio dei ministri del 5 maggio 2011, che disciplina l'organizzazione nazionale per la gestione delle emergenze, e nei principali manuali operativi come il Vademecum STOP dei Vigili del Fuoco, redatto da Grimaz et al. (2010), tali eventi hanno infatti messo in luce la necessità di disporre di strumenti tecnici e organizzativi in grado di garantire interventi tempestivi ed efficaci di messa in sicurezza. In questo scenario, i puntellamenti post-sismici si configurano come interventi provvisionali essenziali. Tale ruolo è confermato sia dalla pratica operativa, come illustrato nel Vademecum STOP, sia dalla letteratura scientifica recente. In particolare, lo studio di Rotilio et al. (2023) evidenzia come i puntellamenti siano ampiamente impiegati nei contesti colpiti dai terremoti del 2009 e del 2016 per ridurre il rischio di collassi, preservare l'integrità delle strutture e garantire condizioni minime di sicurezza per la rimozione delle macerie, la transitabilità urbana e l'avvio delle operazioni di restauro. L'analisi condotta dagli autori dimostra inoltre che tali opere provvisionali rappresentano il presupposto tecnico indispensabile per la gestione del rischio nelle prime fasi post-evento. L'adozione sistematica di opere provvisionali ha consentito, ad esempio nel post-terremoto dell'Aquila 2009, di evitare cedimenti a catena e di preservare migliaia di manufatti. Analogamente, dopo il sisma dell'Italia centrale del 2016, le puntellature diffuse hanno contribuito in modo determinante a garantire la stabilità provvisoria di un patrimonio edilizio storico altrimenti destinato alla perdita. Esperienze analoghe si riscontrano anche in altri Paesi colpiti da eventi sismici recenti: in Nuova Zelanda, dopo il terremoto di Christchurch del 22 febbraio 2011, i documenti tecnici elaborati dal Ministry of Business (MBIE) (2014) evidenziano come le operazioni di stabilizzazione d'emergenza abbiano previsto un ampio impiego di sistemi di *temporary shoring, bracing e propping* per mettere in sicurezza facciate storiche e edifici gravemente danneggiati. Un quadro simile emerge in Messico, a seguito del terremoto del 19 settembre 2017 che ha colpito in particolare le regioni di Puebla, Morelos e Città del Messico. Le analisi prodotte dall' INAH – *Coordinación Nacional de Antropología* (2018) e il rapporto pubblicato dall' UNESCO (2018) documentano i gravi effetti dell'evento sul patrimonio monumentale, evidenziando l'adozione diffusa di interventi di

protezione e puntellamento d'emergenza per salvaguardare chiese, conventi ed edifici storici a rischio di collasso. In tutti questi contesti, la fase di installazione delle opere provvisionali si è rivelata un passaggio strategico, capace di influire sulla sicurezza pubblica, sull'efficacia del soccorso e sulla possibilità di pianificare interventi successivi di riparazione e consolidamento. Nonostante la loro importanza, i puntellamenti post-sismici hanno rappresentato per lungo tempo un ambito poco normato e relativamente marginale nella produzione scientifica. Le principali disposizioni nazionali, come il D.M. del 17 gennaio 2018 – Norme Tecniche per le Costruzioni e la relativa Circolare esplicativa del 2019, richiamano la necessità di garantire condizioni di sicurezza durante gli interventi temporanei, ma non forniscono indicazioni organiche sulla progettazione, sul dimensionamento o sulla gestione delle opere provvisionali. Un'impostazione analoga si osserva nella Direttiva del Presidente del Consiglio dei ministri del 5 maggio 2011, che colloca le opere provvisionali tra le attività urgenti di messa in sicurezza in emergenza, senza tuttavia definirne criteri tecnici dettagliati. Solo negli ultimi quindici-venti anni la comunità ingegneristica ha iniziato a documentare in modo sistematico le esperienze maturate nell'ambito degli interventi provvisionali post-sisma, dando origine alle prime linee guida operative e a una produzione tecnica più strutturata. Documenti come il Vademecum STOP (2010) e le linee operative sviluppate nell'ambito della ricostruzione dell'Aquila dal 2009 in poi costituiscono esempi significativi di questa evoluzione. Analogamente, in ambito internazionale, i rapporti pubblicati dall'*Earthquake Engineering Field Investigation Team* (EEFIT) e le guide tecniche elaborate dal *Ministry of Business, Innovation and Employment* della Nuova Zelanda a partire dal 2014 testimoniano la crescente attenzione dedicata ai sistemi di puntellamento, alle stabilizzazioni d'emergenza e alle pratiche operative di messa in sicurezza. In Italia, l'esperienza maturata in occasione dei principali eventi sismici ha evidenziato la necessità di interventi rapidi e procedure operative uniformi; un'esigenza che ha portato all'elaborazione di protocolli condivisi tra Vigili del Fuoco, Protezione Civile e Soprintendenze, in continuità con i documenti operativi già richiamati in precedenza, che hanno progressivamente contribuito a consolidare un approccio coordinato alla messa in sicurezza del patrimonio edilizio danneggiato. Un aspetto peculiare del contesto italiano riguarda proprio il grado di approfondimento che lo studio dei puntellamenti ha progressivamente assunto. Tale attenzione è riconducibile a una pluralità di fattori. In primo luogo, la frequenza e l'intensità dei terremoti che hanno colpito il territorio nazionale hanno reso indispensabile disporre di strumenti progettuali e operativi adeguati alla gestione dell'emergenza, come evidenziato dalle disposizioni contenute nella Direttiva del 2011, che definisce procedure condivise per le attività urgenti di messa in sicurezza, e dai documenti operativi elaborati dal Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, che hanno codificato le principali modalità di intervento nei contesti post-sismici. In secondo luogo, l'estensione del patrimonio edilizio storico e monumentale impone di garantire interventi compatibili con le esigenze di tutela e reversibilità. A ciò si aggiunge la crescente introduzione di tecniche digitali per la gestione delle informazioni e dei processi di cantiere, come il *Building Information Modeling* (BIM), che

consente di integrare la pianificazione delle opere provvisionali con la modellazione delle strutture permanenti e delle interferenze operative. Parallelamente, l'attenzione alla sostenibilità ambientale ha promosso la diffusione di sistemi modulari e riutilizzabili per ridurre l'impatto ambientale e ottimizzare i costi. Alla luce di queste considerazioni, lo studio e la progettazione dei puntellamenti non si configurano più come un ambito esclusivamente emergenziale, ma come un settore autonomo di ricerca, normazione e innovazione tecnica, nel quale si intrecciano esigenze di sicurezza, tutela del patrimonio culturale, efficienza gestionale e sostenibilità.

È in questo quadro che si colloca la presente ricerca, che assume come obiettivo generale la definizione di un Protocollo operativo replicabile per la rimozione in sicurezza delle opere provvisionali post-sisma. L'intento non è soltanto quello di fornire indicazioni procedurali, ma di costruire uno strumento fondato su una valutazione quantitativa del livello di stabilità residua delle strutture e supportato da dispositivi applicabili in contesto reale. In tale prospettiva, il lavoro sviluppa un modello di calcolo del coefficiente di sicurezza in fase di disarmo, concepito per orientare in modo oggettivo le decisioni relative alla rimozione dei puntellamenti, e struttura procedure operative controllate che consentano di pianificare e monitorare le sequenze di smontaggio riducendo l'esposizione al rischio. Parallelamente, la ricerca integra criteri di sostenibilità ambientale nella gestione post-rimozione dei materiali, introducendo strumenti di valutazione capaci di confrontare le diverse strategie di riuso, riciclo o smaltimento. Nell'ambito della fase di validazione, viene inoltre sperimentato l'impiego della modellazione informativa BIM quale supporto alla rappresentazione tridimensionale e al coordinamento delle sequenze operative, con l'obiettivo di rendere più leggibile e controllabile il processo decisionale. L'integrazione tra strumenti di valutazione quantitativa, criteri ambientali e supporto informativo digitale configura così un approccio multidimensionale alla gestione della fase di disarmo, nel quale sicurezza, sostenibilità e tracciabilità operativa concorrono alla definizione di scelte tecnicamente fondate. L'elaborato è strutturato secondo un percorso logico che accompagna il lettore dall'identificazione del problema alla verifica della soluzione proposta, in modo da rendere coerente e comprensibile l'intera impostazione del progetto di ricerca. Dopo il presente capitolo introduttivo, che definisce il contesto, le criticità e gli obiettivi generali, i capitoli successivi approfondiscono progressivamente le basi teoriche e tecniche su cui si fonda il Protocollo. Viene dapprima sviluppata un'analisi sistematica dello stato dell'arte e del quadro normativo di riferimento, al fine di individuare le lacune esistenti nella gestione delle opere provvisionali e, in particolare, nella fase di rimozione. Segue un capitolo dedicato all'analisi dei meccanismi di collasso delle murature e delle principali tipologie di puntellamento, che costituisce la base conoscitiva necessaria per la definizione dei criteri di valutazione della sicurezza. Su tali presupposti viene quindi presentato il Protocollo di cantiere per la rimozione in sicurezza delle opere provvisionali, articolato nei suoi passaggi operativi e corredato dagli strumenti di supporto sviluppati, inclusi il modello di calcolo del coefficiente di sicurezza e le schede operative. La metodologia è successivamente applicata a casi studio reali,

all’interno dei quali vengono integrate la valutazione ambientale e la rappresentazione delle sequenze operative mediante modellazione informativa. La discussione dei risultati consente di verificare la coerenza tra gli obiettivi dichiarati e gli esiti ottenuti, evidenziando punti di forza e criticità del Protocollo. Le conclusioni riprendono in modo sintetico l’intero percorso, delineando i contributi scientifici apportati e le possibili evoluzioni future, così da restituire al lettore una visione organica e coerente dell’impostazione e degli sviluppi della ricerca.

1 STUDIO DELLO STATO DELL'ARTE E IDENTIFICAZIONE DEL RESEARCH GAP

1.1 REVISIONE SISTEMATICA DELLA LETTERATURA SUI SISTEMI DI PUNTELLAMENTO: SICUREZZA, GESTIONE E SOSTENIBILITA'

Il presente capitolo ha l'obiettivo di analizzare in modo critico la letteratura scientifica e tecnica relativa ai sistemi di puntellamento temporaneo post-sisma, al fine di individuare le principali linee di ricerca esistenti, le aree di convergenza e le lacune ancora aperte, con particolare riferimento alla fase di rimozione delle opere provvisionali. Tale analisi costituisce la base per l'identificazione del *research gap* che giustifica l'impostazione della presente ricerca. A tal fine, è stata condotta una revisione sistematica della letteratura secondo i criteri metodologici di seguito descritti.

La ricerca bibliografica è stata condotta utilizzando il database Scopus: la scelta di questa piattaforma si giustifica con l'esigenza di disporre di un archivio ampio, aggiornato e trasversale, in grado di restituire un quadro quanto più completo possibile dei contributi relativi ai puntelli e ai sistemi temporanei di sostegno. La selezione è stata inoltre limitata agli articoli scientifici *peer-reviewed* disponibili in modalità open access, al fine di garantire la piena accessibilità e verificabilità delle fonti analizzate. Per la selezione degli articoli è stato considerato un arco temporale compreso tra il 2005 e il 2025. Questa scelta consente di includere sia i contributi consolidati, sviluppati in seguito a eventi sismici significativi come quelli che hanno colpito l'Italia nel 2009 e nel 2016, sia le pubblicazioni più recenti e in corso di stampa, che riflettono le evoluzioni metodologiche e normative più attuali. L'ampiezza dell'intervallo temporale garantisce dunque una visione completa, che abbraccia vent'anni di letteratura sul tema. Come si evince dalla *Tabella 1.1*, dal punto di vista disciplinare, la ricerca è stata incentrata prevalentemente sugli ambiti dell'Ingegneria e delle Scienze dei Materiali, che costituiscono il nucleo centrale per lo studio dei puntelli e dei sistemi temporanei. A questi si sono affiancati i settori delle Scienze Informatiche e delle *Decision Sciences*, che consentono di intercettare i contributi riguardanti rispettivamente la modellazione numerica, la simulazione e gli approcci decisionali legati alla gestione della sicurezza. In aggiunta, sono stati inclusi anche i settori delle Scienze Ambientali, per valorizzare i contributi dedicati alla sostenibilità e al *Life Cycle Assessment*, e delle Scienze Sociali, che possono offrire spunti utili in relazione alla gestione dei cantieri e alla sicurezza degli operatori in contesti emergenziali. Non sono invece stati considerati altri campi disciplinari offerti da Scopus, come le scienze mediche, biologiche o chimiche, in quanto non pertinenti rispetto all'oggetto specifico di indagine.

Tabella 1.1: Filtri selezionati in Scopus

Area tematica	• **INGEGNERIA** • **INFORMATICA** • **SCIENZA AMBIENTALE** • **SCIENZE SOCIALI** • **MATEMATICA** • **MULTIDISCIPLINARE** • **SCIENZE DECISIONALI**
Range temporale	2005 - 2025
Open access	Tutti *Open access*

La definizione delle parole chiave è stata condotta in maniera da coprire in modo sistematico le diverse dimensioni del problema. Un primo nucleo di termini ha riguardato direttamente i puntelli e i sistemi di sostegno temporaneo, attraverso espressioni come *shoring, propping, temporary support* e *temporary bracing*. A questo si sono affiancati i termini che descrivono le fasi operative di utilizzo: da un lato quelli connessi al montaggio, come *installation, erection, setup e assembly*; dall'altro quelli relativi allo smontaggio, quali *removal, dismantling e disassembly*. È stato inoltre considerato il contesto applicativo, includendo termini come *seismic, earthquake, post-earthquake, emergency* e *disaster*, senza tuttavia vincolare rigidamente la ricerca agli scenari emergenziali, così da poter raccogliere anche contributi più generali sull'uso dei puntelli. Un ulteriore blocco di parole chiave è stato dedicato ai temi della sostenibilità e dell'impatto ambientale, attraverso espressioni quali *Life Cycle Assessment*, LCA, *sustainability* ed *environmental impact*. Infine, sono stati introdotti i termini legati alle problematiche e ai rischi, come *safety, failure, collapse, issues* e *criticalities*, insieme a quelli utili a intercettare eventuali esperienze pratiche o casi reali, come case study, *real application, field test* e *construction site*.

Tabella 1.2: Keywords impiegate

Categoria	**Keywords**	**Obiettivo**
Puntelli	Shoring, propping, temporary support, temporary bracing	Intercettare tutti i contributi che parlano di puntelli, sistemi di puntellamento e opere provvisionali in senso lato.
Fasi operative – montaggio	Installation, erection, setup, assembly	Raccogliere studi relativi alla fase di installazione e messa in opera dei puntelli.
Fasi operative – smontaggio	Removal, dismantling, disassembly	Identificare contributi che analizzano la fase di disarmo, rimozione e smontaggio dei sistemi provvisionali.
Contesto applicativo	Seismic, earthquake, post-earthquake, emergency, disaster	Collegare i puntelli agli scenari di emergenza sismica

Categoria	Keywords	Obiettivo
		e post-sismica, senza limitarsi esclusivamente a questi.
Sostenibilità e impatto ambientale	Life Cycle Assessment, LCA, sustainability, environmental impact	Considerare studi che affrontano il tema del ciclo di vita, della sostenibilità e dell'impatto ambientale delle opere provvisionali.
Problematiche e rischi	Safety, failure, collapse, issues, criticalities	Intercettare ricerche che discutono rischi, incidenti, instabilità e criticità di progetto o di cantiere.
Casi reali	Case study, real application, field test, construction site	Individuare lavori che riportano esperienze concrete, casi studio e applicazioni pratiche in cantiere

A partire da questi insiemi di parole chiave, sono state costruite diverse combinazioni logiche, utilizzando operatori booleani AND e OR, per intercettare in maniera mirata i diversi aspetti della tematica. Per impostare la ricerca bibliografica relativa ai puntelli e, in particolare, alle problematiche connesse al loro smontaggio in sicurezza, è stato necessario definire un insieme di combinazioni di parole chiave capaci di esplorare in modo sistematico le diverse prospettive di analisi del tema. L'obiettivo era raccogliere non soltanto i contributi più tecnici e strutturali, ma anche quelli legati alle procedure operative, ai casi concreti documentati e alle prospettive innovative che emergono dal dibattito scientifico più recente. La panoramica relativa alle diverse combinazioni è esemplificata nella *Tabella 1.3*.

Tabella 1.3: Combinazioni keywords

N.	Obiettivo della ricerca	Combinazioni keywords
1	Puntelli	("shoring" OR "propping" OR "temporary support" OR "temporary bracing") AND ("post-earthquake" OR "post-seismic" OR "earthquake" OR "seismic")
2	Montaggio puntelli	("shoring" OR "propping" OR "temporary support" OR "temporary bracing") AND ("installation" OR "erection" OR "setup" OR "assembly")
3	Smontaggio puntelli	("shoring" OR "propping" OR "temporary support" OR "temporary bracing") AND ("removal" OR "dismantling" OR "disassembly") AND ("safety" OR "risk")
4	Problematiche e criticità	("shoring" OR "propping" OR "temporary support" OR "temporary bracing") AND ("failure" OR "collapse" OR "issues" OR "criticalities")
5	Casi reali e applicazioni pratiche	("shoring" OR "propping" OR "temporary support" OR "temporary bracing") AND ("case study" OR "real application" OR "field test" OR "construction site")

N.	Obiettivo della ricerca	Combinazioni keywords
6	Sostenibilità e ciclo di vita	("shoring" OR "propping" OR "temporary support" OR "temporary bracing") AND ("Life Cycle Assessment" OR "LCA" OR "sustainability" OR "environmental impact")
7	Aspetti normativi e linee guida	("shoring" OR "propping" OR "temporary support" OR "temporary bracing") AND ("guidelines" OR "standards" OR "codes" OR "regulation")

Un primo gruppo di termini è stato dedicato ai puntelli in generale e al loro impiego in contesti post-sismici. A tale scopo è stata elaborata la combinazione ("*shoring*" OR "*propping*" OR "*temporary support*" OR "*temporary bracing*") AND ("*post-earthquake*" OR "*post-seismic*" OR "*earthquake*" OR "*seismic*"), che consente di intercettare gli articoli che trattano in maniera diretta i sistemi di sostegno temporaneo in scenari emergenziali, mantenendo al centro il tema del puntellamento post-sisma. Un secondo insieme di combinazioni ha riguardato la fase di montaggio, attraverso la *query* ("*shoring*" OR "*propping*" OR "*temporary support*" OR "*temporary bracing*") AND ("*installation*" OR "*erection*" OR "*setup*" OR "*assembly*"). La corretta installazione rappresenta infatti un passaggio essenziale per garantire la funzionalità e la sicurezza del sistema provvisionale, ed è un tema ampiamente trattato nella manualistica tecnica e, in parte, nella letteratura scientifica. La terza combinazione è stata orientata verso lo smontaggio dei puntelli, tema centrale di questa ricerca, con l'impiego della formula ("*shoring*" OR "*propping*" OR "temporary support" OR "*temporary bracing*") AND ("*removal*" OR "*dismantling*" OR "*disassembly*") AND ("*safety*" OR "*risk*"). L'intento è stato quello di selezionare gli articoli che si soffermano esplicitamente sulla fase di dismissione, spesso trascurata negli studi scientifici ma di cruciale importanza per la tutela degli operatori e la gestione delle emergenze. Un ulteriore filone è stato dedicato all'analisi delle problematiche e delle criticità riscontrate nei sistemi di puntellamento, attraverso la *query* ("*shoring*" OR "*propping*" OR "*temporary bracing*") AND ("*failure*" OR "*co*llapse" OR "*issues*" OR "*criticalities*"). Questa scelta ha lo scopo di raccogliere i lavori che, pur non trattando direttamente le procedure di montaggio o smontaggio, offrono indicazioni preziose sui possibili punti deboli dei sistemi temporanei e sulle modalità con cui essi possono perdere efficacia. Accanto a queste combinazioni è stata prevista una ricerca specifica sui casi reali e le applicazioni pratiche, utilizzando la formula ("*shoring*" OR "*propping*" OR "*temporary support*" OR "temporary bracing") AND ("case study" OR "*real application*" OR "*field test*" OR "*construction site*"). In tal modo è possibile individuare contributi che documentano esperienze concrete di utilizzo dei puntelli, in condizioni emergenziali o in cantieri ordinari, fornendo un riscontro diretto delle pratiche operative. Per intercettare gli studi più recenti e innovativi, è stata predisposta una combinazione dedicata ai temi della sostenibilità ambientale e del ciclo di vita, formulata come ("*shoring*" OR "*propping*" OR "*temporary structures*" OR "*shoring systems*") AND ("*Life Cycle Assessment*" OR "LCA" OR "*sustainability*" OR "*environmental impact*"). Si tratta di un

ambito ancora emergente ma in forte crescita, che consente di collocare il tema dei puntelli all'interno delle più ampie riflessioni sull'impatto ambientale delle costruzioni temporanee. Infine, è stata inserita una *query* volta a recuperare gli articoli che trattano gli aspetti normativi e regolamentari, attraverso la formula ("*shoring*" OR "*propping*" OR "*temporary support*" OR "*temporary bracing*") AND ("*guidelines*" OR "*standards*" OR "*codes*" OR "*regulation*"). Questa combinazione permette di includere i contributi che discutono le norme tecniche e le procedure codificate, le quali rappresentano un riferimento imprescindibile per la pratica professionale e per la sicurezza nei cantieri. Nel loro insieme, queste sette combinazioni consentono di coprire in maniera bilanciata tutte le principali dimensioni di interesse: i puntelli in generale e in ambito sismico, le procedure operative di montaggio e smontaggio, le criticità strutturali, i casi reali, le prospettive legate alla sostenibilità e gli aspetti normativi. La strategia adottata garantisce così una visione ampia ma al tempo stesso mirata, capace di restituire un quadro completo e criticamente utilizzabile per la costruzione dello stato dell'arte. L'unione dei risultati provenienti dalle sette *query* definite ha restituito un corpus complessivo di 4593 articoli unici, dopo la rimozione dei duplicati. Di questi, la grande maggioranza, pari a circa l'82,6%, è dotata di DOI, elemento che ne facilita l'identificazione e la reperibilità. La consistenza numerica dell'insieme rappresenta un dato significativo: pur avendo circoscritto l'indagine a un tema specifico come quello dei puntelli, le diverse combinazioni di ricerca hanno permesso di raccogliere un patrimonio ampio e articolato di contributi. È però stato evidente fin da subito che non tutti fossero pertinenti al tema dei puntelli provvisionali, dal momento che molte delle parole chiave utilizzate nelle ricerche intercettano anche ambiti diversi, come ad esempio i sistemi di controventamento permanenti, il settore minerario o persino applicazioni mediche e biomeccaniche. Si è quindi resa necessaria una scrematura accurata, come illustrato nella *Figura 1.1,* capace di distinguere gli articoli realmente collegati al tema dei puntelli da quelli che ne rappresentavano soltanto un rumore di fondo.

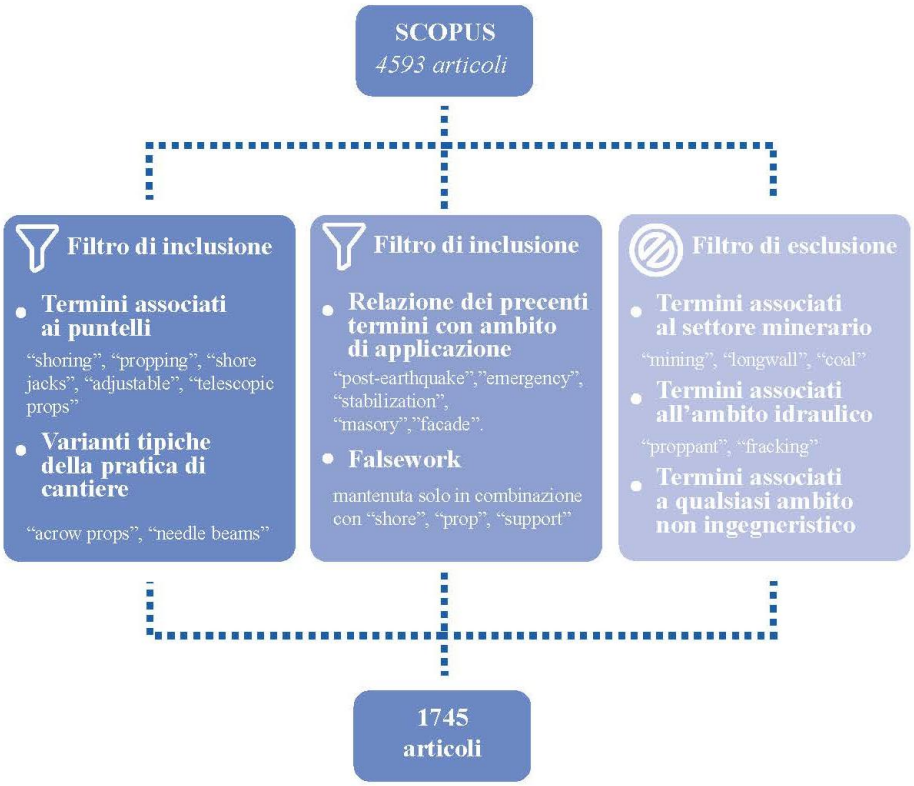


Figura 1.1: Prima Scrematura articoli

Per condurre questa operazione si è scelto di elaborare un filtro basato su tre livelli di inclusione e su un blocco specifico di esclusione. Il primo livello di inclusione ha raccolto i termini tecnici più direttamente associati ai puntelli, come *shoring, propping, shore jacks, adjustable* o *telescopic props*, e varianti tipiche della pratica di cantiere, come *acrow props* o *needle beams*. A questo si è aggiunto un secondo livello, più contestuale, che ha messo in relazione tali termini con espressioni che richiamano l'ambito di applicazione, come *post-earthquake, emergency, stabilization, masonry, façade, historic building* o *heritage*. In questo modo sono stati intercettati anche articoli che, pur non utilizzando la terminologia canonica dei puntelli, ne descrivevano chiaramente l'impiego in scenari di emergenza o nel supporto a edifici vulnerabili. Infine, si è valutata con attenzione la parola *falsework*, che talvolta si riferisce al sostegno di casserature ma in altri casi coincide con sistemi provvisionali assimilabili ai puntelli. Per questo motivo è stata mantenuta solo quando compariva in combinazione con termini come *shore, prop, support* o *frame*, e al tempo stesso non era associata a *formwork* concrete, che avrebbe ricondotto al settore della gettata in opera.

Accanto ai blocchi di inclusione è stato definito un set di esclusioni esplicite, volto a eliminare quei campi di ricerca che usano termini simili ma in contesti del tutto differenti. Sono stati così rimossi i riferimenti al settore minerario (*mining, longwall, coal*), alla fratturazione idraulica (*proppant, fracking*), alle applicazioni mediche (*orthodontics, knee brace, spinal brace, exoskeleton*), all'ingegneria offshore (*jacket, subsea, pipeline*) e, soprattutto, agli elementi di controventamento permanenti come i *buckling restrained braces* (BRB) o gli

eccentrically braced frames (EBF), che non hanno nulla a che vedere con i puntelli provvisionali. L'applicazione congiunta di questi criteri ha permesso di affinare sensibilmente la selezione. Dal totale iniziale di 4593 articoli, ne sono stati mantenuti 1745 come pertinenti, mentre 1674 sono stati esclusi in quanto riconducibili con certezza a settori estranei e 1174 scartati perché non contenevano alcun riferimento ai termini chiave. La scrematura così condotta ha garantito un equilibrio tra ampiezza e precisione, recuperando contributi che sarebbero sfuggiti a una ricerca basata su keyword troppo rigide, ma allo stesso tempo riducendo il rischio di includere lavori che non hanno relazione con i puntelli post-sisma o con i sistemi di sostegno temporanei per le costruzioni.
Dopo essere arrivati ai 1745 articoli complessivi, la fase successiva della ricerca ha previsto una lettura sistematica di tutti gli abstract, con l'obiettivo di individuare solo i contributi effettivamente pertinenti al tema specifico dei sistemi provvisionali e, in particolare, dei puntelli post-sisma. Questo processo non si è limitato a un filtraggio basato sulle parole chiave, ma ha richiesto un'analisi critica di ciascun abstract, verificando di volta in volta se l'articolo trattasse concretamente di puntellamenti, *falsework, shoring, scaffolding* o comunque di strutture temporanee di sostegno utilizzate nei cantieri, con riferimento al loro montaggio, smontaggio, sicurezza o comportamento sotto carico. Il risultato finale di questo percorso è stato un insieme di 90 articoli che costituiscono il nucleo solido della bibliografia di riferimento per l'analisi, come illustrato in *Figura 1.3*. È seguita la fase di classificazione sistematica dei novanta articoli selezionati, finalizzata a organizzare la letteratura in insiemi coerenti e a facilitarne l'analisi critica. L'analisi dello stato dell'arte è stata condotta secondo un approccio induttivo: la lettura approfondita dei contributi ha consentito di individuare progressivamente le categorie interpretative più ricorrenti, senza ricorrere a una classificazione predefinita a priori. Ciascun contributo è stato letto direttamente, così da comprenderne in modo accurato i contenuti e collocarlo nella categoria più rappresentativa. Da questo lavoro di lettura e confronto sono emerse cinque grandi aree tematiche, come illustrato nella *Tabella 1.4*, che costituiscono i filoni di ricerca più ricorrenti e che verranno analizzate singolarmente nei paragrafi successivi.

Tabella 1.4: Sintesi filoni di ricerca individuati

Area tematica	**Obiettiva della categoria**	**N° articoli**
Puntelli: tipologie, classificazione e montaggio	Descrivere le principali tipologie di puntelli e sistemi di sostegno, analizzare i criteri di progettazione e le modalità di montaggio, confrontare i risultati sperimentali e numerici, e fornire una base teorica per comprendere il comportamento strutturale prima della fase di smontaggio.	30
Normative e linee guida	Ricostruire il quadro normativo di riferimento, evidenziare le carenze delle norme esistenti e le differenze tra codici, presentare raccomandazioni operative e linee guida elaborate in seguito a	15

Area tematica	Obiettiva della categoria	N° articoli
	eventi critici, e discutere l'evoluzione verso approcci di verifica più mirati e data-driven.	
Smontaggio: lacune e problematiche	Analizzare i rischi associati alla fase di disarmo, definire il problema della tempistica ottimale di rimozione, e mettere in evidenza il gap di letteratura esistente per motivare la necessità di procedure più sistematiche e linee guida dedicate.	10
Sostenibilità & LCA	Introdurre il tema dell'impatto ambientale delle strutture temporanee, illustrare l'applicazione di metodologie di LCA, discutere l'uso di materiali a basso impatto e strategie di logistica sostenibile, e collegare questi aspetti alla possibilità di progettare puntelli e processi di smontaggio più circolari e riutilizzabili.	15
Casi reali	Presentare esempi concreti di applicazioni, crolli, emergenze post-sismiche e sperimentazioni in cantiere, per trarre lezioni apprese e validare o mettere in discussione le procedure teoriche di progetto, montaggio e smontaggio.	20

La prima area, che rappresenta il nucleo più consistente della letteratura, è dedicata alla classificazione dei sistemi di puntellamento, alle loro tipologie, ai criteri di progetto e alle tecniche di montaggio. Essa raccoglie numerosi studi sperimentali e numerici volti a indagare la capacità portante dei puntelli, la loro risposta a instabilità e le modalità di assemblaggio più sicure, includendo anche esempi di applicazioni pratiche e proposte di soluzioni tecnologiche innovative.
Un secondo gruppo di contributi riguarda il quadro normativo e le linee guida di riferimento. Questa parte della letteratura esamina i codici e le procedure applicabili alle strutture temporanee, evidenziandone la frammentarietà e proponendo metodi più mirati per la verifica di sicurezza. Non mancano, inoltre, lavori che presentano raccomandazioni operative elaborate in seguito a eventi sismici o a crolli di strutture provvisionali, con l'obiettivo di uniformare i criteri di progetto e migliorare la gestione del rischio in cantiere. La terza area di interesse si concentra sulla fase di smontaggio, momento particolarmente delicato nel ciclo di vita dei puntelli. I contributi raccolti analizzano i sovraccarichi che si generano durante la rimozione. Un ulteriore insieme di lavori esplora il tema della sostenibilità, con particolare riferimento all'applicazione di metodologie di *Life Cycle Assessment* per la valutazione dell'impatto ambientale dei sistemi provvisionali. Sebbene la letteratura specifica sui puntelli sia ancora limitata, diversi studi propongono l'uso di materiali a basso impatto e di strategie di ottimizzazione logistica per ridurre le emissioni complessive del cantiere, offrendo spunti utili per futuri sviluppi orientati a un approccio più circolare, che includa anche il riuso e il riciclo dei componenti. Infine, un numero significativo di contributi documenta casi reali, che vanno dalle esperienze di emergenza post-sismica ai crolli e agli incidenti che hanno coinvolto sistemi di sostegno temporaneo, fino alle sperimentazioni di tecnologie di monitoraggio implementate in cantiere. Questi lavori rappresentano una fonte preziosa di

informazioni, poiché consentono di osservare il comportamento delle strutture provvisionali in condizioni reali e di trarre lezioni utili per migliorare le procedure di progetto, montaggio e smontaggio.

L'analisi della distribuzione temporale delle pubblicazioni in *Figura 1.2* mostra che l'interesse scientifico per i sistemi provvisionali non si è sviluppato in maniera lineare, ma segue un andamento fortemente condizionato dai principali eventi sismici che hanno colpito diversi Paesi negli ultimi vent'anni. Nel complesso, prima del 2010 la produzione scientifica risulta limitata e frammentaria, mentre a partire dal 2010 si osserva un incremento significativo del numero di contributi, con picchi evidenti nei periodi immediatamente successivi a terremoti di grande intensità, come quelli verificatisi in Nuova Zelanda (2011), Giappone (2011) e Italia centrale (2016). Questo andamento conferma come le emergenze sismiche agiscano da catalizzatore per la ricerca, stimolando lo sviluppo di nuovi criteri di progetto, procedure operative più affidabili e soluzioni tecniche dedicate alle opere provvisionali. L'immagine evidenzia chiaramente come la categoria più rappresentata sia quella relativa alle tipologie di puntellamenti e alle modalità di progetto, verifica e montaggio, caratterizzata da una crescita quasi costante nel tempo. Ciò riflette la centralità di questi aspetti nella pratica professionale, con un crescente interesse verso l'ottimizzazione delle fasi di posa, il controllo degli stati limite e l'integrazione di tecniche innovative per il monitoraggio e la gestione del rischio durante il cantiere. Anche i contributi dedicati ai casi reali mostrano un andamento crescente, con un incremento marcato negli ultimi anni. Questa tendenza evidenzia una volontà sempre più diffusa di documentare situazioni concrete e di trarne indicazioni operative utili, sia in termini di prestazioni strutturali sia di procedure di sicurezza. Di particolare rilievo è la crescita recente dei lavori dedicati alla sostenibilità, all'analisi del ciclo di vita e alla riduzione dell'impatto ambientale delle opere provvisionali. Questi contributi, praticamente assenti prima del 2015, aumentano rapidamente negli anni successivi, in linea con l'evoluzione generale del settore delle costruzioni verso modelli più responsabili, circolari ed efficienti dal punto di vista energetico e ambientale. In netto contrasto con le altre categorie, la letteratura dedicata alla fase di smontaggio risulta estremamente ridotta e discontinua, con pochi contributi distribuiti lungo l'intero arco temporale considerato. Tale scarsità rappresenta un dato particolarmente significativo, poiché lo smontaggio dei puntelli costituisce una fase critica sia per la sicurezza degli operatori sia per la definizione di procedure standardizzate. La limitata attenzione ricevuta dal tema conferma la presenza di una reale lacuna scientifica, che rappresenta uno dei principali motivi di approfondimento della presente ricerca. Nel complesso, la distribuzione quantitativa e temporale degli articoli selezionati evidenzia due aspetti chiave: da un lato, la prevalenza di studi dedicati al progetto e al montaggio, che rimangono il fulcro dell'interesse tecnico-scientifico; dall'altro, la recente crescita dei contributi relativi ai casi reali e ai temi della sostenibilità, a dimostrazione di un progressivo avvicinamento della ricerca sia all'osservazione diretta delle pratiche di cantiere sia alla necessità di ridurre l'impatto ambientale delle opere provvisionali. Allo stesso tempo, la

scarsità di studi sullo smontaggio conferma la presenza di un ambito ancora poco esplorato, che necessita di essere approfondito e sistematizzato.

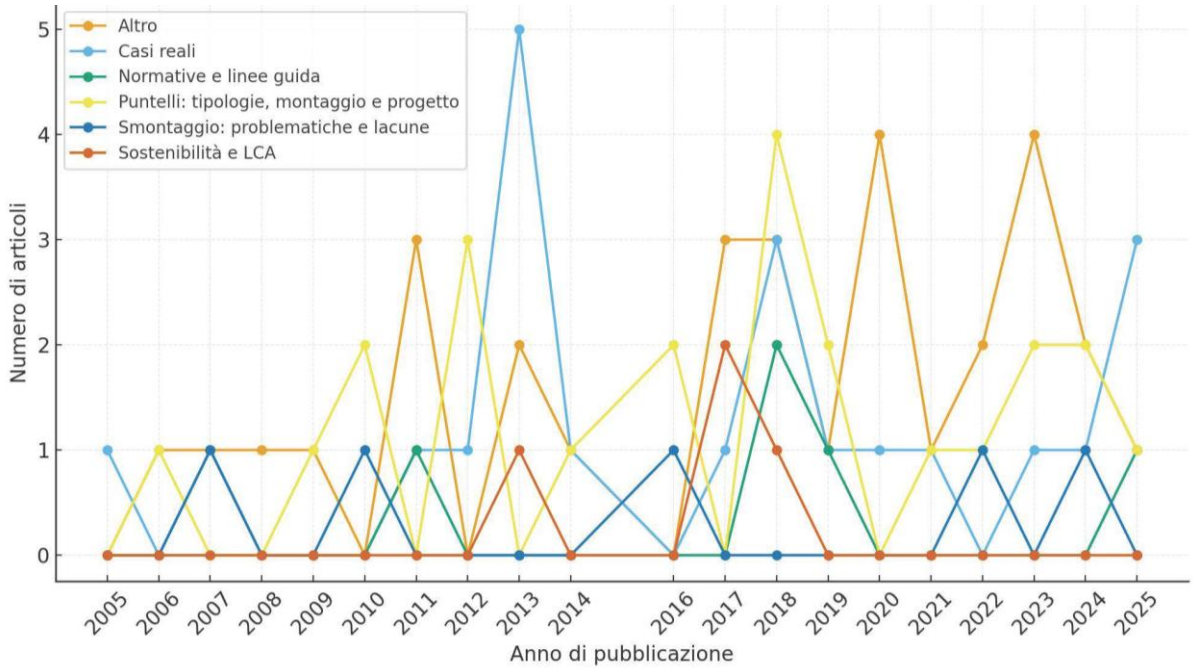


Figura 1.2: Distribuzione temporale degli articoli per categoria

Per facilitare la comprensione del percorso di selezione e organizzazione della bibliografia, si riporta nella *Figura 1.3* il *flawchart* completo, che sintetizza l'intero processo di ricerca: dalla raccolta iniziale dei 4593 articoli, alla lettura e filtraggio, fino all'individuazione del campione finale di novanta contributi suddivisi per area tematica. Questo schema costituisce una rappresentazione grafica utile per visualizzare l'approccio metodologico seguito e per garantire la tracciabilità dell'analisi.

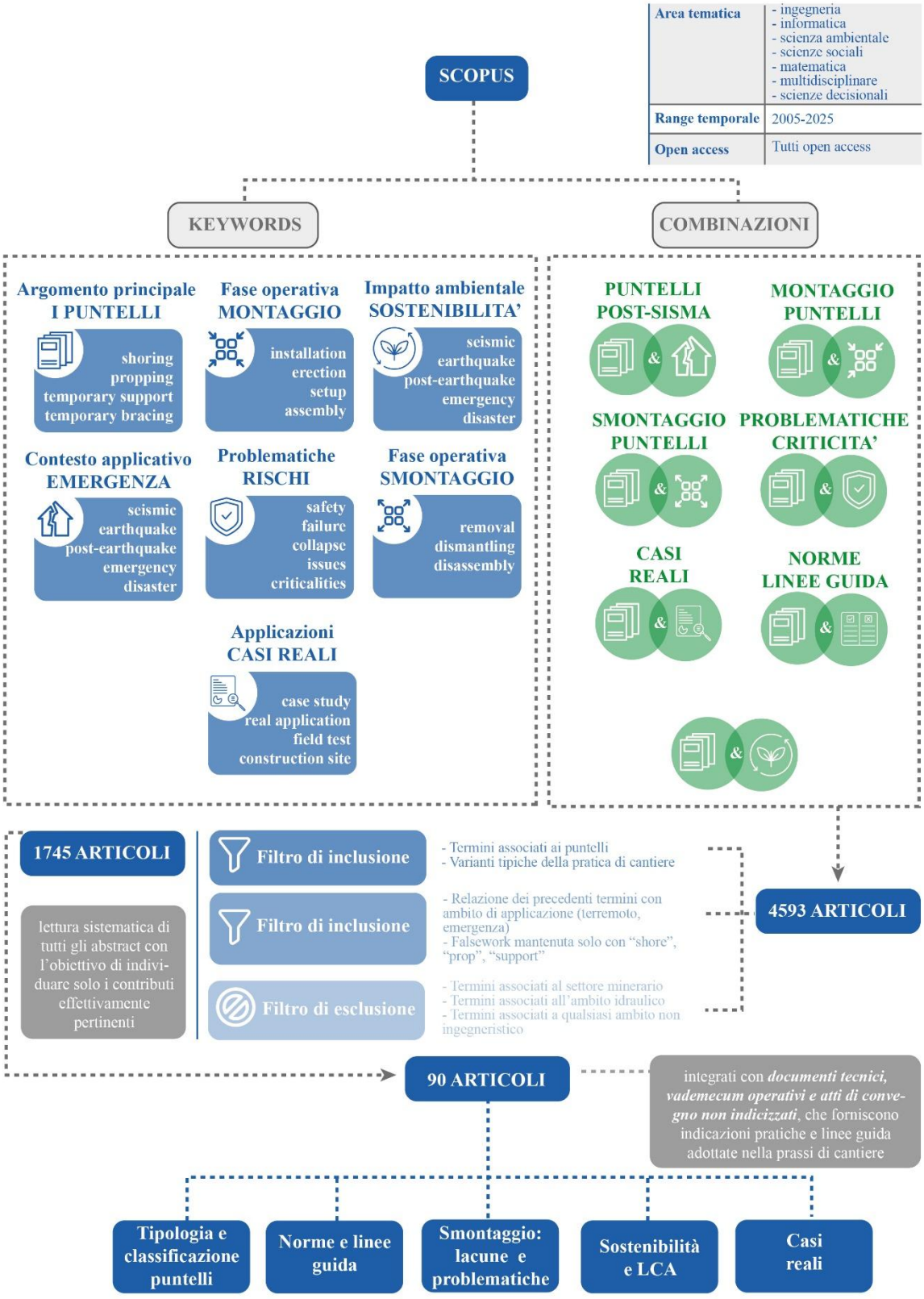


Figura 1.3: Flawchart

Nei paragrafi che seguono verranno quindi esaminati, nell'ordine, gli studi dedicati alla classificazione dei sistemi di puntellamento e alle tecniche di

montaggio, quelli che si occupano del quadro normativo e delle linee guida, i contributi che trattano in modo specifico la fase di smontaggio, i lavori che approfondiscono il tema della sostenibilità e, infine, i casi reali documentati in letteratura. Oltre ai novanta articoli selezionati attraverso la ricerca bibliografica sistematica, sono stati presi in considerazione anche documenti tecnici, vademecum operativi e atti di convegno non indicizzati, che forniscono indicazioni pratiche e linee guida adottate nella prassi di cantiere. Queste fonti, pur non rientrando nel campione oggetto dell'analisi quantitativa, contribuiscono ad arricchire la discussione e a fornire un quadro più completo e aderente alla realtà operativa.

1.1.1 Puntelli: tipologie classificazione

Per affrontare correttamente il tema dei sistemi di puntellamento, è utile partire da una visione di insieme degli studi più rilevanti che costituiscono la base teorica e pratica su cui si fonda questo capitolo. La *Tabella 1.5* riassume i contributi principali presi in esame, indicando per ciascuno l'oggetto dello studio, la metodologia adottata e la rilevanza rispetto agli obiettivi di questo lavoro.

Tabella 1.5: Principali contributi bibliografici

Autore	**Argomento affrontato**	**Principale contributo**	**Perché citato nel capitolo**
DOLCE ET AL. (2006)	Progettazione di puntelli post-sisma	Tabelle di calcolo e schede di verifica	Fornisce un metodo standard per dimensionare e scegliere i puntelli
GRIMAZ ET AL. (2010)	Procedure operative	Schede e priorità di intervento per il montaggio in emergenza	Permette di eseguire montaggi in modo sicuro e ripetibile
CIFANI ET AL. (2011)	Applicazioni reali a L'Aquila	Descrive il percorso decisionale per messa in sicurezza del centro storico	Dimostra l'efficacia di procedure standardizzate in scenari di emergenza
LOZANO-GALANT ET AL. (2012)	Analisi del montaggio di ponti su appoggi provvisori	Introdotto il *Forward Algorithm* per simulare passo passo le fasi costruttive, includendo creep e ritiro	Mostra come pianificare il montaggio riducendo errori e deformazioni impreviste
BUITRAGO ET AL. (2018)	Dispositivi di limitazione del carico sui puntelli	Prove sperimentali e modello semplificato per il dimensionamento	Offre una soluzione per ridurre i sovraccarichi e prevenire collassi progressivi
SU ET AL. (2018)	Controllo e sicurezza dei puntelli	Sistema IoT con sensori che misurano forze e spostamenti, allarmi automatici	Porta il monitoraggio in tempo reale dentro il cantiere
FERRARI (2024)	Sicurezza e conservazione	Propone approccio integrato e reversibile, con rilievi digitali e documentazione	Collega la progettazione dei puntelli alla tutela del patrimonio

La progettazione e il montaggio dei sistemi di puntellamento rappresentano il cuore del problema della messa in sicurezza post-sismica: la loro corretta scelta e installazione determinano la stabilità temporanea degli edifici e la possibilità di proseguire le operazioni di recupero in condizioni di sicurezza. La letteratura scientifica e tecnica concorda nel considerare i puntelli non semplici dispositivi provvisori, ma vere e proprie strutture ingegneristiche che richiedono criteri di calcolo, procedure di verifica e protocolli di montaggio rigorosi. La scelta del tipo di puntello è il primo passo di questo processo. Dolce et al. (2006) nel Manuale OPUS, forniscono un percorso metodologico chiaro che accompagna il progettista dalla determinazione dei carichi fino alla scelta della tipologia di puntello, includendo esempi numerici e tabelle di dimensionamento. Questo approccio è coerente con quanto indicato dal Michael Barker et al. (2011), che nella *Field Guide for Building Stabilization and Shoring Techniques* classifica i sistemi provvisionali distinguendo tra puntelli verticali, *raker* e sistemi di *cribbing*, e sottolinea come la selezione del sistema debba essere integrata nella pianificazione complessiva dell'intervento. Le raccomandazioni progettuali trovano un naturale complemento nelle procedure operative proposte da Grimaz et al. (2010), che nel Vademecum S.T.O.P. traducono i criteri di scelta in schede grafiche e priorità di intervento, rendendo il processo esecutivo più sicuro e ripetibile anche in contesti di emergenza. Un aspetto fondamentale è la pianificazione delle fasi di montaggio. Lozano-Galant et al. (2012) propongono il *Forward Algorithm* (FA), un metodo innovativo per simulare la sequenza costruttiva passo passo. Accanto alla progettazione e alla pianificazione, la letteratura più recente sottolinea l'importanza del monitoraggio in tempo reale. Su et al. (2018) sviluppano un sistema IoT che integra sensori wireless nei puntelli per misurare cedimenti, spostamenti laterali, forze assiali e inclinazioni, trasmettendo allarmi automatici quando i valori superano le soglie di sicurezza. In questo modo è possibile reagire tempestivamente a eventuali anomalie, riducendo la dipendenza dalle sole ispezioni visive. Buitrago et al. (2018) si concentrano invece sulla sicurezza passiva, ovvero tutte quelle misure che non richiedono un intervento attivo o un controllo continuo per funzionare, ma che proteggono comunque il sistema in caso di sovraccarico o situazione imprevista. Loro introducono i *Load Limiters*: elementi che si deformano in modo controllato quando il carico supera un certo limite, così da evitare che un singolo puntello venga sovraccaricato e permettere una distribuzione più equilibrata delle azioni. Le prove sperimentali condotte dagli autori dimostrano un comportamento stabile e ripetibile, e il modello semplificato da loro proposto permette di integrare questi dispositivi anche in analisi globali complesse. Le evidenze teoriche e sperimentali trovano conferma nelle applicazioni reali. Cifani et al. (2011) descrivono la messa in sicurezza del centro storico dell'Aquila dopo il sisma del 2009, sottolineando come l'adozione di schemi standardizzati e procedure condivise abbia ridotto i tempi di intervento e aumentato la sicurezza degli operatori. Modena et al. (2010) giungono a conclusioni simili analizzando diversi scenari post-sismici, e sottolineano come la raccolta sistematica dei dati sugli interventi eseguiti rappresenti un passaggio fondamentale per migliorare la progettazione futura. Gli

autori mostrano che documentare non solo la tipologia di puntellamento utilizzato, ma anche le condizioni al contorno, le difficoltà incontrate e le soluzioni alternative adottate, permette di creare un archivio di buone pratiche utile a standardizzare gli interventi e ridurre errori o ritardi in occasioni successive. Inoltre, evidenziano come queste informazioni possano essere integrate in protocolli di intervento e linee guida operative, contribuendo a un miglior coordinamento tra progettisti, imprese e autorità di protezione civile. In questa direzione si inserisce anche Ferrari (2024) che propone un approccio integrato basato sulla reversibilità degli interventi, la digitalizzazione del rilievo e la tracciabilità delle scelte progettuali, con l'obiettivo di conciliare sicurezza strutturale e conservazione del patrimonio.

1.1.2 Norme e linee guida

Nel contesto italiano ed europeo non esiste una norma tecnica cogente che disciplini in modo organico i sistemi di puntellamento: progettazione, esercizio e – soprattutto – smontaggio non sono regolati da un testo unico dedicato. Come evidenziato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2018) con le Norme Tecniche per le Costruzioni, i progettisti possono fare riferimento soltanto ai principi generali sulle combinazioni di carico, sugli stati limite e sui criteri di sicurezza, mentre i documenti europei – come l'Eurocodice 1 per le azioni e l'Eurocodice 3 per le strutture in acciaio (CEN, 2004) – forniscono un impianto rigoroso ma pensato per strutture permanenti. Questo genera una condizione in cui le scelte progettuali e operative vengono spesso guidate da manuali e linee guida di settore, come il Manuale OPUS di Dolce et al. (2006), il Vademecum S.T.O.P. di Grimaz et al. (2010) e la *Field Guide for Building Stabilization and Shoring Techniques* del Michael Barker et al. (2011), presentati nel capitolo precedente, che però non hanno valore normativo. In assenza di una norma tecnica dedicata, infatti, il vuoto regolatorio è stato in parte colmato da documenti tecnici di riferimento. Il Manuale OPUS rappresenta il più completo compendio nazionale sulle opere provvisionali urgenti, fornendo tabelle di calcolo e procedure di verifica utili soprattutto in emergenza. Analogamente, il Vademecum S.T.O.P. traduce questi principi in schede operative, assegnando priorità e sequenze di montaggio per uniformare gli interventi sul campo. Sul piano internazionale, la *Field Guide for Building Stabilization and Shoring Techniques del Department of Homeland Security* (2011) offre una classificazione sistematica dei sistemi di puntellamento e procedure standard per il montaggio e il controllo. Questa carenza di una norma univoca ha spinto diversi autori a indagare criticamente il tema dei puntellamenti e a proporre metodi, strumenti e procedure che possano integrare o colmare le lacune lasciate dalle sole prescrizioni generali. La letteratura scientifica e tecnica degli ultimi anni si concentra proprio su questi aspetti, analizzando sia i casi di fallimento che le soluzioni sperimentate con successo e suggerendo possibili evoluzioni del quadro regolatorio. Una revisione critica molto approfondita è quella proposta Kerpelis (2019), che analizza i casi di crollo e i sistemi di puntellamento adottati dopo i grandi terremoti, mostrando come l'assenza di criteri unificati abbia portato, in diversi casi, a scelte improvvisate, sovra-dimensionate o inadeguate. L'autore

richiama esplicitamente la necessità di linee guida specifiche per scenari emergenziali, capaci di tenere conto di carichi variabili, sollecitazioni residue e della possibilità di repliche sismiche. Un altro contributo fondamentale è quello di Cho et al. (2018), che legano normativa e tecnologia mostrando come il rispetto delle prescrizioni possa essere rafforzato da sistemi di monitoraggio digitale in tempo reale. Gli autori propongono sensori per il rilievo di spostamenti e inclinazioni e algoritmi di allerta precoce per segnalare condizioni di sovraccarico o instabilità, trasformando la normativa da strumento prescrittivo statico a sistema di sicurezza dinamico e monitorato. Dal punto di vista progettuale Wang et al. (2011)presentano un caso studio molto specifico che mostra come sia possibile formalizzare procedure di calcolo e criteri di verifica per il dimensionamento di sostegni temporanei di grande luce. La definizione di criteri ripetibili e di un metodo di verifica rappresenta un passo importante verso la creazione di regole progettuali universalmente applicabili. Un approccio simile è adottato da Miao et al. (2025) che descrivono una tecnica costruttiva normata per accelerare la realizzazione di ponti ad arco, riducendo l'esposizione ai rischi derivanti dalla presenza di sistemi di puntellamento. Questa esperienza mostra come le prescrizioni possano recepire soluzioni innovative per migliorare la sicurezza complessiva del cantiere. Infine, Klasson et al. (2018) presentano una *failure review* e un'indagine tra ingegneri strutturisti, evidenziando come la normativa vigente sia percepita come insufficiente per la prevenzione di fenomeni di instabilità locale. Gli autori propongono un aggiornamento dei codici e lo sviluppo di linee guida specifiche per ridurre l'incertezza e uniformare i criteri di verifica. Questi contributi, letti insieme, confermano l'idea che il quadro normativo attuale sia efficace nel garantire principi di sicurezza per il progetto, ma insufficiente per gestire le fasi temporanee e critiche come lo smontaggio, come desunto dalla *Tabella 1.6.*

Tabella 1.6: Copertura normativa e contributi della letteratura

Fonte/articolo	**Ambito**	**Punti di forza**	**Lacune evidenziate**
CEN (2004) - EUROCODICI	Normativa europea	Quadro armonizzato di verifica	Non trattano fasi temporanee
DOLCE ET AL. (2006)	Manuale nazionale	Metodo di dimensionamento	Non normato, mancano criteri per disarmo
GRIMAZ ET AL. (2010)	Linea guida operativa	Sequenze di montaggio codificate	Assenza di parametri quantitativi
WANG ET AL. (2011)	Progettazione	Criteri di calcolo replicabili	Manca standardizzazione
MICHAEL BARKER ET AL. (2011)	Guida internazionale	Classificazione tipologica e procedure	Non adattata alle specificità post-sismiche
NTC (2018)	Normativa nazionale	Principi generali di sicurezza	Nessuna norma dedicata ai puntellamenti

Fonte/articolo	Ambito	Punti di forza	Lacune evidenziate
CHO ET AL. (2018)	Monitoraggio	Introduzione controllo attivo	Non recepito in norme ufficiali
KLASSON ET AL. (2018)	Failure review	Carenze normative	Mancata traduzione in prescrizioni
KERPELIS (2019)	Analisi critica	Evidenzia errori ricorrenti	Richiama necessità di linee guida unificate
MIAO ET AL. (2025)	Sequenza costruttiva	Riduzione rischi di cantiere	Applicabilità limitata

Alla luce di questi risultati, Grimaz (2011) suggerisce di superare l'approccio puramente prescrittivo e di adottare un quadro prestazionale, in cui la sicurezza dei sistemi di puntellamento sia definita tramite classi di prestazione (ad esempio, livelli di resistenza residua o di spostamento massimo accettabile) e valutata considerando la probabilità di ulteriori eventi sismici attraverso l'analisi probabilistica delle repliche (APSHA). In questo modo, ogni intervento di puntellamento sarebbe progettato e verificato in funzione di un livello di prestazione dichiarato e misurabile, rendendo più oggettive le decisioni sul momento in cui effettuare lo smontaggio. Strumenti come il *Forward Algorithm* di Lozano-Galant et al. (2012), che consente di simulare fase per fase l'evoluzione delle deformazioni e delle sollecitazioni, e i sistemi di monitoraggio in tempo reale proposti da Su et al. (2018), che misurano parametri chiave come spostamenti e inclinazioni, diventano così strumenti complementari: il primo permette di prevedere il comportamento del sistema durante le fasi di carico e scarico, il secondo consente di verificarlo in tempo reale, riducendo il rischio di imprevisti. Questa combinazione di analisi predittiva e monitoraggio continuo offre una base solida per definire criteri di smontaggio più sicuri e standardizzati. L'analisi congiunta delle norme, delle linee guida e dei contributi scientifici suggerisce che il passo successivo debba essere la formalizzazione di criteri prestazionali per le opere di puntellamento. Non basta più sapere come montare un sistema, ma occorre stabilire quali obiettivi deve soddisfare in termini di sicurezza, deformabilità e capacità residua, sia durante l'esercizio che in fase di smontaggio. La *Tabella 1.7* propone un quadro di riferimento preliminare, in cui a ciascun obiettivo corrispondono indicatori misurabili, strumenti di verifica e possibili riferimenti normativi. Questo schema vuole essere un primo passo verso una normazione che permetta di trasformare le buone pratiche in requisiti vincolanti.

Tabella 1.7: Quadro prestazionale per i sistemi di puntellamento

Obiettivo	**Indicatore**	**Strumento di verifica**	**Possibile riferimento**
Stabilità durante montaggio	Verticalità entro tolleranza	Check-list e ispezioni	Grimaz (2011)
Controllo carichi	Picchi di carico ≤ valori progetto	Monitoraggio e load limiters	Su et al. (2018)
Sicurezza per disarmo	Deformazioni residue sottosoglia	Rilievi + simulazione fasi	Da integrare in OPUS/NTC
Documentazione	Registro anomalie	Archiviazione digitale	Modena et al. (2010)

La sintesi di questi lavori suggerisce che la direzione futura del quadro normativo debba essere quella di formalizzare criteri prestazionali verificabili per i sistemi di puntellamento, in particolare per lo smontaggio, così da ridurre variabilità applicativa e rischio di collassi durante le fasi di rimozione.

1.1.3 Smontaggio: lacune e problematiche

Dopo aver analizzato nel primo capitolo la classificazione, la progettazione e il montaggio dei sistemi di puntellamento e, nel secondo, il quadro normativo e i principali documenti tecnici di riferimento, emerge chiaramente come la fase di smontaggio rappresenti un punto critico ancora poco indagato. Come già evidenziato, né le Norme Tecniche per le Costruzioni (2018) né gli Eurocodici (CEN), (2004) offrono prescrizioni specifiche sul disarmo delle opere provvisionali, limitandosi a indicazioni generali sui carichi e sui criteri di verifica strutturale. Questa assenza di norme univoche si traduce, nella pratica di cantiere, in decisioni basate prevalentemente sull'esperienza del direttore dei lavori, con margini di discrezionalità che possono esporre a rischi significativi.
La letteratura scientifica conferma questa situazione: i contributi che affrontano direttamente il tema dello smontaggio sono pochi, disomogenei e focalizzati su aspetti specifici, lasciando scoperti interi ambiti di interesse, come la pianificazione della sequenza di scarico, la definizione di criteri quantitativi per autorizzare la rimozione dei sostegni o l'uso di sistemi di monitoraggio per il controllo in tempo reale. Proprio questa scarsità è essa stessa un risultato dell'analisi bibliografica: la limitata produzione scientifica sullo smontaggio evidenzia l'urgenza di un approfondimento sistematico e di linee guida unificate, così da ridurre il rischio di errori e incidenti nelle fasi finali del ciclo di vita delle opere provvisionali. È in questa prospettiva che vanno letti i contributi presentati di seguito, nei quali vari autori propongono modelli di calcolo, metodi di simulazione e casi studio reali che consentono di comprendere meglio i rischi di questa fase e di delineare possibili criteri per una sua regolamentazione futura.
Un punto di partenza importante è il lavoro di Kerpelis (2019), che nella sua analisi critica dei metodi di puntellamento adottati dopo i grandi terremoti mette in evidenza la mancanza di procedure standardizzate anche per la fase di smontaggio. Questo studio conferma quanto osservato nel capitolo normativo,

ovvero che la gestione dello smontaggio è affidata quasi esclusivamente all'esperienza dei tecnici in cantiere, senza un quadro di riferimento comune.
Gli articoli esaminati confermano che lo smontaggio non è una semplice fase conclusiva, ma un'operazione strutturalmente delicata, nella quale il sistema di puntellamento viene progressivamente scaricato e la struttura portante si trova a riassumere interamente i carichi. Un'errata sequenza di rimozione può generare sovraccarichi locali o effetti domino, fino a innescare collassi progressivi. In questo senso, il lavoro di Buitrago et al. (2018) sui *load limiters* è particolarmente rilevante: pur essendo concepiti per prevenire picchi di carico in fase di esercizio, questi dispositivi offrono un margine di sicurezza anche durante lo scarico, limitando il trasferimento improvviso delle azioni agli elementi rimanenti. L'analisi delle fasi di rimozione può inoltre essere supportata da strumenti di simulazione. Lozano-Galant et al. (2012), attraverso il loro *forward algorithm*, propongono un metodo per ricostruire passo dopo passo l'evoluzione delle sollecitazioni in un'opera sostenuta da puntelli. Questo approccio, applicato al disarmo, consentirebbe di pianificare una sequenza di smontaggio che mantenga le sollecitazioni entro limiti di sicurezza, riducendo il rischio di collassi sproporzionati. Il monitoraggio in tempo reale rappresenta un ulteriore passo avanti. Su et al. (2018) hanno sviluppato un sistema IoT per la misura continua di spostamenti e inclinazioni in sistemi di puntellamento, con la possibilità di generare allarmi automatici al superamento di soglie predefinite. Applicato alla fase di rimozione, questo tipo di sistema consentirebbe di fermare le operazioni se si rilevano deformazioni anomale, garantendo un controllo oggettivo del processo. Anche la letteratura che documenta casi reali offre insegnamenti utili. Il *Massachusetts Bay Transportation Authority* (MBTA) (2015) nel rapporto sull'*Alewife Lobby Roof Damage*, documenta come la rimozione prematura dei sostegni abbia provocato cedimenti significativi e reso necessari interventi urgenti, con conseguenze rilevanti sia dal punto di vista economico che della sicurezza. Analogamente, Klasson et al. (2018), attraverso la *failure review* di strutture di copertura snelle, mostrano come l'analisi sistematica degli incidenti rappresenti uno strumento essenziale per aggiornare procedure e criteri, fornendo indicazioni utili a prevenire il ripetersi di errori analoghi.

Tabella 1.8: Contributi principali relativi allo smontaggio

Autore/studio	**Aspetto trattato**	**Principale contributo**	**Rilevanza per il capitolo**
LOZANO-GALANT ET AL. (2012)	Simulazione fasi	Forward algorithm per prevedere sollecitazioni fase per fase	Pianificazione di sequenze di disarmo più sicure
MASSACHUSETTS BAY TRANSPORTATION AUTHORITY (MBTA) (2015)	Caso reale	Conseguenze di smontaggio prematuro	Evidenza concreta del rischio

Autore/studio	Aspetto trattato	Principale contributo	Rilevanza per il capitolo
BUITRAGO ET AL. (2018)	Sicurezza strutturale	Load limiters che riducono i picchi di carico	Applicabili anche nella fase di scarico
SU ET AL. (2018)	Monitoraggio	Sistema IoT per controllo in tempo reale	Permette stop immediato in caso di anomalie
KLASSON ET AL. (2018)	Failure review	Analisi qualitativi per cedimenti in tempo reale	Base per aggiornamento di linee guida
KERPELIS (2019)	Analisi critica post-sisma	Evidenzia mancanza di procedure unificate per il disarmo	Conferma il gap normativo

L'esame complessivo della letteratura permette di individuare alcuni criteri che potrebbero costituire la base per un approccio prestazionale al disarmo. Si tratta di parametri concreti, misurabili e verificabili in cantiere, che consentirebbero di passare da decisioni basate sull'esperienza a procedure oggettive e standardizzate. La *Tabella 1.9* sintetizza questi criteri, indicando per ciascuno l'indicatore da monitorare, lo strumento di controllo più adatto e il beneficio atteso in termini di sicurezza e affidabilità dell'intervento.

Tabella 1.9: Criteri prestazionali per la fase di smontaggio

Obiettivo	Indicatore misurabile	Strumento di verifica	Beneficio atteso
Limitazione dei sovraccarichi	Carichi per puntello ≤ soglia	Load limiters (Buitrago et al., 2018)	Prevenzione collassi progressivi
Sequenza di smontaggio	Ordine di rimozione verificato in simulazione	Forward algorithm (Lozano-Galant et al., 2012)	Riduzione rischio di redistribuzioni critiche
Controllo deformazioni	Spostamenti entro limiti	Monitoraggio IoT (Su et al., 2018)	Arresto tempestivo operazioni in caso di anomalia
Aggiornamento prassi	Lezioni tratte da failure review	Registrazione e analisi post-evento (Klasson et al., 2018)	Evoluzione continua delle procedure

In conclusione, l'analisi bibliografica mette in luce un gap significativo: la fase di smontaggio è trattata solo in pochi studi, spesso come parte marginale di ricerche più ampie. Mancano linee guida ufficiali e criteri prestazionali codificati. Tuttavia, i contributi esaminati offrono spunti concreti – simulazioni,

monitoraggio, dispositivi di protezione – che, se integrati in un quadro normativo, potrebbero trasformare questa fase da attività basata sull'esperienza a processo controllato e verificabile.

1.1.4 Sostenibilità Ambientale e Life Cycle Assessment

Dopo aver affrontato la classificazione e le tecniche di montaggio dei sistemi di puntellamento nel primo capitolo e il quadro normativo nel secondo, e dopo aver discusso le criticità legate allo smontaggio nel terzo, è naturale estendere l'analisi alla dimensione ambientale di queste strutture temporanee. La crescente attenzione alla sostenibilità nel settore delle costruzioni impone infatti di considerare non solo la sicurezza e l'efficienza strutturale, ma anche l'impatto ambientale associato alla produzione, all'uso e alla dismissione dei puntelli. La valutazione di questi impatti si basa metodologicamente sulla *Life Cycle Assessment* (LCA), regolata a livello internazionale dalle norme UNI EN ISO 14040:2006 – *Life Cycle Assessment — Principles and Framework* (2006) e UNI EN ISO 14044:2021 – *Life Cycle Assessment — Requirements and Guidelines* (2021), che definiscono rispettivamente i principi generali e i requisiti tecnici per condurre studi completi e verificabili. In ambito edilizio, la UNI EN 15978:2011 – Sustainability of Construction Works — *Assessment of Environmental Performance of Buildings — Calculation Method* (2011) rappresenta un ulteriore riferimento, fornendo indicazioni specifiche per calcolare le prestazioni ambientali degli edifici lungo l'intero ciclo di vita. Sebbene non siano pensate esclusivamente per le opere provvisionali, queste norme possono essere estese ai sistemi di puntellamento per valutarne l'impronta di carbonio e gli altri impatti ambientali in modo sistematico. Inoltre, la UNI/PdR 75 – Linee Guida per La Valutazione Del Life Cycle Costing (LCC) nelle Opere Pubbliche (2020) fornisce linee guida pratiche per la separazione e il riuso dei componenti a fine vita, un aspetto particolarmente rilevante per il tema del disarmo sostenibile. Tali aspetti normativi verranno analizzati in maniera puntuale nel *Capitolo 2.6: Valutazione della sostenibilità ambientale orientata al ciclo di vita.*

Dal punto di vista scientifico, solo pochi studi applicano effettivamente l'LCA ai sistemi temporanei. De la Rúa et al. (2020) propongono un'analisi quantitativa delle emissioni di gas serra associate alla produzione e al riuso di ponteggi metallici, offrendo uno schema metodologico replicabile anche per i puntelli. I risultati mostrano che il riutilizzo dei componenti ha un impatto significativo nella riduzione delle emissioni complessive, indicando la convenienza di strategie di progettazione che ne massimizzino la vita utile. Un contributo complementare proviene dagli studi sulla supply chain sostenibile: Sartal et al. (2017), pur non trattando direttamente le opere provvisionali, dimostrano come l'adozione di fornitori locali e processi produttivi agili possa ridurre tempi di approvvigionamento e impatto ambientale. Applicata ai puntelli post-sisma, questa logica si tradurrebbe in una filiera più resiliente e meno dipendente da trasporti a lunga distanza, riducendo anche le emissioni legate alla logistica di emergenza. La letteratura più generale offre inoltre spunti per l'impiego di materiali innovativi a basso impatto, come biocompositi o leghe leggere riciclabili, che potrebbero sostituire in futuro parte dei tradizionali sistemi in

acciaio, senza comprometterne la resistenza. Questo approccio è coerente con le raccomandazioni di Zeule et al. (2017), che evidenziano come la scelta dei materiali sia una delle leve principali per ridurre le emissioni di gas serra lungo il ciclo di vita delle opere. Sebbene la sostenibilità sociale non sia oggetto specifico degli studi sui puntelli, la letteratura sul lavoro flessibile e sulla sicurezza nei cantieri (ad es. Isidorsson & Kubisa (2018) offre spunti utili per includere anche la dimensione sociale nella valutazione complessiva, con particolare riferimento alle condizioni operative nei cantieri di emergenza).
Nonostante questi contributi, dall'analisi bibliografica emerge chiaramente un gap di ricerca: mancano studi sistematici che applichino le metodologie di LCA ai sistemi di puntellamento in maniera estesa e comparabile. In particolare, è quasi del tutto assente la valutazione degli impatti associati alla fase di smontaggio, che rappresenta un momento critico per il riuso dei componenti e la gestione dei rifiuti di cantiere. Integrare queste valutazioni in future linee guida potrebbe aprire la strada a strategie di progettazione e gestione più sostenibili, orientate alla riduzione dell'impronta ambientale e alla promozione dell'economia circolare anche nelle opere provvisionali.

Tabella 1.10:Contributi principali su sostenibilità ambientale e LCA

Autore	**Tema principale**	**Contributo**	**Applicabilità ai puntelli**
DE LA RÚA ET AL. (2020)	LCA di ponteggi metallici	Quantifica emissioni di CO_2 in produzione e riuso, propone schema metodologico	Può essere adattato per calcolare l'impronta ambientale dei puntelli
SARTAL ET AL. (2017)	Supply chain sostenibile	Mostra come fornitori locali riducano tempi e impatti	Applicabile per ottimizzare la logistica in emergenza
SPRA (ISTITUTO SUPERIORE PER LA PROTEZIONE E LA RICERCA AMBIENTALE) (2023)	Rapporto rifiuti speciali	Dati nazionali sulla produzione di rifiuti da costruzione e demolizione	Utile per stimare impatto della fase di smontaggio
studi su materiali innovativi (vari)	Materiali a basso impatto	Propongono biopolimeri e compositi leggeri	Offrono spunti per futuri sviluppi tecnologici

1.1.5 Casi reali

La letteratura che documenta casi reali riveste un ruolo decisivo nell'analisi delle strutture di puntellamento, perché consente di osservare il comportamento delle opere provvisionali in condizioni non teoriche ma operative, spesso in scenari di emergenza ad alta complessità. Le esperienze documentate in letteratura permettono infatti di passare dal piano teorico a quello operativo, mostrando con esempi concreti l'impatto che scelte progettuali, tempistiche e modalità di

monitoraggio possono avere sulla sicurezza complessiva delle opere provvisionali. Le esperienze documentate in letteratura forniscono spunti preziosi per comprendere la complessità della gestione dei puntelli post-sisma, rivelando rischi legati all'assenza di procedure unificate e alla difficoltà di programmare in modo coerente la fase di smontaggio.

Uno dei contributi più dettagliati proviene da Modena et al. (2010), che analizzano le operazioni di messa in sicurezza del patrimonio storico-artistico a seguito del sisma dell'Aquila del 2009. Gli autori riportano come l'installazione di puntellamenti e strutture provvisionali sia stata fondamentale per prevenire crolli e consentire la riapertura di alcune porzioni del centro storico, ma evidenziano anche l'eterogeneità dei criteri utilizzati, frutto di scelte operate sotto pressione e spesso legate alla disponibilità immediata di materiali più che a una pianificazione coordinata. Proprio a partire da queste difficoltà nasce il Vademecum STOP curato da Grimaz et al. (2010), che rappresenta la formalizzazione delle esperienze maturate sul campo. Non si tratta di un documento teorico astratto, ma di un manuale operativo basato sulle soluzioni realmente applicate durante l'emergenza aquilana, con l'obiettivo di renderle replicabili e di fornire un linguaggio comune tra tecnici e squadre operative. Il Vademecum insiste sul fatto che la gestione delle opere provvisionali debba essere vista come un processo dinamico, che parte dall'installazione ma deve proseguire con il monitoraggio e la rimozione in sicurezza. A conferma di queste criticità, Rossetto et al. (2014), nelle missioni EEFIT, sottolineano che l'assenza di un sistema di documentazione centralizzato ha impedito di analizzare in modo sistematico le performance dei puntelli nel tempo. Questa lacuna ha limitato la possibilità di estrarre dati utili per migliorare le future strategie di intervento.

Un contributo importante è fornito da Ferrari (2024), che analizza diversi interventi reali eseguiti su edifici storici danneggiati da eventi sismici recenti, come quelli dell'Italia centrale. Sulla base di queste esperienze, l'autore propone un approccio integrato alla gestione dell'emergenza, che prevede la predisposizione di piani di intervento e di tipologie standard di opere provvisionali da applicare in funzione dei possibili scenari di danno. Questo metodo permette di ridurre i tempi di decisione e di migliorare la qualità e la coerenza delle opere installate in fase di urgenza. Il terremoto di Kumamoto del 2016 conferma questo quadro: Nakahara et al. (2017) riportano che, nonostante l'ampio impiego di puntellamenti per proteggere infrastrutture strategiche, la mancanza di linee guida condivise ha portato a notevoli differenze nei tempi di disarmo e nei criteri di verifica tra i diversi cantieri. Anche eventi al di fuori del contesto sismico offrono insegnamenti preziosi. Bosela (2018) analizzando il collasso del Tropicana Parking Garage, dimostra che la rimozione non controllata dei supporti temporanei può innescare collassi progressivi. Questo caso mette in evidenza come le configurazioni transitorie richiedano un monitoraggio accurato e un piano di alleggerimento controllato, considerazioni direttamente applicabili al tema dello smontaggio dei puntelli post-sisma. Infine, Miltiadou-Fezans et al. (2003) documentano le opere provvisionali installate per sostenere il Katholikon di Dafni Monastery in Grecia, dopo il terremoto del 1999. L'intervento ha richiesto soluzioni reversibili e compatibili con la conservazione del bene,

mettendo in luce l'importanza di un approccio multidisciplinare che bilanci la sicurezza strutturale con la tutela del patrimonio.

Tabella 1.11: Sintesi casi di studio rilevanti

Caso di studio	Contesto	Criticità emerse	Lezioni apprese
MILTIDOU-FEZANS ET AL. (2003)	Bene monumentale	Richiesta di soluzioni poco invasive	Interventi reversibili e multidisciplinari
MODENA ET AL. (2010)	Emergenza post-sisma	Puntellamenti realizzati con criteri eterogenei e gestione frammentaria	Necessità di coordinamento centralizzato e sistema di tracciamento
GRIMAZ ET AL. (2010)	Formalizzazione esperienze L'Aquila	Assenza di standard per monitoraggio e rimozione	Standardizzare procedure e renderle replicabili
ROSSETTO ET AL. (2014)	Analisi post-evento	Mancanza di database delle opere provvisionali	Creazione di archivi condivisi per apprendimento continuo
FERRARI (2024)	Pianificazione preventiva	Decisioni lente e non omogenee	Predisporre piani pre-evento e tipologie standard di puntelli
NAKAHARA ET AL. (2017)	Emergenza post-sisma	Tempi di disarmo non uniformi	Necessità di linee guida condivise e formazione
BOSELA (2018)	Cantiere edilizio	Cedimento per smontaggio non controllato	Monitoraggio e controllo delle sequenze di alleggerimento

Questi casi mettono in luce nuovamente un aspetto cruciale: la letteratura scientifica e tecnica è ricca di descrizioni di interventi di montaggio e consolidamento, ma molto più povera di riferimenti sistematici sulla fase di smontaggio. La maggior parte delle esperienze racconta quanto è stato fatto per mettere in sicurezza, ma non documenta con la stessa accuratezza il processo di rimozione, né le tempistiche ottimali per il disarmo. Questa carenza costituisce un gap conoscitivo che ostacola la definizione di procedure condivise e che motiva l'esigenza di una ricerca specifica volta a colmare tale vuoto.

1.2 CONCLUSIONI E GAP DI RICERCA

Il percorso di analisi svolto in questo lavoro ha permesso di tracciare un quadro ampio e articolato dello stato dell'arte relativo ai sistemi di puntellamento, con particolare riferimento al loro utilizzo in contesti post-sismici. Dalla prima parte del lavoro è emerso che la letteratura scientifica offre un'ampia gamma di

contributi sulla progettazione e sulla capacità portante dei puntelli, con studi che ne analizzano il comportamento sotto carichi verticali, gli effetti delle imperfezioni geometriche e le condizioni che possono portare all'instabilità. Numerosi autori hanno anche indagato le tecniche di montaggio e le buone pratiche per garantire la sicurezza nelle fasi iniziali del ciclo di vita delle opere provvisionali. Tuttavia, è apparso evidente che questa attenzione si concentra soprattutto sulla fase di installazione e molto meno sul momento in cui il puntello deve essere rimosso, un passaggio che, come si è visto, è tutt'altro che secondario. Il capitolo dedicato al quadro normativo ha fatto emergere un aspetto ancora più critico: i puntellamenti non sono oggetto di una regolamentazione specifica. Le Norme Tecniche per le Costruzioni e gli Eurocodici li citano soltanto come strutture temporanee, ma non forniscono indicazioni puntuali né per la loro progettazione né, soprattutto, per la loro rimozione. Questa lacuna normativa si traduce, nella pratica, in scelte che vengono prese caso per caso, affidandosi all'esperienza del tecnico o del direttore dei lavori. Il risultato è che ogni cantiere può adottare soluzioni diverse, con margini di incertezza che incidono direttamente sulla sicurezza e sulla tempistica delle operazioni di riapertura delle aree. Nel capitolo dedicato alle criticità dello smontaggio, questa mancanza di riferimenti è diventata ancora più evidente. Gli articoli trovati affrontano aspetti molto circoscritti, come la variazione delle sollecitazioni durante il disarmo, ma non propongono criteri condivisi per stabilire il momento ottimale in cui procedere con la rimozione. La letteratura scientifica appare quindi frammentaria e parziale, mancando di una visione complessiva che integri la fase di smontaggio nel ciclo di vita del sistema di puntellamento.

Un'altra dimensione considerata è stata quella della sostenibilità, che negli ultimi anni ha assunto un ruolo sempre più rilevante anche per le opere provvisionali. L'applicazione del *Life Cycle Assessment* ai puntelli ha permesso di valutare l'impatto ambientale dei materiali e delle procedure di cantiere, suggerendo possibili strategie per ridurlo. Sono emersi spunti interessanti, come l'uso di materiali riciclabili o l'ottimizzazione logistica per ridurre gli spostamenti. Tuttavia, anche in questo ambito la fase di smontaggio è raramente considerata, nonostante rappresenti il momento chiave per recuperare i componenti e limitarne lo smaltimento. Infine, i casi reali analizzati nell'ultimo capitolo hanno offerto una conferma sul campo delle criticità individuate. Le esperienze dell'Aquila e di Kumamoto mostrano come l'assenza di procedure unificate possa portare a puntellamenti realizzati con criteri eterogenei e difficili da gestire nel tempo. Documenti come il Vademecum STOP sono nati proprio da queste esperienze per fornire strumenti operativi e schede tecniche standardizzate, ma restano raccomandazioni tecniche e non normative. Altri casi, come il crollo del Tropicana Parking Garage o l'intervento d'urgenza alla stazione di Alewife, dimostrano quanto le configurazioni temporanee siano vulnerabili e quanto sia fondamentale un monitoraggio costante durante le fasi di alleggerimento. Infine, il caso del Katholikon di Dafni Monastery mette in luce l'importanza di un approccio multidisciplinare, in grado di bilanciare la sicurezza strutturale con la tutela del patrimonio.

Riassumendo, l'analisi bibliografica ha evidenziato come la conoscenza disponibile sia solida per quanto riguarda la progettazione e il montaggio, ma ancora carente per quanto riguarda lo smontaggio: l'assenza di riferimenti normativi specifici, la scarsità di studi sistematici sulla fase di rimozione e la mancanza di criteri oggettivi e replicabili per decidere quando procedere allo smontaggio rappresentano un vuoto importante, che rischia di compromettere la sicurezza e di allungare i tempi di recupero delle aree colpite da un evento sismico. Alla luce delle evidenze emerse dall'analisi bibliografica, il presente lavoro di ricerca si propone di colmare il vuoto di conoscenze e procedure che caratterizza la fase di smontaggio delle opere provvisionali. L'intento non è soltanto quello di raccogliere buone pratiche già esistenti, ma di proporre un modello operativo strutturato e replicabile, capace di guidare tecnici e operatori nella pianificazione e nell'esecuzione delle operazioni di rimozione in condizioni di sicurezza controllata.

1.3 OBIETTIVI DELLA RICERCA

Alla luce delle lacune evidenziate dall'analisi bibliografica, la ricerca si propone di affrontare in modo organico e strutturato il tema della rimozione delle opere provvisionali post-sisma, una fase del processo di ricostruzione che, pur rivestendo un ruolo cruciale, risulta tuttora priva di riferimenti metodologici e normativi. La tesi mira a trasformare la rimozione dei puntelli da attività condotta prevalentemente in modo empirico e disomogeneo a processo strutturato, verificabile e replicabile, fondato su criteri di sicurezza misurabili e su un quadro metodologico chiaro.

In tale prospettiva, il lavoro si sviluppa attorno a quattro domande che ne orientano l'impostazione metodologica. La prima riguarda la possibilità di definire un modello di calcolo capace di quantificare il livello di sicurezza residua in fase di disarmo: è possibile introdurre un parametro oggettivo che supporti le decisioni operative, riducendo la componente discrezionale tipica delle valutazioni empiriche? A questa esigenza risponde l'elaborazione di un Protocollo di cantiere per la rimozione in sicurezza delle opere provvisionali, all'interno del quale viene introdotto un coefficiente di sicurezza λ in grado di rappresentare in modo quantitativo le condizioni operative e guidare la pianificazione delle strategie di smontaggio. Un secondo ambito di indagine concerne la strutturazione di una procedura operativa controllata e replicabile: in che modo organizzare la fase di rimozione secondo una sequenza logica e verificabile che integri in modo coerente aspetti tecnici e gestionali? Il Protocollo sviluppato nella ricerca è concepito come uno strumento capace di accompagnare il tecnico dall'analisi delle condizioni iniziali alla pianificazione delle operazioni di smontaggio, riducendo l'incertezza e aumentando la tracciabilità delle scelte. Una terza linea di approfondimento introduce la dimensione ambientale: come integrare criteri di sostenibilità nella gestione post-rimozione dei materiali, orientando le decisioni verso soluzioni più responsabili sotto il profilo dell'impatto ambientale? Tale aspetto viene affrontato mediante l'applicazione della metodologia *Life Cycle Assessment* (LCA), utilizzata per valutare il fine vita

dei puntelli e confrontare le strategie di riuso, riciclo e smaltimento, nella prospettiva di individuare un equilibrio tra sicurezza, impatto ambientale e costi. Infine, la riflessione si estende al contributo che gli strumenti digitali possono offrire alla gestione della fase di disarmo: in quale misura la modellazione informativa BIM può supportare la rappresentazione e il coordinamento delle sequenze operative, migliorando la comunicazione tra le figure coinvolte e riducendo il rischio di errori? Nell'ambito della validazione, il ricorso alla modellazione informativa consente di documentare e simulare le fasi di smontaggio, rafforzando il controllo del processo e la coerenza con il progetto di ricostruzione.

La verifica di tali assunti è affidata alla fase di validazione, condotta mediante l'applicazione del Protocollo a cinque casi di studio reali localizzati nel territorio aquilano, selezionati per la loro eterogeneità tipologica e strutturale. Questa fase consente di valutare l'efficacia, l'adattabilità e la trasferibilità del metodo in differenti contesti operativi.

Nel complesso, la ricerca mira a fornire un contributo originale al dibattito scientifico e tecnico sulla gestione del costruito post-sisma, proponendo un approccio integrato che unisca sicurezza, sostenibilità e digitalizzazione. Il lavoro intende colmare un vuoto metodologico ancora evidente, offrendo un modello applicabile in ambito operativo e replicabile in differenti contesti di ricostruzione, capace di rendere la fase di smontaggio un momento consapevole, controllato e pienamente integrato nel processo edilizio complessivo.

1.4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Bosela, P., & Bosela, P. (2018). Tropicana Parking Garage Collapse. *Forensic Engineering 2018*, 1118–1124. https://doi.org/10.1061/9780784482018.108

Buitrago, M., Adam, J. M., Calderón, P. A., & Moragues, J. J. (2018). Load limiters on shores: Design and experimental research. *Engineering Structures*, *173*, 1029–1038. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.063

Cho, C., Kim, K., Park, J., & Cho, Y. K. (2018). Data-Driven Monitoring System for Preventing the Collapse of Scaffolding Structures. *Ournal of Construction Engineering and Management*, *144*(8).

Cifani, G., Castellucci, A., Lemme, A., Liris, M., Martinelli, A., Mazzariello, A., Milano, L., Morisi, C., Petracca, A., Marchetti, L., Di Girolamo, G., Marchetti, M., & Marsili, C. (2011). *SISMA ABRUZZO 2009 – Messa in sicurezza degli edifici monumentali: percorso metodologico e tecniche di intervento*.

De la Rúa, C., Antizar-Ladislao, B., & Maroto-Valer, M. M. (2020). Life cycle assessment and economic analysis of steel and wooden scaffoldings. *Journal of Cleaner Production*, *272*.

Dolce, M., Liberatore, D., Moroni, C., Perillo, G., Spera, G., & Cacosso, A. (2006). *OPUS – Manuale delle opere provvisionali urgenti post-sisma*.

Ferrari, L. (2024). Emergency Response for Architectural Heritage in Seismic Areas: An Integrated Approach to Safety and Conservation. *Heritage*, *7*(9), 4678–4696. https://doi.org/10.3390/heritage7090221

Grimaz, S. (2011). Management of urban shoring during a seismic emergency: advances from the 2009 L'Aquila (Italy) earthquake experience. *Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata*, *52*(2), 341–355.

Grimaz, S., Cavriani, M., Mannino, E., Munaro, L., Bellizzi, M., Bolognese, C., Caciolai, M., D'Odorico, A., Maiolo, A., & Ponticelli, L. (2010). *Vademecum STOP – Schede tecniche delle opere provvisionali per la messa in sicurezza post-sisma da parte dei Vigili del Fuoco*.

INAH – Coordinación Nacional de Antropología. (2018). Los sismos de septiembre de 2017 en México. Miradas antropológicas. *Rutas de Campo*, *3*.

Isidorsson, T., & Kubisa, J. (Eds.). (2018). *Job Quality in an Era of Flexibility*. Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203710678

Kerpelis, P. (2019, June). Critical analysis of building shoring methods after catastrophic earthquakes. *2nd International Conference on Natural Hazards & Infrastructure (ICONHIC 2019)*.

Klasson, A., Björnsson, I., Crocetti, R., & Hansson, E. F. (2018). Slender Roof Structures - Failure Reviews and a Qualitative Survey of Experienced Structural Engineers. *Structures*, *15*, 174–183. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.06.009

Lozano-Galant, J. A., Payá-Zaforteza, I., Xu, D., & Turmo, J. (2012). Forward Algorithm for the construction control of cable-stayed bridges built on temporary supports. *Engineering Structures*, *40*, 119–130. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.02.022

Massachusetts Bay Transportation Authority (MBTA). (2015). *Alewife Station Lobby Roof Damage: Urgent Response and Repairs*.

Miao, X., Yuan, A., Wang, X., & Chen, Q. (2025). Arch First and Beam Later Technology: An Accelerated and Safe Construction for Tied Arch Bridges. *Structural Engineering International*, *35*(2), 162–170. https://doi.org/10.1080/10168664.2024.2312179

Michael Barker, Hollice Stone, David Hammond, & John O'Connell. (2011). *Field Guide for Building Stabilization and Shoring Techniques (BIPS 08)*.

Miltiadou-Fezans, A., Tassios, T. P., Delinikolas, N., Chorafa, E., Zarogianni, E., & Chandrinos, I. (2003). Earthquake structural problems and urgent measures undertaken to support the Katholikon of Dafni Monastery in Athens, Greece. *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture VIII (WIT Transactions on The Built Environment, Vol. 66)*, 533–542.

Ministry of Business, I. and E. (MBIE). (2014). *Field Guide: Rapid Post-Disaster Building Usability Assessment – Earthquakes*.

Modena, C., Da Porto, F., Filippo, C., Munari, M., & Simonato, E. (2010). Cultural Heritage Buildings and the Abruzzo Earthquake: Performance and Post-Earthquake Actions. *Advanced Materials Research*, *133–134*, 3–17. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.3

Nakahara, H., & Uehara, H. (2017). Damage to buildings and temporary structures during the 2016 Kumamoto Earthquake. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, *17*(4).

Rossetto, T., D'Ayala, D., Gori, F., Persio, R., Han, J., Novelli, V., Wilkinson, S. M., Alexander, D., Hill, M., Stephens, S., Kontoe, S., Elia, G., Verrucci, E., Vicini, A., Shelley, W., & Foulser-Piggott, R. (2014). The value of multiple earthquake missions: the EEFIT L'Aquila Earthquake experience. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *12*(1), 277–305. https://doi.org/10.1007/s10518-014-9588-y

Rotilio, M., D'Alberto, G., Di Egidio, A., Contento, A., & De Berardinis, P. (2023). Proposal of a Protocol for the Safe Removal of Post-Earthquake Provisional Shorings. *Buildings*, *13*(9), 2363. https://doi.org/10.3390/buildings13092363

Sartal, A., Martínez-Senra, A., & García, J. (2017). Balancing Offshoring and Agility in the Apparel Industry: Lessons From Benetton and Inditex. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, *25*(0), 16–23. https://doi.org/10.5604/12303666.1228148

SPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale). (2023). *Rapporto rifiuti speciali – Edizione 2023*.

Su, J., Li, J., Tan, L., & Huang, X. (2018). Development of the IoT-based Monitoring System for Scaffold Shoring System of Concrete Formwork. *MATEC Web of Conferences*, *175*, 03072. https://doi.org/10.1051/matecconf/201817503072

UNESCO (United Nations Educational, S. and C. O., International Cooperation Agency (JICA), & Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AMEXCID). (2018). *Stories behind the 2017 earthquakes in Mexico: Response-Recovery-Reconstruction*.

UNI EN 15978:2011 – Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method. (2011).

UNI EN ISO 14040:2006 – Life cycle assessment — Principles and framework. (2006).

UNI EN ISO 14044:2021 – Life cycle assessment — Requirements and guidelines. (2021).

UNI/PdR 75:2020 – Linee guida per la valutazione del Life Cycle Costing (LCC) nelle opere pubbliche. (2020).

Wang, H. J., Xue, Z. C., & Han, Z. Q. (2011). Temporary Support Design on Large-Span Casting Box Girder of the Songpu Bridge. *Applied Mechanics and Materials*, *99–100*, 304–307. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.99-100.304

Zeule, L. de O., Vinhal, L. D., Serra, S. M. B., & Barreto, D. (2017). Decision making process assisted by life cycle assessment: greenhouse gas emission. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, *8*(2). https://doi.org/10.12972/susb.20170022

2 QUADRO CONOSCITIVO E TECNICO PER LA DEFINIZIONE DEL PROTOCOLLO DI RIMOZIONE

Dopo aver sviluppato l'analisi bibliografica, che ha permesso di inquadrare criticamente il tema delle opere provvisionali e di mettere in evidenza le principali lacune tecniche e normative, si è reso necessario un passaggio successivo di carattere conoscitivo, pensato come base propedeutica per lo sviluppo del Protocollo di rimozione che costituisce il cuore di questa ricerca. Non sarebbe stato possibile passare direttamente alla definizione di uno strumento operativo senza prima approfondire in modo sistematico le caratteristiche dei sistemi di puntellamento, i meccanismi di collasso che essi sono chiamati a contrastare e le peculiarità costruttive degli edifici su cui vengono installati. Questa fase di studio ha avuto l'obiettivo di costruire un quadro organico e comparabile, in grado di trasformare le evidenze emerse dalla letteratura in conoscenza tecnica applicabile. In questa sezione, le tipologie di puntello sono state esaminate non solo dal punto di vista descrittivo, ma anche mettendole in relazione con le modalità di danneggiamento più frequenti, così da chiarire quale configurazione risulti più efficace in base al meccanismo da contrastare. Allo stesso modo, l'analisi dei meccanismi di ribaltamento fuori piano e di deformazione nel piano ha permesso di identificare i parametri fondamentali che devono guidare le scelte progettuali per garantire che le opere provvisionali assolvano correttamente alla loro funzione di stabilizzazione temporanea. Parallelamente, l'attenzione si è concentrata anche sul contesto edilizio e sulla configurazione urbana, con particolare riferimento ai centri storici, dove la presenza di aggregati edilizi e spazi ristretti condiziona in modo significativo la scelta e la disposizione delle opere provvisionali. Sono stati inoltre approfonditi gli aspetti normativi per chiarire l'assetto regolamentare di riferimento e individuare eventuali carenze, insieme a una prima valutazione ambientale basata su principi di ciclo di vita, utile a comprendere le implicazioni in termini di recupero, riuso e sostenibilità dei materiali impiegati. In questo senso, il capitolo di analisi conoscitiva rappresenta la cerniera tra la revisione teorica e la proposta operativa. Fornisce infatti gli strumenti interpretativi necessari per leggere correttamente le condizioni di partenza, definire criteri di scelta basati su parametri oggettivi e preparare il terreno alla formalizzazione del Protocollo. Solo disponendo di una base di conoscenza così strutturata è stato possibile sviluppare uno strumento che non si limiti a fornire raccomandazioni generiche, ma che possa essere realmente applicato in cantiere, garantendo sicurezza, coerenza metodologica e tracciabilità delle operazioni di smontaggio.

2.1 LE OPERE PROVVISIONALI POST-SISMA

Come descritto da Cifani et al. (2011), dopo il sisma che ha colpito la città dell'Aquila il 6 aprile 2009 la gestione delle opere provvisionali è stata affrontata attraverso un percorso organizzativo strutturato, che ha visto la collaborazione di numerosi soggetti istituzionali. All'interno della Struttura del Vice Commissario

per la Tutela dei Beni Culturali è stato costituito un gruppo di lavoro congiunto tra funzionari del MiBAC ed enti di ricerca, incaricato di elaborare le soluzioni progettuali per la messa in sicurezza, con particolare attenzione alle chiese e agli edifici pubblici vincolati. Le soluzioni individuate sono state successivamente condivise con il Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, che ne ha curato la realizzazione attraverso le proprie sezioni specialistiche, tra cui il Nucleo Coordinamento per le Opere Provvisionali (N.C.P.) e i gruppi SAF, garantendo l'esecuzione degli interventi secondo le indicazioni progettuali. Questo modello di cooperazione istituzionale è stato poi ripreso e descritto anche in documenti successivi del Dipartimento della Protezione Civile (2014), che ne hanno messo in evidenza il valore come esempio di buona pratica per la gestione delle fasi di messa in sicurezza post-sismica. Nella progettazione di queste opere, è fondamentale che i presidi provvisori non alterino il comportamento strutturale dell'edificio né interferiscano con gli interventi di consolidamento definitivi. Come indicato nelle Norme Tecniche per le Costruzioni, (2018) e nella relativa Circolare esplicativa n. 7 del 21 gennaio 2019, ogni intervento provvisionale deve infatti garantire la conservazione del comportamento globale della struttura e non introdurre vincoli o rigidezze tali da modificarne il quadro resistente. Al contrario, tali presidi dovrebbero essere concepiti in modo da poter essere successivamente integrati o riutilizzati nella fase di restauro e di messa in sicurezza permanente.

Nella gestione delle opere provvisionali post-sisma, la distinzione tra interventi a breve, medio e lungo termine rappresenta ormai un criterio consolidato, recepito sia nella normativa tecnica sia nella letteratura scientifica. Le Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale emanate dal Ministero per i Beni e le Attività Culturali (MiBAC) (2011), Ministero per i Beni e le Attività Culturali e per il Turismo (MiBACT) (2015), Ministero della Cultura (MiC) (2020) definiscono infatti che le opere a breve termine sono orientate alla riduzione immediata del rischio, tramite attività urgenti quali la rimozione delle macerie, la messa in sicurezza degli elementi instabili, la delimitazione delle aree pericolose e la realizzazione di percorsi protetti per operatori e cittadini. La stessa impostazione è richiamata nelle procedure per la gestione dell'emergenza del Dipartimento della Protezione Civile (2014), che inquadra tali azioni come indispensabili per garantire l'accessibilità e la sicurezza nella fase post-evento. Le opere a medio e lungo termine, spesso definite semi-definitive, hanno invece l'obiettivo di ristabilire livelli minimi di agibilità e continuità funzionale dell'edificio, permettendo l'avvio o la prosecuzione delle indagini diagnostiche e delle attività progettuali. Le Linee Guida MiC del 2015 e 2020 sottolineano come questa fase richieda un processo conoscitivo più articolato, basato sull'analisi delle vulnerabilità residue e sulla valutazione della compatibilità fra gli interventi provvisionali e le successive opere di consolidamento definitivo. La scelta dell'intervento più adeguato discende infatti da una lettura approfondita del danno e delle modalità con cui il sisma ha attivato specifici meccanismi di collasso. Tale approccio è ampiamente condiviso nella letteratura scientifica: numerosi studi, tra cui quelli di Lagomarsino & Cattari (2015) e di Brando et al. (2017), mostrano come la corretta interpretazione degli effetti del terremoto

costituisca il presupposto per orientare in modo efficace le prime misure di messa in sicurezza. Dall'osservazione sistematica degli edifici danneggiati nei principali eventi italiani e internazionali emergono tre modalità ricorrenti di risposta delle murature, documentate da D'Ayala et al. (2011), Sorrentino et al. (2019) e da numerosi lavori successivi. La prima modalità è la disgregazione della muratura, tipica degli edifici caratterizzati da materiali eterogenei o malte di bassa qualità, che favoriscono la perdita di coesione anche in assenza di veri e propri meccanismi strutturali; una condizione questa evidenziata anche da Penelis, G. (2007) nel contesto degli edifici con murature deboli. La seconda modalità comprende i meccanismi fuori dal piano, frequentemente associati alla carenza di connessioni tra pareti e alla presenza di spinte non contrastate provenienti da coperture, archi o volte. Analisi condotte sugli edifici danneggiati nei terremoti dell'Aquila 2009 e dell'Emilia 2012 confermano la diffusione di tali fenomeni, spesso responsabili dei collassi locali più severi. Infine, quando le pareti presentano ammorsamenti efficaci e il comportamento globale dell'edificio tende a divenire scatolare, si sviluppano i meccanismi nel piano, la cui evoluzione è governata dalla geometria dei pannelli murari, dall'entità dei carichi verticali e orizzontali e dalle proprietà meccaniche del materiale, secondo quanto descritto nei modelli teorici di Cattari & Lagomarsino (2013). In questo quadro, l'integrazione tra osservazione del danno, conoscenza del comportamento strutturale e indicazioni normative costituisce il fondamento per la definizione di misure provvisionali efficaci e coerenti con la successiva fase di consolidamento, garantendo allo stesso tempo sicurezza immediata e compatibilità con le strategie di intervento a lungo termine.

L'analisi combinata dei meccanismi di danneggiamento, della qualità costruttiva e delle vulnerabilità strutturali consente, in ultima istanza, di definire con maggiore precisione la tipologia di intervento provvisionale più efficace, nonché le modalità operative per la successiva fase di consolidamento definitivo.

La catalogazione delle opere provvisionali si è svolta principalmente sulla base della ricognizione effettuata dal CNR e dai Vigili del Fuoco. Di ciascuna tipologia sono riportate gli aspetti che ne orientano la scelta progettuale:

- individuazione dei principali schemi statici e di dimensionamento;
- individuazione e gestione delle principali problematiche esecutive (fasi lavorative, sicurezza operatori, tempi di realizzazione, …) e criticità generali;
- analisi delle misure di sicurezza adottate al fine di mitigare il rischio.

2.1.1 Puntellatura di ritegno



Figura 2.1: Puntellatura di ritegno

Nel contesto della messa in sicurezza post-sismica degli edifici danneggiati, l'adozione dei puntelli di ritegno rappresenta una misura provvisoria fondamentale per stabilizzare le porzioni di muratura soggette a rischio di ribaltamento. Basandosi sulle schede tecniche del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, queste strutture, realizzate con elementi lignei, metallici o lamellari, vengono posizionate con inclinazione controllata e dimensionate in relazione all'altezza della parete, allo spessore e alla geometria del supporto. Per pareti di altezza inferiore a sette metri si privilegia l'uso del legno; per strutture più elevate o per esigenze particolarmente gravose, si impiega acciaio o legno lamellare. Dal punto di vista statico, il dimensionamento dei puntelli utilizza abachi tabellari per determinare la sezione necessaria e l'interasse tra elementi, individuati in funzione della luce da sostenere e delle condizioni di vincolo superiore. Tra i puntelli e la muratura da sostenere vengono posizionati dei ripartitori di carico costituiti da tavole e correnti verticali e orizzontali, sempre in legno. La tipologia dell'ancoraggio al terreno dei puntelli è determinata dalla natura del fondo stradale o del piano di campagna (trave di contrasto con picchetti singoli o accoppiati, doppia trave di contrasto, scavo del terreno con inserimento di una base fondale in legno, ecc.). Vengono realizzati due schemi, puntellatura di ritegno su base di appoggio o a stampella. Si riporta nella *Figura 2.2* una scheda riassuntiva dei caratteri principali.

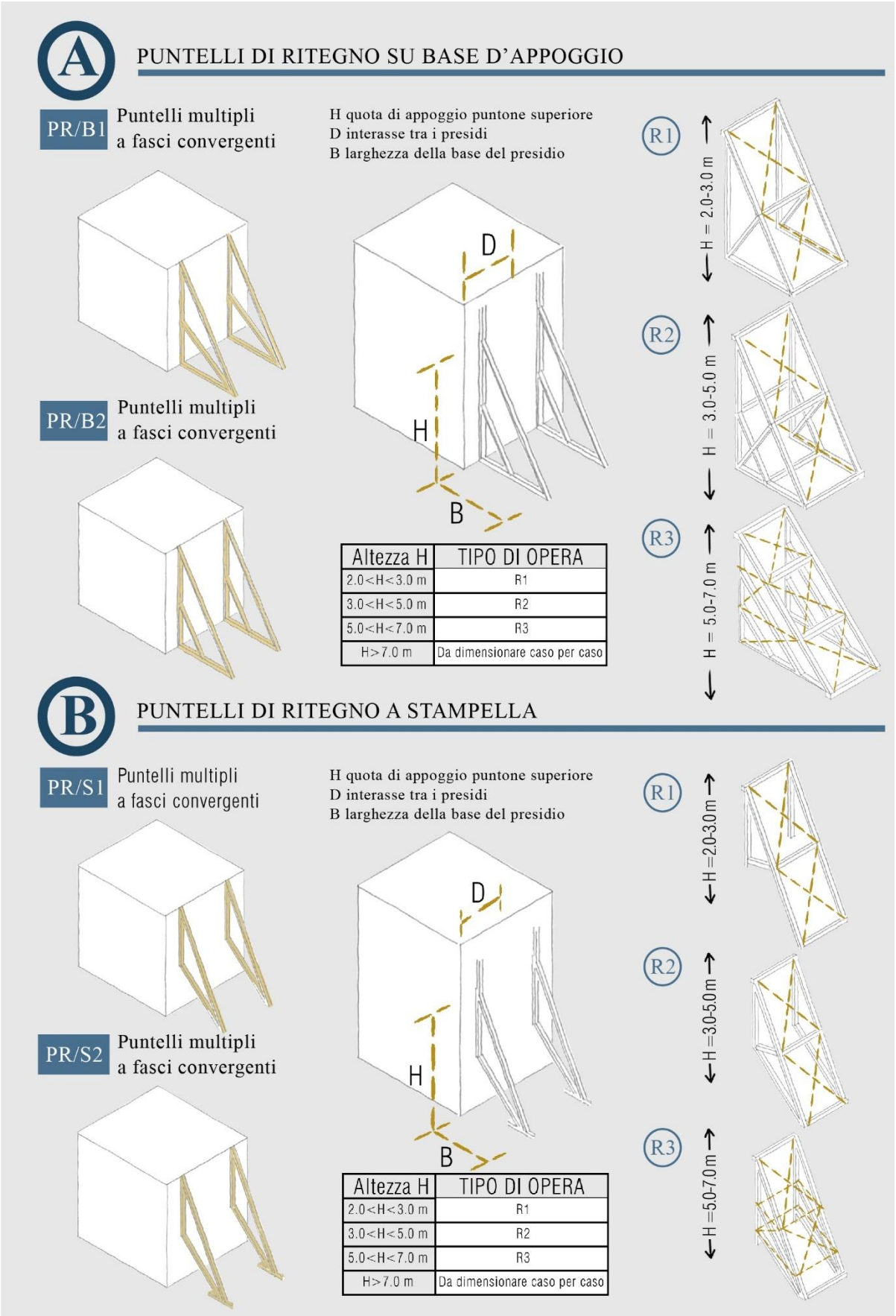


Figura 2.2: Scheda riassuntiva Puntellatura di ritegno

2.1.2 Puntellatura di contrasto

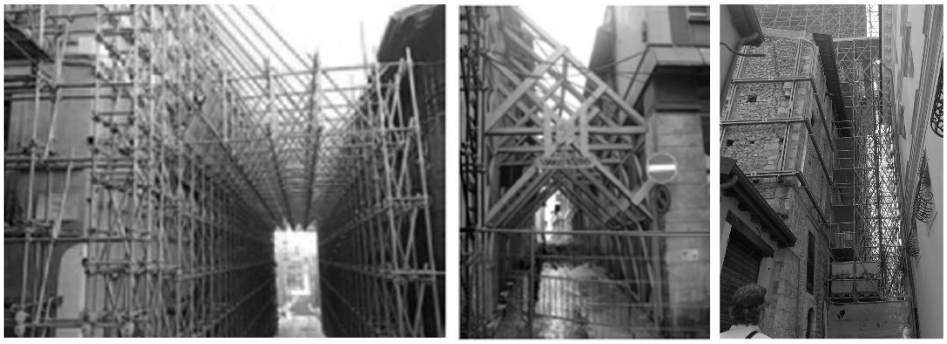


Figura 2.3: Puntellatura di contrasto (Fonte: Celestini & Mantini, 2012)

Nel panorama degli interventi provvisionali post-sisma, i puntelli di contrasto assumono un ruolo cruciale quando si tratta di stabilizzare porzioni di murature crollate o lese che si sviluppano in presenza di edifici adiacenti. Diversamente dai puntelli di ritegno tradizionali, i puntelli di contrasto sono disposti in modo tale da trasferire le sollecitazioni sismiche orizzontali della muratura danneggiata verso il fabbricato contiguo, sfruttando l'azione di supporto reciproco tra i due corpi edilizi. Tale strategia è particolarmente efficace nei contesti urbani densi, tipici dei centri storici come quello dell'Aquila. Nel definire gli schemi statici, si distinguono due condizioni operative principali: il contrasto alla pari, che si impiega quando le altezze del fabbricato in crisi e del fabbricato di appoggio sono simili, e il contrasto con scarico, utilizzato quando la parete da sostenere supera in altezza quella adiacente. Questi schemi standardizzati fanno riferimento a configurazioni geometriche rigorose, in cui la lunghezza del traverso e la distanza tra i fabbricati vengono correlate in funzione dell'altezza interpiano. Dal punto di vista esecutivo, l'installazione dei puntelli di contrasto richiede una preparazione accurata delle sedi murarie. Vengono create fresature o incassi calibrati, con rimozione dell'intonaco, per garantire un adeguato ammorsamento tra puntello e muratura. L'opera deve essere costruita in condizioni che minimizzino il rischio di instabilità durante il montaggio e prevedano una messa in forza dei puntelli mediante cunei o malta di presa rapida. È altresì essenziale che i dispositivi non alterino irreversibilmente il comportamento strutturale dell'edificio ma siano compatibili con eventuali interventi successivi. Si riporta nella *Figura 2.4* una scheda riassuntiva dei caratteri principali.

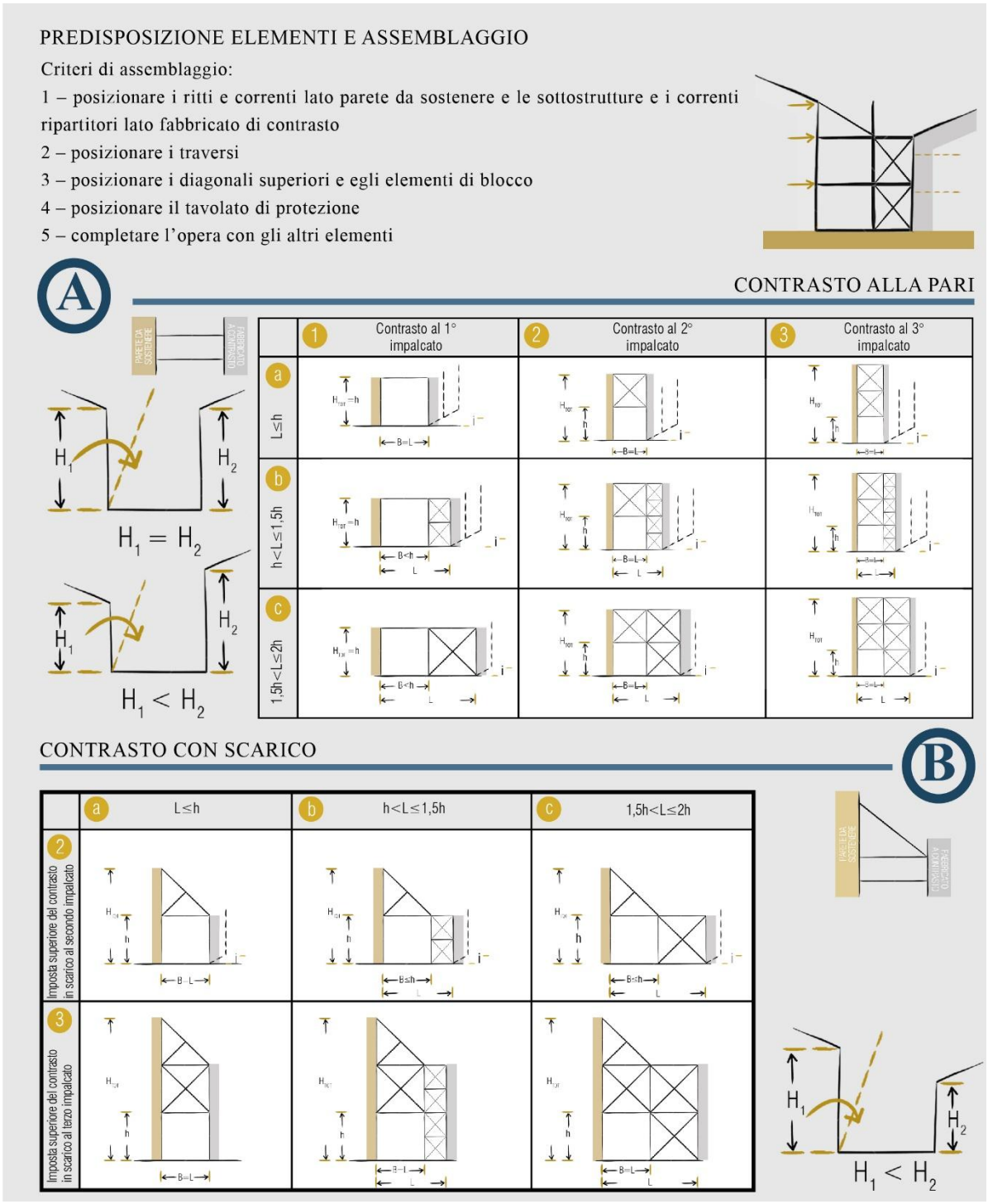


Figura 2.4: Scheda riassuntiva Puntelli di contrasto

2.1.3 Puntellatura di sostegno e sbadacchiature



Figura 2.5:Puntellatura di sostegno e sbadacchiature

Nel quadro degli interventi provvisionali adottati dopo eventi sismici, la puntellatura di sostegno assume un ruolo strategico nel garantire la stabilità degli elementi portanti della muratura, come archi, volte e solai, quando questi risultano gravemente compromessi. Tale presidio utilizza generalmente aste verticali o leggermente inclinate, realizzate in legno, acciaio o, in alcuni casi, muratura, e risulta particolarmente indicato nel sostenere carichi verticali gravanti su strutture lesionate, fungendo da supporto temporaneo fino alla realizzazione dei consolidamenti definitivi. I puntelli in acciaio, dal momento che sono spesso prefabbricati e di rapida installazione, sono preferiti per altezza contenute (fino a circa 4–5 metri), mentre per altezze maggiori o condizioni di accesso complicate si fa ricorso alle versioni in legno o legno lamellare, che trovano applicazione anche in contesti monumentali per la loro compatibilità con il patrimonio storico. Si riporta nella *Figura 2.6* una scheda riassuntiva dei caratteri principali.

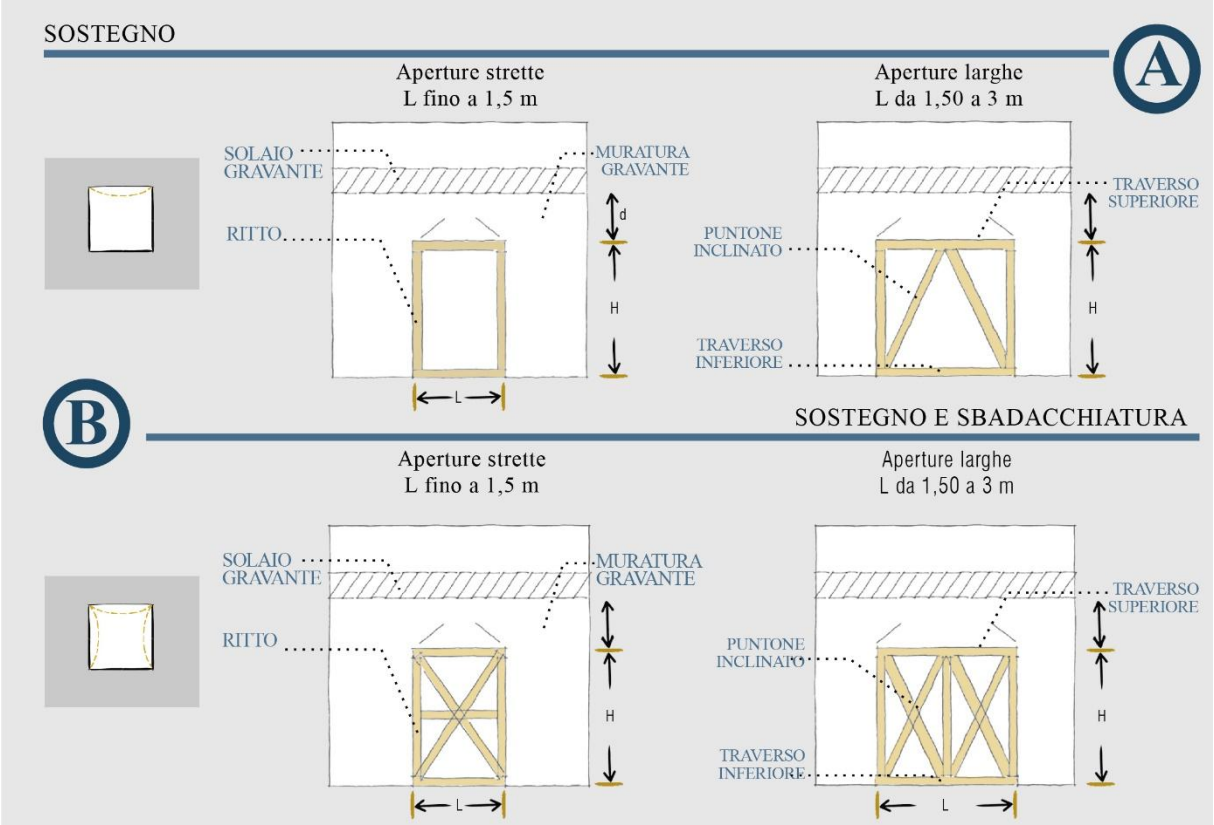


Figura 2.6: Scheda riassuntiva Puntellatura di sostegno e sbadacchiature

2.1.4 Puntellatura di sostegno a balconi e solai

Tra le numerose opere provvisionali adottate nel contesto della messa in sicurezza post-sismica, un ruolo di particolare rilievo è rivestito dalla puntellatura di sostegno a solai e balconi. Questi elementi, per loro stessa natura, risultano spesso tra i più vulnerabili a seguito di un evento sismico, in quanto soggetti a deformazioni per eccesso di carico, perdita di appoggio o rottura dei collegamenti con le strutture verticali. La puntellatura ha dunque la funzione di intercettare i carichi statici e dinamici trasmessi dall'elemento dissestato, trasferendoli in modo controllato a un basamento sicuro, con lo scopo di prevenire il collasso localizzato e consentire l'esecuzione in sicurezza di rilievi, indagini e, successivamente, interventi di consolidamento o sostituzione. Nel caso dei solai, il dissesto si manifesta prevalentemente con fenomeni di inflessione verso l'intradosso, fessurazioni nelle zone centrali della campata o presso gli appoggi, e in alcuni casi veri e propri abbassamenti differenziali. Per quanto riguarda i balconi, invece, i danni più frequenti consistono in rotazioni della soletta e distacchi nell'area di ammorsamento alla muratura. Si riporta nella *Figura 2.7* una scheda riassuntiva dei caratteri principali.

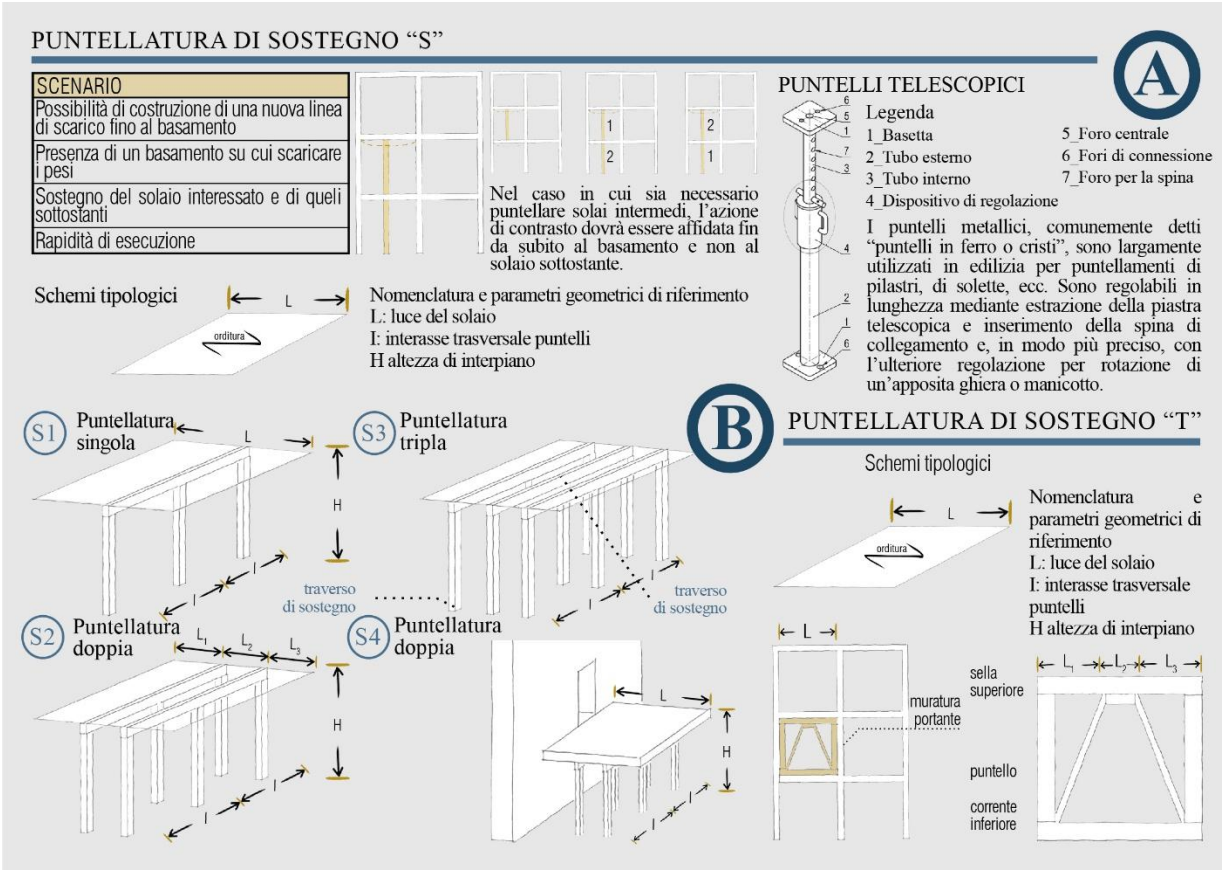


Figura 2.7: Scheda riassuntiva Puntellatura di sostegno a balconi e solai

2.1.5 Centinature di confinamento



Figura 2.8: Centinature di confinamento

Nel panorama delle opere provvisionali post-sisma, le centinature di confinamento rappresentano una soluzione tecnica indispensabile per la messa in sicurezza di archi e volte danneggiati, elementi strutturali particolarmente vulnerabili agli effetti delle azioni orizzontali e verticali indotte dai terremoti. La funzione principale di questo tipo di presidio è quella di contenere le spinte residue e prevenire ulteriori deformazioni, fessurazioni o crolli, offrendo un sostegno temporaneo ma efficace alle strutture voltate fino all'attuazione di interventi definitivi. Le centinature vengono generalmente adottate in presenza di lesioni in chiave o alle reni della volta, situazioni che possono compromettere gravemente l'equilibrio statico del sistema. In particolare, le volte a botte e gli archi in muratura, spesso realizzati con materiali disomogenei o non ben ammorsati, possono manifestare una perdita progressiva della forma resistente,

evidenziata da abbassamenti della linea di imposta, aperture della chiave o rigonfiamenti delle superfici estradossali. Le centinature, in questi casi, hanno il compito di assorbire parte dei carichi verticali e ridistribuirli verso il basso, riducendo il grado di sollecitazione sui piedritti e minimizzando il rischio di rottura per schiacciamento o instabilità.
Dal punto di vista costruttivo, le centine sono realizzate mediante telai reticolari in legno, generalmente a sezione quadrata, opportunamente controventati e distribuiti lungo la luce della volta. Il numero dei ritti e la distanza tra i traversi principali vengono determinati in funzione della geometria dell'arco o della volta, della sua luce e dello spessore murario. Un aspetto fondamentale nella progettazione e nella posa delle centinature riguarda il punto di appoggio al suolo e la trasmissione dei carichi. Le centine devono poggiare su basamenti in grado di sopportare le forze trasmesse senza deformazioni significative. In presenza di aperture ai livelli inferiori, la soluzione preferibile è quella della centina aperta, che permette il trasferimento delle spinte a elementi strutturali effettivamente portanti, minimizzando il carico sul solaio sottostante e riducendo l'invasività dell'intervento. Tale configurazione si dimostra particolarmente vantaggiosa nei contesti storici, dove l'obiettivo primario è la salvaguardia del costruito e la reversibilità degli interventi. Si riporta nella *Figura 2.9* una scheda riassuntiva dei caratteri principali.

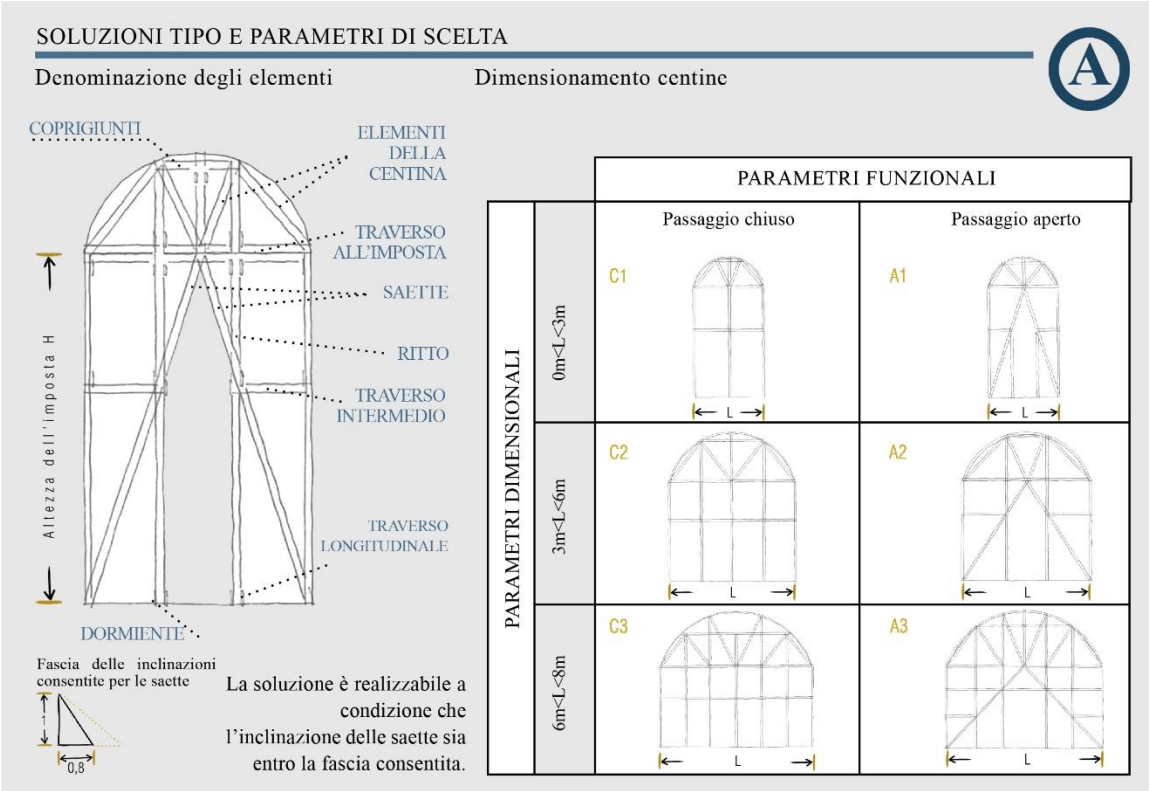


Figura 2.9: Scheda riassuntiva Centinature di confinamento

2.1.6 Incamiciatura della parete



Figura 2.10: Incamiciatura della parete (Fonte: Celestini & Mantini, 2012)

Tra le tecniche provvisionali impiegate in fase emergenziale per la messa in sicurezza di strutture murarie danneggiate, l'incamiciatura della parete rappresenta una soluzione specifica pensata per contrastare fenomeni di spanciamento trasversale o perdita di stabilità locale. L'intervento ha lo scopo principale di incrementare, in modo temporaneo ma efficace, la resistenza a compressione della muratura attraverso un'azione contenitiva laterale esercitata da un sistema di barre passanti e elementi di bloccaggio. La necessità di tale presidio si manifesta in particolare laddove le pareti, sottoposte a sollecitazioni statiche o sismiche, mostrano rigonfiamenti o disgregazione della tessitura muraria, in assenza di un efficace comportamento scatolare dell'edificio. L'incamiciatura prevede la perforazione trasversale della parete mediante l'inserimento di barre d'acciaio ad aderenza migliorata, disposte secondo uno schema reticolare, che attraversano interamente lo spessore murario. Le estremità delle barre vengono bloccate mediante piastre metalliche, fissate esternamente alla parete e contrapposte tra loro, in modo da generare una tensione che esercita un effetto di compressione confinante sul paramento murario. Il serraggio delle barre avviene per mezzo di morsetti a cuneo o tenditori metallici, attraverso una procedura che garantisce la messa in tiro controllata dell'insieme. Va evidenziato che l'incamiciatura non è un intervento universalmente applicabile: è espressamente sconsigliata nei casi in cui la muratura presenti gravi disgregazioni, instabilità generalizzata o dissesti verticali diffusi, per i quali le vibrazioni indotte dalla perforazione potrebbero innescare crolli. Inoltre, è vietato l'utilizzo di questa tecnica su edifici sottoposti a vincolo storico o monumentale, se non previa autorizzazione della competente autorità per la tutela del patrimonio. Prima di effettuare l'intervento di incamiciatura è necessario realizzare un puntellamento di sostegno dei solai che scaricano sulla parete da cucire al fine di ridurne il carico sollecitante e di garantire migliori condizioni di sicurezza per gli operatori. Al termine delle operazioni di cucitura il puntellamento può essere rimosso per trasferire nuovamente il carico alla parete rinforzata. A chiusura delle operazioni è necessario piegare le barre verso la parete per ragioni di sicurezza. Queste ultime non vanno tagliate al fine di consentire una nuova messa in tiro dei tondini in acciaio. Si riporta nella *Figura 2.11* una scheda riassuntiva dei caratteri principali.

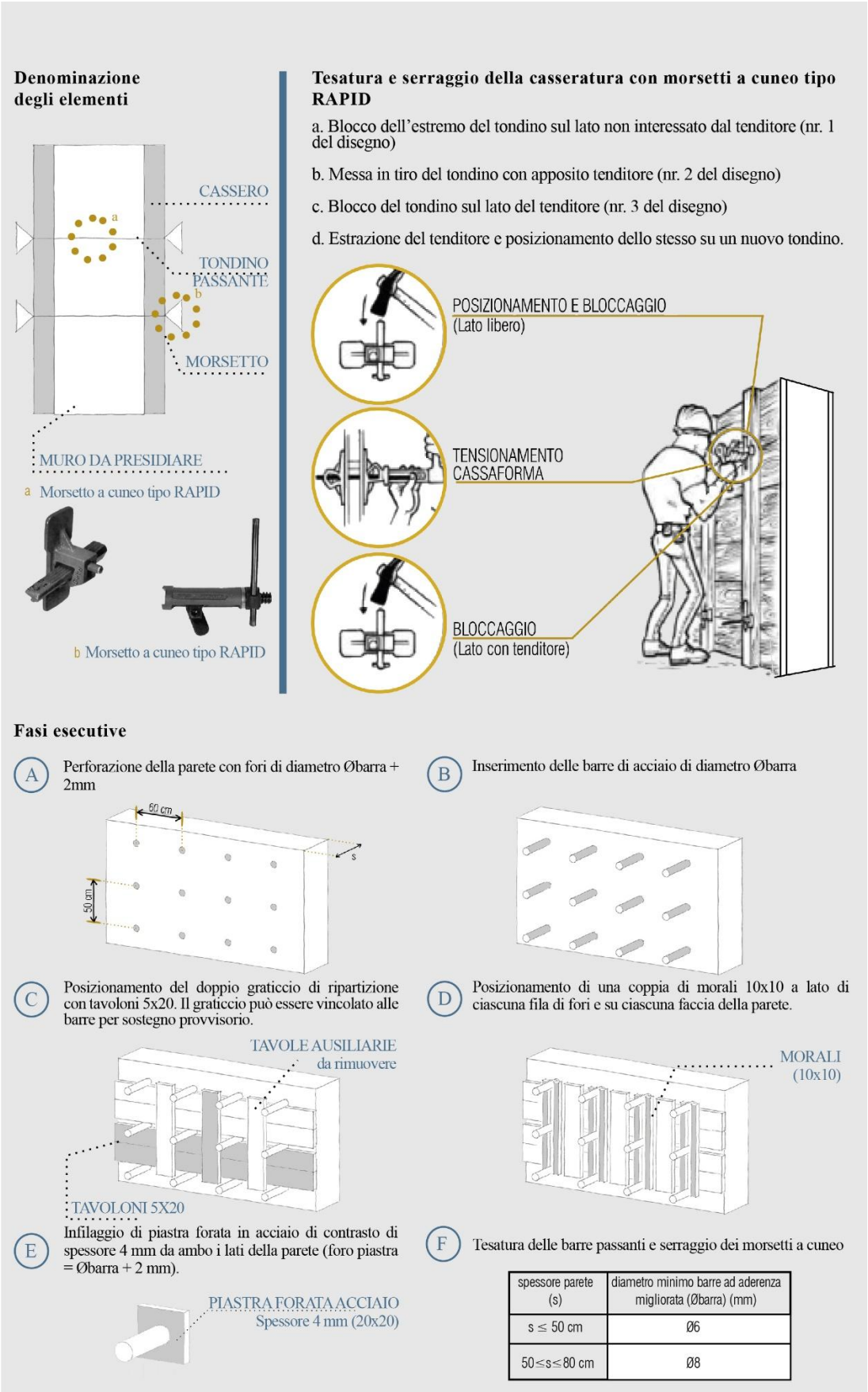


Figura 2.11: Scheda riassuntiva Incamiciatura della parete

2.1.7 Cerchiature



Figura 2.12: Cerchiature (Fonte: Celestini & Mantini, 2012)

Gli interventi di cerchiatura possono applicarsi agli elementi sia in muratura sia in cemento armato. Oltre che su colonne e pilastri, l'intervento è efficace anche su intere strutture, ottenendo la massima efficacia in strutture con pianta compatta e dimensioni contenute, quali ad esempio campanili e torri, in quanto la capacità di contenimento della cerchiatura si riduce all'aumentare delle dimensioni in pianta della struttura. Per di più, eccessive lunghezze in pianta aumentano le difficoltà operative, rendendo talvolta impraticabili tali interventi.
Le soluzioni di cerchiatura esistenti dipendono dalla tipologia di struttura:

- cinturazione totale esterna: possibilità di avvolgimento completo (larghezza pareti da contenere non molto estesa);
- cinturazione parziale passante: presenza di aperture laterali allineate (o possibilità di praticare fori) a distanza non ravvicinata dalla parete da presidiare o possibilità di praticare fori passanti in zone in calcestruzzo in blocchi lapidei;
- cinturazione vincolata: presenza di pareti laterali su cui poter vincolare la fune a distanza non ravvicinata dalla parete da presidiare in zone in calcestruzzo o in blocchi lapidei.

Tra le diverse tecniche di cerchiatura provvisionale impiegate nella messa in sicurezza post-sisma, particolare rilievo assumono le soluzioni che prevedono l'utilizzo di fasce in poliestere. Questi interventi sono stati ampiamente applicati su edifici danneggiati che presentavano elementi strutturali – in particolare colonne e pilastri – sollecitati da sforzi eccessivi di compressione e/o taglio. Tali elementi, spesso realizzati in muratura o in calcestruzzo, risultano particolarmente fragili nei confronti delle azioni di trazione e tendono a sviluppare meccanismi di collasso localizzati se non adeguatamente contenuti. La cerchiatura con fasce in poliestere viene pertanto utilizzata come misura temporanea, con funzione prevalentemente cautelativa, in attesa di un successivo intervento strutturale più invasivo, come ad esempio la puntellatura o il consolidamento permanente. Questa tecnologia si distingue per la rapidità di applicazione e l'elevata efficienza in fase emergenziale. Le fasce vengono poste in tensione attraverso dispositivi meccanici a regolazione manuale, noti come cricchetti, che permettono di conferire al sistema una funzione attiva già al termine della fase di installazione. Un ulteriore vantaggio di questo tipo di intervento è rappresentato dalla possibilità di riutilizzare sia le fasce che i dispositivi di serraggio, rendendo l'operazione non solo efficace, ma anche

economicamente sostenibile e flessibile dal punto di vista operativo. Un'alternativa diffusa è costituita dalle cerchiature realizzate con tubi e giunti metallici, sistemi che sfruttano l'assemblaggio modulare di componenti prefabbricati per creare una struttura reticolare disposta lungo i prospetti dell'edificio da presidiare. L'intero sistema viene montato secondo le indicazioni di un progetto o disegno esecutivo redatto da un tecnico abilitato, e ha lo scopo di garantire il sostegno e il contenimento degli elementi murari danneggiati, sia in funzione preventiva – qualora si tema un cedimento imminente – sia in funzione contenitiva, nel caso in cui si rilevi un distacco in atto o potenziale di porzioni murarie o frammenti. L'impiego di tubi e giunti si rivela spesso preferibile rispetto a carpenterie metalliche complesse, soprattutto in contesti urbani con viabilità ridotta o spazi di manovra limitati, che ostacolano l'utilizzo di autogrù, piattaforme aeree o mezzi pesanti. Un ulteriore sistema, particolarmente efficace nel contrastare fenomeni di schiacciamento e presso-flessione, è quello della cerchiatura con profilati metallici e cavi d'acciaio. Tali interventi si rivelano idonei per il confinamento di colonne e pilastri fragili, in quanto l'azione esercitata dai cavi consente di limitare le dilatazioni trasversali e di generare uno stato di compressione triassiale. Questo effetto, oltre a incrementare il carico di collasso per sforzo assiale, migliora anche la duttilità dell'elemento strutturale e la sua resistenza a taglio. Si tratta di una soluzione che trova particolare applicazione negli edifici in muratura di dimensioni contenute, dove la compattezza dell'organismo edilizio consente una risposta più uniforme alla messa in tensione dei sistemi di confinamento. Infine, merita menzione la tecnica della cerchiatura in legno e cavi d'acciaio, spesso utilizzata per l'intervento su intere strutture, e non solo su singoli elementi. Anche in questo caso, l'assemblaggio dei componenti avviene secondo uno schema progettuale definito, con l'obiettivo di creare una struttura continua disposta lungo i prospetti dell'edificio. La funzione principale è duplice: cautelativa, quando la costruzione, pur danneggiata, non ha ancora manifestato crolli, ma si ritiene che il rischio possa aumentare nel tempo; oppure contenitiva, nei casi in cui siano già presenti distacchi o dissesti significativi. La combinazione tra il comportamento flessibile del legno e la capacità di trazione dell'acciaio consente un'elevata adattabilità, soprattutto nei contesti vincolati, dove il rispetto delle caratteristiche formali e materiche dell'edificio impone soluzioni reversibili e poco invasive. Si riporta scheda riassuntiva nella *Figura 2.13.*

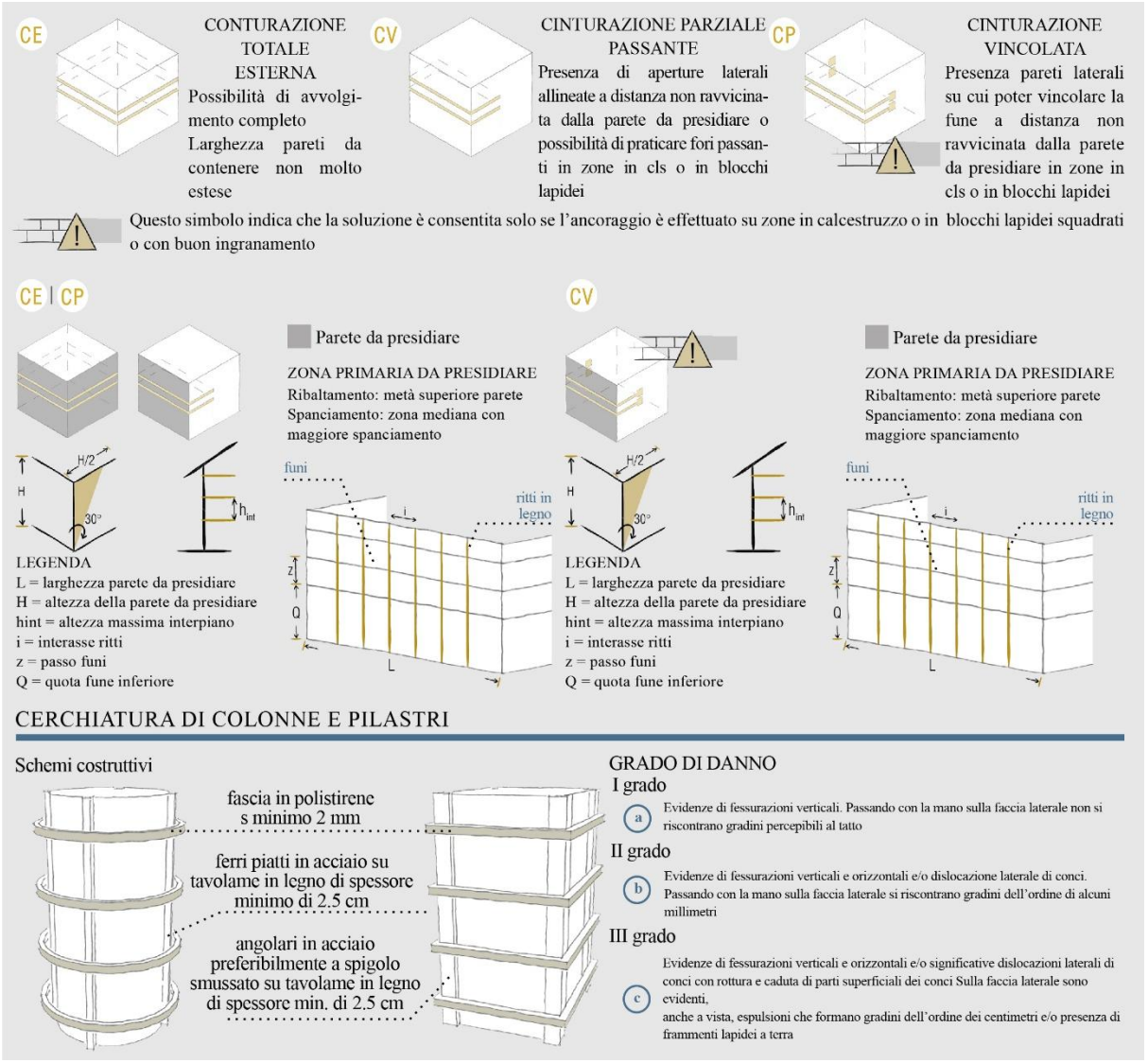


Figura 2.13: Scheda riassuntiva Cerchiature

2.1.8 Tirantature



Figura 2.14:Tirantature (Fonte: Celestini & Mantini, 2012)

Tra gli interventi provvisionali impiegati per la messa in sicurezza di edifici danneggiati da eventi sismici, le tirantature rappresentano una soluzione

estremamente efficace per il contenimento dei meccanismi di ribaltamento fuori piano e lo spanciamento di pareti murarie. Si tratta di interventi non invasivi che sfruttano la messa in trazione di cavi in acciaio per esercitare un'azione attiva di contenimento trasversale sulle strutture murarie, agendo in modo puntuale ma distribuito. Il principio su cui si basa l'intervento è quello del confinamento flessibile: le pareti da presidiare, soggette a fenomeni di disconnessione o distacco dal resto della struttura, vengono trattenute attraverso funi metalliche tese, collegate a sistemi di contrasto esterni o ad altri elementi strutturali in grado di assorbire le forze trasmesse. I tiranti possono essere installati con diversi schemi, a seconda della morfologia dell'edificio e della posizione delle pareti da contenere. Le configurazioni più comuni includono la cinturazione totale esterna, la tirantatura passante interna e la tirantatura vincolata laterale, ciascuna con specifiche indicazioni d'impiego e prestazioni. Le cinturazioni totali esterne vengono realizzate avvolgendo l'edificio con funi continue che percorrono l'intero perimetro a quote prestabilite, e risultano particolarmente efficaci su fabbricati di piccole dimensioni con geometria compatta. In alternativa, le tirantature passanti interne prevedono l'installazione di funi che attraversano la struttura da parte a parte, in corrispondenza dei solai, e sono ancorate a traversi o profili metallici, spesso posizionati all'intradosso o all'estradosso dei solai stessi. Questa configurazione è vantaggiosa quando si dispone di una sufficiente regolarità planimetrica e la muratura presenta lesioni di distacco simmetriche. Nel caso in cui l'attraversamento delle murature non sia praticabile, ad esempio per la presenza di vincoli architettonici o impianti, si opta per una tirantatura vincolata laterale, che prevede l'ancoraggio delle funi a pareti perpendicolari o a elementi strutturali esterni, in grado di assorbire le reazioni generate dalla messa in tiro. Il dimensionamento delle tirantature dipende da molteplici fattori: la lunghezza e l'altezza della parete da contenere, il tipo di muratura, il livello di danneggiamento, e la presenza di elementi rigidi a cui vincolare le estremità delle funi. Si riporta scheda riassuntiva nella *Figura 2.15.*

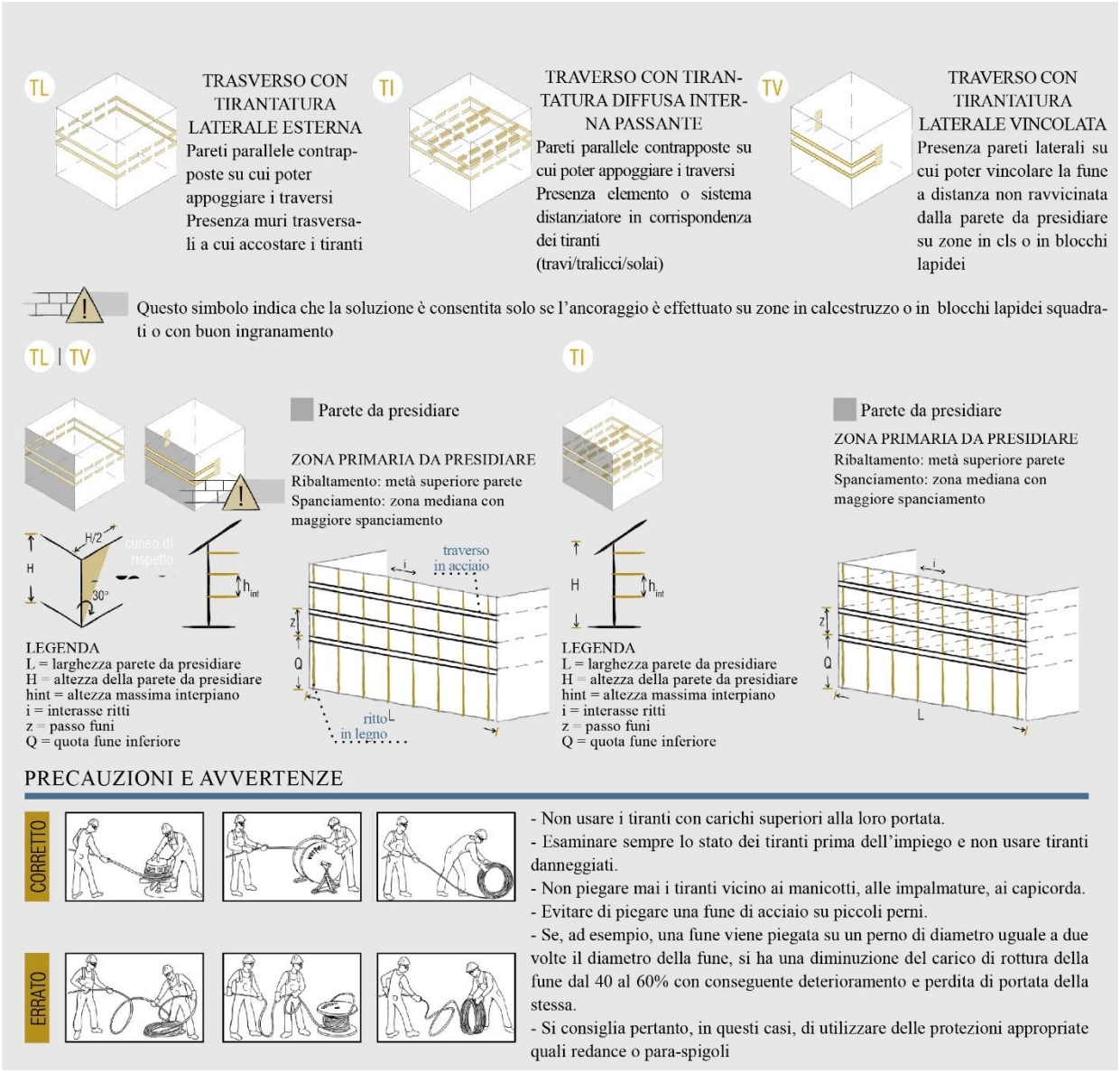


Figura 2.15: Scheda riassuntiva Tirantature

2.2 I MECCANISMI DI COLLASSO

La comprensione dei meccanismi di collasso è essenziale per interpretare il comportamento degli edifici danneggiati da eventi sismici e per definire interventi provvisionali efficaci, capaci di prevenire crolli secondari e garantire la sicurezza di operatori e cittadini. Per inquadrare correttamente l'argomento, nel presente lavoro si fa riferimento principalmente alle *PERPETUATE Guidelines* proposte da Lagomarsino & Cattari (2015), e al documento di Milano, et al. (2009), allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento emanate a seguito del terremoto dell'Aquila. Questi due contributi forniscono una classificazione sistematica dei principali cinematismi osservati sul campo e propongono i relativi modelli di analisi, costituendo un riferimento solido per l'attività progettuale. Secondo questo approccio, i meccanismi di collasso possono essere interpretati come configurazioni cinematiche che la struttura tende ad assumere una volta superata la capacità resistente. Vaiano et al. (2020) confermano che l'osservazione dei cinematismi è il primo passo per una valutazione efficace del rischio post-sismico, poiché consente di individuare i punti critici su cui concentrare l'attenzione nelle fasi di messa in sicurezza. Milano, et al. (2009) aggiungono che un'errata identificazione del meccanismo attivo può condurre a interventi provvisionali inefficaci o addirittura dannosi, con il rischio di sovraccaricare porzioni di muratura già compromesse.

La corretta classificazione e modellazione dei meccanismi di collasso rappresenta quindi il prerequisito per una progettazione consapevole delle opere provvisionali, assicurando che il puntellamento lavori in sinergia con la struttura e non ne alteri l'equilibrio. Questo approccio consente anche di programmare con maggiore sicurezza le fasi successive, compreso il disarmo, riducendo i rischi associati a configurazioni instabili o a sequenze di smontaggio non controllate.

In generale, i meccanismi che possono portare al collasso di una muratura si dividono in due grandi famiglie: meccanismi nel piano, che interessano la parete nel proprio piano di giacitura e producono deformazioni per flessione o taglio, e meccanismi fuori dal piano, in cui la parete tende a ruotare o a flettersi trasversalmente rispetto alla sua posizione originale. Questa distinzione è fondamentale perché le sollecitazioni, le modalità di attivazione e le strategie di messa in sicurezza sono profondamente diverse nei due casi.

Per il presente lavoro mi sono concentrata su quattro meccanismi in particolare: ribaltamento semplice, ribaltamento composto, flessione verticale e flessione orizzontale. La scelta è stata guidata dall'osservazione che questi meccanismi sono i più ricorrenti negli edifici in muratura in seguito a eventi sismici, come documentato da Milano et al. (2009) e Lagomarsino e Cattari (2015). Essi sono anche quelli che maggiormente condizionano la progettazione delle opere provvisionali: il puntellamento deve essere concepito per contrastare la cinematica di collasso che l'edificio sta manifestando o che potrebbe attivarsi in caso di repliche sismiche. Concentrarsi su queste tipologie consente di sviluppare criteri di progettazione e di smontaggio applicabili nella pratica di cantiere, ottimizzando l'efficacia dell'intervento e riducendo il rischio di crolli progressivi.

Nei paragrafi seguenti vengono analizzati nel dettaglio i quattro meccanismi considerati, descrivendone le condizioni di innesco, i modelli di analisi più utilizzati e le implicazioni per la progettazione, l'installazione e la successiva rimozione dei puntelli.

2.2.1 Ribaltamento semplice



Figura 2.16: (a) Schema Ribaltamento semplice. (b) Immagini esemplificative (Fonte: Celestini & Mantini, 2012)

Il ribaltamento semplice delle pareti esterne è uno dei meccanismi di collasso più diffusi e critici negli edifici in muratura soggetti ad azione sismica. Esso si schematizza come la rotazione rigida di una porzione di parete attorno ad una cerniera cilindrica orizzontale posta alla base.
L'attivazione del meccanismo avviene per sollecitazioni fuori piano che producono il distacco della parete dalle murature ortogonali o dai diaframmi di piano, con conseguente perdita di equilibrio e caduta all'esterno.
La condizione di innesco si verifica quando la parete risulta non ammorsata in sommità (assenza di cordoli, catene o solai con sufficiente capacità di ancoraggio) e quando le murature ortogonali presentano scarsa qualità o assenza di connessione nel martello murario. L'evidenza sul campo di tale cinematismo si manifesta attraverso lesioni verticali in prossimità dell'intersezione tra la parete ribaltante e quelle ortogonali, nonché attraverso lo sfilamento del paramento dalla connessione d'angolo. Il fenomeno può riguardare una porzione isolata di muratura (ad esempio tra due aperture), l'intera parete di un piano, o più livelli sovrapposti, a seconda delle condizioni di vincolo dei solai. Particolare attenzione va riservata agli edifici con solai spingenti o debolmente collegati, dove il ribaltamento può propagarsi progressivamente verso l'alto o il basso.

2.2.2 Ribaltamento composto

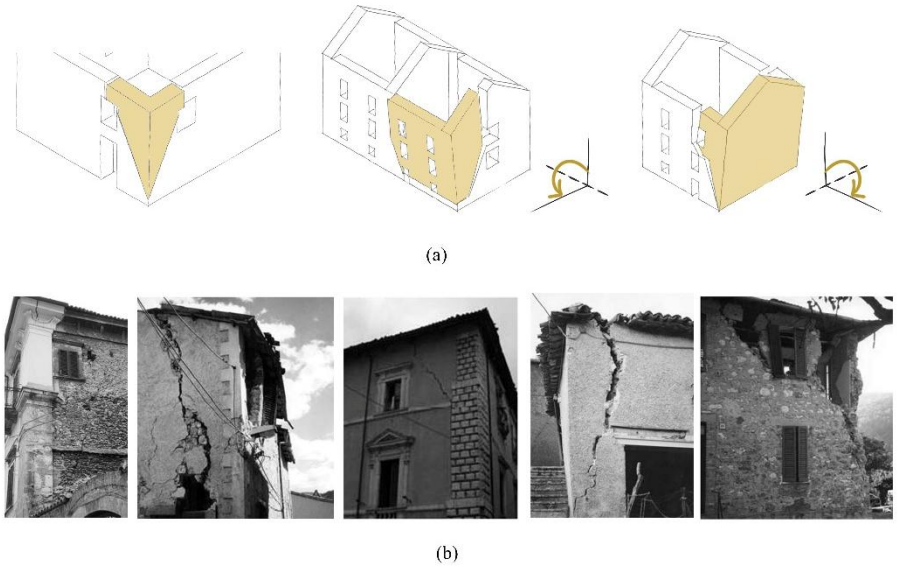


Figura 2.17: (a) Schema Ribaltamento composto. (b) Immagini esemplificative (Fonte: Celestini & Mantini, 2012)

Il ribaltamento composto si differenzia dal meccanismo semplice in quanto la parete non ruota come un blocco rigido unico, ma subisce una rotazione combinata con deformazione o frattura lungo linee di debolezza intermedie. Secondo le *PERPETUATE Guidelines*, questo meccanismo è tipico di pareti con aperture asimmetriche, discontinuità murarie o porzioni di muratura di diversa rigidezza. L'attivazione può avvenire in due fasi: iniziale ribaltamento di una porzione di muro (ad esempio il timpano), seguito dal distacco della parte rimanente. I segni distintivi sono quadri fessurativi più complessi, con linee di frattura diagonali o irregolari, che identificano il distacco progressivo dei macroblocchi. Il rischio associato a questo meccanismo è particolarmente elevato, poiché la caduta avviene in maniera sequenziale e imprevedibile, aumentando la pericolosità per le aree di ingombro.

2.2.3 Flessione verticale

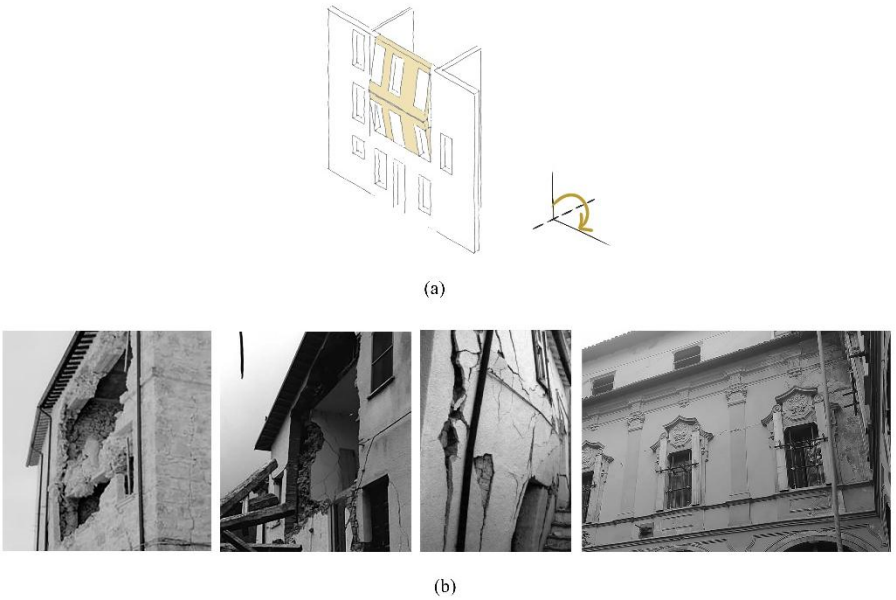


Figura 2.18: (a) Schema Flessione verticale. (b) Immagini esemplificative (Fonte: Celestini & Mantini, 2012)

La flessione verticale è un meccanismo di collasso fuori piano in cui la parete si comporta come una lastra verticale incastrata ai lati, sviluppando una deformata flessionale e portando a rottura per trazione nel paramento di estradosso.
Questo meccanismo è favorito in edifici con connessioni efficaci alle estremità della parete, che impediscono il ribaltamento rigido ma non garantiscono sufficiente rigidezza per contrastare la flessione fuori piano. I sintomi osservabili includono fessurazioni verticali e orizzontali distribuite lungo l'altezza della parete, con espulsione di conci centrali. La sua identificazione è essenziale per decidere interventi provvisionali mirati, quali l'applicazione di centinature e controventi in grado di ridurre la luce libera della parete e incrementarne la stabilità.

2.2.4 Flessione orizzontale

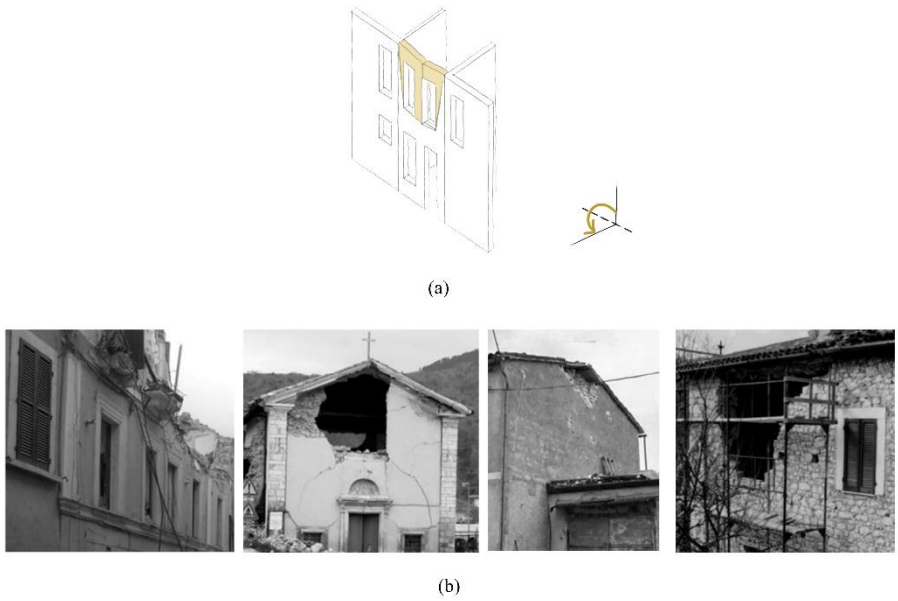


Figura 2.19:(a) Schema Flessione orizzontale. (b) Immagini esemplificative (Fonte: Celestini & Mantini, 2012)

La flessione orizzontale si verifica prevalentemente in pareti lunghe e sottili o in tamponature, che sotto azione sismica fuori piano sviluppano una configurazione ad arco spingente. La muratura, vincolata ai due estremi, subisce un ribaltamento differenziale che porta a fessurazioni verticali alternate e distacco di porzioni intermedie. Questo cinematismo è stato ampiamente documentato negli edifici in muratura dell'Aquila e in altre emergenze sismiche. La sua pericolosità è legata al possibile collasso improvviso dell'intera parete in assenza di presidi provvisionali quali puntellature trasversali o sistemi di controventatura temporanea.

2.3 ANALISI LINEARE DEI MECCANISMI DI COLLASSO

Per la stesura del presente capitolo si fa riferimento al lavoro di Beolchini et al. (2005): tale documento costituisce un riferimento metodologico fondamentale per l'individuazione dei meccanismi di collasso e per la definizione dei modelli di analisi volti alla valutazione della sicurezza sismica degli edifici in muratura.
Una volta individuati i possibili meccanismi di collasso attivabili in un edificio in muratura, è necessario definire uno o più modelli di analisi per quantificare l'entità dell'azione sismica in grado di innescarne l'attivazione. A questo scopo, si fa riferimento al moltiplicatore sismico λ, ovvero al moltiplicatore dei carichi orizzontali agenti sugli elementi strutturali che induce l'attivazione del meccanismo di collasso considerato. L'approccio metodologico più diffuso per analizzare i meccanismi locali fuori dal piano è quello dell'analisi limite dell'equilibrio, svolta secondo il metodo cinematico. In questo contesto, le

strutture murarie vengono modellate come insiemi di corpi rigidi, rappresentativi dei macroelementi coinvolti nel cinematismo. La valutazione delle condizioni limite si basa sull'ipotesi semplificativa di muratura priva di resistenza a trazione e, in genere, dotata di resistenza a compressione idealmente infinita. I diversi blocchi identificati nel modello sono in grado di ruotare o traslare l'uno rispetto all'altro lungo superfici di frattura predefinite, assumendo il comportamento di un sistema labile. Per ogni cinematismo ritenuto significativo rispetto alla configurazione geometrico-strutturale dell'edificio, viene dunque determinato il valore di λ, corrispondente alla soglia oltre la quale l'equilibrio viene meno. Il meccanismo più pericoloso è quello associato al valore minimo del coefficiente sismico, il quale rappresenta la condizione critica per la stabilità della costruzione. Tuttavia, anche i meccanismi con λ appena superiori vanno considerati con attenzione, in quanto indicativi di altre possibili vulnerabilità locali. Dal punto di vista operativo, l'analisi si basa sul bilancio tra il lavoro compiuto dalle forze esterne agenti sul sistema e quello svolto dalle eventuali forze interne resistenti. L'equilibrio cinematico viene espresso mediante l'applicazione del Principio dei Lavori Virtuali, il quale impone che, per una configurazione virtuale di moto compatibile con il meccanismo, il lavoro virtuale compiuto dalle forze esterne sia uguagliato al lavoro virtuale delle forze interne. In particolare, il moltiplicatore λ viene ricavato come fattore di scala dell'azione orizzontale, tale da equilibrare il sistema rispetto alla configurazione di collasso assunta. Le azioni considerate nell'analisi includono: il peso proprio dei blocchi che compongono la catena cinematica, applicato nei rispettivi baricentri; i carichi verticali agenti su questi blocchi (ad esempio, sovraccarichi dovuti a solai, volte, coperture o porzioni murarie non incluse nel modello); un sistema di forze orizzontali proporzionali ai carichi verticali, nel caso in cui tali forze non siano efficacemente trasmesse ad altri elementi strutturali; ed eventuali forze esterne concentrate, come quelle esercitate da catene metalliche o elementi di collegamento. Formalmente, il valore di λ si ottiene dalla seguente equazione di equilibrio virtuale:

$$\lambda\left[\sum_{i=1}^{n} P_i\,\delta_{ix} + \sum_{j=n+1}^{n+m} P_j\,\delta_{jx}\right] - \sum_{i=1}^{n} P_i\delta_{\ iy} - \sum_{h=1}^{0} F_h\,\delta_h = L_{fi}$$

in cui:

- n è il numero di tutte le forze peso applicate ai diversi blocchi della catena cinematica;
- m è il numero di forze peso non direttamente gravanti sui blocchi le cui masse, per effetto dell'azione sismica, generano forze orizzontali sugli elementi della catena cinematica, in quanto non efficacemente trasmesse ad altre parti dell'edificio;
- è il numero di forze esterne, non associate a masse, applicate ai diversi blocchi; − Pi è la generica forza peso applicata al blocco;

- P_j è la generica forza peso, non direttamente applicata ai blocchi, la cui massa, per effetto dell'azione sismica, genera una forza orizzontale sugli elementi della catena cinematica, in quanto non efficacemente trasmesse ad altre parti dell'edificio;
- i_x è lo spostamento virtuale orizzontale del punto di applicazione dell'i-esimo peso Pi, assumendo come verso positivo quello associato alla direzione secondo cui agisce l'azione sismica che attiva il meccanismo;
- δ_{jx} è lo spostamento virtuale orizzontale del punto di applicazione dell'j-esimo peso P_j, assumendo come verso positivo quello associato alla direzione secondo cui agisce l'azione sismica che attiva il meccanismo;
- δ_{iy} è lo spostamento virtuale verticale del punto di applicazione dell'i-esimo peso Pi, positivo se verso l'alto;
- F_h è il valore assoluto della generica forza esterna applicata ad un blocco;
- δ_h è lo spostamento virtuale del punto di applicazione dell'h-esima forza esterna, nella direzione della stessa e di segno positivo se di verso discorde;
- L_{fi} è il lavoro di eventuali forze interne.

Attraverso questo metodo è quindi possibile stimare, con buona approssimazione, l'intensità sismica in grado di attivare i diversi meccanismi locali di collasso e, conseguentemente, individuare le zone più vulnerabili dell'edificio, orientando le strategie di intervento verso una mitigazione efficace del rischio.

2.3.1 Ribaltamento semplice

Il moltiplicatore di collasso λ delle forze orizzontali è valutato imponendo le condizioni di equilibrio che il sistema di forze agenti deve rispettare in condizioni di incipiente ribaltamento. Si procede quindi alla valutazione del momento delle forze che determinano il ribaltamento del corpo attorno alla cerniera cilindrica considerata (momento ribaltante) e quello delle forze che si oppongono a tale rotazione (momento stabilizzante).
Il momento stabilizzante è dato da:

$$M_{S(A)} = W*s/2 + F*d + P*d + T*h$$

Il momento ribaltante è pari a:

$$M_{R(A)} = \lambda *[W*y_G + FV*hV + PS*h] + FH*hV + PH*h$$

Formalmente, il valore di λ si ottiene dalla seguente equazione di equilibrio virtuale:

$$\lambda = \frac{w * \frac{s}{2} + Fv * dv + Ps * d + T * h - Ph * h}{W * yg + Fv * hv + Ps * h}$$

2.3.2 Ribaltamento composto

I meccanismi di ribaltamento composto si manifestano attraverso la rotazione rigida delle pareti investite dall'azione sismica attorno a cerniere cilindriche orizzontali ed il trascinamento di porzioni di muratura appartenenti alle pareti di

controvento. L'attivazione di cinematismo di questo tipo richiede la presenza di un buon ammorsamento delle pareti ortogonali coinvolte, garantito da cantonali correttamente eseguiti, con assenza di connessioni efficaci in testa al macroelemento ribaltante, come per il caso del ribaltamento semplice. Il meccanismo è favorito poi, oltre che dalla presenza di coperture spingenti, anche dalla fattura delle pareti di controvento. La qualità della muratura costituente le pareti ortogonali alla facciata condiziona la definizione delle dimensioni del cuneo di distacco e quindi anche l'entità del coefficiente sismico associato al cinematismo.
Il moltiplicatore di collasso è pari a:

$$\lambda = \frac{W * \frac{s}{2} + Fv * dv + Wo * xgo + Ps * d + Pso * d0 + T * h - FH * hv - Ph * h}{W * yg + Wo * ygo + Fv * hv + Ps * h + Pso * h}$$

2.3.3 Flessione verticale

Il meccanismo di flessione verticale si manifesta, per effetto delle azioni ortogonali, con formazione di una cerniera cilindrica orizzontale che divide la struttura muraria in due blocchi rigidi ed attorno alla quale essi ruotano reciprocamente fino al collasso. La combinazione delle azioni verticali ed orizzontali sulla parete determina l'instaurarsi di una sorte di effetto arco verticale nella stessa per cui le forze orizzontali si scaricano sui vincoli agli estremi della tesa muraria. Se però queste ultime superano un certo valore le azioni verticali non sono più sufficienti a contrastare l'effetto instabilizzante del momento flettente e ciò determina l'instaurarsi del cinematismo. All'interno della tesa muraria si manifesta quindi la formazione di una cerniera cilindrica che la percorre orizzontalmente e la cui posizione verticale è a priori indeterminata. L'analisi consiste nell'individuare la posizione della cerniera che corrisponde al minimo valore del moltiplicatore di collasso λ:

$$\lambda = \frac{\left(N * d * \left(\frac{hv}{h} - hv\right)\right) + Ps * a * \left(\frac{hv}{h} - hv\right) + Fv * dv - Fh * hv + s * (W + N + Ps)}{hv * (W + 2Fv)}$$

2.3.4 Flessione orizzontale

Il meccanismo di flessione orizzontale di una facciata efficacemente vincolata alle pareti ortogonali e libera in sommità si manifesta, per effetto delle azioni ortogonali al piano della stessa, con formazione di cunei di distacco formati da macroelementi che ruotano rigidamente attorno a cerniere cilindriche poste alla loro base, fino al collasso della parete. Se le azioni fuori dal piano della parete non possono attivare il ribaltamento della stessa a causa delle condizioni di vincolo, per esempio per tiranti agli estremi della tesa muraria che risulta libera nella parte centrale, si instaura un effetto arco orizzontale nella parete. In tal modo le azioni sismiche, dovute all'inerzia dei corpi, e statiche, provocate da eventuali elementi spingenti alla sommità della struttura muraria, vengono riportate agli estremi della stessa attraverso un percorso di sollecitazione che descrive un arco di scarico nello spessore della parete.

La valutazione del moltiplicatore di collasso dei carichi orizzontali che attiva il cinematismo descritto può essere descritta con l'equazione dei lavori virtuali.

$$\lambda = \frac{\mathrm{H} * \mathrm{S} * \left(1 + \frac{\mathrm{L1}}{\mathrm{L2}}\right) - \mathrm{PH1} * \mathrm{d1} - \mathrm{PH2} * \frac{\mathrm{L1}}{\mathrm{L2}} * \mathrm{d2}}{\mathrm{W1} * \mathrm{xG1}}$$

2.4 RELAZIONE TRA MECCANISMI DI COLLASSO, TIPOLOGIA DI PUNTELLO E TIPOLOGIE EDILIZIE.

La comprensione dei meccanismi di collasso che si attivano negli edifici in muratura a seguito di un evento sismico costituisce, come discusso anche in precedenza alla luce degli studi di riferimento sul danno sismico (Lagomarsino & Cattari (2014); D'Ayala et al. (2011); Brando et al. 2017)), il presupposto fondamentale per la corretta progettazione delle opere provvisionali. La letteratura tecnica ha infatti mostrato come a ciascuna modalità di danneggiamento corrisponda una tipologia di puntellamento più efficace nel contenerne l'evoluzione e nel ridurre il rischio di ulteriori instabilità. Tale relazione deve tuttavia essere interpretata nel quadro della specifica tipologia edilizia, poiché le vulnerabilità dipendono dall'epoca costruttiva, dalla distribuzione planimetrica, dalla qualità dei materiali e dalla presenza o meno di adeguati vincoli trasversali, come richiamato anche dalle Linee Guida del Ministero della Cultura (2015; 2020) nella valutazione del comportamento strutturale post-sisma.

2.4.1 Ribaltamento semplice e puntellatura di ritegno

Il ribaltamento semplice è uno dei meccanismi di collasso più diffusi negli edifici storici, in particolare nelle facciate principali o nei timpani con lati liberi in sommità e privi di efficaci sistemi di connessione. Il collasso si innesca per effetto delle accelerazioni sismiche trasversali e della mancanza di ammorsamento tra la parete ribaltante e le ortogonali. A ciò si aggiunge, molto spesso, la spinta non contrastata dei solai in legno o delle coperture a falda. Per contrastare tale meccanismo, la puntellatura di ritegno è la soluzione più diretta: consiste nell'installazione di puntoni inclinati che assorbono la componente orizzontale del sisma opponendosi al moto rotazionale della parete. Si tratta di sistemi facilmente realizzabili anche in emergenza e particolarmente adatti a edifici a pianta semplice, con pareti di spessore contenuto (30–60 cm) e altezza tra i 3 e i 12 m. Le strutture ecclesiastiche, i palazzi nobiliari a corte, le case a schiera dei centri storici si prestano bene a questa modalità di contenimento.

2.4.2 Flessione verticale e puntellature di sostegno

Il meccanismo di flessione verticale si attiva in presenza di porzioni murarie lunghe, prive di ancoraggi intermedi, e vincolate solo agli estremi. È tipico di ambienti voltati, navate centrali, pareti d'ambito in cui i solai o le volte non esercitano un'azione di cucitura efficace. In queste configurazioni, le spinte

orizzontali possono generare instabilità verticale della muratura, che si manifesta come una flessione a grande raggio. In tali casi è opportuno intervenire con puntellature di sostegno, installate all'interno dell'edificio e orientate verticalmente o leggermente inclinate, in grado di assorbire la spinta e contrastare la perdita di equilibrio. Questi sistemi sono particolarmente utili in edifici a navata unica o in costruzioni con pareti molto alte (oltre 6 m), ad esempio magazzini agricoli, chiese a navata o cappelle votive prive di volte. La distribuzione regolare dei puntelli, associata a travi ripartitrici, consente di stabilizzare anche lesioni verticali evolute.

2.4.3 Flessione orizzontale e cerchiature o tirantature

Il meccanismo di flessione orizzontale si verifica prevalentemente nei timpani o nelle pareti alte in cui la sommità non è adeguatamente contenuta. È frequente nei fronti murari di edifici a capanna, come le chiese, dove la copertura esercita una spinta orizzontale e la parete risponde flettendosi nel proprio piano. Le opere provvisionali più adatte a contenere questa deformazione sono:

- le cerchiature in sommità, realizzate con fasce metalliche, funi in acciaio o tubi e giunti, che circondano la parte superiore della parete e ne impediscono la deformazione;
- le tirantature trasversali che collegano due pareti contrapposte o ancorano la parete a elementi rigidi interni.

Queste soluzioni sono efficaci in presenza di strutture a pianta longitudinale, come edifici a navata singola, stalle e fienili storici, scuole di epoca razionalista prive di cordoli. Le cerchiature sono particolarmente efficaci per contenere lo spanciamento nel tempo, e possono essere progettate anche con materiali compositi nei casi in cui sia richiesto un basso impatto visivo.

2.4.4 Ribaltamento composto e interventi integrativi

Il ribaltamento composto si manifesta con maggiore complessità nei contesti in cui esiste un parziale ammorsamento tra le pareti ortogonali. Si attiva per effetto di una rotazione della parete principale che trascina con sé porzioni della muratura di spina o degli angoli, generando un cuneo di distacco inclinato. A questo meccanismo si oppongono più strategie simultanee:

- puntellature di ritegno per impedire il moto rotazionale iniziale;
- cerchiature orizzontali per contenere lo spanciamento trasversale;
- tirantature diagonali o passanti per opporsi alla trazione generata lungo il piano inclinato di frattura.

Edifici con cantonali regolari, palazzi d'angolo, case su lotti trapezoidali o con geometrie complesse sono particolarmente esposti a questo meccanismo. In questi casi, il progetto delle opere provvisionali deve tener conto della coesistenza di più cinematismi: il dimensionamento dei puntelli va combinato con l'analisi del cuneo coinvolto.

2.4.5 Matrice di correlazione

L'analisi dei danni strutturali causati da eventi sismici consente, attraverso gli strumenti della meccanica strutturale, di mettere in evidenza come differenti

caratteristiche tipologiche e costruttive determinino risposte strutturali differenti sotto l'azione sismica. Analizzando elementi ricorrenti nei principali tipi edilizi — come la sequenza facciata-navata-volta nelle chiese, oppure le facciate d'angolo e gli archi negli edifici di carattere palaziale — è stato possibile individuare correlazioni significative tra configurazioni costruttive, meccanismi di collasso prevalenti e soluzioni provvisionali adottate. A partire dalle principali tipologie costruttive (*Figura 2.20.a*), dai meccanismi di collasso più ricorrenti (*Figura 2.20.b*) e dalle tipologie più comuni di puntellamenti post-sismici (*Figura 2.20.c*), tali correlazioni sono state sistematizzate attraverso lo sviluppo di una matrice. Questa matrice mette in relazione le tipologie edilizie con i corrispondenti meccanismi di collasso sismico caratteristici e con le soluzioni provvisionali post-sisma più frequentemente adottate. Tale fase preliminare dell'indagine si è conclusa con l'elaborazione della matrice di correlazione originale riportata nella *Tabella 2.1*.

Tabella 2.1: Matrice di correlazione

Tipologie costruttive	**Meccanismi di collasso**	**Tipologie di puntellamento**
A1, A2, A3, A4, A5, A6	B1, B2	Puntellatura di ritegno
A2, A3, A4, A7	B1, B2	Puntellatura di contrasto
A1, A2, A3, A4, A5, A6, A9	B3	Puntellatura di sostegno e sbadacchiature
A1, A2, A3, A4, A5, A6, A8, A9	B6	Puntellatura di sostegno solai e balconi
A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7	B4	Centinatura
A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7	B1, B2	Tirantatura
A1, A2, A3, A4, A5, A6, A8, A9	B1, B2, B5	Cerchiatura
A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7	B5	Incamiciatura

La matrice proposta ha lo scopo di restituire il processo logico attraverso cui si giunge all'individuazione della tipologia di puntellamento più adatta in un dato contesto edilizio. Si tratta di uno strumento che mette in relazione, con immediatezza e rigore, tre elementi fondamentali: le tipologie edilizie (*Figura 2.20.a*), i meccanismi di ribaltamento (*Figura 2.20.b*) e le soluzioni provvisionali più adeguate (*Figura 2.20.c*). Nella pratica operativa, il primo passo dell'analisi consiste nel riconoscere a quale categoria appartenga l'edificio oggetto di intervento. Non si tratta di una semplice descrizione architettonica, ma di una classificazione strutturale basata su caratteristiche geometriche, costruttive e tipologiche ricorrenti: edifici in muratura disposti in aggregato, case isolate con tetto a doppia falda, strutture con aperture ravvicinate o con aggetti significativi come balconi o pensiline. A ciascuna di queste tipologie, indicate nella prima colonna della matrice, è associata una serie di comportamenti strutturali potenzialmente critici, che rappresentano i modi più probabili in cui l'edificio può cedere sotto l'azione di un sisma o per effetto di condizioni di degrado. A questi

scenari potenziali di danno vengono quindi associate, nella terza colonna, le soluzioni di puntellamento più appropriate per contrastarli efficacemente.
Il valore della matrice sta proprio nella sua capacità di mettere in relazione, in modo immediato, la natura costruttiva dell'edificio con la risposta strutturale più probabile e con il tipo di intervento tecnico più coerente.

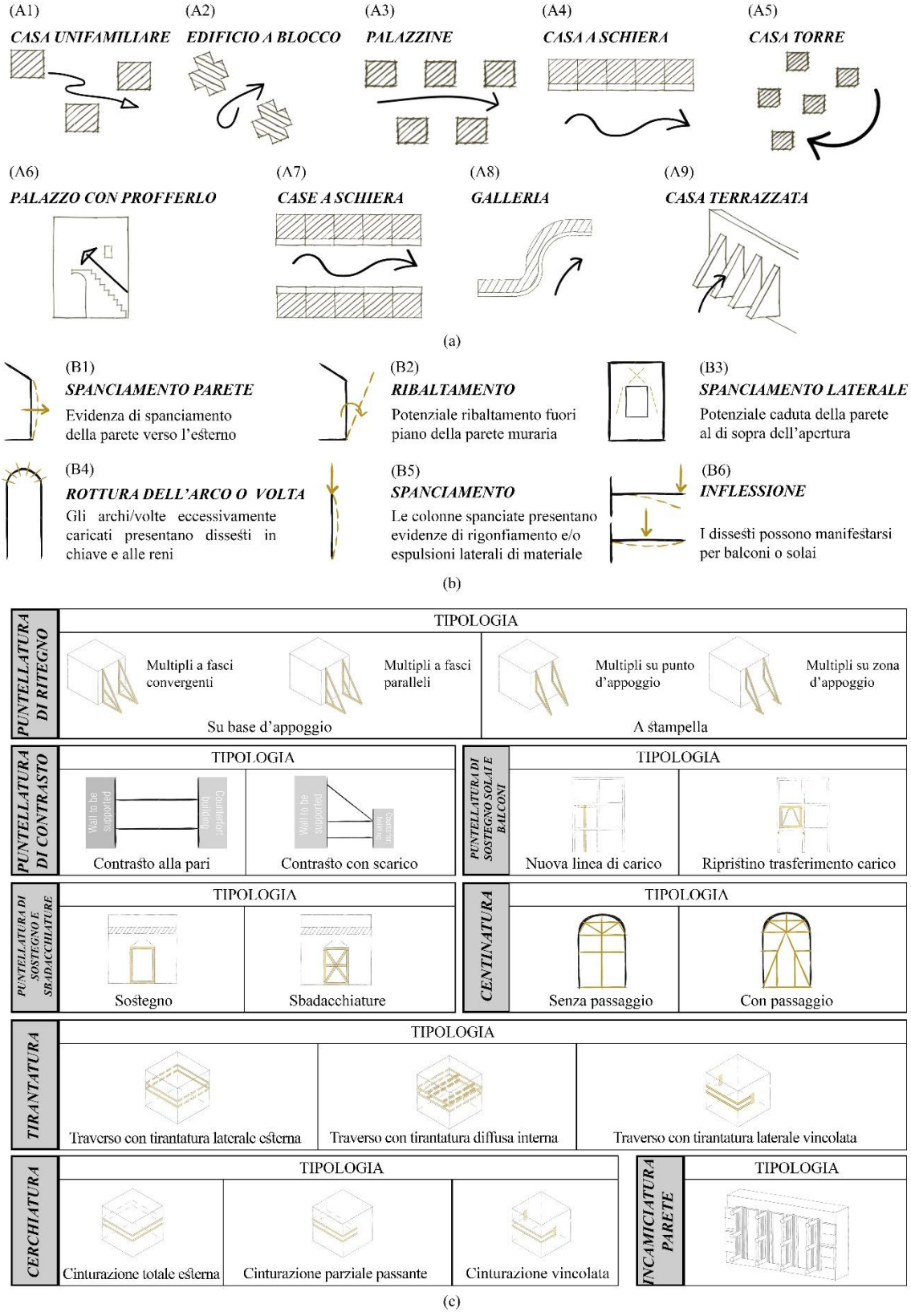


Figura 2.20: (a) Tipologie architettoniche. (b) Meccanismi di collasso. (c) Tipologie di puntellamento

2.5 ANALISI ED INTERVENTI SULLE MURATURE

L'applicabilità del Protocollo di cantiere sviluppato nell'ambito di questa ricerca presuppone che la porzione di edificio interessata dal meccanismo di collasso mantenga, allo stato attuale, un comportamento assimilabile a quello di un corpo rigido. Questo requisito è fondamentale per garantire l'attendibilità delle verifiche di sicurezza e la corretta pianificazione delle operazioni di rimozione delle opere provvisionali. Per questo motivo, nel presente capitolo si affronta il tema del ripristino preliminare delle condizioni strutturali della muratura e delle verifiche da effettuare prima del calcolo dell'indice di sicurezza λ. Le informazioni tecniche riportate sono tratte e rielaborate a partire dai volumi Massimo Mariani (2014).

In generale, ai fini della sicurezza, prima della valutazione dell'indice di sicurezza devono essere attuati i seguenti interventi preliminari:

- analisi non distruttive visive e/o strumentali eseguite sulla muratura della porzione danneggiata, per stabilire se si sia verificato un processo di disgregazione parziale o totale;
- interventi di consolidamento murario in aree che presentano fenomeni di disaggregazione, per ripristinare il comportamento monolitico della porzione danneggiata della struttura;
- posizionamento di sensori e ulteriore strumentazione di monitoraggio, per verificare l'eventuale aumento dell'apertura delle fessure durante le operazioni di rimozione dei puntelli.

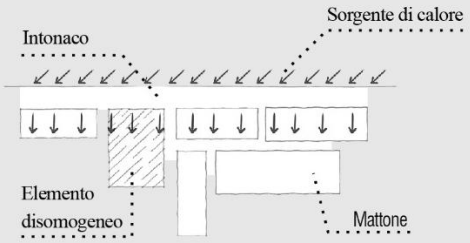
2.5.1 Indagini sulle murature

Prima di eseguire qualsiasi intervento di consolidamento o restauro, risulta essenziale una valutazione preliminare accurata dello stato della muratura. Le prove diagnostiche possono essere suddivise in due categorie principali, a seconda del livello di invasività:

- prove non distruttive, che non alterano né danneggiano l'integrità strutturale dell'edificio;
- prove invasive, che richiedono piccole alterazioni o fori nella muratura, necessari per valutazioni dirette più approfondite.

Per quanto concerne le prime, tra queste la termografia infrarossa (*Figura 2.21*) consente di individuare discontinuità, ponti termici, tamponamenti sotto intonaco e la presenza di elementi strutturali nascosti, offrendo dati qualitativi sulla composizione termica superficiale senza alcun contatto con la muratura. Le indagini soniche sfruttano onde elastiche a bassa frequenza (16–20 kHz), generate tramite un impulso meccanico, per rilevare disomogeneità interne, vuoti o crepe. Vengono rilevate attraverso sensori in grado di registrare il tempo di percorrenza tra punto di impatto e ricezione, evidenziando potenziali difetti.

Questa indagine utilizza la radiazione emessa dai materiali, successivamente alla sollecitazione termica alla quale sono sottoposti. Tale peculiarità estesa alle analisi delle strutture murarie consente, attraverso questa prova, l'individuazione della tessitura muraria, la presenza di aperture tamponate e la valutazione dell'omogeneità dei materiali .



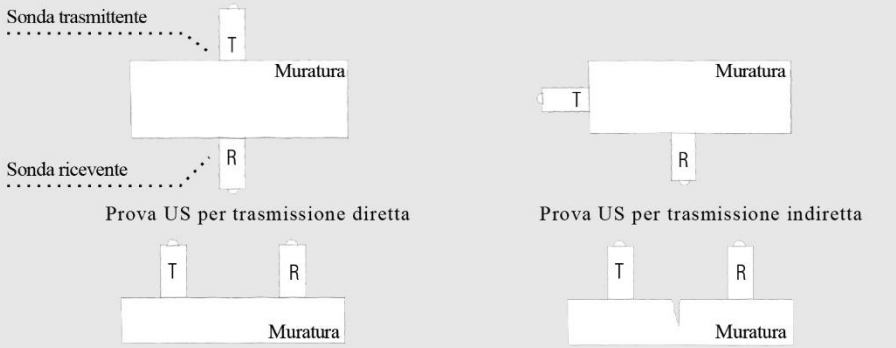
Eccitazione termica di una muratura

La termografia non può, però, essere utilizzata in presenza di umidità nella muratura, e risente dell'ora del giorno e di fattori ambientali. Inoltre la presenza di una cortina di qualsiasi materiale non consente di riconoscere la tessitura muraria delle strutture sottoposte ad indagini.

Figura 2.21: Prova termografica

Le prove ultrasoniche, illustrate nella *Figura 2.22,* operano su principi simili, ma utilizzano frequenze più elevate (fino a 10 MHz), idonee per materiali più omogenei come pietra, legno o calcestruzzo. Consentono di evidenziare microlesioni e difetti interni con maggior precisione.

L'individuazione delle parti di muratura degradate, la valutazione della loro omogeneità e del quadro fessurativo, nonché la misura dello spessore possono essere effettuate con prove che utilizzano l'effetto della propagazione di onde elastiche di frequenza superiore a quella percepita dall'orecchio umano.
Le tipologie di prova possibili sono:



Il pregio di questo metodo di indagine è nella pratica di tecniche totalmente non distruttive, purtroppo esso perde efficacia in presenza di murature o materiali ad elevato assorbimento acustico.



Figura 2.22: Prove ultrasoniche

Il georadar (GPR) sfrutta onde elettromagnetiche per rilevare variazioni di materiale e cavità interne fino a diversi metri di profondità, con elevata risoluzione spaziale. L'endoscopia prevede un foro di circa Ø20 mm e l'inserimento di una sonda ottica per l'ispezione visiva interna della muratura, consentendo osservazioni dirette del materiale e del suo stato. Ha il limite di essere ristretta alla zona circoscritta dalla superficie del foro d'indagine, per cui, ad esempio, in una muratura consente l'osservazione di una superficie minima, seppure per l'intero spessore. L'endoscopio è composto da un sistema di lenti, da un'asta di fibra ottica e da una luce per l'illuminazione della cavità. Il tutto è completato con l'applicazione di una macchina fotografica o una telecamera per le riprese necessarie alla documentazione. Infine, si utilizzano strumenti come il vibrometro per misurare le vibrazioni ambientali, la magnetometria per individuare elementi metallici nascosti (armature, catene), e sistemi di monitoraggio basati su sensori fessurametrici (marking tape) o microcamere per rilevare aperture fessurative nel tempo. Relativamente alle prove di tipo invasivo, la prova con martinetti piatti (singolo o doppio) richiede piccoli tagli orizzontali nella muratura per inserire sensori che misurano le tensioni verticali reali in situ (*Figura 2.23*). Essenziale allo svolgimento della prova, sono uno o due tagli

orizzontali sulla muratura in corrispondenza delle connessioni murarie; motivo per cui la prova è considerata invasiva. Oggetto d'indagine sono murature in mattoni o pietrame regolarmente squadrato. Il dilatometro prevede un foro di circa 250 mm, una sonda che esercita pressione radiale e una centralina per misurare deformazioni negli slot del foro, rilevando la risposta elastica del materiale. Le prove per lo stato deformativo superficiale, di solito qualitative, permettono di misurare le deformazioni globali superficiali dovute a carichi o assestamenti, spesso utili per validazioni numeriche.

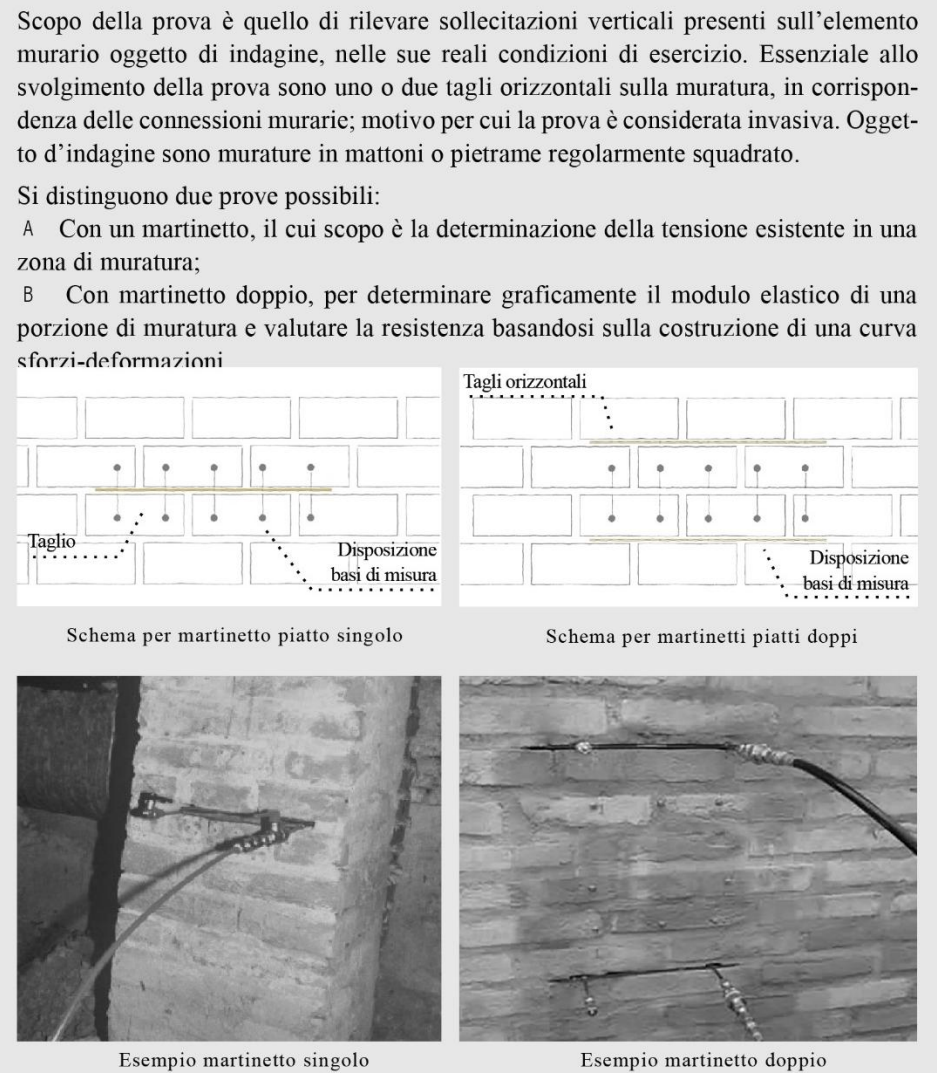


Figura 2.23: Prova invasiva con martinetti piatti

Come riportato nella *Tabella 2.2*, queste tecniche consentono una diagnosi accurata, essenziale per progettare e dimensionare correttamente gli interventi di consolidamento strutturale. Nei libri di Mariani si trovano dettagliate indicazioni operative per ciascuna prova, con schemi, strumentazioni consigliate e criteri di interpretazione dei dati.

Tabella 2.2: Sintesi prove sulle murature

Tipologia	Tecnica	Finalità
Non distruttiva	Termografia	Rilevamento discontinuità superficiali, tamponamenti, umidità
	Prove soniche/ultrasoniche	Identificazione di crepe interne, cavità, omogeneità materica
	Georadar	Localizzazione strutture interne, cavità, canne fumarie
	Endoscopia	Ispezione visiva interna tramite foro Ø20 mm
	Vibrometro	Valutazione di vibrazioni strutturali e ambientali
	Magnetometria	Individuazione di armature e catene metalliche
Invasive	Martinetti piatti	Misura delle tensioni verticali reali sul paramento murario
	Dilatometro	Misurazione della risposta radiale intorno a un foro
	Prove deformativo-superficiali	Valutazione delle deformazioni visibili per raffronti e modelli numerici

2.5.2 Interventi atti ad incrementare la resistenza delle murature

Il consolidamento delle murature lesionate è un passaggio fondamentale per ripristinare la continuità strutturale e garantire la sicurezza delle operazioni di rimozione delle opere provvisionali. Gli interventi possono essere classificati in diverse tipologie, a seconda del tipo di dissesto e dell'obiettivo da perseguire. Le iniezioni di miscele e leganti (di cui si riporta una scheda riassuntiva nella *Figura 2.24*) rappresentano una delle tecniche più diffuse e consistono nell'introdurre malte fluide o leganti all'interno di microfessure e cavità, in modo da ristabilire la coesione del materiale e migliorare la risposta monolitica della parete. È fondamentale una preliminare indagine diagnostica per calibrare la composizione e la pressione delle iniezioni, evitando di generare sollecitazioni indesiderate.

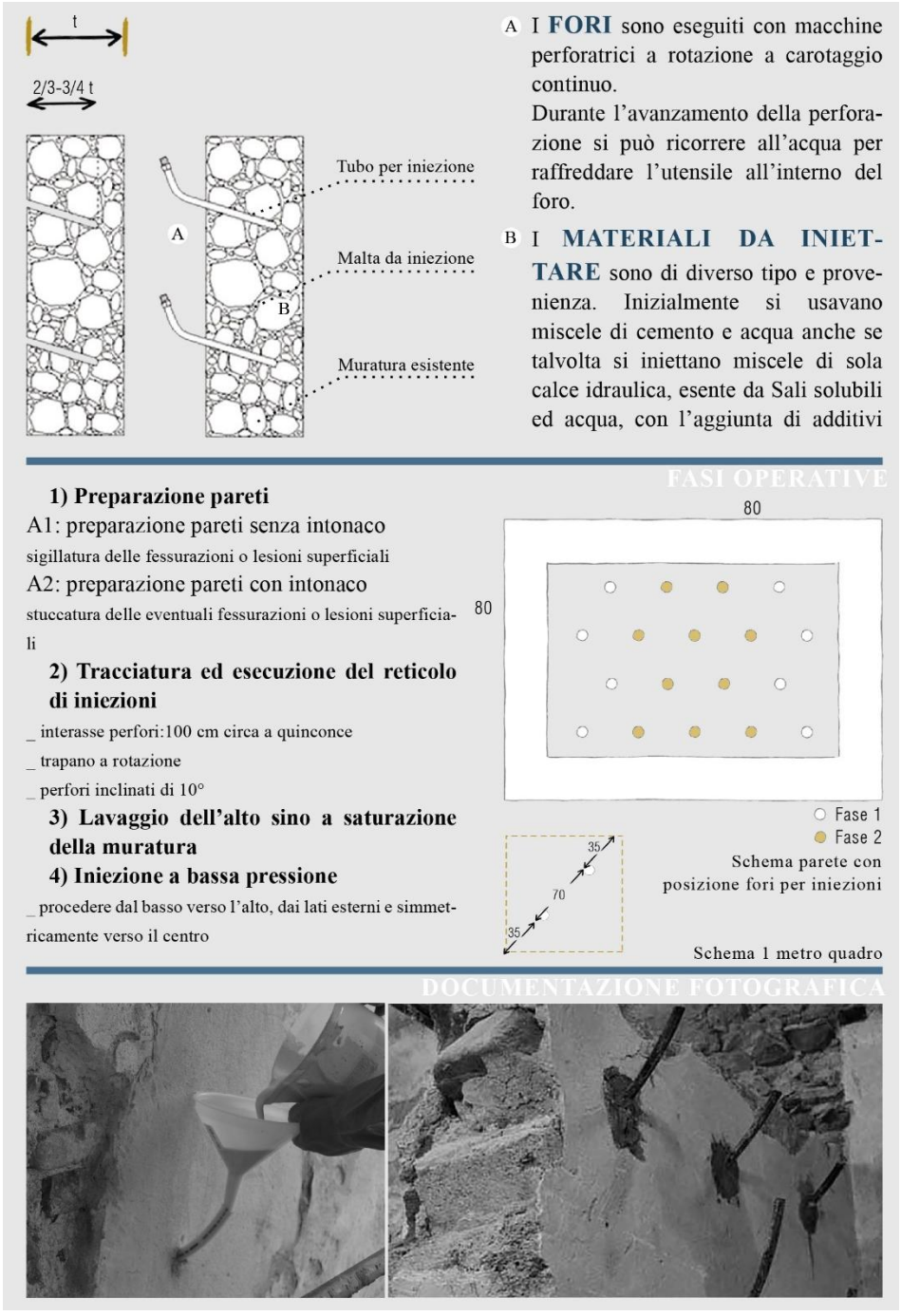


Figura 2.24: Iniezioni di miscele e leganti

Quando la muratura presenta una separazione tra paramenti, è necessario ristabilire l'ammorsamento orizzontale tramite l'inserimento di diatoni artificiali, realizzati in conglomerato cementizio armato o in acciaio cementato. Questo intervento è particolarmente efficace se eseguito dopo un preconsolidamento mediante iniezioni (*Figura 2.25*).

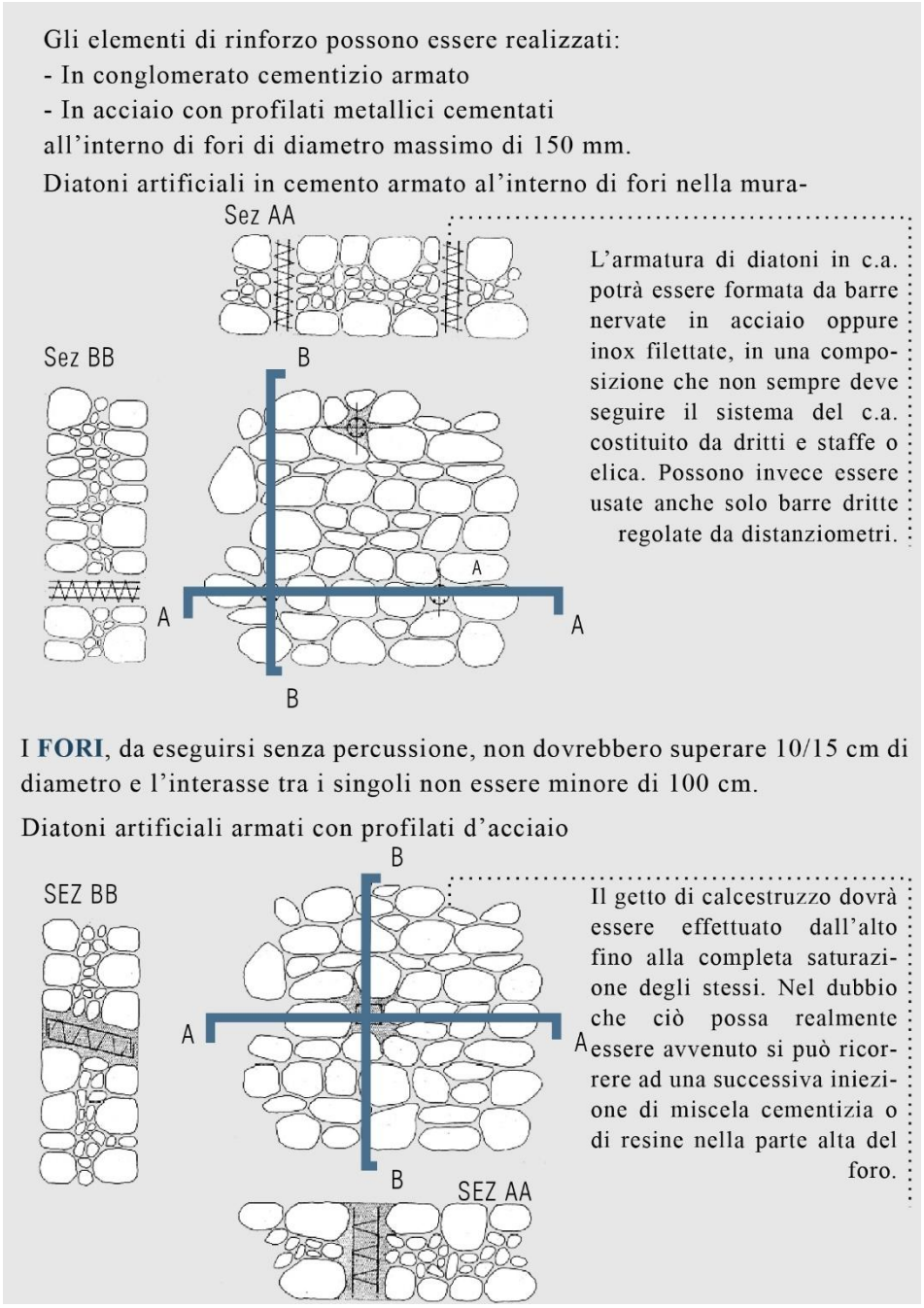


Figura 2.25: Diatoni artificiali

Per le pareti che mostrano espulsione del paramento esterno, si possono utilizzare tiranti antiespulsivi, (*Figura 2.26*) costituiti da barre in acciaio passanti e ancorate con piastre esterne. Una variante più sofisticata è rappresentata dalle cuciture attive (C.A.M.), che permettono di applicare un confinamento attivo e controllato sulla muratura, ma richiedono una maggiore densità di fori e un puntellamento adeguato.

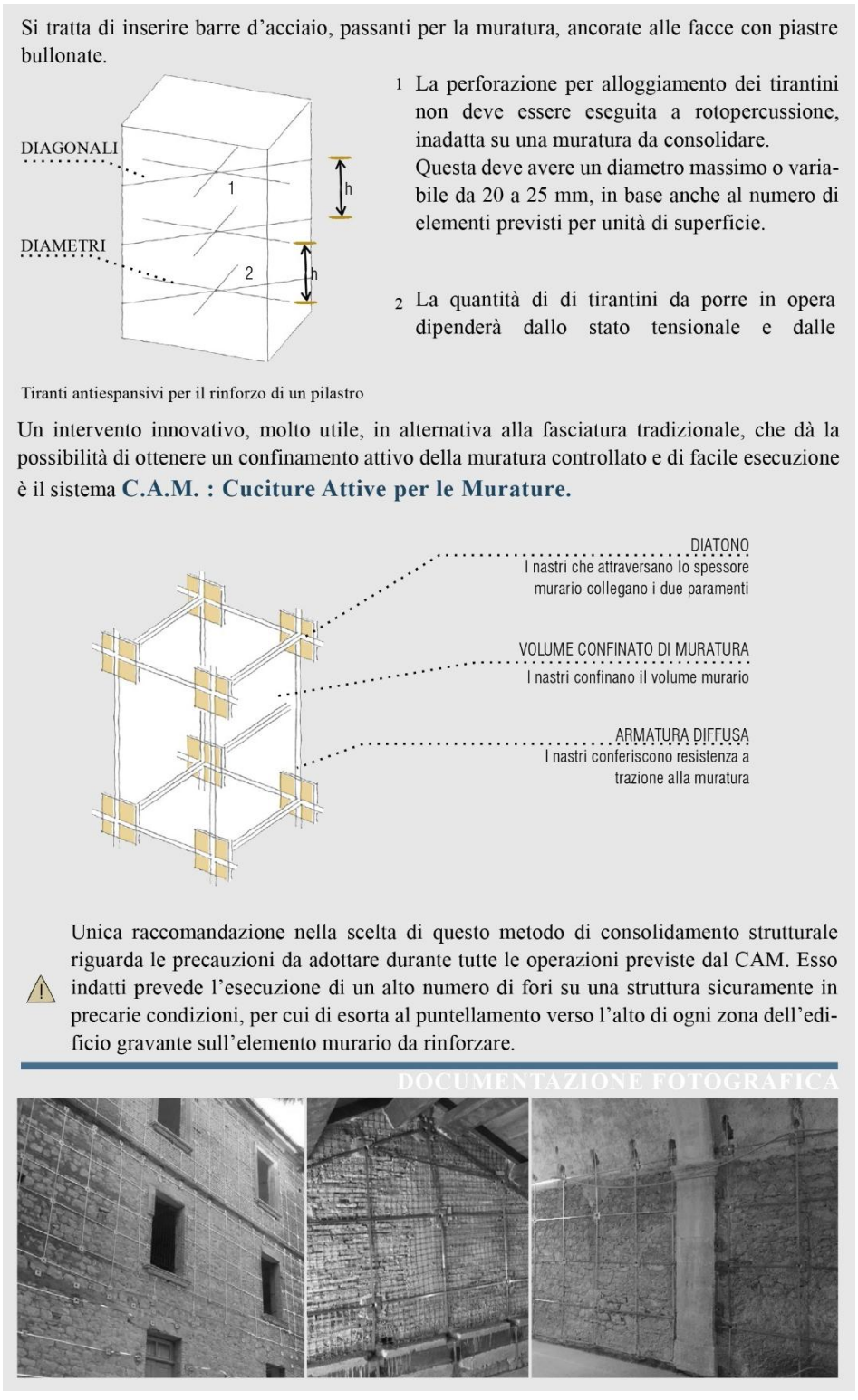


Figura 2.26: Tiranti antiespulsivi

In presenza di murature fortemente frammentate, è possibile adottare l'intonaco armato o "betoncino armato" (*Figura 2.27*), che consiste nell'applicazione di due sottili strati di calcestruzzo armato sulle due facce della muratura, collegati mediante perni passanti e armatura elettrosaldata. Questo intervento, pur

incrementando la sezione resistente, è piuttosto invasivo e va ponderato in funzione del valore storico e architettonico dell'edificio.

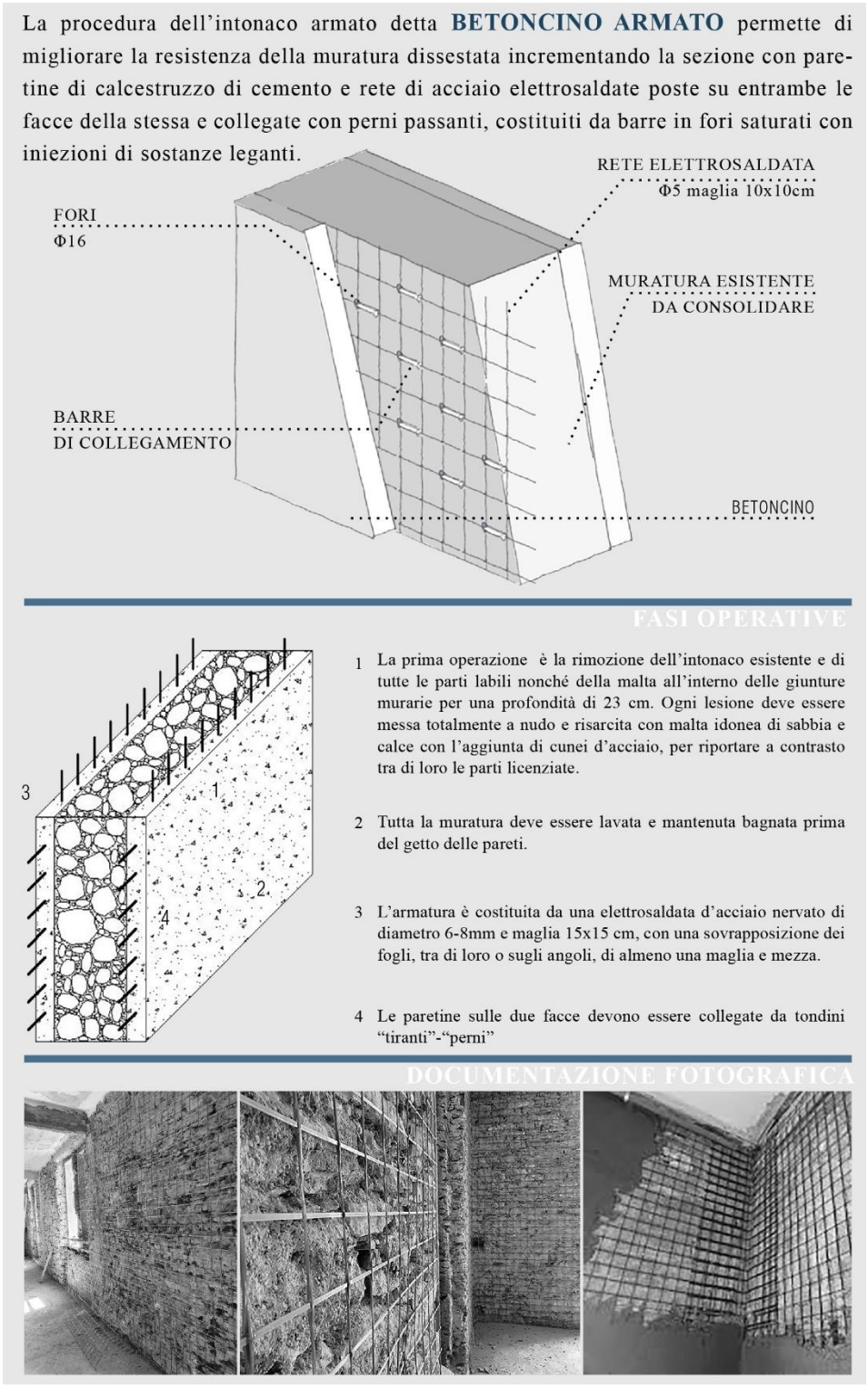


Figura 2.27: Betoncino armato

Nei casi in cui si manifestino fenomeni di pressoflessione, il placcaggio laterale con piastre d'acciaio (*Figura 2.28*) consente di confinare la muratura,

migliorandone la resistenza, grazie all'uso di piastre accoppiate con barre filettate e resine di ancoraggio.

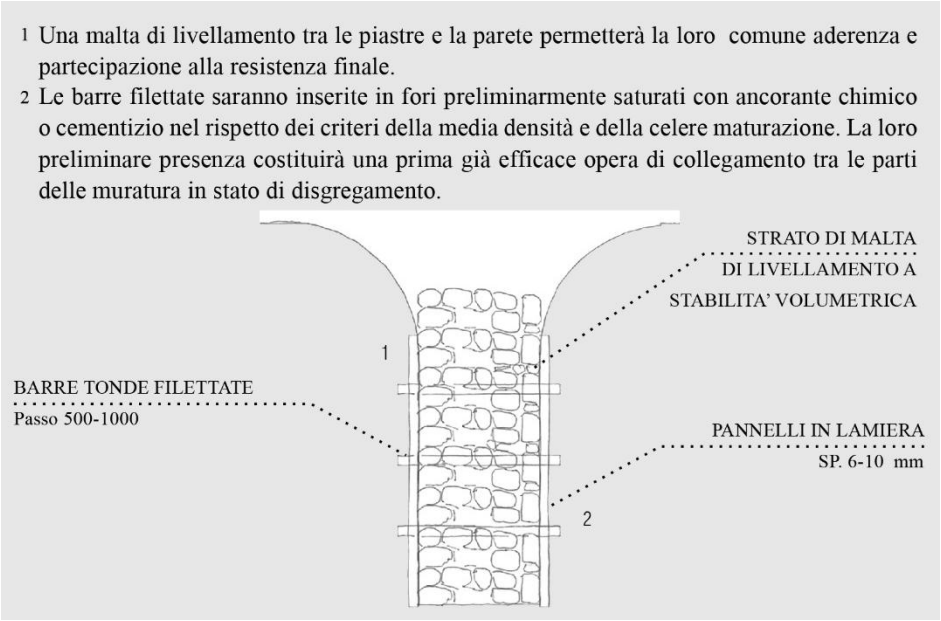
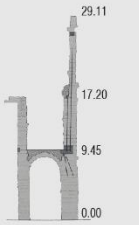


Figura 2.28: Placcaggio laterale con piastre d'acciaio

Per sostenere murature soggette a carichi verticali e prevenire cedimenti, si possono impiegare tiranti d'acciaio post-tesi, che vengono inseriti in fori e tesati fino a garantire un adeguato contrasto alle spinte. Si tratta di un sistema che permette di scaricare parzialmente la muratura e di ridistribuire i carichi. Infine, i controventamenti esterni in acciaio costituiscono un sistema leggero e reversibile per incrementare la resistenza alle azioni sismiche fuori piano. I telai perimetrali, opportunamente progettati, contribuiscono a trasformare l'edificio in un sistema scatolare, riducendo il rischio di ribaltamento delle pareti. Importante esempio di applicazione è lo storico intervento di Riccardo Morandi sulla vela rimasta dell'originario impianto murario dell'Arena di Verona (*Figura 2.29*).

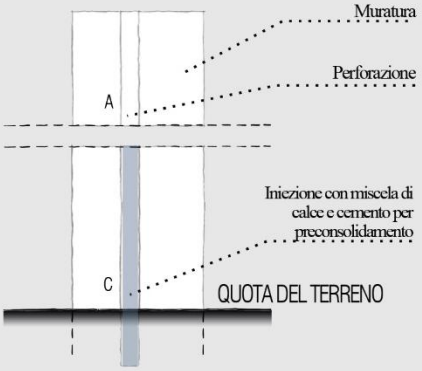


Un importante intervento storico è quello diRiccardo Morandi sulla vela rimasta dell'originario impianto murario dell'Arena di Verona.

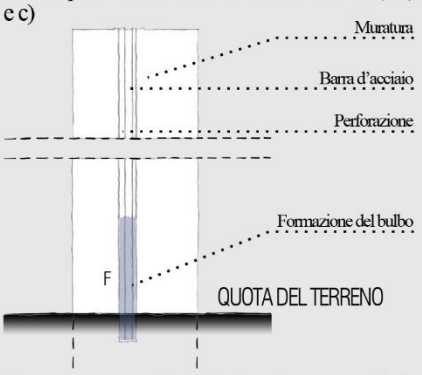
Il sistema è costituito da un cordolo posto ai piedi del muro, fissato a quello sottostante per mezo di perforazioni armate e dai tiranti verticali composti da trefoli d'acciaio entro fori messi in tendione e bloccati in sommità.



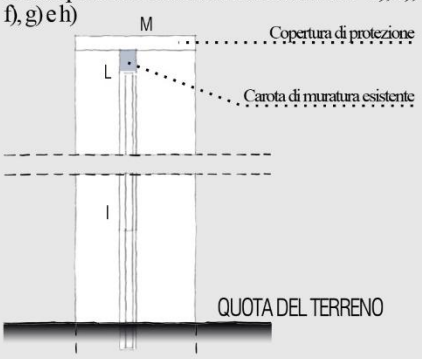
Le fasi della lavorazione sono state le seguenti:



Tirante post- teso d'acciaio. Fase intervento a), b) e c)



Tirante post- teso d'acciaio. Fase intervento d), e), f), g) e h)



Tirante post- teso d'acciaio. Fase intervento i), j) e k)

A Perforazione a carotaggio continuo nella muratura, previa sigillatura delle lesioni dui paramenti esterni.

B Pulitura del foro con aria dal fondo.

C Iniezioni nei fori con miscela di calce, cemento bianco, acqua e fluidificazione per il preconsolidamento e la saturazione delle

D Riperforazione, ad avvenuta maturazione della miscela, dello stesso foro sempre a carotaggio continuo.

E Inserimento della barra d'aciaio.

F Formazione del bulbo (parte ancorante vera e propria) di lunghezza pari a quanto derivato dalla calcolazione strutturale, mediante iniezione di resine o malta idraulica.

G Posa in opera della piastra d'acciaio previo getto di livellamento della superficie con

H Tesatura delle bare d'acciaio fino al raggingimento di una solecitazione di trazione utile per prevenire le cadute di tensione prodotte dalla muratura e dal'acciaio.

I Saturazione completa dei fori mediante iniezioni di resine epossidiche.

L Rimozione della piastra e dello spessore di livelamento di geso e taglio della barra fino a 5 cm al'interno del foro così da ricollocare sulla testa dello stesso un elemento di muratura cilindrico residuo della perforazione a

M Ripristino della muratura esistente.

Figura 2.29: Tiranti post-tesi_ esempio applicativo

Tabella 2.3: Sintesi principali tecniche di consolidamento

Tecnica	Obiettivo principale	Note
Iniezioni di miscele e leganti	Riempimento di vuoti e microlesioni, ripristino coesione muraria	Richiedono indagine preliminare, esecuzione a bassa pressione dal basso verso l'alto
Diatoni artificiali	Ristabilire l'ammorsamento tra paramenti di murature a sacco	Da eseguire preferibilmente dopo preconsolidamento
Tiranti antiespulsivi / cuciture attive (c.a.m.)	Confinare i paramenti ed evitare espulsioni	Cuciture attive consentono un confinamento controllato ma richiedono molti fori
Intonaco armato ("betoncino")	Ricostruire la continuità di murature frammentate, aumentandone la resistenza	Invasivo, aumenta la sezione con lastre di c.a. e rete elettrosaldata
Placcaggio con piastre d'acciaio	Confinare pareti soggette a pressoflessione	Piastre accoppiate, barre filettate e malte di livellamento
Tiranti post-tesi	Contrastare spinte verticali e distribuire i carichi	Utili in casi di cedimenti verticali, soluzione adottata in edifici storici
Controventamenti esterni in acciaio	Aumentare la stabilità fuori piano e la risposta sismica	Soluzione reversibile, leggera, adatta a contesti storici

2.6 VALUTAZIONE DELLA SOSTENIBILITA' AMBIENTALE ORIENTATA AL CICLO DI VITA

Il settore delle costruzioni è riconosciuto come uno dei comparti maggiormente responsabili dei consumi di risorse e delle emissioni climalteranti a livello globale. Come evidenziato nel *Global Status Report for Buildings and Construction pubblicato da United Nations Environment Programme* (UNEP) & *Global Alliance for Buildings and Construction* (GlobalABC) (2023), il comparto edilizio contribuisce a circa il 36% delle emissioni globali di CO_2 e a oltre il 37% del consumo energetico mondiale. Negli ultimi anni, l'attenzione verso la sostenibilità ambientale nel settore delle costruzioni è aumentata in modo significativo. Tale evoluzione è stata fortemente stimolata dalle politiche europee, come illustrato nel *Circular Economy Action Plan* presentato dalla *Circular Economy Action Plan – "A new Circular Economy Action Plan"* (2020), che promuove la transizione verso modelli produttivi a ridotto impatto ambientale e orientati al riuso, al riciclo e all'estensione del ciclo di vita dei materiali. Ulteriori indirizzi operativi sono stati forniti dal *framework Level(s)*, introdotto dalla *European Commission* (2021) che propone un sistema armonizzato per la valutazione della sostenibilità degli edifici lungo l'intero ciclo di vita. In questo

contesto, l'impiego della metodologia *Life Cycle Assessment* (LCA) ha assunto un ruolo centrale. Le basi concettuali dell'analisi del ciclo di vita, così come il termine oggi comunemente utilizzato, furono consolidate nei primi anni '90. Come ricordato da Frank Consoli et al. (1993), il concetto di *Life Cycle Assessment* venne formalmente definito nel 1993 durante una conferenza internazionale dell'associazione, contribuendo alla standardizzazione delle prime procedure metodologiche per l'analisi degli impatti ambientali lungo il ciclo di vita dei prodotti. Il successivo consolidamento scientifico e operativo della metodologia è stato accompagnato dall'elaborazione degli standard internazionali. Come definito dall'*International Organization for Standardization,* il riferimento normativo principale per l'esecuzione degli studi LCA è rappresentato dalle norme UNI EN ISO 14040:2006 – *Life Cycle Assessment — Principles and Framework* (2006) e UNI EN ISO 14044:2021 – *Life Cycle Assessment — Requirements and Guidelines* (2021), che rappresentano gli standard internazionali di riferimento per l'analisi del ciclo di vita. Il *Life Cycle Assessment* consente di valutare in modo sistematico gli impatti ambientali associati a un prodotto, a un servizio o a un processo considerando tutte le fasi del suo ciclo di vita: dall'estrazione delle materie prime, alla produzione, al trasporto, all'uso e fino al fine vita. L'importanza di un approccio olistico al ciclo di vita è sottolineata anche dal lavoro di Guinée et al. (2011), che descrivono la LCA come uno strumento in grado di identificare le principali categorie di impatto, individuare le fasi più critiche del ciclo di vita e supportare scelte progettuali e gestionali più sostenibili.

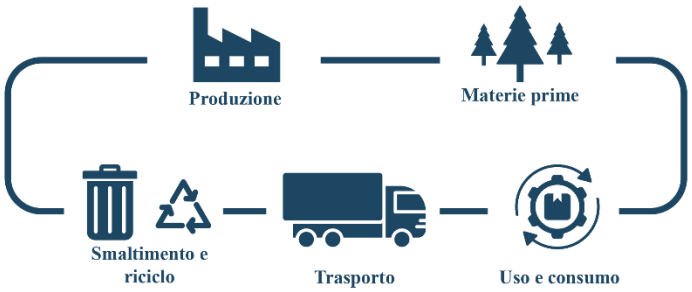


Figura 2.30: Schema ISO 14040

La ISO 14040 indica che ogni studio di LCA deve seguire un percorso strutturato, articolato in quattro fasi tra loro collegate, come illustrato nella *Figura 2.31.*

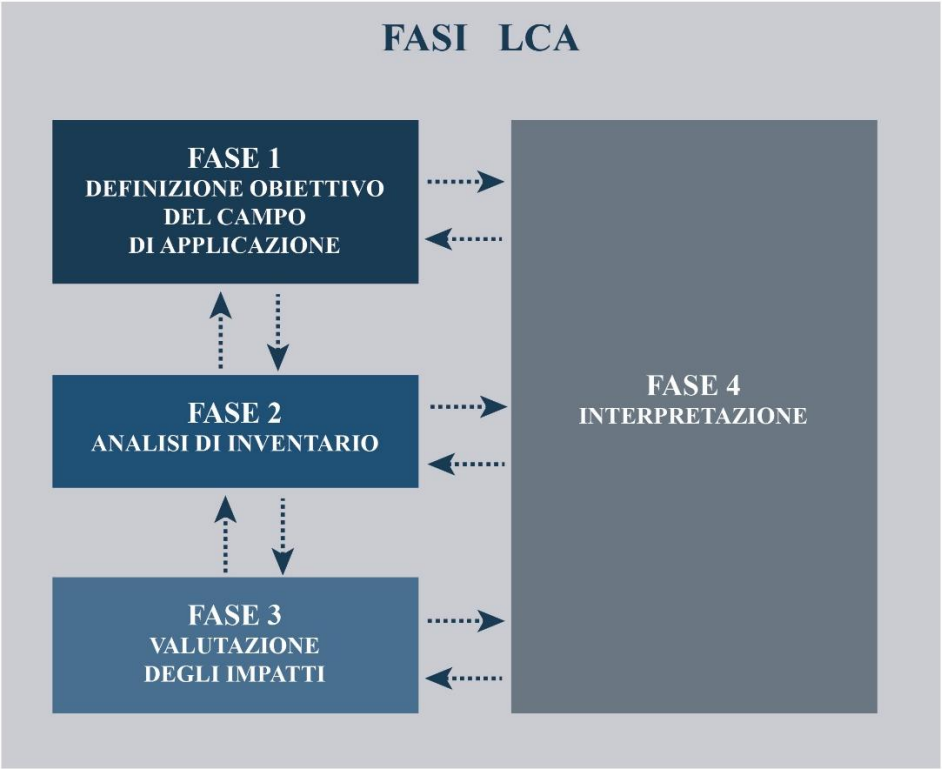


Figura 2.31: Fasi LCA

La prima fase è la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione (*goal & scope*). In questo passaggio si specificano le finalità dell'analisi, ossia le domande a cui si intende rispondere, e si definisce l'unità funzionale, ovvero l'elemento di riferimento a cui rapportare tutti i dati raccolti (ad esempio, un metro lineare di puntellamento installato e mantenuto per un determinato periodo di tempo). Vengono inoltre stabiliti i confini del sistema, decidendo fino a dove estendere l'analisi: si può considerare solo la produzione dei materiali (studio *cradle-to-gate*) oppure includere anche le fasi di trasporto, uso e smaltimento (studio *cradle-to-grave*). È fondamentale che tali scelte siano chiaramente documentate, così che i risultati possano essere trasparenti, replicabili e comparabili tra casi diversi. La seconda fase è l'analisi di inventario (LCI), durante la quale si procede alla raccolta e alla modellazione dei dati. In questa fase vengono quantificati tutti i flussi in ingresso e in uscita dal sistema: quantità di materiali, consumi energetici, trasporti (espressi in distanza e mezzi utilizzati), tempi di installazione e manutenzione, emissioni inquinanti e destinazioni di fine vita. Tutti i dati vengono armonizzati in unità coerenti e organizzati in un inventario strutturato che costituisce la base per la successiva fase di valutazione. Segue la valutazione degli impatti (LCIA), nella quale i flussi dell'inventario vengono trasformati in indicatori di impatto ambientale. Come illustrato *dalla Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC), la valutazione degli impatti ambientali si basa su un insieme di categorie che rappresentano le principali pressioni generate da un prodotto o da un processo lungo il suo ciclo di vita. La SETAC identifica sette categorie di impatto fondamentali: il cambiamento climatico, l'acidificazione, l'eutrofizzazione, la formazione di ossidanti fotochimici (smog

fotochimico), il consumo di risorse abiotiche, la tossicità umana e l'ecotossicità. Queste categorie costituiscono la base concettuale dei metodi di caratterizzazione comunemente utilizzati negli studi LCA. A seconda del metodo scelto – come ad esempio il metodo CML, che si concentra su categorie *midpoint*, oppure il metodo ReCiPe, che consente una valutazione sia *midpoint* sia *endpoint* – è possibile includere ulteriori categorie o aggregare gli impatti secondo differenti livelli di complessità. Accanto ai metodi di caratterizzazione tradizionalmente impiegati negli studi LCA, un ruolo sempre più rilevante è assunto dal metodo *Environmental Footprint* (EF), sviluppato dalla Commissione Europea e formalizzato dal *Joint Research Centre* (JRC) nell'ambito delle iniziative per l'armonizzazione della valutazione ambientale dei prodotti nei Paesi membri. L'attuale versione EF 3.0 costituisce un quadro metodologico organico che si sviluppa in coerenza con gli standard internazionali UNI EN ISO 14040 e UNI EN ISO 14044, fornendo un sistema integrato per la caratterizzazione degli impatti lungo il ciclo di vita. Il metodo include 16 categorie di impatto, selezionate per rappresentare in modo bilanciato le principali pressioni ambientali, e integra procedure di normalizzazione e pesatura che consentono di aggregare i risultati in forma comparabile tra settori e prodotti diversi. Questo rende EF 3.0 uno strumento particolarmente adatto per la confrontabilità degli studi a livello europeo. Inoltre, l'approccio permette di rappresentare in modo trasparente i benefici e gli oneri derivanti dai processi di economia circolare, come il riciclo dei materiali metallici o il recupero energetico dei materiali lignei, contabilizzando gli effetti oltre il confine di sistema (Modulo D). L'importanza del metodo EF è riconosciuta anche nel settore delle costruzioni: la norma UNI EN 15804:2019 - *Sustainability of Construction Works – Environmental Product Declarations – Core Rules for the Product Category of Construction Products* (2019), che disciplina le Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD) per i materiali da costruzione, richiede espressamente l'adozione degli indicatori EF, rafforzando così la coerenza tra studi LCA e documentazione ambientale di prodotto in ambito europeo. La fase di interpretazione serve, infine, a leggere criticamente i risultati, individuando le fasi più impattanti del ciclo di vita e suggerendo possibili strategie di miglioramento. Questa fase è importante perché permette di capire se i risultati sono coerenti con gli obiettivi dello studio e se i dati raccolti sono sufficientemente rappresentativi. La ISO 14044 entra più nel dettaglio e specifica i requisiti operativi che uno studio deve rispettare. Oltre a fornire regole per la raccolta e la gestione dei dati, la norma stabilisce che i risultati debbano essere trasparenti, completi e ripetibili. Per gli studi di tipo comparativo, che mettono a confronto due o più soluzioni, è richiesta anche una revisione critica da parte di un esperto esterno, per garantire che lo studio sia conforme agli standard e che le conclusioni siano fondate. Queste norme garantiscono che due studi LCA condotti da soggetti diversi siano coerenti e confrontabili, requisito fondamentale quando si devono prendere decisioni progettuali o di acquisto, ad esempio nella scelta di un sistema di puntellamento in legno o in acciaio in un cantiere post-sisma.

A livello europeo, il CEN/TC 350 ha elaborato norme specifiche per le costruzioni. La EN 15804:2012+A2:2019 stabilisce le *Product Category Rules*

(PCR) per i materiali da costruzione. Questo significa che le EPD (*Environmental Product Declarations*) emesse da produttori diversi sono redatte con lo stesso approccio e quindi comparabili tra loro. Per il mio tema di ricerca questo è essenziale: confrontare un sistema di puntellamento metallico con uno in legno ha senso solo se i dati alla base dell'analisi sono armonizzati. La EN 15978 – Sustainability of construction works (2011) si concentra invece sull'edificio nel suo complesso. Fornisce un metodo per calcolare le prestazioni ambientali suddividendo il ciclo di vita in moduli, come illustrato nella *Figura 2.32*:

- A1–A3 Produzione (estrazione e lavorazione delle materie prime)
- A4–A5 Costruzione (trasporto in cantiere e fase di posa)
- B1–B7 Uso (manutenzione, riparazioni, sostituzioni, consumi energetici)
- C1–C4 Fine vita (demolizione, trasporto, recupero o smaltimento)
- Modulo D benefici e carichi oltre il ciclo di vita (es. riciclo di materiali)

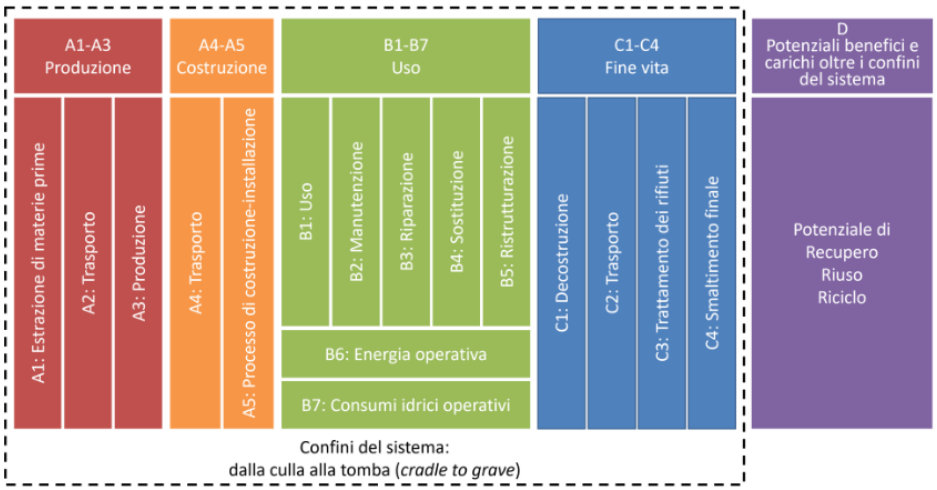


Figura 2.32: Metodo di calcolo EN 15978

Per le opere provvisionali il focus è soprattutto sui moduli A1–A5 (produzione e logistica) e C1–C4 (riuso, riciclo, smaltimento), poiché la fase d'uso è limitata nel tempo ma ad alta intensità di risorse. L'evoluzione normativa europea orientata alla circolarità ha trovato applicazione diretta nel contesto italiano attraverso l'introduzione dei Criteri Ambientali Minimi (CAM) per l'edilizia, stabiliti dal Decreto 11 Ottobre 2017 – Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento Di Servizi Di Progettazione e Lavori per La Nuova Costruzione, Ristrutturazione e Manutenzione Di Edifici Pubblici (2017). I CAM hanno reso obbligatoria, negli appalti pubblici, l'adozione di requisiti ambientali specifici, tra cui l'utilizzo di materiali dotati di EPD conformi alla EN 15804:2012+A2:2019 – *Sustainability of Construction Works – Environmental Product Declarations – Core Rules for the Product Category of Construction Products* (2019), la documentazione dei contenuti di riciclato e la dimostrazione della riduzione degli impatti ambientali dell'opera mediante analisi di ciclo di vita. Tali prescrizioni sono state successivamente recepite e rafforzate dal Decreto Legislativo 31 Marzo 2023, n. 36 – Codice Dei Contratti Pubblici in Attuazione Dell'articolo 1 Della Legge 21 Giugno 2022, n. 78, Recante Delega al Governo

in Materia Di Contratti Pubblici, (2023) che integra i CAM nella disciplina generale degli appalti e riconosce alla metodologia LCA un ruolo determinante anche in termini di criteri premiali nelle gare pubbliche, contribuendo a orientare la progettazione verso soluzioni più sostenibili e coerenti con gli obiettivi europei di decarbonizzazione e circolarità. Per chiarezza, una sintesi del quadro normativo è riportata nella tabella seguente:

Tabella 2.4:Sintesi quadro normativo

Livello	Norma/documento	Oggetto
Internazionale	ISO 14040:2006	Principi e quadro di riferimento per l'LCA
Internazionale	ISO 14044:2006	Requisiti e linee guida per l'LCA
Europeo	EN 15804:2012+A2:2019	Regole di categoria di prodotto (PCR) per i materiali da costruzione
Europeo	EN 15978:2011	Metodo per la valutazione della prestazione ambientale degli edifici
Italiano	D.M. 11/10/2017 e s.m.i. (CAM Edilizia)	Criteri Ambientali Minimi per le opere pubbliche
Italiano	D.Lgs. 36/2023 (Codice Appalti)	Integrazione dei CAM e promozione di LCA

2.7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Beolchini, G. C., Milano, L., & Antonacci, E. (2005). *Repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura – Definizione di modelli per l'analisi strutturale degli edifici in muratura, Volume II – Parte 1°*.

Brando, G., Rapone, D., & De Matteis, G. (2017). Damage patterns in masonry buildings after the 2016 Central Italy earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *15*(10), 4245–4270.

Cattari, S., & Lagomarsino, S. (2013). Collapse mechanisms of masonry walls under in-plane seismic actions. *Journal of Earthquake Engineering*, *17*(6), 799–825.

Celestini, G., & Mantini, G. (2012). *Misure di prevenzione e protezione per la manutenzione dei sistemi di sicurezza e delle opere provvisionali realizzate sui manufatti a seguito di eventi calamitosi* (G. Mantini & G. Celestini, Eds.). Fabiani Stampatori.

Cifani, G., Castellucci, A., Lemme, A., Liris, M., Martinelli, A., Mazzariello, A., Milano, L., Morisi, C., Petracca, A., Marchetti, L., Di Girolamo, G., Marchetti, M., & Marsili, C. (2011). *SISMA ABRUZZO 2009 – Messa in sicurezza degli edifici monumentali: percorso metodologico e tecniche di intervento*.

Circular Economy Action Plan (2020) – "A new Circular Economy Action Plan." (2020). *European Commission*.

D'Ayala, D., Dab, B., & Paganoni, S. (2011). Assessment and analysis of damage in L'Aquila historic centre after the 2009 earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *9*(1), 81–104.

Decreto 11 Ottobre 2017 – Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento Di Servizi Di Progettazione e Lavori per La Nuova Costruzione, Ristrutturazione e Manutenzione Di Edifici Pubblici, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana (2017).

Decreto Legislativo 31 Marzo 2023, n. 36 – Codice Dei Contratti Pubblici in Attuazione Dell'articolo 1 Della Legge 21 Giugno 2022, n. 78, Recante Delega al Governo in Materia Di Contratti Pubblici, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 77 del 31 marzo 2023, Suppl. Ordinario n. 12 (2023).

Dipartimento della Protezione Civile. (2014). *Manuale per la gestione tecnica dell'emergenza sismica: rilievo del danno e agibilità – Scheda AeDES*.

EN 15804:2012+A2:2019 – Sustainability of Construction Works – Environmental Product Declarations – Core Rules for the Product Category of Construction Products (2019).

European Commission. (2021). *Level(s) – Indicator framework for sustainable buildings.*

European Committee for Standardization (CEN). (2011). *EN 15978:2011 – Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method*.

Frank Consoli, David Allen, Ian Boustead, James Fava, William Franklin, Allan A. Jensen, Nick de Oude, Rod Parrish, Rod Perriman, Dennis Postlethwaite, Beth Quay, Jacinthe Séguin, & Bruce Vigon. (1993). *Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice."* SETAC.

Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., & Rydberg, T. (2011). Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. *Environmental Science & Technology*, *45*(1), 90–96. https://doi.org/10.1021/es101316v

Lagomarsino, S., & Cattari, S. (2014). PERPETUATE guidelines for the seismic assessment of cultural heritage masonry structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *12*(4), 1229–1277.

Lagomarsino, S., & Cattari, S. (2015). PERPETUATE guidelines for seismic performance-based assessment of cultural heritage masonry structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *13*(1), 13–47. https://doi.org/10.1007/s10518-014-9674-1

Massimo Mariani. (2014). *Particolari costruttivi nel consolidamento e restauro*. DEI.

Milano, L., Mannella, A., Morisi, C., & Martinelli, A. (2009). *Schede illustrative dei principali meccanismi di collasso locali negli edifici esistenti in muratura e dei relativi modelli cinematici di analisi*.

Milano, L., Penna, A., & Morandi, P. (2009). Valutazione della sicurezza post-sismica di edifici in muratura: metodologie e applicazioni. *Journal of Earthquake Engineering*, *13*(s1), 1–20.

Ministero della Cultura (MiC). (2020). *Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale – Versione aggiornata*.

Ministero per i Beni e le Attività Culturali e per il Turismo (MiBACT). (2015). *Aggiornamento delle Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio*.

Ministero per i Beni e le Attività Culturali (MiBAC). (2011). *Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale*.

Penelis, G. (2007). *Earthquake-resistant concrete and masonry building design*. CRC Press.

Sorrentino, L., Liberatore, L., Decanini, L. D. F., & Monti, G. (2019). Seismic behaviour of masonry buildings: lessons learned from recent Italian earthquakes. *International Journal of Architectural Heritage*, *13*(7–8), 1125–1144.

UNI EN 15804:2019 - Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products. (2019).

UNI EN ISO 14040:2006 – Life cycle assessment — Principles and framework. (2006).

UNI EN ISO 14044:2021 – Life cycle assessment — Requirements and guidelines. (2021).

United Nations Environment Programme (UNEP), & Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC). (2023). *Global Status Report for Buildings and Construction 2023*.

Vaiano, G., Masi, A., & Vona, M. (2020). Analisi dei meccanismi locali negli edifici in muratura: un approccio integrato per la riduzione del rischio sismico. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 567–593.

3 PROTOCOLLO DI CANTIERE PER LA RIMOZIONE DI OPERE PROVVISIONALI IN SICUREZZA

Nei capitoli precedenti è stata condotta un'ampia analisi bibliografica che ha permesso di mappare lo stato dell'arte sugli interventi provvisionali post-sisma, evidenziando punti di forza, criticità e significative lacune di ricerca. In particolare, è emersa l'assenza di una procedura univoca e strutturata per la fase di rimozione delle opere provvisionali, che spesso è stata gestita con un approccio emergenziale, affidato all'esperienza del singolo operatore e non supportato da strumenti di valutazione quantitativa del rischio. L'urgenza di affrontare questa fase con un approccio scientifico nasce proprio dalla necessità di superare questa logica reattiva e frammentaria, introducendo una metodologia proattiva capace di anticipare i rischi e definire preventivamente le condizioni di sicurezza. È in questo quadro che prende forma il Protocollo per la rimozione in sicurezza delle opere provvisionali, che rappresenta il risultato centrale della presente ricerca. Il Protocollo non si limita a proporre indicazioni operative, ma definisce un percorso strutturato di verifica e decisione, costruito per guidare il tecnico attraverso una sequenza logica di controlli, valutazioni e scelte operative. La sua applicabilità concreta è resa possibile da una serie di strumenti sviluppati integralmente nell'ambito della tesi, concepiti per trasformare passaggi tradizionalmente affidati all'esperienza in procedure supportate da criteri oggettivi e tracciabili. L'obiettivo è duplice: ridurre il rischio connesso alle operazioni di smontaggio e integrare tale fase nel processo complessivo di progetto e di cantiere. In questa prospettiva, la rimozione dei puntellamenti non è più un momento terminale e residuale, ma una fase pianificata e coordinata con gli interventi di consolidamento e ricostruzione. L'impostazione adottata include inoltre una dimensione ambientale ed economica, che viene incorporata nel processo decisionale e non relegata a una valutazione successiva. Come illustrato nella *Figura 3.1*, il Protocollo si articola in una sequenza di passaggi consequenziali costruiti con logica ad esclusione, che conducono progressivamente dalla verifica preliminare delle condizioni strutturali fino all'esecuzione del piano di smontaggio. All'interno di tale struttura trovano collocazione gli strumenti sviluppati nella ricerca, attivati nelle fasi in cui è richiesta una valutazione quantitativa o un raccordo tra analisi e operatività. L'assunto iniziale è che il sistema di messa in sicurezza installato immediatamente dopo il sisma sia in condizioni di efficienza e stia svolgendo correttamente la sua funzione. La prima fase prevede un'analisi preliminare della porzione di muratura interessata, volta a verificare la permanenza di un comportamento assimilabile a quello di un corpo rigido o l'eventuale insorgenza di fenomeni di disgregazione tali da richiedere interventi di preconsolidamento. In presenza di criticità, il Protocollo impone il coordinamento con il progetto di ricostruzione, così da garantire coerenza tra opere temporanee e lavorazioni definitive. Accertate le condizioni preliminari, la valutazione della sicurezza viene formalizzata attraverso il calcolo del coefficiente λ mediante il foglio di

calcolo sviluppato nella presente ricerca. Tale strumento consente di esprimere in termini quantitativi il livello di stabilità residua e di classificare il rischio associato alla rimozione secondo intervalli predefiniti. Il passaggio da una valutazione qualitativa a un indice numerico rappresenta uno dei contributi metodologici della tesi, in quanto riduce la discrezionalità e rende confrontabili strategie operative differenti. Qualora il valore del coefficiente evidenzi una condizione non accettabile, il Protocollo prevede l'attuazione di prescrizioni tecniche, applicate in modo progressivo fino al raggiungimento di un livello di sicurezza adeguato. Anche in questa fase è richiesto il costante riscontro con l'attività progettuale, per evitare interferenze o incoerenze con le lavorazioni successive. Solo al termine di tali verifiche si procede alla pianificazione dello smontaggio, che deve essere eseguito secondo una sequenza controllata. In questa fase intervengono la scheda di contesto e le schede tecniche operative, anch'esse sviluppate nell'ambito della ricerca, con la funzione di tradurre le valutazioni analitiche in indicazioni operative puntuali, adattate alle specificità del sito e del sistema di puntellamento. Completato lo smontaggio in condizioni di sicurezza, il Protocollo introduce una verifica finale dedicata alla gestione del materiale rimosso. La valutazione ambientale, condotta secondo metodologia LCA, e la stima semplificata della sostenibilità economica costituiscono strumenti autonomi sviluppati nella ricerca, finalizzati a confrontare in modo strutturato le opzioni di riuso, riciclo o smaltimento. In questo modo la fase conclusiva dell'intervento viene ricondotta a un processo decisionale consapevole, coerente con principi di sostenibilità e responsabilità gestionale. Dopo averne delineato l'impostazione generale, si procede ora alla descrizione dettagliata delle sei fasi che compongono il Protocollo, illustrandone la logica interna e gli strumenti attivati nei passaggi che richiedono una valutazione strutturata.

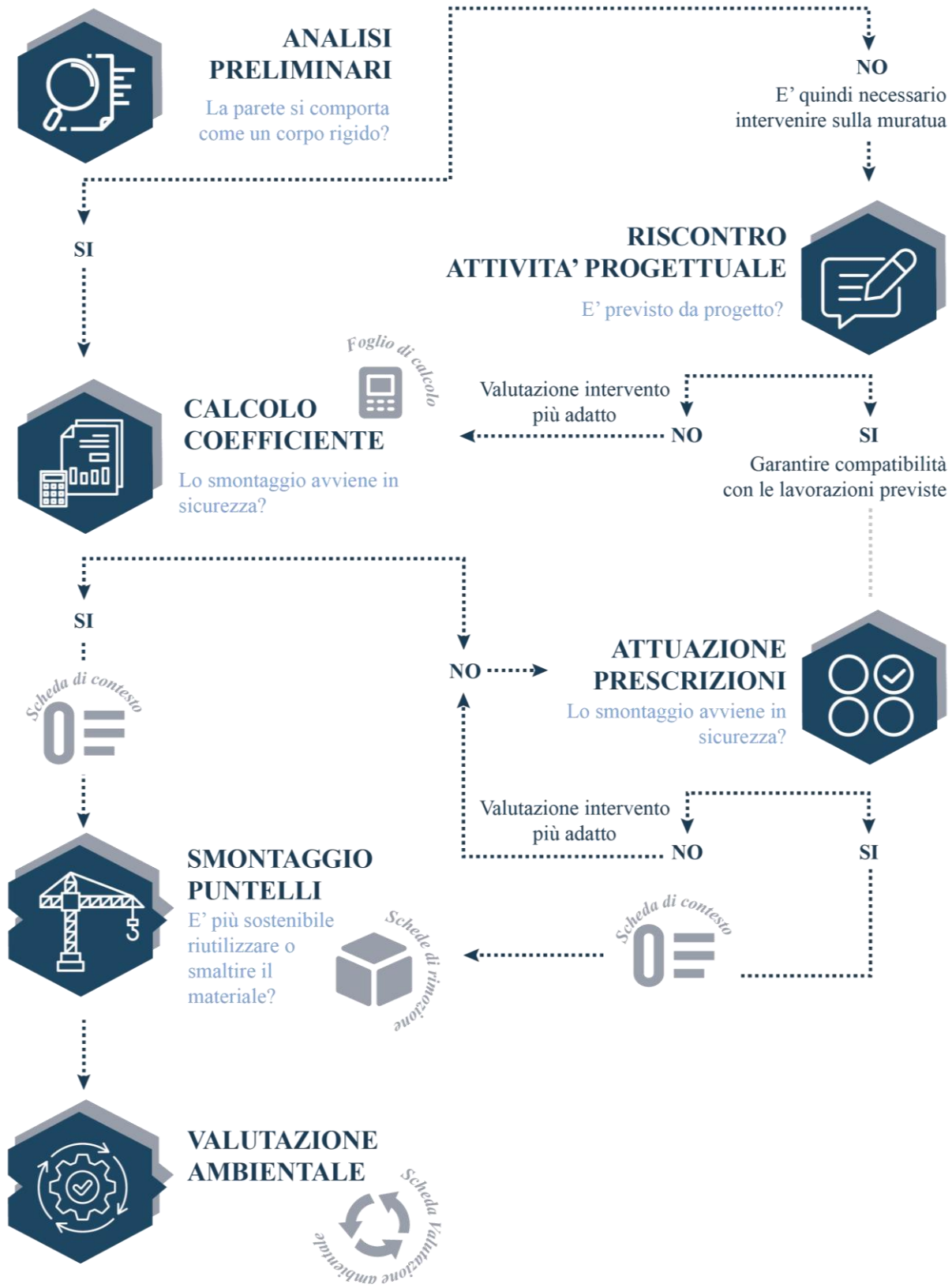


Figura 3.1: Protocollo di rimozione

3.1 FASE 00_ IPOTESI ALLA BASE DEL PROTOCOLLO

Prima di affrontare nel dettaglio le fasi, è necessario chiarire le ipotesi di base su cui il Protocollo si fonda, così da definire in modo preciso i presupposti teorici e i limiti operativi entro i quali la metodologia trova applicazione. L'applicabilità del Protocollo, infatti, si fonda su un insieme di ipotesi preliminari che ne definiscono i limiti operativi e l'ambito di validità. Tali ipotesi costituiscono i presupposti teorici indispensabili per garantire la coerenza dell'analisi con il modello di calcolo adottato. In primo luogo, va precisato che lo strumento sviluppato per la valutazione della sicurezza non tiene conto né della presenza né della tipologia dei puntellamenti eventualmente presenti sulla facciata dell'edificio. La sua applicazione, infatti, prescinde da tali condizioni, in quanto si basa esclusivamente sulla conoscenza del meccanismo rigido di collasso attivato, delle caratteristiche geometriche della porzione strutturale coinvolta, e dei carichi gravitazionali (propri o derivanti da altri elementi strutturali) che insistono sull'area analizzata. In seconda istanza, la valutazione del coefficiente sismico di sicurezza λ – che rappresenta il moltiplicatore dei carichi orizzontali capace di attivare il cinematismo considerato – presuppone che la porzione di muratura o la parte di edificio oggetto dell'analisi si comporti ancora, allo stato attuale, come un corpo rigido monolitico. Tale assunzione implica che non si siano verificate deformazioni incompatibili con l'ipotesi di rigidezza del blocco e che il cinematismo potenziale possa essere rappresentato con un modello semplificato a corpi rigidi idealizzati, secondo l'approccio cinematico dell'analisi limite. Infine, si assume che le opere di sostegno eventualmente predisposte in fase emergenziale – ossia i puntellamenti provvisori montati in seguito all'evento sismico – siano ancora oggi in condizioni ottimali e operative, e pertanto in grado di svolgere efficacemente la funzione per cui sono stati installati. Il Protocollo non prevede, né contempla, alcuna operazione preliminare volta a verificare, ripristinare o rafforzare l'efficienza di tali dispositivi di contenimento. Si tratta, in sostanza, di un presupposto operativo che garantisce la continuità funzionale tra la condizione rilevata e quella simulata nel modello analitico.

3.2 FASE 01_ ANALISI PRELIMINARI



Figura 3.2: Fase 01_ Analisi preliminari

Il primo passo costituisce il punto di partenza del Protocollo e rappresenta la condizione necessaria per poter procedere a qualunque valutazione quantitativa. È in questa fase che viene verificato se la porzione di muratura interessata mantiene ancora un comportamento assimilabile a quello di un corpo rigido, condizione indispensabile per poter modellare il meccanismo di collasso secondo

l'approccio cinematico adottato. La verifica si basa sui rilievi e sulle indagini già descritte nel *Capitolo 2.5_Analisi e interventi sulle murature*, al quale si rimanda per una trattazione completa delle metodologie di rilievo visivo, strumentale e diagnostico. Nel contesto del Protocollo, queste informazioni vengono utilizzate per formulare un giudizio tecnico sulla continuità del paramento murario, sulla presenza di eventuali disgregazioni o perdite di ammorsamento e, se necessario, per individuare le zone in cui intervenire con operazioni di preconsolidamento. Qualora l'esito della verifica indichi una perdita di monoliticità, si procede all'esecuzione degli interventi preliminari necessari – ad esempio iniezioni di leganti, cuciture armate o ristabilimento di connessioni tra paramenti – al fine di ripristinare le condizioni minime di stabilità. Solo dopo avere garantito che la muratura possa essere considerata un macroblocco rigido, si può proseguire al passo successivo del Protocollo.

3.3 FASE 02_ RISCONTRO CON L'ATTIVITA' PROGETTUALE



Figura 3.3: Fase 02_ Riscontro attività progettuale

Completata la verifica preliminare della monoliticità e, se necessario, gli interventi di preconsolidamento, il Protocollo prevede un passaggio fondamentale di coordinamento con il progetto di ricostruzione o di consolidamento definitivo. Questa fase ha lo scopo di garantire che le operazioni temporanee eseguite – sia quelle già presenti sia quelle che verranno introdotte in seguito come prescrizioni – siano pienamente compatibili con le lavorazioni previste dal progetto esecutivo. Il riscontro progettuale permette di evitare interferenze, duplicazioni o lavorazioni in contrasto tra loro, che potrebbero generare ritardi, costi aggiuntivi o necessità di smontaggi non programmati. Nel contesto del Protocollo, questo momento di confronto non è puramente formale: rappresenta un'occasione per allineare il cronoprogramma, verificare le fasi di cantierizzazione e stabilire un flusso di informazioni costante tra il coordinatore della sicurezza, il direttore dei lavori e le imprese coinvolte. Questo passaggio assicura che le soluzioni adottate nella fase provvisionale non siano isolate, ma facciano parte di un disegno unitario, coerente con la futura ricostruzione. In questo modo il Protocollo diventa uno strumento di integrazione e non un vincolo aggiuntivo, contribuendo a una gestione ordinata e continua dell'intervento. Solo quando è stata verificata la piena coerenza tra le operazioni provvisorie e quelle definitive, si può procedere al passo successivo.

3.4 FASE 03_ CALCOLO COEFFICIENTE λ



Figura 3.4: Fase 03_Calcolo coefficiente λ

Una volta verificate le condizioni di monoliticità e garantita la coerenza con il progetto di ricostruzione, il Protocollo prevede il calcolo del coefficiente di sicurezza λ, che rappresenta il moltiplicatore dei carichi orizzontali in grado di attivare il cinematismo di collasso considerato. Questa fase costituisce il cuore quantitativo del processo ed è realizzata tramite lo strumento di calcolo sviluppato nell'ambito della presente ricerca, costruito sulla base dell'approccio cinematico dell'analisi limite e dei modelli a corpo rigido. Nell'ambito della presente ricerca ci si è posti l'obiettivo di mettere a punto uno strumento di valutazione speditivo, in grado di fornire rapidamente indicazioni sul livello di rischio associato alla rimozione delle opere provvisionali. La logica di base di questo strumento è strettamente connessa al concetto di moltiplicatore di collasso precedentemente introdotto: il parametro scelto per rappresentare lo stato di sicurezza è infatti un coefficiente λ, che esprime l'accelerazione orizzontale necessaria ad attivare il meccanismo di collasso considerato. Il funzionamento dello strumento si articola su tre passaggi fondamentali. Il primo è la determinazione del coefficiente di sicurezza della porzione muraria oggetto di studio, anche nel caso in cui essa sia attualmente sostenuta da puntellamenti di sicurezza. Il secondo consiste nella collocazione del valore calcolato all'interno di intervalli di rischio predefiniti, costruiti in modo da rendere immediata la classificazione della condizione di sicurezza attraverso un sistema a più livelli. Il terzo passaggio riguarda la definizione di un set di interventi da attuare prima della rimozione dei puntelli, suddivisi in prescrizioni obbligatorie – necessarie per riportare la parete in condizioni di stabilità accettabili – e prescrizioni facoltative, che possono essere adottate per incrementare ulteriormente il margine di sicurezza, a discrezione del progettista. Questo approccio consente di trasformare il calcolo del moltiplicatore di collasso, tipicamente confinato all'ambito analitico, in uno strumento di supporto decisionale pratico e replicabile, capace di guidare le operazioni di smontaggio in modo razionale e documentato. Per comprendere appieno questa fase del Protocollo, è utile distinguere due aspetti complementari: da un lato il processo che ha portato allo sviluppo dello strumento di calcolo per la valutazione del coefficiente di sicurezza λ, dall'altro le modalità operative con cui lo strumento viene effettivamente utilizzato. Nei paragrafi che seguono vengono quindi illustrate prima le basi teoriche e le scelte metodologiche adottate per la costruzione del modello, e successivamente le istruzioni pratiche che consentono di impiegarlo in modo

corretto e di interpretarne i risultati all'interno del flusso decisionale del Protocollo.

3.4.1 Sviluppo dello strumento di calcolo

L'indice di sicurezza definito in questa ricerca si basa direttamente sul moltiplicatore di collasso introdotto e sviluppato nel *Capitolo 2.3*, dedicato all'analisi lineare dei meccanismi di collasso. Come già discusso in quella sede, il moltiplicatore rappresenta l'accelerazione orizzontale oltre la quale si attiva il meccanismo di collasso rigido della porzione muraria considerata.
Nel contesto del presente lavoro, la sua stima viene effettuata applicando la procedura di equilibrio dei momenti resistenti e ribaltanti, variando a seconda che si tratti di uno dei quattro meccanismi di collasso studiati (ribaltamento semplice, ribaltamento composito, flessione verticale o cinematismo a due pannelli). Tale approccio consente di tener conto delle specificità cinematiche di ciascun meccanismo, garantendo che il valore del moltiplicatore sia rappresentativo delle reali condizioni di stabilità della porzione analizzata.
Il moltiplicatore di collasso viene calcolato nell'ipotesi di cinematica rigida lineare associata al meccanismo considerato, ed è ricavato imponendo l'equilibrio tra i momenti resistenti e i momenti ribaltanti delle forze agenti sulla porzione danneggiata dell'edificio in muratura. In generale, i momenti resistenti che si oppongono all'attivazione del meccanismo dipendono dalle seguenti azioni verticali e orizzontali:

- il peso proprio di tutte le parti dell'edificio che gravano sulla porzione che può attivare il cinematismo;
- le azioni statiche orizzontali resistenti dovute alla presenza di eventuali catene o tiranti metallici.

I momenti ribaltanti, invece, che favoriscono l'innesco del meccanismo di collasso, dipendono dalle seguenti azioni orizzontali:

- le forze inerziali sismiche, generate dall'accelerazione orizzontale e dalle masse dei corpi coinvolti nel meccanismo. Tali forze sono proporzionali all'accelerazione al suolo di progetto;
- le azioni statiche orizzontali trasmesse alla porzione danneggiata da archi, volte e coperture spingenti.

Va osservato che le forze inerziali sismiche sopra richiamate sono le uniche a dipendere in modo diretto dall'accelerazione sismica orizzontale, mentre tutte le altre azioni dipendono esclusivamente dalle caratteristiche geometriche e meccaniche della struttura. La condizione di collasso si verifica nel momento in cui i momenti resistenti e i momenti ribaltanti risultano uguali, e il moltiplicatore di collasso rappresenta l'accelerazione orizzontale minima capace di innescare il meccanismo rigido di collasso. Da ciò deriva che un cinematismo rigido si attiva quando il moltiplicatore di collasso calcolato è maggiore o, al più, uguale all'accelerazione sismica realmente agente. È importante sottolineare che, anche in assenza di eventi sismici, nel caso in cui si proceda con interventi di miglioramento o adeguamento sismico, è opportuno valutare i moltiplicatori di collasso relativi a tutti i possibili meccanismi rigidi di collasso attivabili. In tali circostanze, infatti, i meccanismi che potrebbero attivarsi non sono noti a priori e

devono essere studiati in modo sistematico, identificando quello associato al moltiplicatore di collasso più basso. Questo perché il cinematismo più critico – quello caratterizzato dal moltiplicatore minimo – rappresenta la condizione di vulnerabilità principale e costituisce l'elemento prioritario su cui concentrare l'intervento di consolidamento. A differenza di un'analisi puramente esplorativa, tuttavia, la valutazione viene condotta sotto l'assunzione di conoscere a priori il tipo di meccanismo che si attiverà. L'identificazione del meccanismo di collasso è resa possibile dall'osservazione del quadro fessurativo presente sulla porzione danneggiata e dalla tipologia di opere provvisionali installate per prevenire ulteriori danni: la combinazione di questi due elementi fornisce infatti un'indicazione chiara della configurazione cinematica attesa. Ne consegue che a ciascuna porzione di struttura danneggiata è associato un solo indice di sicurezza, calcolato sul meccanismo di collasso individuato come prevalente. È importante sottolineare che la valutazione dell'indice di sicurezza viene eseguita prescindendo dalla presenza delle opere provvisionali, poiché l'obiettivo è stimare le condizioni effettive della parete nel momento in cui tali puntellamenti verranno rimossi. Formalmente, il valore dell'indice di sicurezza λ si ottiene ponendo in equilibrio il momento torcente totale resistente con quello ribaltante, in cui il momento resistente è pari a:

$$M_R = \sum_{k=1}^{n} W_k + \sum_{j=1}^{m} C_j$$

E il momento ribaltante:

$$M_O = \lambda \sum_{k=1}^{n} M_k + \sum_{h=1}^{l} H_h$$

Nelle equazioni, λ è l'indice di sicurezza, che rappresenta l'accelerazione orizzontale al suolo; W_k e M_k sono i momenti dovuti rispettivamente al peso proprio e alle forze sismiche inerziali; C_j è il j-esimo momento dovuto alle azioni statiche dei tiranti metallici esistenti; H_h è il momento dovuto alle azioni orizzontali statiche applicate da archi, volte e tetti spingenti. Tutti questi contributi sono valutati in base al tipo di meccanismo rigido di rottura. L'indice di sicurezza si ottiene quindi equiparando i momenti resistenti e di ribaltamento:

$$\lambda = \frac{\sum_{k=1}^{n} W_k + \sum_{j=1}^{m} C_j - \sum_{h=1}^{l} H_h}{\sum_{k=1}^{n} M_k}$$

Dopo avere chiarito la modalità di calcolo del coefficiente di sicurezza, è necessario spiegare in base a quali criteri sono stati definiti gli intervalli di rischio che permettono di inquadrare il valore calcolato in un contesto operativo. Idealmente, per definire il livello di prescrizioni necessario a garantire la sicurezza nella rimozione dei puntellamenti, la soluzione più corretta sarebbe quella di tenere pienamente conto dello stato di danno effettivo della struttura. Tuttavia, una valutazione diretta del danno non è sempre disponibile, e quando lo è può derivare da fonti di attendibilità incerta o da rilievi eseguiti con metodologie

non omogenee. Per questa ragione, la classificazione del livello di sicurezza è stata realizzata tramite una versione normalizzata dell'indice di sicurezza, indicata come:

$$\tilde{\lambda} = \lambda / a_{ref}$$

dove λ è il coefficiente di sicurezza calcolato e a_{ref} rappresenta un valore di accelerazione di riferimento. In un caso ideale, a_{ref} dovrebbe corrispondere al valore massimo di accelerazione effettivamente sperimentata dalla struttura durante l'evento sismico, poiché il rapporto tra la capacità massima di resistenza della parete – espressa da λ – e l'accelerazione realmente subita fornirebbe un indicatore diretto del danno accumulato. Poiché, nella pratica, l'accelerazione massima realmente sperimentata è raramente disponibile, si adotta come approssimazione il valore di accelerazione attesa fornito dalle norme tecniche di riferimento per il sito considerato. Questo approccio, pur semplificato, consente di ottenere un indice comparabile e applicabile in modo uniforme ai diversi casi studio. A partire da questo indice normalizzato vengono quindi definiti i quattro intervalli di sicurezza – o intervalli di rischio – utilizzati nello strumento, come visibile nella *Figura 3.5*. La loro ampiezza è determinata da tre soglie $\tilde{\lambda}_1$, $\tilde{\lambda}_2$ $\tilde{\lambda}_3$ che suddividono il dominio dell'indice normalizzato in quattro fasce. Ciascuna fascia corrisponde a un diverso livello di rischio e costituisce il riferimento per l'attivazione delle prescrizioni tecniche previste dal Protocollo.

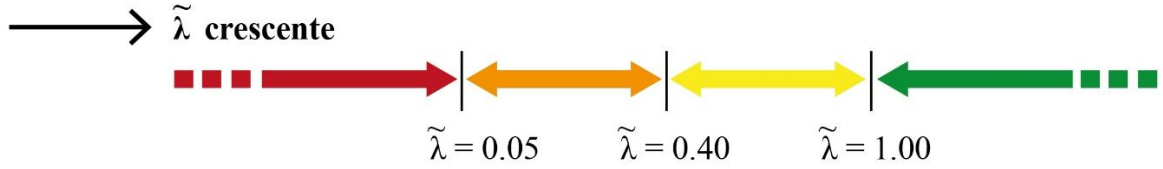


Figura 3.5: Intervalli di sicurezza

In considerazione della limitata disponibilità di dati sperimentali, i valori di soglia individuati sono stati inizialmente proposti in via preliminare, sulla base di considerazioni teoriche, e successivamente sottoposti a validazione mediante il confronto con un campione rappresentativo di edifici reali nei quali si è effettivamente osservata l'attivazione di meccanismi di collasso a corpo rigido. La *Tabella 3.1* raccoglie questo insieme di casi studio, includendo sia edifici dotati di opere provvisionali sia edifici privi di puntellamenti, così da coprire un'ampia gamma di condizioni strutturali.

Tabella 3.1: Casi di studio considerati

	Edifici	**Meccanismo ribaltamento**	**Dimensioni [m];[m];[m^2]**	**λ_0 [g]**	**λ_a [g]**
1	Chiesa di Santa Caterina (AQ)	Rib. Semplice	s = 1.00 Y_g = 5.75 A = 293.21	0.08695	0.08695
2	Chiesa di Santa Caterina (AQ)	Rib. Semplice	s = 1.00 Y_g = 5.75 A = 293.21	0.1739	0.1739
3	Chiesa di San Francesco di Paola	Rib. Semplice	s = 0.90 Y_g = 4.95 A = 134.08	0.0909	0.0909
4	Chiesa di San Francesco di Paola	Rib. Semplice	s = 0.90 Y_g = 4.95 A = 134.08	0.0094	0.0842
5	Chiesa di San Silvestro (AQ)	Rib. Semplice	s = 1.20 Y_g = 10.55 A = 477.92	0.0568	0.0568
6	Chiesa di San Silvestro (AQ)	Rib. Semplice	s = 0.90 Y_g = 1.81 A = 35.58	0.2107	0.2107
7	Chiesa di San Benedetto di Arischia (AQ)	Rib. Semplice	s = 0.75 Y_g = 2.21 A = 26.90	0.0869	0.1696
8	Chiesadi Santa Giusta (AQ)	Rib. Semplice	s = 0.75 Y_g = 4.17 A = 142.25	0.0899	0.0899
9	Chiesadi Santa Giusta (AQ)	Rib. Semplice	s = 0.75 Y_g = 4.17 A = 142.25	0.3734	0.3734
10	Chiesa di Santa Maria della Concezione (AQ)	Rib. Semplice	s = 0.68 Y_g = 3.17 A = 68.08	0.0023	0101725
11	Chiesa di Santa Maria della Concezione (AQ)	Rib. Semplice	s = 1.10 Y_g = 3.04 A = 55.84	0.0448	0.1809
12	Chiesa di Santa Maria della	Flessione verticale	s = 1.10 Y_g = 3.04 A = 54.23	0.3864	0.3864

	Edifici	**Meccanismo ribaltamento**	**Dimensioni [m];[m];[m²]**	**λ_0 [g]**	**λ_a [g]**
	Concezione (AQ)				
13	Abitazione civile A, Civita di Bagno (AQ)	Rib. composto	s = 0.70 Y_g = 2.82 A = 79.49	0.2039	0.2522
14	Palazzo Carli (AQ)	Rib. Semplice	s = 0.70 Y_g = 4.69 A = 100.74	0.1705	0.1705
15	Palazzo Carli (AQ)	Rib. composto	s = 0.70 Y_g = 7.08 A = 629.99	0.06734	0.08134
16	Chiesa di Santa Caterina (AQ)	Rib. semplice	s = 0.35 Y_g = 7.35 A = 255.00	0.0039	0.0744
17	Chiesa della Madonna di Roio (AQ)	Rib. composto	s = 1.00 Y_g = 5.89 A = 124.05	0.0653	0.0653
18	Chiesa della Madonna di Roio (AQ)	Rib. composto	s = 1.00 Y_g = 3.47 A = 40.44	0.0123	0.17904
19	Chiesa parrocchiale di San Flaviano (AQ)	Rib. semplice	s = 0.85 Y_g = 5.71 A = 166.53	0.0744	0.0744
20	Chiesa di San Benedetto di Arischia (AQ)	Rib. semplice	s = 0.70 Y_g = 3.45 A = 159.20	0.1014	0.1014
21	Chiesa di Santa Maria della Concezione (AQ)	Rib. semplice	s = 0.70 Y_g = 2.98 A = 23.44	0.1174	0.1174
22	Chiesa di Santa Maria della Concezione (AQ)	Rib. semplice	s = 0.70 Y_g = 4.08 A = 110.84	0.0857	0.0857
23	Chiesa di Santa Maria della	Rib. semplice	s = 0.70 Y_g = 4.08 A = 110.84	0.1843	0.1843

	Edifici	**Meccanismo ribaltamento**	**Dimensioni [m];[m];[m²]**	**λ_0 [g]**	**λ_a [g]**
	Concezione (AQ)				
24	Abitazione civile B, Civita di Bagno (AQ)	Flessione orizzontale	s = 0.70 Y_g = 1.26 A = 9.59	0.011	0.011
25	Abitazione civile B, Civita di Bagno (AQ)	Rib. composto	s = 0.70 Y_g = 1.66 A = 15.32	0.2578	0.2578
26	Abitazione civile B, Civita di Bagno (AQ)	Rib. semplice	s = 0.70 Y_g = 4.778 A = 74.36	0.0852	0.0852
27	Abitazione civile C, Civita di Bagno (AQ)	Flessione orizzontale	s = 0.50 Y_g = 1.26 A = 6.10	0.0489	0.0489
28	Abitazione civile C, Civita di Bagno (AQ)	Flessione orizzontale	s = 0.50 Y_g = 1.36 A = 13.23	0.1851	0.1851
29	Palazzo Carli (AQ)	Rib. semplice	s = 0.50 Y_g = 1.21 A = 25.69	0.2066	0.2066
30	Palazzo Carli (AQ)	Rib. composto	s = 0.55 Y_g = 4.72 A = 15.34	0.1317	0.1317
				0.122681034	0.148837143

Nella quarta colonna della tabella sono riportate le grandezze geometriche che caratterizzano il meccanismo di collasso rigido:

- la variabile s rappresenta lo spessore della parete o della porzione interessata dal meccanismo;
- la variabile Y_g indica la quota del baricentro della porzione danneggiata, misurata a partire dal punto più basso (in genere la cerniera plastica di rotazione);
- A rappresenta l'area della porzione di muratura oggetto di analisi.

Un aspetto rilevante che emerge dall'analisi dei dati è che i valori medi degli indici di sicurezza calcolati in assenza di prescrizioni preventive (λ_0) risultano significativamente più bassi rispetto a quelli ottenuti dopo l'applicazione delle sole prescrizioni obbligatorie (λ_a). Ciò dimostra in maniera quantitativa che

l'adozione delle prescrizioni obbligatorie determina un incremento dell'indice di sicurezza, migliorando le condizioni di stabilità della parete e rendendo più sicura l'operazione di rimozione delle opere provvisionali.

Nella *Figura 3.6*, i valori $\tilde{\lambda}_1 = 0.05$, $\tilde{\lambda}_2 = 0.4$ e $\tilde{\lambda}_3 = 1.0$ sono i valori di soglia da confrontare con l'indice di sicurezza $\tilde{\lambda}$.

Per confrontare la scelta proposta degli intervalli di sicurezza con i casi disponibili e comprendere quali sarebbero le conseguenze di tale scelta per i campioni di prova presentati in *Tabella 3.1*, viene innanzitutto adattata una distribuzione per l'indice di sicurezza normalizzato $\tilde{\lambda}$ di tali casi. Questo adattamento si basa sull'assunzione che i casi considerati siano rappresentativi dell'inventario edilizio in muratura dell'area analizzata. La *Figura 3.6* illustra una selezione di distribuzioni considerate per l'adattamento dei dati, accompagnate dall'istogramma normalizzato che rappresenta la funzione di densità di probabilità empirica dei dati. È interessante notare che, anche in assenza di dati con valore superiore a 2, sono state esplorate distribuzioni non limitate superiormente, data l'assenza di motivazioni a priori per assumere la non esistenza di tali scenari. Questo adattamento si basa sull'assunzione che i casi considerati siano rappresentativi dell'inventario di edifici in muratura nell'area analizzata. Ai fini del confronto, le distribuzioni adattate sono sovrapposte agli intervalli scelti. Come accennato in precedenza, il valore a_{ref} considerato in questo lavoro è l'accelerazione massima attesa fornita dalla NTC (Norme Tecniche per le Costruzioni, 2018), $a_{ref} = 0.25$. Se confrontata con l'istogramma normalizzato dei dati, la distribuzione di Weibull adattata (curva blu nelle *Figura 3.6 e Figura 3.7*) sembra fornire un migliore adattamento ai dati. La *Figura 3.7* presenta la funzione di densità di probabilità adattata per questa distribuzione, insieme agli intervalli di sicurezza suggeriti e ai fattori di sicurezza normalizzati per i casi di campione. Questi casi sono categorizzati in base alla presenza o assenza di opere provvisionali, rappresentate rispettivamente da punti viola e verdi. Assumendo che la selezione del campione rappresenti accuratamente l'inventario degli edifici in muratura dell'area analizzata, la distribuzione di Weibull adattata quantifica la probabilità che un edificio in muratura dell'area presenti un determinato valore di $\tilde{\lambda}$. Inoltre, la regione sottesa dalle funzioni di densità di probabilità, delimitata da due valori di soglia successivi ($\tilde{\lambda}_i$), rappresenta la proporzione di edifici in muratura che ci si aspetta rientrino nell'intervallo di sicurezza definito da tali due $\tilde{\lambda}_i$. La *Figura 3.7*, inoltre, mostra che, secondo gli intervalli di sicurezza scelti, la maggior parte dei casi con opere provvisionali (punti viola) è inclusa nei primi due intervalli di sicurezza, mentre la maggior parte dei casi senza opere provvisionali (punti verdi) è classificata nel terzo e nel quarto intervallo. In entrambi i gruppi sono presenti due eccezioni. Inoltre, si può osservare che il primo intervallo, sebbene relativamente stretto, include un numero significativo di casi, tutti con opere provvisionali. Confrontando la distribuzione adattata con le soglie di intervallo, si nota che, dato che il valore mediano della distribuzione adattata è di circa 0,37, poco più del 50% delle strutture in muratura verrebbe classificato nei primi due intervalli di sicurezza, e circa il 7% delle strutture

rientrerebbe nel primo intervallo. Pur fornendo risultati soddisfacenti, la determinazione delle soglie degli intervalli di sicurezza presentata in questo lavoro è limitata dalla disponibilità di dati e di valutazioni del danno. Studi futuri potrebbero migliorare la definizione di tali soglie ampliando il dataset per includere un più vasto insieme di casi provenienti da diverse regioni con differenti livelli di sismicità, potenzialmente indotta da terremoti differenti.
Questa calibrazione preliminare ha permesso di definire un set di intervalli di sicurezza sufficientemente robusto da essere applicato in maniera sistematica ai casi studio, fornendo al tecnico un riferimento immediato per classificare la condizione di stabilità della porzione muraria analizzata.
Sulla base di queste considerazioni, è stato sviluppato uno strumento di calcolo in ambiente MS Excel, concepito per consentire un'applicazione rapida e trasparente del metodo. Per ciascuno dei quattro meccanismi di collasso rigido considerati è stato realizzato un foglio di lavoro dedicato, nel quale l'utente inserisce i dati geometrici e meccanici della porzione muraria oggetto di analisi. Questa impostazione riduce al minimo il fabbisogno informativo, richiedendo soltanto le misure effettivamente rilevabili in sito, e rende lo strumento utilizzabile anche da operatori con un livello di specializzazione medio.
All'interno dei fogli di calcolo sono implementate le formulazioni di equilibrio tra momento resistente e momento ribaltante: a partire dai parametri in ingresso, il foglio calcola automaticamente il coefficiente di sicurezza λ e, successivamente, la sua versione normalizzata $\tilde{\lambda} = \lambda / a_{ref}$, dove a_{ref} rappresenta l'accelerazione di riferimento scelta. In questo modo il valore calcolato può essere immediatamente confrontato con le soglie definite in precedenza, collocando il caso all'interno di uno dei quattro intervalli di rischio.
Lo strumento fornisce come output otto differenti valori dell'indice di sicurezza:

- un valore iniziale, λ_0, calcolato in assenza di interventi preliminari e coincidente con il moltiplicatore di collasso tradizionale;
- sette valori aggiuntivi λ_β (β=1,…,8) che rappresentano configurazioni progressive di interventi migliorativi, ottenute combinando prescrizioni obbligatorie e facoltative.

La disponibilità di più valori consente di simulare scenari alternativi, valutando l'efficacia delle prescrizioni prima della rimozione delle opere provvisionali e quantificando il conseguente incremento di sicurezza. La descrizione dettagliata degli interventi e delle prescrizioni considerate nelle diverse combinazioni sarà presentata nel capitolo successivo, dedicato all'attuazione delle prescrizioni tecniche. In questa sede è sufficiente sottolineare che la possibilità di calcolare λ per diverse configurazioni costituisce un supporto decisionale essenziale per definire la strategia di intervento più appropriata, prima di procedere allo smontaggio dei puntellamenti. Nel sottocapitolo successivo sarà inoltre mostrato il foglio di calcolo nella sua forma effettiva, illustrandone la struttura, i campi di imput e le schermate di output, così da fornire al lettore un quadro chiaro e completo del suo utilizzo pratico.
In sintesi, lo strumento traduce in un percorso operativo guidato il concetto teorico di moltiplicatore di collasso, consentendo di:

- determinare rapidamente il coefficiente di sicurezza,

- collocarlo all'interno di intervalli di rischio chiaramente definiti,
- esplorare l'effetto di differenti scenari di intervento,
- fornire al tecnico un quadro chiaro e oggettivo della condizione di sicurezza, utile per decidere se procedere con la rimozione delle opere provvisionali o attuare misure correttive.

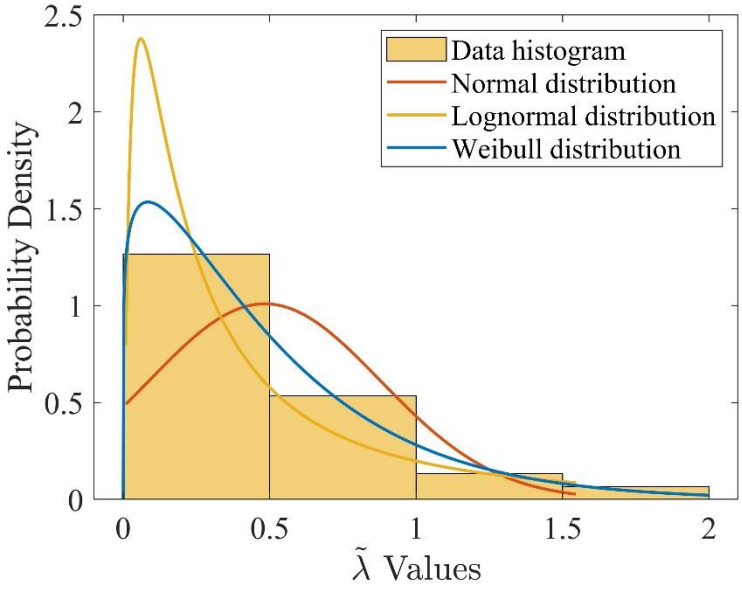


Figura 3.6: Istogramma normalizzato dell'indice di sicurezza normalizzato per i casi di prova (Fonte: Alessandro Contento, "Proposal of a protocol for the safe removal of post-earthquake provisional shorings (2023)).

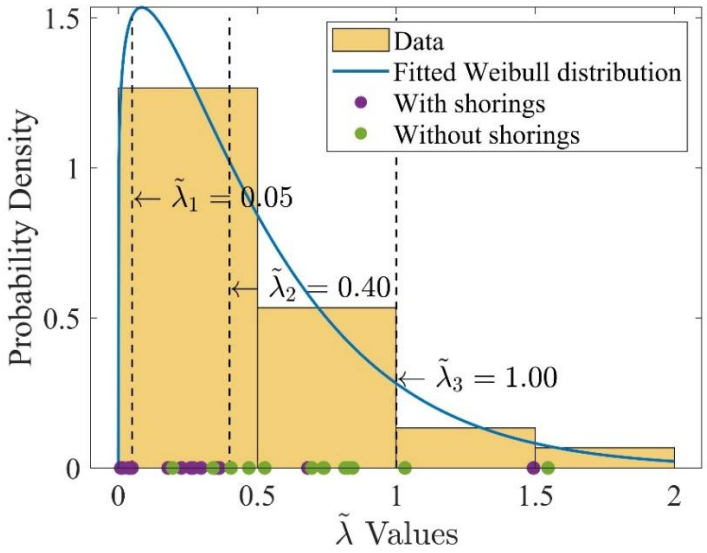
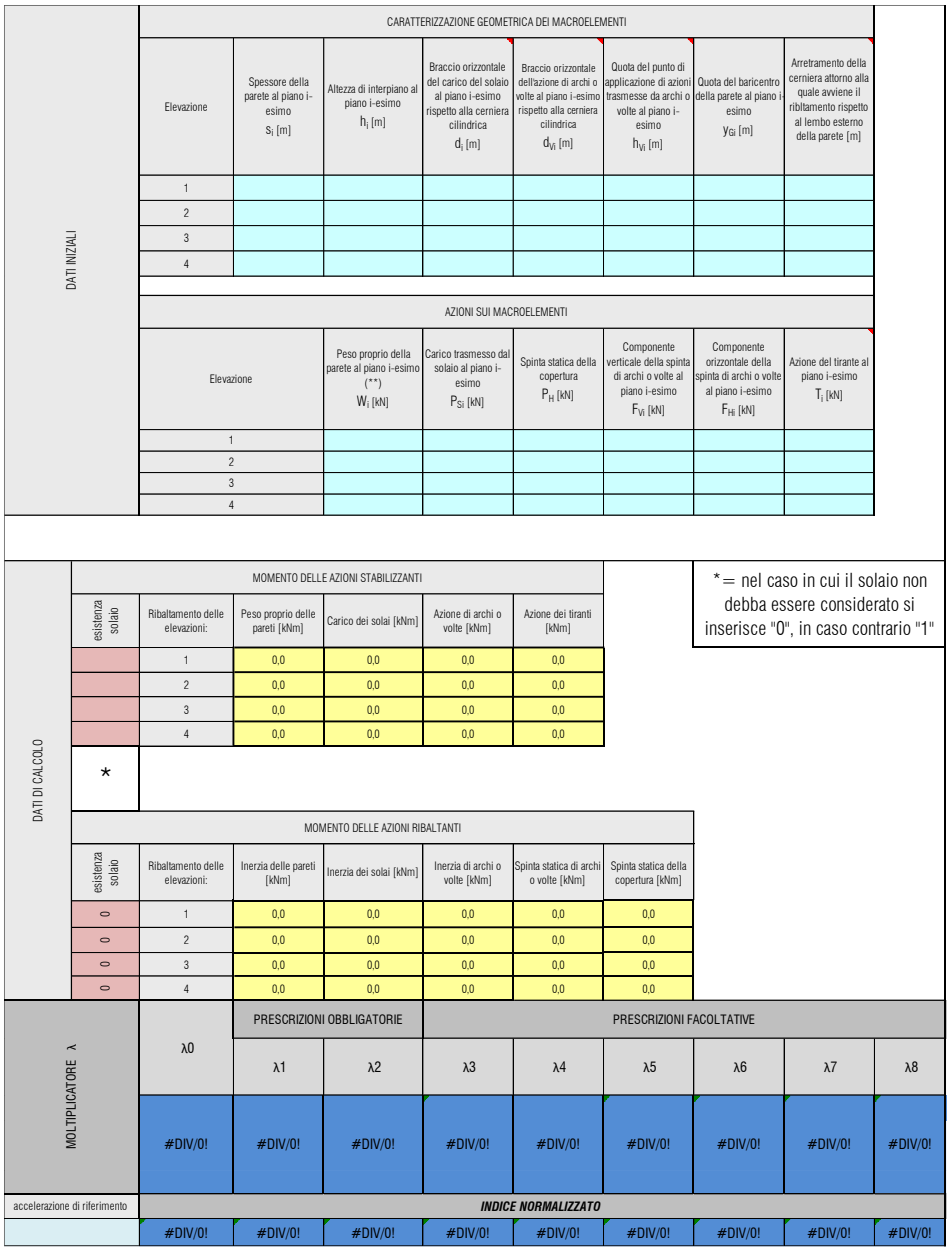


Figura 3.7: Confronto tra i casi e gli intervalli di sicurezza scelti (Fonte: Alessandro Contento, "Proposal of a protocol for the safe removal of post-earthquake provisional shorings (2023)).

3.4.2 Modalità d'uso dello strumento di calcolo del coefficiente

Dopo averne illustrato la logica di sviluppo e le ipotesi di base, si passa ora alla descrizione operativa dello strumento di calcolo, concepito per tradurre la valutazione della stabilità residua in un indice quantitativo confrontabile. In questa sezione viene presentata la struttura del foglio di lavoro, i dati di imput richiesti e le modalità di inserimento, insieme ai criteri di interpretazione dei valori restituiti ai fini della classificazione del livello di sicurezza e della pianificazione delle operazioni di smontaggio. Lo strumento non si configura come un semplice supporto computazionale, ma come il dispositivo attraverso cui il Protocollo assume carattere misurabile e verificabile, riducendo la componente discrezionale tipica delle valutazioni esclusivamente qualitative. L'obiettivo è fornire al lettore una guida completa e di facile utilizzo, così che lo strumento possa essere impiegato correttamente da tecnici e operatori anche in contesti reali di cantiere. Il primo passo per l'utilizzo dello strumento consiste nell'individuare con precisione il meccanismo di collasso rigido attivabile dalla porzione muraria oggetto di analisi. Questa operazione, come discusso nella Fase 1 del Protocollo, si fonda sull'osservazione del quadro fessurativo e sulla verifica dello stato di connessione con le pareti ortogonali e i solai. Una volta identificata la configurazione di collasso (ribaltamento semplice, ribaltamento composito, flessione verticale o cinematismo a due pannelli), l'utente seleziona nel file Excel il foglio di calcolo corrispondente. Per ciascuno dei quattro meccanismi di collasso rigido considerati è stato sviluppato un foglio di calcolo dedicato, costruito secondo una struttura uniforme, così da garantire coerenza e confrontabilità dei risultati. Ciascun foglio prevede un set di celle di imput in cui inserire le principali grandezze geometriche (spessore della parete, altezza del baricentro, posizione della cerniera di rotazione), i carichi gravitazionali insistenti e, ove necessario, le spinte orizzontali derivanti da archi, volte o coperture spingenti. In tutti i fogli è inoltre prevista la possibilità di selezionare l'accelerazione di riferimento a_{ref} tra quattro valori predefiniti, corrispondenti a diverse classi di pericolosità sismica del sito. Una volta inseriti i dati, il foglio calcola automaticamente il coefficiente di sicurezza λ, e lo normalizza. La struttura è la medesima per tutti i meccanismi: l'utente deve unicamente selezionare il foglio corrispondente al cinematismo identificato e inserire i dati richiesti, come illustrato nella *Figura 3.8*. Questa impostazione riduce al minimo la possibilità di errore e consente di utilizzare lo strumento anche in situazioni operative, fornendo un risultato rapido, trasparente e standardizzato.



DATI INIZIALI

CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA DEI MACROELEMENTI

Elevazione	Spessore della parete al piano i-esimo s_i [m]	Altezza di interpiano al piano i-esimo h_i [m]	Braccio orizzontale del carico del solaio al piano i-esimo rispetto alla cerniera cilindrica d_i [m]	Braccio orizzontale dell'azione di archi o volte al piano i-esimo rispetto alla cerniera cilindrica d_{Vi} [m]	Quota del punto di applicazione di azioni trasmesse da archi o volte al piano i-esimo h_{Vi} [m]	Quota del baricentro della parete al piano i-esimo y_{Gi} [m]	Arretramento della cerniera attorno alla quale avviene il ribaltamento rispetto al lembo esterno della parete [m]
1							
2							
3							
4							

AZIONI SUI MACROELEMENTI

Elevazione	Peso proprio della parete al piano i-esimo (**) W_i [kN]	Carico trasmesso dal solaio al piano i-esimo P_{Si} [kN]	Spinta statica della copertura P_H [kN]	Componente verticale della spinta di archi o volte al piano i-esimo F_{Vi} [kN]	Componente orizzontale della spinta di archi o volte al piano i-esimo F_{Hi} [kN]	Azione del tirante al piano i-esimo T_i [kN]
1						
2						
3						
4						

DATI DI CALCOLO

MOMENTO DELLE AZIONI STABILIZZANTI

esistenza solaio	Ribaltamento delle elevazioni:	Peso proprio delle pareti [kNm]	Carico dei solai [kNm]	Azione di archi o volte [kNm]	Azione dei tiranti [kNm]
	1	0,0	0,0	0,0	0,0
	2	0,0	0,0	0,0	0,0
	3	0,0	0,0	0,0	0,0
	4	0,0	0,0	0,0	0,0

*

*= nel caso in cui il solaio non debba essere considerato si inserisce "0", in caso contrario "1"

MOMENTO DELLE AZIONI RIBALTANTI

esistenza solaio	Ribaltamento delle elevazioni:	Inerzia delle pareti [kNm]	Inerzia dei solai [kNm]	Inerzia di archi o volte [kNm]	Spinta statica di archi o volte [kNm]	Spinta statica della copertura [kNm]
0	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0	4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

MOLTIPLICATORE λ

λ0	PRESCRIZIONI OBBLIGATORIE		PRESCRIZIONI FACOLTATIVE					
	λ1	λ2	λ3	λ4	λ5	λ6	λ7	λ8
#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

accelerazione di riferimento

INDICE NORMALIZZATO

#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

Figura 3.8: Foglio Excel per calcolo indice di sicurezza

Entrando nel merito del foglio di calcolo, i dati richiesti sono in particolare lo spessore della parete, l'altezza del baricentro della porzione interessata rispetto alla cerniera di rotazione, la massa agente sulla parete (comprensiva di carichi permanenti e di eventuali sovraccarichi significativi), nonché le eventuali azioni orizzontali statiche trasmesse da archi, volte o coperture spingenti. La scelta di questi parametri è stata calibrata in modo da privilegiare grandezze di facile rilievo in situ, così da rendere lo strumento applicabile anche in condizioni di limitata disponibilità di dati. Una volta inseriti i valori nelle celle di imput (identificate in azzurro nella *Figura 3.9*), il foglio di calcolo elabora automaticamente i momenti resistenti e i momenti ribaltanti, evidenziandoli nelle celle gialle per distinguerli dai dati immessi dall'utente (*Figura 3.10*). Questa impostazione consente di verificare in tempo reale la correttezza dei dati e la

coerenza dei risultati intermedi, prima di procedere all'interpretazione dell'esito finale.

DATI INIZIALI

CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA DEI MACROELEMENTI							
Elevazione	Spessore della parete al piano i-esimo s_i [m]	Altezza di interpiano al piano i-esimo h_i [m]	Braccio orizzontale del carico del solaio al piano i-esimo rispetto alla cerniera cilindrica d_i [m]	Braccio orizzontale dell'azione di archi o volte al piano i-esimo rispetto alla cerniera cilindrica d_{Vi} [m]	Quota del punto di applicazione di azioni trasmesse da archi o volte al piano i-esimo h_{Vi} [m]	Quota del baricentro della parete al piano i-esimo y_{Gi} [m]	Arretramento della cerniera attorno alla quale avviene il ribltamento rispetto al lembo esterno della parete [m]
1							
2							
3							
4							

AZIONI SUI MACROELEMENTI						
Elevazione	Peso proprio della parete al piano i-esimo (**) W_i [kN]	Carico trasmesso dal solaio al piano i-esimo P_{Si} [kN]	Spinta statica della copertura P_H [kN]	Componente verticale della spinta di archi o volte al piano i-esimo F_{Vi} [kN]	Componente orizzontale della spinta di archi o volte al piano i-esimo F_{Hi} [kN]	Azione del tirante al piano i-esimo T_i [kN]
1						
2						
3						
4						

Figura 3.9: Caselle di IMPUT del foglio di calcolo

DATI DI CALCOLO

MOMENTO DELLE AZIONI STABILIZZANTI					
esistenza solaio	Ribaltamento delle elevazioni:	Peso proprio delle pareti [kNm]	Carico dei solai [kNm]	Azione di archi o volte [kNm]	Azione dei tiranti [kNm]
	1	0,0	0,0	0,0	0,0
	2	0,0	0,0	0,0	0,0
	3	0,0	0,0	0,0	0,0
	4	0,0	0,0	0,0	0,0
*					

MOMENTO DELLE AZIONI RIBALTANTI						
esistenza solaio	Ribaltamento delle elevazioni:	Inerzia delle pareti [kNm]	Inerzia dei solai [kNm]	Inerzia di archi o volte [kNm]	Spinta statica di archi o volte [kNm]	Spinta statica della copertura [kNm]
0	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0	4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Figura 3.10: Caselle OUTPUT del foglio di calcolo

Il risultato è immediatamente normalizzato rispetto all'accelerazione di riferimento, così da restituire il valore adimensionale, direttamente confrontabile con le soglie definite in precedenza (*Figura 3.11*).

λ0	PRESCRIZIONI OBBLIGATORIE		PRESCRIZIONI FACOLTATIVE					
	λ1	λ2	λ3	λ4	λ5	λ6	λ7	λ8
#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
INDICE NORMALIZZATO								
#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

Figura 3.11: I valori normalizzati dell'indice di sicurezza

Come già anticipato, oltre al valore iniziale λ_0, lo strumento fornisce in parallelo i valori λ_β (β= 1,…,8), che simulano l'effetto di differenti combinazioni di interventi di preconsolidamento. In questo modo l'utente può verificare, in tempo reale, come la parete si sposterebbe negli intervalli di sicurezza a seguito dell'applicazione delle prescrizioni obbligatorie o facoltative. Questo passaggio rappresenta un ausilio decisionale: consente infatti di individuare il set di interventi minimali necessari a riportare la parete in una condizione di stabilità accettabile, evitando sia interventi superflui sia eccessi di cautela che allungherebbero inutilmente i tempi di cantiere. La lettura finale dei risultati deve essere sempre accompagnata da un riscontro progettuale e dal coordinamento con le altre attività di cantiere. Solo quando il valore di λ risulta collocato in un intervallo che garantisce un livello di sicurezza sufficiente (verde, o giallo con eventuale applicazione delle prescrizioni previste), è possibile pianificare in sicurezza le operazioni di smontaggio delle opere provvisionali. La collocazione del valore normalizzato all'interno di uno dei quattro intervalli di rischio costituisce l'elemento chiave per il passo successivo del Protocollo. In funzione dell'intervallo in cui ricade il risultato, infatti, il tecnico è chiamato a definire e attuare le prescrizioni preliminari necessarie a riportare la parete in condizioni di stabilità accettabili. Il capitolo seguente è dedicato proprio a questa fase operativa, illustrando i criteri di selezione delle prescrizioni, la loro sequenza applicativa e le modalità con cui esse interagiscono con il piano complessivo di smontaggio delle opere provvisionali

3.5 FASE 04_ ATTUAZIONE DELLE PRESCRIZIONI



Figura 3.12: Fase 04_ Attuazione delle prescrizioni

Il valore del coefficiente di sicurezza normalizzato, calcolato mediante lo strumento descritto nel capitolo precedente, rappresenta il punto di partenza per

la fase successiva del Protocollo: la definizione e l'attuazione delle prescrizioni tecniche preliminari alla rimozione delle opere provvisionali. Questa fase ha l'obiettivo di riportare la porzione muraria interessata dal meccanismo di collasso in una condizione di stabilità sufficiente a consentire lo smontaggio in sicurezza, senza innescare cinematismi indesiderati. La scelta delle prescrizioni è guidata da un approccio graduale e mirato: si interviene in primo luogo con le misure obbligatorie, necessarie a garantire il raggiungimento di un livello minimo di sicurezza, e solo successivamente con eventuali misure facoltative, volte a incrementare ulteriormente il margine di sicurezza laddove lo si ritenga opportuno. In questa fase risulta nuovamente essenziale un confronto con le attività previste dal progetto di ricostruzione, al fine di garantire la coerenza tra le prescrizioni adottate e le lavorazioni programmate, evitando interventi ridondanti o potenzialmente interferenti con le opere definitive. Le prescrizioni sono state organizzate in due categorie: obbligatorie e facoltative. Le prime rappresentano interventi minimi e inderogabili, necessari a garantire la sicurezza dell'operazione di rimozione; le seconde hanno carattere migliorativo e possono essere adottate a discrezione del progettista per aumentare il margine di sicurezza, specialmente in contesti complessi o in presenza di criticità aggiuntive. Gli interventi obbligatori e le ragioni per cui sono stati suggeriti sono elencati di seguito:

- rimozione di tiranti metallici esistenti. Questo intervento nasce dal presupposto che, se la porzione dell'edificio ha subito danni, i tiranti metallici hanno funzionato male o sono danneggiati. Anche se i tiranti metallici non vengono rimossi fisicamente, non dovrebbero essere presi in considerazione nella valutazione dell'indice di sicurezza. Supporre che siano funzionali andrebbe contro la sicurezza. Vale la pena osservare che, per quanto riguarda l'indice di sicurezza, tale rimozione corrisponde alla scomparsa del termine dipendente dall' C_j. Questo fatto prevede una riduzione del valore dell'indice di sicurezza e, di conseguenza, un aumento del livello di rischio. È importante notare che questi tiranti metallici erano già presenti all'interno degli edifici prima degli eventi sismici e prima dell'installazione del puntellamento temporaneo;
- non considerare azioni orizzontali dovute ad archi, volte e tetti spingenti. Tali azioni orizzontali aumentano il momento di ribaltamento della porzione danneggiata dell'edificio e i loro effetti sono indipendenti dal verificarsi di eventi sismici. L'eliminazione delle azioni orizzontali può essere effettuata assemblando tiranti metallici temporanei in archi o volte, che possono anche diventare permanenti se compatibili con il progetto di restauro. Gli effetti della spinta dei tetti possono essere trascurati smontando il tetto prima della rimozione dei puntellamenti provvisori. Vale la pena osservare che tali azioni corrispondono matematicamente alla scomparsa del termine dipendente dall' H_h, fornendo così un aumento dell'indice di sicurezza e una riduzione generale del livello di rischio;

Gli interventi facoltativi hanno lo scopo di fornire la versatilità di cui sopra. Gli operatori coinvolti nella procedura possono scegliere la tipologia e il numero

degli interventi opzionali, prima di procedere alla rimozione. Gli interventi opzionali e le varie combinazioni tra loro incidono sul valore dell'indice di sicurezza, aumentando il valore di $\tilde{\lambda}$ ottenuto senza considerare alcun intervento preventivo.

- Installazione di puntellamenti verticali di solai e/o volte. Questo intervento riduce il carico sulla parete o sulla porzione di edificio che ha mostrato un meccanismo di ribaltamento. Produce generalmente una diminuzione dell'indice di sicurezza perché viene meno il contributo stabilizzante del peso proprio di solai e volte, mentre rimane invariato il contributo al ribaltamento, dovuto agli effetti sismici inerziali orizzontali. La valutazione dell'indice di sicurezza con e senza il puntellamento verticale interno, fornisce un'indicazione della convenienza di ripristinare solai e volte (con la conseguente rimozione dei puntellamenti verticali) prima di rimuovere i tamponamenti esterni;
- demolizione di pavimenti e/o volte. Questo intervento preventivo elimina sia le forze di stabilizzazione gravitazionale che le forze di ribaltamento inerziale sismiche. Per le volte, la demolizione annulla anche le forze orizzontali statiche, che aumentano i momenti di ribaltamento indipendentemente dalle azioni sismiche. In generale, poiché il contributo inerziale al ribaltamento è maggiore del contributo stabilizzante dovuto al peso proprio, questo intervento produce un aumento dell'indice di sicurezza. Se la loro demolizione è inclusa nel progetto di restauro sismico, allora questo intervento preventivo è altamente consigliato.

I valori λ_0 e λ_β restituiti dal foglio di calcolo, presentati nel capitolo precedente, rappresentano lo strumento per simulare in modo progressivo l'effetto delle prescrizioni tecniche sulla sicurezza della parete. La *Tabella 3.2* riporta la legenda completa delle configurazioni considerate, distinguendo tra prescrizioni obbligatorie e facoltative.

Tabella 3.2: Indici di sicurezza

LEGENDA MOLTIPLICATORE Λ			
	λ_0	Calcolo coincidente con Moltiplicatore di Collasso	
PRESCR. OBBLIGAOTRIE	λ_1	λ dipende solo dai carichi gravitazionali e dalla geometria di muro, solaio e volte	Calcolato eliminando la spinta di archi, volte e copertura
	λ_2		Calcolato trascurando l'effetto di catene esistenti
PRESCRIZIONI FACOLTATIVE	λ_3	λ dipende solo dai carichi gravitazionali e dalla geometria del muro	Calcolato considerando la puntellatura dei solai
	λ_4		Calcolato considerando la puntellatura delle volte
	λ_5		Calcolato considerando la puntellatura di solai e volte
	λ_6		Calcolato considerando la rimozione dei solai
	λ_7		Calcolato considerando la rimozione delle volte
	λ_8		Calcolato considerando la rimozione di solai e volte

La *Figura 3.13* mostra qualitativamente gli effetti previsti degli interventi preventivi sull'indice di sicurezza. In generale, gli interventi preliminari obbligatori e facoltativi aumentano il valore dell'indice di sicurezza.

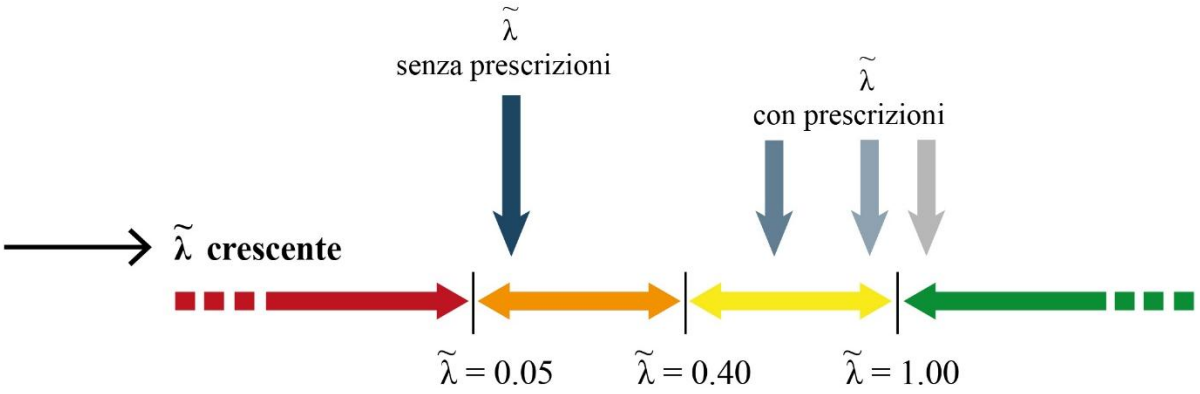


Figura 3.13: Effetto prescrizioni obbligatorie e facoltative

3.6 FASE 05_ SMONTAGGIO DEI PUNTELLI



Figura 3.14: Fase 05_ Rimozione dei puntelli

Una volta raggiunto, attraverso le prescrizioni obbligatorie e facoltative, un livello di sicurezza considerato accettabile, il Protocollo consente di procedere con la pianificazione e l'esecuzione delle operazioni di smontaggio delle opere provvisionali. Questa fase è particolarmente delicata, poiché rappresenta il momento in cui la struttura torna progressivamente a comportarsi in maniera autonoma, senza il contributo dei puntellamenti provvisori. È quindi fondamentale che lo smontaggio avvenga secondo una sequenza controllata, monitorata e coordinata con le altre attività di cantiere, così da garantire la sicurezza degli operatori e la stabilità residua della costruzione. Si riportano ora le prescrizioni previste per ciascun intervallo.

- Intervallo rosso: nel caso più critico, anche dopo l'applicazione delle prescrizioni obbligatorie e facoltative, l'indice di sicurezza permane nel livello più basso. Questa condizione è associata al massimo rischio di collasso della parete e rende impossibile procedere alla rimozione dei puntellamenti fino a quando non siano state eseguite operazioni preliminari di riparazione o ripristino strutturale. In tale scenario, il progetto di restauro deve prevedere come prioritarie le lavorazioni necessarie a ristabilire la continuità e la monoliticità della muratura interessata dal meccanismo di collasso. Qualora i puntellamenti interferiscano con l'organizzazione del cantiere o ostacolino gli interventi di consolidamento, è necessario procedere preliminarmente alla cucitura delle principali linee di frattura, scelta progettuale che dipenderà dalla tipologia di muratura e dal suo stato di conservazione.
- Intervallo arancione: quando l'indice di sicurezza si colloca nell'intervallo arancione, lo smontaggio deve essere eseguito con estrema attenzione, anche nel caso in cui siano già state adottate le prescrizioni migliorative. Queste ultime, infatti, devono essere comunque implementate, in quanto contribuiscono a ridurre il rischio residuo durante le operazioni di ripristino. In questo scenario è possibile pianificare una rimozione parziale e progressiva dei puntellamenti, riducendo ad esempio il numero di tiranti o di nastri di trazione provvisori. Nel caso di edifici multipiano, i puntellamenti devono essere rimossi solo nei livelli oggetto dell'intervento, mantenendo attivi quelli

relativi ai piani superiori o inferiori e proseguendo il monitoraggio in continuo.

- Intervallo giallo: un indice di sicurezza compreso nell'intervallo giallo è associato a un livello di rischio relativamente basso, ma richiede comunque prudenza per le possibili incertezze derivanti dalle operazioni, come demolizioni parziali o interventi localizzati. La rimozione deve essere effettuata in modo graduale e coordinato con l'avanzamento delle lavorazioni, consentendo agli operatori di osservare il comportamento della struttura tramite il sistema di monitoraggio installato. Anche in questo caso, la riduzione dei puntellamenti deve essere progressiva, così da garantire la stabilità in ogni fase del cantiere.
- Intervallo verde: se l'indice di sicurezza ricade nell'intervallo verde, il livello di sicurezza è considerato accettabile e i puntellamenti provvisori possono essere rimossi completamente all'inizio degli interventi di ripristino. Tuttavia, trattandosi comunque di un edificio danneggiato da sisma, è raccomandato mantenere attivo il sistema di monitoraggio per tutta la durata dei lavori, così da individuare tempestivamente eventuali comportamenti anomali e prevenire situazioni di pericolo.

A questo punto, le informazioni ottenute dal calcolo dell'indice di sicurezza e dalla classificazione nei quattro intervalli di rischio vengono tradotte in un piano di intervento concreto. Tale passaggio non avviene in modo informale, ma viene formalizzato attraverso la compilazione di una Scheda per la comprensione del contesto sviluppata nell'ambito della presente ricerca, concepita come strumento di raccordo tra la valutazione analitica e la fase esecutiva, come mostrato nella *Figura 3.15*.

La scheda assume un ruolo strutturale all'interno del Protocollo, poiché consente di trasformare l'esito numerico dell'analisi in indicazioni operative coerenti con le specificità del cantiere. Essa non si limita a registrare informazioni, ma organizza in modo sistematico i dati necessari alla pianificazione dello smontaggio, rendendo esplicite le condizioni al contorno che possono influenzare la sicurezza delle operazioni. In primo luogo, viene definito il contesto di pertinenza del cantiere, ovvero l'inquadramento dell'intervento all'interno del tessuto urbano o del complesso edilizio, con particolare riferimento alle condizioni di accessibilità, alla presenza di vincoli architettonici o paesaggistici, nonché alla prossimità di elementi strutturali ancora vulnerabili o instabili. Successivamente, la scheda documenta lo stato di conservazione e di degrado dei puntellamenti al momento della loro rimozione. Questo passaggio consente di valutare eventuali criticità legate al prolungato utilizzo di elementi non progettati per durare nel tempo, come ad esempio l'indebolimento di connessioni lignee, l'ossidazione di componenti metallici o la perdita di verticalità di aste e montanti. La conoscenza puntuale di tali aspetti consente di prevenire rischi durante la dismissione, spesso sottovalutati a causa della percezione errata che lo smontaggio sia una fase "residuale" dell'intervento.

0	***Tipologia puntellamento***		
		Soluzione	Materiale
0.1	Punt. Di Contrasto		
0.2	Punt. Di Ritegno		
0.3	Punt. Di Sostegno e Sbadacchiature		
0.4	Punt. Di Sostegno Solai e Balconi		
0.5	Centinatura		
0.6	Tirantatura		
0.7	Cerchiatura		
0.8	Incamiciatura		
1	***Conoscenza***		
1.1	*Stato di Degrado*		
1.1.1	Struttura in legno	Presenza tarli	
		Muffe	
		Stato collegamenti	
1.1.2	Struttura Metallica	Stato deformazioni	
		Stato corrosione	
		Stato efficienza giunti	
		Stato efficienza collegamenti	
1.2	*Area di pertinenza manufatto*		
1.2.1	Area Pubblica		
		Occupazione suolo pubblico	
		Accesso da strada	
		Accesso	
		Vicinanza cantieri limitrofi	
		Vicinanza edifici limitrofi	
		Interferenza con mezzi limitrofi	
1.2.2	Area Privata		
		Occupazione suolo pubblico	
		Accesso da strada	
		Accesso	
		Vicinanza cantieri limitrofi	
		Vicinanza edifici limitrofi	
		Interferenza con mezzi limitrofi	
2	***Procedura di Rimozione***		
2.1	*Tipologia puntellamento*		
2.1.1	Punt. Di Contrasto	RIF. SCHEDA 1	
2.1.2	Punt. Di Ritegno	RIF. SCHEDA 2	
2.1.3	Punt. Di Sostegno e Sbadacchiature	RIF. SCHEDA 3	
2.1.4	Punt. Di Sostegno Solai e Balconi	RIF. SCHEDA 4	
2.1.5	Centinatura	RIF. SCHEDA 5	
2.1.6	Tirantatura	RIF. SCHEDA 6	
2.1.7	Cerchiatura	RIF. SCHEDA 7	
2.1.8	Incamiciatura	RIF. SCHEDA 8	
2.2	*Mezzi e Attrezzature per Rimozione*		
2.2.1	Gru	si	
2.2.2	Autogrù	no	

Figura 3.15: Scheda di Contesto

Il cuore della scheda è rappresentato dalla procedura di rimozione vera e propria: è stato sviluppato nella sezione 2: Procedura di Rimozione. Si tratta di un sistema di schede tecniche operative - ognuna corrispondente a un tipo specifico di puntellamento - destinate a guidare le operazioni di smontaggio in modo ordinato, graduale e sicuro. Queste schede non sono semplici riassunti di cantiere: rappresentano veri e propri strumenti di lavoro che traducono una metodologia unificata in azione, supportando la valutazione preliminare, la pianificazione degli interventi e l'esecuzione sicura delle procedure di smontaggio. Ogni scheda include una descrizione concisa della funzione strutturale dell'opera provvisionale, le configurazioni tipiche, la nomenclatura tecnica dei componenti e - cosa più importante - la sequenza operativa per la rimozione, suddivisa in verifiche preliminari, fasi da eseguire, attrezzature necessarie e rischi associati. Le schede sono pensate per essere utilizzate congiuntamente alle informazioni raccolte durante i sopralluoghi in loco e l'analisi tecnica, e si prestano bene all'integrazione nel Piano Operativo di Sicurezza (POS) e nel Piano di Sicurezza e Coordinamento (PSC), offrendo una base strutturata per la coordinazione tra il progettista strutturale, l'impresa esecutrice e il coordinatore della sicurezza. Le immagini presenti all'interno di ciascuna scheda sono state direttamente estrapolate da Gruppo di Lavoro NCP, Grimaz (2010). Si riporta ora per ciascuna scheda una sintesi operativa. Ciascuna verrà allegata alla presente Ricerca.

3.6.1 Scheda di rimozione 01_ Puntellatura di contrasto

La scheda dedicata alla puntellatura di contrasto descrive una tipologia di opera provvisionale utilizzata per stabilizzare edifici adiacenti tra loro, posti a distanza ravvicinata, mediante l'installazione di elementi orizzontali o inclinati che contrastano spinte reciproche. Questo sistema consente di impedire deformazioni o cedimenti fuori piano, particolarmente frequenti in contesti post-sismici o di degrado avanzato. La procedura di smontaggio è organizzata in tre fasi principali: verifiche preliminari, operazioni preliminari e rimozione degli elementi. Le verifiche iniziali comprendono il controllo dell'idoneità e funzionalità della puntellatura, la presenza di consolidamenti strutturali aggiuntivi e l'esistenza di un impalcato sicuro per operare in quota. Viene verificata la portanza del piano di lavoro, la presenza di parapetti, sottoponte nei casi di dislivello superiore a 2,5 metri, e accessi sicuri. Laddove non siano possibili protezioni collettive, è obbligatorio l'uso di dispositivi di protezione individuale contro le cadute. Prima della rimozione vera e propria si procede alla bonifica dell'area, eliminando materiali depositati o pericolanti. La rimozione degli elementi inizia dall'alto e prosegue progressivamente verso il basso, in modo da non compromettere la stabilità della struttura residua. Prima dello smontaggio di traversi e controventi, è indispensabile verificarne l'assenza di sollecitazioni. Qualora gli elementi siano troppo pesanti o ingombranti, si provvede alla loro sezionatura per agevolarne la movimentazione. Gli elementi rimossi non devono mai essere lasciati sulla struttura di puntellamento, ma immediatamente trasferiti in apposite aree di stoccaggio. La procedura impone una supervisione continua da parte del personale preposto, con verifica costante dell'assenza di cedimenti o movimenti strutturali. Inoltre, devono essere predisposte misure di emergenza ed

evacuazione in caso di improvviso collasso. Infine, vengono elencati i macchinari e attrezzature impiegati, tra cui ponteggi metallici, piattaforme elevabili, mezzi di sollevamento, attrezzi da taglio e strumenti manuali. I principali rischi identificati includono cadute di materiali, infortuni da taglio o schiacciamento, cadute dall'alto e malfunzionamenti legati all'uso di attrezzature complesse.

3.6.2 Scheda di rimozione 02_ Puntellatura di ritegno

La scheda relativa alla puntellatura di ritegno descrive un sistema provvisionale concepito per contrastare la prosecuzione di cinematismi instabili, quali ribaltamenti o spanciamenti di pareti o elementi strutturali. Si tratta di una struttura di opposizione che, attraverso l'utilizzo di puntelli disposti secondo configurazioni specifiche, assicura un'azione contenitiva fino all'esecuzione degli interventi di consolidamento definitivo. La procedura di smontaggio si articola in più fasi. Le verifiche preliminari riguardano l'accertamento dell'idoneità e della funzionalità dell'opera provvisionale, la presenza di eventuali strutture secondarie di supporto già installate e la verifica dei consolidamenti strutturali. Viene inoltre valutata la disponibilità di adeguati mezzi di sollevamento e piattaforme per operare in quota. In questa fase si procede anche all'imbragatura dei puntelli e alla rimozione di diagonali e traversi intermedi eventualmente coinvolti. Le operazioni preliminari prevedono la bonifica dell'area: rimozione di materiali instabili o caduti e messa in sicurezza delle superfici murarie adiacenti. La fase di rimozione degli elementi è condotta in modo graduale e controllato. I puntelli vengono imbragati mediante fasce o catene e rimossi con mezzi di sollevamento, evitando ogni interferenza con gli altri elementi della puntellatura. Diagonali e traversi devono essere rimossi solo dopo averne verificato la completa de-tensionatura, e si presta particolare attenzione alla stabilità dei correnti di ripartizione. I puntelli vengono poi adagiati a terra in posizione orizzontale per il disassemblaggio, e nessun componente deve essere lasciato sulla struttura residua, ma trasferito subito nell'area di stoccaggio. Durante tutte le operazioni, è richiesta una supervisione costante da parte di personale preposto, con il compito di garantire l'aderenza alle prescrizioni del PSC e del POS, di monitorare eventuali movimenti imprevisti della struttura e di assicurare la prontezza nell'attivare le procedure di evacuazione in caso di cedimento. Le attrezzature impiegate includono ponteggi metallici, piattaforme di lavoro elevabili, mezzi di sollevamento, strumenti da taglio e attrezzi manuali. I rischi principali associati alla procedura comprendono cadute di materiale, infortuni da taglio e schiacciamento, crolli strutturali e uso di attrezzature complesse in condizioni operative critiche.

3.6.3 Scheda di rimozione 03_ Puntellatura di sostegno e sbadacchiatura

La scheda relativa alla puntellatura di sostegno e sbadacchiatura delle aperture descrive una tipologia di opera provvisionale utilizzata per prevenire il fenomeno di spanciamento laterale dei maschi murari adiacenti a varchi, quali porte o finestre. Questo tipo di intervento è essenziale nei contesti post-sismici, dove la perdita di continuità muraria può compromettere la stabilità locale delle pareti. La procedura di smontaggio inizia con una serie di verifiche preliminari, che

comprendono l'accertamento dell'idoneità e funzionalità dell'opera provvisionale, il controllo della corretta installazione di eventuali strutture di supporto sostitutive e la verifica dell'efficacia di consolidamenti già effettuati. Si procede poi a una valutazione dell'impalcato su cui operare, che deve presentare adeguata resistenza e portanza, parapetti di protezione, sottoponte in presenza di dislivelli significativi (>250 cm) e accessi sicuri. Se le misure collettive anticaduta non sono applicabili, è richiesto l'uso obbligatorio di DPI anticaduta. Le operazioni preliminari prevedono la bonifica delle superfici interessate dalla presenza di materiali instabili o caduti. Nella fase di rimozione degli elementi, diagonali e traversi intermedi vengono smontati con cautela, previa verifica della loro assenza di sollecitazioni. Qualora previsto dal progetto esecutivo, è possibile procedere a uno smontaggio parziale per consentire ulteriori interventi strutturali. Gli elementi rimossi devono essere immediatamente conferiti in un'area di deposito designata, evitando qualsiasi accumulo sulla struttura ancora in opera. È fondamentale monitorare possibili cedimenti di porzioni non coese della muratura. Durante tutte le fasi, è richiesta supervisione continua da parte del personale preposto, che deve assicurare la corretta applicazione delle misure previste dai piani PSC e POS, rilevare eventuali movimenti imprevisti e garantire l'attivazione delle procedure di emergenza in caso di instabilità. Le attrezzature utilizzate includono ponteggi metallici, piattaforme elevabili, mezzi per il sollevamento, attrezzi da taglio e utensili manuali. I principali rischi individuati comprendono cadute di materiale, traumi da taglio o schiacciamento, cadute dall'alto e crolli improvvisi della struttura.

3.6.4 Scheda di rimozione 04_ Puntellatura di sostegno solai e balconi

Questa scheda è dedicata alla puntellatura di solai e balconi, una misura provvisionale concepita per alleggerire e sostenere elementi orizzontali che presentano segni di cedimento o deformazioni eccessive, spesso a seguito di eventi sismici o degrado avanzato. La funzione principale del sistema è quella di assorbire i carichi gravanti, evitando sollecitazioni aggiuntive che potrebbero compromettere ulteriormente la stabilità dell'elemento strutturale. La dismissione della puntellatura richiede una valutazione iniziale accurata, che riguarda la coerenza dell'intervento con la situazione statica residua, la funzionalità dei dispositivi installati e l'eventuale predisposizione di sostegni alternativi, già attivi o da attivare. In parallelo, si controllano le condizioni del piano operativo: deve essere stabile, ben accessibile e in grado di sopportare il peso degli operatori e delle attrezzature impiegate. Dove non siano presenti sistemi anticaduta collettivi efficaci, è necessario ricorrere a dispositivi individuali. In preparazione allo smontaggio vero e proprio, si procede a liberare l'area di intervento da eventuali materiali sfusi o pericolanti e si verifica l'integrità delle superfici murarie limitrofe. Le operazioni devono seguire un ordine ben definito: si inizia sempre dalla parte più elevata della struttura per poi proseguire verso i livelli inferiori, così da non alterare l'equilibrio del sistema. È fondamentale rimuovere con attenzione controventi e irrigidimenti, e verificare che ogni puntello non sia ancora soggetto a carichi prima di procedere alla sua estrazione. In presenza di travi secondarie di ripartizione, queste vanno

temporaneamente sostenute durante la fase di rimozione per evitare cedimenti improvvisi. Una volta smontati, tutti i componenti devono essere immediatamente collocati in un'area di deposito sicura, senza lasciarli in appoggio su parti ancora attive della puntellatura. Il controllo delle operazioni è affidato a figure preposte, incaricate di monitorare costantemente la sicurezza del cantiere, accertare eventuali movimenti imprevisti e garantire che le procedure previste dai piani di sicurezza (PSC e POS) siano effettivamente applicate. Devono inoltre essere pronte ad attivare tempestivamente le procedure di emergenza in caso di collasso. Per le operazioni vengono generalmente utilizzate piattaforme mobili, trabattelli, mezzi di sollevamento, attrezzature da taglio e utensili manuali. I rischi principali includono cadute di oggetti, incidenti da contatto con utensili, cadute dall'alto e possibilità di crolli parziali o totali dell'elemento sostenuto.

3.6.5 Scheda di rimozione 05_ Opere di centinatura

La centinatura di archi e volte è un sistema provvisionale concepito per sostenere temporaneamente il peso gravante sugli archi, ridistribuendo i carichi verso terra e alleggerendo le sollecitazioni che agiscono sui piedritti. Questa soluzione è essenziale quando la stabilità originaria dell'arco risulta compromessa, ad esempio in seguito a eventi sismici o dissesti strutturali. Lo smontaggio di tale struttura richiede un approccio metodico, articolato in diverse fasi. Si comincia con le verifiche preliminari, che prevedono il controllo dello stato di conservazione e dell'efficienza dell'opera, l'eventuale presenza di puntellamenti alternativi già predisposti e la conferma dell'avvenuto consolidamento della struttura circostante. Le operazioni di preparazione includono la rimozione di materiali sciolti o pericolanti, e la verifica della sicurezza del piano di lavoro, che deve essere stabile, dotato di parapetti e, se necessario, di sottoponte per operare a quote elevate. Dove i dispositivi collettivi di protezione non sono attuabili, si rende obbligatorio l'impiego di DPI specifici per i lavori in quota. Durante la fase di dismissione vera e propria, si procede con la rimozione progressiva dei componenti: dapprima gli elementi di copertura dei giunti, quindi i traversi intermedi e longitudinali, e infine gli elementi principali della centina. È fondamentale che ogni pezzo venga rimosso solo dopo aver accertato l'assenza di tensioni residue. In alcuni casi, se previsto dal progetto, può essere eseguita una rimozione parziale per consentire interventi di consolidamento. Tutti i componenti smontati devono essere immediatamente trasferiti nelle aree di stoccaggio dedicate, per evitare sovraccarichi residui sulla struttura ancora in opera. Il personale incaricato della supervisione deve monitorare attentamente ogni fase dell'intervento, verificando l'assenza di movimenti anomali e assicurandosi che vengano rispettate le disposizioni contenute nel PSC e nel POS. Devono inoltre essere predisposte eventuali procedure di evacuazione d'emergenza. Tra le attrezzature utilizzate figurano trabattelli, piattaforme aeree, dispositivi di sollevamento, utensili da taglio e attrezzi manuali. I rischi connessi includono infortuni da caduta di materiali, incidenti legati all'uso di utensili, cadute dall'alto e cedimenti localizzati della struttura provvisionale o dell'arco stesso.

3.6.6 Scheda di rimozione 06_ Opere di tirantatura

La tirantatura rappresenta una soluzione provvisionale basata sull'impiego di elementi in trazione—solitamente funi o barre metalliche—utilizzati per contenere spinte anomale e instabilità, come il ribaltamento o lo svergolamento di pareti murarie. La sua efficacia risiede nella capacità di vincolare a distanza porzioni di struttura, distribuendo le forze attraverso un sistema di tiranti e ancoraggi opportunamente dimensionati. Lo smantellamento di questo sistema richiede un approccio prudente e sequenziale. Prima di ogni intervento, è necessario verificare che l'opera non sia più essenziale al mantenimento dell'equilibrio della struttura, e che siano eventualmente già attivi sistemi alternativi di contenimento. Contestualmente, si valuta la presenza di rinforzi strutturali e la coerenza del contesto operativo con quanto previsto in fase di progetto. A livello logistico, è fondamentale che il personale operi da postazioni sicure e certificate, con impalcati adeguati al carico, percorsi protetti, parapetti e sottoponti nei casi in cui siano presenti dislivelli considerevoli. Quando le protezioni collettive non sono realizzabili, è obbligatorio ricorrere a sistemi anticaduta individuali. La sequenza operativa di rimozione inizia con l'allentamento graduale delle funi, cominciando dall'elemento superiore. Questo passaggio deve essere accompagnato dal supporto fisico ai ritti verticali, per prevenire instabilità durante la decompressione del sistema. Si procede quindi alla rimozione di funi, vincoli e aste, seguendo sempre l'ordine stabilito in fase progettuale. Qualora necessario, il disassemblaggio può essere limitato ad alcune sezioni per consentire ulteriori interventi di consolidamento. Tutti i componenti disattivati devono essere immediatamente rimossi dalla zona di lavoro e collocati in aree designate, in modo da mantenere l'ambiente ordinato e privo di ostacoli potenzialmente pericolosi. È essenziale che l'operazione sia seguita in ogni momento da un tecnico incaricato della supervisione, responsabile di monitorare l'integrità della struttura e di intervenire tempestivamente in caso di anomalie o emergenze. Gli strumenti impiegati includono sistemi di sollevamento leggeri, ponteggi, piattaforme mobili e attrezzi specifici per il disinnesto meccanico dei tiranti. Tra i pericoli associati figurano tensioni residue non controllate, distacchi improvvisi di elementi, danni da taglio o impatto e, nei casi peggiori, il collasso parziale delle parti strutturali precedentemente vincolate.

3.6.7 Scheda di rimozione 07_ Opere di cerchiatura

La cerchiatura è una tecnica provvisionale impiegata per migliorare la resistenza a compressione di elementi verticali isolati, come pilastri o colonne, contrastandone il rischio di spanciamento e l'espulsione laterale. Questo sistema, basato sull'applicazione di fasce metalliche, cricchetti e angolari, si configura come un contenimento attivo che mantiene il vincolo trasversale durante la fase critica del danneggiamento strutturale. Lo smontaggio dell'intervento deve avvenire in modo ordinato, partendo da una serie di controlli iniziali: si valuta l'effettiva necessità di mantenere la cerchiatura, si verifica la presenza di rinforzi strutturali alternativi già installati e si accerta che l'ambiente di lavoro rispetti i requisiti di stabilità, accessibilità e sicurezza. Particolare attenzione va posta alla presenza di impalcati idonei, sottoponti nei dislivelli superiori a 250 cm e

parapetti di protezione. In assenza di misure collettive, l'impiego di DPI anticaduta è obbligatorio. Le operazioni preliminari prevedono la bonifica dell'area da materiali pericolanti e depositi accidentali. La rimozione vera e propria inizia con l'allentamento controllato dei cricchetti, a partire da quelli posti più in alto. Durante questa fase, è fondamentale sostenere con attenzione gli elementi metallici—ferri o angolari—in modo da evitare spostamenti incontrollati o cadute. Una volta liberate le fasce, si procede alla loro estrazione e alla successiva rimozione dei restanti componenti della cerchiatura. Se il progetto lo prevede, la dismissione può avvenire in modo parziale per facilitare interventi strutturali locali. Tutti i materiali rimossi devono essere immediatamente trasportati in zone di deposito sicure e organizzate, evitando di lasciare elementi appoggiati alla struttura principale. L'intera fase deve essere svolta sotto costante supervisione tecnica, con personale qualificato incaricato di garantire il rispetto delle disposizioni contenute nei piani di sicurezza (POS e PSC), monitorare eventuali segnali di instabilità e coordinare le procedure d'emergenza in caso di imprevisti. Tra le attrezzature più comuni, si segnalano trabattelli, piattaforme elevabili, sistemi di sollevamento, utensili da taglio e strumenti manuali. I principali fattori di rischio includono cadute di materiali o persone, lesioni da utensili, schiacciamento e crolli improvvisi di elementi strutturali compromessi.

3.6.8 Scheda di rimozione 08_ Opere di incamiciatura

L'incamiciatura è un intervento provvisionale volto a migliorare la stabilità di pareti murarie indebolite, attraverso il contenimento della loro deformabilità trasversale. Questo tipo di opera, realizzata mediante casseri e tiranti, ha lo scopo di aumentare la capacità resistente a compressione delle murature, limitando spanciamenti e cedimenti localizzati. La fase di disinstallazione deve essere gestita con attenzione, a partire dalle verifiche preliminari, che comprendono il controllo dello stato dell'opera, la presenza di eventuali rinforzi strutturali alternativi già installati, e la compatibilità tra l'intervento in corso e le condizioni attuali dell'edificio. Il piano di lavoro deve garantire condizioni operative sicure: accessibilità adeguata, portanza sufficiente per materiali e operatori, parapetti, sottoponte per dislivelli e, se necessario, DPI per il lavoro in quota. Prima di rimuovere i componenti, si procede alla pulizia della zona operativa, eliminando frammenti, detriti o elementi instabili sulle pareti. La rimozione vera e propria segue una sequenza precisa: si comincia allentando gradualmente i tenditori (partendo dai più alti), assicurandosi che i casseri siano sorretti per evitarne il distacco improvviso. Una volta disattivati i tiranti e rimosse eventuali piastre di collegamento, si procede allo smontaggio dei casseri. L'intervento può essere effettuato anche in maniera parziale, qualora il progetto preveda un consolidamento intermedio. Tutti i materiali dismessi devono essere gestiti in modo ordinato, trasferendoli immediatamente nelle aree di deposito designate, così da mantenere la zona di lavoro sgombra e sicura. Durante l'intera attività, un tecnico incaricato deve monitorare lo stato della struttura, prevenire situazioni di rischio e verificare il rispetto delle prescrizioni riportate nei piani di sicurezza (PSC e POS). In caso di instabilità imprevista, deve essere attivata

tempestivamente la procedura di evacuazione. Le operazioni richiedono l'uso di attrezzature come ponteggi, piattaforme elevabili, dispositivi di sollevamento, strumenti da taglio e utensili manuali. I rischi connessi comprendono cadute di materiale, lesioni da attrezzature, perdita dell'equilibrio in quota, schiacciamenti e cedimenti improvvisi.

3.7 FASE 06_ VALUTAZIONE AMBIENTALE DEL FINE VITA



Figura 3.16:Fase 06_Valutazione ambientale

Il sesto e ultimo passo del Protocollo introduce una riflessione fondamentale che segue le operazioni di rimozione: una volta concluso lo smontaggio delle opere provvisionali, è necessario interrogarsi su quale sia la gestione più opportuna del materiale dismesso. In altri termini, il Protocollo estende la valutazione oltre la fase esecutiva, ponendo l'attenzione sulle possibili destinazioni dei componenti rimossi — riutilizzo, riciclo o smaltimento — e sulle conseguenze ambientali che ciascuna scelta comporta. L'obiettivo del passo è quindi quello di fornire un quadro di riferimento per la valutazione ambientale delle strategie di gestione post-rimozione, basata sui principi del *Life Cycle Assessment* (LCA). Tale valutazione permette di individuare, in modo oggettivo e comparabile, quale opzione risulti ambientalmente più conveniente, supportando così decisioni coerenti con i criteri di sostenibilità e con i principi dell'economia circolare. Nei capitoli successivi verranno illustrati la struttura metodologica dell'approccio adottato, la base dati di riferimento costruita attraverso l'analisi comparativa delle diverse tipologie di puntellamento e la modalità con cui i risultati ottenuti sono stati integrati nel Protocollo, fino a definire un sistema di supporto decisionale applicabile ai casi studio reali.

3.7.1 Struttura metodologica dell'approccio

L'applicazione della metodologia LCA all'interno del Protocollo si basa pienamente sui principi e sui requisiti stabiliti dalle norme UNI EN ISO 14040 e UNI EN ISO 14044, già illustrate nel Capitolo 2.5, e li traduce in un percorso operativo specifico per la valutazione delle strategie di gestione post-smontaggio delle opere provvisionali. In questa fase, i fondamenti metodologici dell'LCA vengono infatti adattati alle caratteristiche dei puntellamenti analizzati e ai dati tecnici disponibili nei casi studio, così da garantire coerenza normativa e, al tempo stesso, applicabilità pratica all'interno del processo decisionale del Protocollo. Nel presente studio l'applicazione della metodologia segue integralmente la struttura prevista dalle norme ISO, articolandosi nelle quattro fasi fondamentali – definizione di obiettivi e campo di applicazione,

compilazione dell'inventario, valutazione degli impatti e interpretazione dei risultati – che sono state adattate alle specificità delle opere provvisionali e ai dati raccolti nei casi studio. Nel paragrafo che segue vengono quindi descritte le scelte metodologiche adottate in ciascuna fase, mentre i risultati quantitativi e l'analisi comparativa dei diversi sistemi di puntellamento sono riportati nel successivo *Capitolo 3.7.2*. L'applicazione dell'LCA non è stata condotta su configurazioni astratte, ma è stata circoscritta alle tipologie di puntellamento effettivamente emerse dall'analisi dei sessanta casi studio esaminati nella fase conoscitiva. In particolare, sono state selezionate le tre categorie risultate maggiormente ricorrenti nel contesto analizzato – sistemi in legno, sistemi metallici con profili HEA/IPE e sistemi tubolari in acciaio zincato – così da garantire coerenza tra osservazione empirica e modellazione ambientale. La prima fase è la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione (*goal & scope*). L'obiettivo dello studio è quello di confrontare l'impatto ambientale delle tre principali tipologie di puntellamento individuate attraverso l'analisi comparata di un campione di circa sessanta interventi di messa in sicurezza, come in seguito illustrato: puntelli in legno, sistemi metallici con elementi profilati di tipo HEA/IPE e sistemi tubolari in acciaio zincato. L'unità funzionale adottata è pari a 1 metro lineare di puntellamento in esercizio, con geometria e massa definite per ciascun materiale. Coerentemente con quanto raccomandato dalla norma ISO 14044, l'unità funzionale è stata definita come un metro lineare di puntellamento in esercizio, scelta che garantisce confrontabilità tra soluzioni tecniche con masse e configurazioni diverse. Tale impostazione è ampiamente utilizzata nella letteratura LCA applicata al settore edilizio, come osservato da Aktas & Bilec (2012), secondo i quali la definizione di un'unità funzionale omogenea costituisce un prerequisito essenziale per la robustezza comparativa dello studio. L'orizzonte temporale di 15 anni è stato assunto per rappresentare in modo realistico la permanenza prolungata delle opere provvisionali nel contesto aquilano. Come dimostrano le osservazioni condotte sul campo, a partire dal sisma del 6 aprile 2009 numerosi puntellamenti sono rimasti in esercizio per oltre un decennio, con interventi di manutenzione periodica. La soglia dei 15 anni consente pertanto di descrivere fedelmente questa condizione operativa. Anche in questo caso, la scelta è pienamente coerente con i criteri metodologici stabiliti dalle norme internazionali e con gli orientamenti presenti nella letteratura scientifica già richiamata: gli intervalli compresi tra 10 e 15 anni sono infatti comunemente adottati per componenti edilizi caratterizzati da vita utile limitata o soggetti a scenari di sostituzione e riuso. I confini di sistema sono stati impostati secondo un approccio *cradle-to-grave*, vale a dire includendo tutte le fasi del ciclo di vita del puntellamento, dalla produzione iniziale delle materie prime fino alla gestione del materiale al termine dell'utilizzo. In pratica, lo studio considera la produzione dei materiali (A1–A3), il trasporto verso il cantiere (A4), l'installazione (A5), le eventuali attività di manutenzione durante il periodo di permanenza (modulo B) e infine le fasi di smontaggio, trattamento e destino finale del materiale (C1–C4), in conformità alla struttura modulare prevista dalle norme europee EN 15804:2012+A2:2019 e UNI EN 15978:2011. Questa scelta consente di cogliere in modo completo le differenze tra materiali caratterizzati da

comportamenti molto diversi lungo il ciclo di vita, come la possibilità di riuso dei sistemi metallici o le emissioni associate alle fasi finali del legno. La seconda fase è l'analisi di inventario (LCI), durante la quale si procede alla raccolta e alla modellazione dei dati: è stato costruito un database dei flussi in ingresso e in uscita associati a 1 metro lineare di puntellamento per ciascuna tipologia considerata (legno, acciaio con profili HEA/IPE, sistemi tubolari in acciaio zincato), lungo tutte le fasi comprese nei confini di sistema: produzione dei materiali, trasporto al cantiere, installazione, manutenzione durante i 15 anni di esercizio e fine vita (smontaggio, conferimento e destinazione finale: riuso/riciclo/smaltimento). Per garantire coerenza, tracciabilità e riproducibilità dei dati, l'inventario è stato modellato utilizzando il software SimaPro 9.5, uno degli strumenti più diffusi e consolidati per le analisi LCA a livello internazionale, ampiamente impiegato sia in ambito accademico sia industriale per la completezza delle sue funzioni di modellazione. L'elaborazione dei processi elementari si basa sul database Ecoinvent 3.9, considerato uno dei più autorevoli e completi database disponibili, caratterizzato da dati verificati, processi documentati e un approccio sistematico di raccolta e validazione, in base a quanto riportato da Wernet et al. (2016). La terza fase, *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA), traduce i flussi inventariali raccolti nella fase precedente in indicatori ambientali, consentendo di valutare e confrontare le tre tipologie di puntellamento analizzate (legno, acciaio HEA/IPE, tubolari zincati). L'analisi è stata condotta in conformità con la UNI EN ISO 14040:2006 "Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Principi e quadro di riferimento" e la UNI EN ISO 14044:2021 "Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Requisiti e linee guida", applicando le categorie di impatto comunemente adottate per il settore delle costruzioni. Nel presente studio è stato adottato il metodo EF 3.0, già illustrato in termini generali nel *Capitolo 2.6*, in quanto particolarmente idoneo a rappresentare le differenze strutturali tra i tre sistemi di puntellamento analizzati. La presenza, nel metodo, di categorie di impatto armonizzate e di procedure integrate di normalizzazione consente infatti di confrontare in modo equilibrato materiali caratterizzati da comportamenti molto diversi lungo il ciclo di vita, come il legno e l'acciaio. L'adozione di EF 3.0 risulta inoltre funzionale alla modellazione dei benefici ambientali derivanti dalle pratiche di economia circolare, in particolare per quanto riguarda l'elevata percentuale di riciclo dei sistemi metallici e il recupero energetico dei materiali lignei. Tali aspetti rivestono un ruolo determinante nel confronto tra soluzioni provvisionali, poiché incidono in maniera significativa sugli impatti complessivi delle fasi di fine vita. L'utilizzo del metodo EF garantisce infine la piena coerenza dei risultati con il quadro normativo europeo previsto dalla UNI EN 15804, che rappresenta il riferimento metodologico principale per i prodotti da costruzione e costituisce quindi un ulteriore elemento di robustezza e confrontabilità dello studio.L'indicatore principale utilizzato è il Potenziale di Riscaldamento Globale (GWP, *Global Warming Potential*), espresso in chilogrammi di CO_2 equivalente (kg CO_2 eq). Il GWP misura il contributo di un gas serra all'effetto serra complessivo su un determinato orizzonte temporale, comparandolo alla CO_2 come unità di riferimento. In particolare, l'orizzonte di 100 anni (GWP100) adottato nello

studio corrisponde allo standard indicato da *Intergovernmental Panel on Climate Change* (2014) e recepito nelle norme europee (UNI EN 15804:2019 "Sostenibilità delle costruzioni – Dichiarazioni ambientali di prodotto – Regole quadro di sviluppo per categoria di prodotto"). Nel contesto specifico di questo lavoro, l'utilizzo del GWP è cruciale per due motivi principali. In primo luogo, esso rappresenta l'indicatore di sintesi più utilizzato nella comparazione tra materiali da costruzione, come sottolineato da Hauschild et al. (2018) in quanto permettono di comunicare in maniera immediata l'impatto climalterante associato alle diverse scelte tecnologiche. In secondo luogo, la contabilizzazione del carbonio biogenico nel legno – che durante la crescita sequestra CO_2 dall'atmosfera – genera un bilancio potenzialmente negativo, distinguendo in maniera netta i risultati di questa tipologia rispetto a quelli in acciaio. Tale aspetto rende il GWP particolarmente adatto per valutare i sistemi provvisionali oggetto di studio, nei quali la competizione tra materiali con caratteristiche molto diverse si gioca anche sulla capacità di ridurre le emissioni nette di gas serra. La fase di interpretazione, anch'essa condotta secondo le linee guida della norma ISO 14044, consiste nell'analisi critica dei risultati ottenuti, nell'identificazione delle fasi a maggiore impatto ambientale e nella verifica della coerenza interna dello studio. Nel contesto del Protocollo, tale interpretazione assume un ruolo operativo: i risultati ottenuti attraverso l'LCA sono infatti tradotti in parametri sintetici che permettono di confrontare in modo immediato le strategie di riuso, riciclo o smaltimento dei materiali, fornendo un supporto oggettivo alle decisioni tecniche nella gestione post-smontaggio. I valori e le elaborazioni quantitative derivanti dall'applicazione della metodologia sono approfonditi nel successivo *Capitolo 3.7.2.*

3.7.2 Valutazione ambientale

Al fine di rendere il Protocollo uno strumento replicabile e applicabile a contesti diversi è stato preliminarmente condotto un lavoro di ricognizione e analisi di un ampio campione di casi studio, comprendente sessanta interventi di messa in sicurezza e di rimozione di opere provvisionali realizzati in seguito a eventi sismici. L'obiettivo è quello di individuare, all'interno di tale campione, le soluzioni più ricorrenti in termini di materiali e configurazioni, così da poter definire un insieme rappresentativo di tipologie da sottoporre a valutazione ambientale e successivamente economica come riportato nella *Tabella 3.3*.

Tabella 3.3: Campione edifici

Nome edificio	**Indirizzo**	**Dimensione puntello**
Edificio 1	Piazza del Palazzo	Tubolari Ø 48 mm x 2.5 mm spessore
Edificio 2	Corso Vittorio Emanuele II	HEA 100 + staffe 250×250×12 mm con tirafondi chimici
Edificio 3	Via Roma	Legno 15×15 cm + giunti metallici 150×150×8 mm

Nome edificio	Indirizzo	Dimensione puntello
Edificio 4	Via Cimino	HEA 100 + staffe 250×250×12 mm con tirafondi chimici
Edificio 5	Corso Vittorio Emanuele II n.86	Legno 15×15 cm + giunti metallici 150×150×8 mm
Edificio 6	Piazza San Marco	IPE 140 + piastre 180×180×12 mm con bullonatura M16
Edificio 7	Villa Comunale	HEA 100 + staffe 250×250×12 mm con tirafondi
Edificio 8	Piazza Santa Maria Paganica	HEA 100 + staffe 250×250×12 mm con tirafondi
Edificio 9	Via Sallustio	Tubolari Ø 48 mm x 2.5 mm spessore
Edificio 10	Piazza Chiarino	IPE 140 + piastre 180×180×12 mm con bullonatura M16
Edificio 11	Via Santa Giusta	IPE 140 + piastre 180×180×12 mm con bullonatura M16
Edificio 12	Via Santa Giusta	HEA 100 + staffe 250×250×12 mm con tirafondi
Edificio 13	Piazza Santa Maria Paganica	IPE 140 + piastre 180×180×12 mm con bullonatura M16
Edificio 14	Via Paganica	Travi legno 20×20 cm
Edificio 15	Via Buccio da Ranallo	Travi legno 20×20 cm
Edificio 16	Via Roma	Tubolari Ø 60 mm x 3 mm spessore + piastre 200×200×10 mm
Edificio 17	Corso Vittorio Emanuele II	HEA 100 + staffe 250×250×12 mm con tirafondi
Edificio 18	Via Fortebraccio	HEA 100 + staffe 250×250×12 mm con tirafondi
Edificio 19	Via dell’Arcivescovado	IPE 140 + piastre 180×180×12 mm con bullonatura M16
Edificio 20	Piazza Duomo	HEA 100 + staffe 250×250×12 mm con tirafondi
Edificio 21	Via di Porta Paganica	Travi legno 20×20 cm
Edificio 22	Via del Carmine	IPE 140 + piastre 180×180×12 mm con bullonatura M16
Edificio 23	Via San Basilio	Travi legno 20×20 cm
Edificio 24	Via Fortebraccio	Travi legno 20×20 cm
Edificio 25	Via San Pietro	Travi legno 20×20 cm
Edificio 26	Via Roio	Tubolari Ø 48 mm x 2.5 mm spessore
Edificio 27	Via Garibaldi	IPE 140 + piastre 180×180×12 mm con bullonatura M16
Edificio 28	Piazza Regina Margherita	IPE 140 + piastre 180×180×12 mm con bullonatura M16
Edificio 29	Costa Masciarelli	Tubolari Ø 60 mm x 3 mm spessore + piastre 200×200×10 mm
Edificio 30	Via delle Grazie	Tubolari Ø 48 mm x 2.5 mm spessore

Nome edificio	Indirizzo	Dimensione puntello
Edificio 31	Via Navelli	IPE 140 + piastre 180×180×12 mm con bullonatura M16
Edificio 32	Via Accursio	IPE 140 + piastre 180×180×12 mm con bullonatura M16
Edificio 33	Via Bominaco	Legno 15×15 cm + giunti metallici 150×150×8 mm
Edificio 34	Via Sant'Amico	HEA 100 + staffe 250×250×12 mm con tirafondi chimici
Edificio 35	Via Antinori	Travi legno 20×20 cm
Edificio 36	Via dell'Arcivescovado	Travi legno 20×20 cm
Edificio 37	Via dell'Arcivescovado	Tubolari Ø 60 mm x 3 mm spessore + piastre 200×200×10 mm
Edificio 38	Piazza S. Margherita	Tubolari Ø 48 mm x 2.5 mm spessore
Edificio 39	Via San Bernardino	IPE 140 + piastre 180×180×12 mm con bullonatura M16
Edificio 40	Piazza San Domenico	IPE 140 + piastre 180×180×12 mm con bullonatura M16
Edificio 41	Via Tancredi da Pentima	HEA 100 + staffe 250×250×12 mm con tirafondi
Edificio 42	Via XX Settembre	HEA 100 + staffe 250×250×12 mm con tirafondi
Edificio 43	Via Camponeschi	IPE 140 + piastre 180×180×12 mm con bullonatura M16
Edificio 44	Via Guelfi	Tubolari Ø 48 mm x 2.5 mm spessore
Edificio 45	Via Arco di S. Biagio	HEA 100 + staffe 250×250×12 mm con tirafondi
Edificio 46	Via San Marciano	Legno 15×15 cm + giunti metallici 150×150×8 mm
Edificio 47	Via Fortebraccio	Travi legno 20×20 cm
Edificio 48	Via Garibaldi	Legno 15×15 cm + giunti metallici 150×150×8 mm
Edificio 49	Via Roma	Legno 15×15 cm + giunti metallici 150×150×8 mm
Edificio 50	Via Garibaldi	Tubolari Ø 48 mm x 2.5 mm spessore
Edificio 51	Via Santa Maria Paganica	Travi legno 20×20 cm
Edificio 52	Via Fortebraccio	IPE 140 + piastre 180×180×12 mm con bullonatura M16
Edificio 53	Via Sallustio	IPE 140 + piastre 180×180×12 mm con bullonatura M16
Edificio 54	Via Cimino	IPE 140 + piastre 180×180×12 mm con bullonatura M16
Edificio 55	Via dell'Arcivescovado	Travi legno 20×20 cm
Edificio 56	Via di Porta Paganica	Legno 15×15 cm + giunti metallici 150×150×8 mm

Nome edificio	Indirizzo	Dimensione puntello
Edificio 57	Via Fortebraccio	IPE 140 + piastre 180×180×12 mm con bullonatura M16
Edificio 58	Via Santa Giusta	Tubolari Ø 60 mm x 3 mm spessore + piastre 200×200×10 mm
Edificio 59	Corso Vittorio Emanuele II	Tubolari Ø 60 mm x 3 mm spessore + piastre 200×200×10 mm
Edificio 60	Via Roma	Tubolari Ø 48 mm x 2.5 mm spessore

A partire dai dati raccolti per ciascun intervento, è stata costruita una base informativa georeferenziata, finalizzata a supportare una lettura spaziale e comparativa delle soluzioni di puntellamento adottate. Per ogni edificio del campione sono state associate informazioni relative alla localizzazione, alla tipologia di puntellamento, al materiale impiegato e alle principali caratteristiche geometriche dei sistemi provvisionali. Tali dati sono stati organizzati all'interno di un sistema cartografico interattivo, sviluppato in ambiente digitale, come illustrato nella *Figura 3.17*, che consente di visualizzare la distribuzione dei casi studio sul territorio. Il sistema cartografico è stato inoltre strutturato in modo da consentire una consultazione dinamica dei dati, attraverso funzionalità di filtraggio e interrogazione puntuale. In particolare, è possibile selezionare gli edifici in base al materiale prevalente del puntellamento (legno, acciaio o sistemi tubolari), permettendo di isolare rapidamente i casi appartenenti a una stessa tipologia costruttiva e di analizzarne la distribuzione spaziale.

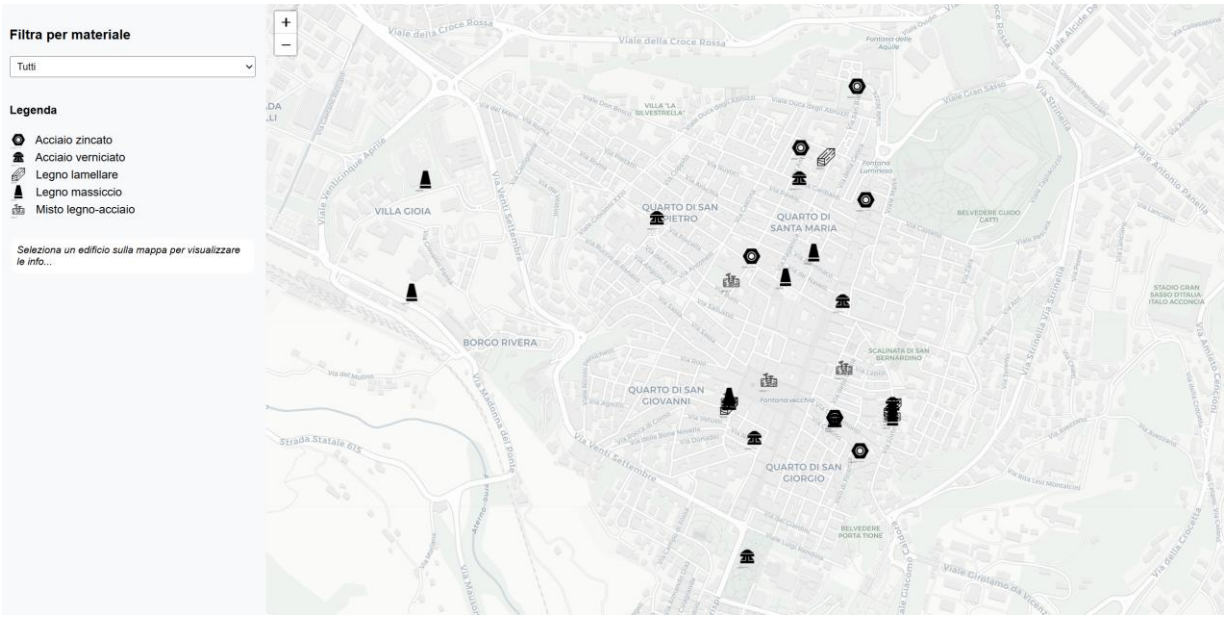


Figura 3.17: Sistema cartografico interattivo

La mappa non ha una funzione meramente descrittiva, ma rappresenta uno strumento di supporto all'analisi conoscitiva: essa permette infatti di individuare concentrazioni ricorrenti di specifiche tipologie di puntellamento, di confrontare

le soluzioni adottate in contesti urbani analoghi e di verificare la coerenza tra configurazione edilizia, spazio disponibile e scelta del sistema provvisionale.
Dall'analisi comparata dei casi è emerso che la maggior parte delle opere provvisionali può essere ricondotta a tre categorie principali, distinte in funzione del materiale costitutivo prevalente, come evidenziato: legno (*Figura 3.18*.a), impiegato soprattutto nei sistemi di sostegno a telaio o controvento per facciate; acciaio (*Figura 3.18*.b), utilizzato nei puntellamenti a elementi profilati di tipo HEA o similare; tubolare metallico (*Figura 3.18*.c), riferito ai sistemi a telai prefabbricati comunemente impiegati nei ponteggi multidirezionali. Queste tre tipologie, rappresentative delle pratiche operative più diffuse, sono state assunte come riferimento per l'impostazione dell'analisi del ciclo di vita, con lo scopo di valutare e confrontare gli impatti associati alle diverse strategie di gestione del materiale una volta conclusa la fase di smontaggio.



Figura 3.18: Tipologia puntellamenti. (a) Puntelli in legno. (b) Puntelli in acciaio. (c) Puntelli tubolari.

Questa suddivisione ha consentito di costruire un inventario omogeneo e confrontabile per le tre categorie. Per ciascun caso sono stati rilevati i dati geometrici, la tipologia di connessioni, lo stato di conservazione e la localizzazione. Questi dati costituiscono la base per la costruzione dell'inventario di ciclo di vita.

Tabella 3.4:Categorie di puntelli

Categoria	Materiali principali	Durabilità prevista	Manutenzione prevista	Criticità principali
Legno	Telai e controventi in legname massiccio (10×10 cm)	10–15 anni senza protezione, soggetto a degrado	Alta: sostituzioni e trattamenti periodici	Sensibile all'umidità, rischio perdita di sezione e instabilità
Acciaio	Profili laminati a caldo (HEA, IPE) + controventi	Molto alta (resistenza e rigidezza)	Bassa: ispezioni visive	Costo elevato e difficoltà logistiche per montaggio
Tubolari	Strutture modulari in tubi zincati Ø48,3×3,2 mm	Alta (grazie a zincatura e modularità)	Minima: controlli periodici	Ingombro elevato e possibili interferenze con il cantiere

L'analisi, articolata secondo quanto espresso nel *Capitolo 3.7.1*, viene ora illustrato numericamente.

3.7.2.1 Definizione obiettivi e campo funzionale

Sulla scia delle scelte metodologiche definite nel Capitolo precedente, la fase di definizione degli obiettivi e del campo di applicazione assume qui una natura operativa, traducendosi nella costruzione dei parametri quantitativi alla base del modello. L'unità funzionale, i confini di sistema e l'orizzonte temporale di riferimento, già definiti nella struttura metodologica, vengono quindi concretamente applicati ai tre sistemi di puntellamento oggetto di confronto. Ai fini dell'elaborazione dei risultati, l'unità funzionale pari a 1 metro lineare di puntellamento in esercizio è stata modellata attribuendo a ciascuna tipologia la relativa massa unitaria, determinata a partire dalle sezioni e dai profili impiegati nei casi studio. La *Tabella 3.5* seguente riporta i valori assunti nel modello numerico.

Tabella 3.5: Geometria e massa per tipologie

Categoria	Massa per metro
Legno	4,5 kg/m (10×10 cm)
Acciaio	HEA 100 = 20,4 kg/m
Tubolari	3,6 kg/m (tubo Ø48,3×3,2 mm)

L'orizzonte temporale di 15 anni, assunto in coerenza con l'evidenza empirica dei puntellamenti installati nel centro storico dell'Aquila, ha consentito di includere nel modello anche gli eventuali interventi manutentivi necessari durante la

permanenza in opera. I valori sopra riportati costituiscono la base per la quantificazione dei flussi dei moduli A1–A3 (produzione), A4 (trasporto), A5 (installazione), B (eventuale manutenzione) e C1–C4 (fine vita). In particolare, sono state considerate le seguenti fasi:

- **produzione (A1-A3)**: estrazione e lavorazione delle materie prime (legno, acciaio), fabbricazione di componenti (travi, giunti, tubi) e processi industriali associati, inclusi consumi energetici e emissioni dirette;
- **trasporto (A4):** trasferimento dei materiali dal luogo di produzione al sito di installazione, calcolato sulla base di distanze medie e tipologia di mezzi utilizzati (autocarri, furgoni);
- **installazione (A5):** operazioni di montaggio in cantiere, inclusi i consumi di macchinari, la manodopera e l'eventuale necessità di attrezzature di sollevamento;
- **manutenzione (B):** interventi di verifica e riparazione effettuati durante il periodo di riferimento, che per il legno comprendono ad esempio la sostituzione di elementi danneggiati o l'applicazione di trattamenti protettivi;
- **fine vita (C1-C4):** smontaggio della struttura, separazione dei materiali e loro destinazione finale (riuso, riciclo, recupero energetico o smaltimento in discarica).

Sono stati invece esclusi i contributi marginali, quali i consumi energetici per la progettazione, i sopralluoghi preliminari e i piccoli spostamenti del personale, in quanto il loro peso sul bilancio complessivo risulta trascurabile. Come riportato dalla UNI EN ISO 14044:2021, è ammessa l'esclusione di processi che incidono in misura minima, purché la scelta sia esplicitata e giustificata. La letteratura conferma che voci di questo tipo contribuiscono in genere per meno dell'1% sul totale (Guinée et al. 2011) e la loro omissione non compromette la completezza né la tracciabilità dello studio.

3.7.2.2 Compilazione dell'Inventario

L'inventario dei flussi (LCI) è stato elaborato quantificando, per ciascuna tipologia di puntellamento, i materiali impiegati, le distanze di trasporto, gli interventi manutentivi previsti nell'orizzonte temporale di riferimento e gli scenari di destinazione a fine vita. L'unità funzionale è rappresentata da un elemento standard con sezione 10×10 cm e massa pari a 4,5 kg/m. I processi di produzione includono segagione ed essiccazione in mix europeo; il trasporto al cantiere è stato modellato con una percorrenza media di 100 km su autocarro pesante; l'installazione e lo smontaggio sono stati rappresentati mediante un consumo energetico equivalente (associato ad attrezzature leggere e lavorazioni di cantiere). In ragione della durabilità del materiale, si è previsto un ciclo di manutenzione con sostituzione del 10% degli elementi ogni 5 anni (quindi due interventi nell'orizzonte di 15 anni), comprendendo trattamenti protettivi localizzati. Per il fine vita si è adottato uno scenario conservativo: 50% della massa avviata a recupero energetico e 50% a smaltimento controllato (con

contabilizzazione delle emissioni biogeniche da incenerimento). Per il puntellamento in acciaio con profili HEA/IPE: l'inventario per unità funzionale è stato parametrizzato su un profilo rappresentativo; ai fini comparativi si adotta come riferimento un HEA 100 con massa teorica ≈ 20,4 kg/m (valore aggiornabile se in progetto è specificato un profilo differente). Il ciclo di produzione include estrazione/lavorazione, produzione di acciaio da altoforno/forno elettrico e laminazione a caldo del profilato; eventuali protezioni anticorrosive (primer/verniciatura) possono essere incluse come voce addizionale qualora documentate. Il trasporto al cantiere è stato ipotizzato pari a 100 km; l'installazione/smontaggio è stata modellata con un consumo energetico equivalente. Data l'elevata durabilità, la manutenzione è limitata a ispezioni visive, senza sostituzioni materiali ricorrenti. Al fine vita si è considerato un riciclo dell'80% della massa metallica e 20% a smaltimento (scenario compatibile con le filiere locali di recupero dell'acciaio); il trasporto al centro di raccolta/recupero è stato modellato con 40 km medi dalla zona di cantiere.
Per il puntellamento tubolare in acciaio zincato (tubi Ø48,3×3,2 mm): l'inventario è stato costruito assumendo per l'unità funzionale una massa di 3,6 kg/m di tubo (valore tipico per ponteggi/tubolari standard), con ciclo di produzione del tubo laminato, zincatura a caldo come trattamento di protezione e medesime ipotesi di trasporto al cantiere (100 km). L'installazione è stata rappresentata con consumo energetico equivalente per attrezzature leggere; la manutenzione è ridotta a controlli periodici, senza sostituzioni sistematiche. Al fine vita si è assunto riciclo dell'80% della massa e 20% a smaltimento, con 40 km medi per il trasferimento al centro di recupero. La *Tabella 3.6* sintetizza i flussi inventariati per le tre tipologie.

Tabella 3.6: Flussi inventariati per unità funzionali

Fase	Flusso inventariato	Unità	Legno	Acciaio	Tubolari
produzione	Massa materiale primario	Kg/m	4.5 (legno massiccio 10*10)	20.4 (HEA 100)	3.3 (tubo standard)
	Trattamento protettivo	-	Incluso in manutenzione	Opzionale (primer/ verniciatura)	Zincatura a caldo (processo)
trasporto	Fabbrica → cantiere	km	100	100	100
installazione	Energia equivalente	MJ/m	0.36	0.36	0.36
uso/manutenzione	Sostituzioni periodiche	%massa/evento	10% ogni 5 anni	solo ispezioni	solo controlli
fine vita	Destinazione finale	% massa	50% recupero energetico; 50% smaltimento	80% riciclo; 20% smaltimento	80% riciclo; 20% smaltimento
	Trasporto cantiere → impianto	km	40	40	40

L'adozione di un valore unico di consumo energetico per l'installazione e lo smontaggio (0,36 MJ/m) in tutte le tipologie è stata scelta per garantire confrontabilità metodologica. Come riportato dalla UNI EN ISO 14044:2021, è ammessa la semplificazione di processi simili quando le differenze non alterano in modo significativo i risultati complessivi. Le variazioni operative tra legno, profili HEA e tubolari (ad esempio uso di mezzi di sollevamento o maggior numero di giunti) incidono infatti in maniera trascurabile sul bilancio energetico globale (<1% secondo Guinée (2002)), e la loro omissione non compromette la coerenza dello studio. Questi dati di inventario rappresentano la base quantitativa per la successiva fase di valutazione degli impatti ambientali (*Life Cycle Impact*

Assessment – LCIA), come previsto dalla UNI EN ISO 14040:2006. La strutturazione dei flussi per unità funzionale consente infatti di confrontare in maniera trasparente le tre tipologie di puntellamento, isolando l'effetto dei materiali e delle diverse destinazioni a fine vita. Nel capitolo seguente i dati qui riportati saranno tradotti in indicatori ambientali normalizzati (ad esempio potenziale di riscaldamento globale espresso in kg CO_2 eq), consentendo l'analisi comparativa tra legno, acciaio e tubolari zincati. Tale passaggio permetterà di individuare i principali hotspot e di valutare l'efficacia delle diverse strategie di smontaggio e gestione del ciclo di vita delle opere provvisionali.

3.7.2.3 Valutazione impatti

➔ **Puntelli in legno**

La *Figura 3.19* rappresenta il contributo delle diverse fasi del ciclo di vita del puntellamento in legno (unità funzionale: 1 m lineare, massa 4,5 kg) alla categoria di impatto *Climate Change*, espresso in kg di CO_2 equivalente.

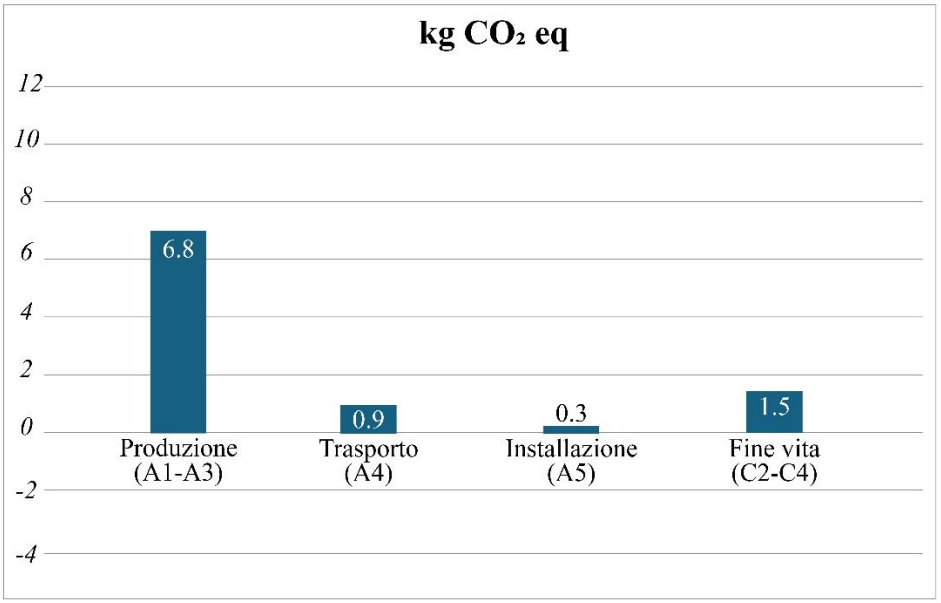


Figura 3.19: Contributo fasi del ciclo di vita del puntello di legno

L'analisi evidenzia in modo chiaro che la fase di produzione (A1–A3) rappresenta l'hotspot principale del ciclo di vita, con un contributo pari a 6,8 kg CO_2 eq, corrispondente al 71% delle emissioni complessive. Tale valore riflette i processi energivori di segagione, piallatura ed essiccazione del legno massiccio, risultati confermati anche nei grafici di caratterizzazione elaborati in SimaPro, visibili nella *Figura 3.20*, nei quali la produzione domina in tutte le categorie EF 3.0. La fase di trasporto (A4) incide per 0,9 kg CO_2 eq (9%), mentre le attività di installazione/smontaggio (A5) rappresentano un contributo marginale (0,3 kg CO_2 eq, 3%). La fase di fine vita (C2–C4) determina un contributo emissivo di 1,5 kg CO_2 eq (17%), coerente con quanto si osserva nei grafici di punteggio singolo in *Figura 3.21*, dove il fine vita mostra un impatto positivo dovuto alle emissioni rilasciate durante le operazioni di trattamento e smaltimento del legno.

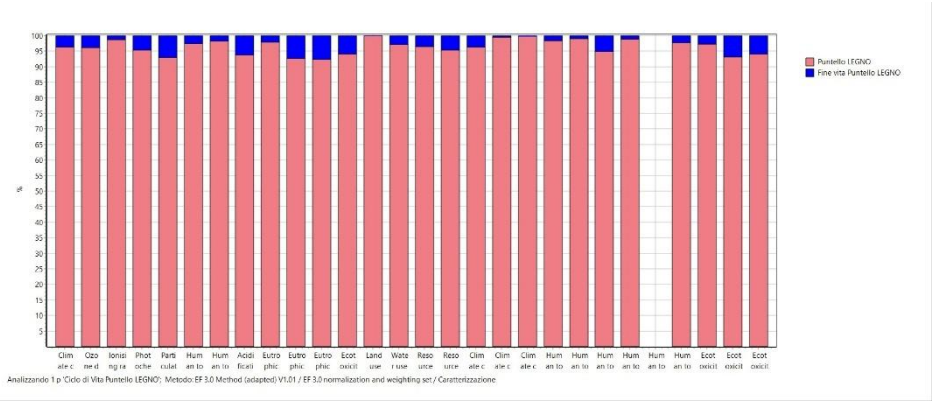


Figura 3.20: Caratterizzazione EF 3.0 del puntello in legno

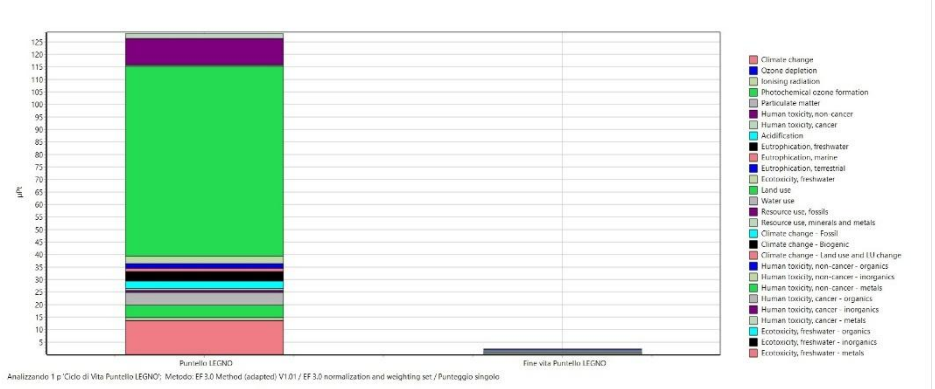


Figura 3.21: Punteggio singolo EF 3.0 del puntello in legno

Il bilancio nella *Tabella 3.7* mostra che oltre il 70% delle emissioni complessive è concentrato nella fase di produzione, seguita dal trasporto (9%) e dal fine vita (17%). L'installazione e lo smontaggio incidono solo marginalmente (3%). La piena corrispondenza tra i valori numerici e le evidenze grafiche conferma che, per il puntello in legno, la fase di produzione rimane l'elemento maggiormente influente nell'impronta climatica complessiva, mentre il fine vita assume un ruolo significativo e non trascurabile nel bilancio finale delle emissioni.

Tabella 3.7: Indicatori di impatto Climate Change

Fase	**Climate Change (kg CO_2 eq)**	**% SUL TOTALE**
Produzione	6.8	71%
Trasporto	0.9	9%
Installazione/smontaggio	0.3	3%
Fine vita	1.5	17%
Totale	9.5	100%

➔ **Puntelli di acciaio**

La *Figura 3.22* mostra il contributo delle diverse fasi del ciclo di vita del puntellamento in acciaio alla categoria di impatto Climate Change (kg CO_2 eq).

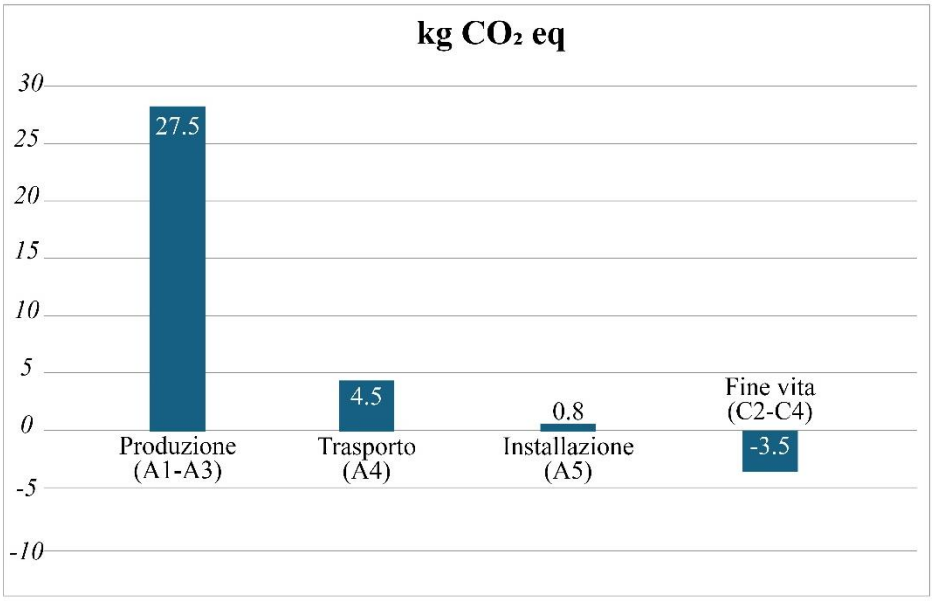


Figura 3.22: Contributo fasi del ciclo di vita del puntello di acciaio

Il grafico evidenzia come la fase di produzione (A1–A3) rappresenti l'hotspot principale, con un contributo pari a circa 27,5 kg CO_2 eq/m, equivalente a circa il 75% dell'impronta climatica totale. Tale valore è coerente con quanto mostrato nel grafico in *Figura 3.23,* dove la produzione domina nettamente la categoria *Climate Change* e le categorie energetiche e minerali associate alla produzione di acciaio primario e alla laminazione a caldo. La fase di trasporto al cantiere (A4) contribuisce per circa 4,5 kg CO_2 eq/m (12%), con un'incidenza proporzionalmente più elevata rispetto al legno, in ragione della maggiore massa per metro lineare del profilo in acciaio. Le attività di installazione e smontaggio (A5) presentano un contributo marginale (0,8 kg CO_2 eq/m, circa 2%), coerentemente con quanto mostrato nei grafici EF 3.0. La fase di fine vita (C2–C4) introduce invece un contributo negativo, pari a –3,5 kg CO_2 eq/m (–10%). Questo risultato è attribuibile al credito di riciclo riconosciuto dal metodo EF 3.0, che contabilizza il beneficio ambientale derivante dalla sostituzione di acciaio primario con acciaio secondario prodotto dal rottame recuperato. Il comportamento è pienamente coerente con quanto osservabile nel grafico in *Figura 3.24*, in cui il fine vita riduce significativamente l'impatto complessivo.

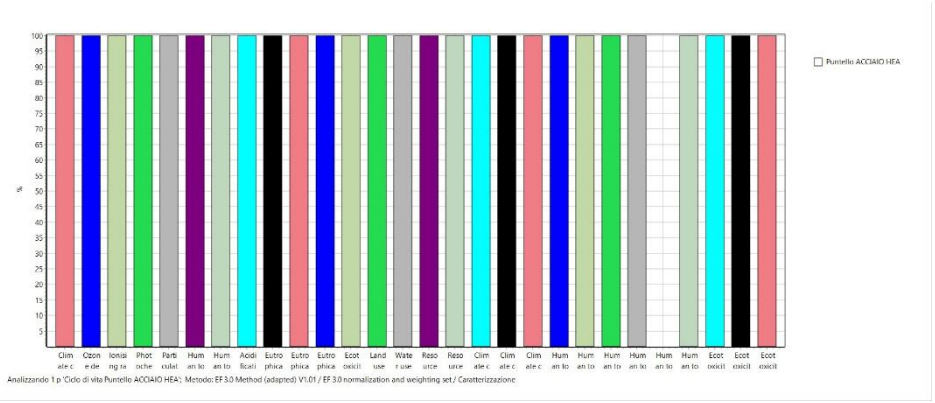


Figura 3.23: Caratterizzazione EF 3.0 (puntello acciaio HEA)

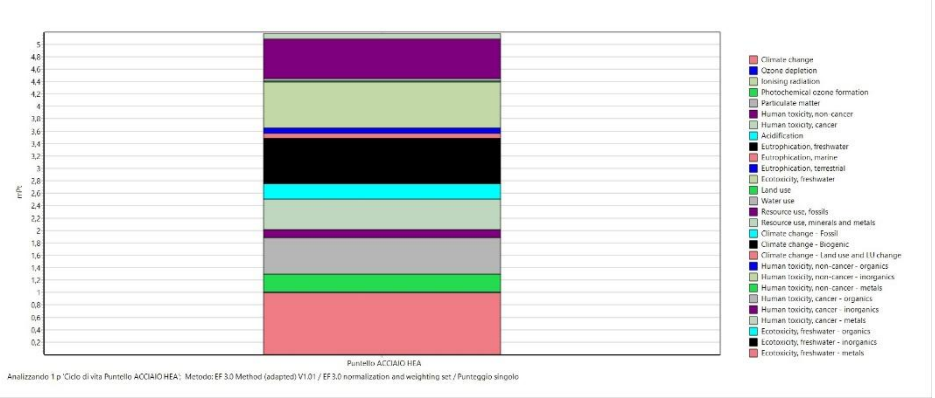


Figura 3.24: Punteggio singolo EF 3.0 (puntello acciaio HEA)

La *Tabella 3.8* riassume il contributo delle diverse fasi del ciclo di vita alla categoria *Climate Change* per 1 m di puntello in acciaio HEA100.

Tabella 3.8: Indicatori di impatto Climate Change

Fase	**Climate Change (kg CO_2 eq)**	**% SUL TOTALE PT**
Produzione	27.5	75%
Trasporto	4.5	12%
Installazione/smontaggio	0.8	2%
Fine vita	-3.5	-10%
Totale	29.3	100%

➔ **Impatto Puntelli tubolari**

La *Figura 3.25* evidenzia chiaramente come, per i puntelli tubolari zincati, la fase di produzione rappresenti la principale fonte di impatto ambientale. Questo risultato è strettamente legato ai processi energivori di laminazione dell'acciaio e al trattamento di zincatura a caldo, che determinano emissioni consistenti già nelle fasi iniziali del ciclo di vita. Al contrario, il trasporto e le operazioni di installazione e smontaggio incidono in maniera molto ridotta, risultando quasi marginali se confrontati con la produzione. Un elemento di particolare interesse riguarda il fine vita, che nel grafico appare con un contributo negativo: tale risultato è imputabile al credito di riciclo introdotto dal metodo EF 3.0, il quale

considera il beneficio ambientale derivante dalla sostituzione dell'acciaio primario con acciaio secondario ottenuto dal recupero del rottame. Questo aspetto dimostra come la valorizzazione del materiale a fine vita possa assumere un ruolo strategico, contribuendo a ridurre in maniera significativa il bilancio complessivo delle emissioni.

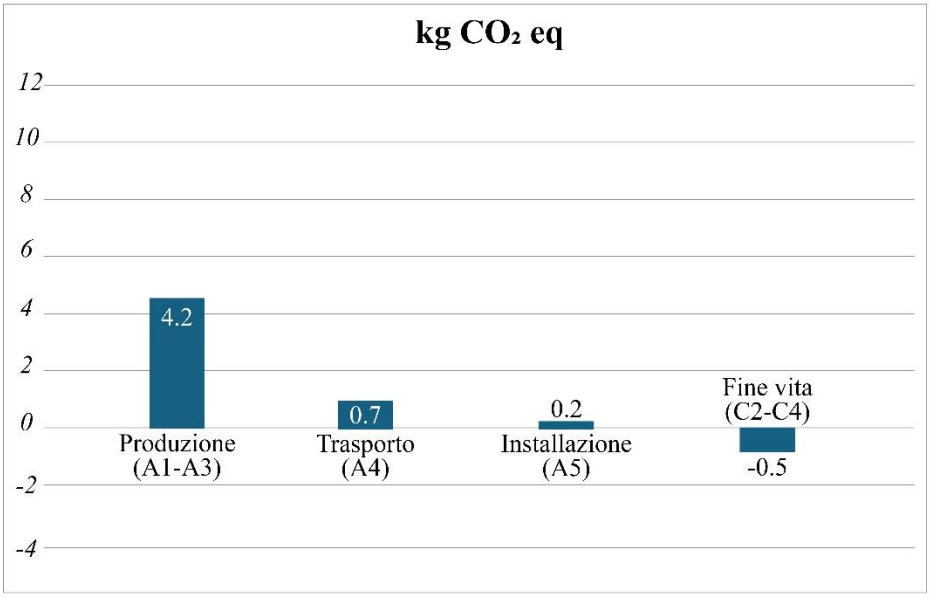


Figura 3.25: Contributo fasi del ciclo di vita del puntello tubolare

Il bilancio nella *Tabella 3.9* evidenzia come la fase di produzione sia la principale responsabile delle emissioni, con circa 4,2 kg CO_2 eq/m (70% del totale). Questo risultato è attribuibile alla laminazione dei tubi e al trattamento di zincatura a caldo, che se da un lato aumenta la durabilità del materiale, dall'altro comporta un rilevante impatto ambientale. Il trasporto incide per circa il 12% (0,7 kg CO_2 eq/m), mentre le operazioni di installazione e smontaggio hanno un contributo marginale (0,2 kg CO_2 eq/m, 3%). Particolarmente significativo è il valore negativo del fine vita (-0,5 kg CO_2 eq/m), legato al credito di riciclo contabilizzato secondo il metodo EF 3.0. Questo beneficio deriva dal fatto che il recupero del rottame zincato permette di sostituire parzialmente la produzione di acciaio primario, generando un bilancio ambientale favorevole. In termini complessivi, il riciclo mitiga parte delle emissioni generate a monte, riducendo il totale a circa 4,6 kg CO_2 eq/m.

Tabella 3.9: Indicatori di impatto Climate Change

Fase	**Climate Change (kg CO_2 eq)**	**% SUL TOTALE PT**
Produzione	4.2	70%
Trasporto	0.7	12%
Installazione/smontaggio	0.2	3%
Fine vita	-0.5	-8%
Totale	4.6	100%

3.7.2.4 Interpretazione dei risultati

La fase di interpretazione rappresenta l'ultimo passaggio del percorso metodologico previsto dalla UNI EN ISO 14040:2006 e dalla UNI EN ISO 14044:2021. L'obiettivo è quello di analizzare in maniera integrata i risultati ottenuti nella valutazione degli impatti, identificando gli hotspot principali, confrontando le diverse tipologie di puntellamento e formulando considerazioni utili sia sul piano tecnico che su quello strategico. Nel linguaggio della Valutazione del Ciclo di Vita, con il termine *hotspot* si indicano quelle fasi del ciclo che incidono in misura predominante sul bilancio ambientale complessivo. Si tratta, in altri termini, dei "punti critici" dove si concentrano i maggiori consumi energetici o le principali emissioni, e che quindi risultano determinanti nel definire l'impronta ambientale del sistema analizzato. La loro individuazione è un passaggio essenziale della fase di interpretazione, perché consente di orientare le strategie di miglioramento verso gli aspetti realmente significativi, evitando di disperdere risorse su contributi marginali. Dall'analisi condotta emerge in maniera chiara come la fase di produzione rappresenti l'elemento più critico per tutte le tipologie di puntellamento considerate. Nel caso del legno, il contributo della produzione incide per oltre il 70% sul totale, a causa dei processi di segagione ed essiccazione. Per l'acciaio HEA/IPE, l'incidenza della produzione è ancora più marcata (≈75%), legata agli elevati consumi energetici dei cicli siderurgici. Anche per i tubolari zincati la produzione costituisce l'hotspot principale, aggravato dal processo di zincatura a caldo. Le fasi di trasporto mostrano un peso variabile: più contenuto per il legno (≈9%), più rilevante per acciaio e tubolari (≈12%), a causa della massa superiore dei profili metallici. Le fasi di installazione e smontaggio hanno in tutti i casi un impatto marginale (<3%), mentre il fine vita si configura come elemento discriminante.
Per mettere a sistema le evidenze emerse nelle tre analisi, la *Tabella 3.10* riporta i valori del Potenziale di Riscaldamento Globale (GWP) per 1 m di puntellamento, suddivisi per fase del ciclo di vita e tipologia. I risultati sono espressi in kg CO_2 eq e derivano dall'elaborazione in EF 3.0 condotta secondo UNI EN ISO 14040:2006 e UNI EN ISO 14044:2021, con inquadramento modulare coerente con UNI EN 15804:2019.

Tabella 3.10: Contributo delle fasi del ciclo di vita categoria Climate Change

Tipologia	Produzione	Trasporto	Installazione/smontaggio	Fine vita	Totale
Legno	6.8	0.9	0.3	+1.5	9.5
Acciaio	27.5	4.5	0.8	-3.5[1]	29.3
Tubolari	4.2	0.7	0.2	-0.5	4.6

[1] Il segno negativo al fine vita indica un credito da riciclo (sostituzione di materiale primario con secondario); il segno positivo indica un carico netto (es. smaltimento/recupero con emissioni associate).

Si osserva che la produzione rappresenta in tutti i casi l'hotspot principale, con differenze sensibili tra materiali. L'acciaio è il più impattante, ma anche il più virtuoso nel fine vita grazie all'elevata percentuale di riciclo; il legno si colloca su valori intermedi ma con un contributo negativo nel trattamento a fine uso; il sistema tubolare risulta complessivamente più bilanciato, grazie al peso ridotto per unità funzionale e al recupero del materiale. La *Figura 3.26* riassume in forma percentuale il contributo delle diverse fasi del ciclo di vita al totale dell'impatto ambientale per ciascuna tipologia di puntellamento. Il grafico mostra in modo evidente come la fase di produzione costituisca l'hotspot principale per tutti i materiali analizzati, con incidenze che superano l'80% del bilancio complessivo. Questo risultato è coerente con la natura dei processi coinvolti: per il legno, l'impatto è associato principalmente all'essiccazione e ai trattamenti protettivi; per l'acciaio, ai cicli di produzione e laminazione ad alta intensità energetica; mentre per il tubolare zincato, il contributo è legato al trattamento di zincatura, pur mantenendo valori inferiori grazie alla ridotta massa per unità funzionale.
La *Figura 3.26* consente quindi di identificare con chiarezza i punti critici del sistema e di orientare le strategie di miglioramento ambientale sulle fasi a maggiore incidenza, evitando di concentrare gli sforzi su contributi marginali.

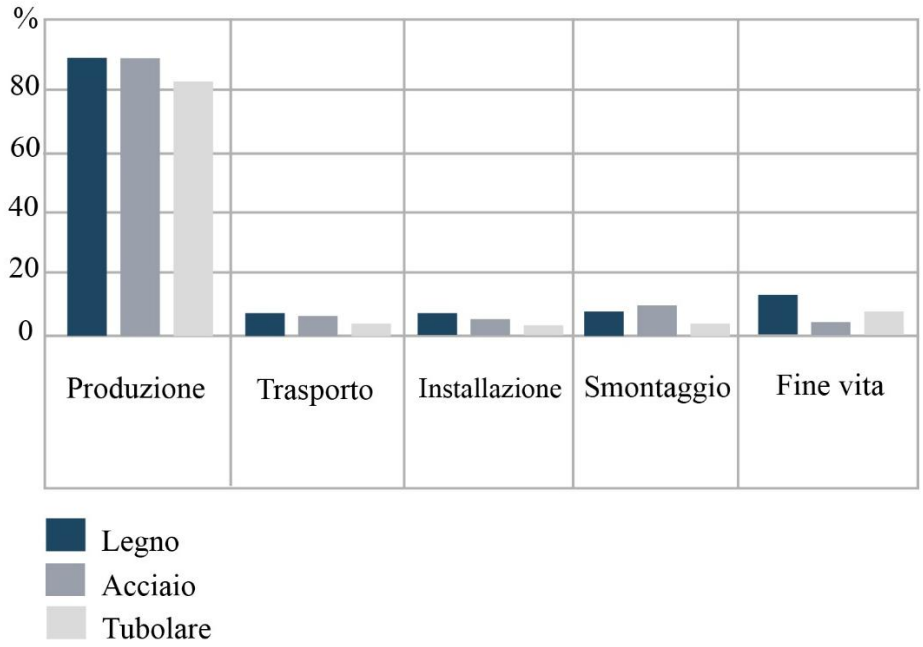


Figura 3.26: Contributo % delle fasi al totale dell'impatto

La *Figura 3.27* rappresenta il bilancio ambientale netto delle tre tipologie di puntellamento, tenendo conto dei benefici derivanti dal riciclo dei materiali metallici. Il grafico mostra che l'acciaio, pur mantenendo l'impatto lordo più elevato, ottiene il credito ambientale più consistente in fase di dismissione grazie all'elevata percentuale di recupero del rottame metallico. Questo consente di compensare parzialmente le emissioni generate in produzione, riducendo l'impatto complessivo del ciclo di vita. Il legno, al contrario, non presenta benefici significativi nel fine vita e rimane penalizzato dal contributo emissivo dello smaltimento, legato principalmente alla degradazione e alla combustione

del materiale. Il tubolare zincato si colloca in una posizione intermedia e più equilibrata: presenta un impatto iniziale contenuto, grazie alla leggerezza e alla durabilità, e beneficia a sua volta del recupero del metallo, che ne riduce ulteriormente il bilancio finale. Nel complesso, la figura evidenzia come la gestione del fine vita sia un elemento cruciale nella valutazione ambientale dei sistemi provvisionali: il riciclo del metallo si configura come un'azione strategica capace di migliorare significativamente la prestazione complessiva del sistema e di orientare le scelte progettuali verso soluzioni a maggiore circolarità e minor impatto climatico.

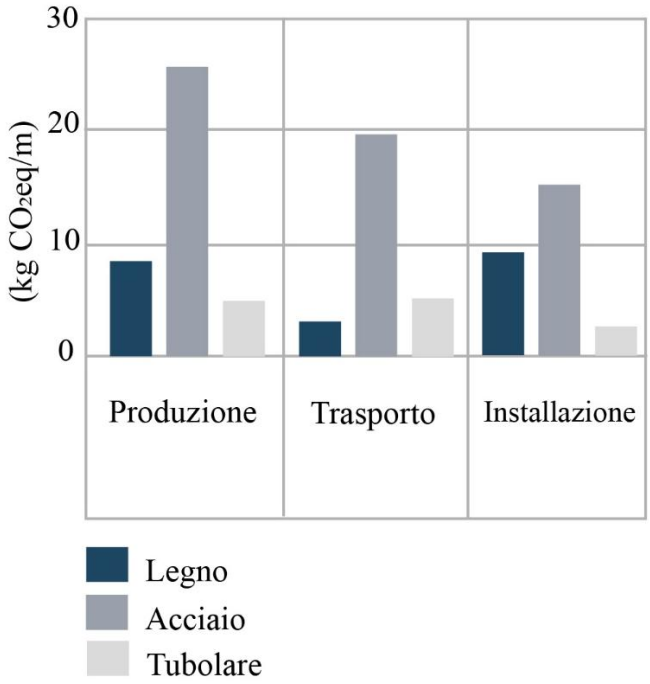


Figura 3.27: Bilancio ambientale complessivo con benefici da riciclo

3.7.3 Valutazione economica semplificata

La valutazione ambientale nel presente lavoro è stata affiancata una valutazione economica semplificata, condotta sulle stesse fasi del ciclo di vita considerate nell'LCA. In questo modo, i risultati ambientali vengono integrati da un quadro economico di riferimento che permette di valutare in parallelo la sostenibilità ambientale ed economica delle diverse strategie di gestione, garantendo una lettura più completa e applicabile nel contesto operativo dei cantieri post-sisma.
L'analisi ha riguardato le principali voci di spesa associate a ciascuna fase:

- produzione e approvvigionamento dei materiali;
- trasporto medio al cantiere:
- installazione e smontaggio;
- manutenzione e gestione del fine vita.

Le fonti utilizzate sono le seguenti: (Redazione DEI, 2023), per i costi unitari dei materiali (legname massiccio, profili HEA/IPE, tubolari zincati) e delle lavorazioni di carpenteria; (Prezzario Regionale Dei Lavori Pubblici Della Regione Abruzzo 2023, 2023), per le tariffe orarie della manodopera, i costi di

trasporto su gomma e le operazioni di smaltimento e conferimento in discarica; Tariffe di trasporto edilizio (Ministero Infrastrutture e Trasporti, 2023), per la stima del trasporto medio dei materiali (€/km·ton); stime tecniche di cantiere elaborate su base esperienziale per la manutenzione dei puntelli in legno e per la movimentazione durante lo smontaggio. I valori economici medi ottenuti sono sintetizzati nella *Tabella 3.11*.

Tabella 3.11: Stima dei costi medi

Fase	**Legno**	**Acciaio**	**Tubolari**	**Fonte principale**
Produzione	5.5 €/m	15 €/m	7 €/m	Prezziario DEI 2023
Trasporto	0.75 €/m	1.50 €/m	0.55 €/m	Tariffe trasporti
Installazione/smontaggio	8.75 €/m	8.75 €/m	8.75 €/m	Prezziario Reg. Abruzzo 2023
Manutenzione	1.0 €/m	0.0 €/m	0.0 €/m	Stima tecnica
Fine vita (smaltimento/recupero)	2.0 €/m	1.0 €/m	0.9 €/m	Prezziario Reg. Abruzzo + quotazioni rottame
Totale stimato	***18-19€/m***	***27-30 €/m***	***20-22 €/m***	

La comparazione evidenzia come le dinamiche economiche seguano in parte le stesse tendenze osservate nei risultati ambientali. I puntelli in legno sono caratterizzati da un basso costo iniziale di produzione, ma risultano penalizzati dalle operazioni di manutenzione e dal costo di smaltimento, che non genera alcun valore residuo. L'acciaio è il materiale più oneroso, sia per il costo unitario sia per l'energia necessaria alla produzione, ma presenta un ritorno economico nel fine vita grazie al recupero del rottame metallico, che può essere riutilizzato nella filiera. I tubolari zincati, infine, si collocano in una posizione intermedia: presentano costi moderati, buona durabilità e possibilità di riuso integrale del sistema, caratteristiche che ne riducono l'incidenza complessiva sul bilancio economico. I risultati, riportati in *Tabella 3.12*, mostrano che la tendenza economica segue in larga misura quella ambientale: il legno presenta i costi iniziali più bassi ma è penalizzato dagli oneri manutentivi, l'acciaio comporta il maggiore investimento iniziale ma recupera parzialmente in fase di dismissione, mentre il tubolare si configura come la soluzione più equilibrata.

Tabella 3.12: Confronto sintetico ambientale ed economico per tipologia di puntello

Tipologia	**Impatto ambientale totale (kg co_2 eq/m)**	**Costo stimato (€/m)**	**Considerazioni**
Legno	9.5	18	Basso costo iniziale, ma alta manutenzione; penalizzato dal fine vita.
Acciaio	29.3	30	Elevato impatto e costo; benefici ambientali da riciclo.
Tubolari	4.6	20	Miglior equilibrio; buona durabilità e possibilità di riuso.

Dalla *Figura 3.28* emerge un chiaro allineamento tra prestazione ambientale ed efficienza economica: le tipologie che riducono l'impatto tendono anche a minimizzare i costi complessivi, mentre i sistemi più energivori e pesanti risultano meno competitivi su entrambi i fronti. Questa evidenza rafforza la coerenza metodologica del lavoro e consente di delineare, per ogni materiale, un profilo prestazionale completo che integra impatti, costi e comportamenti di fine vita. Tale interpretazione conclude la fase analitica dello studio LCA, fornendo i presupposti per la definizione dei parametri di riferimento e per la successiva valutazione comparata delle strategie di gestione post-smontaggio, che costituiranno il passo successivo del Protocollo.

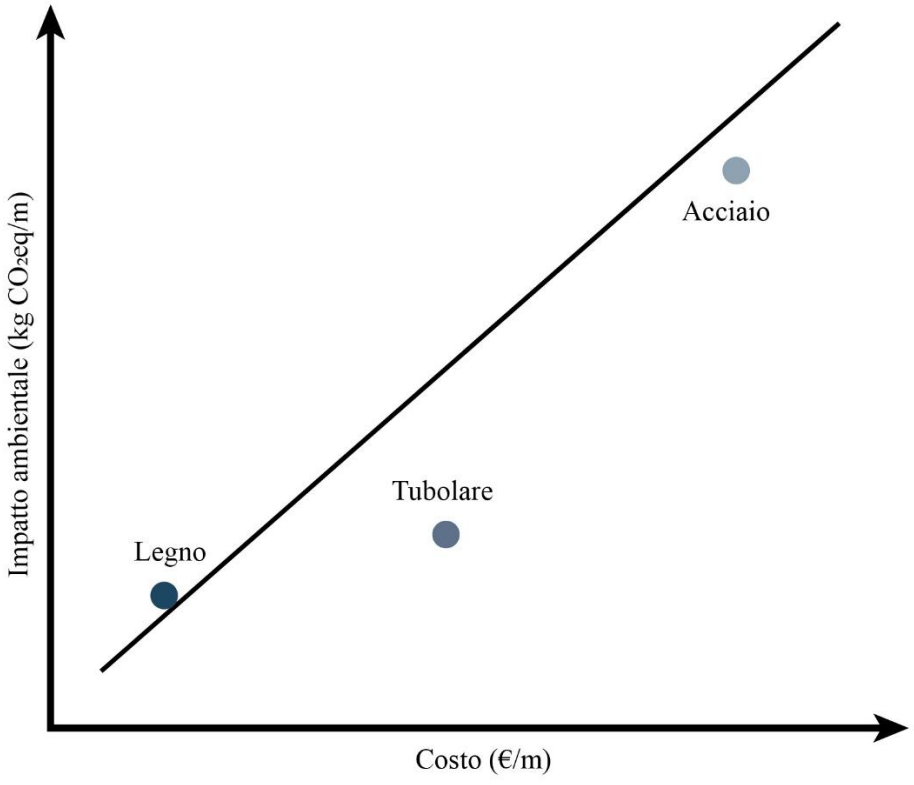


Figura 3.28: Correlazione tra impatto ambientale e costo unitario

3.7.4 Integrazione dei risultati nel Protocollo

La conclusione dello studio LCA costituisce il punto di partenza per la fase successiva del Protocollo, in cui i risultati dell'analisi ambientale vengono tradotti in strumenti operativi a supporto delle decisioni di cantiere. Dopo aver quantificato gli impatti associati alle diverse tipologie di puntellamento e individuato le principali fasi critiche, è infatti necessario trasformare le informazioni ottenute in valori di riferimento che possano essere utilizzati in modo replicabile nei casi futuri. Questa transizione segna il passaggio dalla dimensione analitica alla dimensione applicativa del Protocollo: dai risultati scientifici alla loro integrazione nel processo di valutazione delle strategie di gestione post-smontaggio.

3.7.4.1 Parametri di riferimento

L'obiettivo è quello di rendere utilizzabili in modo semplice le informazioni tecniche emerse. Per farlo, i risultati dell'analisi sono stati "tradotti" in una serie di parametri di riferimento, cioè valori sintetici e facilmente leggibili che descrivono, in modo quantitativo, l'impatto ambientale delle principali tipologie di puntellamento analizzate. Un parametro di riferimento è un numero che indica quanto un metro di puntellamento incide sull'ambiente, espresso in termini di emissioni di anidride carbonica equivalente (kg CO_2 eq/m). Questo valore rappresenta la quantità di gas a effetto serra che viene emessa, lungo tutto il ciclo di vita del puntello, considerando la produzione, il trasporto, l'utilizzo e la fase di smontaggio o smaltimento. I risultati dell'analisi sono stati espressi in forma media normalizzata, ovvero tramite valori medi riferiti a una unità funzionale fissa, corrispondente a un metro lineare di puntellamento. Questa operazione consente di uniformare i risultati e di rendere i valori confrontabili tra loro, indipendentemente dalla dimensione o dalla complessità dei casi analizzati. In altri termini, ogni risultato non rappresenta l'impatto complessivo di un singolo cantiere, ma la quota media di emissioni associate a un tratto elementare di puntellamento. Tale impostazione permette di trasferire i risultati da un contesto specifico a uno più generale, garantendo la possibilità di utilizzare i dati come riferimento in differenti situazioni operative. Chi applica il Protocollo potrà così stimare in modo rapido l'impatto ambientale del proprio intervento, moltiplicando il valore medio di riferimento (espresso in kg CO_2 eq/m) per la lunghezza effettiva del sistema installato.

Tabella 3.13: Parametri di riferimento ambientale per tipologia di puntellamento

Tipologia di puntellamento	Impatto medio tot. (kg co_2 eq/m)	Fase di produzione	Trasporto	Fine vita	Osservazioni
Legno	9.5	Incidenza elevata per trattamenti ed essiccazione	Incidenza media, peso contenuto	Penalizzato dalle emissioni di smaltimento	Materiale leggero ma a bassa duttilità
Acciaio	29.3	Impatto più alto per produzione siderurgica	Elevata incidenza per peso	Beneficio da ciciclo	Alta resistenza, elevato impatto iniziale
Tubolare	4.6	Impatto moderato, zincatura a caldo	Bassa incidenza	Beneficio da riuso e riciclo	Miglio equilibrio tra durabilità e peso

Questi valori diventano la base di lavoro del Protocollo: ogni volta che, durante la pianificazione o la verifica di un cantiere, si deve stimare l'impatto ambientale di un determinato sistema di puntellamento, è possibile richiamare direttamente i parametri di questa tabella. Ad esempio: se in un intervento di rimozione si utilizza un sistema in legno lungo 20 m, l'impatto complessivo potrà essere stimato in circa $9.5 \times 20 = 190$ kg CO_2 eq.

Questa impostazione consente di quantificare rapidamente gli effetti ambientali di scelte alternative, anche senza dover eseguire ogni volta un'analisi LCA completa. Il valore non sostituisce uno studio specifico, ma fornisce una stima orientativa attendibile, utile per il confronto e per la selezione delle strategie di intervento più sostenibili.

3.7.4.2 Valutazione comparativa delle strategie

Una volta individuati i parametri di riferimento ambientale, è necessario comprendere come questi cambino al variare delle strategie di gestione dei materiali impiegati nelle opere provvisionali. Nel contesto del Protocollo, questo passaggio ha l'obiettivo di fornire una base oggettiva per confrontare diverse opzioni operative al termine della fase di smontaggio, consentendo di scegliere quella che garantisce il miglior equilibrio tra sicurezza, efficienza e sostenibilità. Con l'espressione strategie di gestione post-smontaggio si indicano i diversi destini possibili dei materiali una volta completata la rimozione delle opere

provvisionali. In questa fase del Protocollo, sono stati considerati tre scenari principali, che rappresentano le alternative più ricorrenti nella prassi di cantiere:

- scenario A – Riuso diretto: i materiali vengono recuperati e reimpiegati in altri interventi, senza subire trasformazioni significative. È il caso, ad esempio, dei puntelli o dei telai metallici che possono essere smontati, controllati e reinstallati in un nuovo cantiere;
- scenario B – Riciclo: i materiali vengono avviati a processi di trasformazione industriale, al termine dei quali si ottiene una materia prima secondaria (ad esempio acciaio rifuso o legno triturato);
- scenario C – Smaltimento: i materiali vengono conferiti a discarica o impianti di recupero energetico, senza possibilità di recupero o reimpiego.

Una volta definiti gli scenari, è necessario quantificare l'impatto ambientale associato a ciascuno di essi. Per farlo, si parte dai valori medi di riferimento ricavati dallo studio LCA (espressi in kg CO_2 eq/m), ai quali vengono applicati dei fattori di correzione che rappresentano le variazioni di impatto dovute al diverso comportamento del materiale nella fase di fine vita. In concreto, questi fattori derivano dal confronto tra le fasi C1–C4 del modello LCA (demolizione, trasporto a impianto, trattamento e destino finale del materiale). Ogni materiale presenta infatti una diversa modalità di gestione e un diverso rendimento di recupero. Nel caso dei materiali metallici, come i profili in acciaio HEA/IPE e i tubolari zincati, il conferimento a riciclo genera un beneficio ambientale significativo, poiché il materiale recuperato sostituisce la produzione primaria da minerale. Questo principio è esplicitamente riconosciuto dalla *(EN 15804:2012+A2:2019 – Sustainability of Construction Works – Environmental Product Declarations – Core Rules for the Product Category of Construction Products* 2019), che nel Modulo D prevede la contabilizzazione dei crediti ambientali derivanti dal riciclo dei metalli, attribuendo al materiale riciclato un valore di sostituzione rispetto alle corrispondenti quantità di acciaio vergine. Inoltre, il metodo *Environmental Footprint* (EF 3.0), sviluppato dalla Commissione Europea e formalizzato dal *Joint Research Centre* (2021), adotta lo stesso approccio: i metalli riciclati vengono considerati portatori di un beneficio ambientale netto, poiché la rifusione richiede consumi energetici ed emissioni notevolmente inferiori rispetto ai cicli siderurgici basati su materia prima vergine. La letteratura scientifica conferma questa dinamica: studi comparativi sul ciclo di vita dell'acciaio mostrano che la produzione da rottame comporta riduzioni sostanziali del fabbisogno energetico e dell'impatto climatico rispetto alla produzione primaria. In particolare, Habert & Roussel (2009) evidenziano come l'utilizzo di acciaio riciclato permetta di abbattere sensibilmente le emissioni di CO_2 associate alle fasi di fusione e laminazione; conclusioni analoghe emergono dalle analisi condotte da Norgate et al. (2007) sui risparmi energetici ottenibili nei processi di rifusione.

Il comportamento del legno a fine vita segue una dinamica completamente diversa rispetto ai materiali metallici, poiché si tratta di un materiale costituito da carbonio biogenico. Durante la crescita dell'albero, il legno assorbe CO_2 dall'atmosfera, immagazzinandola nella propria struttura; tale carbonio viene

tuttavia rilasciato nuovamente quando il materiale giunge al termine della sua vita utile. Come chiarito dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (2015), i processi di combustione o degradazione biologica del legno comportano il rilascio del carbonio precedentemente assorbito, prevalentemente sotto forma di CO_2 nel caso della combustione e, in condizioni anaerobiche tipiche delle discariche, anche sotto forma di metano e altri gas climalteranti.
Sulla base dei risultati dello studio LCA, le differenze tra i tre scenari sono state quindi quantificate mediante coefficienti percentuali di riduzione o incremento, applicati al valore medio complessivo di ogni materiale. A titolo esemplificativo:

- per lo scenario di riuso, è stata considerata una riduzione del 35–40% dell'impatto rispetto allo smaltimento, poiché non vengono generati nuovi processi produttivi;
- per il riciclo, è stata ipotizzata una riduzione del 15–20%, che tiene conto dei benefici da recupero del materiale ma anche delle emissioni associate al trattamento;
- per lo smaltimento, è stato mantenuto il valore integrale dell'impatto totale ottenuto dall'LCA, poiché non si produce alcun beneficio ambientale.

I coefficienti di correzione applicati ai parametri medi di riferimento non derivano da valori tabellati normativi, ma da un'elaborazione coerente con la struttura modulare definita dalle norme UNI EN 15804:2019 – "Sostenibilità delle costruzioni – Dichiarazioni ambientali di prodotto – Regole quadro per prodotti da costruzione" e UNI EN 15978:2011 – "Sostenibilità delle costruzioni – Valutazione della prestazione ambientale degli edifici – Metodi di calcolo", che consentono di isolare e modificare i moduli di fine vita (C1–C4) in funzione degli scenari di gestione. Le percentuali di riduzione o incremento adottate (–35/–40% per il riuso, –15/–20% per il riciclo) sono state ricavate dai risultati dello studio LCA e sono coerenti con i range documentati nella letteratura LCA più recente, tra cui il lavoro di (Hauschild et al. 2018, e le linee guida europee del 2018), *Product Environmental Footprint* (PEF) *Guide.*
In altre parole, si simula che cosa accade se, invece di smaltire, si ricicla o si riutilizza il materiale, e si osserva come cambia l'impatto complessivo. Nel caso del riuso, l'impatto ambientale risulta più basso perché il materiale mantiene la propria forma e funzione, evitando la produzione di nuovi elementi e riducendo i trasporti e i trattamenti successivi. Nel riciclo, l'impatto è intermedio: si riducono le emissioni legate alla produzione da materia prima vergine, ma si generano nuove emissioni dovute ai processi di rifusione, taglio o triturazione. Nello smaltimento, non si ottiene alcun recupero e si aggiungono le emissioni dovute al conferimento in discarica o alla combustione: per questo è l'opzione più impattante. Per rendere il procedimento più chiaro e facilmente replicabile, si è assunto un approccio lineare, basato su due componenti:

1. un nucleo comune, che comprende le fasi di produzione, trasporto e installazione/smontaggio (che rimane invariata);
2. una fase variabile di fine vita, che cambia a seconda dello scenario applicato.

Il valore finale dell'impatto si ottiene sommando il "nucleo comune" e il valore di "fine vita" corrispondente alla strategia selezionata. I dati di partenza derivano direttamente dallo studio LCA condotto sul campione di casi. Essi indicano, per ogni materiale, quanti chilogrammi di CO_2 equivalente sono associati a ciascuna fase del ciclo di vita di un metro lineare di puntellamento:

Tabella 3.14:Kg di CO2 EQ associato a ciascuna fase

Materiale	Produzione	Trasporto	Installazione/ smaltimento	Fine vita	Totale base
Legno	6.8	0.9	0.3	+1.5	9.5
Acciaio	27.5	4.5	0.8	-3.5	29.3
Tubolare	4.2	0.7	0.2	-0.5	4.6
	"Nucleo comune"			Colonna che cambia a seconda dello scenario	

Per definire il comportamento del materiale nel fine vita, sono stati adottati valori coerenti con i risultati del modello LCA, completati da fattori di correzione, tratti da letteratura e da norme di riferimento:

Tabella 3.15:Fattori di correzione

Scenario	Descrizione sintetica	Valore di fine vita (c1-c4)	Fonte
Riuso	Il materiale viene recuperato e reinstallato senza trasformazioni.	0,0 kg CO_2 eq/m	Approccio semplificato da UNI EN 15804: il componente mantiene funzione e forma.
Riciclo – metalli	Il materiale viene rifuso o recuperato come rottame metallico.	−3,5 (acciaio), −0,5 (tubolare)	Crediti ambientali da riciclo – risultati LCA (modulo D, ISO 14044:2021).
Riciclo – legno	Il materiale è riutilizzato per pannelli o biomassa (stima conservativa).	+0,75	Coefficiente operativo (50% dello smaltimento)
Smaltimento - metalli	Conferimento senza recupero, solo trattamento e trasporto.	+0,41 (acciaio), +0,07 (tubolare)	Per i metalli, quando non si applica più il credito di riciclo, si inserisce un onere minimo di smaltimento dichiarato (0,02 kg CO_2/kg)

Scenario	Descrizione sintetica	Valore di fine vita (c1-c4)	Fonte
Smaltimento -legno	Discarica o combustione con rilascio di CO_2.	+1,5	Dato diretto da LCA.

Per determinare l'impatto ambientale complessivo di ciascuna strategia di gestione, si sommano i valori del nucleo comune (produzione, trasporto, installazione/smontaggio) con il contributo specifico della fase di fine vita:

Tabella 3.16: Calcolo impatto ambientale Puntello legno

Puntello legno		
produzione	6.8	
trasporto	0.9	
installazione	0.3	
nucleo comune (tot)	***8.0***	
fine vita - riuso	0	
fine vita – riciclo	+0.75	
fine vita – smaltimento	+1.50	
tot. riuso	8.0 + 0	***8.0***
tot. riciclo	8 + 0.75	***0.75***
tot. smantellamento	8 + 1.5	***9.5***

Tabella 3.17: Calcolo impatto ambientale Puntello acciaio

Puntello acciaio		
produzione	27.5	
trasporto	4.5	
installazione	0.8	
nucleo comune (tot)	***32.8***	
fine vita - riuso	0	
fine vita – riciclo	-3.5	
fine vita – smaltimento	+0.41	
tot. Riuso	32.8 + 0	***32.8***
tot. Riciclo	32.8 + 3.5	***29.3***
tot. Smantellamento	32.8 + 0.41	***33.21***

Tabella 3.18: Calcolo impatto ambientale Puntello tubolare

Puntello tubolare	
Produzione	4.2
Trasporto	0.7
Installazione	0.2
nucleo comune (tot)	***5.10***
fine vita – riuso	0

fine vita – riciclo	-0.5	
fine vita – smaltimento	+0.07	
tot. Riuso	5.1+0	***5.1***
tot. Riciclo	5.1-0.5	***4.6***
tot. Smantellamento	5.1+0.07	***5.17***

Nel Protocollo, la *Tabella 3.19* permette di individuare a colpo d'occhio quale strategia è più vantaggiosa, semplicemente confrontando i valori numerici.

Tabella 3.19: Tabella riassuntiva - impatto ambientale tot. per strategia (1m di puntello)

Tipologia puntellamento	**Nucleo comune**	**Riuso**	**Riciclo**	**Smaltimento**
Legno	8.0	8.0	8.75	9.5
Acciaio	32.8	32.8	29.3	33.21
Tubolare	5.1	5.1	4.6	5.17

Per chiarire come i parametri e i calcoli presentati possano essere utilizzati in modo operativo all'interno del Protocollo, si riporta di seguito un esempio applicativo. L'obiettivo è mostrare, passo per passo, come un tecnico può stimare l'impatto ambientale complessivo delle diverse strategie di gestione post-smontaggio e scegliere quella più sostenibile. Si consideri un cantiere nel quale deve essere rimosso un sistema di puntellamento in tubolare zincato, con una lunghezza complessiva pari a 24 metri lineari. Il tecnico, consultando la tabella dei valori medi di riferimento, individua i dati relativi al materiale in esame. A questo punto, per ciascuno scenario, viene calcolato l'impatto complessivo moltiplicando il valore totale per la lunghezza effettiva del sistema:

1. scenario A – Riuso diretto: il riuso comporta che il materiale venga smontato, controllato e reinstallato in un altro cantiere senza ulteriori trattamenti. Il calcolo è quindi 5.1*24= 122,4 kg CO_2 eq;
2. scenario B – Riciclo: il metallo viene rifuso e reimmesso nel ciclo produttivo, generando un credito ambientale per la riduzione dell'uso di materia prima vergine. Il calcolo è quindi 4.6*24= 110,4 kg CO_2 eq;
3. scenario C – Smantellamento: il materiale è conferito a discarica o impianto di trattamento senza recupero, con un piccolo onere aggiuntivo legato al trasporto e alla gestione del rifiuto. Il calcolo, quindi, è 5.17*24= 124,1 kg CO_2 eq.

Dalla comparazione dei tre valori risulta che la strategia con l'impatto ambientale più basso è il riciclo, con 110,4 kg CO_2 eq, seguita dal riuso con 122,4 kg CO_2 eq, mentre lo smaltimento è la soluzione meno sostenibile con 124,1 kg CO_2 eq. Nel contesto del Protocollo, questa analisi consente di quantificare in modo oggettivo la convenienza ambientale delle diverse strategie e di motivare la scelta operativa sulla base di un criterio tecnico misurabile.

3.7.4.3 Integrazione della valutazione economica

Oltre all'aspetto ambientale, lo studio condotto ha previsto anche un'analisi economica orientata a valutare i costi associati alle diverse strategie di gestione dei materiali post-smontaggio. I risultati ottenuti consentono di introdurre nel

Protocollo un ulteriore parametro di supporto decisionale, volto a integrare la sostenibilità economica con quella ambientale. La logica di calcolo rimane la stessa adottata per l'analisi LCA: per ogni materiale si considera un valore unitario di costo riferito all'unità funzionale di 1 m lineare di puntellamento, distinto per le tre strategie di gestione (riuso, riciclo, smaltimento). I costi comprendono le voci relative a produzione, trasporto, installazione/smontaggio e trattamento di fine vita, e derivano dalle elaborazioni riportate nel *Capitolo 3.7.2 – Valutazione ambientale ed economica*, in particolare dalle *Tabella 3.11* e *Tabella 3.12*, basate su fonti tecniche ufficiali (Prezzario DEI – Opere Edili 2023, Prezzario Regionale Abruzzo 2023, e Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2023 – Tariffe medie di trasporto edilizio).

Tabella 3.20: Costi unitari medi per strategia di gestione (€/m di puntello)

Materiale	Riuso €/m	Riciclo €/m	Smaltimento €/m	Fonte dati
Legno	7.40	9.80	12.20	Prezzario DEI 2023; Regione Abruzzo 2023
Acciaio	17.80	21.00	27.50	DEI 2023; MIT 2023
Tubolare	9.20	10.80	12.00	DEI 2023; stima casi studio

Anche in questo caso, la lettura è di tipo comparativo: più basso è il valore, minore è la spesa associata alla strategia. L'andamento dei risultati mostra una coerenza generale tra convenienza ambientale ed economica. Le strategie di riuso e riciclo, già individuate come più sostenibili in termini di emissioni di CO_2 equivalente, risultano generalmente anche più vantaggiose sul piano dei costi diretti. Questa analisi consente di trasferire all'interno del Protocollo una valutazione di sostenibilità integrata, nella quale il tecnico può confrontare, per ogni materiale, sia l'impatto ambientale (kg CO_2 eq/m) sia l'incidenza economica (€/m).

3.7.4.4 Scheda di controllo ambientale ed economico

Il controllo ambientale ed economico non ha la finalità di sostituire l'analisi LCA completa, ma di tradurre i risultati ottenuti nella fase di studio in uno strumento operativo semplificato, sviluppato specificamente nell'ambito della presente ricerca per essere integrato nel Protocollo. In questo modo, anche nei cantieri in cui non sia possibile condurre un'analisi ambientale approfondita, il metodo consente di effettuare una valutazione oggettiva, tracciabile e replicabile della sostenibilità delle diverse strategie operative, superando approcci puramente qualitativi o intuitivi.

A partire dai risultati illustrati nei paragrafi precedenti, è stata quindi sviluppata una scheda di valutazione ambientale ed economica che integra, in un unico supporto decisionale, sia l'indicatore ambientale sintetico derivato dall'LCA sia

un parametro economico di confronto. L'inclusione del fattore costo non rappresenta un elemento accessorio, ma consente di affiancare alla dimensione ambientale una valutazione di fattibilità economica, rendendo il processo decisionale coerente con le reali condizioni operative di cantiere.
Il risultato operativo del passo consiste quindi nella definizione di una Scheda di controllo ambientale ed economica (*Figura 3.29*), che consente di riportare in forma sintetica le valutazioni condotte sulle diverse strategie di gestione dei materiali post-smontaggio. La scheda ha una struttura semplice e replicabile, pensata per essere compilata direttamente dal tecnico incaricato, sulla base della lunghezza totale dei puntellamenti e delle tipologie di materiale impiegate. Nella pratica, il tecnico potrà compilare la scheda in ambiente Excel, inserendo la lunghezza effettiva dei puntellamenti e selezionando la tipologia di materiale. Il foglio di calcolo, mediante formule automatiche, restituirà i valori di impatto e di costo complessivo, evidenziando in modo immediato la strategia più vantaggiosa.

Materiale	Strategia	Lunghezza (m)	Impatto unitario (kg CO_2 eq/m)	Costo unitario (€/m)	Impatto totale (kg CO_2 eq/m)	Costo totale (kg CO_2 eq/m)	Strategia migliore
	Riuso						
	Riciclo						
	Smaltimento						

Figura 3.29: Scheda di valutazione Ambientale

Per facilitare la compilazione, il file è stato strutturato in modo intuitivo: le celle blu indicano i campi da compilare manualmente (materiale, quantità, strategia selezionata), mentre le celle gialle contengono dati e formule preimpostate, che vengono aggiornate automaticamente in base ai valori inseriti. In questo modo, il Protocollo diventa non solo uno strumento metodologico, ma anche un dispositivo operativo di verifica e supporto decisionale, capace di integrare in modo trasparente gli aspetti ambientali, tecnici ed economici e di garantire uniformità nella compilazione dei dati tra i diversi cantieri analizzati. Le uniche caselle da compilare manualmente sono due: la prima, denominata "Materiale", consente di scegliere la tipologia di puntellamento tra le tre disponibili — legno, acciaio o tubolare zincato — tramite un elenco a tendina preimpostato; la seconda, denominata "Lunghezza (m)", permette di indicare la lunghezza complessiva del sistema di puntellamento oggetto dell'analisi. Una volta selezionato il materiale, come nella *Figura 3.30*, il foglio richiama automaticamente i parametri caratteristici relativi alle tre strategie di gestione — riuso, riciclo e smaltimento — aggiornando i valori di impatto unitario (kg CO_2 eq/m) e di costo unitario (€/m) associati a ciascuna di esse.

Materiale	Strategia	Lunghezza (m)	Impatto unitario (kg CO_2 eq/m)	Costo unitario (€/m)	Impatto totale (kg CO_2 eq/m)	Costo totale (kg CO_2 eq/m)	Strategia migliore
Legno	Riuso		8	7,4			
	Riciclo		8,75	9,8			
	Smaltimento		9,5	12,2			

Figura 3.30: Esempio scelta Materiale nella Scheda di valutazione

Dopo aver inserito la lunghezza nella casella dedicata (*Figura 3.31*), il foglio di calcolo procede in modo automatico al calcolo dell'impatto totale, ottenuto moltiplicando la lunghezza per l'impatto unitario, e del costo totale, determinato come prodotto tra la lunghezza e il costo unitario. Sulla base dei valori calcolati, il foglio elabora infine il confronto tra le tre strategie e individua quella più vantaggiosa, riportandone il nome all'interno della casella verde "Strategia migliore". In questo modo il tecnico può visualizzare immediatamente, in un unico prospetto, sia i valori complessivi di impatto ambientale e di costo, sia la strategia che garantisce la maggiore efficienza complessiva.

Materiale	Strategia	Lunghezza (m)	Impatto unitario (kg CO_2 eq/m)	Costo unitario (€/m)	Impatto totale (kg CO_2 eq/m)	Costo totale (kg CO_2 eq/m)	Strategia migliore
Legno	Riuso	20	8	7,4	160	148	RIUSO
	Riciclo		8,75	9,8	175	196	
	Smaltimento		9,5	12,2	190	244	

Figura 3.31: Esempio compilazione Scheda di valutazione

3.8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Aktas, C. B., & Bilec, M. M. (2012). Impact of lifetime on US residential building LCA results. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *17*(3), 337–349. https://doi.org/10.1007/s11367-011-0363-x

EN 15804:2012+A2:2019 – Sustainability of Construction Works – Environmental Product Declarations – Core Rules for the Product Category of Construction Products (2019).

Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., & Rydberg, T. (2011). Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. *Environmental Science & Technology*, *45*(1), 90–96. https://doi.org/10.1021/es101316v

Habert, G., & Roussel, N. (2009). Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. *Cement and Concrete Composites*, *31*(6), 397–402.

Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2018). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Springer.

Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.). (2014). *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2015). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415416

Norgate, T. E., Jahanshahi, S., & Rankin, W. J. (2007). Assessing the environmental impact of metal production processes. *Journal of Cleaner Production*, *15*(8–9), 838–848.

Prezzario regionale dei lavori pubblici della Regione Abruzzo 2023. (2023).

Redazione DEI. (2023). *Prezzario DEI – Opere Edili 2023: Prezzi informativi dell'edilizia*.

UNI EN 15978:2011 – Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method. (2011).

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *21*(9), 1218–1230. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8

4 VALIDAZIONE DELL'APPLICABILITA' DEL PROTOCOLLO DI CANTIERE

Ai fini della validazione del Protocollo proposto, l'approccio metodologico è stato applicato a cinque casi studio reali, situati nella provincia dell'Aquila, come mostrato nella *Figura 4.1*. Gli edifici analizzati, tutti destinati a uso civile, comprendono: due abitazioni residenziali nel comune di Montereale (AQ); un complesso edilizio nel centro storico dell'Aquila, di proprietà del Convitto Nazionale, della Camera di Commercio e della Provincia; un immobile ubicato in una zona periferica dell'Aquila, in via Delle Buone Novelle, e un Palazzo di proprietà dell'Università degli Studi dell'Aquila.

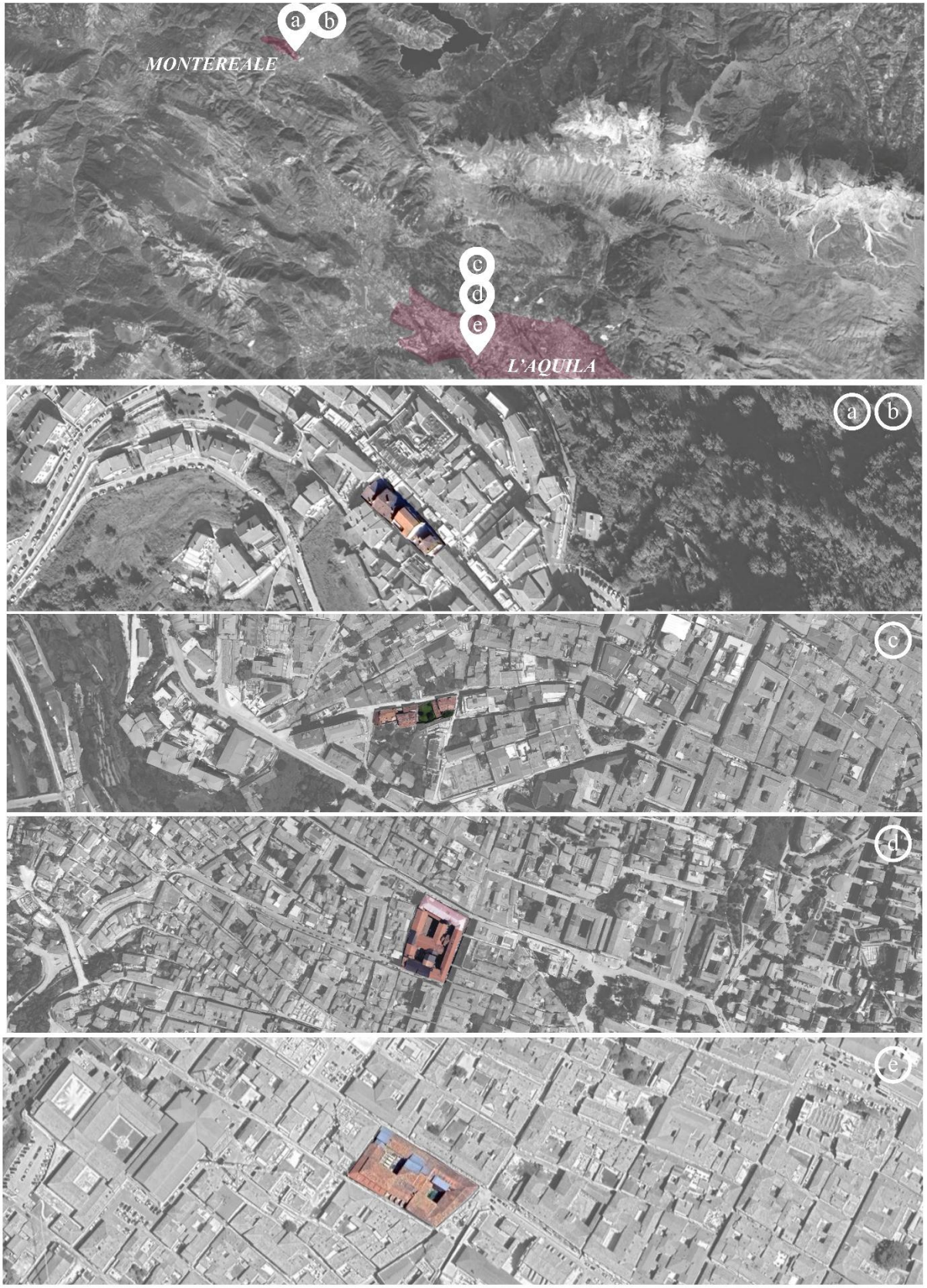


Figura 4.1: Localizzazione dei cinque casi di studio

4.1 AGGREGATO SITO A MONTEREALE #1, L'AQUILA

4.1.1 Inquadramento

Il presente caso di studio riguarda un edificio storico a destinazione mista, situato in un contesto urbano consolidato. La struttura si sviluppa su tre livelli fuori terra, con una configurazione funzionale che riflette le caratteristiche tipiche dell'edilizia tradizionale locale: il piano terra ospita attività commerciali, mentre il primo e il secondo piano sono destinati ad uso residenziale. Dal punto di vista costruttivo, l'edificio è realizzato in muratura portante costituita da blocchi di pietra locale, una scelta costruttiva che testimonia la volontà di utilizzare materiali reperibili in loco, tipici dell'edilizia vernacolare. Le pareti divisorie interne sono in laterizio, mentre la copertura è realizzata con una struttura in legno, conformemente alle tecniche tradizionali della zona. I solai al piano terra e al primo piano sono costituiti da voltine in mattoni sorrette da profili in acciaio tipo IPE, una soluzione mista che combina elementi in muratura e metallo per garantire sia solidità che flessibilità strutturale. Al secondo piano, invece, è presente un controsoffitto in camorcanna, materiale leggero e diffusamente impiegato nelle finiture interne dell'edilizia storica. L'edificio presenta alcune problematiche strutturali e di degrado, che hanno motivato l'analisi approfondita oggetto del presente studio. In particolare, sono state osservate lesioni verticali lungo il prospetto principale, quello affacciato su via Nazionale, che suggeriscono possibili movimenti differenziali o fenomeni di assestamento della muratura. Inoltre, sono stati rilevati distacchi e fessurazioni nel manto di copertura, con conseguente rischio di infiltrazioni e danneggiamenti più estesi nel tempo. Questo insieme di criticità rende l'edificio un caso esemplare per comprendere le dinamiche di degrado in strutture storiche in muratura, nonché le potenzialità e i limiti degli interventi di consolidamento e recupero. Il presente lavoro si propone quindi di analizzare in modo dettagliato le caratteristiche costruttive, le cause dei dissesti riscontrati e le possibili strategie di intervento, con l'obiettivo di coniugare la conservazione del patrimonio architettonico con la sicurezza strutturale.

4.1.2 Oggetto della validazione e configurazione iniziale

Per validare il Protocollo oggetto di studio, l'attenzione è stata rivolta alla facciata dell'edificio prospiciente Via Nazionale (*Figura 4.2*.a), interessata da un semplice meccanismo di ribaltamento, con cerniera plastica localizzata in sommità del piano terra. Per contrastare tale cinematismo, sono stati installati dispositivi di contenimento costituiti da elementi metallici e lignei, disposti sia in verticale che in orizzontale (*Figura 4.2*.b). Tali elementi assolvono la funzione di impedire il ribaltamento o lo spanciamento della muratura. Il sistema di puntellamento risulta pienamente funzionante, con materiali in buone condizioni e connessioni correttamente eseguite tra gli elementi.

4.1.3 Fase 01: Analisi preliminari

L'indagine in sito ha evidenziato un quadro fessurativo compatibile con tale cinematismo, senza fenomeni di disgregazione significativa della muratura. I materiali risultano in buone condizioni, con lievi fenomeni di erosione imputabili a fattori antropici, escludendo la necessità di interventi preliminari di consolidamento.

4.1.4 Fase 02: Riscontro con l'attività progettuale

La valutazione è stata condotta in coerenza con le lavorazioni previste nel progetto di restauro, verificando la compatibilità tra le operazioni temporanee e gli interventi strutturali programmati. In particolare, è stata considerata la presenza della copertura spingente e la sua incidenza sul meccanismo di collasso individuato.

4.1.5 Fase 03: Calcolo del coefficiente di sicurezza λ

Applicando il foglio di calcolo sviluppato nell'ambito della ricerca, l'indice di rischio normalizzato λ_0, calcolato in assenza di qualunque intervento preventivo, colloca l'edificio in una condizione di relativa sicurezza, corrispondente alla zona gialla ($\lambda_0 = 0{,}48$, caso C1 in *Figura 4.2*.c).

4.1.6 Fase 04: Attuazione delle prescrizioni

L'attuazione degli interventi preliminari obbligatori, che in questo caso consistono nella completa rimozione della copertura spingente, determina un miglioramento ulteriore, portando l'indice di rischio a valori prossimi all'intervallo verde ($\lambda_1 = 0{,}96$, caso C2 in *Figura 4.2*.c). L'applicazione dell'intervento preventivo facoltativo, costituito dal puntellamento verticale dei solai insieme alla rimozione della copertura spingente, mantiene l'edificio all'interno dell'intervallo giallo, con una lieve diminuzione dell'indice di rischio rispetto al caso precedente ($\lambda_3 = 0{,}77$, caso C3 in *Figura 4.2*.c). Qualora venga adottata, come intervento preventivo opzionale la rimozione totale dei solai insieme alla copertura spingente, l'indice di rischio aumenta ulteriormente ($\lambda_6 = 0{,}84$, caso C4 in *Figura 4.2*.c) rispetto al valore λ_3 precedente.

4.1.7 Fase 05: Smontaggio dei puntelli

In questo scenario, la rimozione del puntellamento dovrebbe avvenire in modo graduale, parallelamente alle attività di restauro in corso, consentendo un monitoraggio continuo del comportamento della porzione strutturale compromessa mediante strumenti installati in sito. Qualora si proceda alla sola rimozione della copertura (caso C2 in *Figura 4.2*.c), senza ulteriori interventi opzionali, lo smontaggio del sistema di puntellamento potrebbe avvenire in condizioni prossime alla piena sicurezza (zona verde), rendendo possibile la rimozione dei dispositivi lignei e metallici senza un rischio significativo di instabilità muraria.

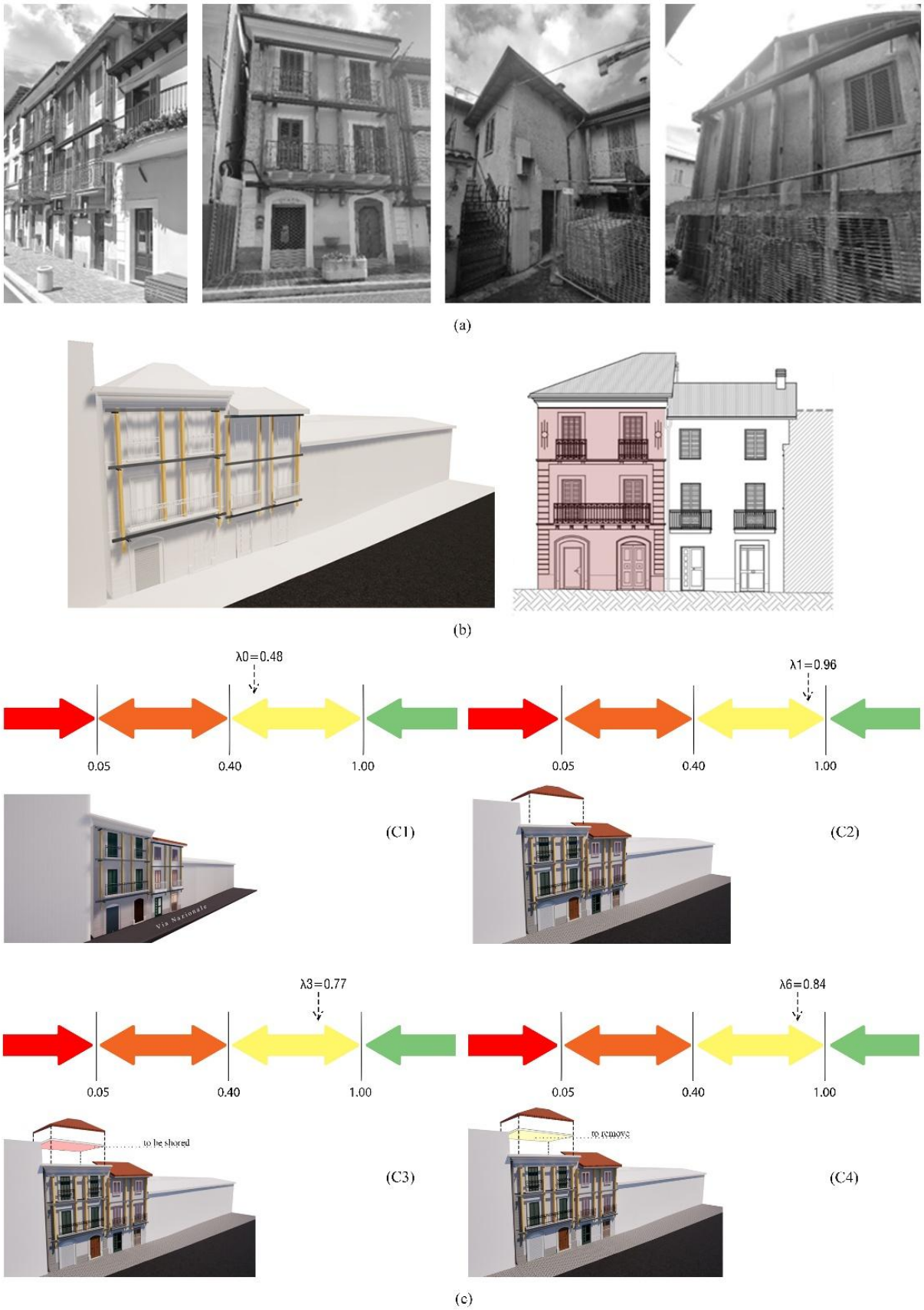


Figura 4.2. Caso di studio #1 sito a Montereale: (a) documentazione fotografica; (b) puntellamenti montati in facciata; (c) calcolo del coefficiente di sicurezza

Prima dello smontaggio finale degli elementi, è necessario comprendere il contesto nel quale l'edificio si trova, così da definire il cantiere e le zone logistiche che lo costituiscono. A tale fine è stata impiegata la Scheda di contesto sviluppata nel contesto della ricerca, nella quale viene analizzato il contesto di impianto del cantiere, l'area di pertinenza (se si tratta di un'area pubblica o privata), la vicinanza a cantieri limitrofi, ma anche i mezzi e le attrezzature impiegate nel cantiere oggetto di validazione. Si riporta l'output del foglio riguardante il cantiere dell'immobile a Montereale (*Figura 4.3*).

0	*Tipologia puntellamento*		
	Incamiciatura	Soluzione	Materiale
0.1	Punt. Di Contrasto		
0.2	Punt. Di Ritegno		
0.3	Punt. Di Sostegno e Sbadacchiature		
0.4	Punt. Di Sostegno Solai e Balconi		
0.5	Centinatura		
0.6	Tirantatura		
0.7	Cerchiatura		
0.8	Incamiciatura		Elementi in acciaio
1	*Conoscenza*		
1.1	*Stato di Degrado*		
1.1.1	Struttura in legno	Presenza tarli	
		Muffe	
		Stato collegamenti	
1.1.2	Struttura Metallica	Stato deformazioni	Buono Stato
		Stato corrosione	Buono Stato
		Stato efficienza giunti	Buono Stato
		Stato efficienza collegamenti	Buono Stato
1.2	*Area di pertinenza manufatto*		
1.2.1	Area Pubblica	si	
		Occupazione suolo pubblico	si
		Accesso da strada	Trafficata
		Accesso	Diretto
		Vicinanza cantieri limitrofi	si
		Vicinanza edifici limitrofi	si
		Interferenza con mezzi limitrofi	si
1.2.2	Area Privata		
		Occupazione suolo pubblico	
		Accesso da strada	
		Accesso	
		Vicinanza cantieri limitrofi	
		Vicinanza edifici limitrofi	
		Interferenza con mezzi limitrofi	
2	*Procedura di Rimozione*		
2.1	*Tipologia puntellamento*		
2.1.1	Punt. Di Contrasto	RIF. SCHEDA 1	
2.1.2	Punt. Di Ritegno	RIF. SCHEDA 2	
2.1.3	Punt. Di Sostegno e Sbadacchiature	RIF. SCHEDA 3	
2.1.4	Punt. Di Sostegno Solai e Balconi	RIF. SCHEDA 4	
2.1.5	Centinatura	RIF. SCHEDA 5	
2.1.6	Tirantatura	RIF. SCHEDA 6	
2.1.7	Cerchiatura	RIF. SCHEDA 7	
2.1.8	Incamiciatura	RIF. SCHEDA 8	
2.2	*Mezzi e Attrezzature per Rimozione*		
2.2.1	Gru		
2.2.2	Autogrù	si	

Figura 4.3: Analisi del contesto

Le fasi operative previste dal Protocollo sono state rappresentate mediante modellazione informativa BIM, con l'obiettivo di visualizzare in modo tridimensionale le configurazioni di puntellamento e le sequenze di smontaggio.

La modellazione è stata articolata in step successivi, corrispondenti alle diverse fasi operative, così da restituire una lettura progressiva dell'intervento e rendere esplicito l'ordine di rimozione dei dispositivi provvisionali. Tale rappresentazione ha consentito di evidenziare le relazioni spaziali tra puntellamenti, murature e lavorazioni previste, facilitando l'individuazione delle possibili interferenze e il coordinamento con le attività di restauro. Il modello informativo si configura pertanto come uno strumento di supporto alla comprensione e al controllo delle sequenze operative, integrando la valutazione analitica con una rappresentazione coerente del processo di smontaggio. Le fasi sono illustrate nella *Figura 4.4*.



Fase0: Allestimento del cantiere



Fase1: Montaggio del ponteggio



Fase2: Puntellamento solaio



Fase3: Rimozione copertura



Fase4: Rimozione puntelli

Figura 4.4: Fasi esecutive di cantiere

4.1.8 Fase 06: Valutazione ambientale del fine vita

Per il primo edificio dell'aggregato sito a Montereale, caratterizzato da un sistema di puntellamento misto in legno e acciaio, è stata applicata la procedura di valutazione ambientale ed economica secondo i parametri e le modalità definite nel *Capitolo 3.7.3* del Protocollo. L'obiettivo è stato quello di verificare, attraverso i valori medi normalizzati di impatto e costo unitario, quale strategia di gestione post-smontaggio risulti più sostenibile per ciascuna tipologia di materiale utilizzata nel cantiere. Nel caso dei puntellamenti in legno, la lunghezza complessiva analizzata è pari a circa 7 metri lineari.
Dai dati riportati nella scheda di valutazione *(Figura 4.5*), l'impatto ambientale risulta pari a 56 kg CO_2 eq per l'ipotesi di riuso, 61,25 kg CO_2 eq per il riciclo e 66,5 kg CO_2 eq per lo smaltimento. Dal punto di vista economico, i costi corrispondenti sono rispettivamente 51,8 €, 68,6 € e 85,4 €. L'andamento dei risultati conferma la maggiore efficienza della strategia di riuso, che comporta sia l'impatto ambientale più basso sia il costo più contenuto, con un risparmio complessivo di circa 35% rispetto allo smaltimento. Il vantaggio del riuso deriva dalla possibilità di reinstallare gli elementi lignei in nuovi cantieri senza necessità di ulteriori trattamenti, evitando così emissioni e spese legate al conferimento in discarica o al trasporto verso impianti di recupero.

Materiale	Strategia	Lunghezza (m)	Impatto unitario (kg CO_2 eq/m)	Costo unitario (€/m)	Impatto totale (kg CO_2 eq/m)	Costo totale (kg CO_2 eq/m)	Strategia migliore
Legno	Riuso	7	8	7,4	56	51,8	RIUSO
	Riciclo		8,75	9,8	61,25	68,6	
	Smaltimento		9,5	12,2	66,5	85,4	

Figura 4.5: Scheda di valutazione ambientale ed economica per puntelli lignei

Per quanto riguarda i puntellamenti metallici in acciaio, la lunghezza complessiva considerata è di 5 metri lineari. L'impatto totale, come mostrato nella *Figura 4.6*, risulta pari a 164 kg CO_2 eq per il riuso, 146,5 kg CO_2 eq per il riciclo e 166,05

kg CO_2 eq per lo smaltimento. Sul piano economico, i costi totali associati alle tre strategie sono rispettivamente 89 €, 105 € e 137,5 €. In questo caso, la strategia di riciclo rappresenta l'opzione più equilibrata: pur avendo un costo leggermente superiore al riuso, essa consente di ottenere una riduzione di circa 11% delle emissioni di CO_2 grazie al recupero del rottame metallico e alla conseguente diminuzione della domanda di materia prima vergine. Lo smaltimento risulta invece l'alternativa più penalizzante sotto entrambi i profili, sia per l'elevato impatto ambientale derivante dalla mancata valorizzazione del materiale, sia per i maggiori costi legati ai trasporti e alle operazioni di conferimento.

Materiale	Strategia	Lunghezza (m)	Impatto unitario (kg CO_2 eq/m)	Costo unitario (€/m)	Impatto totale (kg CO_2 eq/m)	Costo totale (kg CO_2 eq/m)	Strategia migliore
Acciaio	Riuso	5	32,8	17,8	164	89	RICICLO
	Riciclo		29,3	21	146,5	105	
	Smaltimento		33,21	27,5	166,05	137,5	

Figura 4.6: Scheda di valutazione ambientale ed economica per puntelli in acciaio

Nel complesso, il caso di Montereale evidenzia come la scelta della strategia di gestione post-smontaggio possa produrre effetti significativi sia sull'impatto ambientale che sui costi complessivi dell'intervento. Il riuso emerge come la soluzione ottimale per i puntellamenti in legno, mentre il riciclo risulta preferibile per quelli metallici, confermando la coerenza tra i risultati ottenuti nella validazione e le tendenze già emerse nella fase metodologica del Protocollo.

4.2 AGGREGATO SITO A MONTEREALE #2, L'AQUILA

4.2.1 Inquadramento

L'edificio oggetto del presente caso di studio appartiene al medesimo aggregato edilizio analizzato in precedenza; per una descrizione dettagliata del contesto e delle caratteristiche generali si rimanda pertanto al *Capitolo 4.1.1*.

4.2.2 Oggetto della validazione e configurazione iniziale

L'edificio fa parte dello stesso aggregato edilizio del precedente caso di studio, con il quale condivide caratteristiche tipologiche, costruttive e vulnerabilità. Le facciate interessate affacciano sul medesimo asse viario e manifestano un comportamento strutturale di tipo composito, caratterizzato da un ribaltamento parziale della parete principale e da lievi deformazioni delle tamponature laterali. I sistemi di puntellamento installati riprendono la stessa logica applicativa già descritta per l'edificio adiacente, con telai metallici in tubi e giunti accoppiati a tiranti orizzontali e fasciature di contenimento.

4.2.3 Fase 01: Analisi preliminari

Le verifiche condotte in sito hanno evidenziato un buono stato di conservazione dei materiali e delle connessioni, senza fenomeni significativi di degrado o instabilità (*Figura 4.7*.a e *Figura 4.7*.b). In linea con quanto emerso per il fabbricato precedente, non si ritiene necessario prevedere ulteriori interventi di

consolidamento murario, essendo le opere provvisionali tuttora efficaci e correttamente funzionanti.

4.2.4 Fase 02: Riscontro con l'attività progettuale

La valutazione è stata condotta in coerenza con le lavorazioni previste nel progetto di restauro, verificando la compatibilità tra le operazioni temporanee e gli interventi strutturali programmati. In particolare, è stata considerata la presenza della copertura spingente e la sua incidenza sul meccanismo di collasso individuato.

4.2.5 Fase 03: Calcolo del coefficiente di sicurezza λ

L'indice di rischio normalizzato λ_0, calcolato in assenza di qualunque intervento preventivo, evidenzia una condizione di elevata vulnerabilità, in cui la stabilità del paramento murario dipende in modo sostanziale dai sistemi di puntellamento installati ($\lambda_0 = 0{,}08$, caso C1 in *Figura 4.7*.c).

4.2.6 Fase 04: Attuazione delle prescrizioni

L'attuazione degli interventi preliminari obbligatori, che in questo caso consistono nella completa rimozione della copertura spingente, determina un miglioramento, indicando un sensibile incremento della condizione di sicurezza generale, pur rimanendo all'interno della fascia intermedia dell'intervallo di rischio ($\lambda_1 = 0{,}37$, caso C2 in *Figura 4.7*.c). L'applicazione dell'intervento preventivo facoltativo, costituito dal puntellamento verticale dei solai insieme alla rimozione della copertura spingente, mantiene l'edificio all'interno del medesimo intervallo, senza significativi cambiamenti ($\lambda_3 = 0{,}33$, caso C3 in *Figura 4.7*.c). Qualora venga adottata, come intervento preventivo opzionale, la rimozione totale dei solai insieme alla copertura spingente, l'indice di rischio rimane invariato ($\lambda_7 = 0{,}37$, caso C4 in *Figura 4.7*.c) rispetto al valore λ_3 precedente.

4.2.7 Fase 05: Smontaggio dei puntelli

In questo scenario, la rimozione del puntellamento dovrebbe avvenire in modo graduale, parallelamente alle attività di restauro in corso, consentendo un monitoraggio continuo del comportamento della porzione strutturale compromessa mediante strumenti installati in sito.

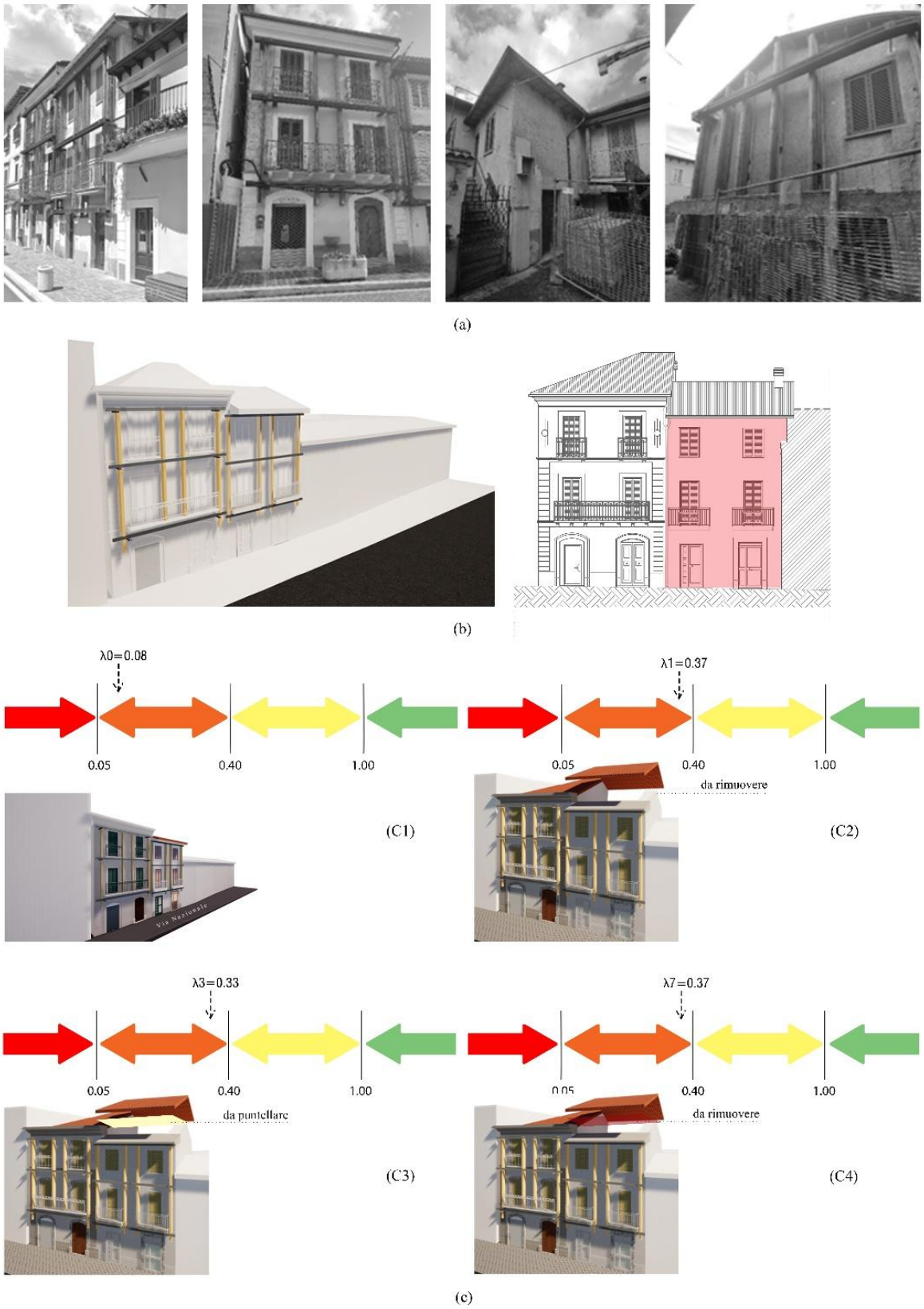


Figura 4.7: Aggregato sito in Montereale n°2: (a) documentazione fotografica; (b) puntellamenti montati in facciata; (c) calcolo del coefficiente di sicurezza

Le fasi di cantiere previste sono le medesime del primo edificio, si rimanda quindi alla *Figura 4.4*. L'analisi del contesto dell'aggregato non evidenzia differenze significative rispetto a quanto già descritto per l'edificio n° 1, con il quale condivide posizione, caratteristiche morfologiche e condizioni di accessibilità. Si fa quindi riferimento alle stesse osservazioni evidenziati nella *Figura 4.3*.

4.2.8 Fase 06: Valutazione ambientale del fine vita

Per quanto riguarda la valutazione ambientale, le stesse ipotesi di calcolo adottate per il primo fabbricato sono state estese anche al presente caso di studio, poiché i materiali, le tecnologie provvisionali e le distanze di trasporto coincidono. Di conseguenza, i risultati della valutazione ambientale coincidono sostanzialmente con quelli già illustrati per l'aggregato n° 1 nelle *Figura 4.5* e *Figura 4.6*, sia in termini di impatti ambientali diretti (emissioni di CO_2 eq) sia di costi energetici associati alle fasi di montaggio, manutenzione e rimozione dei puntellamenti metallici. Pertanto, anche per l'aggregato n° 2 il contributo principale all'impatto complessivo è imputabile alla produzione e al trasporto dei componenti in acciaio, mentre la possibilità di riuso o riciclo dei materiali al termine del ciclo di vita rappresenta la strategia più efficace per ridurre l'impronta ambientale complessiva. In linea con i risultati del caso precedente, la strategia di riuso si conferma come l'opzione più vantaggiosa sia dal punto di vista ambientale sia da quello economico, mentre smaltimento e riciclo comportano impatti maggiori in termini di emissioni climalteranti e consumo di risorse.

4.3 CONVITTO NAZIONALE, L'AQUILA

4.3.1 Inquadramento

Il complesso edilizio analizzato nel presente studio costituisce un aggregato strutturale, frutto di un processo costruttivo prolungato e stratificato che si è sviluppato nell'arco di diversi secoli. All'interno dell'edificio sono tuttora presenti componenti architettoniche e strutturali risalenti fino al XII secolo, a testimonianza della rilevanza storica e culturale del complesso nel tessuto urbano della città dell'Aquila. Fino al sisma del 2009, l'edificio accoglieva funzioni molteplici ed eterogenee, ospitando il Convitto Nazionale, la Camera di Commercio, uffici della Provincia dell'Aquila, una storica biblioteca, una chiesa e diverse attività commerciali localizzate al piano strada. Questa diversificazione funzionale si riflette nella complessità spaziale e strutturale dell'insieme, che si estende su un'ampia superficie con un'impronta planimetrica rettangolare di circa 105 metri per 69 metri. Dal punto di vista altimetrico, l'edificio raggiunge un'altezza alla linea di gronda di circa 17 metri, distribuita su un numero variabile di piani che va da due a cinque livelli a seconda delle porzioni considerate. Il campanile della chiesa compresa nel complesso si innalza fino a circa 25 metri, configurandosi come uno degli elementi verticali più riconoscibili della composizione architettonica. Sotto il profilo strutturale, l'aggregato presenta una notevole eterogeneità, determinata dalle successive fasi costruttive e dai numerosi interventi di modifica. I muri portanti sono costituiti prevalentemente da blocchi di pietra sbozzata, disposti con o senza regolarità di corsi orizzontali, e in alcune

aree da laterizi pieni legati con malta di calce. Le strutture orizzontali risultano altrettanto diversificate: oltre alla presenza prevalente di volte in mattoni sorrette da archi murari, si riscontrano solai in calcestruzzo armato e sistemi misti con travi in acciaio e pignatte in laterizio, introdotti in occasione di ristrutturazioni più recenti. Le coperture sono realizzate in modo uniforme mediante tradizionali orditure lignee con capriate a doppia o tripla orditura, sovrastate da tavolati lignei di appoggio per il manto di copertura. L'evento sismico che ha colpito l'Abruzzo il 6 aprile 2009, seguito da una lunga sequenza di repliche, ha provocato danni estesi e gravi sia agli elementi strutturali sia a quelli non strutturali. Il livello complessivo di danneggiamento risulta significativo, con l'unica eccezione del corpo di fabbrica della Camera di Commercio, precedentemente oggetto di un intervento di ristrutturazione strutturale che aveva comportato l'inserimento di telai in cemento armato all'interno della muratura e la sostituzione dei solai originari. I danni più severi comprendono deformazioni e rotazioni fuori piano con spostamenti permanenti, derivanti dall'attivazione di meccanismi di ribaltamento delle facciate e di dissesti localizzati agli angoli dell'edificio. Si rilevano inoltre lesioni orizzontali dovute alla flessione verticale delle pareti, fessurazioni diagonali indicative di fenomeni combinati di ribaltamento e formazione di cunei di spinta, nonché cedimenti parziali delle coperture e dei controsoffitti dei sottotetti. Questa complessità architettonica e strutturale, unita all'elevato valore storico e alla gravità dei danni sismici, rende il complesso un caso di studio esemplare per l'analisi della vulnerabilità sismica degli aggregati edilizi storici. Al tempo stesso, costituisce un contesto significativo per approfondire strategie di intervento compatibili, finalizzate alla conservazione del patrimonio architettonico e al ripristino delle condizioni di sicurezza strutturale. I dati dimensionali, costruttivi e funzionali del complesso sono desunti dalla documentazione di rilievo e valutazione del danno redatta nell'ambito delle attività di emergenza e ricostruzione post-sismica coordinate dall'Ufficio Speciale per la Ricostruzione del Comune dell'Aquila (USRC).

4.3.2 Oggetto della validazione e configurazione iniziale

L'edificio del Convitto Nazionale ha riportato danni significativi durante gli eventi sismici che hanno colpito L'Aquila nel 2009. L'installazione delle opere provvisionali di puntellamento post-sisma si è rivelata complessa e articolata. La *Figura 4.8*.a mostra alcuni di questi sistemi temporanei di sostegno. Le facciate prospicienti Corso Umberto I e Corso Vittorio Emanuele II risultano interessate da un duplice meccanismo composito di ribaltamento. Ai fini dell'applicazione del Protocollo, l'attenzione si è concentrata sul meccanismo di ribaltamento composito lungo Corso Umberto I. Per contrastare tale fenomeno sono state predisposte diverse tipologie di puntellamento, tra cui: in primo luogo, fasciature in polistirene, disposte in modo da realizzare una parziale fasciatura passante, compatibilmente con la presenza di aperture laterali allineate ma distanziate tra loro. Queste fasciature hanno la funzione di contrastare i movimenti di ribaltamento e l'eventuale rigonfiamento della muratura. In secondo luogo, sistemi di tiranti e puntellamenti metallici costituiti da tubi e morsetti collegati tra loro a formare un telaio di contenimento ancorato alla facciata (*Figura 4.8*.b).

Tale sistema è concepito per sostenere gli elementi murari compromessi dall'azione sismica, fornendo un rinforzo precauzionale o contenendo eventuali distacchi parziali. Le opere provvisionali installate risultano pienamente funzionali, con i materiali in buono stato di conservazione e connessioni tra i componenti correttamente eseguite.

4.3.3 Fase 01: Analisi preliminari

I sopralluoghi in sito non hanno evidenziato significativi fenomeni di disgregazione della muratura, se si escludono lievi tracce di erosione superficiale. Pertanto, non si ritiene necessario prevedere interventi di consolidamento murario.

4.3.4 Fase 02: Riscontro con l'attività progettuale

La valutazione è stata condotta in coerenza con le lavorazioni previste nel progetto di restauro, verificando la compatibilità tra le operazioni temporanee e gli interventi strutturali programmati. In particolare, è stata considerata la presenza della copertura spingente e la sua incidenza sul meccanismo di collasso individuato.

4.3.5 Fase 03: Calcolo del coefficiente di sicurezza λ

L'indice di rischio normalizzato, calcolato senza considerare alcun intervento preventivo, risulta pari a $\lambda_0 = 0{,}036$ (caso C1 illustrato nella *Figura 4.8*.c). Tale valore ricade nella zona rossa, indicando che il puntellamento non può essere smontato, almeno fino all'esecuzione degli interventi obbligatori.

4.3.6 Fase 04: Attuazione delle prescrizioni

Qualora si procedesse esclusivamente con le misure obbligatorie — in particolare, la rimozione della copertura e dell'azione di spinta delle volte mediante l'inserimento di catene provvisorie — l'indice normalizzato salirebbe a $\lambda_1 = 0{,}46$ (caso C2 in *Figura 4.8*.c). In questa configurazione, il valore rientrerebbe nella zona gialla di sicurezza, in prossimità della soglia con la zona arancione.
Considerando invece le opzioni derivanti dall'esecuzione degli interventi facoltativi, si individuano due possibili scenari: da un lato, il puntellamento della volta interessata dal meccanismo di ribaltamento; dall'altro, la sua rimozione completa. Qualora si optasse per il puntellamento della volta, l'indice di rischio normalizzato risulterebbe pari a $\lambda_4 = 0{,}39$ (caso C3 in *Figura 4.8*.c), valore che si colloca in zona arancione e che pertanto richiede particolare cautela nella fase di smontaggio dei puntelli. In alternativa, se si procedesse alla rimozione integrale della volta, l'indice di rischio aumenterebbe fino a $\lambda_7 = 0{,}47$ (caso C4 in *Figura 4.8*.d), rientrando nella zona gialla di sicurezza e collocandosi su un valore molto prossimo a quello dell'indice λ_1 precedentemente calcolato.

4.3.7 Fase 05: Smontaggio dei puntelli

Considerando la sola applicazione delle misure obbligatorie, la rimozione completa delle opere provvisionali dovrà essere eseguita in modo graduale e coordinato con l'avanzamento dei lavori di consolidamento, consentendo agli

operatori di monitorare il comportamento della porzione danneggiata della struttura attraverso il sistema di controllo installato. Prevedendo invece anche le prescrizioni facoltative, gli interventi di consolidamento dovrebbero essere pianificati in maniera progressiva sui diversi livelli dell'edificio, prevedendo lo smontaggio delle opere provvisionali esclusivamente nel livello oggetto dell'intervento e mantenendo in opera i puntellamenti negli altri piani, con il sistema di monitoraggio operativo.

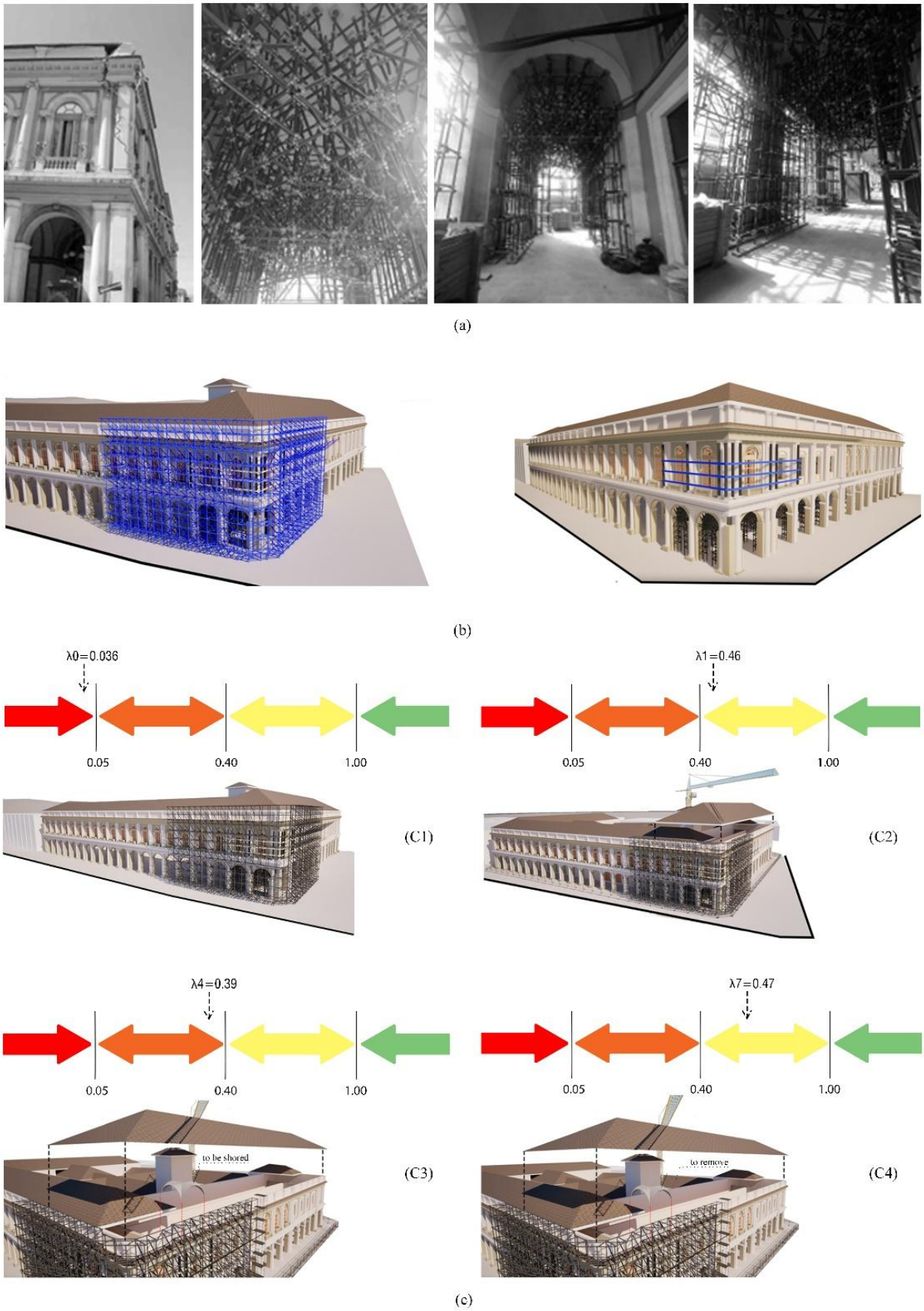


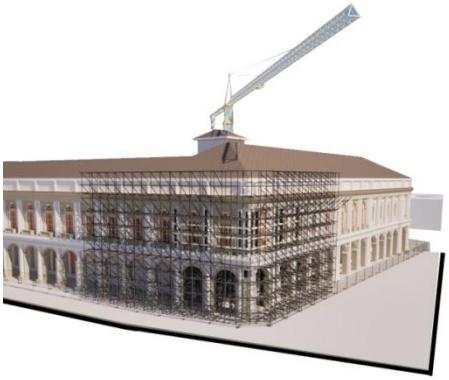
Figura 4.8: Convitto Nazionale: (a) documentazione fotografica; (b) puntellamenti montati in facciata; (c) calcolo del coefficiente di sicurezza

In generale, la rimozione del puntellamento dovrà essere eseguita per step, seguendo l'avanzamento degli interventi di ripristino, in modo che sia possibile osservare il comportamento della porzione danneggiata della struttura attraverso il sistema di monitoraggio installato. A tal proposito, anche per l'aggregato del Convitto Nazionale è stata redatta la scheda a compilazione guidata per l'approfondimento in tema di sicurezza (*Figura 4.9*).

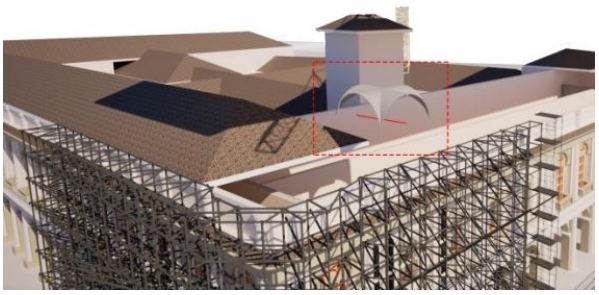
0	***Tipologia puntellamento***		
	Tirantatura	Soluzione	Materiale
0.1	Punt. Di Contrasto		
0.2	Punt. Di Ritegno		
0.3	Punt. Di Sostegno e Sbadacchiature		
0.4	Punt. Di Sostegno Solai e Balconi		
0.5	Centinatura		
0.6	Tirantatura	Traverso con tirantatura laterale esterna	Elementi in acciaio
0.7	Cerchiatura		
0.8	Incamiciatura		
1	***Conoscenza***		
1.1	*Stato di Degrado*		
1.1.1	Struttura in legno	Presenza tarli	
		Muffe	
		Stato collegamenti	
1.1.2	Struttura Metallica	Stato deformazioni	Buono Stato
		Stato corrosione	Buono Stato
		Stato efficienza giunti	Buono Stato
		Stato efficienza collegamenti	Buono Stato
1.2	*Area di pertinenza manufatto*		
1.2.1	Area Pubblica	si	
		Occupazione suolo pubblico	si
		Accesso da strada	Trafficata
		Accesso	Diretto
		Vicinanza cantieri limitrofi	no
		Vicinanza edifici limitrofi	si
		Interferenza con mezzi limitrofi	si
1.2.2	Area Privata		
		Occupazione suolo pubblico	
		Accesso da strada	
		Accesso	
		Vicinanza cantieri limitrofi	
		Vicinanza edifici limitrofi	
		Interferenza con mezzi limitrofi	
2	***Procedura di Rimozione***		
2.1	*Tipologia puntellamento*		
2.1.1	Punt. Di Contrasto	RIF. SCHEDA 1	
2.1.2	Punt. Di Ritegno	RIF. SCHEDA 2	
2.1.3	Punt. Di Sostegno e Sbadacchiature	RIF. SCHEDA 3	
2.1.4	Punt. Di Sostegno Solai e Balconi	RIF. SCHEDA 4	
2.1.5	Centinatura	RIF. SCHEDA 5	
2.1.6	Tirantatura	RIF. SCHEDA 6	
2.1.7	Cerchiatura	RIF. SCHEDA 7	
2.1.8	Incamiciatura	RIF. SCHEDA 8	
2.2	*Mezzi e Attrezzature per Rimozione*		
2.2.1	Gru	si	
2.2.2	Autogrù	no	

Figura 4.9: Analisi del contesto

Si riportano le fasi esecutive previste da cantiere nella *Figura 4.10*.



Fase0: Allestimento del cantiere e montaggio gru



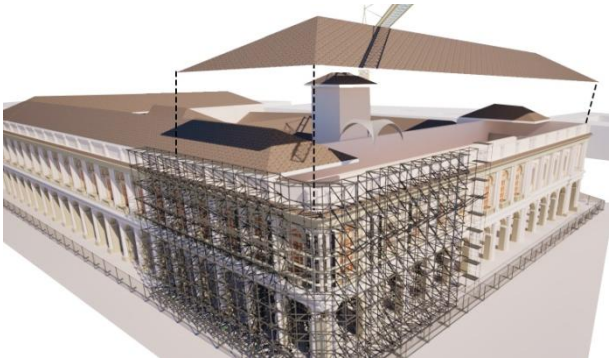
Fase1: Inserimento catene nelle volte



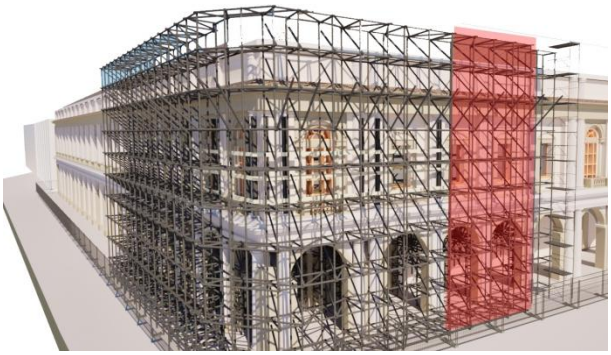
Fase2: Consolidamento interno delle facciate



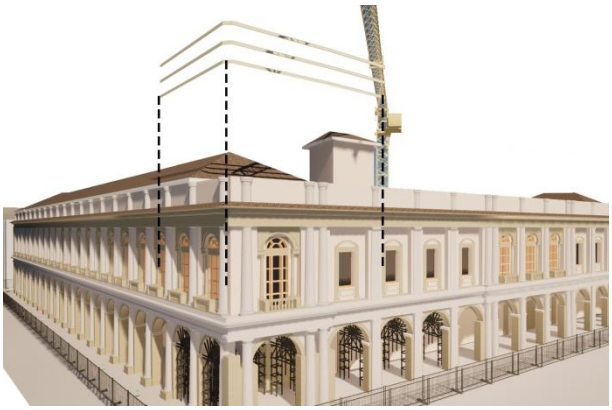
Fase3: Montaggio parziale del ponteggio



Fase4: Rimozione copertura



Fase5: Smontaggio parziale modulo tubi e giunti, montaggio ponteggio parziale, consolidamento esterno della facciata (realizzato per tratti)



Fase6: Rimozione cerchiature

Figura 4.10: Fasi esecutive di cantiere

4.3.8 Fase 06: Valutazione ambientale del fine vita

Nel caso del Convitto Nazionale, caratterizzato da un sistema di puntellamento interamente realizzato con tubolari metallici zincati, è stata condotta la valutazione ambientale ed economica secondo i parametri e le modalità operative definite nel Protocollo. La lunghezza complessiva del sistema analizzato è pari a 23 metri lineari, corrispondente a una delle porzioni principali di sostegno installate lungo la facciata prospiciente la corte interna. Dalla compilazione della scheda di valutazione (*Figura 4.11*) emergono i seguenti risultati: per lo scenario di riuso, l'impatto ambientale totale è pari a 117,3 kg CO_2 eq, con un costo complessivo di 211,6 €; per lo scenario di riciclo, l'impatto scende a 105,8 kg CO_2 eq, mentre il costo aumenta a 248,4 €; infine, lo smaltimento comporta un impatto di 118,9 kg CO_2 eq e un costo di 276 €. L'analisi mette in evidenza che la strategia di riciclo costituisce l'alternativa più sostenibile sotto il profilo ambientale, con una riduzione delle emissioni di circa 10 % rispetto al riuso e di oltre 11 % rispetto allo smaltimento. Dal punto di vista economico, sebbene il riciclo comporti un incremento dei costi diretti di circa 17 % rispetto al riuso, esso garantisce un significativo beneficio in termini di recupero del materiale, che può essere reimpiegato nei processi produttivi riducendo la domanda di acciaio primario. La maggiore incidenza economica è pertanto compensata dal miglior comportamento ambientale e dalla possibilità di reintroduzione del metallo nella filiera, fattore che contribuisce alla riduzione complessiva dell'impatto del cantiere. Lo smaltimento risulta invece l'opzione meno efficiente, sia per l'assenza di crediti da recupero sia per i costi aggiuntivi legati al conferimento e al trasporto verso impianti autorizzati. In sintesi, la valutazione del caso del Convitto Nazionale conferma la tendenza generale già emersa nei casi precedenti: i sistemi metallici mostrano i migliori risultati quando avviati a riciclo, mentre il riuso diretto rimane la soluzione più vantaggiosa per i materiali lignei. L'applicazione pratica del Protocollo consente dunque di individuare, anche in contesti complessi come quello del centro storico, la strategia più coerente con gli obiettivi di sostenibilità ambientale ed economica del progetto di rimozione.

Materiale	Strategia	Lunghezza (m)	Impatto unitario (kg CO_2 eq/m)	Costo unitario (€/m)	Impatto totale (kg CO_2 eq/m)	Costo totale (kg CO_2 eq/m)	Strategia migliore
Tubolare	Riuso	23	5,1	9,2	117,3	211,6	RICICLO
	Riciclo		4,6	10,8	105,8	248,4	
	Smaltimento		5,17	12	118,91	276	

Figura 4.11: Scheda di valutazione ambientale ed economica per puntelli tubolari

4.4 AGGREGATO SITO IN VIA DELLE BONE NOVELLE, L'AQUILA

4.4.1 Inquadramento

L'edificio analizzato nel presente studio si trova nel cuore del centro storico dell'Aquila, lungo Via delle Bone Novelle, in prossimità dell'intersezione con Via dell'Arcivescovado. Si tratta di una posizione particolarmente significativa all'interno dell'antico tessuto urbano, adiacente a uno dei principali percorsi di

accesso a Piazza Duomo, nodo di rilevanza storica e funzionale per la città. Il contesto urbano in cui l'edificio è inserito è fortemente caratterizzato dalla morfologia medievale del centro storico aquilano: una rete viaria irregolare, costituita da vicoli stretti, edifici in linea e aggregati edilizi sviluppatisi in maniera progressiva nel corso dei secoli. Sebbene tale impianto urbano contribuisca in modo determinante al valore storico e culturale dell'area, esso comporta anche specifiche criticità sotto il profilo strutturale, in particolare per quanto riguarda il comportamento sismico degli edifici storici. L'edificio oggetto di studio è parte integrante di un aggregato composto da quattro unità strutturali distinte. Queste unità, pur essendo fisicamente connesse tra loro, presentano differenze significative in termini di geometria, tipologia costruttiva e probabile epoca di edificazione. Tale configurazione aggregata è una caratteristica ricorrente nel centro storico dell'Aquila, dove la crescita urbana per successive addizioni ha condotto alla formazione di sistemi edilizi complessi e articolati.

4.4.2 Oggetto della validazione e configurazione iniziale

Per validare il Protocollo oggetto di studio, l'attenzione è stata rivolta alla facciata dell'edificio prospiciente Via delle Bone Novelle (Figura 4.12.a), interessata da un semplice meccanismo di ribaltamento, con la cerniera plastica localizzata alla base dell'ultimo livello. Per contrastare questo meccanismo, sono stati installati elementi in acciaio verticali e orizzontali, finalizzati a prevenire il collasso della muratura *(Figura 4.12*.b).

4.4.3 Fase 01: Analisi preliminari

Non sono stati riscontrati fenomeni di disgregazione muraria tali da richiedere interventi preliminari di consolidamento.

4.4.4 Fase 02: Riscontro con attività progettuale

La valutazione è stata condotta in coerenza con le lavorazioni previste nel progetto di restauro, verificando la compatibilità tra le operazioni temporanee e gli interventi strutturali programmati. In particolare, è stata considerata la presenza della copertura spingente e la sua incidenza sul meccanismo di collasso individuato.

4.4.5 Fase 03: Calcolo del coefficiente di sicurezza λ

Il valore dell'indice di rischio, calcolato senza considerare alcun intervento preventivo, risulta pari a $\lambda_0 = 1{,}19$. Tale valore indica che la facciata si trova in una condizione di sicurezza strutturale, poiché l'indice ricade direttamente nell'intervallo verde, evidenziando che l'installazione dei sistemi di puntellamento è avvenuta esclusivamente a scopo precauzionale.

4.4.6 Fase 04: Attuazione delle prescrizioni

In seguito all'esecuzione della misura obbligatoria prevista dal Protocollo — ossia la rimozione della copertura e, di conseguenza, l'eliminazione della spinta ad essa associata — l'indice di sicurezza sale a $\lambda_1 = 1{,}33$, collocando la struttura in uno stato di sicurezza ancora maggiore. In questa configurazione, il

puntellamento può essere rimosso senza alcun rischio di instabilità o di collasso della parete analizzata.

4.4.7 Fase 05: Smontaggio dei puntelli

A differenza dei casi precedentemente esaminati, nel presente studio l'impiego dell'opera provvisionale è riconducibile a un approccio esclusivamente precauzionale. Pertanto, la sua rimozione può avvenire in condizioni di completa sicurezza. È tuttavia sempre consigliabile predisporre un sistema di monitoraggio per rilevare eventuali evoluzioni impreviste. In questo caso, non si osserva alcuna variazione tra i valori dell'indice di sicurezza λ_1 e λ_7. Tale comportamento è spiegabile con il fatto che la cerniera del meccanismo di ribaltamento si trova alla base dell'ultimo livello dell'edificio, con la conseguenza che l'unica forza significativa agente sulla parete è la spinta statica esercitata dalla copertura. Pertanto, una volta considerata la demolizione del tetto, come indicato nella misura obbligatoria, i risultati dell'analisi rimangono invariati.

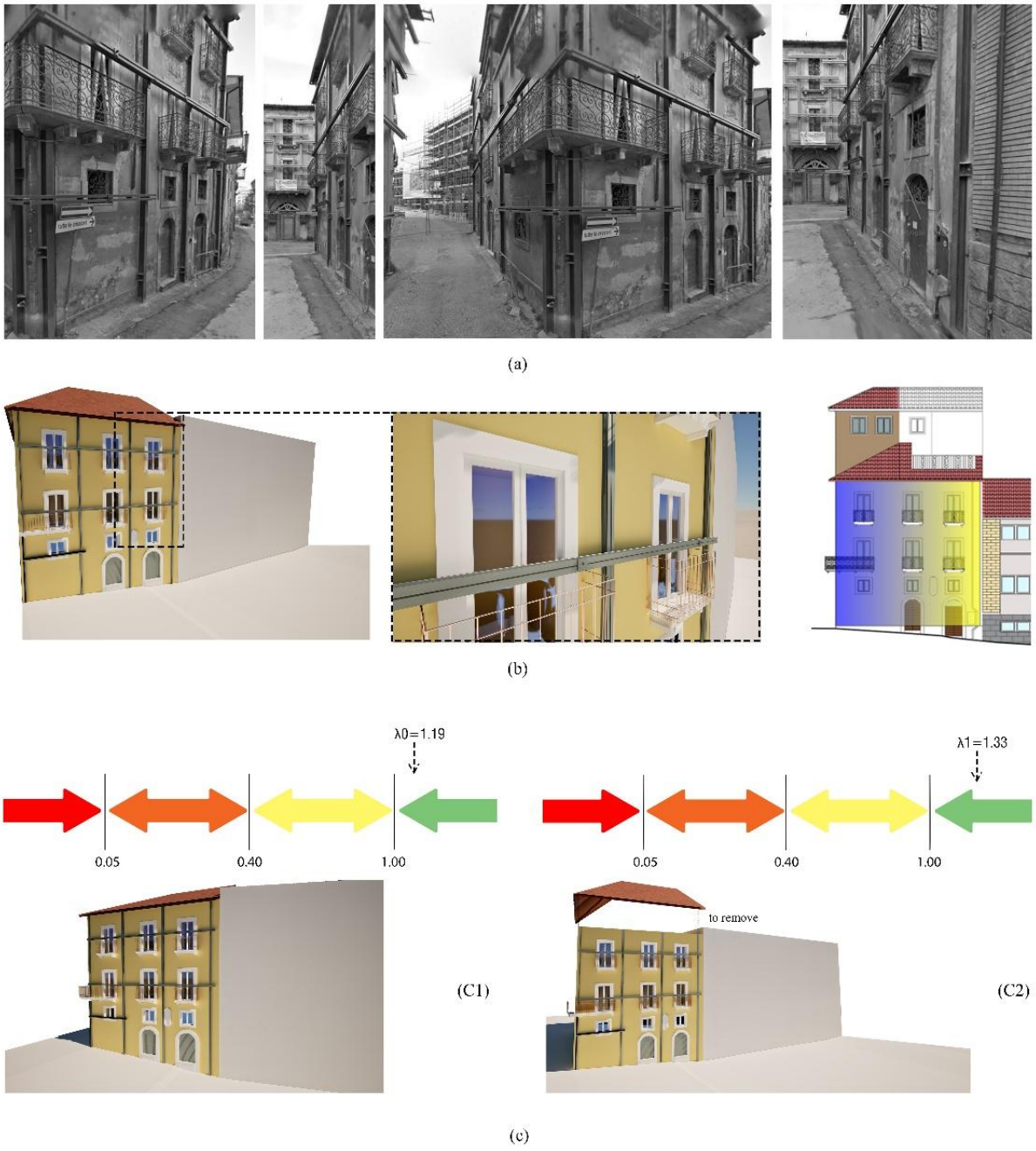


Figura 4.12: Aggregato sito in Via delle Bone Novelle:(a) documentazione fotografica; (b) puntellamenti montati in facciata; (c) calcolo del coefficiente di sicurezza

Si riporta comunque la scheda a compilazione guidata per l'approfondimento in tema di sicurezza *(Figura 4.13*).

0	*Tipologia puntellamento*		
	Incamiciatura	Soluzione	Materiale
0.1	Punt. Di Contrasto		
0.2	Punt. Di Ritegno		
0.3	Punt. Di Sostegno e Sbadacchiature		
0.4	Punt. Di Sostegno Solai e Balconi		
0.5	Centinatura		
0.6	Tirantatura		
0.7	Cerchiatura		
0.8	Incamiciatura		Elementi in acciaio
1	*Conoscenza*		
1.1	*Stato di Degrado*		
1.1.1	Struttura in legno	Presenza tarli	
		Muffe	
		Stato collegamenti	
1.1.2	Struttura Metallica	Stato deformazioni	Buono Stato
		Stato corrosione	Buono Stato
		Stato efficienza giunti	Buono Stato
		Stato efficienza collegamenti	Buono Stato
1.2	*Area di pertinenza manufatto*		
1.2.1	Area Pubblica	si	
		Occupazione suolo pubblico	si
		Accesso da strada	Isolata
		Accesso	Diretto
		Vicinanza cantieri limitrofi	si
		Vicinanza edifici limitrofi	si
		Interferenza con mezzi limitrofi	si
1.2.2	Area Privata		
		Occupazione suolo pubblico	
		Accesso da strada	
		Accesso	
		Vicinanza cantieri limitrofi	
		Vicinanza edifici limitrofi	
		Interferenza con mezzi limitrofi	
2	*Procedura di Rimozione*		
2.1	*Tipologia puntellamento*		
2.1.1	Punt. Di Contrasto	RIF. SCHEDA 1	
2.1.2	Punt. Di Ritegno	RIF. SCHEDA 2	
2.1.3	Punt. Di Sostegno e Sbadacchiature	RIF. SCHEDA 3	
2.1.4	Punt. Di Sostegno Solai e Balconi	RIF. SCHEDA 4	
2.1.5	Centinatura	RIF. SCHEDA 5	
2.1.6	Tirantatura	RIF. SCHEDA 6	
2.1.7	Cerchiatura	RIF. SCHEDA 7	
2.1.8	Incamiciatura	RIF. SCHEDA 8	
2.2	*Mezzi e Attrezzature per Rimozione*		
2.2.1	Gru		
2.2.2	Autogrù		

Figura 4.13: Analisi del contesto

Nel presente caso, il valore dell'indice di sicurezza λ_0 ricade già nell'intervallo verde, indicando una condizione strutturale tale da consentire la rimozione dei puntellamenti senza la necessità di prescrizioni obbligatorie o facoltative. Non essendo richieste fasi correttive né configurazioni alternative da valutare, la sequenza operativa risulta lineare e coincide sostanzialmente con le ordinarie attività di cantierizzazione e smontaggio controllato. Per tale motivo, non si è

ritenuto necessario sviluppare una modellazione informativa dedicata delle fasi esecutive in ambiente BIM, in quanto l'assenza di scenari alternativi o interferenze significative non avrebbe apportato un valore aggiunto alla rappresentazione del processo.

4.4.8 Fase 06: Valutazione ambientale del fine vita

Nel caso dell'edificio situato in Via delle Bone Novelle, caratterizzato da un sistema di puntellamento interamente in acciaio tipo HEA, è stata condotta la valutazione ambientale ed economica secondo la metodologia definita nel Protocollo. La lunghezza complessiva dei puntellamenti analizzati è pari a 9 metri lineari, corrispondente al tratto principale di sostegno della facciata maggiormente danneggiata. Dalla scheda di calcolo visibile nella *Figura 4.14* emergono i seguenti risultati: per lo scenario di riuso, l'impatto ambientale totale risulta pari a 295,2 kg CO_2 eq, con un costo complessivo di 160,2 €; nello scenario di riciclo, l'impatto scende a 263,7 kg CO_2 eq, mentre il costo aumenta a 189 €; infine, nello scenario di smaltimento, si registra un impatto di 298,9 kg CO_2 eq e un costo totale di 247,5 €. L'analisi mostra che la strategia di riciclo rappresenta l'opzione più sostenibile dal punto di vista ambientale, con una riduzione delle emissioni di circa 11 % rispetto al riuso e di quasi 12 % rispetto allo smaltimento. Sul piano economico, pur comportando un incremento dei costi diretti pari a circa 18 % rispetto al riuso, il riciclo consente di ottenere un recupero effettivo del materiale e una conseguente diminuzione della domanda di acciaio primario, generando un bilancio ambientale complessivo più favorevole. La strategia di riuso si conferma comunque efficiente in termini economici, ma comporta un impatto ambientale maggiore dovuto ai cicli aggiuntivi di movimentazione e al degrado meccanico del materiale, che ne riduce la vita utile residua. Lo smaltimento, al contrario, risulta la soluzione meno vantaggiosa in assoluto, sia per l'assenza di benefici ambientali derivanti dal recupero del metallo, sia per i costi aggiuntivi associati al trasporto e al conferimento presso impianti di trattamento.

Materiale	Strategia	Lunghezza (m)	Impatto unitario (kg CO_2 eq/m)	Costo unitario (€/m)	Impatto totale (kg CO_2 eq/m)	Costo totale (kg CO_2 eq/m)	Strategia migliore
Acciaio	Riuso	9	32,8	17,8	295,2	160,2	RICICLO
	Riciclo		29,3	21	263,7	189	
	Smaltimento		33,21	27,5	298,89	247,5	

Figura 4.14:Scheda di valutazione ambientale ed economica per puntelli in acciaio

Nel complesso, il caso di Via delle Bone Novelle conferma la coerenza dei risultati ottenuti nei casi precedenti, evidenziando come la fase di fine vita del materiale rappresenti un fattore decisivo per la riduzione degli impatti complessivi e per la razionalizzazione dei costi. L'adozione sistematica della scheda di valutazione ambientale ed economica consente di verificare in modo oggettivo la convenienza delle diverse strategie e di indirizzare le decisioni operative verso le soluzioni più sostenibili dal punto di vista tecnico, ambientale ed economico.

4.5 PALAZZO CARLI, L'AQUILA

4.5.1 Inquadramento

Il Palazzo Carli, noto anche come ex Rettorato dell'Università degli Studi dell'Aquila, si trova nel cuore del centro storico della città, prospiciente Piazza Vincenzo Rivera e in posizione strategica rispetto ai principali assi viari e nodi di interesse istituzionale. L'edificio costituisce un importante esempio di architettura storica stratificata, risultato di una successione di interventi edilizi che si sono susseguiti a partire dal XVI secolo e che si sono protratti nei secoli successivi. L'impianto originario risale al periodo tardo-cinquecentesco, ma il palazzo ha assunto l'attuale configurazione tra l'inizio e la metà del Settecento, quando la famiglia Carli ne promosse un significativo ampliamento e il rifacimento della facciata in forme tardo-barocche. La configurazione planimetrica è articolata e si sviluppa intorno a due corti interne, con un'impronta trapezoidale che copre una superficie complessiva di circa 3.000 metri quadrati. L'edificio si eleva su tre piani principali, oltre al livello sottotetto e al piano seminterrato, presentando una notevole articolazione volumetrica e una varietà di soluzioni costruttive legate alle diverse fasi di accrescimento. Dal punto di vista strutturale, l'edificio è costituito prevalentemente da murature portanti in pietra e laterizio, con orizzontamenti tradizionali in voltine di mattoni e solai lignei, integrati nel tempo da interventi di consolidamento successivi che hanno parzialmente modificato l'assetto originario. La compresenza di elementi murari di epoche differenti e l'eterogeneità delle tecniche costruttive rendono il complesso particolarmente sensibile alle azioni sismiche e pongono specifiche sfide nella valutazione della vulnerabilità e nella definizione di strategie di intervento compatibili. Il sisma del 6 aprile 2009 ha causato danni molto gravi, con estese lesioni nei paramenti murari, crolli parziali in diversi ambiti dell'edificio e compromissione degli elementi di orizzontamento e copertura. La facciata principale e le corti interne hanno evidenziato deformazioni significative e dissesti che hanno reso necessario l'allestimento di opere provvisionali di puntellamento a scopo sia di contenimento sia di prevenzione di ulteriori crolli.
Fino all'evento sismico, il palazzo aveva ospitato le funzioni di rappresentanza e gli uffici del rettorato dell'Università degli Studi dell'Aquila, assumendo un ruolo di riferimento per la comunità accademica cittadina. Dopo il terremoto, l'edificio è rimasto inutilizzato e sottoposto a un regime di consolidamento provvisorio protrattosi per oltre un decennio. Di recente è stato avviato l'iter per il finanziamento e l'appalto degli interventi di recupero e restauro, con l'obiettivo di restituire l'immobile alla sua funzione istituzionale e di valorizzarne il rilievo storico e architettonico.

4.5.2 Oggetto della validazione e configurazione iniziale

Il Palazzo Carli ha subito danni significativi in seguito agli eventi sismici che hanno colpito L'Aquila nel 2009. Le facciate prospicienti Via Roma e Piazza dell'Annunziata sono risultate interessate da un duplice meccanismo di ribaltamento *(Figura 4.15*.a): da un lato il ribaltamento del cantonale, dall'altro un cinematismo composto della facciata principale su Via Roma. Per contrastare

questi fenomeni sono state predisposte differenti tipologie di puntellamento (Figura 4.15.b), fra cui fasce in polistirene atte a realizzare una cerchiatura parziale passante, incamiciature metalliche verticali e orizzontali finalizzate a contrastare lo spanciamento della muratura e puntellature anticaduta posizionate come presidio di contenimento in caso di distacchi parziali. Nel complesso, le opere provvisionali installate si presentano in buone condizioni di conservazione e pienamente funzionali.

4.5.3 Fase 01: Analisi preliminari

L'analisi preliminare non ha rilevato fenomeni di disgregazione muraria diffusa, ma solo modesti segni di erosione superficiale e degrado di origine antropica.

4.5.4 Fase 02: Riscontro con l'attività progettuale

Al momento dell'applicazione del Protocollo, non risultava ancora avviata la progettazione esecutiva degli interventi di consolidamento, condizione che ha richiesto una valutazione indipendente delle ipotesi operative.

4.5.5 Fase 03: Calcolo del coefficiente di sicurezza λ

Il calcolo dell'indice di sicurezza normalizzato ha restituito un valore iniziale pari a $\lambda_0 = 0{,}27$ (caso C1 in *Figura 4.15*.c), collocato nell'intervallo arancione. Tale condizione impone l'adozione di misure di particolare cautela durante lo smontaggio dei puntellamenti.

4.5.6 Fase 04: Attuazione delle prescrizioni

Come intervento preliminare obbligatorio, è stata prescritta la rimozione della copertura, al fine di eliminare le spinte statiche orizzontali che contribuiscono in modo prevalente al meccanismo di ribaltamento individuato. Tuttavia, anche a seguito di tale operazione, l'indice di sicurezza risulta invariato, mantenendosi nell'intervallo arancione e confermando la necessità di ulteriori interventi per garantire condizioni di maggiore sicurezza. Tra le opzioni facoltative individuate, si è prevista la rimozione dell'ultimo solaio al di sotto della copertura. Tale misura, una volta attuata, ha determinato un incremento dell'indice di sicurezza fino al valore $\lambda_6 = 0{,}42$ (caso C2 in (*Figura 4.15*.c), consentendo il passaggio alla zona gialla. In questa configurazione, il rischio di instabilità si riduce sensibilmente, pur rimanendo opportuna una gestione graduale delle operazioni di smontaggio e un costante monitoraggio dello stato della muratura.

4.5.7 Fase 05: Smontaggio dei puntelli

La procedura operativa stabilita dal Protocollo prevede che lo smontaggio dei puntellamenti venga eseguito per fasi, in stretta sinergia con l'avanzamento dei lavori di ripristino. A tal fine, si è predisposta una sequenza di interventi modulati, che partono dall'alto e proseguono verso la base dell'edificio, prevedendo l'ammorsamento progressivo delle porzioni di facciata liberate dai puntelli, l'inserimento di catene o tiranti nel cantonale, e la rimozione graduale dei diversi ordini di cerchiature e incamiciature. In questo modo, si garantisce che ciascun passaggio sia controllato e verificabile, riducendo il rischio di collassi localizzati durante le operazioni di smontaggio.

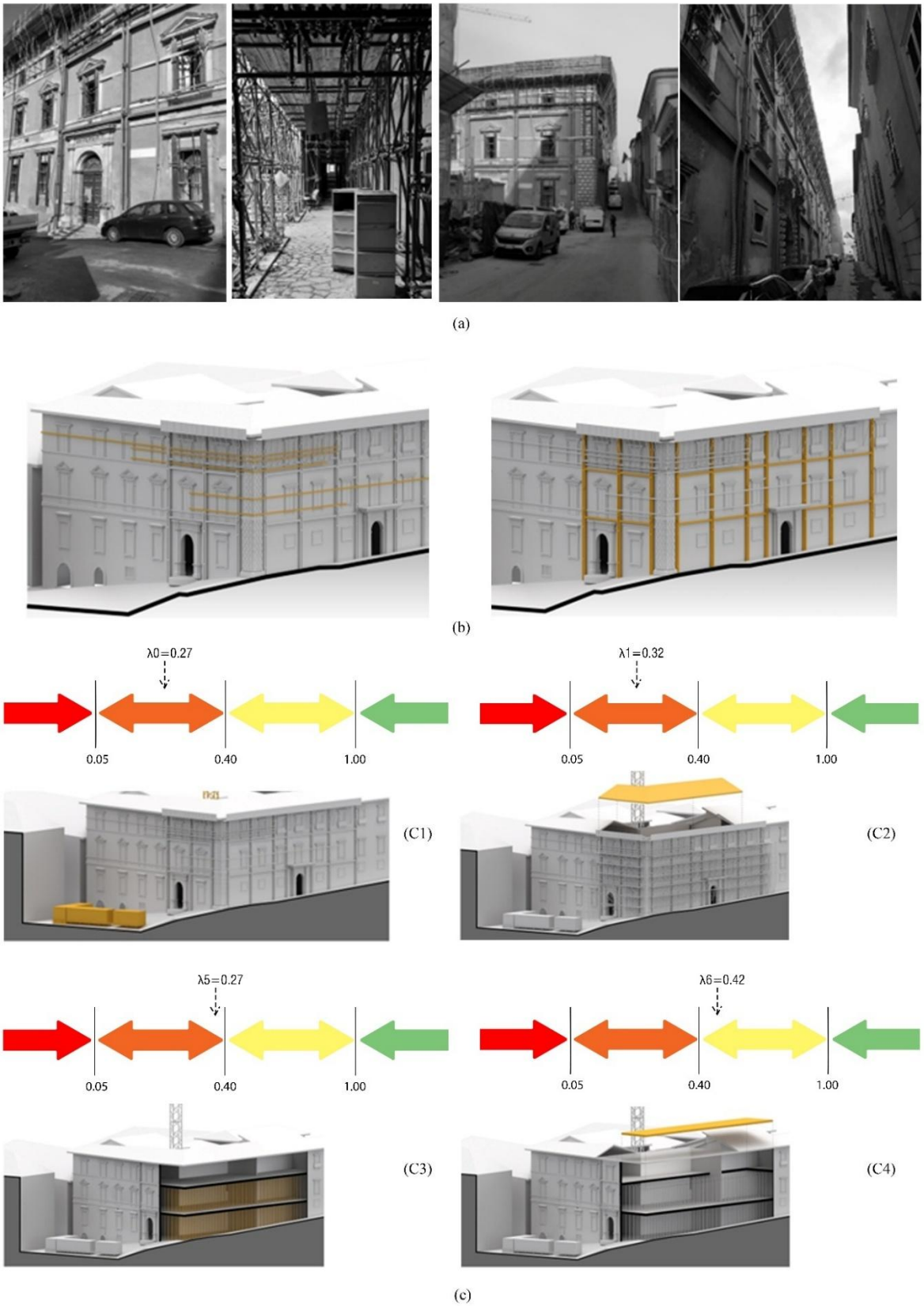


Figura 4.15: Palazzo Carli: (a) documentazione fotografica; (b) puntellamenti montati in facciata; (c) calcolo del coefficiente di sicurezza

La rimozione del puntellamento dovrà essere eseguita per step, man mano che avanzano gli interventi di ripristino, in modo che sia possibile osservare il comportamento della porzione danneggiata della struttura attraverso il sistema di monitoraggio installato. A tal proposito, anche per Palazzo Carli è stata redatta la scheda a compilazione guidata per l'approfondimento in tema di sicurezza (*Figura 4.16*).

0	*Tipologia puntellamento*		
	Centinatura	Soluzione	Materiale
0.1	Punt. Di Contrasto		
0.2	Punt. Di Ritegno		
0.3	Punt. Di Sostegno e Sbadacchiature		
0.4	Punt. Di Sostegno Solai e Balconi		
0.5	Centinatura		Elementi in acciaio
0.6	Tirantatura		
0.7	Cerchiatura		
0.8	Incamiciatura		
1	*Conoscenza*		
1.1	*Stato di Degrado*		
1.1.1	Struttura in legno	Presenza tarli	
		Muffe	
		Stato collegamenti	
1.1.2	Struttura Metallica	Stato deformazioni	Buono Stato
		Stato corrosione	Buono Stato
		Stato efficienza giunti	Buono Stato
		Stato efficienza collegamenti	Buono Stato
1.2	*Area di pertinenza manufatto*		
1.2.1	Area Pubblica	si	
		Occupazione suolo pubblico	si
		Accesso da strada	Isolata
		Accesso	Diretto
		Vicinanza cantieri limitrofi	si
		Vicinanza edifici limitrofi	si
		Interferenza con mezzi limitrofi	si
1.2.2	Area Privata		
		Occupazione suolo pubblico	
		Accesso da strada	
		Accesso	
		Vicinanza cantieri limitrofi	
		Vicinanza edifici limitrofi	
		Interferenza con mezzi limitrofi	
2	*Procedura di Rimozione*		
2.1	*Tipologia puntellamento*		
2.1.1	Punt. Di Contrasto	RIF. SCHEDA 1	
2.1.2	Punt. Di Ritegno	RIF. SCHEDA 2	
2.1.3	Punt. Di Sostegno e Sbadacchiature	RIF. SCHEDA 3	
2.1.4	Punt. Di Sostegno Solai e Balconi	RIF. SCHEDA 4	
2.1.5	Centinatura	RIF. SCHEDA 5	
2.1.6	Tirantatura	RIF. SCHEDA 6	
2.1.7	Cerchiatura	RIF. SCHEDA 7	
2.1.8	Incamiciatura	RIF. SCHEDA 8	
2.2	*Mezzi e Attrezzature per Rimozione*		
2.2.1	Ponteggio metallico		
2.2.2	Attrezzi manuali		

Figura 4.16: Analisi del contesto

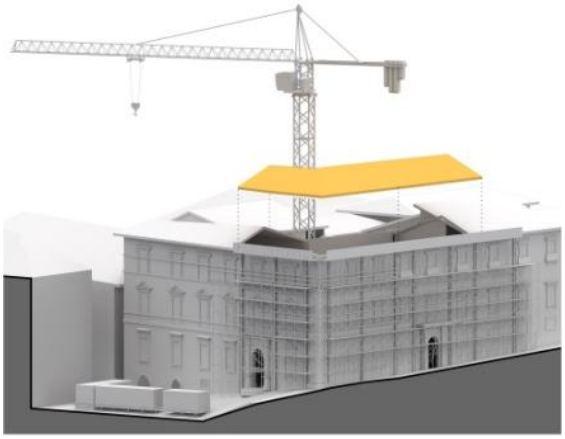
Si riportano le fasi esecutive previste da cantiere nella *Figura 4.17*.



Fase0: Allestimento del cantiere e montaggio gru



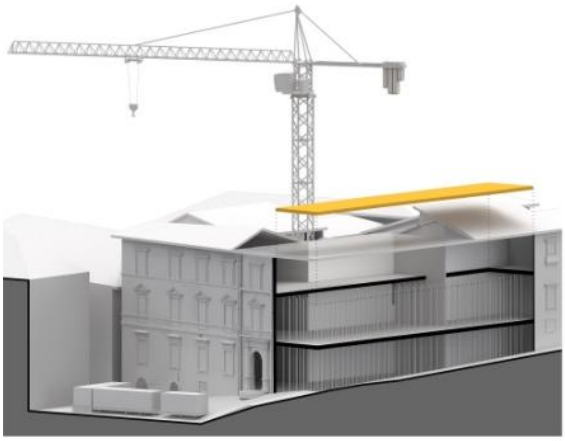
Fase1: Montaggio ponteggio



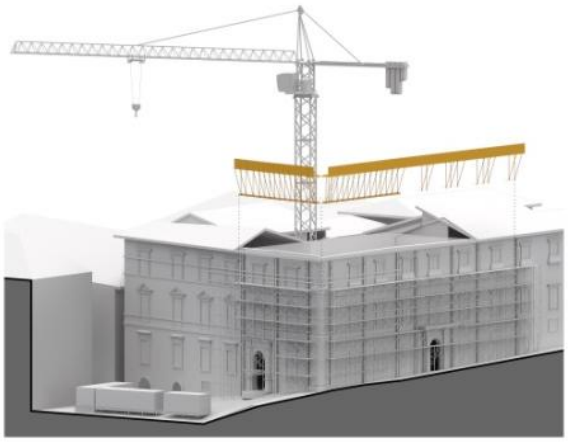
Fase2: Rimozione copertura



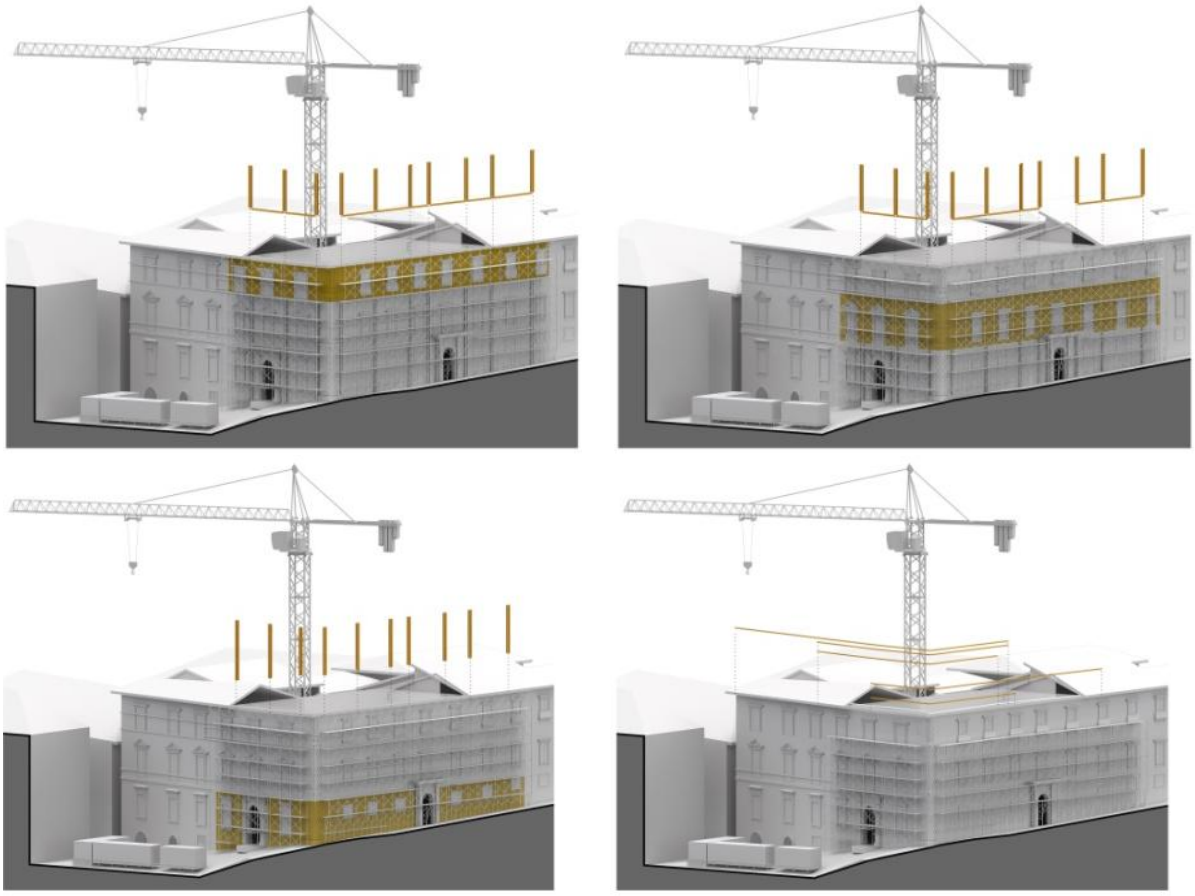
Fase3: Puntellamento solai



Fase4: Rimozione solaio



Fase5: Rimozione puntelli anticadura



Fase 6: Ammorsamento facciata e rimozione puntellatura

Fase7: Rimozione cerchiature

Figura 4.17: Fasi esecutive di cantiere

4.5.8 Fase 06: Valutazione ambientale del fine vita

Nel caso di Palazzo Carli, l'intervento di messa in sicurezza ha previsto l'utilizzo di puntellamenti metallici in acciaio tipo HEA, installati per una lunghezza complessiva di 15 metri lineari a sostegno del prospetto principale e delle strutture voltate del piano terra. La valutazione ambientale ed economica, condotta secondo le procedure del Protocollo, ha permesso di confrontare i tre possibili scenari di gestione post-smontaggio — riuso, riciclo e smaltimento — mediante l'applicazione dei parametri medi di impatto e costo unitario definiti nel *Capitolo 3.7.3.* Dalla compilazione della scheda di valutazione nella *Figura 4.18* risulta che, per lo scenario di riuso, l'impatto ambientale complessivo ammonta a 492 kg CO_2 eq, con un costo totale di 267 €. Nel caso del riciclo, l'impatto scende a 439,5 kg CO_2 eq, mentre il costo cresce a 315 €; lo smaltimento, invece, determina un impatto di 498,15 kg CO_2 eq e un costo complessivo di 412,5 €. L'analisi evidenzia come la strategia di riciclo rappresenti la soluzione più equilibrata, con una riduzione delle emissioni di circa il 10 % rispetto al riuso e di quasi il 12 % rispetto allo smaltimento, a fronte di un incremento dei costi limitato (circa il 15–18 %). La possibilità di reimmettere l'acciaio nel ciclo produttivo sotto forma di rottame rifuso comporta un credito ambientale significativo, che compensa le emissioni associate ai processi di

raccolta e rifusione. Dal punto di vista economico, il riciclo risulta competitivo rispetto alle altre opzioni, poiché evita le spese legate al conferimento in discarica e riduce la necessità di approvvigionamento di nuovo materiale per futuri interventi. Lo smaltimento si conferma la strategia meno sostenibile, sia per il maggiore impatto ambientale sia per l'elevata incidenza economica dovuta alle operazioni di trasporto e trattamento. Il riuso, pur presentando un costo inferiore, risulta penalizzato da una perdita di prestazioni meccaniche del materiale e da maggiori esigenze di movimentazione e controllo.

Materiale	Strategia	Lunghezza (m)	Impatto unitario (kg CO_2 eq/m)	Costo unitario (€/m)	Impatto totale (kg CO_2 eq/m)	Costo totale (kg CO_2 eq/m)	Strategia migliore
Acciaio	Riuso	15	32,8	17,8	492	267	RICICLO
	Riciclo		29,3	21	439,5	315	
	Smaltimento		33,21	27,5	498,15	412,5	

Figura 4.18: Scheda di valutazione ambientale ed economica per puntelli in acciaio

Nel complesso, il caso di Palazzo Carli conferma l'efficacia del metodo di valutazione integrata introdotto dal Protocollo: la scheda ambientale ed economica consente di identificare in modo immediato la soluzione di gestione più sostenibile, fornendo un supporto operativo concreto alla pianificazione delle attività di smontaggio e recupero dei sistemi provvisionali post-sisma.

5 DISCUSSIONE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

La presente ricerca si è posta l'obiettivo di strutturare un Protocollo operativo per la rimozione in sicurezza delle opere provvisionali post-sisma, fondato su criteri quantitativi e integrato con strumenti di valutazione ambientale, economica e di supporto digitale alla pianificazione. A conclusione del percorso metodologico e della validazione su casi studio reali, si rende ora necessario interpretare criticamente i risultati ottenuti, valutandone la coerenza rispetto agli obiettivi iniziali e il contributo apportato al quadro scientifico di riferimento. Il presente capitolo è pertanto dedicato alla discussione sistematica degli esiti della ricerca, alla definizione dei suoi limiti metodologici e applicativi e all'individuazione delle possibili linee evolutive del Protocollo. Tale articolazione consente di raccordare in modo esplicito la domanda di ricerca, gli strumenti sviluppati e le evidenze emerse dalla sperimentazione, delineando la portata scientifica e operativa del lavoro svolto.

5.1 DISCUSSIONE DEI RISULTATI E CONTRIBUTO SCIENTIFICO

5.1.1 Sintesi trasversale dei casi di studio

L'applicazione del Protocollo ai cinque casi di studio ha permesso di verificare la sua efficacia e adattabilità in contesti architettonici e strutturali differenti, caratterizzati da diverse tipologie di meccanismo, configurazioni costruttive e livelli di danno. L'analisi comparativa dei valori dell'indice λ consente di trarre considerazioni unitarie sull'effettivo grado di sicurezza residua e sull'efficacia delle strategie di rimozione, fornendo un quadro di sintesi utile alla validazione complessiva del metodo. Il confronto tra le diverse fasi operative, riportate nella *Tabella 5.1* mostra come la rimozione della copertura costituisca l'intervento obbligatorio più efficace: in tutti i casi analizzati produce un incremento significativo dell'indice λ, talvolta sufficiente a spostare la struttura in una fascia di rischio inferiore. Gli interventi facoltativi, quali il puntellamento dei solai o la rimozione controllata dei livelli superiori, determinano invece incrementi più contenuti o differenziati, la cui efficacia dipende strettamente dalla rigidezza locale della parete e dalla distribuzione dei carichi. Nei casi con maggiore articolazione spaziale (come il Convitto Nazionale), la presenza di spinte residue e interazioni tra pareti ortogonali riduce il beneficio di singoli interventi, rendendo necessaria una pianificazione per fasi e un controllo costante attraverso monitoraggio strutturale.

Tabella 5.1: Indici di sicurezza per fasi dei cinque casi

Caso di studio	**λ_0 (stato iniziale)**	**λ_1 (prescrizioni obbligatorie)**	**λ_3 (prescrizioni facoltative)**	**$\lambda_{6/7}$ (prescrizioni facoltative)**
Montereale #1	0.48 Intervallo giallo	0.96 Intervallo giallo	0.77 Intervallo giallo	0.84 Intervallo giallo
Montereale #2	0.08 Intervallo rosso	0.37 Intervallo arancio	0.33 Intervallo arancio	0.37 Intervallo arancio
Convitto nazionale	0.036 Intervallo rosso	0.46 Intervallo giallo	0.39 Intervallo arancio	0.47 Intervallo giallo
Via delle Bone Novelle	1.19 Intervallo verde	1.33 Intervallo verde	-	1.33 Intervallo verde
Palazzo Carli	0.32 Intervallo arancio	0.88 Intervallo giallo	0.74 Intervallo giallo	0.92 Intervallo giallo

Nel complesso, l'analisi dei singoli casi di studio consente di individuare andamenti coerenti ma anche alcune specificità legate alle diverse configurazioni strutturali (*Tabella 5.2*). Nel primo caso, relativo all'aggregato n°1 di Montereale, il valore iniziale dell'indice ($\lambda_0 = 0{,}48$) colloca l'edificio all'interno della fascia gialla, in una condizione di sicurezza intermedia. L'applicazione della prescrizione obbligatoria, corrispondente alla rimozione della copertura, produce un netto miglioramento, portando il valore dell'indice a $\lambda_1 = 0{,}96$ e avvicinandolo alla soglia di piena sicurezza. Gli interventi facoltativi, come il puntellamento o la rimozione dei solai superiori, non determinano incrementi significativi e risultano quindi non necessari: la priorità operativa resta concentrata sull'eliminazione del tetto e sul successivo smontaggio graduale delle opere provvisionali. Per l'aggregato n°2, anch'esso ubicato a Montereale, la situazione si presenta decisamente più critica. Il valore iniziale di $\lambda_0 = 0{,}08$ rientra nella fascia rossa, indicando una condizione di forte vulnerabilità. Anche dopo la rimozione della copertura, che innalza l'indice fino a $\lambda_1 = 0{,}37$, la struttura rimane in fascia arancione, al di sotto del limite minimo di sicurezza. In questo caso, la rimozione dei puntelli non può essere avviata se non in parallelo a interventi di consolidamento localizzato e a una gestione per fasi, poiché gli interventi facoltativi non sono in grado di compensare l'elevato livello di rischio residuo.
Il caso del Convitto Nazionale mostra invece un comportamento più articolato. L'indice $\lambda_0 = 0{,}036$, inizialmente in fascia rossa, sale a $\lambda_1 = 0{,}46$ dopo l'applicazione delle prescrizioni obbligatorie — che comprendono la rimozione della copertura e l'inserimento di tiranti provvisori — determinando un sensibile miglioramento e il passaggio alla fascia gialla. Tuttavia, le interazioni tra le volte e le spinte residue mantengono un livello di rischio non trascurabile: gli interventi facoltativi possono produrre lievi variazioni dell'indice (λ compreso tra 0,39 e 0,47), ma non modificano in modo sostanziale la fascia di appartenenza. Per tale

motivo, il Protocollo suggerisce di procedere con lo smontaggio per livelli, in concomitanza con le operazioni di restauro, mantenendo un monitoraggio continuo delle deformazioni. Il caso di Via delle Bone Novelle si distingue nettamente dagli altri, poiché il valore iniziale di $\lambda_0 = 1{,}19$ si colloca già nella fascia verde, a testimonianza di una condizione di stabilità strutturale elevata. L'incremento successivo ($\lambda_1 = 1{,}33$) conferma che l'intervento obbligatorio migliora ulteriormente la sicurezza, ma il puntellamento ha in questo caso una funzione esclusivamente precauzionale. La rimozione delle opere provvisionali può quindi avvenire in totale sicurezza, limitando il monitoraggio a una funzione di controllo. Infine, per Palazzo Carli, l'analisi mostra un incremento tra i più significativi di tutto il campione. L'indice passa, infatti da $\lambda_0 = 0{,}32$, corrispondente alla fascia arancione, a $\lambda_1 = 0{,}88$ dopo la rimozione della copertura, raggiungendo la fascia gialla e avvicinandosi alla soglia di sicurezza. Il valore successivo ($\lambda_6 = 0{,}92$) conferma l'effetto positivo delle ulteriori operazioni, come il puntellamento dei solai e degli archi trasversali, anche se il miglioramento resta contenuto. Nel complesso, l'edificio mostra un comportamento stabile e controllabile, per il quale la rimozione graduale delle opere provvisionali risulta pienamente compatibile con le condizioni di sicurezza individuate dal Protocollo.

Tabella 5.2: Incrementi Δλ per intervento

Caso di studio	**$\Delta\lambda_{1-0}$**	**$\Delta\lambda_{3-1}$**	**$\Delta\lambda_{6/7-1}$**	**Intervento più incisivo**
Montereale #1	+0.48	-0.19	-0.12	Rimozione copertura
Montereale #2	+0.29	-0.04	0.00	Rimozione copertura
Convitto nazionale	+0.42	-0.07	+0.01	Rimozione copertura
Via delle Bone Novelle	+0.14	-	0.00	Rimozione copertura
Palazzo Carli	+0.56	-0.14	+0.04	Rimozione copertura

Operativamente, queste evidenze sostengono tre linee: sequenza dall'alto con priorità alla copertura; monitoraggio attivo durante tutte le fasi; uso selettivo degli optional: si impiegano quando integrano la logica di cantiere (ad es. già previsti nel restauro) o quando producono un reale Δλ positivo; si evitano quando non spostano la fascia. In chiave ambientale, le decisioni sui tempi di rimozione e sulla riduzione degli interventi non necessari si allineano con la strategia di riuso dei componenti metallici, che resta l'opzione più favorevole in termini di impatto e costi. Un ulteriore elemento di interesse riguarda la coerenza tra i risultati dell'analisi strutturale e le valutazioni ambientali condotte parallelamente. In tutti i casi, la strategia di riuso dei materiali metallici dei puntellamenti si conferma la soluzione più vantaggiosa sia in termini di impatto ambientale (minori emissioni di CO_2 eq) sia di sostenibilità economica, poiché evita i costi e gli impatti legati al riciclo o allo smaltimento. Tale risultato assume particolare rilevanza nei

contesti urbani complessi, dove la quantità di materiale impiegato è maggiore e la logistica di cantiere comporta un notevole contributo agli impatti complessivi. Nel complesso, la discussione dei risultati mette in evidenza come il Protocollo rappresenti uno strumento operativo capace di integrare in modo efficace aspetti di sicurezza, efficienza e sostenibilità. Le analisi condotte sui cinque casi di studio dimostrano che l'applicazione del metodo consente di gestire la fase di rimozione delle opere provvisionali con un approccio progressivo e controllato, in cui la sequenza delle operazioni avviene dall'alto verso il basso, riducendo progressivamente i vincoli strutturali in condizioni di equilibrio verificato. In tutte le situazioni analizzate è emersa inoltre la necessità di mantenere attivo un sistema di monitoraggio continuo durante l'intera durata delle attività di smontaggio, così da garantire il controllo costante dei parametri di sicurezza e individuare tempestivamente eventuali variazioni nel comportamento strutturale. L'applicazione ai cinque casi studio non ha comportato una revisione strutturale dell'impianto metodologico del Protocollo, ma ha consentito di affinarne alcuni aspetti operativi, in particolare nella definizione più chiara delle soglie decisionali associate all'indice λ e nella formalizzazione delle sequenze progressive di smontaggio. La fase di validazione si è pertanto configurata come un processo di consolidamento e chiarificazione applicativa del metodo, rafforzandone la coerenza interna e la robustezza operativa. Un ulteriore elemento di coerenza riguarda la pianificazione delle operazioni, che deve procedere in stretta correlazione con l'avanzamento delle lavorazioni di restauro, assicurando la compatibilità tra le diverse fasi operative e minimizzando le interferenze tra cantieri paralleli. Infine, dal punto di vista ambientale, i risultati confermano l'importanza di promuovere il riuso dei componenti metallici, preferendolo al riciclo o allo smaltimento, in linea con i principi dell'economia circolare e della sostenibilità del cantiere. Tale scelta consente di ridurre significativamente l'impatto ambientale complessivo e di ottimizzare le risorse impiegate nell'intero ciclo di vita delle opere provvisionali. Il Protocollo, applicato a casi eterogenei, conferma dunque la propria affidabilità come strumento di supporto alle decisioni nella gestione delle opere provvisionali post-sisma, garantendo livelli adeguati di sicurezza e un approccio coerente con gli obiettivi di sostenibilità tecnica e ambientale della ricostruzione.

5.1.2 Integrazione tra sicurezza, sostenibilità e strumenti digitali

Uno degli elementi qualificanti emersi dalla validazione del Protocollo riguarda l'integrazione sistematica tra valutazione strutturale, sostenibilità ambientale, analisi economica e supporto digitale. Tale integrazione non rappresenta un'estensione accessoria del metodo, ma ne costituisce un principio fondativo, coerente con l'impostazione dichiarata nella Premessa, dove la gestione informativa digitale delle costruzioni e la sostenibilità ambientale sono poste in parallelo come dimensioni complementari del processo di ricostruzione. Dal punto di vista strutturale, il foglio di calcolo per la determinazione dell'indice λ ha consentito di tradurre l'analisi dei cinematismi locali in una procedura quantitativa replicabile. La possibilità di normalizzare l'indice rispetto a soglie di classificazione consente di superare una valutazione meramente descrittiva del

rischio, introducendo un criterio misurabile a supporto delle decisioni operative. In questo senso, lo strumento non si limita a fornire un valore numerico, ma struttura un linguaggio condiviso tra progettisti, direttori dei lavori e coordinatori della sicurezza. Le schede di contesto e di procedura, sviluppate come dispositivi di raccordo tra esito analitico e fase esecutiva, hanno dimostrato la loro utilità nel sistematizzare informazioni spesso disperse: condizioni di accessibilità, interferenze tra lavorazioni, stato di conservazione dei puntellamenti, vincoli architettonici e urbanistici. La formalizzazione di tali dati consente di trasformare il passaggio dalla valutazione teorica alla pianificazione del cantiere in un processo tracciabile e documentabile, riducendo il rischio di scelte non coordinate. A questa dimensione strutturale si affianca la componente ambientale ed economica. L'applicazione della metodologia LCA alle principali tipologie di puntellamento ha permesso di quantificare l'impatto ambientale delle strategie di gestione post-smontaggio, evidenziando la convenienza del riuso dei componenti metallici rispetto al riciclo o allo smaltimento. L'estensione della scheda di controllo al parametro economico consente di integrare la valutazione ambientale con un confronto sui costi diretti delle alternative operative. Tale integrazione assume rilievo non solo in termini di sostenibilità, ma anche di responsabilità gestionale, poiché rende esplicita la relazione tra sicurezza raggiunta, impatto ambientale e impegno economico. La modellazione informativa BIM ha svolto un ruolo di supporto alla visualizzazione delle sequenze operative, consentendo di rappresentare in forma tridimensionale le configurazioni di puntellamento e le relative fasi di smontaggio. La possibilità di articolare il modello in step progressivi ha facilitato la comprensione delle interferenze tra murature, presidi provvisionali e lavorazioni previste, rendendo più chiaro il coordinamento tra le diverse attività di cantiere. Pur non configurandosi come sistema integrato di simulazione 4D o piattaforma di project management, il modello informativo ha contribuito a rafforzare la coerenza tra valutazione analitica e pianificazione spaziale delle operazioni. In questa prospettiva, il parallelismo tra gestione informativa digitale e sostenibilità ambientale assume un significato concreto: entrambe le dimensioni operano come strumenti di controllo e di ottimizzazione del processo decisionale. La digitalizzazione consente di rendere visibili e coordinabili le fasi operative; la valutazione ambientale ed economica consente di orientare le scelte verso soluzioni più efficienti e responsabili. Il Protocollo si configura quindi come un sistema integrato, nel quale sicurezza, sostenibilità e gestione informativa non sono ambiti separati, ma componenti interconnesse di un unico percorso metodologico. La validazione sui casi studio dimostra che tale integrazione è operativamente praticabile e produce effetti concreti nella pianificazione delle fasi di smontaggio. In tal modo, la rimozione delle opere provvisionali non è più concepita come atto finale residuale, ma come fase strategica del ciclo di vita dell'intervento, governata attraverso strumenti analitici, ambientali e digitali coerentemente coordinati.

5.1.3 Confronto con la letteratura e avanzamento scientifico

Il contributo scientifico del presente lavoro può essere compreso pienamente solo se messo in relazione critica con la letteratura esistente sui tre ambiti che lo

strutturano: analisi dei meccanismi di collasso in muratura, progettazione e gestione delle opere provvisionali, valutazione ambientale ed economica orientata al ciclo di vita. Per quanto riguarda l'analisi dei cinematismi, il Protocollo si fonda sull'impostazione metodologica proposta dalle *PERPETUATE* di Lagomarsino & Cattari (2014) e sul repertorio dei meccanismi di danno sistematizzato da Beolchini et al. (2005), che individuano nei meccanismi locali fuori piano una delle principali cause di collasso negli edifici storici in muratura. Analogamente, Cattari & Lagomarsino (2013)) evidenziano come la corretta identificazione del meccanismo attivo costituisca il presupposto per qualsiasi valutazione di sicurezza affidabile. Tuttavia, mentre tali contributi si concentrano prevalentemente sulla fase di analisi del danno e sulla progettazione degli interventi di rafforzamento, il presente lavoro estende il ragionamento alla fase successiva e meno esplorata dello smontaggio controllato delle opere provvisionali, introducendo un indice normalizzato di sicurezza (λ) che consente di quantificare la variazione del livello di stabilità al variare delle fasi operative. In questo senso, il Protocollo non si limita a recepire modelli teorici esistenti, ma li integra in una procedura decisionale strutturata, traducendo l'analisi qualitativa del meccanismo in uno strumento operativo di pianificazione del disarmo. Un ulteriore elemento di confronto riguarda la letteratura sulle opere provvisionali e sui sistemi di sostegno temporaneo. Studi come quello di Buitrago et al. (2018) hanno approfondito aspetti specifici di comportamento strutturale dei puntelli e dispositivi di limitazione del carico, concentrandosi sulla sicurezza in fase di utilizzo. Allo stesso modo, Cho et al. (2018) propongono sistemi di monitoraggio data-driven per prevenire il collasso delle strutture di ponteggio. Tuttavia, tali contributi affrontano prevalentemente la fase di installazione e gestione in esercizio, mentre la fase di smontaggio rimane raramente oggetto di formalizzazione metodologica. Il presente Protocollo colma questo vuoto proponendo una sequenza strutturata di fasi, corredata da schede operative e strumenti di verifica, che trasformano una pratica tradizionalmente affidata all'esperienza in un processo analitico e ripetibile. Sul piano ambientale, la ricerca si colloca nel solco metodologico definito dalla norma UNI EN 15978:2011 e dalla EN 15804:2012+A2:2019 adottando un approccio *cradle-to-grave* coerente con le raccomandazioni internazionali. La definizione dell'unità funzionale pari a un metro lineare di puntellamento in esercizio risponde ai criteri di comparabilità richiamati da Aktas & Bilec (2012), secondo cui la coerenza dell'unità funzionale è prerequisito per la robustezza dello studio LCA. L'utilizzo del metodo EF 3.0 e dell'indicatore GWP100 si inserisce inoltre nel quadro teorico sistematizzato da Hauschild et al. (2018), che sottolineano l'importanza di indicatori armonizzati per la confrontabilità tra materiali da costruzione. In tale contesto, il contributo originale della ricerca non risiede nell'applicazione dell'LCA in sé, ampiamente consolidata nella letteratura (Guinée et al. (2011)), ma nella sua integrazione diretta all'interno di un Protocollo di sicurezza strutturale, trasformando la valutazione ambientale in uno strumento di supporto decisionale operativo durante la pianificazione dello smontaggio. Un ulteriore elemento di avanzamento riguarda l'integrazione tra sicurezza, sostenibilità ambientale e sostenibilità economica. Studi recenti, come quello di De la Rúa et

al. (2020), hanno analizzato comparativamente l'impatto ambientale ed economico di sistemi di ponteggio in acciaio e legno, ma tali analisi restano generalmente disgiunte dai processi decisionali di cantiere. Nel presente lavoro, invece, la valutazione ambientale e quella economica sono incorporate in tool abilitanti che dialogano direttamente con le fasi del Protocollo, contribuendo alla selezione della strategia di gestione del materiale rimosso (riuso, riciclo, smaltimento) in funzione di sicurezza, impatto e costo. Infine, per quanto concerne la digitalizzazione, la letteratura evidenzia il crescente ruolo dei sistemi informativi e del monitoraggio digitale nella prevenzione del rischio strutturale (Cho et al. (2018)). Tuttavia, il contributo del presente studio non si limita alla modellazione tridimensionale, ma introduce un primo livello di integrazione tra modellazione informativa, sequenza delle lavorazioni e valutazione prestazionale delle scelte operative, ponendo le basi per un'evoluzione futura verso sistemi di supporto decisionale multi-obiettivo interoperabili con database informativi e tecnologie di rilevamento in tempo reale, come suggerito anche nelle prospettive metodologiche più recenti. In sintesi, il valore scientifico del Protocollo risiede nella formalizzazione integrata di tre dimensioni tradizionalmente trattate separatamente - analisi strutturale dei meccanismi, gestione operativa delle opere provvisionali e valutazione ambientale ed economica - all'interno di un'unica architettura metodologica coerente, verificata attraverso casi studio reali e supportata da strumenti applicativi replicabili. Tale integrazione rappresenta l'elemento di originalità e avanzamento rispetto allo stato dell'arte.

5.2 LIMITI DELLA RICERCA

Nonostante i risultati ottenuti e la validazione sperimentale condotta, la presente ricerca presenta alcuni limiti metodologici e applicativi che è opportuno esplicitare al fine di inquadrare correttamente il dominio di validità del Protocollo. Un primo limite riguarda il numero e la tipologia dei casi studio utilizzati per la validazione. L'applicazione è stata condotta su cinque edifici, selezionati nel contesto della ricostruzione post-sismica aquilana, caratterizzati da configurazioni murarie e meccanismi di collasso tra i più ricorrenti nel patrimonio storico locale. Sebbene tale campione abbia consentito di verificare l'adattabilità del metodo a condizioni strutturali differenti, esso non può considerarsi statisticamente rappresentativo dell'intero panorama edilizio nazionale o internazionale. La validazione si configura pertanto come una dimostrazione di applicabilità metodologica, piuttosto che come una generalizzazione universale del modello. Un secondo limite concerne il perimetro tipologico dei meccanismi analizzati. Il Protocollo è stato calibrato principalmente su meccanismi locali fuori piano (ribaltamento semplice e composto, flessioni verticali e orizzontali), in coerenza con le osservazioni sul campo e con la letteratura di riferimento (Milano, Mannella, et al. (2009), Lagomarsino & Cattari (2015)). Meccanismi globali complessi o strutture ibride non sono stati oggetto di approfondimento specifico e richiederebbero ulteriori adattamenti dell'impianto metodologico. Un ulteriore limite riguarda il livello attuale di integrazione digitale del Protocollo.

L'approccio BIM adottato ha consentito di tradurre le sequenze operative in modelli tridimensionali e di supportare la visualizzazione del coordinamento tra le lavorazioni, migliorando la comprensione delle interferenze e la pianificazione delle fasi. Tuttavia, il sistema non è attualmente integrato con strumenti di simulazione 4D basati su cronoprogramma strutturato, né con sistemi di rilevamento dati in tempo reale o piattaforme interoperabili capaci di aggiornare dinamicamente l'indice di sicurezza λ in funzione di dati acquisiti in cantiere. L'integrazione tra modellazione informativa, calcolo strutturale e strumenti di valutazione ambientale ed economica avviene ancora attraverso un coordinamento metodologico e non tramite un flusso dati automatizzato. Infine, l'indice normalizzato di sicurezza λ costituisce una sintesi quantitativa del comportamento strutturale nelle diverse fasi operative. Pur rappresentando un avanzamento rispetto a valutazioni esclusivamente qualitative o empiriche, esso resta legato alle ipotesi modellistiche adottate e non sostituisce la necessità di una valutazione ingegneristica caso per caso. Il Protocollo deve quindi essere inteso come strumento di supporto decisionale e non come sostituzione del giudizio tecnico.

5.3 SVILUPPI FUTURI

La formalizzazione del Protocollo rappresenta un primo livello di strutturazione metodologica del processo di rimozione delle opere provvisionali; tuttavia, proprio la sua applicazione ai casi studio e l'analisi dei limiti individuati consentono di delineare con chiarezza alcune traiettorie evolutive che possono rafforzarne ulteriormente il valore scientifico e operativo. Gli sviluppi futuri possono essere ricondotti a tre ambiti principali: l'estensione metodologica del dominio applicativo, l'evoluzione verso un sistema decisionale multi-obiettivo e l'integrazione digitale avanzata.

5.3.1 Estensione metodologica

Un primo ambito di sviluppo riguarda l'ampliamento del dominio applicativo del Protocollo. La validazione condotta ha interessato edifici in muratura storica e meccanismi locali fuori piano, coerentemente con il contesto della ricostruzione post-sismica aquilana. L'applicazione a tipologie strutturali differenti, quali sistemi misti o aggregati edilizi complessi, consentirebbe di verificare la robustezza dell'indice λ in scenari più articolati e di adattare il modello a configurazioni globali. Ulteriori applicazioni in contesti territoriali diversi permetterebbero di testare la trasferibilità del metodo e di rafforzarne la dimensione generalizzabile. Anche sul piano ambientale, l'integrazione di dati primari raccolti direttamente in cantiere potrebbe migliorare la precisione delle valutazioni e consolidare il legame tra analisi teorica e prassi operativa. In prospettiva, la formalizzazione del Protocollo in linee guida tecniche o strumenti di riferimento per le stazioni appaltanti potrebbe rappresentare un ulteriore sviluppo, contribuendo alla standardizzazione di una fase – quella della rimozione delle opere provvisionali – che attualmente risulta ancora poco regolamentata.

5.3.2 Evoluzione verso un sistema decisionale multi-obiettivo

Nella configurazione attuale, il Protocollo è strutturato attorno a un nucleo centrale rappresentato dalla valutazione della sicurezza strutturale attraverso l'indice normalizzato λ. A questo asse principale si affianca, in modo integrato ma distinto, la valutazione ambientale basata sull'approccio LCA, mentre la dimensione economica è introdotta come parametro comparativo di supporto alla decisione, senza configurarsi come analisi approfondita dei costi lungo l'intero ciclo di vita. Questa impostazione consente già oggi una lettura coordinata delle scelte operative: la decisione di rimuovere, mantenere o modificare un sistema di puntellamento può essere valutata non soltanto in termini di sicurezza, ma anche in relazione agli impatti ambientali associati alla gestione dei materiali e, in forma semplificata, ai costi diretti delle alternative considerate. Tuttavia, tali dimensioni non sono ancora integrate all'interno di un unico modello decisionale strutturato, ma restano strumenti affiancati, coordinati dalla logica del Protocollo. Un'evoluzione naturale del lavoro potrebbe consistere nella formalizzazione di un sistema di supporto alle decisioni multi-obiettivo, nel quale l'indice λ, gli indicatori ambientali e i parametri economici vengano ricondotti a una matrice valutativa unitaria. In una simile configurazione, ciascuna strategia di intervento potrebbe essere analizzata non solo in termini di ammissibilità tecnica, ma anche secondo un equilibrio esplicito tra riduzione del rischio, minimizzazione dell'impatto ambientale, contenimento dei costi e compatibilità con i tempi e le interferenze di cantiere. L'introduzione di criteri ponderati, modulabili in funzione del contesto specifico, consentirebbe di adattare il processo decisionale alle priorità dell'intervento. In situazioni di elevata vulnerabilità strutturale, la sicurezza potrebbe mantenere un ruolo dominante; in contesti caratterizzati da vincoli ambientali stringenti o da risorse economiche limitate, la gerarchia dei criteri potrebbe essere ridefinita in modo esplicito e trasparente. Tale sviluppo trasformerebbe il Protocollo da sequenza strutturata di verifiche tecniche a sistema decisionale integrato, capace di supportare scelte multi-criterio in modo formalizzato. In questa prospettiva, il contributo della ricerca non risiederebbe soltanto nella definizione di una procedura di rimozione sicura, ma nell'impostazione di un modello capace di evolvere verso strumenti avanzati di *decision support* applicati alla gestione del cantiere post-sismico.

5.3.3 Integrazione digitale avanzata

L'adozione della modellazione informativa BIM nella presente ricerca ha consentito di rappresentare tridimensionalmente le configurazioni di puntellamento e di visualizzare in modo progressivo le sequenze di smontaggio, rendendo più chiaro il coordinamento tra le lavorazioni e facilitando l'individuazione delle possibili interferenze. Tale applicazione ha dimostrato l'utilità dello strumento digitale come supporto alla comprensione spaziale e organizzativa del processo. Un ulteriore sviluppo potrebbe consistere nell'integrazione strutturata del modello informativo con la dimensione temporale, attraverso una modellazione 4D pienamente connessa al cronoprogramma dei lavori. L'associazione tra oggetti del modello e fasi temporali consentirebbe di simulare l'evoluzione delle condizioni di vincolo e di

stabilità nel tempo, anticipando criticità e sovrapposizioni operative. In prospettiva più ampia, il Protocollo potrebbe essere reso interoperabile con ambienti di condivisione dei dati e piattaforme di gestione informativa digitale previste dal Codice dei Contratti Pubblici, così da inserirsi organicamente nel flusso documentale del cantiere pubblico digitalizzato. L'integrazione con sistemi di project management e con database strutturati permetterebbe di collegare direttamente le scelte operative ai modelli informativi e agli strumenti di controllo. Un ulteriore livello evolutivo potrebbe essere rappresentato dall'integrazione con sistemi di monitoraggio in tempo reale, attraverso sensori capaci di restituire dati sugli spostamenti o sulle deformazioni durante le fasi di smontaggio. In tal modo, l'indice di sicurezza potrebbe essere aggiornato dinamicamente sulla base di dati acquisiti in cantiere, avvicinando il modello alla logica del digital twin del cantiere e trasformando il Protocollo da strumento di pianificazione statica a sistema adattivo.

5.4 CONSIDERAZIONI FINALI

La ricerca ha dimostrato come la fase di rimozione delle opere provvisionali, tradizionalmente affrontata in modo empirico e frammentario, possa essere ricondotta a un processo strutturato, verificabile e replicabile. L'introduzione dell'indice normalizzato di sicurezza λ, l'integrazione della valutazione ambientale e l'impiego di strumenti digitali di supporto alla pianificazione hanno consentito di trasformare una pratica operativa in un modello metodologico coerente. Il Protocollo proposto non si configura come un insieme di prescrizioni isolate, ma come un sistema logico che mette in relazione analisi strutturale, organizzazione del cantiere e sostenibilità delle scelte operative. In tal modo, la sicurezza non viene considerata come requisito separato, ma come elemento strutturante del processo decisionale, da valutare parallelamente agli impatti ambientali e alla fattibilità tecnica. L'applicazione ai casi studio reali ha confermato la capacità del metodo di adattarsi a configurazioni differenti, evidenziando la centralità della pianificazione progressiva delle fasi di smontaggio e del monitoraggio continuo delle condizioni di stabilità. Al tempo stesso, i limiti individuati e gli sviluppi prospettati delineano un percorso evolutivo chiaro, orientato verso una maggiore integrazione digitale e verso l'adozione di logiche decisionali multi-obiettivo. In questa prospettiva, il contributo della ricerca consiste nell'aver formalizzato, per la prima volta in modo organico, la fase di dismissione delle opere provvisionali come momento strategico del processo di ricostruzione post-sismica, superando la logica emergenziale e riconducendola a criteri di sicurezza, sostenibilità e gestione informativa coerenti con l'evoluzione contemporanea del settore delle costruzioni.

6 BIBLIOGRAFIA

Aktas, C. B., & Bilec, M. M. (2012). Impact of lifetime on US residential building LCA results. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *17*(3), 337–349. https://doi.org/10.1007/s11367-011-0363-x

Beolchini, G. C., Milano, L., & Antonacci, E. (2005). *Repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura – Definizione di modelli per l'analisi strutturale degli edifici in muratura, Volume II – Parte 1°*.

Bosela, P., & Bosela, P. (2018). Tropicana Parking Garage Collapse. *Forensic Engineering 2018*, 1118–1124. https://doi.org/10.1061/9780784482018.108

Brando, G., Rapone, D., & De Matteis, G. (2017). Damage patterns in masonry buildings after the 2016 Central Italy earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *15*(10), 4245–4270.

Buitrago, M., Adam, J. M., Calderón, P. A., & Moragues, J. J. (2018). Load limiters on shores: Design and experimental research. *Engineering Structures*, *173*, 1029–1038. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.063

Cattari, S., & Lagomarsino, S. (2013). Collapse mechanisms of masonry walls under in-plane seismic actions. *Journal of Earthquake Engineering*, *17*(6), 799–825.

Celestini, G., & Mantini, G. (2012). *Misure di prevenzione e protezione per la manutenzione dei sistemi di sicurezza e delle opere provvisionali realizzate sui manufatti a seguito di eventi calamitosi* (G. Mantini & G. Celestini, Eds.). Fabiani Stampatori.

Cho, C., Kim, K., Park, J., & Cho, Y. K. (2018). Data-Driven Monitoring System for Preventing the Collapse of Scaffolding Structures. *Ournal of Construction Engineering and Management*, *144*(8).

Cifani, G., Castellucci, A., Lemme, A., Liris, M., Martinelli, A., Mazzariello, A., Milano, L., Morisi, C., Petracca, A., Marchetti, L., Di Girolamo, G., Marchetti, M., & Marsili, C. (2011). *SISMA ABRUZZO 2009 – Messa in sicurezza degli edifici monumentali: percorso metodologico e tecniche di intervento*.

Circular Economy Action Plan (2020) – "A new Circular Economy Action Plan." (2020). *European Commission*.

D'Ayala, D., Dab, B., & Paganoni, S. (2011). Assessment and analysis of damage in L'Aquila historic centre after the 2009 earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *9*(1), 81–104.

De la Rúa, C., Antizar-Ladislao, B., & Maroto-Valer, M. M. (2020). Life cycle assessment and economic analysis of steel and wooden scaffoldings. *Journal of Cleaner Production*, *272*.

Decreto 11 Ottobre 2017 – Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento Di Servizi Di Progettazione e Lavori per La Nuova Costruzione, Ristrutturazione e Manutenzione Di Edifici Pubblici, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana (2017).

Decreto Legislativo 31 Marzo 2023, n. 36 – Codice Dei Contratti Pubblici in Attuazione Dell'articolo 1 Della Legge 21 Giugno 2022, n. 78, Recante Delega al Governo in Materia Di Contratti Pubblici, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 77 del 31 marzo 2023, Suppl. Ordinario n. 12 (2023).

Dipartimento della Protezione Civile. (2014). *Manuale per la gestione tecnica dell'emergenza sismica: rilievo del danno e agibilità – Scheda AeDES*.

Dolce, M., Liberatore, D., Moroni, C., Perillo, G., Spera, G., & Cacosso, A. (2006). *OPUS – Manuale delle opere provvisionali urgenti post-sisma*.

EN 15804:2012+A2:2019 – Sustainability of Construction Works – Environmental Product Declarations – Core Rules for the Product Category of Construction Products (2019).

European Commission. (2021). *Level(s) – Indicator framework for sustainable buildings.*

European Committee for Standardization (CEN). (2011). *EN 15978:2011 – Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method*.

Ferrari, L. (2024). Emergency Response for Architectural Heritage in Seismic Areas: An Integrated Approach to Safety and Conservation. *Heritage*, *7*(9), 4678–4696. https://doi.org/10.3390/heritage7090221

Frank Consoli, David Allen, Ian Boustead, James Fava, William Franklin, Allan A. Jensen, Nick de Oude, Rod Parrish, Rod Perriman, Dennis Postlethwaite, Beth Quay, Jacinthe Séguin, & Bruce Vigon. (1993). *Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice."* SETAC.

Grimaz, S. (2011). Management of urban shoring during a seismic emergency: advances from the 2009 L'Aquila (Italy) earthquake experience. *Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata*, *52*(2), 341–355.

Grimaz, S., Cavriani, M., Mannino, E., Munaro, L., Bellizzi, M., Bolognese, C., Caciolai, M., D'Odorico, A., Maiolo, A., & Ponticelli, L. (2010). *Vademecum STOP – Schede tecniche delle opere provvisionali per la messa in sicurezza post-sisma da parte dei Vigili del Fuoco*.

Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., & Rydberg, T. (2011). Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. *Environmental Science & Technology*, *45*(1), 90–96. https://doi.org/10.1021/es101316v

Habert, G., & Roussel, N. (2009). Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. *Cement and Concrete Composites*, *31*(6), 397–402.

Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2018). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Springer.

INAH – Coordinación Nacional de Antropología. (2018). Los sismos de septiembre de 2017 en México. Miradas antropológicas. *Rutas de Campo*, *3*.

Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.). (2014). *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2015). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415416

Isidorsson, T., & Kubisa, J. (Eds.). (2018). *Job Quality in an Era of Flexibility*. Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203710678

Kerpelis, P. (2019, June). Critical analysis of building shoring methods after catastrophic earthquakes. *2nd International Conference on Natural Hazards & Infrastructure (ICONHIC 2019)*.

Klasson, A., Björnsson, I., Crocetti, R., & Hansson, E. F. (2018). Slender Roof Structures - Failure Reviews and a Qualitative Survey of Experienced Structural Engineers. *Structures*, *15*, 174–183. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.06.009

Lagomarsino, S., & Cattari, S. (2014). PERPETUATE guidelines for the seismic assessment of cultural heritage masonry structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *12*(4), 1229–1277.

Lagomarsino, S., & Cattari, S. (2015). PERPETUATE guidelines for seismic performance-based assessment of cultural heritage masonry structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *13*(1), 13–47. https://doi.org/10.1007/s10518-014-9674-1

Lozano-Galant, J. A., Payá-Zaforteza, I., Xu, D., & Turmo, J. (2012). Forward Algorithm for the construction control of cable-stayed bridges built on temporary supports. *Engineering Structures*, *40*, 119–130. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.02.022

Massachusetts Bay Transportation Authority (MBTA). (2015). *Alewife Station Lobby Roof Damage: Urgent Response and Repairs*.

Massimo Mariani. (2014). *Particolari costruttivi nel consolidamento e restauro*. DEI.

Miao, X., Yuan, A., Wang, X., & Chen, Q. (2025). Arch First and Beam Later Technology: An Accelerated and Safe Construction for Tied Arch Bridges. *Structural Engineering International*, *35*(2), 162–170. https://doi.org/10.1080/10168664.2024.2312179

Michael Barker, Hollice Stone, David Hammond, & John O'Connell. (2011). *Field Guide for Building Stabilization and Shoring Techniques (BIPS 08)*.

Milano, L., Mannella, A., Morisi, C., & Martinelli, A. (2009). *Schede illustrative dei principali meccanismi di collasso locali negli edifici esistenti in muratura e dei relativi modelli cinematici di analisi*.

Milano, L., Penna, A., & Morandi, P. (2009). Valutazione della sicurezza post-sismica di edifici in muratura: metodologie e applicazioni. *Journal of Earthquake Engineering*, *13*(s1), 1–20.

Miltiadou-Fezans, A., Tassios, T. P., Delinikolas, N., Chorafa, E., Zarogianni, E., & Chandrinos, I. (2003). Earthquake structural problems and urgent measures undertaken to support the Katholikon of Dafni Monastery in Athens, Greece. *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture VIII (WIT Transactions on The Built Environment, Vol. 66)*, 533–542.

Ministero della Cultura (MiC). (2020). *Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale – Versione aggiornata*.

Ministero per i Beni e le Attività Culturali e per il Turismo (MiBACT). (2015). *Aggiornamento delle Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio*.

Ministero per i Beni e le Attività Culturali (MiBAC). (2011). *Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale*.

Ministry of Business, I. and E. (MBIE). (2014). *Field Guide: Rapid Post-Disaster Building Usability Assessment – Earthquakes*.

Modena, C., Da Porto, F., Filippo, C., Munari, M., & Simonato, E. (2010). Cultural Heritage Buildings and the Abruzzo Earthquake: Performance and Post-Earthquake Actions. *Advanced Materials Research*, *133–134*, 3–17. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.3

Nakahara, H., & Uehara, H. (2017). Damage to buildings and temporary structures during the 2016 Kumamoto Earthquake. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, *17*(4).

Norgate, T. E., Jahanshahi, S., & Rankin, W. J. (2007). Assessing the environmental impact of metal production processes. *Journal of Cleaner Production*, *15*(8–9), 838–848.

Penelis, G. (2007). *Earthquake-resistant concrete and masonry building design*. CRC Press.

Prezzario regionale dei lavori pubblici della Regione Abruzzo 2023. (2023).

Redazione DEI. (2023). *Prezzario DEI – Opere Edili 2023: Prezzi informativi dell'edilizia*.

Rossetto, T., D'Ayala, D., Gori, F., Persio, R., Han, J., Novelli, V., Wilkinson, S. M., Alexander, D., Hill, M., Stephens, S., Kontoe, S., Elia, G., Verrucci, E., Vicini, A., Shelley, W., & Foulser-Piggott, R. (2014). The value of multiple earthquake missions: the EEFIT L'Aquila Earthquake experience. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *12*(1), 277–305. https://doi.org/10.1007/s10518-014-9588-y

Rotilio, M., D'Alberto, G., Di Egidio, A., Contento, A., & De Berardinis, P. (2023). Proposal of a Protocol for the Safe Removal of Post-Earthquake Provisional Shorings. *Buildings*, *13*(9), 2363. https://doi.org/10.3390/buildings13092363

Sartal, A., Martínez-Senra, A., & García, J. (2017). Balancing Offshoring and Agility in the Apparel Industry: Lessons From Benetton and Inditex. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, *25*(0), 16–23. https://doi.org/10.5604/12303666.1228148

Sorrentino, L., Liberatore, L., Decanini, L. D. F., & Monti, G. (2019). Seismic behaviour of masonry buildings: lessons learned from recent Italian earthquakes. *International Journal of Architectural Heritage*, *13*(7–8), 1125–1144.

SPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale). (2023). *Rapporto rifiuti speciali – Edizione 2023*.

Su, J., Li, J., Tan, L., & Huang, X. (2018). Development of the IoT-based Monitoring System for Scaffold Shoring System of Concrete Formwork.

MATEC Web of Conferences, *175*, 03072. https://doi.org/10.1051/matecconf/201817503072

UNESCO (United Nations Educational, S. and C. O., International Cooperation Agency (JICA), & Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AMEXCID). (2018). *Stories behind the 2017 earthquakes in Mexico: Response-Recovery-Reconstruction*.

UNI EN 15804:2019 - Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products. (2019).

UNI EN 15978:2011 – Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method. (2011).

UNI EN ISO 14040:2006 – Life cycle assessment — Principles and framework. (2006).

UNI EN ISO 14044:2021 – Life cycle assessment — Requirements and guidelines. (2021).

UNI/PdR 75:2020 – Linee guida per la valutazione del Life Cycle Costing (LCC) nelle opere pubbliche. (2020).

United Nations Environment Programme (UNEP), & Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC). (2023). *Global Status Report for Buildings and Construction 2023*.

Vaiano, G., Masi, A., & Vona, M. (2020). Analisi dei meccanismi locali negli edifici in muratura: un approccio integrato per la riduzione del rischio sismico. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 567–593.

Wang, H. J., Xue, Z. C., & Han, Z. Q. (2011). Temporary Support Design on Large-Span Casting Box Girder of the Songpu Bridge. *Applied Mechanics and Materials*, *99–100*, 304–307. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.99-100.304

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *21*(9), 1218–1230. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8

Zeule, L. de O., Vinhal, L. D., Serra, S. M. B., & Barreto, D. (2017). Decision making process assisted by life cycle assessment: greenhouse gas emission. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, *8*(2). https://doi.org/10.12972/susb.20170022

7 ALLEGATI

- Scheda di rimozione 01_ Puntellatura di contrasto
- Scheda di rimozione 02_ Puntellatura di ritegno
- Scheda di rimozione 03_ Puntellatura di sostegno e sbadacchiatura
- Scheda di rimozione 04_ Puntellatura di sostegno solai e balconi
- Scheda di rimozione 05_ Opere di centinatura
- Scheda di rimozione 06_ Opere di tirantatura
- Scheda di rimozione 07_ Opere di cerchiatura
- Scheda di rimozione 08_ Opere di incamiciatura

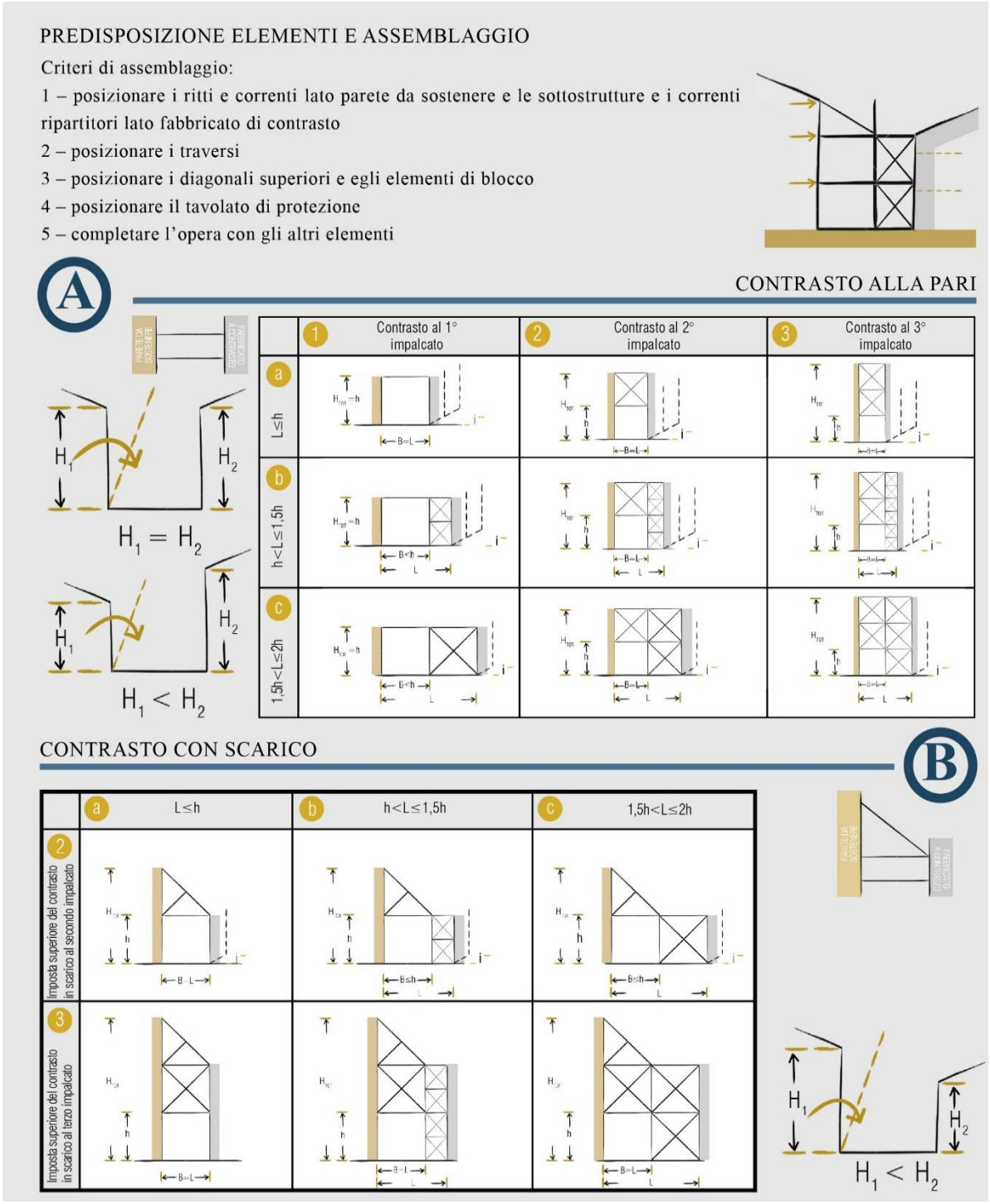
Allegato 1

Scheda di rimozione 01_Puntellatura di contrasto

Descrizione

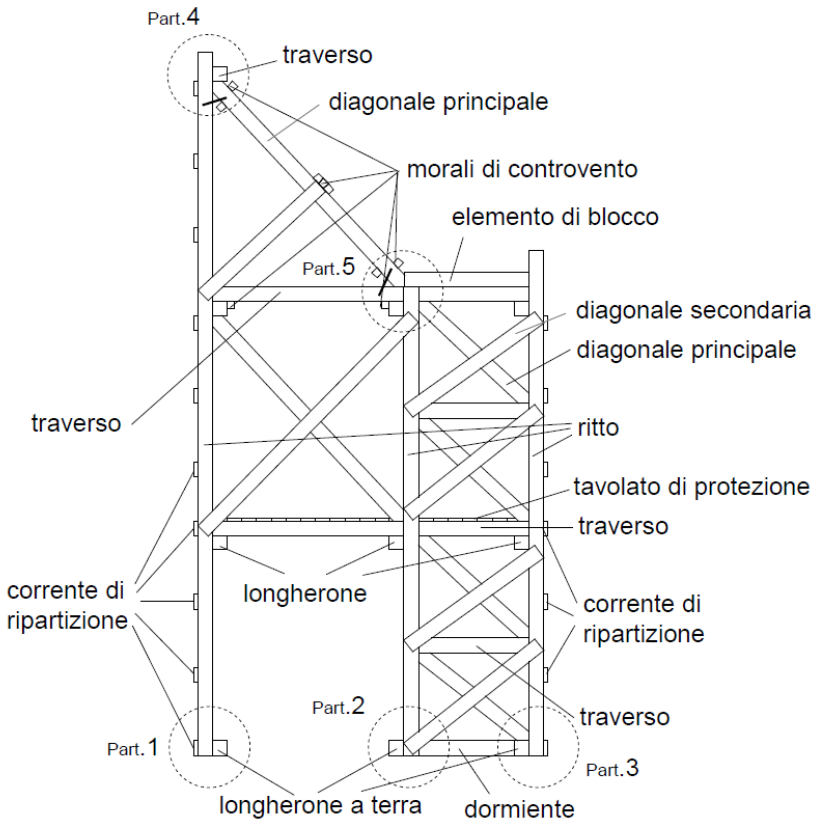
Nel panorama degli interventi provvisionali post-sisma, i puntelli di contrasto assumono un ruolo cruciale quando si tratta di stabilizzare porzioni di murature crollate o lese che si sviluppano in presenza di edifici adiacenti. Diversamente dai puntelli di ritegno tradizionali, i puntelli di contrasto sono disposti in modo tale da trasferire le sollecitazioni sismiche orizzontali della muratura danneggiata verso il fabbricato contiguo, sfruttando l'azione di supporto reciproco tra i due corpi edilizi. Tale strategia è particolarmente efficace nei contesti urbani densi, tipici dei centri storici come quello dell'Aquila.
Nel definire gli schemi statici, si distinguono due condizioni operative principali: il contrasto alla pari, che si impiega quando le altezze del fabbricato in crisi e del fabbricato di appoggio sono simili, e il contrasto con scarico, utilizzato quando la parete da sostenere supera in altezza quella adiacente. Questi schemi standardizzati fanno riferimento a configurazioni geometriche rigorose, in cui la lunghezza del traverso e la distanza tra i fabbricati vengono correlate in funzione dell'altezza interpiano. Dal punto di vista esecutivo, l'installazione dei puntelli di contrasto richiede una preparazione accurata delle sedi murarie. Vengono create fresature o incassi calibrati, con rimozione dell'intonaco, per garantire un adeguato ammorsamento tra puntello e muratura. L'opera deve essere costruita in condizioni che minimizzino il rischio di instabilità durante il montaggio e prevedano una messa in forza dei puntelli mediante cunei o malta di presa rapida. È altresì essenziale che i dispositivi non alterino irreversibilmente il comportamento strutturale dell'edificio ma siano compatibili con eventuali interventi successivi.

Configurazioni tipo



Nomenclatura di riferimento

Allegato 1



Procedura di rimozione

Si riportano le procedure di rimozione generali:

1) Verifiche preliminari:
   - idoneità dell'opera provvisionale;
   - funzionalità dell'opera provvisionale;
   - corretta installazione di ulteriori opere provvisionali a supporto o sostituzione;
   - consolidamenti ed opere di rinforzo della struttura.
2) Verificare la presenza e la consistenza di idoneo impalcato su cui effettuare le operazioni di rimozione:
   - resistenza e capacità di carico idonee a supportare i carichi degli addetti e di eventuale attrezzatura e materiale rimosso;
   - presenza di parapetto a protezione dei lavori in quota;
   - presenza di sottoponte per impalcati con dislivelli >250 cm.;
   - presenza di idoneo sistema di accesso all'impalcato su cui vengono effettuate le lavorazioni;
   - polo in caso di non possibilità di attuazione (o attuazione parziale) di misure anticaduta collettive utilizzare i dispositivi di protezione anticaduta personali.
3) Operazioni preliminari:
   - rimuovere dagli impalcati eventuali materiali depositati o caduti;
   - bonificare le pareti della struttura da eventuali elementi instabili o pericolanti.
4) Rimozione degli elementi:

- procedere al disassemblaggio dall'alto e proseguire verso basso solo dopo aver completato il livello superiore;
- se previsto dal progetto esecutivo rimuovere parzialmente l'opera di puntellamento per effettuare opere di consolidamento o rinforzo strutturale;
- prima di rimuovere traversi e diagonali accertarsi che gli stessi non siano sottoposti a compressioni o tensioni;
- controllare la stabilità dei correnti di ripartizione durante la rimozione dei ritti al fine di evitare la caduta degli elementi o di materiale depositato;
- controllare eventuali cedimenti di parti non coese con la struttura;
- sezionare elementi ingombranti o eccessivamente pesanti al fine di agevolare le operazioni di rimozione;
- non depositare gli elementi rimossi sulla struttura di puntellamento, gli stessi devono essere immediatamente conferiti nel luogo di deposito designato.

5) Supervisione e controllo durante le operazioni:
   - garantire la corretta attuazione delle procedure operative previste dal PSC e dal POS mediante la costante supervisione effettuata da parte del preposto;
   - controllare eventuali movimenti o cedimenti della struttura se non precedentemente consolidata;
   - garantire l'eventuale attuazione delle procedure di evacuazione previste in caso di crollo o cedimenti strutturali.

I rischi individuati per la suddetta rimozione sono i seguenti:

- caduta di materiale dall'alto;
- tagli, abrasioni, perforazioni;
- cadute dall'alto;
- schiacciamento;
- crollo;
- utilizzo attrezzature complesse (mezzi sollevamento materiali e/o persone).

Allegato 2

Scheda di rimozione 02_Puntellatura di ritegno

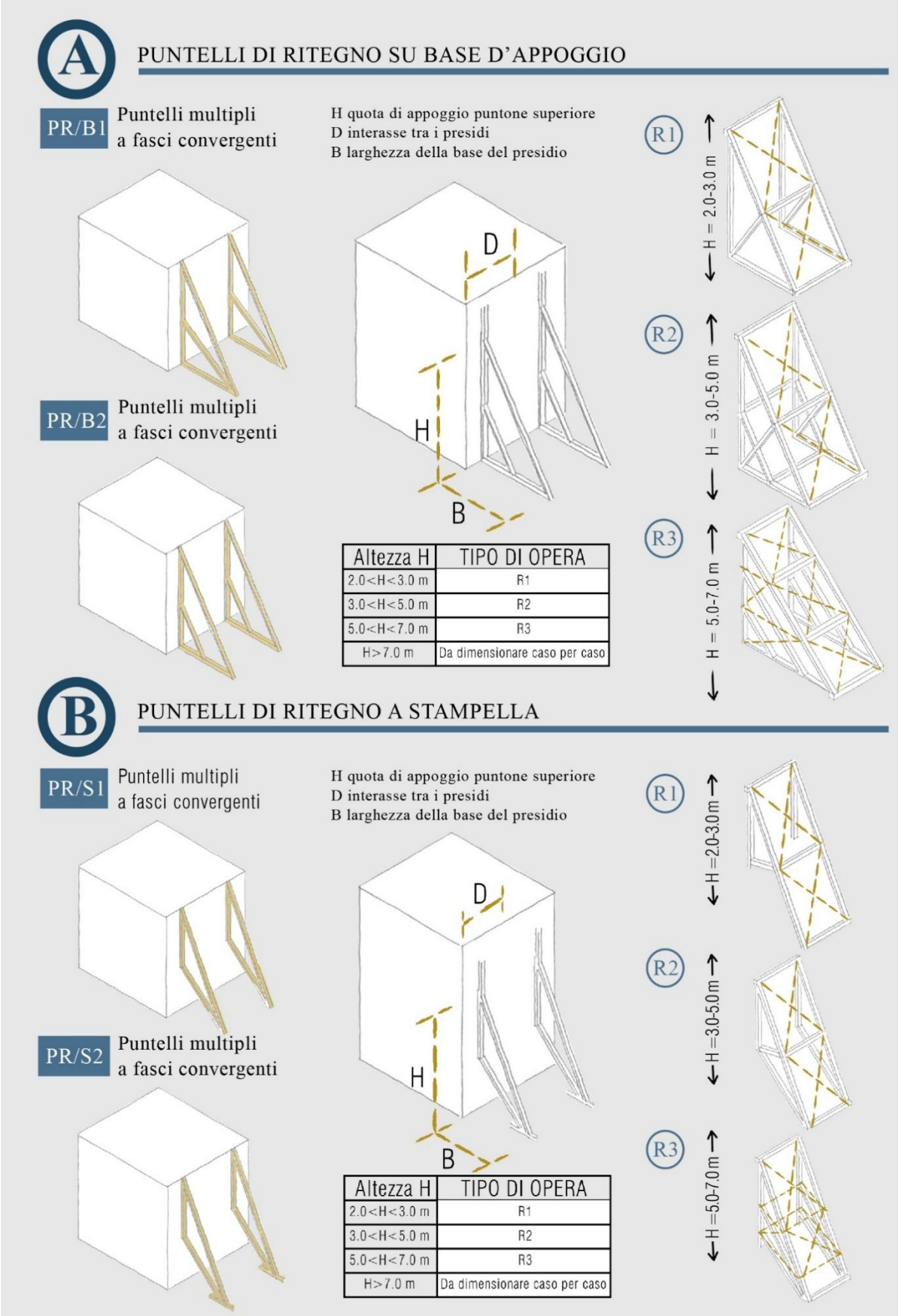
Descrizione

Nel contesto della messa in sicurezza post-sismica degli edifici danneggiati, l'adozione dei puntelli di ritegno rappresenta una misura provvisoria fondamentale per stabilizzare le porzioni di muratura soggette a rischio di ribaltamento. Queste strutture, realizzate con elementi lignei, metallici o lamellari, vengono posizionate con inclinazione controllata e dimensionate in relazione all'altezza della parete, allo spessore e alla geometria del supporto. Per pareti di altezza inferiore a sette metri si privilegia l'uso del legno; per strutture più elevate o per esigenze particolarmente gravose, si impiega acciaio o legno lamellare.

Dal punto di vista statico, il dimensionamento dei puntelli utilizza abachi tabellari per determinare la sezione necessaria e l'interasse tra elementi, individuati in funzione della luce da sostenere e delle condizioni di vincolo superiore.

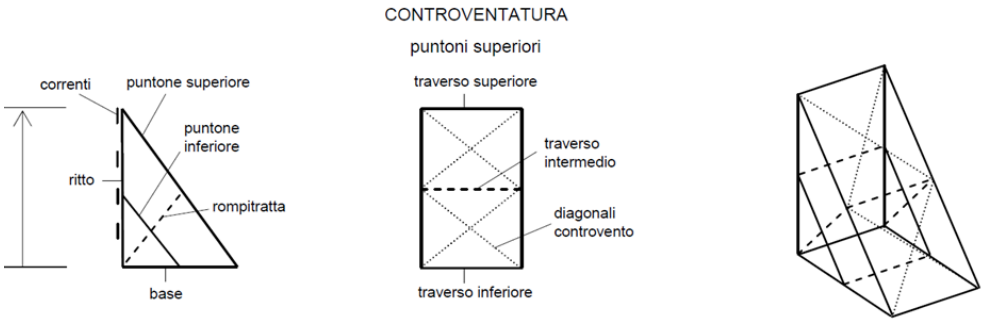
Tra i puntelli e la muratura da sostenere vengono posizionati dei ripartitori di carico costituiti da tavole e correnti verticali e orizzontali, sempre in legno. La tipologia dell'ancoraggio al terreno dei puntelli è determinata dalla natura del fondo stradale o del piano di campagna (trave di contrasto con picchetti singoli o accoppiati, doppia trave di contrasto, scavo del terreno con inserimento di una base fondale in legno, ecc.). Vengono realizzati due schemi, puntellatura di ritegno su base di appoggio o a stampella.

Configurazioni tipo



Allegato 2

Nomenclatura di riferimento



Procedura di rimozione

Si riportano le procedure di rimozione generali:

1) Verifiche preliminari:
   - idoneità dell'opera provvisionale;
   - funzionalità dell'opera provvisionale;
   - corretta installazione di ulteriori opere provvisionali a supporto o sostituzione;
   - consolidamenti ed opere di rinforzo della struttura.
2) Verificare la disponibilità di mezzi di sollevamento e piattaforme di lavoro elevabili o mezzi equivalenti per effettuare operazioni in quota:
   - rimozione diagonali di controvento e traversi intermedi;
   - imbragatura dei puntelli.
3) Operazioni preliminari:
   - rimuovere eventuali materiali depositati o caduti;
   - bonificare le pareti della struttura da eventuali elementi instabili o pericolanti.
4) Rimozione degli elementi:
   - imbragare il puntello tramite fasce o catene per successiva rimozione tramite mezzi di sollevamento;
   - procedere al disassemblaggio dei diagonali di controvento e dei traversi intermedi limitatamente al puntello da rimuovere;
   - se previsto dal progetto esecutivo rimuovere parzialmente l'opera di puntellamento per effettuare opere di consolidamento o rinforzo strutturale;
   - prima di rimuovere traversi e diagonali accertarsi che gli stessi non siano sottoposti a compressioni o tensioni;
   - rimuovere diagonali di controvento e dei traversi intermedi;
   - controllare la stabilità dei correnti di ripartizione durante la rimozione dei ritti al fine di evitare la caduta degli elementi o di materiale depositato;
   - controllare eventuali cedimenti di parti non coese con la struttura;
   - controllare l'assenza di eventuali connessioni del puntello con gli elementi di ripartizione;
   - rimuovere il puntello tramite mezzi di sollevamento idonei e posizionarlo in orizzontale (a terra) per successivo disassemblaggio;

- durante la movimentazione del puntello, lo stesso deve essere guidato tramite funi di ritegno al fine di non urtare altri elementi dell'opera di puntellamento;
- gli elementi rimossi sulla struttura di puntellamento devono essere immediatamente conferiti nel luogo di deposito designato.

5) Supervisione e controllo durante le operazioni:
   - garantire la corretta attuazione delle procedure operative previste dal PSC e dal POS mediante la costante supervisione effettuata da parte del preposto;
   - controllare eventuali movimenti o cedimenti della struttura se non precedentemente consolidata;
   - garantire l'eventuale attuazione delle procedure di evacuazione previste in caso di crollo o cedimenti strutturali.

I rischi individuati per la suddetta rimozione sono i seguenti:

- caduta di materiale dall'alto;
- tagli, abrasioni, perforazioni;
- cadute dall'alto;
- schiacciamento;
- crollo;
- utilizzo attrezzature complesse (mezzi sollevamento materiali e/o persone).

I rischi individuati per la suddetta rimozione sono i seguenti:

- caduta di materiale dall'alto;
- tagli, abrasioni, perforazioni;
- cadute dall'alto;
- schiacciamento;
- crollo;
- utilizzo attrezzature complesse (mezzi sollevamento materiali e/o persone).

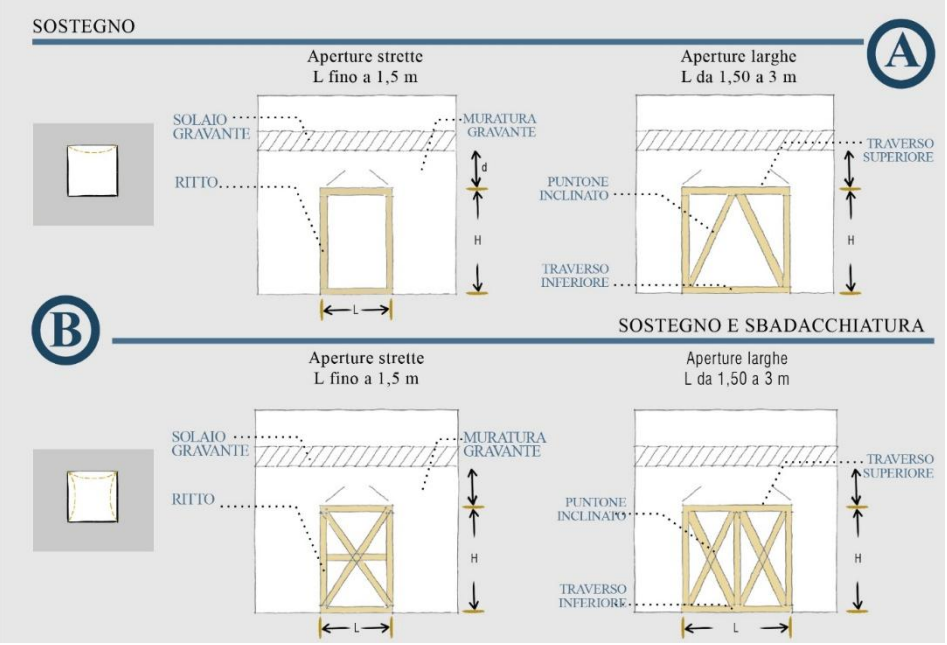
Allegato 3

Scheda di rimozione 03_Punellatura di sostegno e sbadacchiature

Descrizione

Nel quadro degli interventi provvisionali adottati dopo eventi sismici, la puntellatura di sostegno assume un ruolo strategico nel garantire la stabilità degli elementi portanti della muratura, come archi, volte e solai, quando questi risultano gravemente compromessi. Tale presidio utilizza generalmente aste verticali o leggermente inclinate, realizzate in legno, acciaio o, in alcuni casi, muratura, e risulta particolarmente indicato nel sostenere carichi verticali gravanti su strutture lesionate, fungendo da supporto temporaneo fino alla realizzazione dei consolidamenti definitivi. I puntelli in acciaio, dal momento che sono spesso prefabbricati e di rapida installazione, sono preferiti per altezza contenute (fino a circa 4–5 metri), mentre per altezze maggiori o condizioni di accesso complicate si fa ricorso alle versioni in legno o legno lamellare, che trovano applicazione anche in contesti monumentali per la loro compatibilità con il patrimonio storico.

Configurazioni tipo



Procedura di rimozione

Si riportano le procedure di rimozione generali:

1) Verifiche preliminari:
   - idoneità dell'opera provvisionale;
   - funzionalità dell'opera provvisionale;
   - corretta installazione di ulteriori opere provvisionali a supporto o sostituzione;
   - consolidamenti ed opere di rinforzo della struttura.

2) Operazioni preliminari:
   - rimuovere eventuali materiali depositati o caduti;
   - bonificare le pareti della struttura da eventuali elementi instabili o pericolanti.
3) Verificare la presenza e la consistenza di idoneo impalcato su cui effettuare le operazioni di rimozione:
   - resistenza e capacità di carico idonee a supportare i carichi degli addetti e di eventuale attrezzatura e materiale rimosso;
   - presenza di parapetto a protezione dei lavori in quota;
   - presenza di sottoponte per impalcati con dislivelli >250 cm.;
   - presenza di idoneo sistema di accesso all'impalcato su cui vengono effettuate le lavorazioni;
   - solo in caso di non possibilità di attuazione (o attuazione parziale) di misure anticaduta collettive utilizzare i dispositivi di protezione anticaduta personali.
4) Rimozione degli elementi:
   - rimuovere eventuali diagonali di controvento e traversi intermedi;
   - se previsto dal progetto esecutivo rimuovere parzialmente l'opera di puntellamento per effettuare opere di consolidamento o rinforzo strutturale;
   - prima di rimuovere traversi e diagonali accertarsi che gli stessi non siano sottoposti a compressioni o tensioni;
   - controllare eventuali cedimenti di parti non coese con la struttura;
   - gli elementi rimossi sulla struttura di puntellamento devono essere immediatamente conferiti nel luogo di deposito designato.
5) Supervisione e controllo durante le operazioni:
   - garantire la corretta attuazione delle procedure operative previste dal PSC e dal POS mediante la costante supervisione effettuata da parte del preposto;
   - controllare eventuali movimenti o cedimenti della struttura se non precedentemente consolidata;
   - garantire l'eventuale attuazione delle procedure di evacuazione previste in caso di crollo o cedimenti strutturali.

I rischi individuati per la suddetta rimozione sono i seguenti:
- caduta di materiale dall'alto;
- tagli, abrasioni, perforazioni;
- cadute dall'alto;
- schiacciamento;
- crollo.

Allegato 4

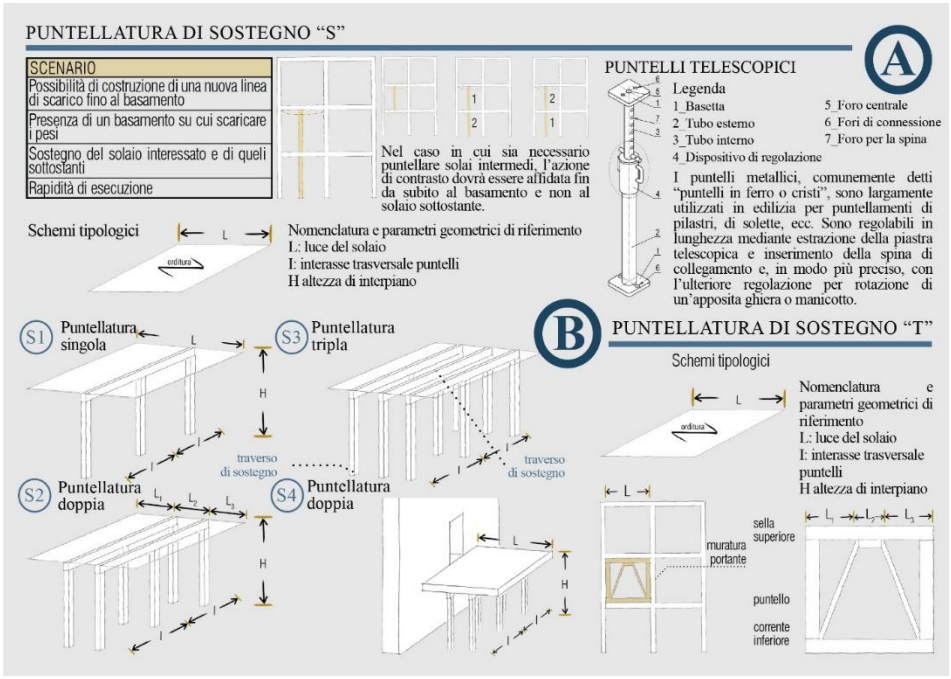
Scheda di rimozione 04_Punellatura di sostegno solai e balconi

Descrizione

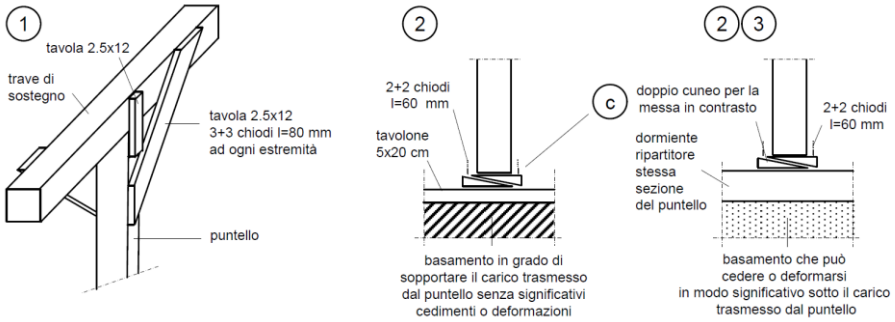
Tra le numerose opere provvisionali adottate nel contesto della messa in sicurezza post-sismica, un ruolo di particolare rilievo è rivestito dalla puntellatura di sostegno a solai e balconi. Questi elementi, per loro stessa natura, risultano spesso tra i più vulnerabili a seguito di un evento sismico, in quanto soggetti a deformazioni per eccesso di carico, perdita di appoggio o rottura dei collegamenti con le strutture verticali. La puntellatura ha dunque la funzione di intercettare i carichi statici e dinamici trasmessi dall'elemento dissestato, trasferendoli in modo controllato a un basamento sicuro, con lo scopo di prevenire il collasso localizzato e consentire l'esecuzione in sicurezza di rilievi, indagini e, successivamente, interventi di consolidamento o sostituzione.

Nel caso dei solai, il dissesto si manifesta prevalentemente con fenomeni di inflessione verso l'intradosso, fessurazioni nelle zone centrali della campata o presso gli appoggi, e in alcuni casi veri e propri abbassamenti differenziali. Per quanto riguarda i balconi, invece, i danni più frequenti consistono in rotazioni della soletta e distacchi nell'area di ammorsamento alla muratura.

Configurazioni tipo



Nomenclatura di riferimento



Procedura di rimozione

Si riportano le procedure di rimozione generali:

1) Verifiche preliminari:
   - idoneità dell'opera provvisionale;
   - funzionalità dell'opera provvisionale;
   - corretta installazione di ulteriori opere provvisionali a supporto o sostituzione;
   - consolidamenti ed opere di rinforzo della struttura.
2) Operazioni preliminari:
   - rimuovere eventuali materiali depositati o caduti;
   - bonificare le pareti della struttura da eventuali elementi instabili o pericolanti.
3) Verificare la presenza e la consistenza di idoneo impalcato su cui effettuare le operazioni di rimozione:
   - resistenza e capacità di carico idonee a supportare i carichi degli addetti e di eventuale attrezzatura e materiale rimosso;
   - presenza di parapetto a protezione dei lavori in quota;
   - presenza di sottoponte per impalcati con dislivelli >250 cm.;
   - presenza di idoneo sistema di accesso all'impalcato su cui vengono effettuate le lavorazioni;
   - solo in caso di non possibilità di attuazione (o attuazione parziale) di misure anticaduta collettive utilizzare i dispositivi di protezione anticaduta personali.
4) Rimozione degli elementi:
   - procedere con lo smantellamento del puntellamento posto a livello più alto e successivamente proseguire verso il livello inferiore;
   - rimuovere eventuali controventi e irrigidimenti trasversali;
   - se previsto dal progetto esecutivo rimuovere parzialmente l'opera di puntellamento per effettuare opere di consolidamento o rinforzo strutturale;
   - prima di rimuovere i puntelli accertarsi che gli stessi non siano sottoposti a compressioni;
   - controllare eventuali cedimenti di parti non coese con la struttura;
   - sostenere la trave di sostegno durante la rimozione dei puntelli;
   - rimuovere i puntelli e successivamente la trave di sostegno;
   - gli elementi rimossi sulla struttura di puntellamento devono essere immediatamente conferiti nel luogo di deposito designato.
5) Supervisione e controllo durante le operazioni:

- garantire la corretta attuazione delle procedure operative previste dal PSC e dal POS mediante la costante supervisione effettuata da parte del preposto;
- controllare eventuali movimenti o cedimenti della struttura se non precedentemente consolidata;
- garantire l'eventuale attuazione delle procedure di evacuazione previste in caso di crollo o cedimenti strutturali.

I rischi individuati per la suddetta rimozione sono i seguenti:

- caduta di materiale dall'alto;
- tagli, abrasioni, perforazioni;
- cadute dall'alto;
- schiacciamento;
- crollo.

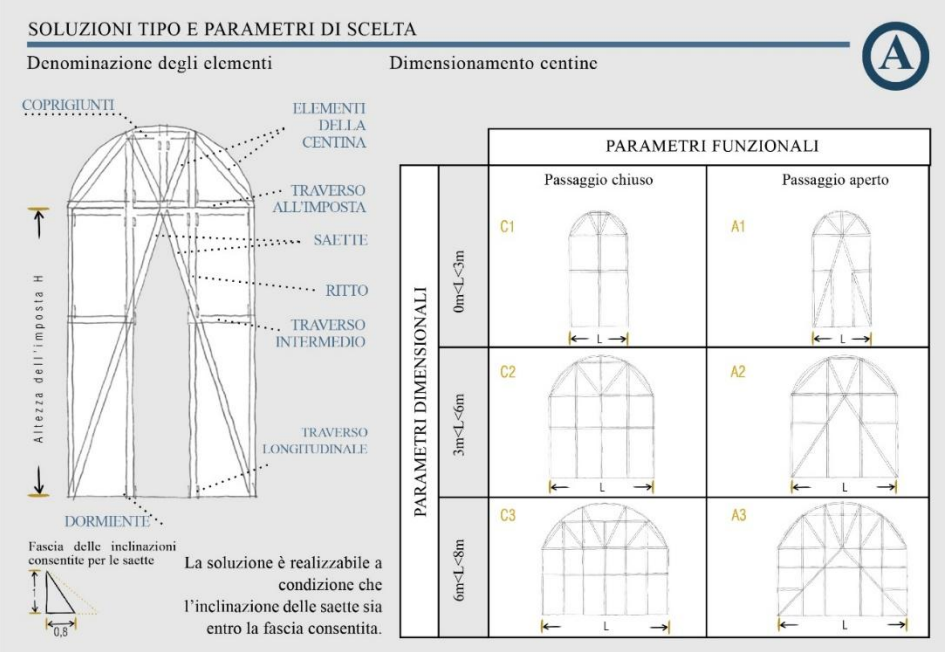
Allegato 5

Scheda di rimozione 05_Opere di Centinatura

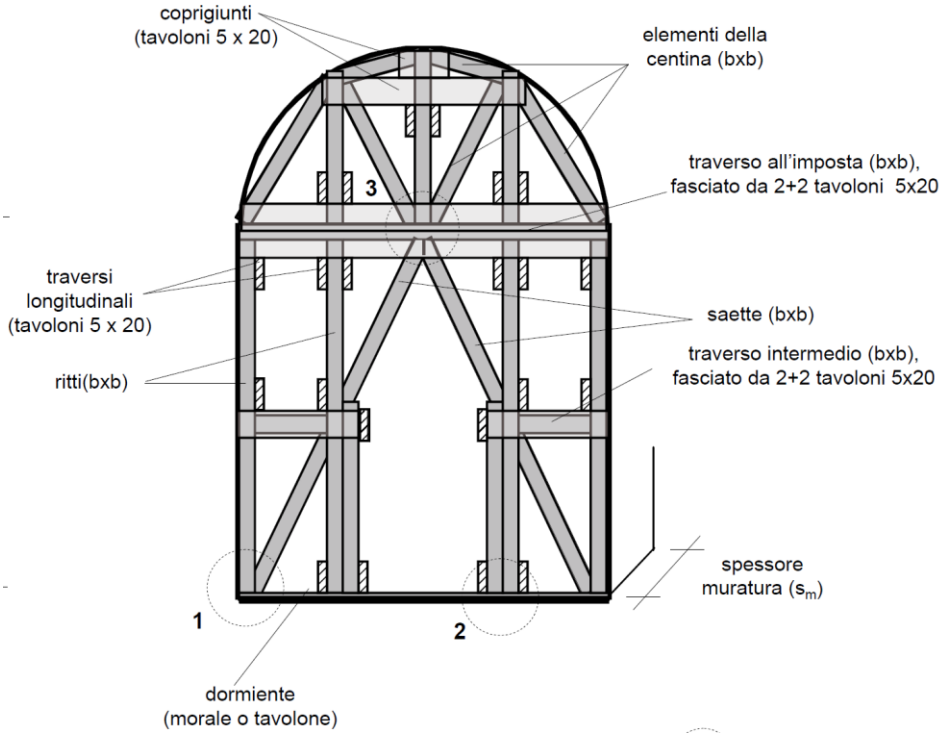
Descrizione

Nel panorama delle opere provvisionali post-sisma, le centinature di confinamento rappresentano una soluzione tecnica indispensabile per la messa in sicurezza di archi e volte danneggiati, elementi strutturali particolarmente vulnerabili agli effetti delle azioni orizzontali e verticali indotte dai terremoti. La funzione principale di questo tipo di presidio è quella di contenere le spinte residue e prevenire ulteriori deformazioni, fessurazioni o crolli, offrendo un sostegno temporaneo ma efficace alle strutture voltate fino all'attuazione di interventi definitivi. Le centinature vengono generalmente adottate in presenza di lesioni in chiave o alle reni della volta, situazioni che possono compromettere gravemente l'equilibrio statico del sistema. In particolare, le volte a botte e gli archi in muratura, spesso realizzati con materiali disomogenei o non ben ammorsati, possono manifestare una perdita progressiva della forma resistente, evidenziata da abbassamenti della linea di imposta, aperture della chiave o rigonfiamenti delle superfici estradossali. Le centinature, in questi casi, hanno il compito di assorbire parte dei carichi verticali e ridistribuirli verso il basso, riducendo il grado di sollecitazione sui piedritti e minimizzando il rischio di rottura per schiacciamento o instabilità. Dal punto di vista costruttivo, le centine sono realizzate mediante telai reticolari in legno, generalmente a sezione quadrata, opportunamente controventati e distribuiti lungo la luce della volta. Il numero dei ritti e la distanza tra i traversi principali vengono determinati in funzione della geometria dell'arco o della volta, della sua luce e dello spessore murario. Un aspetto fondamentale nella progettazione e nella posa delle centinature riguarda il punto di appoggio al suolo e la trasmissione dei carichi. Le centine devono poggiare su basamenti in grado di sopportare le forze trasmesse senza deformazioni significative. In presenza di aperture ai livelli inferiori, la soluzione preferibile è quella della centina aperta, che permette il trasferimento delle spinte a elementi strutturali effettivamente portanti, minimizzando il carico sul solaio sottostante e riducendo l'invasività dell'intervento. Tale configurazione si dimostra particolarmente vantaggiosa nei contesti storici, dove l'obiettivo primario è la salvaguardia del costruito e la reversibilità degli interventi.

Configurazioni tipo



Nomenclatura di riferimento



Procedura di rimozione

Si riportano le procedure di rimozione generali:

1) Verifiche preliminari:
   - idoneità dell'opera provvisionale;
   - funzionalità dell'opera provvisionale;

- corretta installazione di ulteriori opere provvisionali a supporto o sostituzione;
- consolidamenti ed opere di rinforzo della struttura.

2) Operazioni preliminari:
   - rimuovere eventuali materiali depositati o caduti;
   - bonificare le pareti della struttura da eventuali elementi instabili o pericolanti.
3) Verificare la presenza e la consistenza di idoneo impalcato su cui effettuare le operazioni di rimozione:
   - resistenza e capacità di carico idonee a supportare i carichi degli addetti e di eventuale attrezzatura e materiale rimosso;
   - presenza di parapetto a protezione dei lavori in quota;
   - presenza di sottoponte per impalcati con dislivelli >250 cm.;
   - presenza di idoneo sistema di accesso all'impalcato su cui vengono effettuate le lavorazioni;
   - solo in caso di non possibilità di attuazione (o attuazione parziale) di misure anticaduta collettive utilizzare i dispositivi di protezione anticaduta personali.
4) Rimozione degli elementi:
   - rimuovere i coprigiunti e gli elementi della centina;
   - prima di rimuovere traversi e diagonali accertarsi che gli stessi non siano sottoposti a compressioni o tensioni;
   - rimuovere eventuali diagonali di controvento e traversi longitudinali ed intermedi;
   - se previsto dal progetto esecutivo rimuovere parzialmente l'opera di puntellamento per effettuare opere di consolidamento o rinforzo strutturale;
   - controllare eventuali cedimenti di parti non coese con la struttura;
   - gli elementi rimossi sulla struttura di puntellamento devono essere immediatamente conferiti nel luogo di deposito designato.
5) Supervisione e controllo durante le operazioni:
   - garantire la corretta attuazione delle procedure operative previste dal PSC e dal POS mediante la costante supervisione effettuata da parte del preposto;
   - controllare eventuali movimenti o cedimenti della struttura se non precedentemente consolidata;
   - garantire l'eventuale attuazione delle procedure di evacuazione previste in caso di crollo o cedimenti strutturali.

I rischi individuati per la suddetta rimozione sono i seguenti:

- caduta di materiale dall'alto;
- tagli, abrasioni, perforazioni;
- cadute dall'alto;
- schiacciamento;
- crollo.

Allegato 6

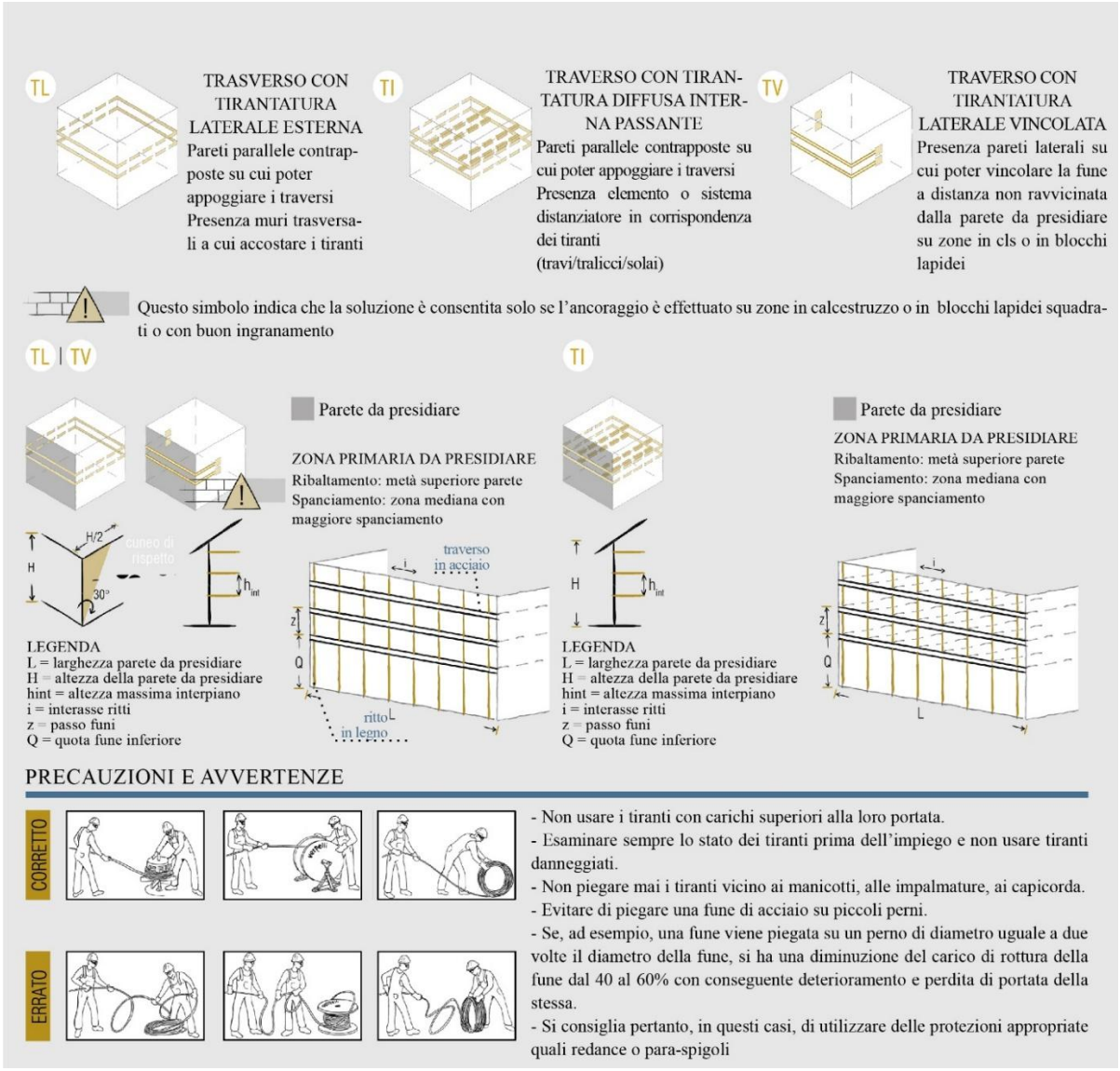
Scheda di rimozione 06_ Tirantature

Descrizione

Tra gli interventi provvisionali impiegati per la messa in sicurezza di edifici danneggiati da eventi sismici, le tirantature rappresentano una soluzione estremamente efficace per il contenimento dei meccanismi di ribaltamento fuori piano e lo spanciamento di pareti murarie. Si tratta di interventi non invasivi che sfruttano la messa in trazione di cavi in acciaio per esercitare un'azione attiva di contenimento trasversale sulle strutture murarie, agendo in modo puntuale ma distribuito.

Il principio su cui si basa l'intervento è quello del confinamento flessibile: le pareti da presidiare, soggette a fenomeni di disconnessione o distacco dal resto della struttura, vengono trattenute attraverso funi metalliche tese, collegate a sistemi di contrasto esterni o ad altri elementi strutturali in grado di assorbire le forze trasmesse. I tiranti possono essere installati con diversi schemi, a seconda della morfologia dell'edificio e della posizione delle pareti da contenere. Le configurazioni più comuni includono la cinturazione totale esterna, la tirantatura passante interna e la tirantatura vincolata laterale, ciascuna con specifiche indicazioni d'impiego e prestazioni. Le cinturazioni totali esterne vengono realizzate avvolgendo l'edificio con funi continue che percorrono l'intero perimetro a quote prestabilite, e risultano particolarmente efficaci su fabbricati di piccole dimensioni con geometria compatta. In alternativa, le tirantature passanti interne prevedono l'installazione di funi che attraversano la struttura da parte a parte, in corrispondenza dei solai, e sono ancorate a traversi o profili metallici, spesso posizionati all'intradosso o all'estradosso dei solai stessi. Questa configurazione è vantaggiosa quando si dispone di una sufficiente regolarità planimetrica e la muratura presenta lesioni di distacco simmetriche. Nel caso in cui l'attraversamento delle murature non sia praticabile, ad esempio per la presenza di vincoli architettonici o impianti, si opta per una tirantatura vincolata laterale, che prevede l'ancoraggio delle funi a pareti perpendicolari o a elementi strutturali esterni, in grado di assorbire le reazioni generate dalla messa in tiro. Il dimensionamento delle tirantature dipende da molteplici fattori: la lunghezza e l'altezza della parete da contenere, il tipo di muratura, il livello di danneggiamento, e la presenza di elementi rigidi a cui vincolare le estremità delle funi.

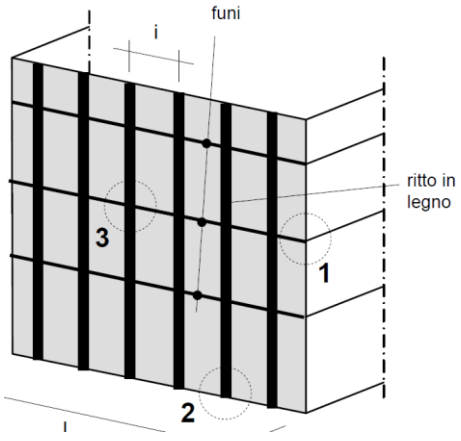
Configurazioni tipo

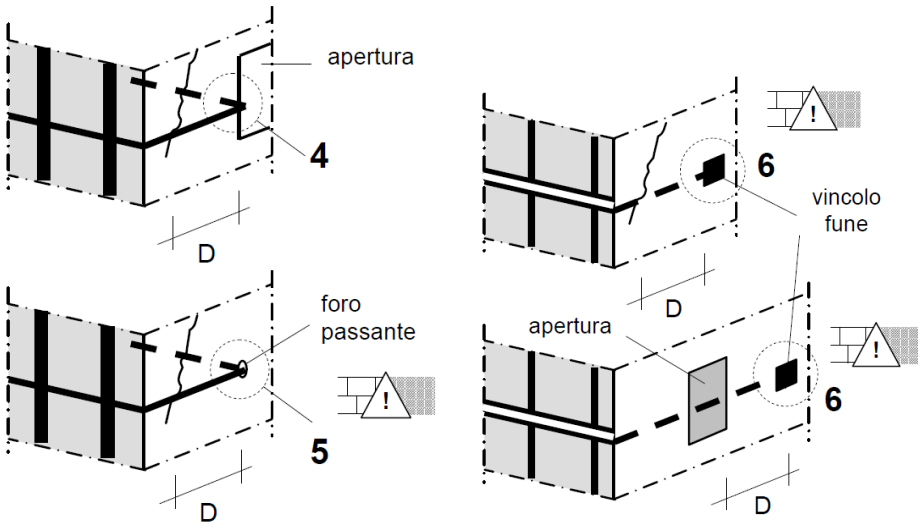


PRECAUZIONI E AVVERTENZE

- Non usare i tiranti con carichi superiori alla loro portata.
- Esaminare sempre lo stato dei tiranti prima dell'impiego e non usare tiranti danneggiati.
- Non piegare mai i tiranti vicino ai manicotti, alle impalmature, ai capicorda.
- Evitare di piegare una fune di acciaio su piccoli perni.
- Se, ad esempio, una fune viene piegata su un perno di diametro uguale a due volte il diametro della fune, si ha una diminuzione del carico di rottura della fune dal 40 al 60% con conseguente deterioramento e perdita di portata della stessa.
- Si consiglia pertanto, in questi casi, di utilizzare delle protezioni appropriate quali redance o para-spigoli

Nomenclatura di riferimento





Procedura di rimozione

Si riportano le procedure di rimozione generali:

1) Verifiche preliminari:
   - idoneità dell'opera provvisionale;
   - funzionalità dell'opera provvisionale;
   - corretta installazione di ulteriori opere provvisionali a supporto o sostituzione;
   - consolidamenti ed opere di rinforzo della struttura.
2) Operazioni preliminari:
   - rimuovere eventuali materiali depositati o caduti;
   - bonificare le pareti della struttura da eventuali elementi instabili o pericolanti.
3) Verificare la presenza e la consistenza di idoneo impalcato su cui effettuare le operazioni di rimozione:
   - resistenza e capacità di carico idonee a supportare i carichi degli addetti e di eventuale attrezzatura e materiale rimosso;
   - presenza di parapetto a protezione dei lavori in quota;
   - presenza di sottoponte per impalcati con dislivelli >250 cm.;
   - presenza di idoneo sistema di accesso all'impalcato su cui vengono effettuate le lavorazioni;
   - solo in caso di non possibilità di attuazione (o attuazione parziale) di misure anticaduta collettive utilizzare i dispositivi di protezione anticaduta personali.
4) Rimozione degli elementi:
   - allentare gradualmente le funi ad iniziare dalla superiore;
   - sorreggere i ritti al fine di evitare la caduta durante l'allentamento delle funi;
   - rimuovere la fune;
   - rimuovere i ritti ed i vincoli;
   - rimuovere i tiranti se presenti;
   - se previsto dal progetto esecutivo rimuovere parzialmente l'opera di puntellamento per effettuare opere di consolidamento o rinforzo strutturale;

- controllare eventuali cedimenti di parti non coese con la struttura;
- gli elementi rimossi sulla struttura di puntellamento devono essere immediatamente conferiti nel luogo di deposito designato.

5) Supervisione e controllo durante le operazioni:
   - garantire la corretta attuazione delle procedure operative previste dal PSC e dal POS mediante la costante supervisione effettuata da parte del preposto;
   - controllare eventuali movimenti o cedimenti della struttura se non precedentemente consolidata;
   - garantire l'eventuale attuazione delle procedure di evacuazione previste in caso di crollo o cedimenti strutturali.

I rischi individuati per la suddetta rimozione sono i seguenti:

- caduta di materiale dall'alto;
- tagli, abrasioni, perforazioni;
- cadute dall'alto;
- schiacciamento;
- crollo;

Allegato 7

Scheda di rimozione 07_ Cerchiature

Descrizione

Gli interventi di cerchiatura possono applicarsi agli elementi sia in muratura sia in cemento armato. Oltre che su colonne e pilastri, l'intervento è efficace anche su intere strutture, ottenendo la massima efficacia in strutture con pianta compatta e dimensioni contenute, quali ad esempio campanili e torri, in quanto la capacità di contenimento della cerchiatura si riduce all'aumentare delle dimensioni in pianta della struttura. Per di più, eccessive lunghezze in pianta aumentano le difficoltà operative, rendendo talvolta impraticabili tali interventi.
Le soluzioni di cerchiatura esistenti dipendono dalla tipologia di struttura:

- cinturazione totale esterna: possibilità di avvolgimento completo (larghezza pareti da contenere non molto estesa);
- cinturazione parziale passante: presenza di aperture laterali allineate (o possibilità di praticare fori) a distanza non ravvicinata dalla parete da presidiare o possibilità di praticare fori passanti in zone in calcestruzzo in blocchi lapidei;
- cinturazione vincolata: presenza di pareti laterali su cui poter vincolare la fune a distanza non ravvicinata dalla parete da presidiare in zone in calcestruzzo o in blocchi lapidei.

Tra le diverse tecniche di cerchiatura provvisionale impiegate nella messa in sicurezza post-sisma, particolare rilievo assumono le soluzioni che prevedono l'utilizzo di fasce in poliestere. Questi interventi sono stati ampiamente applicati su edifici danneggiati che presentavano elementi strutturali – in particolare colonne e pilastri – sollecitati da sforzi eccessivi di compressione e/o taglio. Tali elementi, spesso realizzati in muratura o in calcestruzzo, risultano particolarmente fragili nei confronti delle azioni di trazione e tendono a sviluppare meccanismi di collasso localizzati se non adeguatamente contenuti. La cerchiatura con fasce in poliestere viene pertanto utilizzata come misura temporanea, con funzione prevalentemente cautelativa, in attesa di un successivo intervento strutturale più invasivo, come ad esempio la puntellatura o il consolidamento permanente.
Questa tecnologia si distingue per la rapidità di applicazione e l'elevata efficienza in fase emergenziale. Le fasce vengono poste in tensione attraverso dispositivi meccanici a regolazione manuale, noti come cricchetti, che permettono di conferire al sistema una funzione attiva già al termine della fase di installazione. Un ulteriore vantaggio di questo tipo di intervento è rappresentato dalla possibilità di riutilizzare sia le fasce che i dispositivi di serraggio, rendendo l'operazione non solo efficace, ma anche economicamente sostenibile e flessibile dal punto di vista operativo.
Un'alternativa diffusa è costituita dalle cerchiature realizzate con tubi e giunti metallici, sistemi che sfruttano l'assemblaggio modulare di componenti prefabbricati per creare una struttura reticolare disposta lungo i prospetti

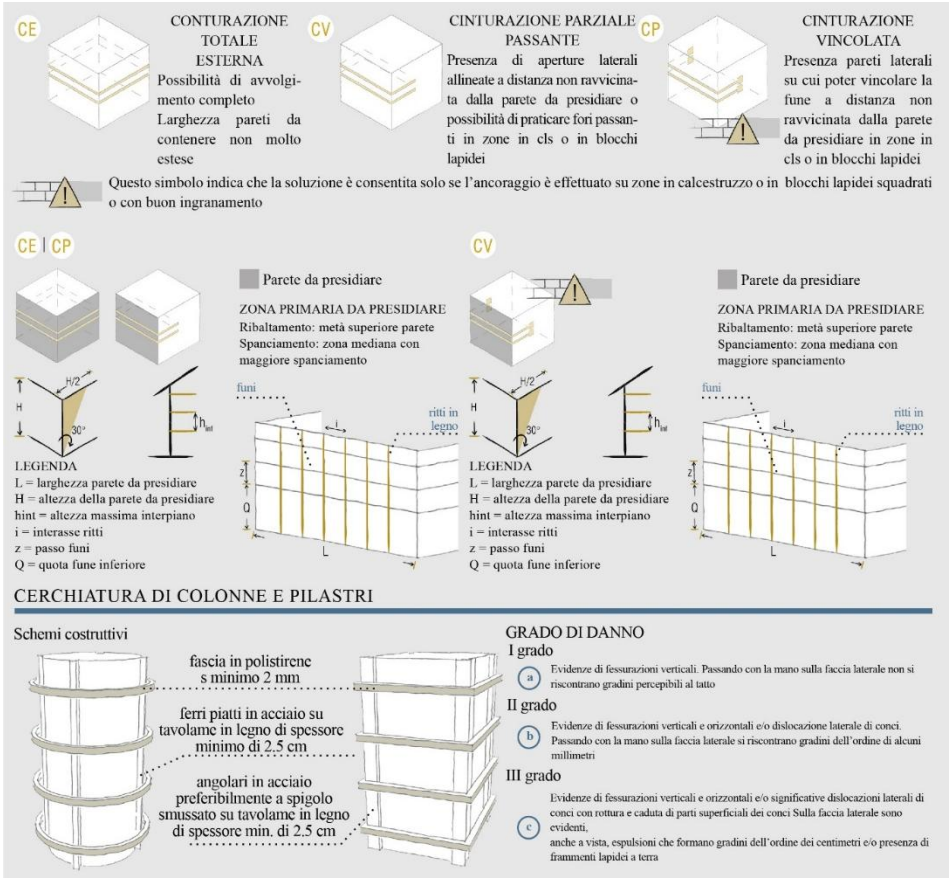
dell'edificio da presidiare. L'intero sistema viene montato secondo le indicazioni di un progetto o disegno esecutivo redatto da un tecnico abilitato, e ha lo scopo di garantire il sostegno e il contenimento degli elementi murari danneggiati, sia in funzione preventiva – qualora si tema un cedimento imminente – sia in funzione contenitiva, nel caso in cui si rilevi un distacco in atto o potenziale di porzioni murarie o frammenti. L'impiego di tubi e giunti si rivela spesso preferibile rispetto a carpenterie metalliche complesse, soprattutto in contesti urbani con viabilità ridotta o spazi di manovra limitati, che ostacolano l'utilizzo di autogrù, piattaforme aeree o mezzi pesanti.

Un ulteriore sistema, particolarmente efficace nel contrastare fenomeni di schiacciamento e presso-flessione, è quello della cerchiatura con profilati metallici e cavi d'acciaio. Tali interventi si rivelano idonei per il confinamento di colonne e pilastri fragili, in quanto l'azione esercitata dai cavi consente di limitare le dilatazioni trasversali e di generare uno stato di compressione triassiale. Questo effetto, oltre a incrementare il carico di collasso per sforzo assiale, migliora anche la duttilità dell'elemento strutturale e la sua resistenza a taglio. Si tratta di una soluzione che trova particolare applicazione negli edifici in muratura di dimensioni contenute, dove la compattezza dell'organismo edilizio consente una risposta più uniforme alla messa in tensione dei sistemi di confinamento.

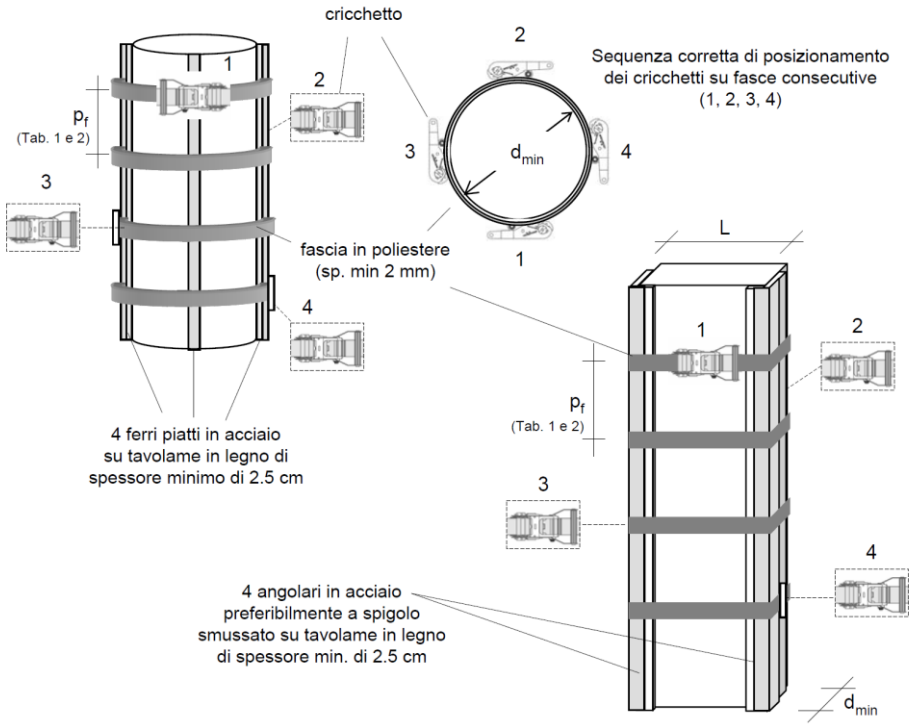
Infine, merita menzione la tecnica della cerchiatura in legno e cavi d'acciaio, spesso utilizzata per l'intervento su intere strutture, e non solo su singoli elementi. Anche in questo caso, l'assemblaggio dei componenti avviene secondo uno schema progettuale definito, con l'obiettivo di creare una struttura continua disposta lungo i prospetti dell'edificio. La funzione principale è duplice: cautelativa, quando la costruzione, pur danneggiata, non ha ancora manifestato crolli, ma si ritiene che il rischio possa aumentare nel tempo; oppure contenitiva, nei casi in cui siano già presenti distacchi o dissesti significativi. La combinazione tra il comportamento flessibile del legno e la capacità di trazione dell'acciaio consente un'elevata adattabilità, soprattutto nei contesti vincolati, dove il rispetto delle caratteristiche formali e materiche dell'edificio impone soluzioni reversibili e poco invasive.

Allegato 7

Configurazioni tipo



Nomenclatura di riferimento



Procedura di rimozione

Si riportano le procedure di rimozione generali:

1) Verifiche preliminari:
   - idoneità dell'opera provvisionale;
   - funzionalità dell'opera provvisionale;
   - corretta installazione di ulteriori opere provvisionali a supporto o sostituzione;
   - consolidamenti ed opere di rinforzo della struttura.
2) Operazioni preliminari:
   - rimuovere eventuali materiali depositati o caduti;
   - bonificare le pareti della struttura da eventuali elementi instabili o pericolanti.
3) Verificare la presenza e la consistenza di idoneo impalcato su cui effettuare le operazioni di rimozione:
   - resistenza e capacità di carico idonee a supportare i carichi degli addetti e di eventuale attrezzatura e materiale rimosso;
   - presenza di parapetto a protezione dei lavori in quota;
   - presenza di sottoponte per impalcati con dislivelli >250 cm.;
   - presenza di idoneo sistema di accesso all'impalcato su cui vengono effettuate le lavorazioni;
   - solo in caso di non possibilità di attuazione (o attuazione parziale) di misure anticaduta collettive utilizzare i dispositivi di protezione anticaduta personali.
4) Rimozione degli elementi:
   - allentare gradualmente le funi ad iniziare dalla superiore;
   - sorreggere i ritti al fine di evitare la caduta durante l'allentamento delle funi;
   - rimuovere la fune;
   - rimuovere i ritti ed i vincoli;
   - rimuovere i tiranti se presenti;
   - se previsto dal progetto esecutivo rimuovere parzialmente l'opera di puntellamento per effettuare opere di consolidamento o rinforzo strutturale;
   - controllare eventuali cedimenti di parti non coese con la struttura;
   - gli elementi rimossi sulla struttura di puntellamento devono essere immediatamente conferiti nel luogo di deposito designato.
5) Supervisione e controllo durante le operazioni:
   - garantire la corretta attuazione delle procedure operative previste dal PSC e dal POS mediante la costante supervisione effettuata da parte del preposto;
   - controllare eventuali movimenti o cedimenti della struttura se non precedentemente consolidata;
   - garantire l'eventuale attuazione delle procedure di evacuazione previste in caso di crollo o cedimenti strutturali.

I rischi individuati per la suddetta rimozione sono i seguenti:

- caduta di materiale dall'alto;
- tagli, abrasioni, perforazioni;
- cadute dall'alto;
- schiacciamento;

Allegato 8

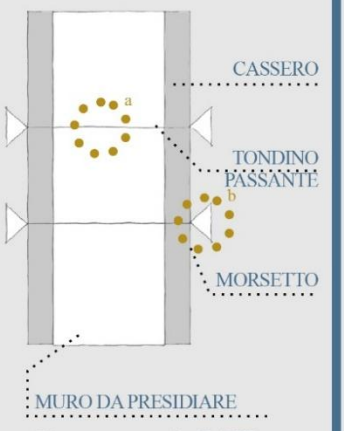
Scheda di rimozione 08_ Incamiciatura

Descrizione

Tra le tecniche provvisionali impiegate in fase emergenziale per la messa in sicurezza di strutture murarie danneggiate, l'incamiciatura della parete rappresenta una soluzione specifica pensata per contrastare fenomeni di spanciamento trasversale o perdita di stabilità locale. L'intervento ha lo scopo principale di incrementare, in modo temporaneo ma efficace, la resistenza a compressione della muratura attraverso un'azione contenitiva laterale esercitata da un sistema di barre passanti e elementi di bloccaggio. La necessità di tale presidio si manifesta in particolare laddove le pareti, sottoposte a sollecitazioni statiche o sismiche, mostrano rigonfiamenti o disgregazione della tessitura muraria, in assenza di un efficace comportamento scatolare dell'edificio. L'incamiciatura prevede la perforazione trasversale della parete mediante l'inserimento di barre d'acciaio ad aderenza migliorata, disposte secondo uno schema reticolare, che attraversano interamente lo spessore murario. Le estremità delle barre vengono bloccate mediante piastre metalliche, fissate esternamente alla parete e contrapposte tra loro, in modo da generare una tensione che esercita un effetto di compressione confinante sul paramento murario. Il serraggio delle barre avviene per mezzo di morsetti a cuneo o tenditori metallici, attraverso una procedura che garantisce la messa in tiro controllata dell'insieme. Va evidenziato che l'incamiciatura non è un intervento universalmente applicabile: è espressamente sconsigliata nei casi in cui la muratura presenti gravi disgregazioni, instabilità generalizzata o dissesti verticali diffusi, per i quali le vibrazioni indotte dalla perforazione potrebbero innescare crolli. Inoltre, è vietato l'utilizzo di questa tecnica su edifici sottoposti a vincolo storico o monumentale, se non previa autorizzazione della competente autorità per la tutela del patrimonio. Prima di effettuare l'intervento di incamiciatura è necessario realizzare un puntellamento di sostegno dei solai che scaricano sulla parete da cucire al fine di ridurne il carico sollecitante e di garantire migliori condizioni di sicurezza per gli operatori. Al termine delle operazioni di cucitura il puntellamento può essere rimosso per trasferire nuovamente il carico alla parete rinforzata. A chiusura delle operazioni è necessario piegare le barre verso la parete per ragioni di sicurezza. Queste ultime non vanno tagliate al fine di consentire una nuova messa in tiro dei tondini in acciaio.

Configurazioni tipo

Denominazione degli elementi



a Morsetto a cuneo tipo RAPID





b Morsetto a cuneo tipo RAPID

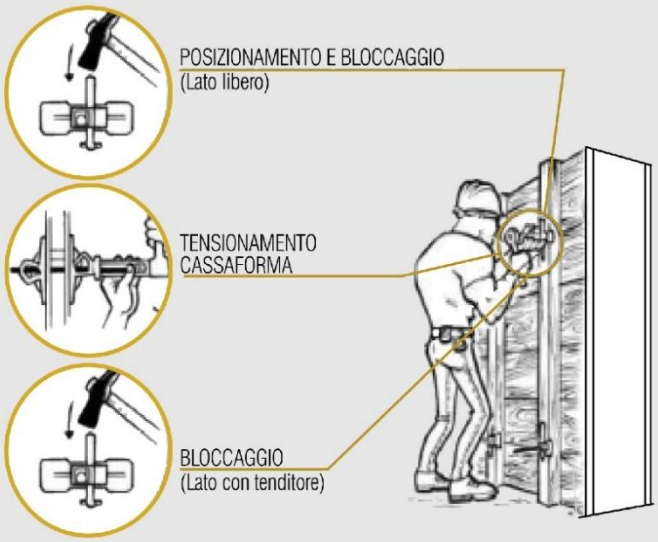
Tesatura e serraggio della casseratura con morsetti a cuneo tipo RAPID

a. Blocco dell'estremo del tondino sul lato non interessato dal tenditore (nr. 1 del disegno)

b. Messa in tiro del tondino con apposito tenditore (nr. 2 del disegno)

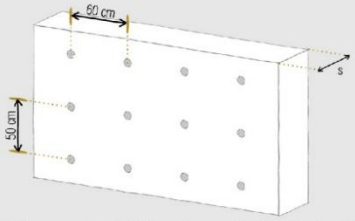
c. Blocco del tondino sul lato del tenditore (nr. 3 del disegno)

d. Estrazione del tenditore e posizionamento dello stesso su un nuovo tondino.

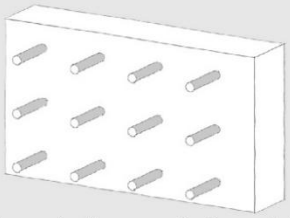


Fasi esecutive

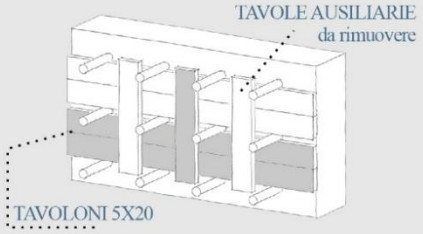
A Perforazione della parete con fori di diametro Øbarra + 2mm



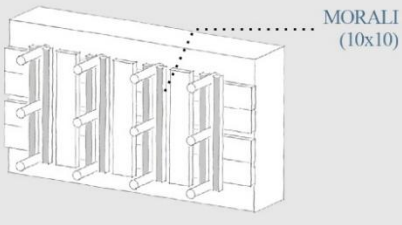
B Inserimento delle barre di acciaio di diametro Øbarra



C Posizionamento del doppio graticcio di ripartizione con tavoloni 5x20. Il graticcio può essere vincolato alle barre per sostegno provvisorio.



D Posizionamento di una coppia di morali 10x10 a lato di ciascuna fila di fori e su ciascuna faccia della parete.



E Infilaggio di piastra forata in acciaio di contrasto di spessore 4 mm da ambo i lati della parete (foro piastra = Øbarra + 2 mm).



F Tesatura delle barre passanti e serraggio dei morsetti a cuneo

spessore parete (s)	diametro minimo barre ad aderenza migliorata (Øbarra) (mm)
s ≤ 50 cm	Ø6
50≤s≤80 cm	Ø8

Procedura di rimozione

Si riportano le procedure di rimozione generali:

1) Verifiche preliminari:
   - idoneità dell'opera provvisionale;
   - funzionalità dell'opera provvisionale;
   - corretta installazione di ulteriori opere provvisionali a supporto o sostituzione;
   - consolidamenti ed opere di rinforzo della struttura.
2) Operazioni preliminari:
   - rimuovere eventuali materiali depositati o caduti;
   - bonificare le pareti della struttura da eventuali elementi instabili o pericolanti.
3) Verificare la presenza e la consistenza di idoneo impalcato su cui effettuare le operazioni di rimozione:
   - resistenza e capacità di carico idonee a supportare i carichi degli addetti e di eventuale attrezzatura e materiale rimosso;
   - presenza di parapetto a protezione dei lavori in quota;
   - presenza di sottoponte per impalcati con dislivelli >250 cm.;
   - presenza di idoneo sistema di accesso all'impalcato su cui vengono effettuate le lavorazioni;
   - solo in caso di non possibilità di attuazione (o attuazione parziale) di misure anticaduta collettive utilizzare i dispositivi di protezione anticaduta personali.
4) Rimozione degli elementi:
   - allentare gradualmente le funi ad iniziare dalla superiore;
   - sorreggere i ritti al fine di evitare la caduta durante l'allentamento delle funi;
   - rimuovere la fune;
   - rimuovere i ritti ed i vincoli;
   - rimuovere i tiranti se presenti;
   - se previsto dal progetto esecutivo rimuovere parzialmente l'opera di puntellamento per effettuare opere di consolidamento o rinforzo strutturale;
   - controllare eventuali cedimenti di parti non coese con la struttura;
   - gli elementi rimossi sulla struttura di puntellamento devono essere immediatamente conferiti nel luogo di deposito designato.
5) Supervisione e controllo durante le operazioni:
   - garantire la corretta attuazione delle procedure operative previste dal PSC e dal POS mediante la costante supervisione effettuata da parte del preposto;
   - controllare eventuali movimenti o cedimenti della struttura se non precedentemente consolidata;
   - garantire l'eventuale attuazione delle procedure di evacuazione previste in caso di crollo o cedimenti strutturali.

I rischi individuati per la suddetta rimozione sono i seguenti:

- caduta di materiale dall'alto;
- tagli, abrasioni, perforazioni;
- cadute dall'alto;
- schiacciamento;