



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Edile

**PROPOSTA DI COEFFICIENTI CORRETTIVI PER SISTEMI DI
RINFORZO CRM (COMPOSITE REINFORCED MORTAR) CON
FIBRE DI VETRO PER VARIE TIPOLOGIE DI MURATURA:
ANALISI STATISTICA E STRUTTURALE**

**PROPOSAL OF CORRECTIVE COEFFICIENTS FOR CRM
(COMPOSITE REINFORCED MORTAR) REINFORCEMENT
SYSTEMS WITH GLASS FIBERS FOR DIFFERENT TYPES OF
MASONRY: STATISTICAL AND STRUCTURAL ANALYSIS**

Relatore:
Prof.ssa **STAZI FRANCESCA**

Tesi di laurea di:
MORGANTI GIANLUCA

Correlatori:
Prof. **SERPILLI MICHELE**
Dott. **NICOLETTI VANNI**

Anno Accademico: **2023/ 2024**

*“Sono pochi i traguardi che tenacia e perizia non possono raggiungere;
le grandi conquiste non si realizzano con la forza, ma con la perseveranza.”*

- Samuel Johnson

SOMMARIO

ABSTRACT	1
INTRODUZIONE	2
1. STATO DELL'ARTE.....	3
1.1. Gli edifici in muratura in Italia: un patrimonio da adeguare.....	3
1.2. Comportamento meccanico delle strutture storiche.....	5
1.3. Caratteristiche meccaniche secondo le NTC 2018.....	8
1.4. Interventi di conservazione degli edifici in muratura.....	12
1.5. Interventi innovativi: intonaco armato CRM	16
1.6. Studi sperimentali e numerici per intonaco CRM.....	19
1.6.1. Campagne sperimentali	20
1.6.2. Criteri di progettazione per rinforzi CRM.....	24
2. CASO DI STUDIO	26
2.1. Edificio di riferimento.....	26
2.2. Sistema di rinforzo	30
3. METODI	32
3.1. Analisi statistica.....	32
3.1.1. Regressione multipla con il software “R”	32
3.1.1.1. Fondamenti della regressione multipla.....	32
3.1.1.2. Regressione polinomiale.....	33
3.1.1.3. Valutazione del modello	34
3.1.2. Applicazione	35
3.1.2.1. Creazione del dataset.....	35
3.1.2.2. Modello di regressione	37
3.2. Modello numerico strutturale	39
3.2.1. Metodo SAM.....	39
3.2.2. Modellazione caso di studio	42
3.2.2.1. Materiali e criteri di rottura.....	47
3.2.2.2. Azioni agenti sulla struttura.....	51
3.3. Analisi strutturale.....	56
3.3.1. Analisi modale	56
3.3.2. Analisi statica non lineare (Pushover).....	56
3.3.3. Applicazione al caso di studio	58
4. RISULTATI.....	60
4.1. Analisi di regressione	60
4.1.1. Studio delle variabili	61

4.1.2. Valutazione del modello	63
4.1.3. Formula di regressione	65
4.1.4. Confronti con normativa	67
4.2. Analisi modale.....	69
4.3. Analisi statica non lineare (Pushover)	80
CONCLUSIONI.....	86
INDICE DELLE FIGURE.....	99
INDICE DELLE TABELLE	102
BIBLIOGRAFIA	103

ABSTRACT

Questa tesi esamina i sistemi di rinforzo CRM (Composite Reinforced Mortar) con fibre di vetro, focalizzandosi sull'efficacia di queste soluzioni nel migliorare la resistenza strutturale degli edifici in muratura, in particolare in contesti sismici.

Viene proposto un modello predittivo e sono forniti coefficienti migliorativi per la progettazione dei rinforzi CRM, sottolineando la necessità di regolamentazioni aggiornate che incentivino il loro utilizzo nelle normative edilizie.

Il rinforzo proposto dalla DIASEN è stato preso come caso di studio, applicato su un edificio di riferimento per valutare l'efficacia della soluzione.

La ricerca comprende un'analisi statistica dei risultati sperimentali, presenti in letteratura, mediante la quale è stato realizzato un modello di regressione utilizzando il software R. Inoltre, sono state condotte analisi strutturali con il software PRO_SAM, finalizzate a definire gli incrementi nella resistenza a taglio dei pannelli murari rinforzati.

I miglioramenti ottenuti, in termini di spostamento e taglio alla base, hanno dimostrato come l'intervento Sismactive Thermal System, e più in generale l'intonaco armato CRM con fibre di vetro, rappresenti un'opzione promettente per il rinforzo delle strutture in muratura, con benefici sia in termini strutturali che pratici.

INTRODUZIONE

Il patrimonio edilizio italiano è costituito da una vasta quantità di edifici in muratura, molti dei quali realizzati prima dell'introduzione delle moderne normative sismiche ed energetiche. Queste strutture, spesso collocate nei centri storici, non solo rappresentano una sfida dal punto di vista della conservazione, ma richiedono interventi di consolidamento per garantire la sicurezza sismica.

Tra le varie tecniche di rinforzo sviluppate negli ultimi anni, l'intonaco armato CRM si distingue per la sua capacità di migliorare le prestazioni strutturali senza influenzare eccessivamente il comportamento dinamico dell'edificio.

Nella tesi, vengono adottate analisi statistiche di dati sperimentali, attraverso regressioni, con l'obiettivo di proporre un modello predittivo capace di stimare i coefficienti migliorativi di resistenza a taglio per i rinforzi CRM.

Inoltre, vengono condotte analisi strutturali statiche non lineari, note come analisi pushover, sia su modelli rinforzati che non rinforzati. L'obiettivo di queste analisi è catturare in modo qualitativo e quantitativo i miglioramenti e le modifiche apportate alla struttura di riferimento dall'intervento di rinforzo con materiali compositi (CRM).

Per il caso di studio, il rinforzo CRM applicato alla struttura è quello proposto dalla DIASEN (Sismactive Thermal System), permettendo così di valutare in modo specifico l'efficacia di questo intervento.

La ricerca mira a colmare le lacune normative esistenti e a supportare una più ampia diffusione dell'intonaco CRM, favorendo così interventi di consolidamento strutturale che siano efficaci, sostenibili e rispettosi del patrimonio edilizio.

1. STATO DELL'ARTE

1.1. Gli edifici in muratura in Italia: un patrimonio da adeguare

Gli edifici in muratura rappresentano una significativa componente del patrimonio edilizio ed architettonico italiano, derivante da secoli di storia, tradizioni e tecnologie costruttive. Queste abitazioni, palazzi ed infrastrutture civili costituiscono una parte fondamentale del tessuto urbano, in particolare dei centri storici, la cui maggior parte è stata realizzata prima dell'introduzione delle normative antisismiche ed energetiche più moderne. Fanno parte di questa grande famiglia le costruzioni in pietra, tufo o muratura non armata assai diffuse su tutto il territorio nazionale.

“Secondo quanto rilevato dal 15° censimento della popolazione e delle abitazioni del 2011 il patrimonio edilizio nazionale può essere classificato secondo tre principali tipologie costruttive:

1. muratura portante
2. calcestruzzo armato
3. diversa da muratura portante e calcestruzzo armato.

La muratura portante costituisce la tipologia costruttiva più diffusa con una media del 57%, contro il 29% del calcestruzzo armato e il 13% composto da materiali diversi.” [1] **Figura 1**

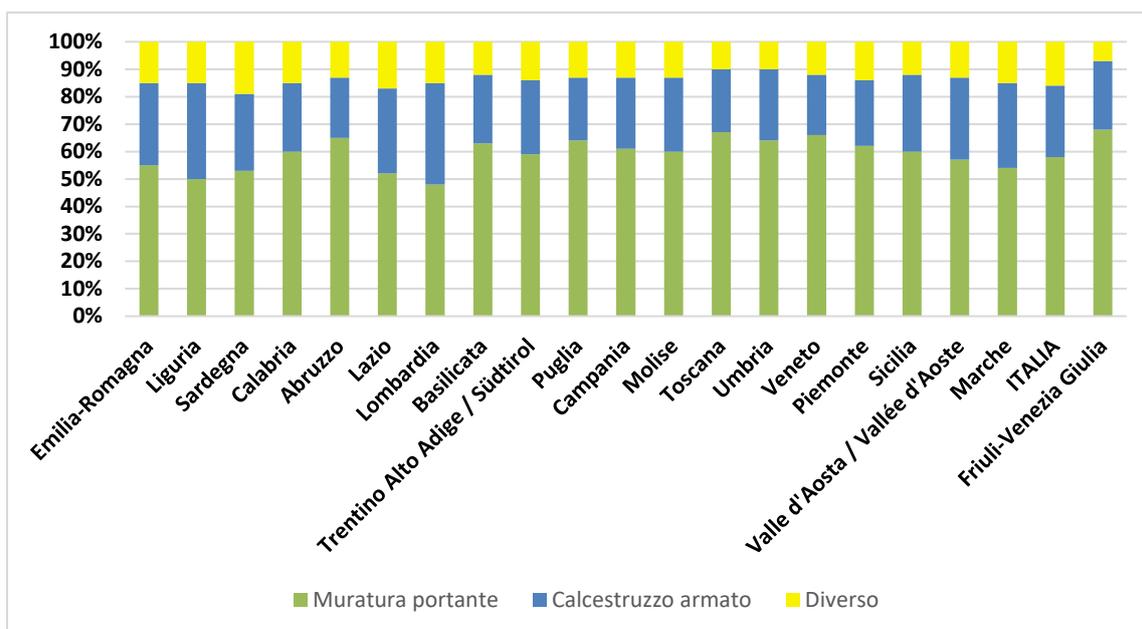


Figura 1- Percentuale di edifici per tipologia costruttiva a livello regionale

Nonostante il loro fascino e la loro importanza culturale, molte di queste costruzioni, tuttavia, rappresentano sfide molto impegnative legate alla vulnerabilità sismica e all'efficienza energetica. Negli ultimi decenni, la consapevolezza di questi problemi ha portato ad un crescente interesse per interventi di adeguamento e recupero, mirati a preservare il patrimonio edilizio, migliorando al contempo la sicurezza e l'efficienza energetica degli edifici esistenti.

La vulnerabilità sismica di tali edifici è un tema ampiamente discusso e che porta alla luce varie cause che contribuiscono ad aumentare tale criticità. Tra questi fattori si possono annoverare:

- 1. Tecniche costruttive tradizionali:** l'utilizzo di tecniche che non prevedono l'utilizzo di rinforzi atti a migliorare la resistenza ed il comportamento dissipativo del fabbricato.
- 2. Degrado dei materiali:** il degrado dei materiali nel corso degli anni porta inevitabilmente ad una riduzione delle caratteristiche meccaniche degli stessi, con conseguente diminuzione delle prestazioni della struttura a livello globale.
- 3. Mancanza di manutenzione:** l'assenza di interventi di natura ordinaria e straordinaria atti a ripristinare le caratteristiche dei materiali e dei pannelli murari.

La crescente frequenza e intensità dei fenomeni sismici in Italia, unita a questa vulnerabilità, evidenzia l'urgenza di interventi mirati per garantire la sicurezza degli edifici esistenti e la protezione delle vite umane.

Non da meno sono le vulnerabilità riguardanti il comparto energetico degli edifici. Negli ultimi anni la crescente consapevolezza dei problemi legati al cambiamento climatico e al risparmio energetico ha portato a nuovi obiettivi anche nel campo edilizio, focalizzandosi con maggior enfasi sulla necessità di interventi di riqualificazione energetica degli edifici.

1.2. Comportamento meccanico delle strutture storiche

La valutazione della vulnerabilità sismica e la conservazione del costruito storico passano attraverso lo studio del comportamento meccanico. In caso di eventi sismici il comportamento strutturale di tali edifici, realizzati con tecniche costruttive tradizionali e materiali locali, viene fortemente influenzato dalle loro caratteristiche specifiche. Per questo motivo l'analisi storico-critica rappresenta un elemento fondamentale per comprenderne i meccanismi di danno.

Le vulnerabilità del costruito storico possono essere suddivise in tre principali categorie:

a) Meccanismi di collasso del primo e secondo modo: sono meccanismi che riguardano murature di buona qualità, nelle quali il rispetto delle cosiddette "regole dell'arte" garantisce un efficiente comportamento monolitico. In particolare:

- **Meccanismi di primo modo:** sono una risposta a sollecitazioni ortogonali al pannello murario, portando al collasso per ribaltamento o flessione fuori dal piano. Sono favoriti da un collegamento scadente tra pareti ortogonali.
- **Meccanismi di secondo modo:** relativi a risposte nel piano della muratura. Il collasso può avvenire per scorrimento o taglio all'interno del pannello, con la formazione di fessure diagonali.

b) Disgregazione: fenomeno tipicamente associato a murature di scarsa qualità, con uno scarso legame tra i blocchi. La scarsa coesione porta alla formazione di un quadro fessurativo diffuso, con conseguenti distacchi parziali o totali dei paramenti. Questo comportamento è particolarmente critico in presenza di azioni sismiche, che possono accelerare il processo di disgregazione e portare al collasso parziale della struttura.

La "regola dell'arte" nella costruzione di edifici in muratura rappresenta un insieme di prescrizioni costruttive, tramandate nel tempo, che mirano a garantire un'adeguata qualità e stabilità delle strutture murarie [2]. Tali linee guida prevedono:

- 1- **Tessitura dei blocchi:** una tessitura adeguata dei blocchi assicura la distribuzione uniforme delle forze, aumentando la stabilità e la resistenza del pannello
- 2- **Combinazione di diatoni e ortostati:** gli ortostati sono elementi longitudinali aventi la principale funzione di contrastare l'azione sismica complanare; tuttavia, non riescono ad offrire un comportamento adeguato in direzione ortogonale. I diatoni sono invece elementi murari, tipicamente pietre o mattoni, che attraversano completamente la parete e contribuiscono a collegare le diverse sezioni del muro, migliorando la coesione e la resistenza complessiva della struttura
- 3- **Filari orizzontali:** l'uso di filari orizzontali è essenziale per garantire una corretta distribuzione dei carichi, consentendo inoltre di localizzare su di essi la formazione delle cerniere cilindriche e quindi attivare un unico meccanismo di danno per l'intero pannello
- 4- **Giunti verticali sfalsati:** i giunti verticali sfalsati sono una pratica che prevede che i giunti tra i blocchi non si allineino perfettamente da una fila all'altra. Questa disposizione riduce il rischio di cedimenti aiutando a distribuire le forze in modo più uniforme lungo la parete
- 5- **Pietre squadrate:** l'utilizzo di queste pietre è fondamentale per facilitare una buona posa e garantire l'integrità della muratura, evitando la formazione di irregolarità e punti di debolezza nella struttura
- 6- **Malta di buone caratteristiche:** la malta utilizzata deve presentare caratteristiche meccaniche e chimiche tali da favorire l'adesione tra i blocchi. Una malta di alta qualità, compatibile con i materiali dei blocchi, favorisce la stabilità strutturale nel tempo
- 7- **Resistenza propria dei blocchi:** i blocchi utilizzati nella costruzione devono avere caratteristiche meccaniche adeguate.

La ripartizione delle azioni sismiche orizzontali tra gli elementi resistenti verticali dipende, generalmente, dalla loro distribuzione nella struttura, dalla connessione reciproca con i solai e dalla rigidezza nel piano dei solai stessi. È stato ampiamente dimostrato che, garantendo una regolarità strutturale, connessioni efficaci tra pareti ortogonali e tra pareti e solai sufficientemente rigidi (realizzando il cosiddetto “comportamento scatolare” (**Figura 2**), la distribuzione dell'azione sismica tra gli elementi resistenti dipende dalla loro rigidezza. È quindi possibile sfruttare la resistenza nel piano delle pareti in muratura orientate nella direzione del sisma (**Figura 3**), limitando le azioni fuori piano sulle altre pareti (**Figura 4**). Diversamente, in caso di integrità strutturale inadeguata, le pareti tendono a comportarsi in modo indipendente, sia nel piano che fuori piano, causando crolli parziali dovuti all'attivazione di diversi meccanismi locali legati al movimento rigido di parti o intere pareti in muratura. [3]

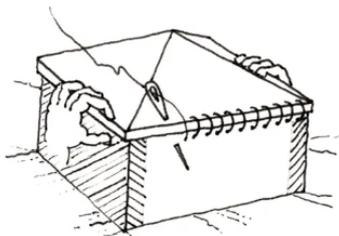


Figura 2- Comportamento scatolare

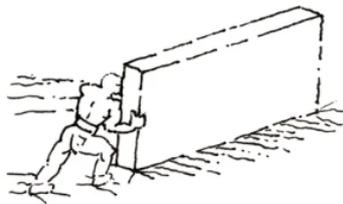


Figura 3- Resistenza nel piano

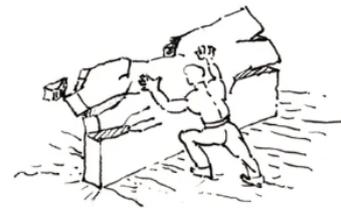


Figura 4- Resistenza fuori dal piano

1.3. Caratteristiche meccaniche secondo le NTC

Le caratteristiche meccaniche degli edifici in muratura esistenti sono trattate in maniera approfondita nel capitolo 8.5.3 delle NTC [4], concentrandosi sulle proprietà di resistenza e deformabilità.

“La tabella C8.5.I (**Figura 5**) riporta, per il comportamento delle tipologie murarie più ricorrenti, indicazioni, non vincolanti, sui possibili valori dei parametri meccanici, identificati attraverso il rilievo degli aspetti costruttivi (§C8.5.2.1) e relativi, con l’eccezione dell’ultima riga, a precise condizioni: malta di calce di modeste caratteristiche (resistenza media a compressione fm stimabile tra 0,7 e 1,5 N/mm²), assenza di ricorsi (listature), paramenti semplicemente accostati o mal collegati, tessitura (nel caso di elementi regolari) a regola d’arte, muratura non consolidata.

Ai soli fini della verifica sismica, nel caso in cui la malta abbia caratteristiche particolarmente scadenti (resistenza media a compressione fm stimabile inferiore a 0,7 N/mm²) ai valori della tabella si applica un coefficiente riduttivo pari a 0,7 per le resistenze e 0,8 per i moduli elastici. I parametri indicati in tabella sono principalmente finalizzati alle verifiche nei riguardi delle azioni sismiche.” [4]

I valori presenti nella tabella fanno riferimento ad una muratura costruita da due paramenti accostati con eventuale sacco interno. In questi casi si rende necessario valutare preventivamente se la muratura considerata abbia caratteristiche tali da garantire che il pannello murario possa comportarsi unitariamente nei riguardi delle sollecitazioni, sia verticali, sia a taglio;

I muri realizzati con due paramenti semplicemente accostati o con riempimenti “a sacco” di scarse proprietà meccaniche presentano un elevato rischio di instabilità, che può essere ulteriormente accentuato dalla presenza di orizzontamenti appoggiati solo su uno dei due paramenti, e dall’assenza di adeguati ancoraggi tra solai e muri esterni. Se i rischi di distacco tra i paramenti possono essere trascurati, allora si potrà considerare il muro come composto da due pareti tra loro semplicemente accostate, ciascuna di spessore pari alla propria sezione efficace.

Nel caso in cui il nucleo interno sia ampio rispetto ai paramenti, e in particolare se scadente, è opportuno ridurre i parametri di resistenza e deformabilità propri dei paramenti esterni. [4].

Tabella C8.5.1 - Valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura, da usarsi nei criteri di resistenza di seguito specificati (comportamento a tempi brevi), e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura. I valori si riferiscono a: f = resistenza media a compressione, τ_0 = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), f_{v0} = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), E = valore medio del modulo di elasticità normale, G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale, w = peso specifico medio.

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

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

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

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

Figura 5- Tabella C8.5.1: Caratteristiche meccaniche di riferimento della muratura secondo le NTC (Circolare delle NTC 2018, 2019)

La normativa permette di modificare i valori presenti nella tabella vista sopra, nel caso in cui sia presa in considerazione una muratura con uno stato di fatto migliore rispetto a quello indicato, utilizzando i coefficienti migliorativi presenti nella tabella C8.5.2 (**Figura 6**).

I coefficienti migliorativi sono funzione dei seguenti fattori:

- **malta di buone caratteristiche**: il coefficiente indicato in Tabella C8.5.2, diversificato per le varie tipologie, si può applicare sia ai parametri di resistenza (f , τ_0 e f_{v0}), sia ai moduli elastici (E e G);
- **presenza di ricorsi (o listature)**: il coefficiente di tabella si può applicare ai soli parametri di resistenza (f e τ_0); Questo coefficiente ha significato solo per alcune tipologie murarie, in cui si riscontra tale tecnica costruttiva;

- **presenza sistematica di elementi di collegamento trasversale tra i paramenti:** il coefficiente indicato in tabella si può applicare ai soli parametri di resistenza (f , τ_0 e f_{v0}).
- **presenza di murature consolidate o progettazione di un intervento di rinforzo:** è possibile incrementare i valori applicando i coefficienti indicati in Tabella C8.5.2, relativi alle tecniche di consolidamento previste.

Tabella C8.5.II -Coefficienti correttivi massimi da applicarsi in presenza di: malta di caratteristiche buone; ricorsi o listature sistematiche connessioni trasversali; consolidamento con iniezioni di malta; consolidamento con intonaco armato; ristilatura armata con connessione dei paramenti.

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

(*) I coefficienti correttivi relativi alle iniezioni di miscele leganti devono essere commisurati all'effettivo beneficio apportato alla muratura, riscontrabile con verifiche sia nella fase di esecuzione (iniettabilità) sia a-posteriori (riscontri sperimentali attraverso prove soniche o similari).

(**) Valori da ridurre convenientemente nel caso di pareti di notevole spessore (p.es. > 70 cm).

(***) Nel caso di muratura di mattoni si intende come "malta buona" una malta con resistenza media a compressione f_m superiore a 2 N/mm². In tal caso il coefficiente correttivo può essere posto pari a $f_m^{0,2}$ (f_m in N/mm²).

(****) Nel caso di muratura di mattoni si intende come muratura trasversalmente connessa quella apparecchiata a regola d'arte.

Figura 6- Tabella C8.5.2: coefficienti migliorativi massimi applicabili (Circolare delle NTC 2018, 2019)

Ai fini di questo studio è evidenziare i coefficienti migliorativi previsti da normativa nel caso di intonaco armato:

“Consolidamento con intonaco armato”: l’effetto di questa tipologia di consolidamento può essere stimato attraverso opportune valutazioni che considerino gli spessori della parete e dell’intonaco armato, oltre che i relativi parametri meccanici. In assenza di queste è possibile adottare il coefficiente indicato in tabella, diversificato per le varie tipologie, applicabile ai valori sia dei parametri di resistenza (f , τ_0 e f_{v0}), sia dei moduli elastici (E e G).

In tal caso non si applicano i coefficienti relativi alla connessione trasversale della muratura non consolidata e alla ristilatura armata. Si rileva che il consolidamento con intonaco armato non ha alcuna efficacia in assenza di sistematiche connessioni trasversali e la sua efficacia è ridotta quando realizzato su un solo paramento. Nell'adozione degli eventuali coefficienti migliorativi si deve tenere conto delle caratteristiche delle malte utilizzate (cementizie o a calce) e delle armature (metalliche o in fibra). Infine, si segnala la necessità di una preventiva verifica che il paramento non evidenzii un'eccessiva disgregazione o presenza di vuoti, tale da rendere inefficace l'accoppiamento con l'intonaco armato; in questi casi è opportuno accoppiare l'intervento con iniezioni." [4]

1.4. Interventi di conservazione degli edifici in muratura

Come citato nel precedente paragrafo, il ripristino della qualità e delle caratteristiche di resistenza della muratura è un requisito essenziale per la salvaguardia del patrimonio storico.

Le resistenze a trazione e flessione molto basse della muratura esistente, insieme al suo comportamento fragile, sono responsabili dell'elevata vulnerabilità sismica di questi edifici, come dimostrato anche dai recenti terremoti in Slovenia orientale (1998-2004), Grecia meridionale (2006-2008), Italia centrale (2009) e Italia settentrionale (2012). Pertanto, sono necessari interventi di rinforzo per aumentare la resistenza sia nel piano che fuori piano delle pareti in muratura. [5]

Tali interventi devono essere realizzati seguendo un processo che richiede una profonda conoscenza delle tecniche, dei materiali e della storia dell'edificio. Per questo motivo, è fondamentale che il progettista segua delle linee guida comunemente denominate "paradigmi del restauro architettonico", basate su un approccio volto a preservare l'integrità storica e culturale della struttura. Questi principi sono:

- **Tendenza al minimo intervento:** ha come obiettivo la sola esecuzione degli interventi strettamente necessari, al fine di preservare l'integrità storica dell'edificio.
- **Ricerca della compatibilità**
 - **Meccanico-strutturale:** l'intervento non deve mutare la concezione strutturale, ma cercare di integrarla.
 - **Chimico-fisica:** mira ad evitare l'insorgere di interazioni negative tra materiali di apporto e materiali già presenti. (es. dilatazioni termiche).
 - **Costruttiva:** applicare metodi di costruzione che rispettino le pratiche tradizionali.
- **Reversibilità:** possibilità futura di rimuovere l'intervento senza riportare danni eccessivi all'opera

- **Rispetto dell'autenticità:** serve a garantire che l'edificio continui a tramandare la sua storia, cercando di rispettare le scelte progettuali e le originali tecniche costruttive.
- **Conservazione della materia:** serve a preservare quanto più possibile i materiali originali.
- **Controllo dell'impatto visivo:** gli interventi devono essere progettati in modo da non alterare significativamente l'aspetto visivo dell'edificio.
- **Riconoscibilità dell'intervento:** le modifiche apportate devono essere chiaramente distinguibili dall'originale.

Sebbene non sia l'oggetto principale di questo studio, è comunque utile discutere brevemente sulle tipologie di interventi sviluppate nel corso degli anni. Si possono distinguere diverse categorie, ciascuna delle quali mira a conseguire obiettivi specifici [2]:

- Interventi volti ad incrementare la qualità muraria:** sono interventi mirati al risanamento e al ripristino delle proprietà meccaniche delle murature danneggiate. (es. intonaco armato, inserimento di diatoni, iniezioni di miscele leganti, ristilatura dei giunti, interventi con FRP (fiber reinforced polymer), interventi con tirantini antiespulsivi)
- Interventi volti a ridurre le carenze dei collegamenti e le spinte statiche:** hanno come obiettivo la realizzazione di un buon comportamento scatolare, migliorando l'ammorsamento tra pareti ortogonali e tra pareti e solai, nonché l'eliminazione delle azioni derivanti da tetti spingenti. (es. catene metalliche, cordolo-tirante in acciaio, cordoli in sommità, cordolo di piano, cerchiature esterne, scuci-cuci, perforazioni armate)

c) Interventi volti a ridurre l'eccessiva deformabilità dei solai e al loro consolidamento: la rigidezza a lastra dei solai (nel proprio piano) è di fondamentale importanza in fase sismica, solai rigidi tendono ad evitare l'insorgere di comportamenti indipendenti delle pareti. Per tale motivo è utile migliorare il comportamento a lastra dei solai. (es. irrigidimento dei solai con soletta in cemento armato o piolatura alla struttura portante, controventamento realizzato con tiranti metallici) (**Figure 7,8,9**)

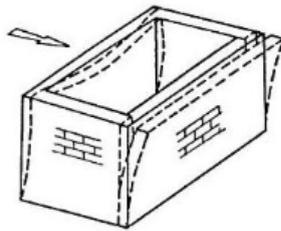


Figura 7- con solaio deformabile e senza cordolo

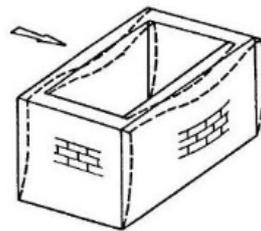


Figura 8- con solaio deformabile e cordolo

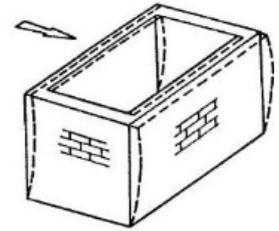


Figura 9- con solaio rigido e cordolo

d) Interventi su strutture particolari (archi, volte, pilastri...): incatenamenti metallici, calotte in calcestruzzo, placcaggio con fasce FRP.

Intonaco armato tradizionale

Ai fini della seguente ricerca è importante soffermarsi su questo tipo di intervento. L'intonaco armato è una tecnica di consolidamento largamente utilizzata negli edifici in muratura con lo scopo di rendere monolitica la struttura, migliorandone di conseguenza le proprietà meccaniche in termini di resistenza e rigidezza.

L'applicazione dell'intonaco armato consiste nel placcaggio della muratura attraverso l'utilizzo di reti elettrosaldate, collegate con connessioni trasversali, e risulta essere efficace solo se applicato su entrambe le facce del pannello murario.[2]

Le fasi di esecuzione del rinforzo possono essere viste nel dettaglio (**Figura 10**) [2]:

- 1- Rimozione del vecchio intonaco, lavaggio e saturazione con acqua della muratura
- 2- Riempimento con malta cementizia di eventuali vuoti o fessure

- 3- Esecuzione delle perforazioni ($2/4$ a m^2) in modo uniforme, equidistanti fra loro e a file sfalsate
- 4- Inserimento dei connettori passanti (barre di acciaio ad aderenza migliorata \varnothing 4-8 mm, circa $2/4$ collegamenti per m^2).
- 5- Posa in opera di opportuni risvolti di almeno 1m sugli incroci murari o in corrispondenza di porte e finestre, e della rete distanziata dalla parete di almeno 2 cm.
- 6- Ripiegatura delle barre a 90° .
- 7- Getto della miscela legante, previa bagnatura a saturazione della muratura.

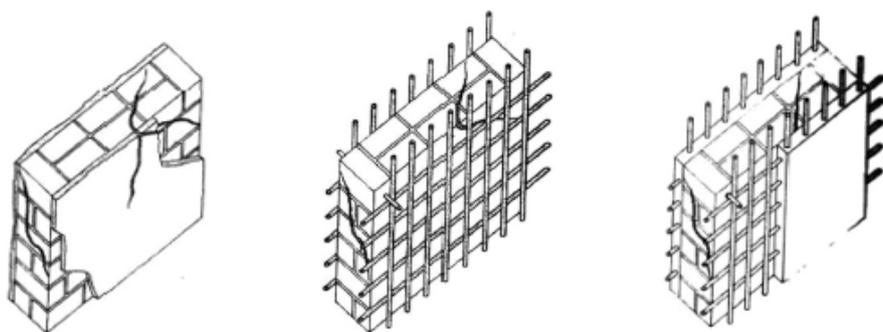


Figura 10- Fasi di posa dell'intonaco armato

Come è facilmente intuibile, questo tipo di intervento presenta numerose limitazioni e criticità. Si può osservare come l'intonaco armato tradizionale si ponga in netto contrasto con i principi del “buon intervento”, risultando invasivo e non coerente con i “paradigmi del restauro architettonico” sopra citati. Inoltre, dal punto di vista sismico, vi è una profonda variazione del comportamento originario della costruzione a causa dell'elevato incremento di massa e rigidità dei muri rinforzati.

Interventi di questo tipo, a base di cemento e acciaio, ampiamente utilizzati nei lavori di ricostruzione seguiti ai terremoti degli anni '80, hanno mostrato forti problemi di durabilità. L'uso di reti metalliche immerse in strati di malta cementizia ha inevitabilmente portato a fenomeni di corrosione, con conseguente perdita di capacità e variazione di volume. [6]

1.5. Interventi innovativi: intonaco armato CRM

A causa delle problematiche appena illustrate, riguardanti gli interventi di intonaco armato tradizionale, la ricerca attuale si sta orientando verso soluzioni innovative, senza elementi metallici, capaci di alte prestazioni ed impatti ridotti, come ad esempio il calcestruzzo proiettato (shotcrete), polimeri fibro-rinforzati (FRP), malte cementizie fibro-rinforzate (FRCM), denominate anche malte rinforzate con materiali compositi (CRM) quando lo spessore è maggiore di 30mm, ed infine malte fibro-rinforzate (FRM). [7]

A causa della ridotta capacità di trazione dei pannelli murari, le strutture in muratura sottoposte a eventi sismici sono particolarmente vulnerabili a cedimenti per taglio nel piano. L'applicazione di reti in FRP incorporate in un rivestimento di malta su entrambe le facce della parete consente di migliorare la resistenza a taglio nel piano e alla flessione fuori piano, aumentando significativamente anche la capacità di deformazione plastica. [8]

L'FRP è un materiale composito costituito da una matrice polimerica organica (di solito resine termoindurenti come epossidica, vinilestere o poliestere) a cui vengono aggiunte fibre di rinforzo inorganiche (principalmente vetro, carbonio e basalto) o sintetiche. Recentemente, anche le fibre naturali (come lino, canapa, juta) hanno suscitato l'interesse di numerosi ricercatori nonostante le loro proprietà meccaniche siano significativamente inferiori rispetto ad altre fibre, a causa delle crescenti preoccupazioni riguardanti l'impatto ambientale dei materiali da costruzione.[3]

Tipicamente, le fibre di rinforzo si caratterizzano per un'elevata rigidità e resistenza a trazione rappresentando la parte portante del composito in termini di carichi tensili. La matrice polimerica protegge le fibre e trasferisce gli sforzi tra le fibre e la struttura circostante. Pertanto, le prestazioni dei compositi FRP dipendono da diversi fattori, come le caratteristiche delle fibre (composizione, orientamento, lunghezza, forma...), le proprietà chimiche e meccaniche della matrice, la disposizione delle fibre nella matrice e l'interazione tra fibre e matrice. Di conseguenza, il comportamento a trazione del composito FRP si colloca generalmente tra quello delle fibre e quello della matrice. [3]

Alcuni tra i vantaggi che si ottengono attraverso un intonaco di tipo CRM sono i seguenti:

- **Minore invasività:** il rinforzo può essere applicato soltanto nella parte esterna, evitando l'interruzione d'uso della struttura durante l'intervento

- **Spessore ridotto:** a differenza dell'intonaco armato classico sono solitamente sufficienti solo 3-5 cm
- **Minore rigidità:** lo spessore limitato garantisce al contempo un minore incremento di rigidità, senza modificarne completamente la distribuzione originale
- **Nessuna corrosione:** data dall'assenza di elementi in acciaio

Nonostante i grandi vantaggi degli FRP, la loro applicazione non è priva di problemi. Alcuni svantaggi sono legati alle resine epossidiche utilizzate per impregnare le fibre di rinforzo, queste infatti, sono caratterizzate da uno scarso comportamento a temperature superiori alla temperatura di transizione vetrosa, costi elevati, difficoltà di rimozione o irreversibilità dell'intervento di rinforzo. Inoltre, le resine epossidiche impediscono la permeabilità al vapore acqueo e hanno una resistenza al fuoco molto bassa. In molti casi, le autorità competenti non consentono l'uso estensivo delle resine epossidiche su edifici storici vincolati.

Una soluzione a questo problema è la sostituzione delle resine epossidiche con malte inorganiche a base di calce o cemento per inglobare le barre in FRP. Questo permette di ottenere un'elevata compatibilità delle matrici con la muratura storica, soprattutto quelle a base di calce, essendo molto simili alle malte storiche sia nella composizione che nelle proprietà meccaniche. [6]

La procedura di applicazione dell'intervento di rinforzo è caratterizzata dalle seguenti fasi (**Figura 11**) [3]:

- 1- Rimozione dell'intonaco esistente** e della malta nei giunti, per una profondità di 10-20 mm su entrambe le facce del muro
- 2- Foratura** per creare passaggi attraverso la muratura in cui inserire i connettori (con un diametro di circa 25 mm)
- 3- Applicazione della rete in GFRP** (rete in fibra di vetro rinforzata con polimeri) (**Figura 12**)

- 4- **Posizionamento di dispositivi aggiuntivi** in GFRP in corrispondenza dei fori, per migliorare l'ancoraggio dei connettori nello strato di malta

- 5- **Inserimento di coppie di connettori a forma di L in GFRP**, sovrapposti all'interno dei fori per un minimo di 120 mm, e iniezione di malta cementizia nei fori per fissare i connettori alla muratura (**Figura 13**)

- 6- **Applicazione del nuovo rivestimento di malta** (spessore minimo di 30 mm), assicurandosi che la rete in GFRP sia posizionata al centro dello spessore della malta

In conclusione, l'evoluzione delle tecniche di rinforzo per le strutture murarie ha portato allo sviluppo di soluzioni più efficaci e sostenibili rispetto ai metodi tradizionali. Materiali come FRP, FRCM e CRM offrono vantaggi significativi in termini di resistenza meccanica, flessibilità e compatibilità con edifici storici, riducendo al contempo gli impatti ambientali.

Questi interventi sono continuamente oggetto di studi e campagne sperimentali, in laboratorio ed in situ, con l'obiettivo di valutarne le prestazioni in termini di resistenza meccanica, durabilità e compatibilità con i materiali esistenti. In questo modo è possibile comprendere al meglio i limiti ed i vantaggi di queste nuove tecnologie.

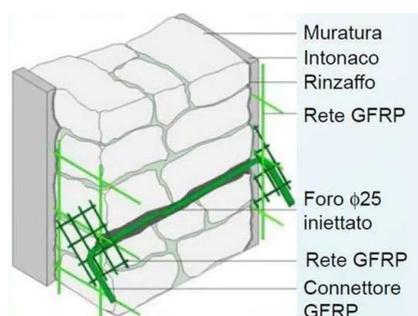


Figura 11- schematizzazione della tecnica di rinforzo in GFRP

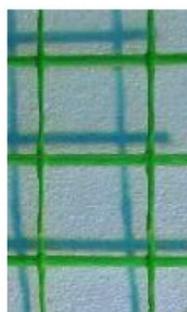


Figura 12- dettaglio rete in GFRP



Figura 13- dettaglio connettori ad L in GFRP

1.6. Studi sperimentali e numerici per intonaco CRM

Come evidenziato nei capitoli precedenti l'intonaco armato di tipo CRM è già riconosciuto come una fra le tecniche più promettenti per il rinforzo di edifici in muratura. Nonostante ciò, la ricerca continua a spingersi oltre, puntando ad ottenere un intervento capace di migliorare non solo le prestazioni strutturali ma anche quelle termiche ed economiche, rendendo questa soluzione sempre più efficiente e versatile.

Una lacuna che deve necessariamente essere colmata riguarda il punto di vista normativo. Come visto nel capitolo 1.3, si può infatti notare come le normative tecniche attuali prevedano coefficienti migliorativi solo per l'intonaco armato tradizionale, ma non contemplano l'intonaco CRM, risultando dunque insufficienti nel valorizzare correttamente le potenzialità di questa tecnologia. Questo rappresenta un problema che non può essere trascurato poiché, la mancanza di un coefficiente migliorativo dedicato a tale intervento, rende difficile la possibilità di quantificare in maniera adeguata i benefici strutturali ottenuti.

L'efficacia di questa tecnica è influenzata da una serie di fattori, come ad esempio:

- **Tipo di fibre:** vetro, basalto, carbonio o anche naturali
- **Tipo di matrice:** a base di calce, cementizie ecc.
- **Proprietà meccaniche degli elementi**
- **Interazione fibra-matrice**

Ne conviene che determinare un coefficiente migliorativo per il CRM (principalmente usato per definire la resistenza a taglio τ_0 della muratura rinforzata) sarebbe estremamente utile per standardizzare ed incentivare il suo utilizzo su vasta scala, fornendo inoltre migliori strumenti di progettazione. Tale coefficiente dovrebbe essere ottenuto considerando una serie di parametri specifici, come il tipo di fibra, la malta utilizzata, le caratteristiche meccaniche e via dicendo, attraverso delle campagne sperimentali o in maniera analitica.

Tale lacuna normativa costituisce la motivazione centrale che ha portato alla nascita della seguente tesi, che si propone quindi di colmare questo vuoto, attraverso un'analisi approfondita dei vari parametri coinvolti e l'elaborazione di una proposta metodologica che possa supportare una futura revisione delle normative, focalizzandosi principalmente su rinforzi CRM con fibre di vetro GFRP (Glass Fiber Reinforce Polymer).

1.6.1. **Campagne sperimentali**

Nel corso degli anni, numerose sono state le campagne sperimentali finalizzate a determinare l'effettivo incremento della resistenza a taglio dei pannelli murari rinforzati con intonaco armato CRM.

Tali test hanno un duplice scopo, da un lato, determinare l'efficacia del rinforzo fornito dal CRM, e dall'altro, stabilire un confronto diretto con le prestazioni delle murature tradizionali. L'approccio maggiormente utilizzato è stato la prova di compressione diagonale, in laboratorio o in situ.

La prova si svolge disponendo due angoli d'acciaio saldati (dispositivi in acciaio 1 e 2) agli angoli opposti del campione, mentre un terzo dispositivo, posizionato nell'angolo superiore viene collegato al dispositivo inferiore attraverso due coppie di barre di acciaio (**Figura 14**).

Un martinetto, interposto tra i dispositivi superiori e attivato tramite una pompa manuale, fornisce la forza diagonale necessaria per la prova, misurata con un trasduttore di pressione. Su entrambe le facce del provino, una coppia di trasduttori potenziometrici (T1 e T3, T2 e T4) monitora le deformazioni diagonali. Tutti i trasduttori sono collegati a un'unità di acquisizione elettronica interfacciata con un computer, che permette di controllare il progresso del test.

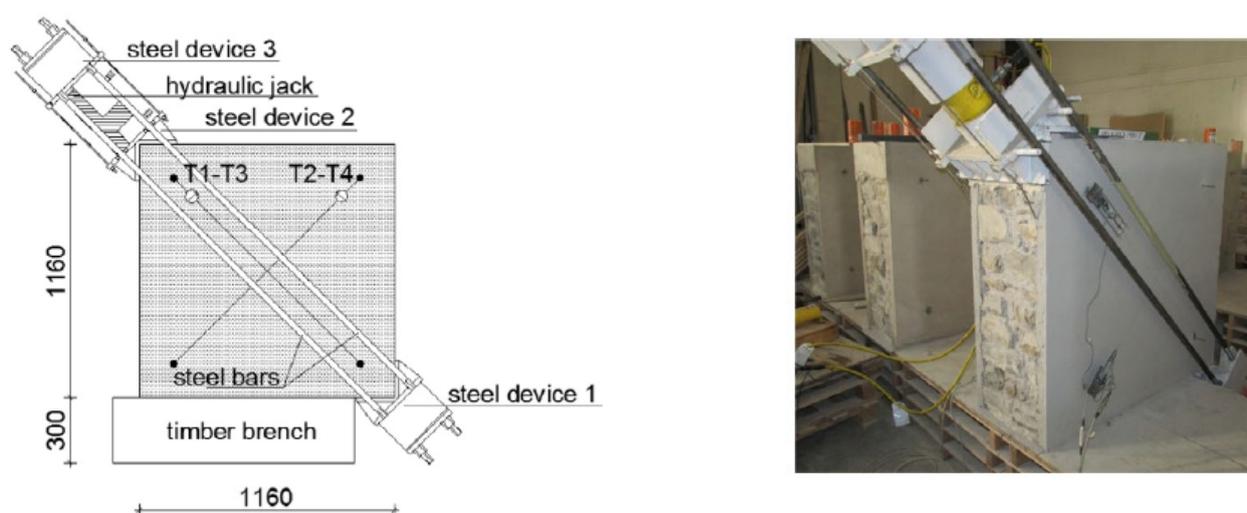


Figura 14- *Apparato sperimentale per il test di compressione diagonale montato su un provino*

Viene eseguita una serie di cicli di carico e scarico con passi di 25-30 kN fino a raggiungere il carico massimo. Il computer registra continuamente i dati relativi al carico applicato e alle deformazioni diagonali durante la prova, inoltre, queste informazioni vengono visualizzate graficamente in tempo reale offrendo una rappresentazione visiva dell'andamento del test.

[8]

La prova è eseguita in conformità agli standard ASTM¹ e RILEM², ed il peso del pannello in muratura è considerato trascurabile rispetto ai carichi applicati. L'interpretazione RILEM del test si basa su un modello del pannello murario considerato come un materiale isotropico ed omogeneo. Secondo la formulazione di Turnsek and Cacovic, la resistenza a taglio può essere determinata come:

$$\tau = \frac{f_t}{1.5}$$

In cui f_t rappresenta la resistenza a trazione della muratura. [6]

Ai fini della tesi sono stati considerati diversi articoli relativi a numerose campagne sperimentali, basate su questa metodologia di prova. Tutti questi studi fanno riferimento a provini in muratura di varia dimensione, rinforzati con intonaco CRM e fibre di vetro di diverse caratteristiche.

Nella campagna condotta da Gattesco e Boem [3], test di compressione diagonale sono stati effettuati su provini quadrati di dimensioni 1160x1160 mm² e spessore variabile in funzione del tipo di muratura (mattoni pieni, murature a sacco, pietra a conci sbozzati e pietra irregolare) e di rinforzo (diversi tipi di malta, spessori della muratura e dimensioni delle reti). I test hanno registrato, in media, un aumento della resistenza a taglio τ_r/τ_0 ³ pari a:

- Mattoni pieni: 1,70
- Muratura a sacco: 1,48
- Pietra a conci sbozzati: 1,86
- Pietra irregolare: 3,40

¹ American Society for Testing and Materials

² International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures

³ Rapporto tra la resistenza a taglio dell'elemento rinforzato e non rinforzato

In [6] sono mostrati i risultati di test effettuati in laboratorio su pannelli murari in mattoni pieni, rinforzati con l'uso di maglie in GFRP inglobate in un intonaco termo-isolante. Questo è stato realizzato con diverse malte a base di calce a bassa resistenza. In questo caso l'incremento della resistenza a taglio media registrata è di 1,23.

Altre campagne sperimentali, come [7], hanno invece indagato l'efficacia del rinforzo sia nella configurazione convenzionale, ovvero applicato su entrambe le facce del provino, sia nella configurazione ad una sola faccia, soluzione solitamente adottata quando sono possibili solamente interventi interni/esterni. Nell'articolo citato, è stata osservata la capacità a taglio di pannelli murari in pietra tenera (tufo), utilizzando sei provini non rinforzati come provini di controllo e ventisei provini rinforzati.

È stato possibile osservare un miglioramento medio della resistenza a taglio pari a:

- 1 faccia di applicazione: 1,55
- 2 facce di applicazione: 3,27

Ai fini della presente tesi, questi ed altri articoli sono stati catalogati nella tabella in Appendice A, in base ai seguenti parametri:

- **Autore (anno)**
- **Codice provino:** codice identificativo del provino relativo all'articolo di riferimento
- **Tipologia di muratura:** tipologia costruttiva dell'elemento
- **Dimensione provino [mm]**
- **Malta intonaco:** tipo di malta usata per il rinforzo
- **Resistenza a compressione malta intonaco $f_{c,c}$ [MPa]**
- **Resistenza a trazione malta intonaco $f_{t,c}$ [MPa]**
- **Dimensione maglia [mm]:** dimensione delle maglie della rete di rinforzo
- **Resistenza a trazione singola barra [kN]:** resistenza a trazione di una singola barra in GFRP
- **Resistenza a trazione maglia [kN/m]:** resistenza a trazione di una maglia in GFRP
- **Modulo elastico a trazione singola barra [GPa]**
- **Allungamento a rottura singola barra [%]**
- **Connettori:** tipologia di connettori utilizzati (a L in GFRP)

- **Densità muratura (NTC) [kN/m³]:** valore di densità della muratura ricavato dalla tabella C8.5.1 della normativa.
- **Presenza sacco:** indica la presenza di un nucleo interno al provino.
- **Facce applicazione:** indica il numero delle facce sulle quali è stato applicato il rinforzo (1 o 2).
- **Resistenza a trazione muratura $f_{t,m}$ [kN]:** valore di resistenza a trazione determinato come $\tau_0 * 1,5$.
- **τ_0 [N/mm²]:** resistenza a taglio dell'elemento, ottenuta dalla prova di compressione diagonale per provini non rinforzati. Per i provini rinforzati è stato usato il valore medio tra quelli ottenuti nei casi senza rinforzo.
- **τ_r [N/mm²]:** resistenza a taglio risultante dalla prova di compressione diagonale.
- **τ_r/τ_0 :** rapporto tra la resistenza a taglio dell'elemento rinforzato e quella prima del rinforzo. Indica il coefficiente migliorativo di resistenza apportato dal rinforzo.
- **G_0 [GPa]:** modulo a taglio dell'elemento non rinforzato.
- **G_r [GPa]:** modulo a taglio dell'elemento rinforzato.
- **G_r/G_0 [N/mm²]:** rapporto tra il modulo a taglio dell'elemento rinforzato e quello prima del rinforzo. Indica il coefficiente migliorativo del modulo a taglio apportato dal rinforzo.
- **Spessore provino [mm]:** spessore del pannello non rinforzato.
- **Spessore coating [mm]:** spessore totale del rinforzo.
- **Spessore totale [mm]:** spessore totale del pannello murario dopo l'applicazione dell'intervento.
- **S_{coat}/S_{wall} :** rapporto tra lo spessore del rinforzo e quello della muratura post-intervento.

Tale classificazione ha consentito di delineare un quadro complessivo del comportamento meccanico dei provini analizzati.

1.6.2. Criteri di progettazione per rinforzi CRM

In letteratura, uno degli studi che ha suscitato particolare interesse per la sua rilevanza e per l'affinità con l'obiettivo della presente ricerca è stato il lavoro intitolato "Design Criteria for Masonry Reinforcement with Composite Reinforced Mortars (CRM)" [9].

Obiettivo di questo studio è lo sviluppo di criteri di progettazione per il rinforzo della muratura utilizzando malte rinforzate con compositi (CRM). Questi criteri sono stati sviluppati attraverso un piano di ricerca sperimentale e numerica che ha esaminato l'influenza del materiale di rinforzo, del rivestimento e dello spessore delle pareti, nonché delle proprietà elastiche e della resistenza della muratura.

L' articolo descrive un modello agli elementi finiti (FE) (**Figura 15**) basato sull'approccio a fessurazione diffusa. Il modello è stato calibrato utilizzando una banca dati sperimentale e sviluppato con il software commerciale ANSYS, al fine di determinare una formulazione progettuale a supporto degli ingegneri strutturali che si occupano di muratura rinforzata con CRM (determinazione coefficiente migliorativo τ_r/τ_0).

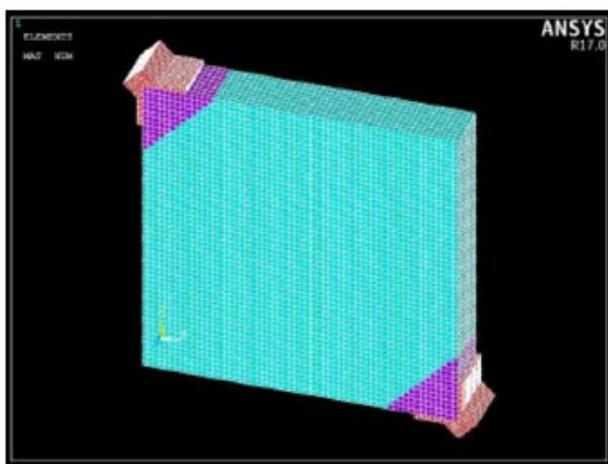


Figura 15- Modello agli elementi finiti

Con l'approccio numerico proposto, una volta nota la tipologia di muratura ed il sistema di rinforzo (rete GFRP e malta a base di calce idraulica¹), l'efficacia del sistema CRM può essere calcolata direttamente in funzione del rapporto tra lo spessore del rivestimento di malta (s_{coat} compreso tra 60 e 100 mm) e lo spessore della parete in muratura (s_{wall} compreso tra 250 e 800 mm), secondo la seguente equazione [9]:

¹ È stata utilizzata una malta a base di calce idraulica naturale per il rivestimento: $f_m = 4,5$ MPa, $f_t = 0,6$ MPa, $E = 14$ GPa, $\nu = 0,15$

$$\delta_{CRM,FEM} = m \frac{S_{coat}}{S_{wall}} + q$$

dove la pendenza (m) e l'intercetta (q) variano in base al tipo di parete in muratura.

I risultati ottenuti sono stati poi comparati con i valori proposti da normativa (**Figura 16**)

Masonry typology	Numerical approach	Code predictions
	$\delta_{CRM,FEM}$	$\delta_{CRM,NTC}$
Irregular/Pebble Stone	$\delta_{RP} = 11.85 \frac{S_{coat}}{S_{wall}} + 0.89$	2.00
Barely Cut Stone	$\delta_{RP} = 8.67 \frac{S_{coat}}{S_{wall}} + 0.94$	1.70
Properly Dressed Stone	$\delta_{RP} = 6.34 \frac{S_{coat}}{S_{wall}} + 0.97$	1.50
Soft Stone	$\delta_{RP} = 9.74 \frac{S_{coat}}{S_{wall}} + 0.92$	1.70
Perfectly Cut Stone	$\delta_{RP} = 4.14 \frac{S_{coat}}{S_{wall}} + 0.99$	1.20
Solid Bricks	$\delta_{RP} = 7.26 \frac{S_{coat}}{S_{wall}} + 0.96$	1.50

Figura 16- Comparazione approccio numerico con valori da normativa (Borri et al., 2022)

In conclusione, l'articolo [9] rappresenta un prezioso contributo nel campo del rinforzo strutturale tramite intonaco CRM, tuttavia, nonostante l'accuratezza del modello FEM presentato, potrebbero essere utili ulteriori miglioramenti.

Il modello FEM, ad esempio, richiede una ricalibrazione per ogni modifica nelle caratteristiche del rinforzo, limitando l'accessibilità per i progettisti che potrebbero trarre vantaggio da uno strumento più semplice e immediato.

2. CASO DI STUDIO

2.1. Edificio di riferimento

Le simulazioni sono state condotte utilizzando come riferimento un edificio tipo in muratura di mattoni pieni. Per semplicità e per gli scopi dell'analisi, si è ritenuto sufficiente modellare esclusivamente una porzione dell'edificio (**Figura 18**), considerandola come un elemento indipendente.

L'edificio in questione riporta le seguenti caratteristiche (**Figura 17**):

ANNO DI COSTRUZIONE	Anni '30
TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	edificio multifamiliare
NUMERO DI PIANI	2 + 1 seminterrato
NUMERO DI APPARTAMENTI	4
SUPERFICIE APPARTAMENTI	43,00 - 79,00 mq
SUPERFICIE TOTALE	244,00 mq
FONDAZIONE	cordolo in cemento armato alto 30 cm circa e magrone alto 1 m circa
STRUTTURA PORTANTE	mista (muratura portante e solai in latero-cemento)
COPERTURA	a due o più falde, in legno
TAMPONATURA	faccia a vista non isolata / intonacata non isolata

Figura 17- Caratteristiche edificio di riferimento

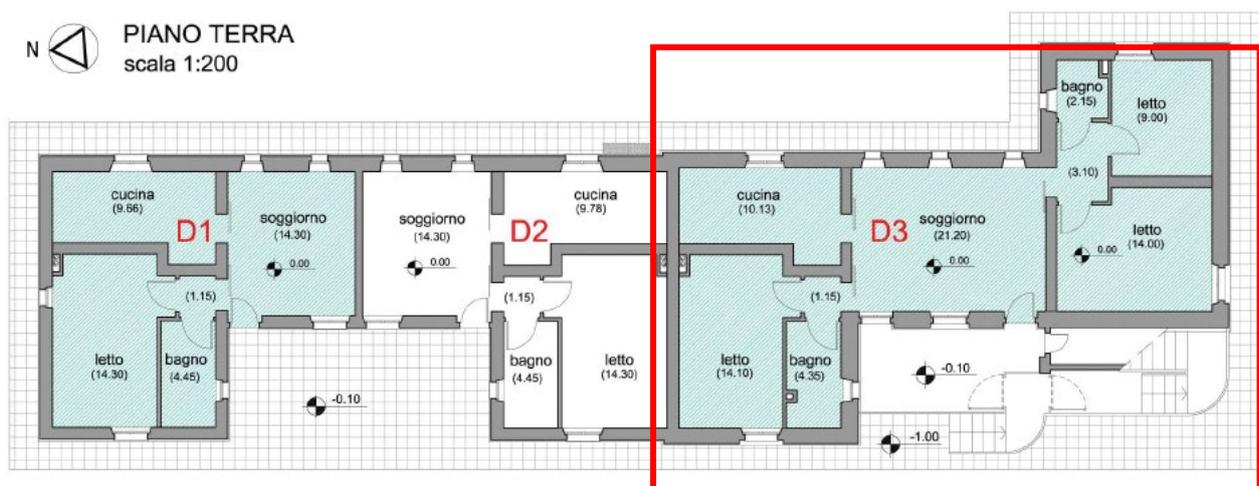


Figura 18- Pianta fuori scala dell'edificio e individuazione della parte considerata

Di seguito sono riportate piante e dettagli costruttivi dell'edificio, mentre sezioni e prospetti sono inserite in appendice:

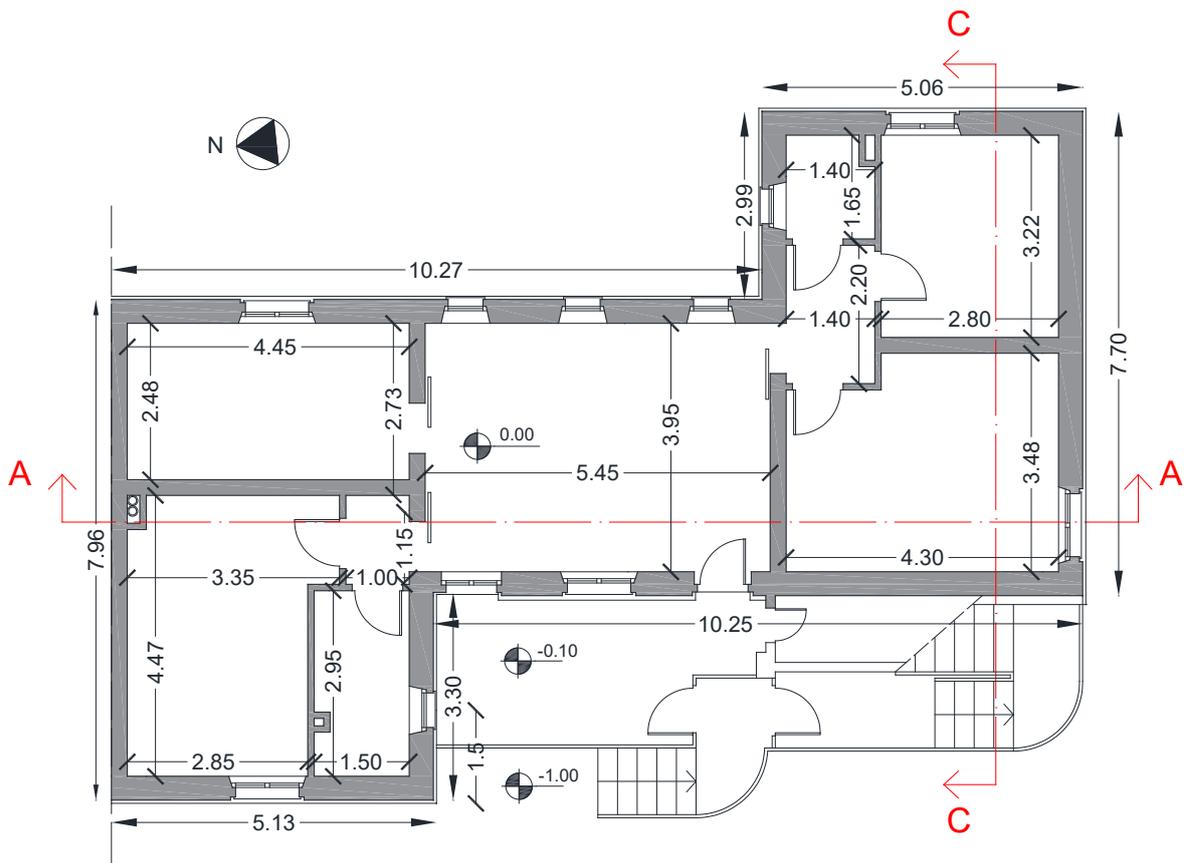


Figura 19- Pianta piano terra (fuori scala), misure in metri

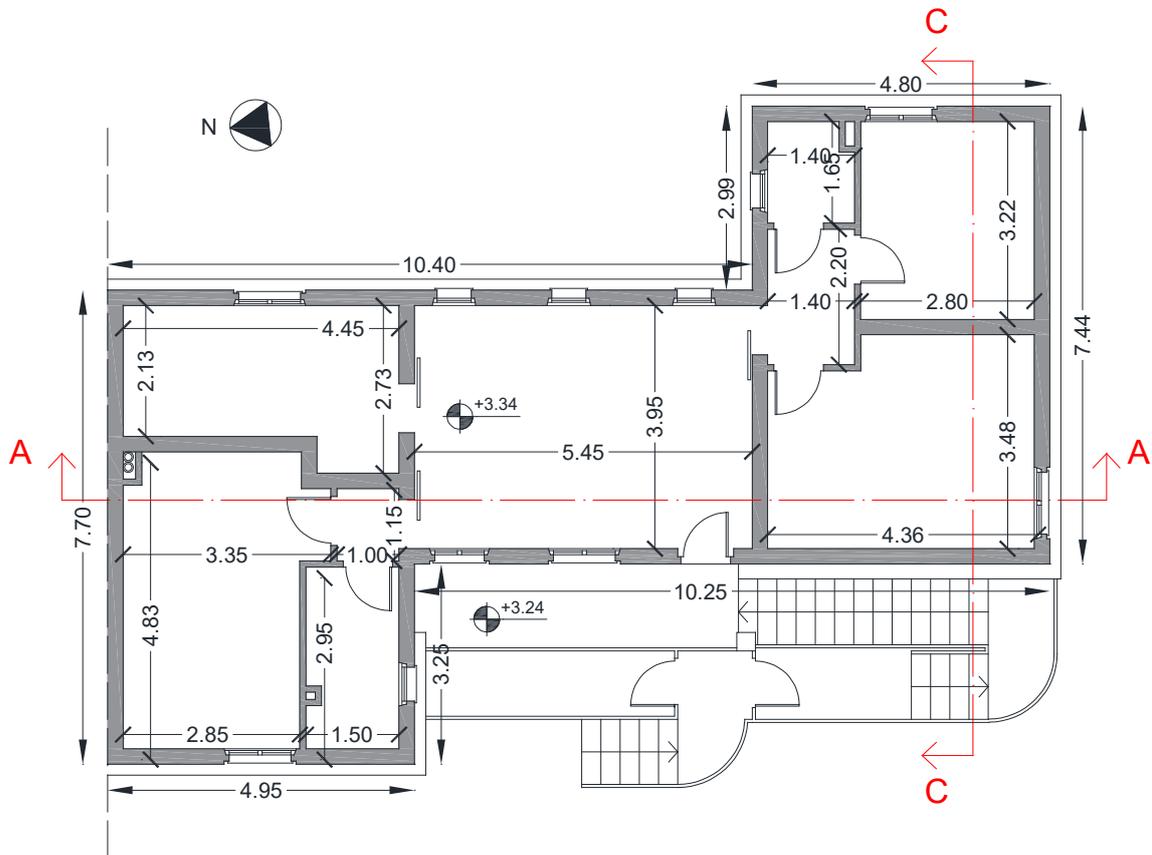


Figura 20- Pianta piano primo (fuori scala), misure in metri

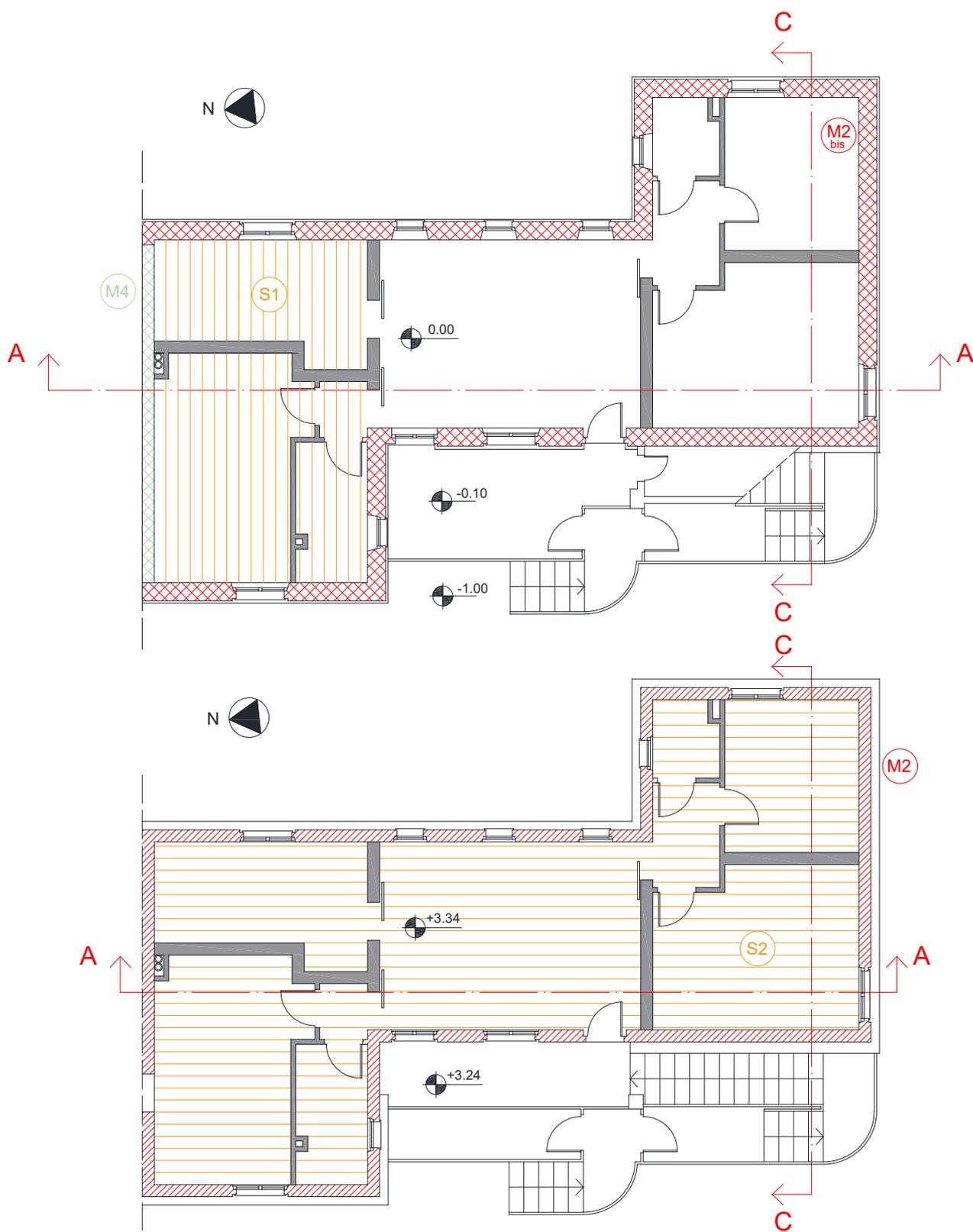


Figura 21- Piante delle tipologie costruttive (fuori scala)

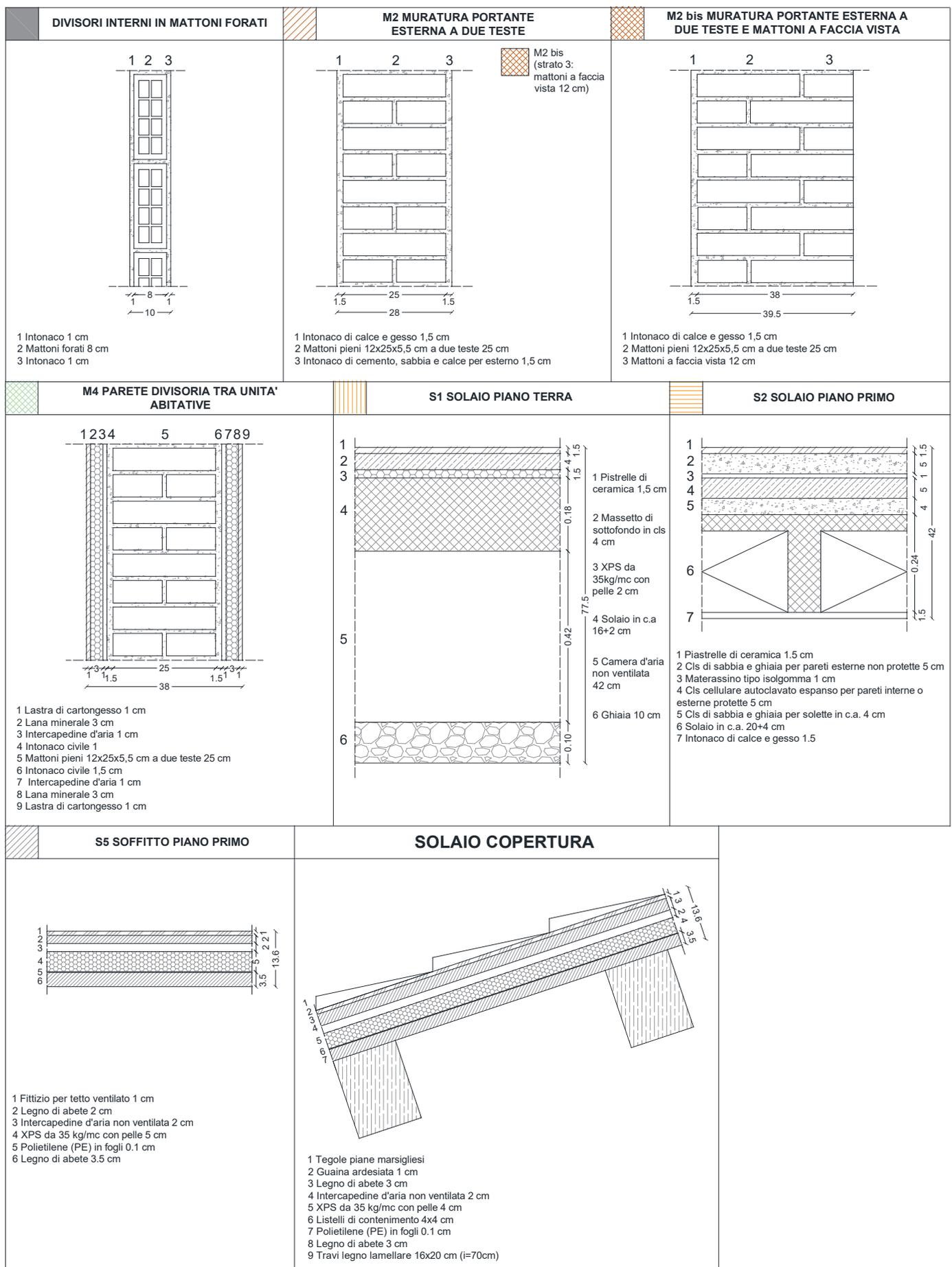


Figura 22- Sezioni di pareti, solai e coperture (fuori scala)

2.2. Sistema di rinforzo

Nella presente tesi è stato analizzato il sistema CRM proposto dalla DIASEN, denominato “Sismactive thermal system”, con l’obiettivo di stimarne i miglioramenti apportati alle strutture in muratura in termini di resistenza a taglio, determinando quindi il relativo coefficiente di incremento. L’edificio preso come caso di studio è stato rinforzato con questo metodo.

Tale sistema rappresenta una proposta innovativa per il miglioramento delle strutture tramite intonaco CRM, progettata per assicurare un incremento sia delle prestazioni sismiche che di isolamento termico degli edifici. Questo intervento multifunzionale è reso possibile grazie all’uso di “Diathonite Sismactive”, una malta strutturale termica M10¹ composta da sughero e calce, sviluppata per garantire eccellenti prestazioni in termini di sicurezza sismica e benessere termico.

DIASEN è un’azienda italiana, fondata nel 1985, specializzata nella produzione di soluzioni innovative per l’edilizia sostenibile. È nota per lo sviluppo di materiali eco-compatibili per l’isolamento termico, il risanamento e la protezione strutturale degli edifici.

I componenti chiave di questo intervento (presi in considerazione in questo studio) sono i seguenti:

- **Diathonite sismactive:** applicata in spessori compresi tra 30 e 50 mm (**Figura 23**)
- **Polites AR 330:** rete in fibra di vetro utilizzata come rinforzo (**Figura 24**)
- **Elites L:** connettore a “L” preformato in fibra di vetro con resina (**Figura 25**)

Sono possibili anche applicazioni con differenti tipi di malta, come la “Calce storica”², e di connettori, come gli “Elites f1 - f2”³ o “Sismabond”⁴, non trattati in questo caso.

¹ Classificazione delle malte in base alla normativa UNI EN 998-2, in cui ciascuna malta è indicata da una sigla recante la lettera M seguita da un numero che indica la resistenza a compressione (fm) espressa in N/mm².

² Malta M15 prodotta dalla DIASEN

³ Connettori a fiocco in fibra di vetro.

⁴ Connettori con resina altamente performante, per carichi elevati.



Figura 23- Malta
Diathonite
Sismactive

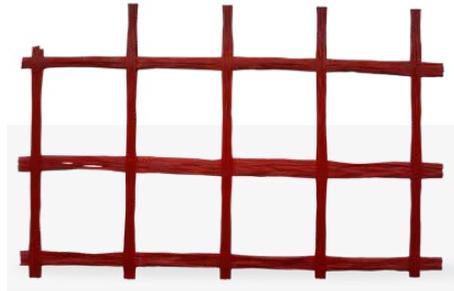


Figura 24- Polites AR 330



Figura 25- Elites L

Nell'ambito del presente lavoro, il sistema di rinforzo è stato considerato applicato sia nella configurazione a due facce che in quella ad una faccia.

La funzione della rete all'interno del sistema è legata all'assorbimento delle sollecitazioni di trazione, mentre l'intonaco strutturale termoisolante M10, formulato con sughero e calce, contribuisce ad assorbire le forze di compressione. Allo stesso tempo, i connettori sono progettati per ancorare la muratura e l'intonaco, sfruttando un meccanismo di trasferimento delle sollecitazioni tra il supporto e la rete.

3. METODI

3.1. Analisi statistica

3.1.1. *Regressione multipla con il software “R”*

Come illustrato nel Capitolo 1.6, la finalità principale di questa tesi è colmare la lacuna normativa presente nelle NTC [10], relativa alla definizione di un coefficiente migliorativo per l'intonaco armato di tipo CRM. L'intento è quello di sviluppare un metodo che permetta di stimare tale coefficiente, tenendo conto delle caratteristiche dei materiali costituenti il rinforzo. Attraverso questa analisi, si mira a fornire uno strumento utile per la progettazione e la valutazione delle prestazioni degli interventi di consolidamento, al fine di migliorarne l'affidabilità e l'efficacia.

Il metodo considerato più idoneo per raggiungere questo obiettivo è stato identificato nella regressione multipla, poiché capace di offrire un approccio accurato per analizzare le relazioni tra le variabili in gioco. Tale analisi si è realizzata attraverso il software “R”.

R è un software gratuito usato per il calcolo statistico e grafico, progettato attorno ad un vero e proprio linguaggio di programmazione. Il programma offre varie tecniche, come modelli lineari e non lineari, test statistici classici e molto altro. [11]

3.1.1.1. *Fondamenti della regressione multipla*

L'analisi di regressione multipla è una tecnica statistica avanzata che consente di descrivere in modo ottimale come un fenomeno specifico possa essere influenzato da una molteplicità di fattori. In questo contesto, il fenomeno da analizzare viene rappresentato dalla relazione:

$$y = f(X_1, X_2, X_3 \dots, X_n)$$

Dove **y** indica la variabile dipendente, in funzione dalle *n* variabili indipendenti (regressori), potenzialmente esplicative o predittive.

Questa metodologia è particolarmente utile in contesti complessi, permettendo di valutare l'impatto di ciascun regressore sulla variabile dipendente, considerando simultaneamente l'influenza delle altre variabili presenti nel modello. [12]

Il modello di regressione multipla si basa sull'ipotesi che esista una relazione lineare tra la variabile Y e le variabili indipendenti $X_1, X_2, X_3 \dots, X_n$. La formula generale è la seguente:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$$

In cui:

- y = valore previsto della variabile dipendente
- β_0 = intercetta del modello (valore di y quando tutti gli altri parametri sono impostati a 0)
- $\beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n$ = coefficienti di regressione (β) delle variabili indipendenti (X), che rappresentano l'impatto di ciascuna variabile sul valore previsto di y.
- ε = errore del modello

In un modello di regressione si vanno a confrontare i valori realmente osservati con quelli previsti, e la loro differenza è chiamata “**errore**” o “**residuo**”.

$$\text{Residuo} = \text{Valore osservato} - \text{Valore previsto}$$

L'obiettivo della regressione è determinare i valori dei coefficienti (β) che minimizzano la somma dei quadrati degli errori (SSE) tra i valori osservati e quelli previsti. Questo è noto come “**metodo dei minimi quadrati**”.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (\text{Valore osservato}_i - \text{Valore previsto}_i)^2$$

Minimizzare questa somma aiuta a ottenere un modello che si adatta in modo ottimale ai dati.

3.1.1.2. **Regressione polinomiale**

Nel caso da noi analizzato si è scelto di utilizzare un modello di regressione di tipo polinomiale. Questo permette di catturare relazioni non lineari tra le variabili indipendenti e quella dipendente, cosa che un semplice modello lineare non sarebbe capace di descrivere. In questo modo i regressori figurano non solo con grado pari ad uno, ma anche con grado maggiore.

Un esempio potrebbe essere:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2^2 + \dots + \beta_n X_n^2 + \varepsilon$$

Nonostante la regressione polinomiale sia non lineare, viene comunque considerata lineare nella sua forma rispetto ai coefficienti (β) che dobbiamo stimare. [13]

3.1.1.3. **Valutazione del modello**

La valutazione del modello rappresenta un passaggio fondamentale, necessario per verificare l'affidabilità del modello e capire se sia adeguato a descrivere i dati e fare previsioni affidabili. Alcuni dei principali metodi per effettuare tale valutazione sono:

- **Coefficiente di determinazione R^2 :** è la proporzione di variazione totale che è spiegata dalla variabile dipendente. Più semplicemente è un parametro che varia da 0 ad 1 e “serve per misurare quanto della variabile dipendente Y sia predetto dalla variabile indipendente X e quindi per valutare l'utilità dell'equazione di regressione ai fini della previsione sui valori della Y... Il valore del coefficiente di determinazione è tanto più elevato quanto più la retta passa vicino ai punti, fino a raggiungere 1 quando tutti i punti sperimentali sono collocati esattamente sulla retta. In tale caso, infatti, ogni Y_i può essere predetto con precisione totale dal corrispondente valore di X_i ”[14]. Solitamente si assume che il modello di regressione sia buono quando R^2 supera 0,6 (60%).

Nei modelli più complessi, con molte variabili indipendenti, al posto di R^2 viene utilizzato il valore di “ R^2 aggiustato” che penalizza l'aggiunta di variabili irrilevanti.

- **Analisi dei residui:** l'analisi grafica dei residui consente di capire se il modello rispetti determinate ipotesi di validità e se risulta essere adeguato. Tali ipotesi sono:
 - Omoschedasticità: “i valori di Y devono avere varianze omogenee per ogni valore di X sperimentato”[14]. Semplicemente, i residui dovrebbero essere distribuiti casualmente senza seguire schemi particolari.
 - Normalità dei residui: realizzata quando i residui mostrano una distribuzione normale
 - Indipendenza dei residui: i residui non devono essere correlati tra loro, in modo tale che l'errore di una previsione non influenzi l'errore di un'altra.

- **F-test e t-test:** Sono test utilizzati per comprendere se le variabili utilizzate nel modello di regressione contribuiscono a spiegare, in modo significativo, la variabile dipendente.
 - **F-test:** Serve a valutare l'intero modello, determinando se almeno una variabile indipendente sia significativa.
 - **T-test:** Valuta la significatività delle singole variabili

In entrambi i test la significatività statistica viene valutata con “valori p” (p-value). Solitamente si considera che un valore di p basso ($\leq 0,05$) indica c'è evidenza sufficiente per rifiutare l'ipotesi nulla¹.

3.1.2. Applicazione

3.1.2.1. Creazione del dataset

In questa tesi, l'analisi di regressione è stata eseguita utilizzando la tabella in Appendice A, descritta nel capitolo 1.6.1, come riferimento per la creazione del dataset, successivamente inserito in R.

La tabella è stata opportunamente rielaborata in modo da considerare solo le variabili e gli articoli più significativi dal punto di vista statistico ed utili per la regressione. Sono state quindi mantenute esclusivamente variabili con alta rilevanza, scartando quelle affette da multicollinearità, in modo da garantire che il modello sia il più robusto e affidabile possibile.

Inoltre, alcuni dati qualitativi presenti nella tabella, come ad esempio la presenza del sacco o il numero delle facce di applicazione, sono stati trasformati in valori utilizzabili per la regressione (spiegati di seguito). Questo ha permesso di includere nel modello variabili categoriche essenziali.

Al termine di un processo iterativo, si è scelto di utilizzare il dataset descritto nella tabella presente in Appendice B², in cui compaiono le seguenti variabili:

¹ Indica l'assenza di effetto, ovvero un coefficiente di regressione pari a 0

² Gli articoli presenti in questo dataset sono: Gattesco & Boem, 2015a , Borri et al., 2016 , Del Zoppo et al., 2019 , Castori et al., 2020.

- **$f_{c,c}$ Resistenza a compressione malta intonaco [Mpa]**
- **Area maglia [mm²]:** espressa come area di una maglia della rete di rinforzo.
- **Resistenza a trazione singola barra [kN]**
- **Modulo elastico a trazione singola barra [GPa]**
- **Allungamento a rottura singola barra [%]**
- **Densità muratura (NTC) [kN/m³]**
- **Presenza sacco:** espresso con valore binario in cui 1 rappresenta la presenza del sacco e 0 rappresenta l'assenza.
- **una faccia:** Indica il caso di una sola faccia di applicazione (1 o 0)
- **due facce:** Indica il caso di due facce di applicazione (1 o 0)
- **spessore provino [mm]**
- **spessore coating [mm]**
- **resistenza a taglio non rinforzata τ_0 [N/mm²]**
- **τ_i/τ_0^1 :** coefficiente migliorativo (variabile dipendente che viene stimata)

È possibile notare come, la variabile che indica le facce di applicazione del rinforzo, sia stata scomposta in due ulteriori variabili chiamate “variabili dummy”, che consentono di rappresentare più efficacemente le diverse combinazioni di rinforzo. Le variabili dummy hanno una forma binaria e possono assumere solo valori 0 ed 1, quindi, in questo caso, le configurazioni possibili sono tre:

- **Nessun rinforzo:** entrambe le variabili valgono 0
- **Una faccia di applicazione:** la variabile “una faccia” sarà uguale ad 1 e “due facce” uguale a 0
- **Due facce di applicazione:** la variabile “una faccia” sarà uguale a 0 e “due facce” uguale a 1

Sono stati inclusi nel dataset sia i provini rinforzati che quelli non rinforzati per un migliore addestramento del modello di regressione.

¹ Nel modello di regressione in R viene nominato “coeff”

3.1.2.2. Modello di regressione

Come già accennato, il modello di regressione scelto in questo caso è di tipo polinomiale ed è espresso in R come segue (Figura 26).

```
#1 Modello di regressione polinomiale
model <- lm(coeff ~ poly(resistenza_a_compressione_malta_intonaco, 2, raw = TRUE) +
  poly(area_rete, 2, raw = TRUE) +
  poly(resistenza_a_trazione_singola_barra, 2, raw = TRUE) +
  poly(modulo_elastico_a_trazione_singola_barra, 2, raw = TRUE) +
  poly(allungamento_a_rottura_singola_barra, 1, raw = TRUE) +
  poly(densità_muratura, 1, raw = TRUE) +
  poly(spessore_provino, 1, raw = TRUE) +
  poly(spessore_coating, 1, raw = TRUE) +
  poly(res_taglio_non_rinforzata, 1, raw = TRUE) +
  una_faccia +
  due_facce +
  presenza_sacco, data = df)

summary(model)

#2 Calcolo della Cook's distance
cooks_d <- cooks.distance(model)

#3 Identificazione osservazioni influenti
influential <- as.numeric(names(cooks_d)[(cooks_d > (4 / nrow(df)))]))

#4 Rimozione osservazioni influenti
df_clean <- df[-influential, ]

#5 Riadattare il modello di regressione polinomiale senza osservazioni influenti
model_clean <- lm(coeff ~ poly(resistenza_a_compressione_malta_intonaco, 2, raw = TRUE) +
  poly(area_rete, 2, raw = TRUE) +
  poly(resistenza_a_trazione_singola_barra, 2, raw = TRUE) +
  poly(modulo_elastico_a_trazione_singola_barra, 2, raw = TRUE) +
  poly(allungamento_a_rottura_singola_barra, 1, raw = TRUE) +
  poly(densità_muratura, 1, raw = TRUE) +
  poly(spessore_provino, 1, raw = TRUE) +
  poly(spessore_coating, 1, raw = TRUE) +
  poly(res_taglio_non_rinforzata, 1, raw = TRUE) +
  una_faccia +
  due_facce +
  presenza_sacco, data = df_clean)

summary(model_clean)
```

Figura 26- Codice di R che rappresenta il modello di regressione scelto ed i relativi passaggi.

Nel codice mostrato in figura, alcune variabili vengono trattate come polinomi di grado 2, riflettendo l'ipotesi che il loro effetto sulla variabile dipendente (coefficiente migliorativo) non sia di tipo lineare. Questo permette di catturare un'interazione più complessa e rappresentare meglio il loro impatto sulla variabile di risposta.

Un passaggio fondamentale presente nel codice è rappresentato dall'utilizzo della Cook's Distance, che misura quanto l'inclusione o l'esclusione di ciascun dato influenzi il risultato finale del modello. In altre parole, è una sorta di indicatore che aiuta a definire gli outlier o anomalie che influenzano eccessivamente l'output della regressione. Le osservazioni che hanno un valore di Cook's Distance superiore a una certa soglia critica vengono rimosse,

evitando che distorcano i risultati. Tale soglia è proporzionale al numero di osservazioni nel dataset. [15]

Il passaggio seguente consiste quindi nel riadattare il modello di regressione utilizzando il dataset in cui sono escluse le osservazioni influenti.

In conclusione, il codice utilizzato segue un processo mirato atto a migliorare la qualità del modello, adottando l'uso di polinomi per cogliere interazioni non lineari tra le variabili e un processo di pulizia dei dati raccolti.

È di fondamentale importanza, infine, individuare l'intervallo di validità, cioè l'intervallo dei valori di input per i quali le previsioni possono essere considerate affidabili. Questo intervallo è determinato dai dati utilizzati per l'addestramento e rappresenta i limiti entro i quali l'algoritmo può operare (**Figura 27**).

	fc,c Resistenza a compressione malta intonaco [Mpa]	Area maglia [mm ²]	Resistenza a trazione singola barra [kN]	Modulo elastico a trazione singola barra [GPa]	Allungamento a rottura singola barra [%]	Densità muratura (NTC) [kN/m ³]	Presenza sacco	una faccia	due facce	spessore provino [mm]	spessore coating [mm]	resistenza a taglio non rinforzata τ_0 [N/mm ²]
Max	25	9801	7,29	72	4	20	1	1	1	700	53	0,32
Min	0	0	0	0	0	14,5	0	0	0	240	0	0,03

Figura 27- Intervallo di validità del modello

3.2. Modello numerico strutturale

In questo capitolo viene descritta la modellazione dell'edificio di riferimento visto nel capitolo 2.2. La modellazione è stata effettuata attraverso il PRO_SAM, un plug-in del software di calcolo PRO_SAP, per il progetto di strutture nuove e la verifica di edifici esistenti.

3.2.1. Metodo SAM

“Promosso da Confindustria Ceramica Raggruppamento Laterizi e sviluppato dal Professor Magenes e dagli Ing. Manzini e Morandi, esegue analisi statiche non lineari (pushover) mediante una modellazione a telaio equivalente.

Il codice SAM II si basa su un metodo proposto da G. Magenes e G.M. Calvi nel 1996, di cui si è mantenuto l'acronimo S.A.M. (Seismic Analysis of Masonry walls). Tale metodo, pensato originariamente per l'analisi di pareti piane, è stato in seguito riformulato e implementato in un programma di calcolo strutturale non lineare per estenderne l'applicazione all'analisi di strutture tridimensionali di una certa dimensione e complessità”. [16]

Il PRO_SAM crea un modello tridimensionale a macroelementi, in cui la struttura portante può essere schematizzata attraverso un telaio equivalente, ovvero, un telaio costituito dai seguenti elementi monodimensionali (**Figura 28**):

- **Maschi:** elementi in muratura ad asse verticale
- **Fasce:** elementi in muratura ad asse orizzontale
- **Cordoli:** elementi in cemento armato ad asse orizzontale
- **Offset rigidi:** elementi rigidi presenti alle estremità dell'elemento deformabile
- **Rigidi:** elementi rigidi presenti tra le estremità dei pannelli ed i nodi dei maschi
- **Non rigidi:** elementi deformabili al di sopra delle aperture nel caso non sia presente il cordolo

I maschi murari e le fasce sono elementi in cui si concentrano deformazioni e danneggiamenti.

L'elemento maschio si considera composto da una parte deformabile con resistenza finita e da due parti infinitamente rigide alle estremità (**Figura 29**). La lunghezza di questa parte deformabile, chiamata “altezza efficace”, viene definita attraverso il criterio introdotto da Dolce (1989) (**Figura 31**).

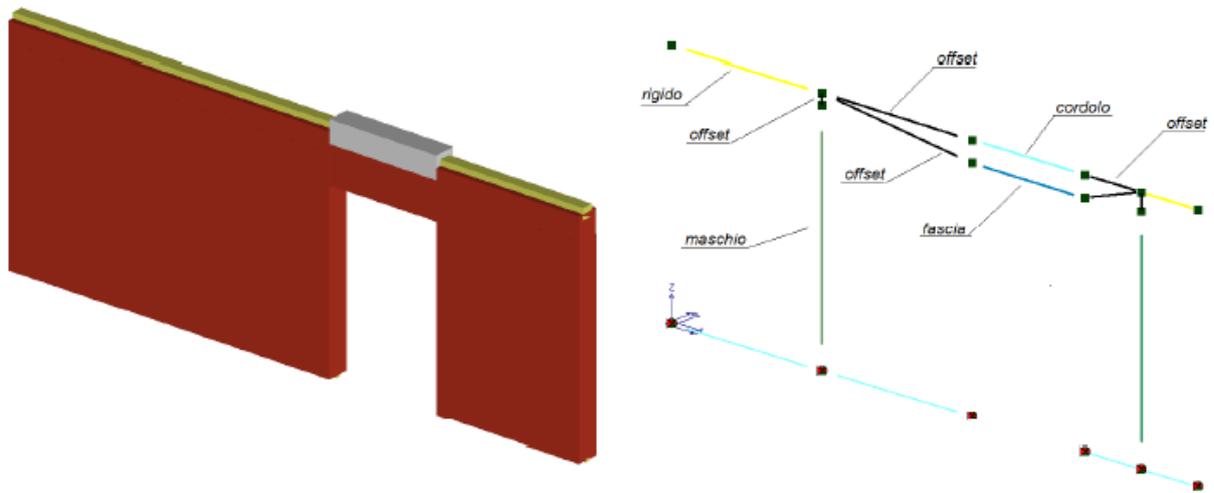


Figura 28- Schematizzazione a telaio equivalente di una parete con apertura e cordolo in spessore di solaio

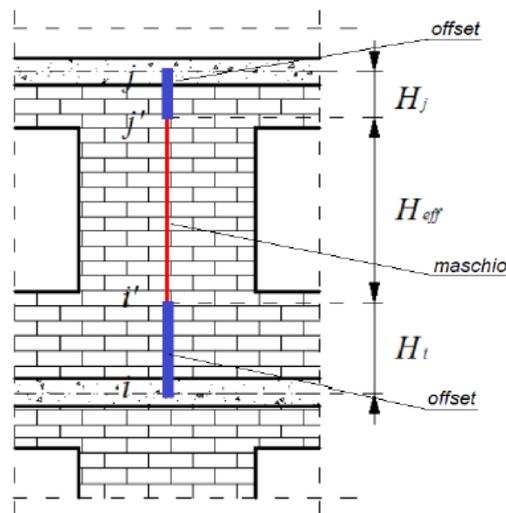


Figura 29- Dettaglio elemento maschio murario

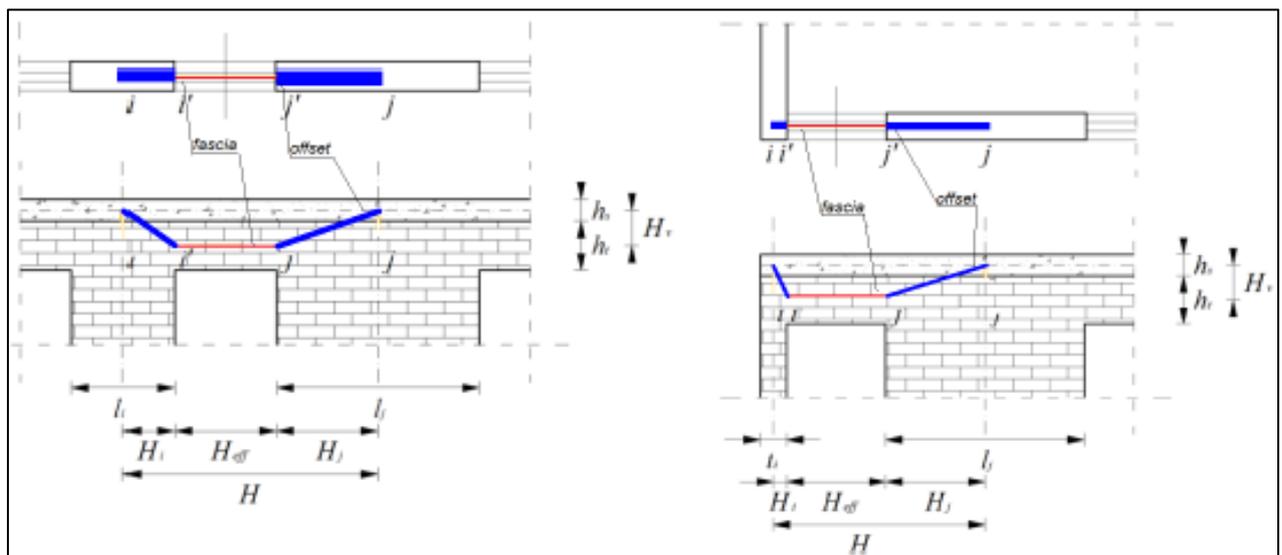
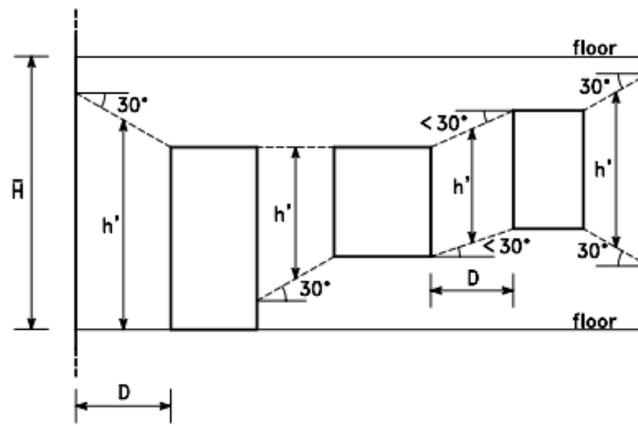


Figura 30- Dettaglio elemento fascia



$$H_{\text{eff}} = h' + \frac{1}{3} D \frac{\bar{H} - h'}{h'} \quad \bar{H} = \text{altezza interpiano}$$

Figura 31- Metodo Dolce per il calcolo dell'altezza efficace

Le fasce di piano (**Figura 30**) vengono individuate come quelle porzioni murarie presenti tra due aperture, come finestre o porte, allineate verticalmente. Sebbene siano elementi secondari nei confronti dei carichi verticali, giocano un ruolo chiave nella risposta dell'edificio in caso di azioni orizzontali, essendo responsabili dell'accoppiamento tra maschi adiacenti.

Al piano terra non viene modellata la fascia sottofinestra, mentre nei maschi vengono introdotti vincoli di incastro alla base per lo scarico del peso del maschio stesso.

I solai, infine, possono essere considerati come diaframmi infinitamente rigidi nel proprio piano oppure come membrane deformabili.

3.2.2. Modellazione caso di studio

L'edificio di riferimento è stato modellato secondo i criteri delineati nel paragrafo precedente, generando un totale di sette modelli, ciascuno rappresentante una diversa configurazione di rinforzo strutturale.

La tecnica di rinforzo ipotizzata consiste nel sistema CRM proposto da DIASEN (Sismactive Thermal System) visto nel capitolo 2.1, considerando uno spessore di applicazione di 50mm.

I modelli realizzati sono denominati come segue:

- **NR**: non rinforzato
- **UNI_2**: rinforzo uniforme applicato su due facce (**Figura 32**)
- **UNI_1**: rinforzo uniforme applicato su una faccia (**Figura 33**)
- **RA_2**: rinforzo di tipo A applicato su due facce (**Figura 34**)
- **RA_1**: rinforzo di tipo A applicato su una faccia (**Figura 35**)
- **RB_2**: rinforzo di tipo B applicato su due facce (**Figura 36**)
- **RB_1**: rinforzo di tipo B applicato su una faccia (**Figura 37**)

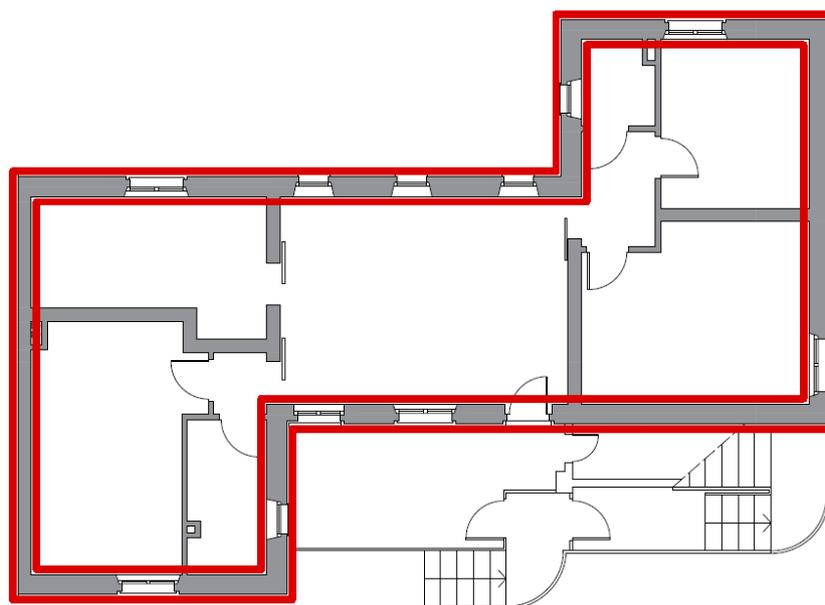


Figura 32- Configurazione di rinforzo UNI_2

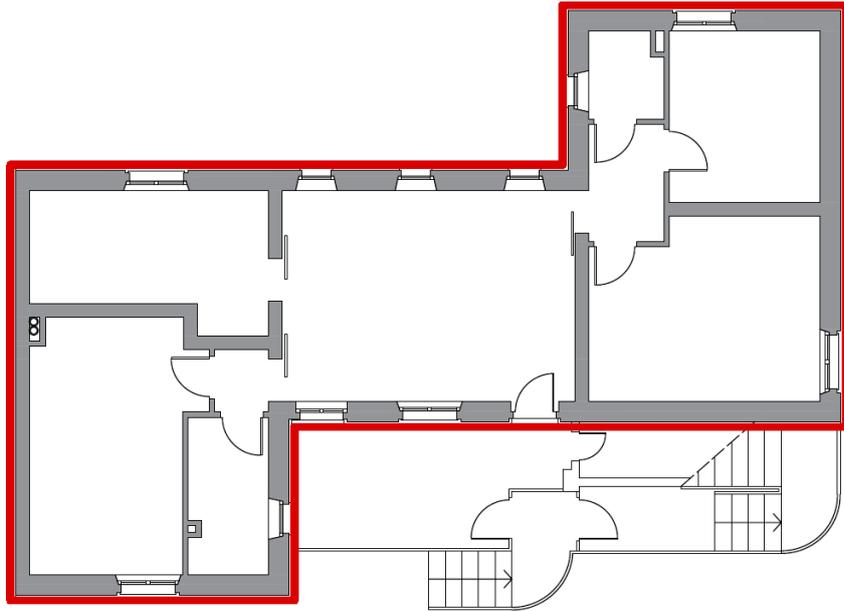


Figura 33- Configurazione di rinforzo UNI_1

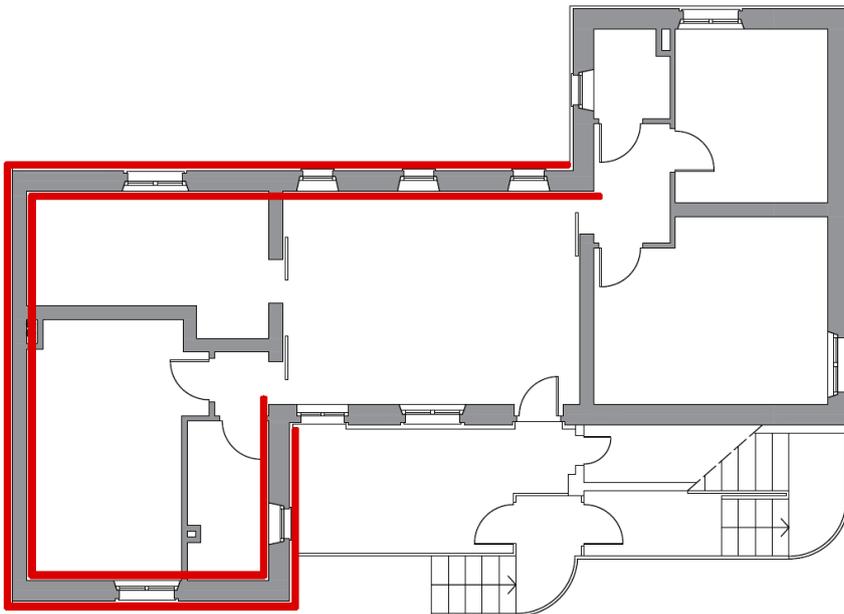


Figura 34- Configurazione di rinforzo RA_2

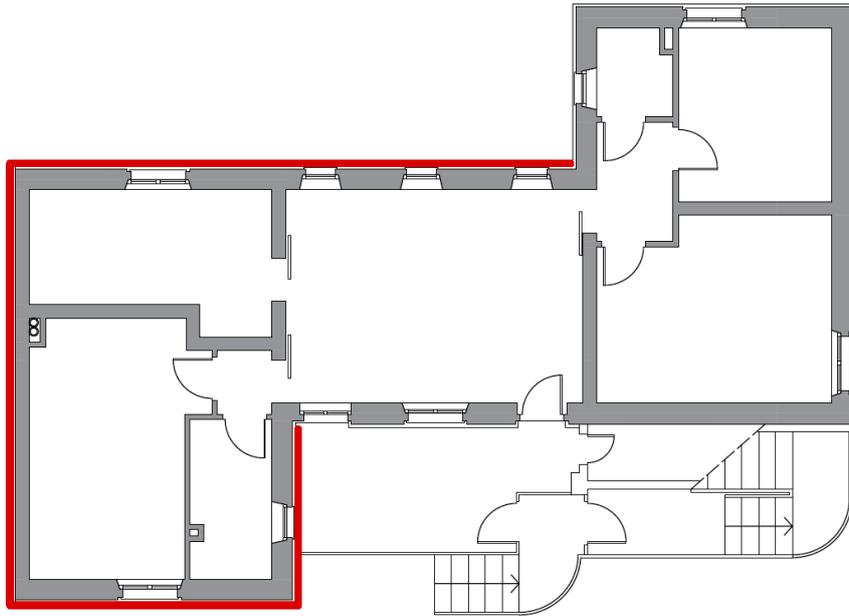


Figura 35- Configurazione di rinforzo RA_1

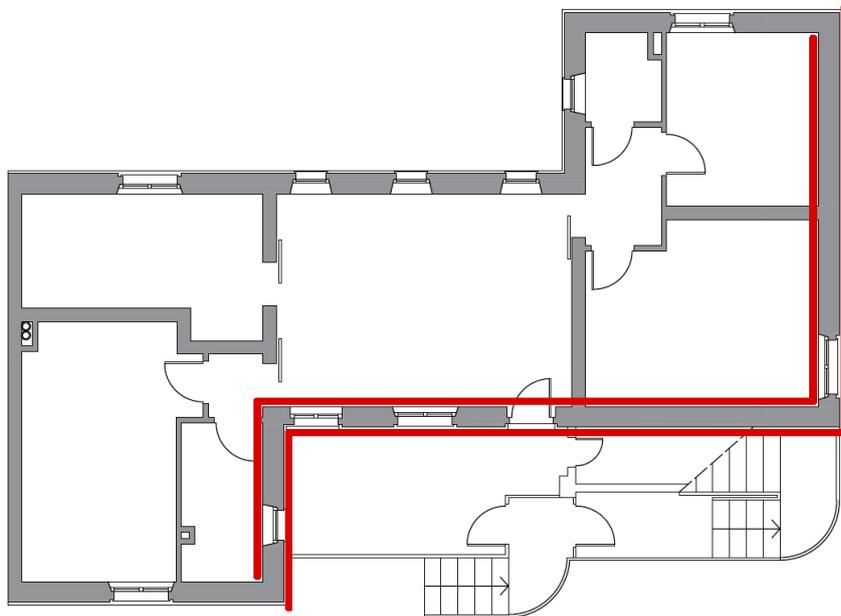


Figura 36- Configurazione di rinforzo RB_2

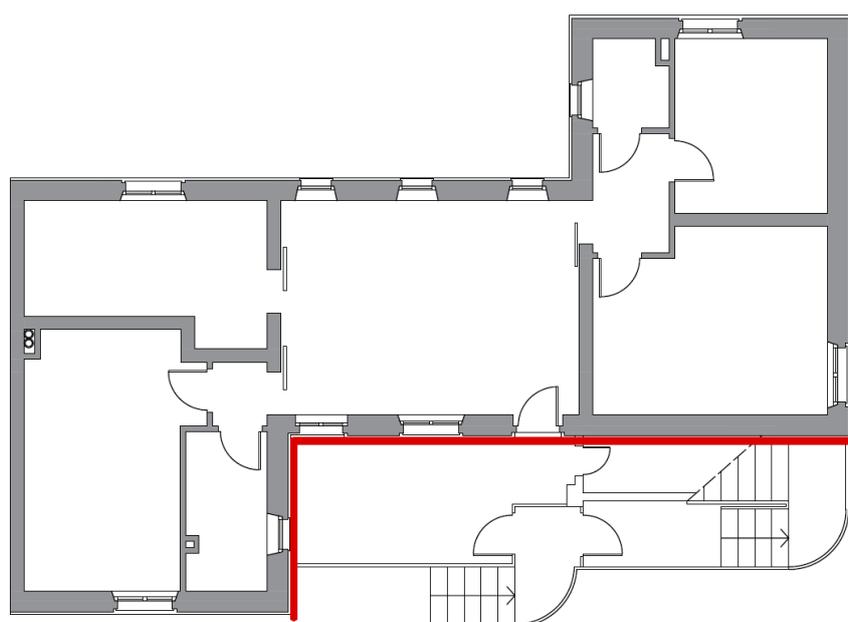


Figura 37- Configurazione di rinforzo RB_1

Nella modellazione della struttura, è stata presa in considerazione esclusivamente la struttura portante delle pareti, rappresentata dallo spessore effettivo della muratura.

I solai sono stati considerati come infinitamente rigidi nel proprio piano. Così facendo, le forze di inerzia dovute al loro peso e ai carichi gravanti su di essi vengono ripartite direttamente alle pareti laterali, che lavorano a taglio nel proprio piano. Inoltre, rappresentano un vincolo al ribaltamento delle pareti, garantendo un comportamento globale della struttura ed evitando l'attivazione di cinematismi locali.

Al fine di favorire una semplificazione del modello, la copertura è stata considerata unicamente attraverso un carico distribuito applicato al solaio di sottotetto, mentre le scale sono state trascurate, in quanto non rilevanti per gli obiettivi del nostro studio.

Il modello a telaio equivalente realizzato può essere visto in **Figura 38** e **Figura 39**.

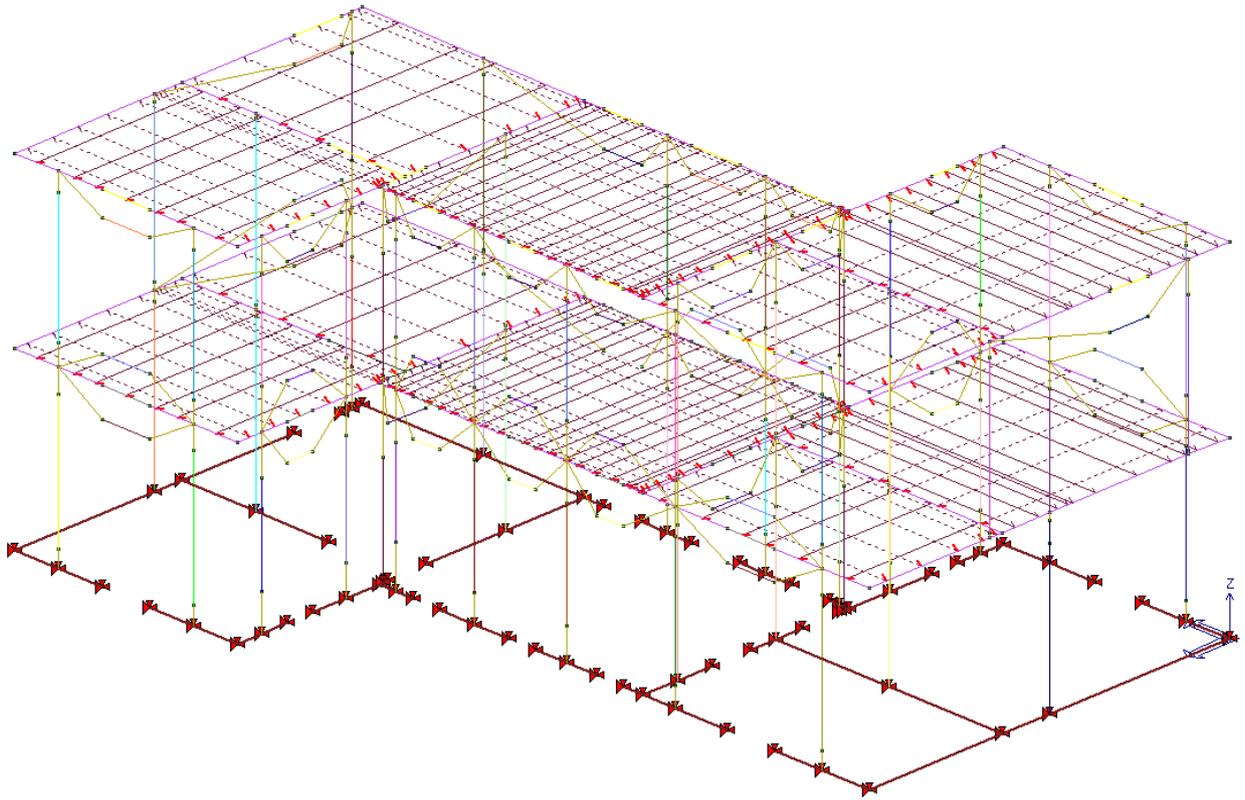


Figura 38- Modello a telaio equivalente della struttura

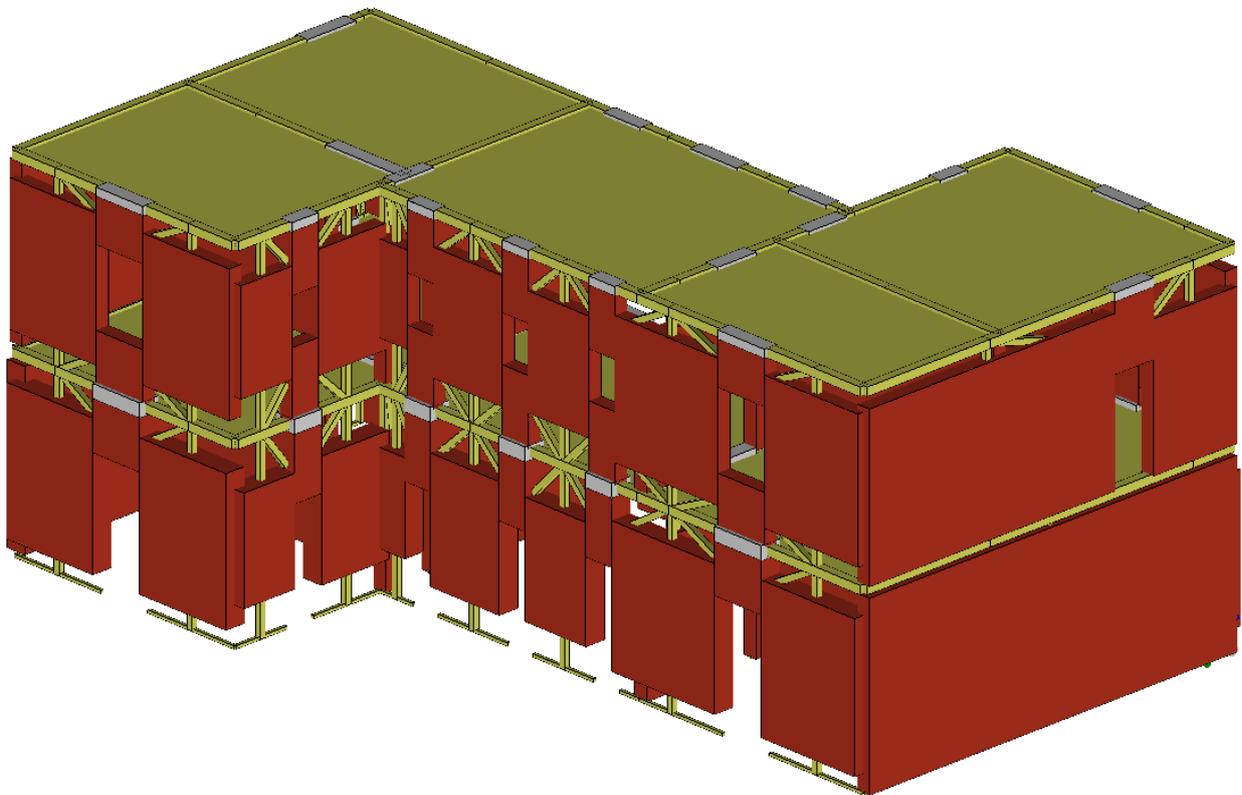


Figura 39- Vista solida del modello a telaio

3.2.2.1. **Materiali e criteri di rottura**

Le caratteristiche meccaniche dei materiali utilizzati nel modello sono ottenute dalla tabella C8.5.1 della normativa [4] (**Figura 5**), nello specifico, quelli relativi alla “Muratura in mattoni pieni e malta di calce”.

Considerando un livello di conoscenza LC1, i valori medi dei parametri meccanici sono definiti come segue:

- **Resistenze:** i valori minimi degli intervalli riportati in Tabella C8.5.1.
- **Moduli elastici:** i valori medi degli intervalli riportati nella tabella suddetta.

Successivamente, nel caso dei modelli rinforzati, tali proprietà sono state opportunamente modificate per riflettere le prestazioni migliorate dei materiali e tener conto dell'intervento di consolidamento.

Per quanto riguarda gli elementi in cemento armato si utilizzano le impostazioni di base del programma, relative ad un calcestruzzo di classe C25/30 ed un quantitativo di armatura standard pari a:

- **Armatura longitudinale:** 10 cm² sia nella parte superiore che inferiore.
- **Armatura trasversale:** Ø8 mm con passo di 3 cm.

Si nota come, di base, venga inserita dal programma un'armatura abbondante. Questo serve a garantire che le verifiche per carichi gravitazionali siano soddisfatte, evitando rotture fragili nel cemento armato, e consentire l'analisi di pushover.

Modello non rinforzato:

Nel modello non rinforzato i materiali hanno le proprietà riportate in **Figura 40**, in cui:

f è la resistenza media a compressione, τ_0^1 e f_{vo}^2 sono la resistenza media a taglio, **E** è il modulo di elastico, **G** è il modulo di taglio, **w** è il peso per unità di volume.

¹ Valore usato nella formula C8.7.1.16 della normativa [4], relativa alla resistenza a taglio per fessurazione diagonale di murature irregolari.

² Valore usato nella formula C8.7.1.17 [4] e nella 7.8.2.2.2 [10], relative rispettivamente alla resistenza a taglio per fessurazione diagonale di murature regolari, e resistenza a taglio scorrimento.

f (N/mm ²)	τ₀ (N/mm ²)	f_{vo} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
2,6	0,05	0,13	1500	500	18

Figura 40- Proprietà meccaniche della muratura non rinforzata

Modelli rinforzati:

Le pareti sottoposte a consolidamento presentano caratteristiche meccaniche superiori rispetto alla versione non rinforzata. Questo incremento è stato implementato nel modello attraverso l'utilizzo di coefficienti migliorativi, come descritto nel capitolo C8.5.3.1 della normativa [4].

L'obiettivo della tesi, ricordiamo, è stato stimare il valore del coefficiente migliorativo di resistenza a taglio della muratura rinforzata con intonaco CRM e, nello specifico, con il sistema proposto da DIASEN; perciò, sono stati adottati i seguenti fattori di incremento:

- **f, E, G:** si utilizza il coefficiente migliorativo pari a **1,5** presente nella tabella C8.5.2 della normativa [4] (**Figura 6**) corrispondente al classico intonaco armato.
- **τ₀, f_{vo}:** coefficiente risultante dall'analisi di regressione vista nel capitolo 3.1.2.2, pari a **3¹** nel caso di rinforzo applicato su entrambe le facce del pannello e **2,8** nel caso di rinforzo su una sola faccia.

La distinzione tra pannelli rinforzati su due facce e pannelli rinforzati su una faccia, è altrettanto importante per il valore che descrive la densità del materiale (**w**), che è stato valutato attraverso una media pesata (**Figura 41**) tra la densità della muratura e quella del rinforzo, secondo la formula seguente:

$$\frac{(\text{Spessore muratura} \times \text{Densità muratura}) + (\text{Spessore rinforzo} \times \text{densità rinforzo})}{\text{Spessore totale}}$$

¹ Nonostante l'analisi di regressione abbia mostrato un valore del coefficiente di rinforzo pari a 4,5, si è ritenuto opportuno fissare un limite massimo di 3 per motivi di sicurezza.

	2 FACCE		1 FACCIA	
Spessore muratura (mm)	380	250	380	250
Spessore rinforzo (mm)	100	100	50	50
Spessore Tot. (mm)	480	350	430	300
Densità pacchetto murario (kN/m ³)	15,50	14,57	16,60	16,00

Densità muratura	18
Densità rinforzo	6

Figura 41- Valori di calcolo per densità di murature rinforzate

Criteri di rottura:

PRO_SAM distingue il comportamento dei maschi e delle fasce nel modello. I legami costitutivi (Figure 48, 49, 50) vengono ricalcolati per ciascun elemento strutturale a ogni step dell'analisi, tenendo conto delle proprietà del materiale, dei criteri progettuali e dello stato di sollecitazione a cui sono sottoposti.

Il software fa riferimento alle disposizioni normative delle NTC 2018 [10] e della relativa circolare esplicativa [4] per stabilire le verifiche da effettuare sugli elementi, e per determinare le capacità a pressoflessione e a taglio di maschi e fasce.

Nei maschi murari i principali meccanismi di rottura (Figura 42) nel piano sono:

- **Pressoflessione;**
- **Taglio-scorrimento;**
- **Taglio con fessurazione diagonale.**

Nelle fasce di piano i possibili meccanismi di rottura nel piano sono:

- **Pressoflessione;**
- **Taglio con fessurazione diagonale.**

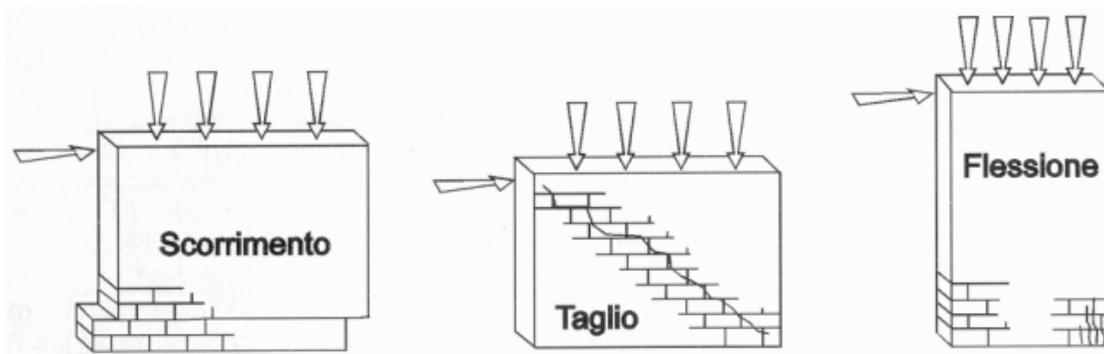


Figura 42- Meccanismi di rottura muratura

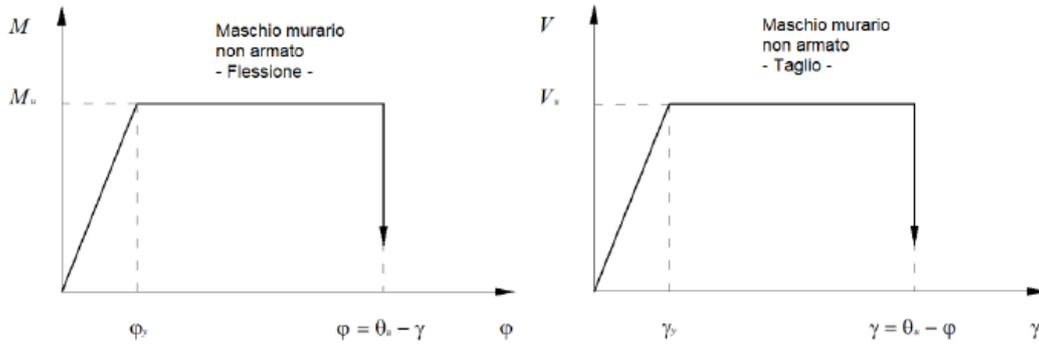


Figura 43- Legami costitutivi a flessione e taglio dei maschi murari

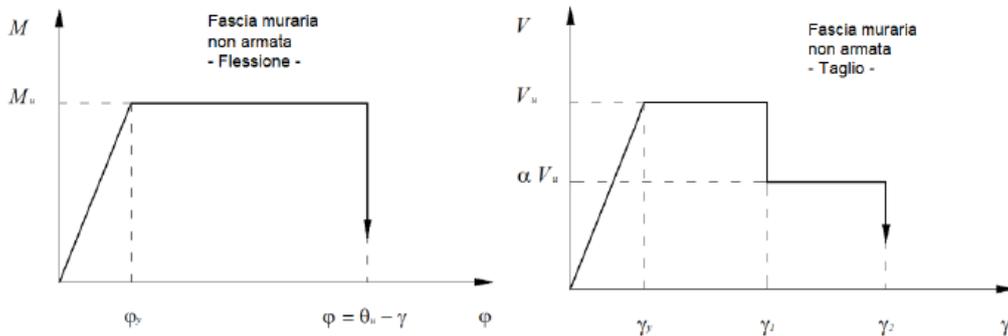


Figura 44- Legami costitutivi a flessione e taglio delle fasce murarie

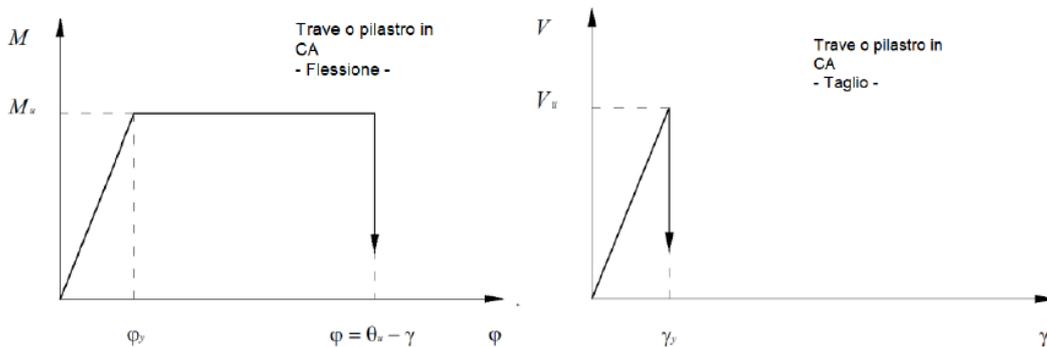


Figura 45- Legami costitutivi cordoli in cemento armato

Nel presente caso è necessario fare un appunto.

Il coefficiente migliorativo di resistenza a taglio è stato applicato sia al valore di τ_0 che a quello di f_{v0} . Tuttavia, è importante sottolineare che le prove di compressione diagonale, su cui è stato addestrato il modello di regressione, forniscono il valore di τ_0 e non di f_{v0} ; di conseguenza, il coefficiente ottenuto dovrebbe influenzare esclusivamente τ_0 .

Per risolvere questa discrepanza, è stato deciso di adottare due criteri di rottura a taglio distinti per le pareti rinforzate e non rinforzate.

- **Pareti non rinforzate:** si considerano sia il criterio di taglio-scorrimento che il taglio con fessurazione diagonale.
- **Pareti rinforzate:** si applica esclusivamente il criterio di rottura per fessurazione diagonale.

Questa scelta è giustificata dal fatto che la muratura rinforzata con intonaco armato può essere considerata come un elemento monolitico privo di giunti di malta, riducendo così la probabilità di rottura per scorrimento.

3.2.2.2. **Azioni agenti sulla struttura**

Le azioni agenti sul fabbricato si possono classificare attraverso la seguente distinzione, definita dalle NTC [10]:

- **Carichi permanenti (G):** azioni che agiscono durante tutta la vita nominale della costruzione; la loro variazione nel tempo è molto lenta tale da poterle considerare costanti nel tempo:
 - peso proprio degli elementi strutturali (G1);
 - peso proprio degli elementi non strutturali (G2);
 - spostamenti e deformazione impressi, ritiro incluso;
 - presollecitazione (P);
- **Carichi variabili (Q):** azioni che agiscono con valori istantanei che possono risultare sensibilmente diversi fra loro nel corso della vita nominale della struttura. Possono essere di lunga durata (se agiscono con un'intensità significativa, anche in modo non continuo, per un tempo non trascurabile rispetto alla vita nominale della struttura) e di breve durata (azioni che agiscono per breve periodo di tempo rispetto alla vita nominale della struttura).
 - sovraccarichi
 - vento
 - neve
 - azioni della temperatura.
- **Eccezionali (A):** incendi, esplosioni, urti.
- **Sismiche (E):** azioni derivanti dai terremoti.

Analisi dei carichi:

Di seguito si riportano le analisi dei carichi di solai e copertura:

SOLAIO P1							
	Elementi	Larghezza	Spessore	Peso dell'unità di superficie/volume	Carico parziale	G1 G2	Carico permanente G (per unità di superficie)
		[m]	[m]	[kN/m ³]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
G1 (strutturale)	Soletta in c.a.		0,04	25,00	1,00	2,96	8,35
	travetto traliccio	0,12	0,20	25,00	1,20		
	Pignatta	0,38	0,2	5,00	0,76		
G2 (non strutturale)	Piastrelle di ceramica		0,015	0,40	0,01	3,39	
	Cls di sabbia e ghiaia		0,05	24,00	1,20		
	Materassino tipo isogomma		0,01	2,65	0,03		
	Cls cellulare autoclavato espanso		0,05	5,20	0,26		
	Intonaco di calce e gesso		0,015	20,00	0,30		
	Tramezzi				1,60		
	- intonaco		0,01	20,00	0,20		
	- mattone forato		0,08	8	0,64		
	- intonaco		0,01	20,00	0,20		
					3,22		
Qk (carico variabile)	Ambienti ad uso residenziale					2,00	

Figura 46- Analisi dei carichi del solaio piano primo

SOTTOTETTO							
	Elementi	Larghezza	Spessore	Peso dell'unità di superficie/volume	Carico parziale	G1 G2	Carico permanente G (per unità di superficie)
		[m]	[m]	[kN/m ³]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
G2 (non strutturale)	Fittizio per tetto ventilato		0,01		0,01	2,10	2,60
	Legno di abete		0,02	6,00	0,12		
	intercapedine d'aria non ventilata		0,02		0,00		
	XPS		0,05	35,00	1,75		
	Polietilene		0,001		0,01		
	Legno di abete		0,035	6,00	0,21		
Qk (carico variabile)	Copertura accessibile per sola manutenzione					0,50	

Figura 47- Analisi dei carichi del solaio di sottotetto

COPERTURA							
	Elementi	Larghezza	Spessore	Peso dell'unità di superficie/volume	Carico parziale	G1 G2	Carico permanente G (per unità di superficie)
		[m]	[m]	[kN/m ³]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
G1 (strutturale)	Travi in legno lamellare	0,16	0,2	5,00	0,23	0,23	4,41
G2 (non strutturale)	Tegole piane marsigliesi		0,01		0,60	2,48	
	Guaina ardesiata		0,01		0,10		
	Legno di abete		0,03	6,00	0,18		
	intercapedine d'aria non ventilata		0,02				
	XPS		0,04	35,00	1,40		
	Listelli di contenimento	0,04	0,04	4,50	0,01		
	Polietilene		0,001		0,01		
	Legno di abete		0,03	6,00	0,18		
Qk (carico variabile)	Copertura accessibile per sola manutenzione					0,50	
qs (carico da neve)						1,20	

Figura 48- Analisi dei carichi della copertura

Come già detto, la copertura è stata considerata unicamente attraverso un carico distribuito applicato al solaio di sottotetto.

Azione sismica:

Inserendo nel PRO_SAM i parametri della struttura (**Figura 49**), è possibile definire l'azione sismica secondo le NTC [10].

Classe d'uso	Vita nominale V_n	Coeff. Uso	Periodo di riferimento V_r	Tipo di suolo	Categoria topografica
	[anni]		[anni]		
II	50.0	1.0	50.0	B	T1

Figura 49- Parametri della struttura

Di seguito sono riportati gli step eseguiti:

Passo 1

Classe d'uso

- I edifici di minor importanza per la sicurezza pubblica [edifici agricoli...]
- II edifici ordinari
- III edifici importanti in relazione alle conseguenze di un eventuale collasso (scuole, teatri...)
- IV edifici la cui funzionalità ha importanza fondamentale per la protezione civile (ospedali, municipi...)

Pericolosità e zonazione

pericolosità sismica

agS per SLV: 0.209

Modalità di progettazione semplificata per $agS < 0.075$

Strutture esistenti

- LC1: conoscenza limitata
- LC2: conoscenza adeguata
- LC3: conoscenza accurata

Fattore di confidenza FC: 1.35

< Indietro Avanti > Annulla Aggiorna

Figura 50- Passo 1 in cui vengono richieste la Classe d'uso della struttura e la località.

Valutazione della pericolosità sismica

ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Vertici della maglia elementare INGV [riferimento ED50]

Id nodo	Longitudine	Latitudine	Distanza [km]
20979	13.490	43.585	2.557
20980	13.559	43.585	4.626
20758	13.559	43.635	5.375
20757	13.490	43.635	3.747

Coordinate geografiche [riferimento WGS84]

Località: ANCONA (AN) Trova

Longitudine: 13.5070 Latitudine: 43.6030 Applica

Applica la Risposta Sismica Locale RSL

Parametri per le forme spettrali

	Pver	Tr	ag [g]	Fo	T*c
SLO	81	30.11	0.0427	2.457	0.280
SLD	63	50.29	0.0569	2.563	0.280
SLV	10	474.56	0.1741	2.454	0.295
SLC	5	974.79	0.2287	2.490	0.310

Periodo di riferimento per l'azione sismica

Vita V_n [anni]	Coefficiente uso C_u	Periodo V_r [anni]	Livello di sicurezza
50	1	50	100

Rimuovi limiti V_r e T_r (di norma NO) Reset Calcola

Nota: per il calcolo dei parametri sismici
1) inserire le coordinate geografiche 2) introdurre V_n e C_u
Per le isole è possibile utilizzare come località: gruppo isole N [con N = 1, 2, 3, 4, 5]

Annulla OK

Figura 51- Scheda relativa alla valutazione della pericolosità sismica

Passo 2

Categoria di suolo di fondazione

A Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi ...

B Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti ...

C Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti ...

D Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti ...

E Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D ...

Categoria topografica

T1

T2 in sommità al pendio

T3 in cresta al rilievo con moderata

T4 in cresta al rilievo

100 quota relativa (%)

Spettri di progetto

Usa spettri esterni Sfoglia...

S (oriz.)

Sv (vert.)

< Indietro Avanti > Annulla Aggiorna

Figura 52- Passo 2 in cui si specificano la categoria di suolo di fondazione e la categoria topografica

Passo 3

Parametri e fattori spettrali

S.L.	ag	S	Fo	Fv	TB	TC	TD
SLO	0.043	1.200	2.457	0.685	0.132	0.397	1.771
SLD	0.057	1.200	2.563	0.825	0.132	0.397	1.828
SLV	0.174	1.200	2.454	1.382	0.138	0.414	2.296
SLC	0.229	1.172	2.490	1.608	0.144	0.431	2.515

Verticale per tutti: 1.000

0.050 0.150 1.000

eta SLO q SLD x q SLD y q SLD z q SLU x q SLU y q SLU z

1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 Aiuto...

Smorzamento... 1.5 1.5 <= Esistenti v. fragili

Verifiche

q=1 per ND

q >= 1

Regolarità

in pianta

in altezza

Edifici isolati

2.0 T is

10.0 s esi

Info...

S (oriz.)

Sv (vert.)

< Indietro Avanti > Annulla Aggiorna

Figura 53- Passo 3 in cui è riportato il riepilogo dei parametri dello spettro e valori relativi ad analisi lineari che, nel nostro caso, non vengono presi in considerazione.

Passo 4

Dati comuni per le analisi

Quota spiccato [cm] 0.0

Contributo carichi in fondazione

Eccentricità aggiuntiva X: 5 Y: 5

ex. muratura

Spost. relativo rapp. SLC/SLD 5

Dati per analisi statica lineare e non lineare

Altezza edificio [cm] 658.33

N. orizzontamenti 2

Fatt. Lambda [0.85 - 1] 1.0

Calcola periodi T1

Periodo T1 [primo modo] dir. x-x 0.117 dir. y-y 0.13 dir. z-z 0.036

Sd (T1) - SLU 0.466 0.496 0.202

Se (T1) - SLD 0.163 0.174 0.039

Rapp T1/TrZ 1.129 1.259

suggerito:

Accelerazione uniforme [Fi=Ph] NO

Eccentricità convenzionale con momenti Mz NO

Usa spostamenti medi di piano per pushover SI

S (oriz.)

Sv (vert.)

< Indietro Avanti > Annulla Aggiorna

Figura 54- Passo 4

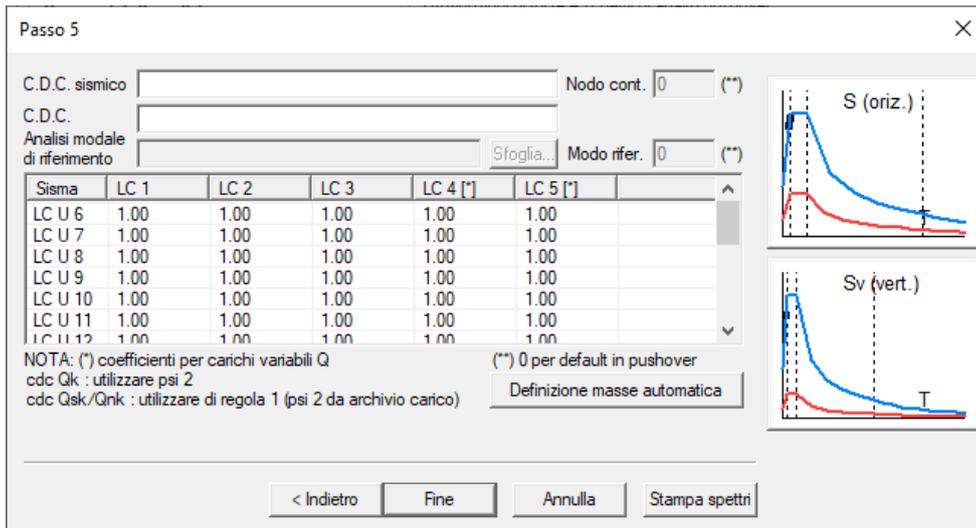


Figura 55- Passo 5 in cui si devono definire le masse sismiche. È disponibile un comando per la definizione automatica: utilizzandolo il programma applicherà automaticamente i coefficienti necessari considerando un peso unitario per i carichi permanenti ed il coefficiente ψ_2 per i variabili dei solai e per il carico da neve dei solai di copertura.

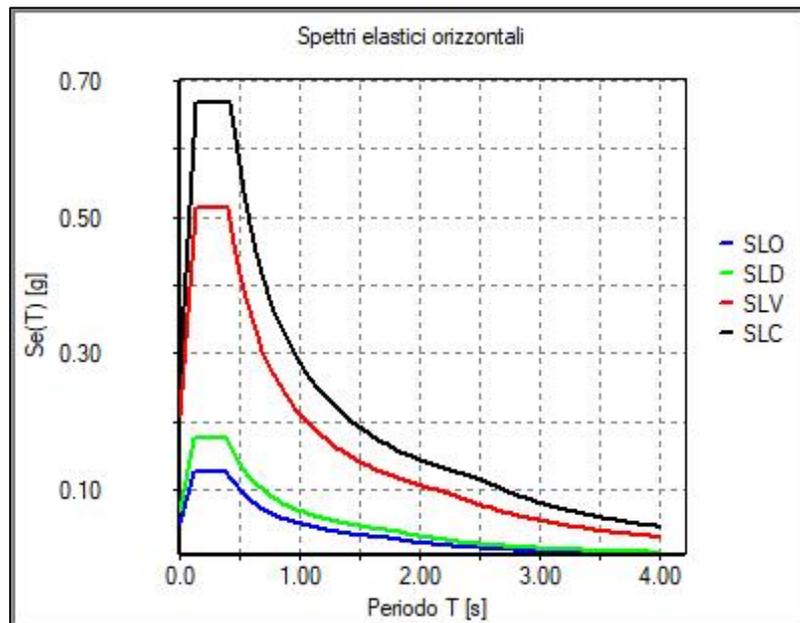


Figura 56- Spettri di risposta elastici

3.3. Analisi strutturale

3.3.1. Analisi modale

Il primo passo dell'analisi è stato realizzare un'analisi modale della struttura, al fine di ottenere una prima comprensione delle modifiche indotte dal sistema di rinforzo Sismactive Thermal System sul comportamento dinamico dell'edificio.

L'analisi modale è stata eseguita con il software PRO_SAM a partire dal modello tridimensionale precedentemente descritto, ed ha permesso di identificare:

- **Forme modali:** visualizzazione dei modi di vibrare della struttura.
- **Frequenza di vibrazione (in Hz o 1/s):** frequenze naturali per ogni modo di vibrare.
- **Percentuali di massa partecipante (%):** quantità di massa che viene eccitata per ciascun modo di vibrare.

I risultati dell'analisi sono discussi nei successivi capitoli.

3.3.2. Analisi statica non lineare (Pushover)

Secondo quanto riportato nelle normative tecniche [10], l'analisi statica non lineare prevede l'applicazione all'edificio dei carichi gravitazionali e, in corrispondenza degli orizzontamenti della costruzione, di un sistema di forze orizzontali proporzionali alle forze d'inerzia, con una risultante "taglio alla base" indicato con **Fb**.

Tali forze sono scalate in modo da far crescere monotonamente, sia in direzione positiva che negativa e fino al raggiungimento delle condizioni di collasso locale o globale, lo spostamento orizzontale **dc** di un punto di controllo coincidente con il centro di massa dell'ultimo livello della costruzione.

L'analisi restituirà un diagramma **Fb-dc** (taglio alla base- spostamento), che indica la curva di capacità della struttura.

È necessario utilizzare almeno due distribuzioni di forze d'inerzia, di cui una appartenente alle distribuzioni principali (Gruppo 1) e una alle distribuzioni secondarie (Gruppo 2), descritte di seguito.

Gruppo 1 – Distribuzioni principali:

- Se il modo di vibrare fondamentale nella direzione considerata ha una partecipazione di massa superiore al 75% ed a condizione di utilizzare come seconda distribuzione la 2 a), si può adottare una distribuzione proporzionale alle forze statiche.
- se il modo di vibrare fondamentale nella direzione considerata ha una partecipazione di massa superiore al 75%, si può applicare una distribuzione corrispondente a un andamento di accelerazioni proporzionale alla forma del modo fondamentale di vibrare nella direzione considerata.
- In ogni caso è possibile utilizzare una distribuzione corrispondente all'andamento delle forze di piano agenti su ciascun orizzontamento. Questa distribuzione deve includere, nella direzione considerata, un numero di modi con una partecipazione di massa complessiva non inferiore all'85%. L'uso di tale distribuzione diventa obbligatorio se il periodo fondamentale della struttura supera $1,3 T_c$.

Gruppo 2 – Distribuzioni secondarie:

- a) distribuzione di forze ottenuta considerando accelerazioni uniformi lungo l'altezza della costruzione;
- b) distribuzione adattiva, che cambia al crescere dello spostamento del punto di controllo in funzione della plasticizzazione della struttura;
- c) distribuzione multimodale, considerando almeno sei modi significativi.

Per ciascuno stato limite analizzato, la verifica consiste nel confronto tra la curva di capacità e la domanda di spostamento, permettendo di valutare il livello di prestazione raggiunto. A tal fine, il sistema strutturale reale viene solitamente rappresentato da un sistema equivalente a un grado di libertà (oscillatore semplice) (**Figura 57**).

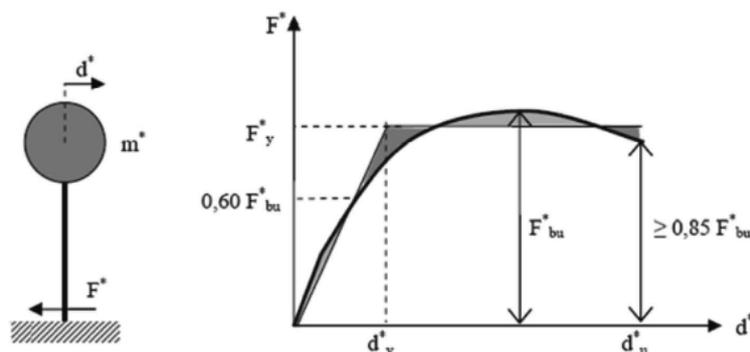


Figura 57- Sistema e diagramma bilineare equivalente

3.3.3. Applicazione al caso di studio

Nel modello analizzato tramite il PRO_SAM, le azioni sismiche sono state simulate come mostrato in **Figura 58**, considerando:

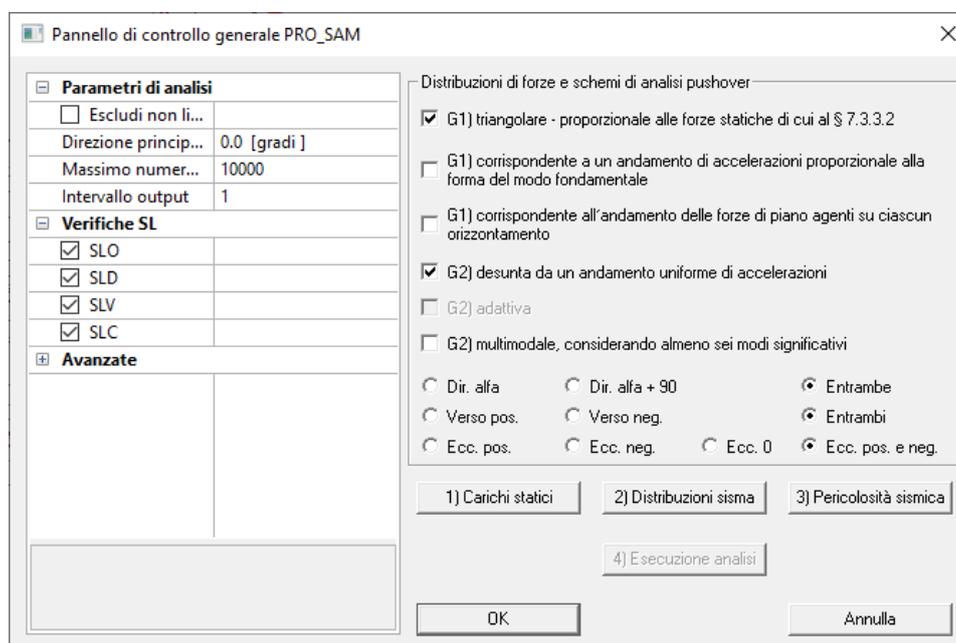


Figura 58- Pannello che riporta le azioni sismiche, la direzione, il verso e le eccentricità considerate

- 1) Distribuzione di forze del gruppo 1 con andamento triangolare, proporzionale alle forze statiche.
- 2) Distribuzione di forze del gruppo 2 desunta da un andamento uniforme di accelerazioni.

Ogni distribuzione di forze considerata è stata applicata in entrambe le direzioni principali (X e Y), alternando il verso positivo e negativo. Inoltre, è stata considerata un'eccentricità sia positiva che negativa. Ne risultano quindi un totale di 16 casi di carico:

- | | |
|-------------------|--------------------|
| 1) 1_X+_e+ | 9) 2_X+_e+ |
| 2) 1_X+_e- | 10) 2_X+_e- |
| 3) 1_X-_e+ | 11) 2_X-_e+ |
| 4) 1_X-_e- | 12) 2_X-_e- |
| 5) 1_Y+_e+ | 13) 2_Y+_e+ |
| 6) 1_Y+_e- | 14) 2_Y+_e- |
| 7) 1_Y-_e+ | 15) 2_Y-_e+ |
| 8) 1_Y-_e- | 16) 2_Y-_e- |

In cui il numero indica il gruppo a cui appartengono.

Nell'analisi pushover vengono utilizzati i legami costitutivi e criteri di rottura discussi nel capitolo 3.2.2.1.

4. RISULTATI

Nel presente capitolo verranno commentati i risultati ottenuti dalle diverse analisi applicate nel corso della tesi.

Per prima cosa si inizierà con una discussione dettagliata sui risultati dell'analisi di regressione, evidenziando le relazioni significative tra le variabili in esame e l'importanza di queste relazioni nel contesto della nostra ricerca. Successivamente, verranno presentati i risultati dell'analisi modale e quella di pushover.

4.1. Analisi di regressione

Di seguito (Figura 59) sono riportati i risultati del modello di regressione polinomiale adottato:

```
Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    1.171e+00  4.437e-01   2.640 0.009715 **
poly(resistenza_a_compressione_malta_intonaco, 2, raw = TRUE)1  3.582e-01  1.151e-01   3.113 0.002461 **
poly(resistenza_a_compressione_malta_intonaco, 2, raw = TRUE)2 -1.982e-02  6.749e-03  -2.936 0.004187 **
poly(area_rete, 2, raw = TRUE)1    6.313e-05  3.627e-05   1.740 0.085095 .
poly(area_rete, 2, raw = TRUE)2   -1.372e-08  3.176e-09  -4.320 3.91e-05 ***
poly(resistenza_a_trazione_singola_barra, 2, raw = TRUE)1    3.927e-01  2.124e-01   1.849 0.067619 .
poly(resistenza_a_trazione_singola_barra, 2, raw = TRUE)2   -7.251e-02  2.035e-02  -3.564 0.000579 ***
poly(modulo_elastico_a_trazione_singola_barra, 2, raw = TRUE)1 -9.589e-01  8.330e-02 -11.512 < 2e-16 ***
poly(modulo_elastico_a_trazione_singola_barra, 2, raw = TRUE)2  9.754e-03  8.172e-04  11.936 < 2e-16 ***
poly(allungamento_a_rottura_singola_barra, 1, raw = TRUE)    7.207e-01  1.160e-01   6.214 1.44e-08 ***
poly(densità_muratura, 1, raw = TRUE)    6.114e-03  2.419e-02   0.253 0.800973
poly(spessore_provino, 1, raw = TRUE)   -5.951e-04  2.794e-04  -2.130 0.035853 *
poly(spessore_coating, 1, raw = TRUE)    1.608e-01  1.048e-02  15.346 < 2e-16 ***
poly(res_taglio_non_rinforzata, 1, raw = TRUE)   -3.214e-01  4.332e-01  -0.742 0.459952
una_faccia    1.060e+01  1.896e+00   5.593 2.23e-07 ***
due_facce    1.231e+01  1.894e+00   6.497 4.00e-09 ***
presenza_sacco -1.736e-01  7.104e-02  -2.444 0.016392 *
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1944 on 93 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9375,    Adjusted R-squared:  0.9267
F-statistic: 87.13 on 16 and 93 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Figura 59- Risultati del modello di regressione

Ogni variabile predittiva nel modello è rappresentata con i seguenti parametri:

- **Estimate (Stima):** Indica la variazione attesa nella variabile dipendente per ogni unità di incremento della variabile predittiva, mantenendo costanti le altre variabili.
- **Std. Error (Errore standard):** Misura l'incertezza della stima. Valori più bassi indicano stime più precise.
- **t value**

- **Pr(>|t|) (p-value):** Indica la probabilità che l'effetto della variabile predittiva sia dovuto al caso. Un p-value basso (tipicamente < 0.05) suggerisce che l'effetto della variabile è statisticamente significativo.

Le stelle accanto ai p-value indicano il livello di significatività:

- *** per $p < 0.001$
- ** per $p < 0.01$
- * per $p < 0.05$
- . per $p < 0.1$

4.1.1. **Studio delle variabili**

Lo studio dei coefficienti del modello ci permette di comprendere quali fattori contribuiscono maggiormente al miglioramento della resistenza a taglio della struttura in muratura, ottenuto con all'applicazione di un ipotetico rinforzo in CRM in fibra di vetro.

Tra le variabili esaminate, alcune emergono come particolarmente rilevanti, mentre altre sembrano avere un impatto marginale.

Variabili più influenti

Al primo posto troviamo il **modulo elastico a trazione della barra** che presenta un coefficiente di -0.9589 e un p-value estremamente significativo, seguito **dall'allungamento a rottura della barra**, con un coefficiente di 0.7207 e un p-value molto basso. Questo dato rende evidente come una maggiore capacità di deformazione della barra in GFRP risulti in un maggiore incremento della resistenza a taglio.

Molto importante è lo **spessore del coating**, con un coefficiente di 0.1608 e un p-value significativo, mostrando che un maggiore spessore del rinforzo porta ad un aumento della capacità a taglio.

Altro fattore cruciale è rappresentato dalla **resistenza a compressione della malta**. Il coefficiente di 0.3582 indica una proporzionalità diretta tra la resistenza della malta e quella a taglio. Tuttavia, il secondo termine negativo (-0.01982) suggerisce che, oltre una certa

soglia, ulteriori incrementi nella resistenza della malta potrebbero non apportare benefici significativi, probabilmente a causa di una riduzione di flessibilità strutturale.

L'area della maglia mostra un effetto misto. Sebbene il primo termine sia positivo, suggerendo un potenziale miglioramento, il secondo termine negativo indica che un'area eccessiva potrebbe avere un effetto avverso sulla resistenza a taglio. Stessa tendenza si può riscontrare nell'articolo [5].

Infine, riguardo alle variabili categoriche, si può notare (come ci si aspettava) un impatto molto significativo relativo alle facce di applicazione del rinforzo, con coefficienti di 10.60 per **una faccia di applicazione** e 12.31 per **due facce di applicazione**.

Variabili meno influenti

La **densità della muratura** ha mostrato un coefficiente molto basso e non significativo; tuttavia, si è scelto di includerla nella regressione poiché rappresenta l'unico fattore capace di definire la tipologia costruttiva della muratura¹.

Lo **spessore del provino** presenta un coefficiente negativo, ciò significa che un incremento di questa variabile porta ad una leggera riduzione del coefficiente migliorativo. Anche la **resistenza a trazione della barra**, pur mostrando un certo grado di significatività, non ha molta influenza sulla resistenza a taglio.

Effetto simile si osserva anche per la **presenza del sacco** e la **resistenza a taglio non rinforzata**, che contribuiscono in modo modesto e non decisivo ai risultati complessivi, cosa probabilmente dovuta ad una insufficiente quantità di dati analizzati.

¹ Nel dataset utilizzato non sono presenti dati sufficienti a ricoprire tutte le tipologie costruttive viste nella Figura 5, perciò si è dovuta mantenere la variabile "densità della muratura" come mezzo di distinzione.

4.1.2. Valutazione del modello

Per prima cosa si può controllare il **coefficiente di determinazione R^2** ottenuto dal modello, pari a 0.9375. Questo significa che circa il 93.75% della variabilità del coefficiente migliorativo è spiegata dalle variabili indipendenti incluse, suggerendo che il modello ha un alto grado di adattamento ai dati e spiega gran parte della variazione osservata nella variabile dipendente.

L'**Adjusted R^2** (R^2 aggiustato) (**Figura 60**), pari a 0.9267, è leggermente inferiore. Questo è fondamentale poiché tiene conto del numero di variabili utilizzate nel modello. Il fatto che tale valore rimanga elevato conferma che la maggior parte delle variabili utilizzate apporta un contributo significativo alla spiegazione del risultato.

Il **test F** complessivo, infine, risulta altamente significativo ($p\text{-value} < 2.2e-16$), indicando un modello con un buon potere predittivo. Questo risultato giustifica l'uso del modello scelto per rispondere alla domanda di ricerca.

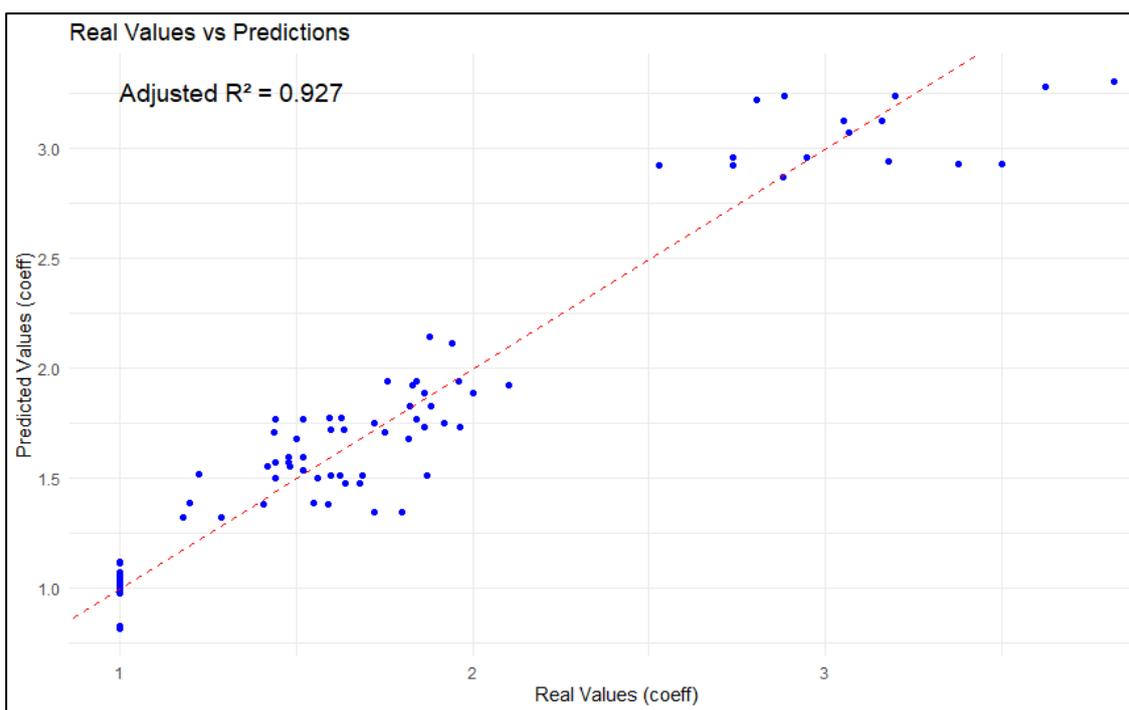


Figura 60- Grafico rappresentante R^2 aggiustato

Di fondamentale importanza per la valutazione del modello, inoltre, è l'analisi grafica dei residui vista di seguito.

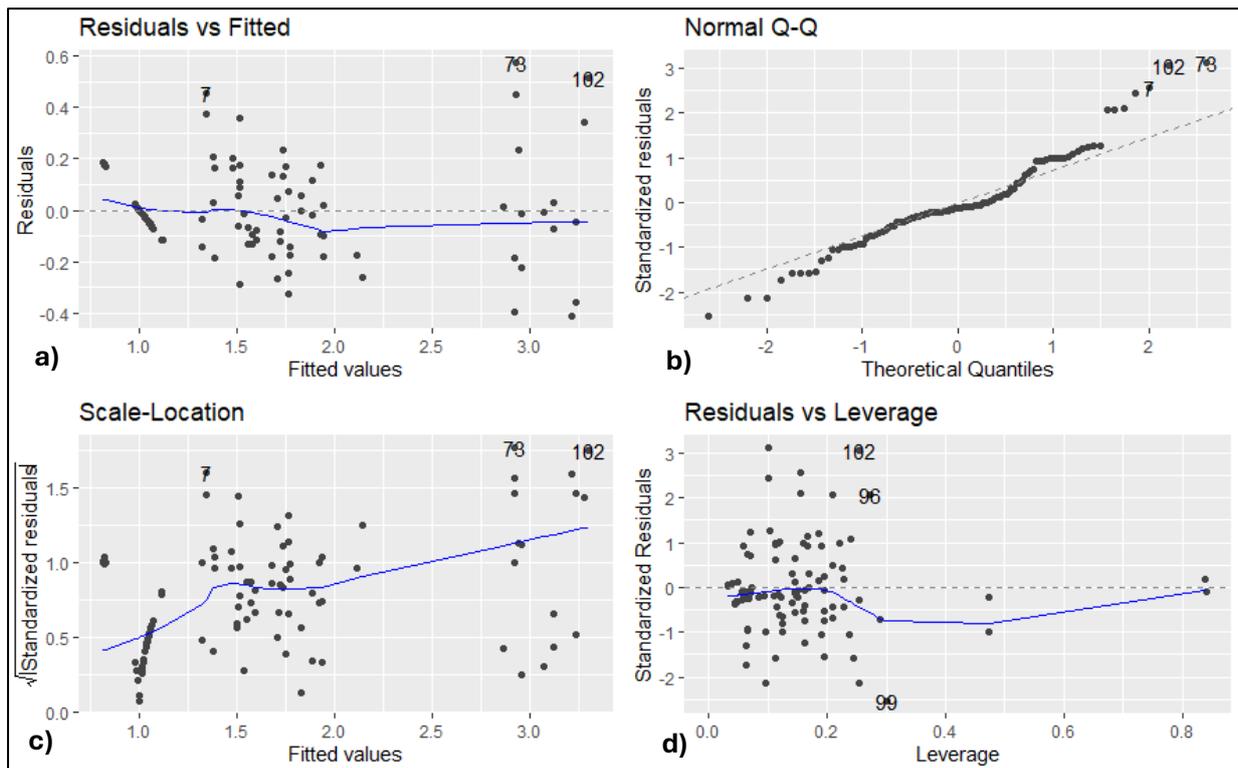


Figura 61- Grafici dei residui

In Figura 61 sono mostrati i seguenti grafici:

- a) **Residui - valori predetti:** mostra i residui del modello rispetto ai valori predetti (fitted values). I residui appaiono distribuiti abbastanza casualmente intorno allo zero, indicando quindi l'assenza di *eteroschedasticità*.
- b) **Grafico quantile-quantile (QQ plot):** confronta la distribuzione dei residui con una distribuzione normale. Nel grafico fornito, nonostante piccoli scostamenti alle estremità, si nota come la maggior parte dei punti si allinei alla diagonale, il che indica che la distribuzione dei residui è vicina a quella normale. Conferma il rispetto dell'assunzione fondamentale di *normalità* dei residui.
- c) **Scale-location plot:** nel grafico la radice quadrata dei residui standardizzati viene tracciata rispetto ai valori stimati. Si nota un trend crescente nei punti, segnalando una possibile eteroschedasticità nel modello.
- d) **Residuals – Leverage:** consente di identificare punti influenti, ovvero osservazioni che potrebbero avere un impatto sproporzionato sui risultati del modello. In questo

grafico, sono presenti alcuni punti che si discostano, come il 96, il 99, e il 102, suggerendo che alcune osservazioni potrebbero avere un'influenza elevata sul modello.

Nel complesso, il modello sembra fornire buoni risultati anche se presenta segni di eteroschedasticità e qualche outlier.

4.1.3. Formula di regressione

La formula risultante dalla regressione è la seguente:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_1^2 + \beta_3 X_2 + \beta_4 X_2^2 + \beta_5 X_3 + \beta_6 X_3^2 + \beta_7 X_4 + \beta_8 X_4^2 + \beta_9 X_5 + \beta_{10} X_6 + \beta_{11} X_7 + \beta_{12} X_8 + \beta_{13} X_9 + \beta_{14} X_{10} + \beta_{15} X_{11} + \beta_{15} X_{12}$$

Figura 62- Formula di regressione

I cui valori sono indicati nella **Tabella 1**.

Tabella 1- Legenda dei valori della formula di regressione

Coefficienti		Variabili	
β_0	4,01803	γ	Coefficiente migliorativo
β_1	-0,08848	X_1	Resistenza a compressione malta intonaco [Mpa]
β_2	0,00444	X_2	Area maglia [mm ²]
β_3	0,00002	X_3	Resistenza a trazione singola barra [kN]
β_4	0,00000	X_4	Modulo elastico a trazione singola barra [GPa]
β_5	-0,41310	X_5	Allungamento a rottura singola barra [%]
β_6	-0,00047	X_6	Densità muratura (NTC) [kN/m ³]
β_7	-0,60342	X_7	Presenza sacco
β_8	0,00591	X_8	Una faccia
β_9	0,16922	X_9	Due facce
β_{10}	-0,12382	X_{10}	Spessore provino [mm]
β_{11}	-0,00008	X_{11}	Spessore coating [mm]
β_{12}	0,07140	X_{12}	Resistenza a taglio non rinforzata [N/mm ²]
β_{13}	-3,91146		
β_{13}	-3,91146		
β_{14}	11,78022		
β_{15}	13,41493		
β_{16}	-0,52664		

Per prevenire l'insorgere di valori inopportuni nei casi più sfavorevoli, come ad esempio in presenza di un sacco con una sola faccia rinforzata e uno spessore ridotto, la formula è stata calibrata in modo da restituire un valore minimo pari a quello stabilito da normativa nella tabella C8.5.2 (**Figura 6**). Questo ha permesso di evitare che l'incertezza del modello di regressione, dovuta ad una mancanza di osservazioni sufficienti, possa restituire valori anomali.

In riferimento al caso di studio in cui si analizza l'intonaco CRM di DIASEN (Sismactive Thermal System), con le caratteristiche in **Figura 63**, applicato alle murature dell'edificio di riferimento (**Figura 22**), la regressione ha mostrato i seguenti valori del coefficiente migliorativo:

$f_{c,c}$ Resistenza a compressione malta intonaco [Mpa]	Area rete [mm ²]	Resistenza a trazione singola barra [kN]	Modulo elastico a trazione singola barra [GPa]	Allungamento a rottura singola barra [%]	spessore coating [mm]
10,10	2500,00	3,15	72,00	3,05	50,00

Figura 63- Caratteristiche del rinforzo Sismactive Thermal System

Due facce di applicazione

- **Muro 380 mm:** 4.50, ridotto a 3 per maggiore sicurezza.
- **Muro 250 mm:** 4.51 ridotto a 3.

Una faccia di applicazione

- **Muro 380 mm:** 2.87
- **Muro 250 mm:** 2.88

Si può notare come lo spessore del muro non influisca molto sul risultato finale.

Per completezza, si mostrano i valori dei coefficienti migliorativi ottenuti dalla regressione per diverse tipologie di muratura (**Figura 64**, **Figura 65**), utilizzando come riferimento il muro di 380 mm.

Tipologia muratura	Regressione
Muratura in pietrame disordinata	3,79
Muratura a conci sbozzati	4,31
Muratura in pietra a spacco con buona tessitura	4,11
Muratura irregolare in pietra tenera	5,02
Muratura a conci regolari in pietra tenera	4,98
Muratura a blocchi lapidei squadrate	3,85
Muratura in mattoni pieni con malta di calce	4,50
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia	4,76

Figura 64- Coefficiente migliorativo muro da 380 mm nel caso di due facce di applicazione del rinforzo

Tipologia muratura	Regressione
Muratura in pietrame disordinata	2,50
Muratura a conci sbozzati	2,68
Muratura in pietra a spacco con buona tessitura	2,47
Muratura irregolare in pietra tenera	3,39
Muratura a conci regolari in pietra tenera	3,34
Muratura a blocchi lapidei squadrate	2,22
Muratura in mattoni pieni con malta di calce	2,87
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia	3,12

Figura 65- Coefficiente migliorativo muro da 380 mm nel caso di una faccia di applicazione del rinforzo

In conclusione, limitando il coefficiente migliorativo ad un valore massimo di 3 (a favore di sicurezza), si può notare come, in alcuni casi, il rinforzo applicato su un solo lato della parete possa risultare non solo sufficiente, ma addirittura più vantaggioso. Questo consentirebbe di ridurre il materiale necessario, abbattendo di conseguenza i costi dell'intervento.

4.1.4. Confronti con normativa

I risultati ottenuti possono essere confrontati con quelli presenti in letteratura per valutare la coerenza delle stime e identificare eventuali differenze significative. Questo può offrire spunti per migliorare il modello di calcolo o per affinare l'interpretazione dei risultati.

Prendendo come riferimento i provini presenti nel dataset e confrontando i coefficienti previsti da normativa (**Figura 6**) con i risultati ottenuti dalla regressione, emerge che, in

media, la regressione restituisce coefficienti migliorativi superiori del 23% rispetto a quelli previsti dalle NTC.

Di seguito (**Figura 66**, **Figura 67**), invece, è riportato il confronto tra i coefficienti migliorativi previsti dalle normative e quelli ottenuti tramite la regressione, considerando le diverse tipologie di muratura. Il riferimento utilizzato è il rinforzo DIASEN (**Figura 63**) e murature di spessore 380mm senza sacco interno.

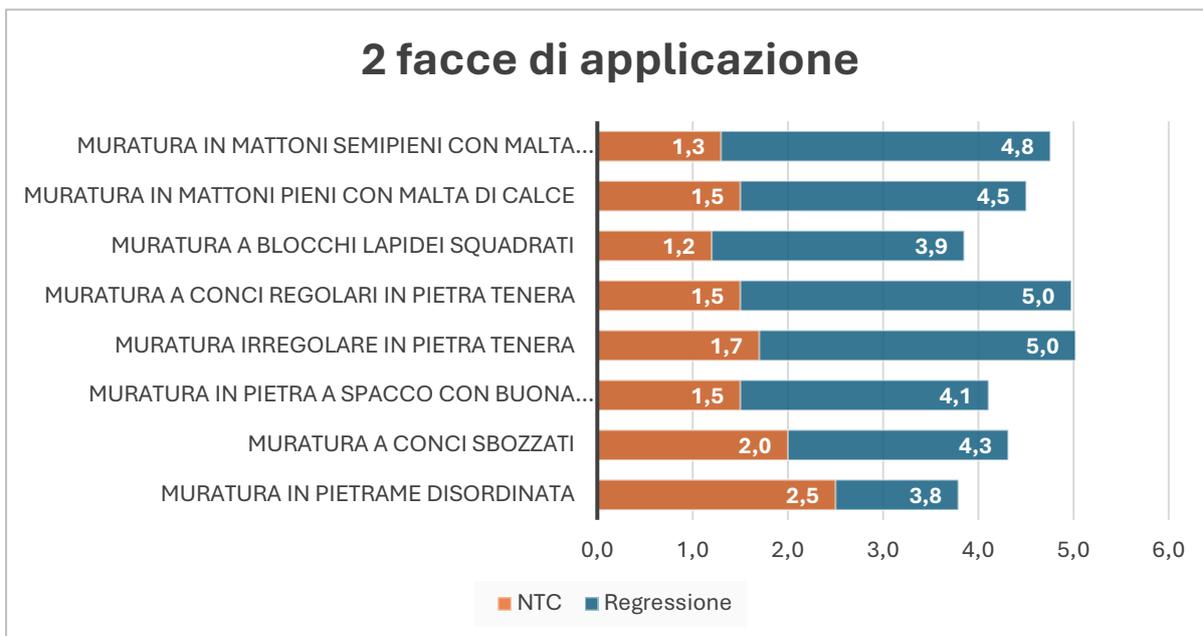


Figura 66- Confronto del coefficiente migliorativo nel caso di rinforzo applicato su due facce

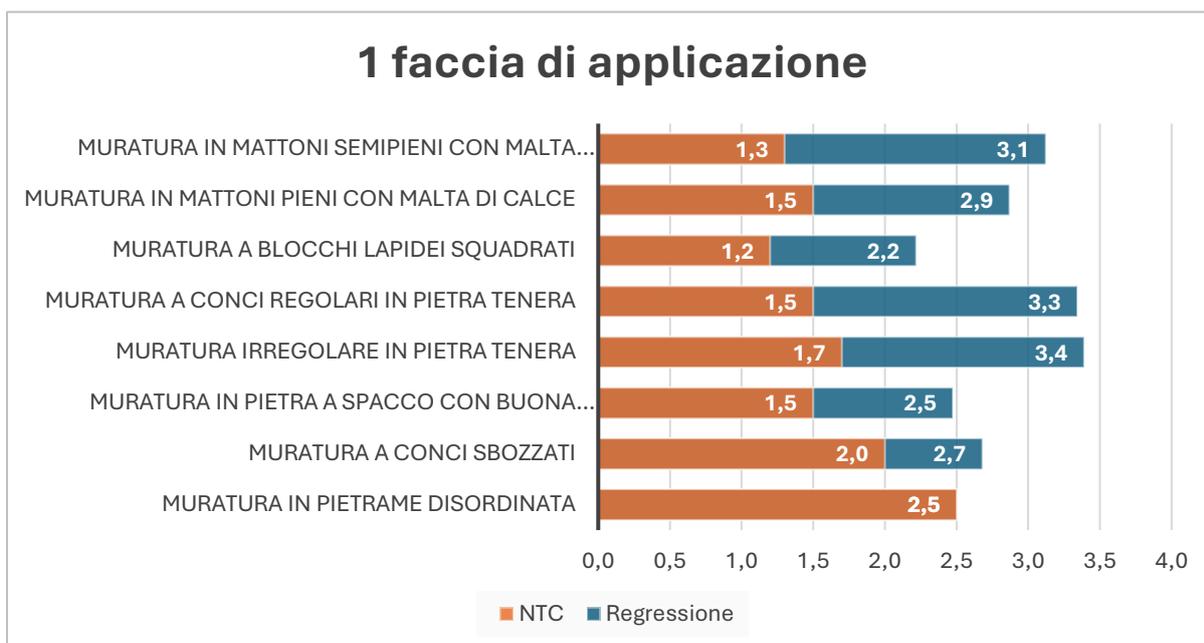
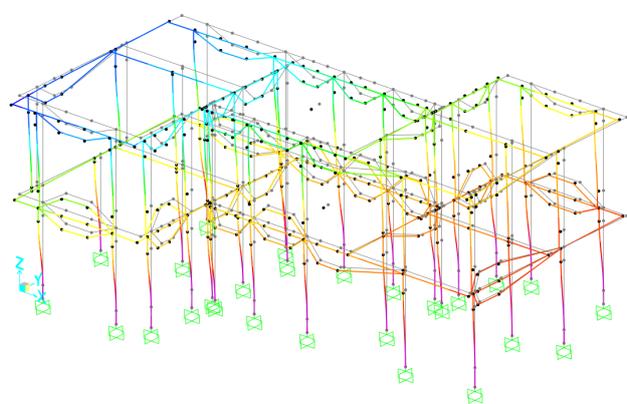


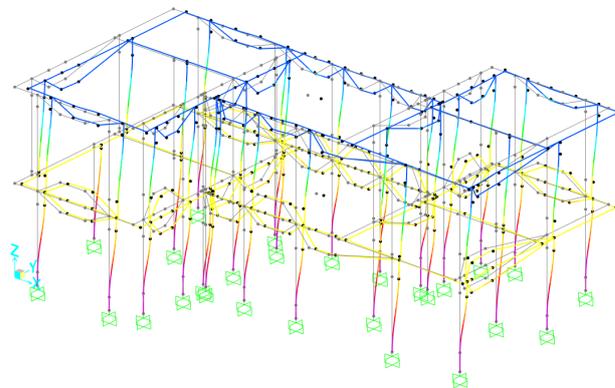
Figura 67- Confronto del coefficiente migliorativo nel caso di rinforzo applicato su una faccia

4.2. Analisi modale

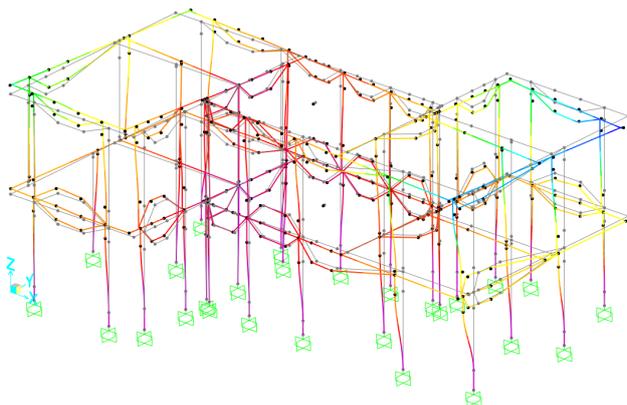
Nelle Figure di seguito sono mostrati i modi di vibrare di tutti i casi analizzati.



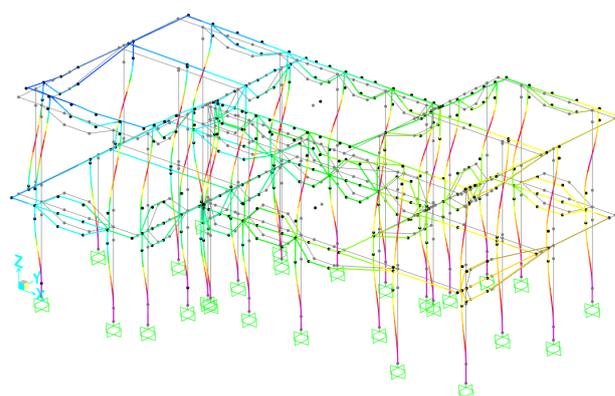
a)



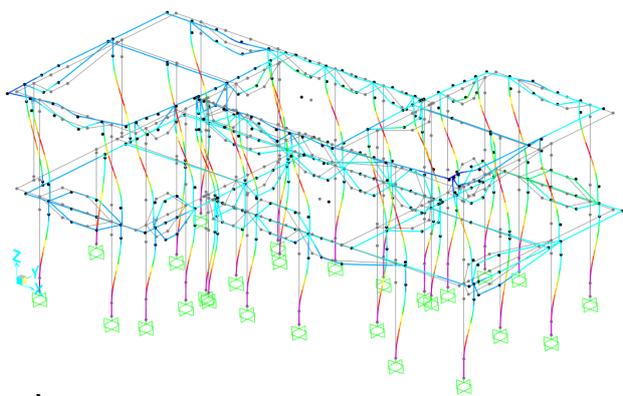
b)



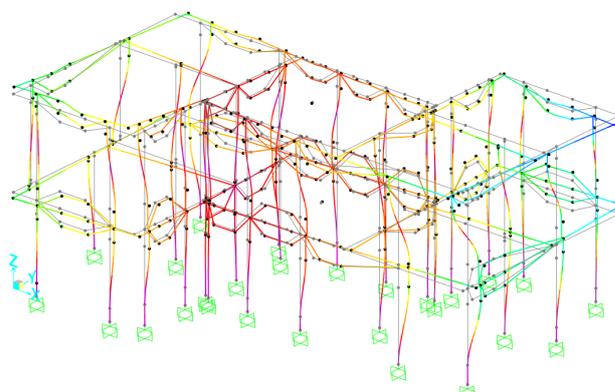
c)



d)

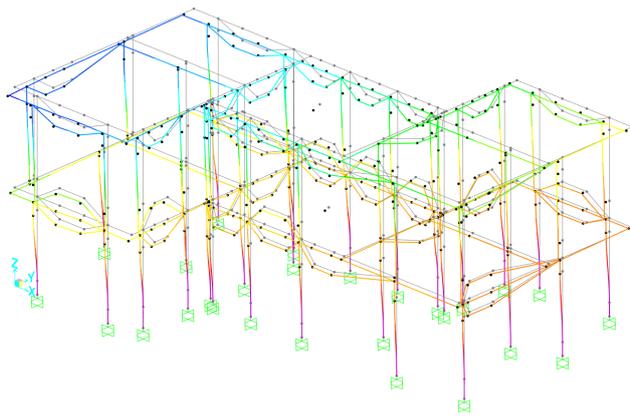


e)

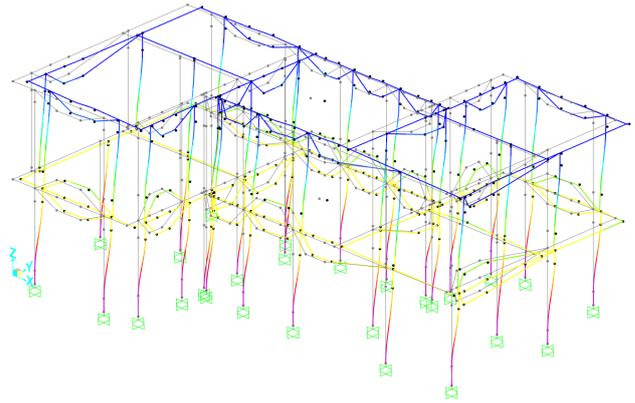


f)

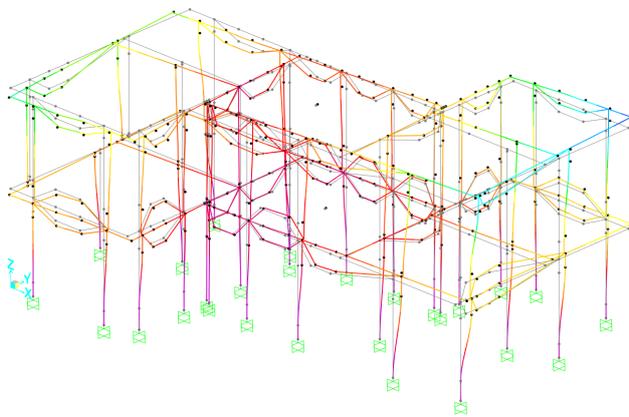
Figura 68- Modi di vibrare del modello non rinforzato (NR): Modo 1 (a); Modo 2 (b); Modo 3 (c); Modo 4 (d); Modo 5 (e); Modo 6 (f).



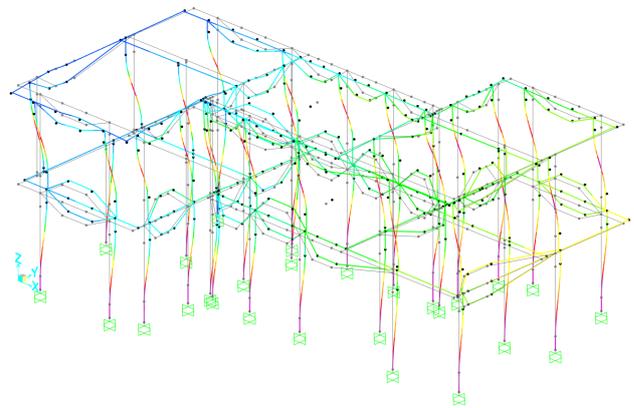
a)



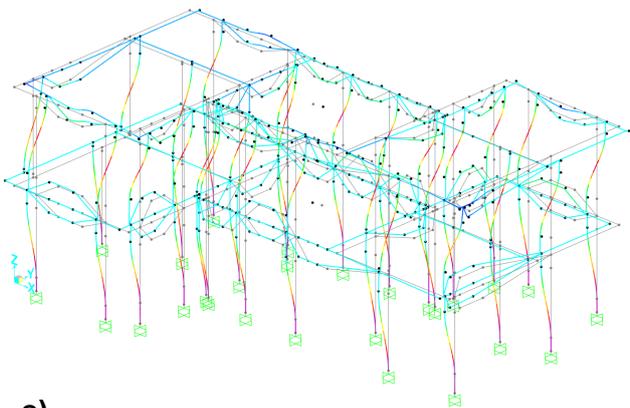
b)



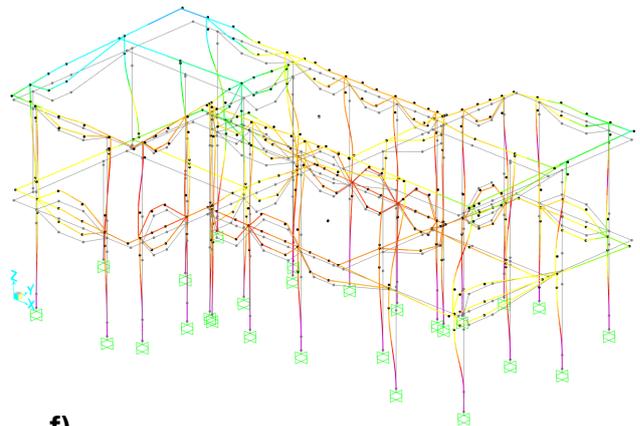
c)



d)

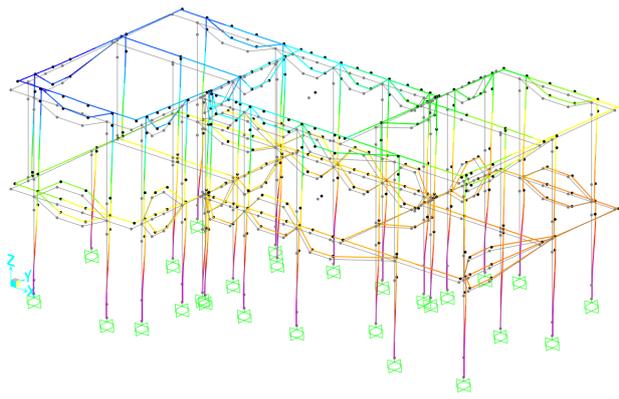


e)

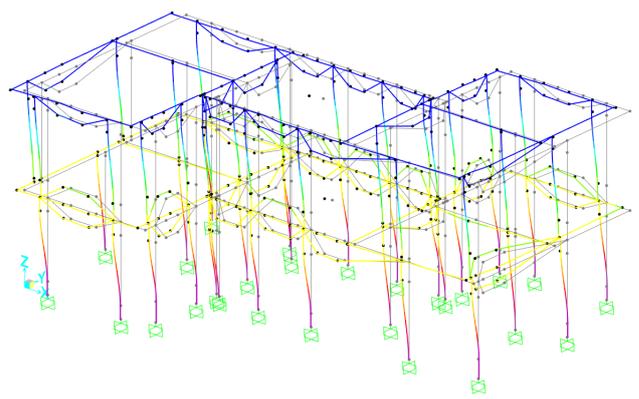


f)

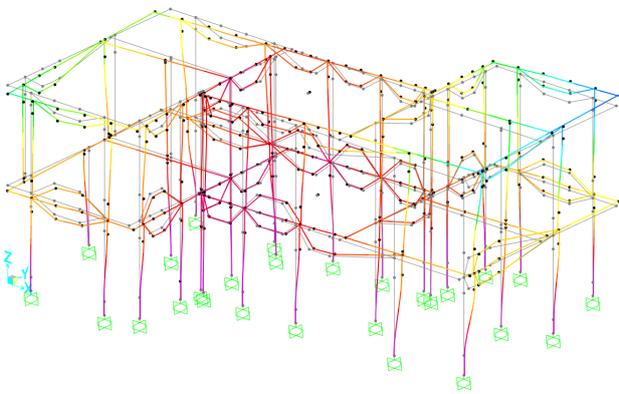
Figura 69- Modi di vibrare del modello UNI_2: Modo 1 (a); Modo 2 (b); Modo 3 (c); Modo 4 (d); Modo 5 (e); Modo 6 (f).



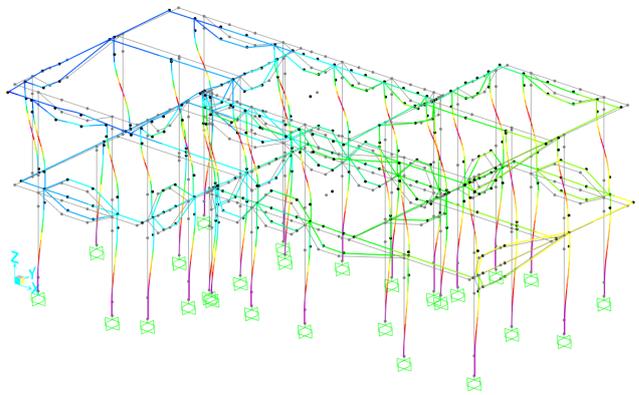
a)



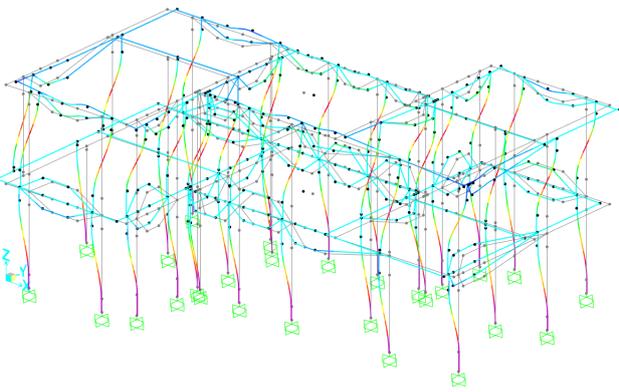
b)



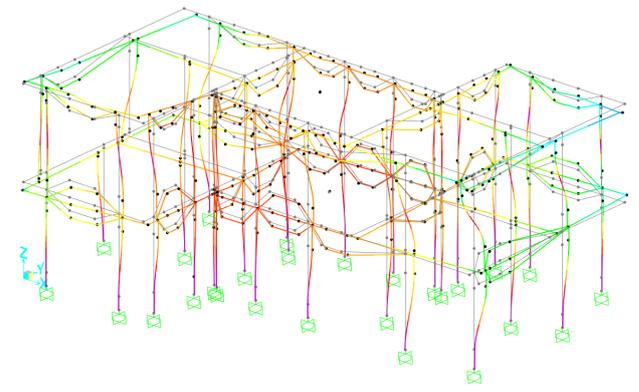
c)



d)

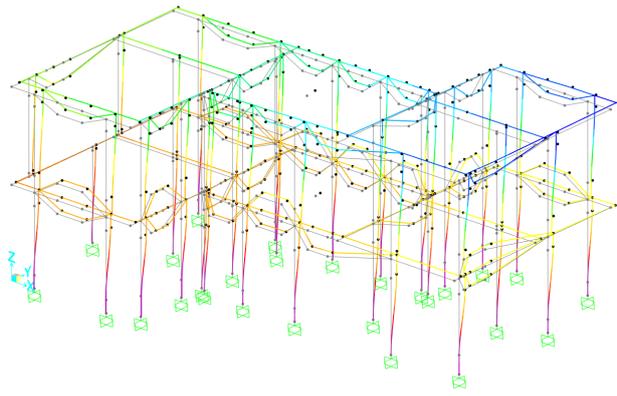


e)

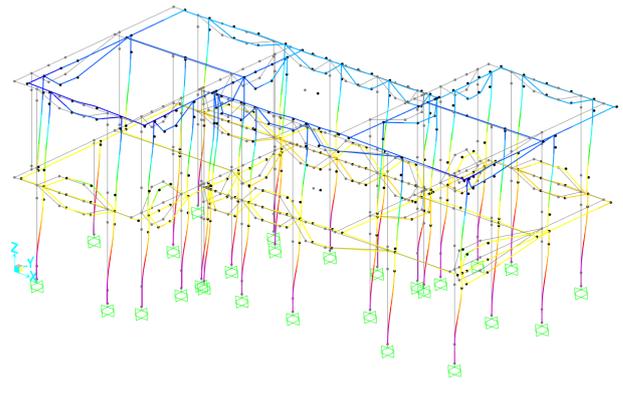


f)

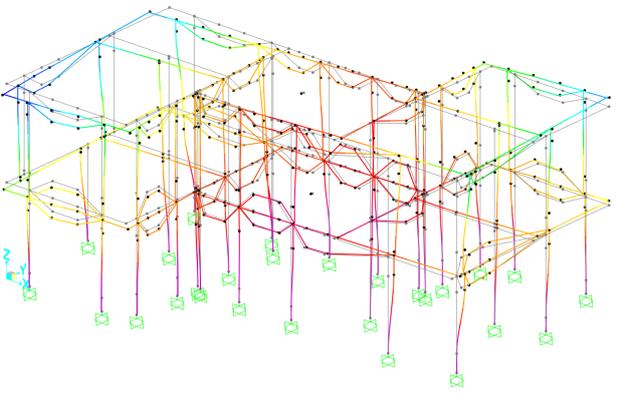
Figura 70- Modi di vibrare del modello UNI_1: Modo 1 (a); Modo 2 (b); Modo 3 (c); Modo 4 (d); Modo 5 (e); Modo 6 (f).



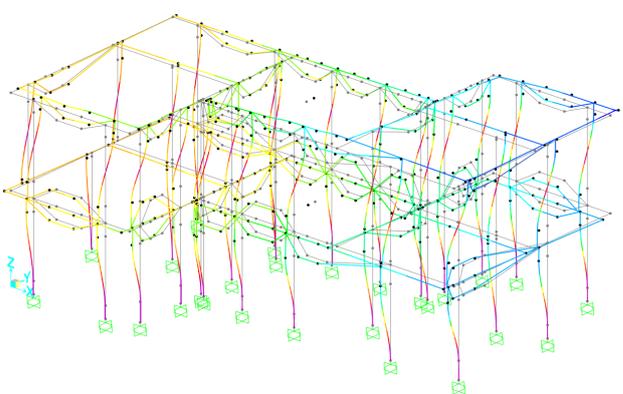
a)



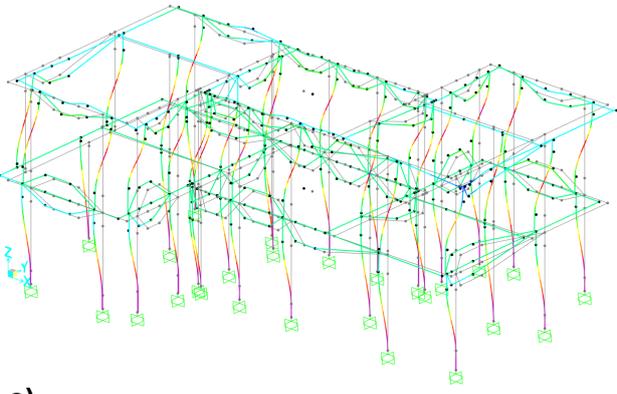
b)



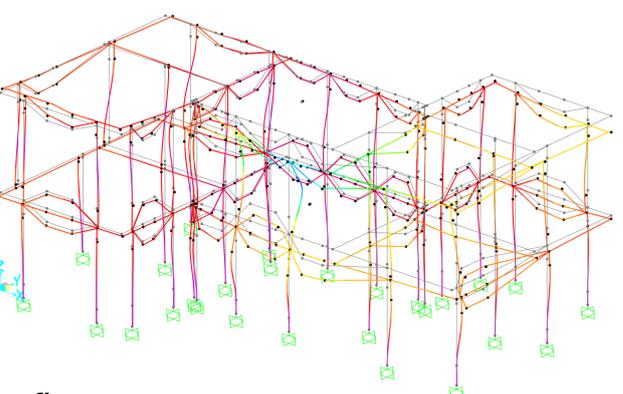
c)



d)

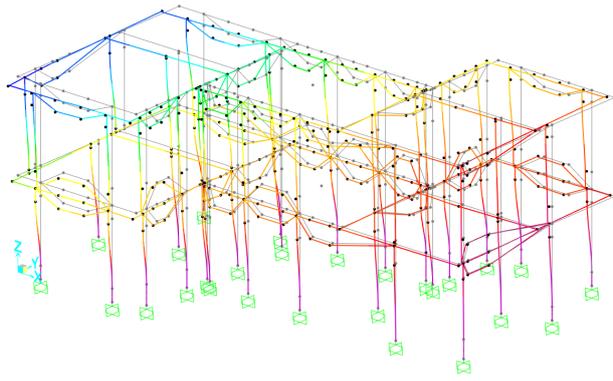


e)

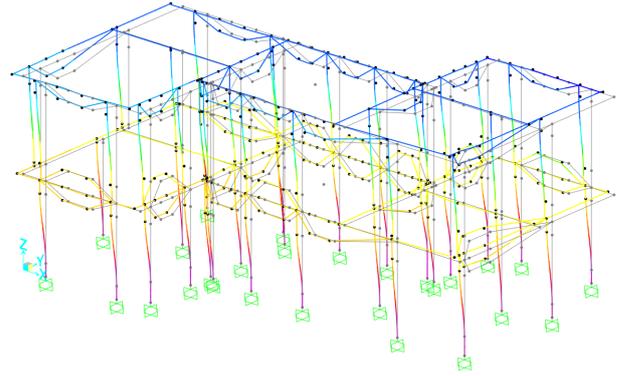


f)

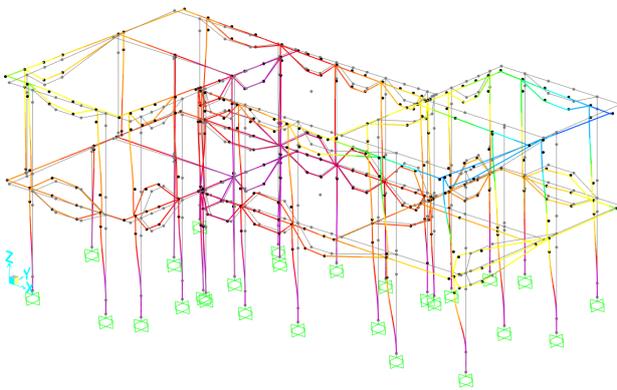
Figura 72- Modi di vibrare del modello RA_1: Modo 1 (a); Modo 2 (b); Modo 3 (c); Modo 4 (d); Modo 5 (e); Modo 6 (f).



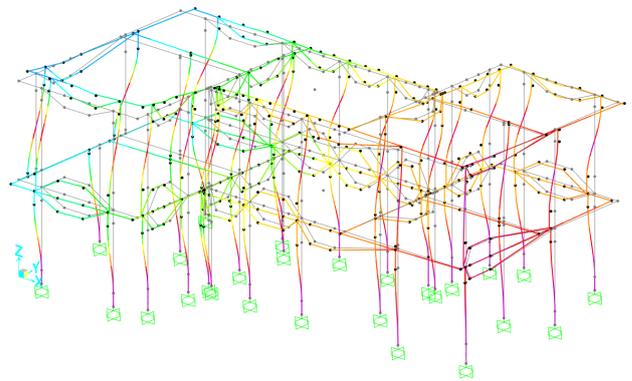
a)



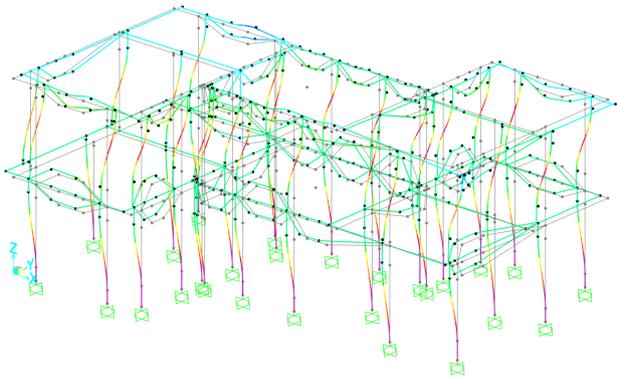
b)



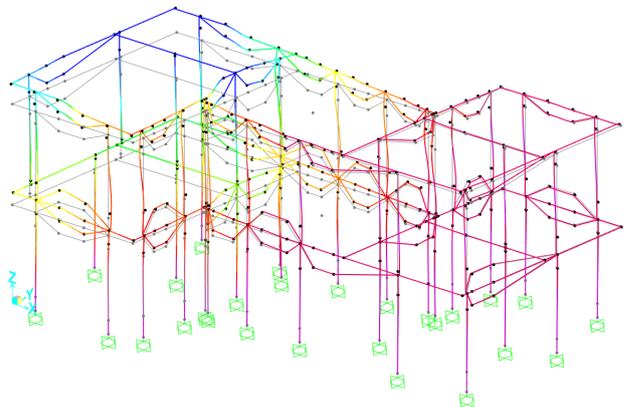
c)



d)

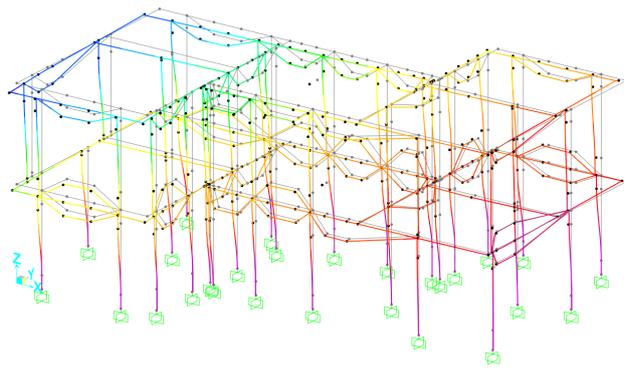


e)

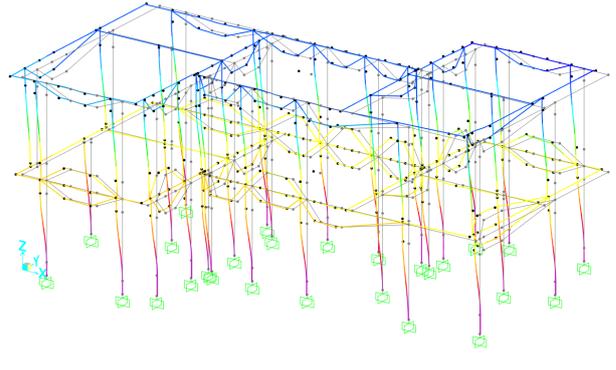


f)

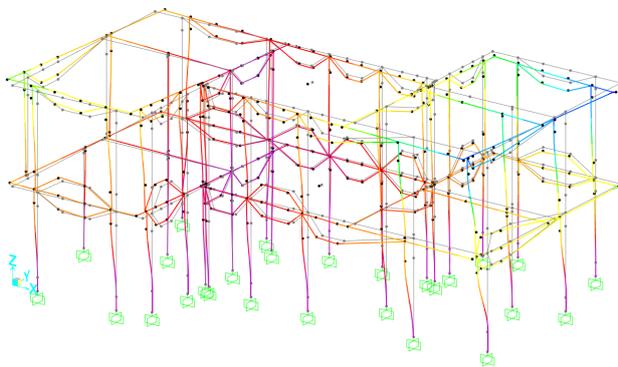
Figura 73- Modi di vibrare del modello RB_2: Modo 1 (a); Modo 2 (b); Modo 3 (c); Modo 4 (d); Modo 5 (e); Modo 6 (f).



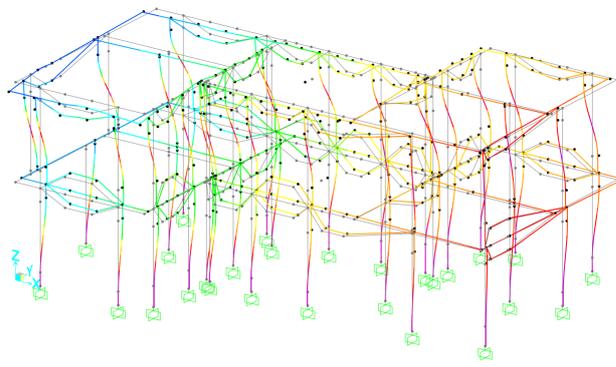
a)



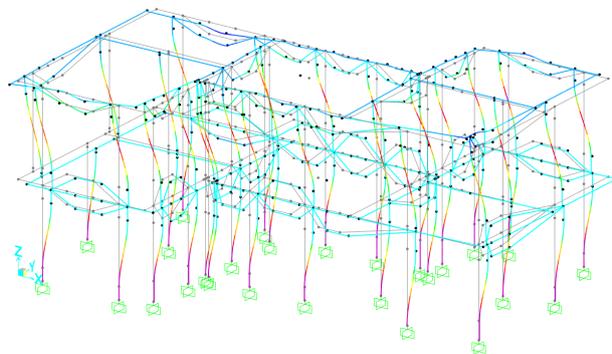
b)



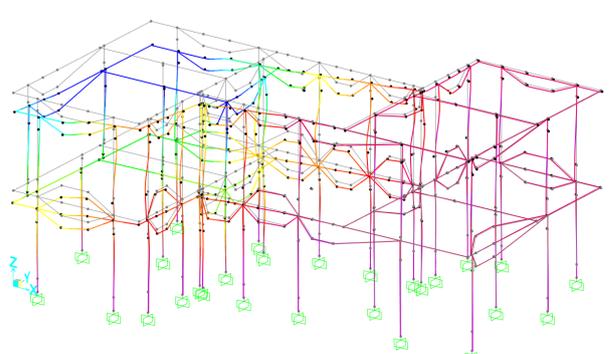
c)



d)



e)



f)

Figura 74- Modi di vibrare del modello RB_1: Modo 1 (a); Modo 2 (b); Modo 3 (c); Modo 4 (d); Modo 5 (e); Modo 6 (f).

Si ricorda la nomenclatura dei modelli analizzati:

- **NR**: non rinforzato
- **UNI_2**: rinforzo uniforme applicato su due facce
- **UNI_1**: rinforzo uniforme applicato su una faccia
- **RA_2**: rinforzo di tipo A applicato su due facce
- **RA_1**: rinforzo di tipo A applicato su una faccia
- **RB_2**: rinforzo di tipo B applicato su due facce
- **RB_1**: rinforzo di tipo B applicato su una faccia

Si riportano inoltre le caratteristiche di tali modi attraverso le tabelle seguenti, in cui si indicano frequenze di vibrazione, periodi e masse partecipanti per ogni modo:

Tabella 2- Output modello NR

NR											
Modo	Frequenza	Periodo	Massa partecipante in X		Massa partecipante in Y		Massa partecipante in Z		Massa rotazionale		
	Hz	sec	kN	%	kN	%	kN	%	kN m ²	%	
1	7,68	0,13	29,1	1%	2399,3	89%	0,0113	0	0,021	0%	
2	8,56	0,12	2364,2	88%	33,7	1%	0,2	0	0,0148	0%	
3	9,66	0,1	9,7	0%	6,7	0%	0,071	0	7,9	91%	
4	17,87	0,06	1,1	0%	235,9	8%	0,3	0	0,00322	0%	
5	19,71	0,05	271,8	10%	0,2	0%	1,3	0	0,00163	0%	
6	21,73	0,05	0,4	0%	1,3	0%	1	0	0,7	8%	

Tabella 3- Output modello UNI_2

UNI_2											
Modo	Frequenza	Periodo	Massa partecipante in X		Massa partecipante in Y		Massa partecipante in Z		Massa rotazionale		
	Hz	sec	kN	%	kN	%	kN	%	kN m ²	%	
1	10,03	0,1	70,9	2%	2488	88%	0,00153	0	0,00148	0%	
2	11,09	0,09	2476,2	87%	76,4	2%	0,2	0	0,0112	0%	
3	13,09	0,08	5,8	0%	0,3	0%	0,2	0	8,4	91%	
4	23,73	0,04	2,9	0%	258,9	9%	0,0238	0	0,00504	0%	
5	25,77	0,04	263,8	9%	0,6	0%	11,1	0	0,00106	0%	
6	29,26	0,03	4,1	0%	0,0229	0%	449,1	0	0,000236	0%	

Tabella 4- Output modello UNI_1

UNI_1										
Modo	Frequenza	Periodo	Massa partecipante in X	%	Massa partecipante in Y	%	Massa partecipante in Z	%	Massa rotazionale	%
	Hz	sec	kN		kN		kN		kN m2	
1	9,57	0,1	55,6	2%	2438,1	88%	0,000386	0	0,000346	0%
2	10,62	0,09	2415,1	87%	60,8	2%	0,3	0	0,00909	0%
3	12,44	0,08	5,8	0%	0,2	0%	0,2	0	8,2	91%
4	22,48	0,04	2,1	0%	250,9	9%	0,051	0	0,00554	0%
5	24,54	0,04	269,2	9%	0,4	0%	6,6	0	0,000932	0%
6	28,24	0,04	0,0958	0%	0,2	0%	8,7	0	0,7	8%

Tabella 5- Output modello RA_2

RA_2										
Modo	Frequenza	Periodo	Massa partecipante in X	%	Massa partecipante in Y	%	Massa partecipante in Z	%	Massa rotazionale	%
	Hz	sec	kN		kN		kN		kN m2	
1	8,54	0,12	8,2	0%	2186,2	79%	0,0124	0	0,9	10%
2	9,91	0,1	2460,6	89%	2,6	0%	0,000226	0	0,0481	0%
3	11,98	0,08	13,7	0%	305,2	11%	0,2	0	7,2	80%
4	19,77	0,05	0,3	0%	225,4	8%	0,5	0	0,1	1%
5	22,98	0,04	267,6	9%	0,0415	0%	0,2	0	0,00237	0%
6	26,34	0,04	1,1	0%	0,0076	0%	702,9	0	0,0000349	0%

Tabella 6- Output modello RA_1

RA_1										
Modo	Frequenza	Periodo	Massa partecipante in X	%	Massa partecipante in Y	%	Massa partecipante in Z	%	Massa rotazionale	%
	Hz	sec	kN		kN		kN		kN m2	
1	8,41	0,12	11,1	0%	2236,1	82%	0,0137	0	0,7	7%
2	9,64	0,1	2416,9	88%	5,3	0%	0,00313	0	0,0485	0%
3	11,43	0,09	13,8	0%	223,9	8%	0,2	0	7,3	83%
4	19,46	0,05	0,4	0%	225,7	8%	0,5	0	0,1	1%
5	22,26	0,04	271	9%	0,0131	0%	0,2	0	0,00192	0%
6	26,05	0,04	0,0152	0%	23,4	0%	3,4	0	0,6	6%

Tabella 7- Output modello RB_2

RB_2										
Modo	Frequenza	Periodo	Massa partecipante in X	%	Massa partecipante in Y	%	Massa partecipante in Z	%	Massa rotazionale	%
	Hz	sec	kN		kN		kN		kN m2	
1	8,47	0,12	1,1	0%	2178,5	79%	0,1	0	0,8	9%
2	9,55	0,1	2384,4	87%	2,4	0%	1,1	0	0,2	2%
3	11,43	0,09	66,6	2%	283,9	10%	0,00707	0	7	79%
4	19,95	0,05	1,5	0%	209,7	7%	0,4	0	0,0711	0%
5	22,14	0,05	260,3	9%	9,1	0%	16,3	0	0,0172	0%
6	26,19	0,04	8,4	0%	38,7	1%	2,2	0	0,7	7%

Tabella 8- Output modello RB_1

RB_1										
Modo	Frequenza	Periodo	Massa partecipante in X	%	Massa partecipante in Y	%	Massa partecipante in Z	%	Massa rotazionale	%
	Hz	sec	kN		kN		kN		kN m2	
1	8,34	0,12	5,4	0%	2226,4	82%	0,1	0	0,6	7%
2	9,35	0,11	2384,7	88%	0,2	0%	0,9	0	0,2	2%
3	11,04	0,09	45,3	1%	226,5	8%	0,0126	0	7,1	81%
4	19,55	0,05	0,3	0%	217,7	8%	0,3	0	0,0461	0%
5	21,55	0,05	264,1	9%	4,5	0%	11,4	0	0,015	0%
6	25,06	0,04	6,6	0%	31,4	1%	1	0	0,7	7%

La prevalenza dei primi tre modi di vibrare è evidenziata in blu, mentre in rosso sono indicati eventuali modi accoppiati (rototraslazionali).

In **Figura 75** viene mostrata la riduzione percentuale del periodo T nei primi tre modi di vibrare, confrontando i modelli rinforzati con il modello non rinforzato (NR). Questo parametro è utile ad interpretare il comportamento dinamico prima e dopo l'intervento.

I modelli UNI_2 e UNI_1 (rinforzo uniforme), presentano in media una riduzione del periodo T del 23% rispetto al modello non rinforzato, indice di un discreto aumento di rigidezza.

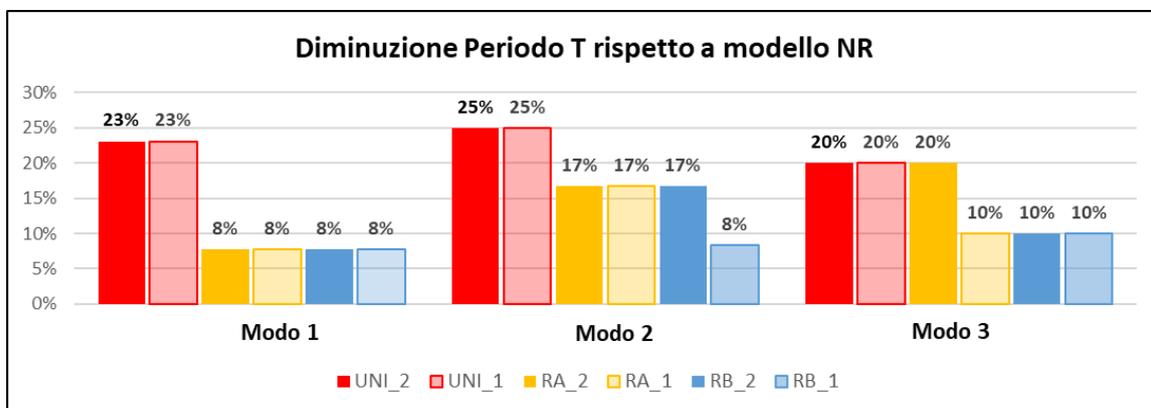


Figura 75- Diminuzione periodo T nei primi tre modi di vibrare rispetto al caso non rinforzato NR

Riguardo ai modelli RA e RB (rinforzi parziali), i risultati mostrano che, sebbene non raggiungano l'efficacia dei modelli UNI in termini di riduzione dei periodi di vibrazione, riescono comunque a fornire un contributo importante.

Osservando i risultati, si può notare come la differenza tra il rinforzo su una sola faccia e quello su entrambe le facce della muratura non sia così marcata come ci si potrebbe aspettare. La riduzione del periodo, infatti, rimane la stessa in entrambe le configurazioni di

rinforzo, ad eccezione del modello RB_1 nel 2° modo e del modello RA_1 nel 3° modo, che registrano un valore inferiore rispetto ai modelli RB_2 ed RA_2.

Questa situazione, nel caso in cui i benefici dei due metodi siano comparabili potrebbe rivelarsi particolarmente vantaggiosa in termini di invasività e costi dell'intervento.

Si può osservare inoltre la presenza di un maggiore accoppiamento rotazionale, seppure contenuto, nel caso dei modelli RA e RB. Questo comportamento si verifica a causa del rinforzo parziale, che introduce zone più rigide all'interno della struttura creando dei punti che tendono a ruotare maggiormente rispetto ad altri.

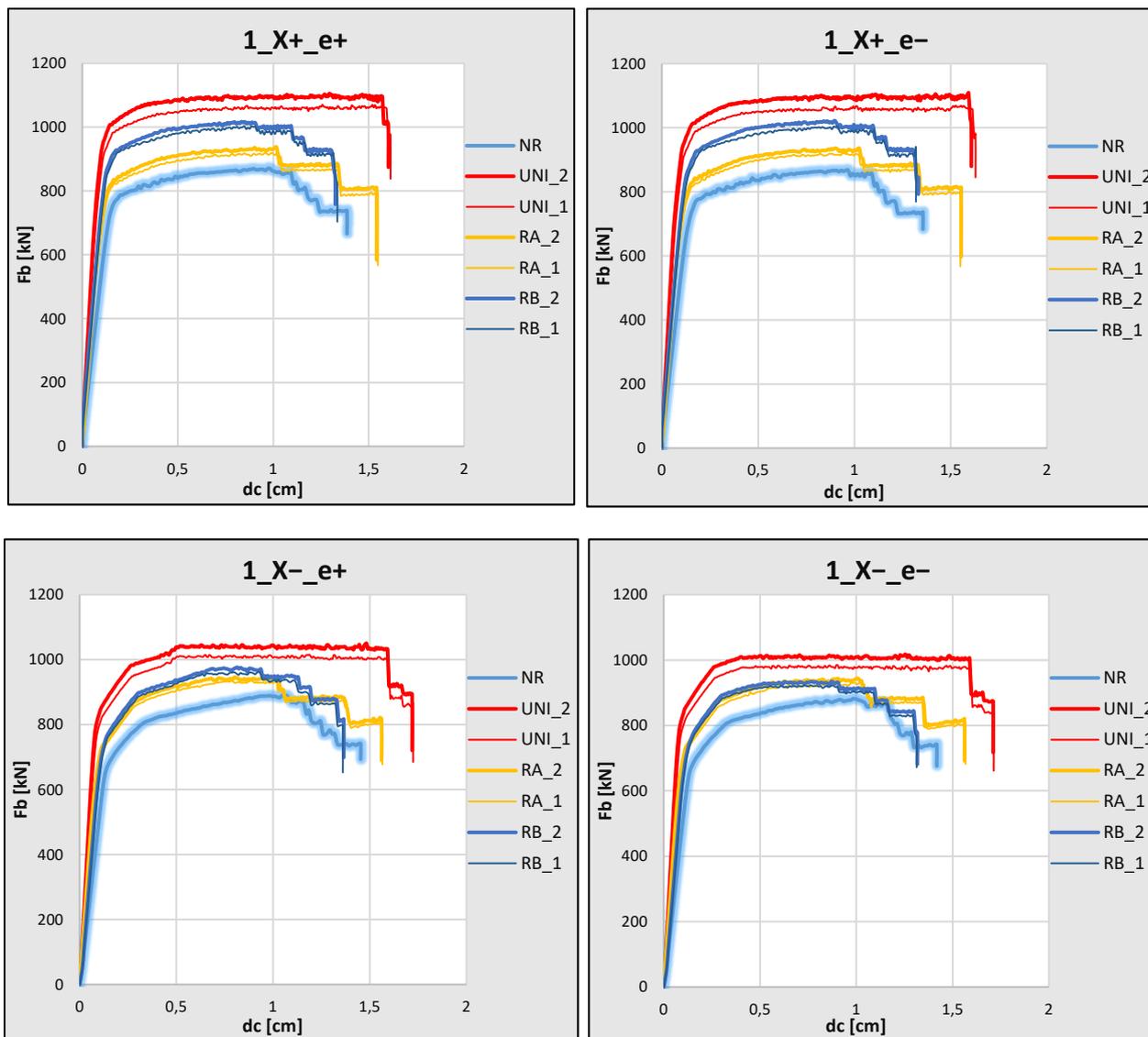
In generale, tutti i modelli analizzati sono caratterizzati da tre modi disaccoppiati¹, sintomo di un buon comportamento dinamico.

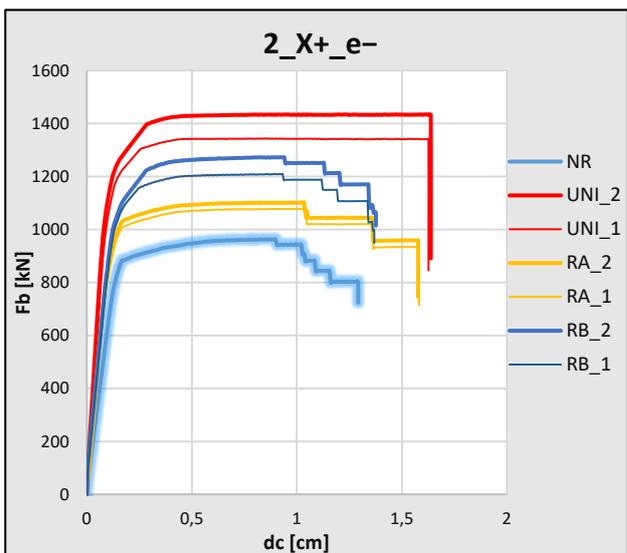
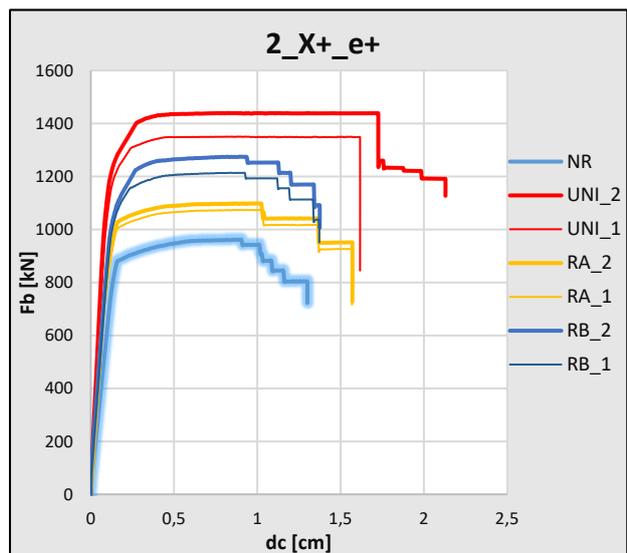
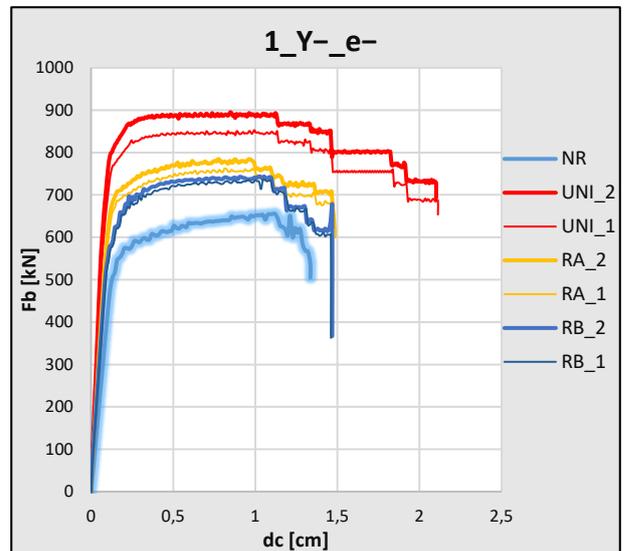
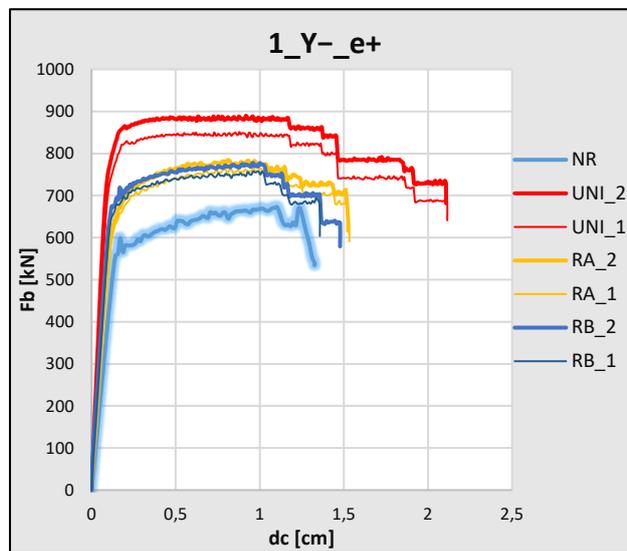
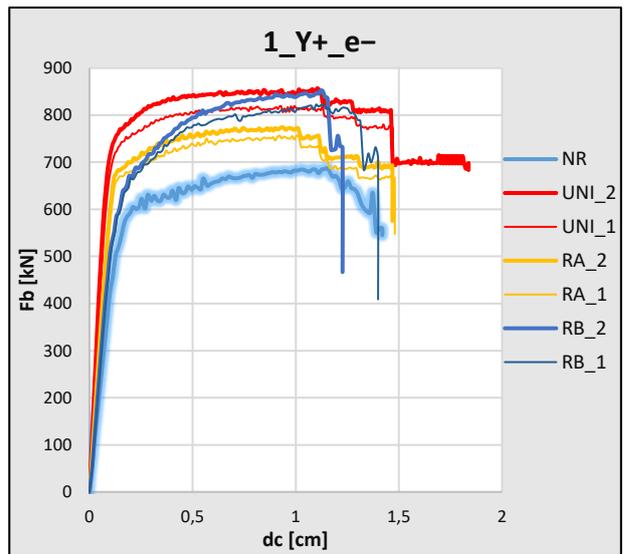
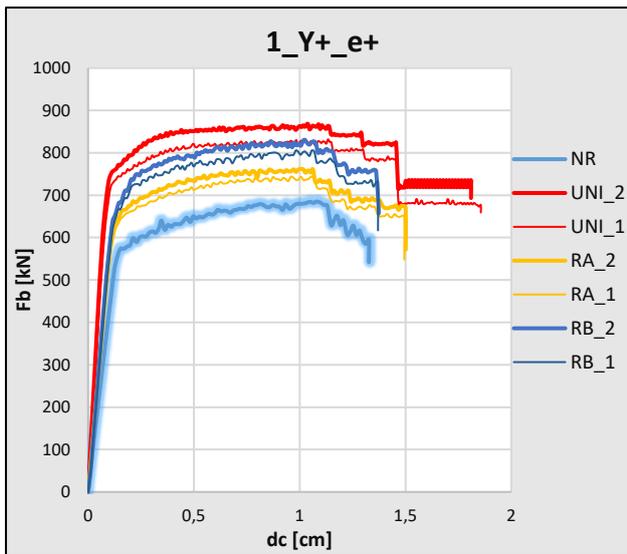
¹ 1° modo traslazionale in X, 2° modo traslazionale in Y e 3° modo rotazionale.

4.3. Analisi statica non lineare (Pushover)

I risultati delle analisi pushover sono presentati per mezzo di curve Taglio alla base (Fb) – Spostamento del nodo di controllo (dc) derivanti dal PRO_SAM, e si analizzano inoltre gli incrementi massimi del taglio alla base (Fmax) e dello spostamento (dmax) ottenuti.

Per ogni modello, sono di seguito riportate le curve di capacità relative alle 16 combinazioni di carico.





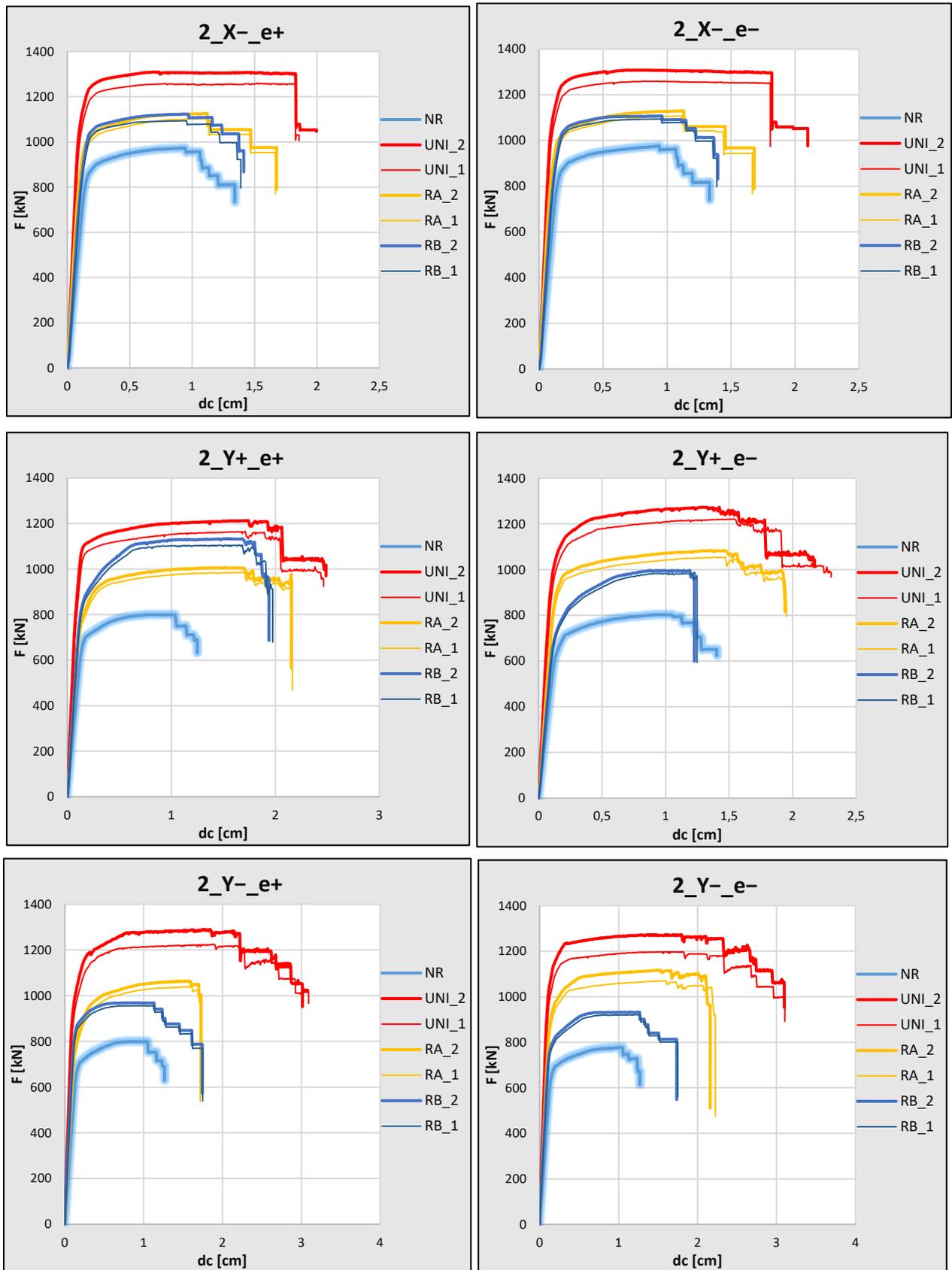


Figura 76- Curve di capacità relative alle 16 combinazioni di carico

L'analisi pushover permette di osservare come il rinforzo influisca significativamente sulla capacità della struttura.

Come ci aspettavamo, il modello UNI_2 porta ad un netto miglioramento delle prestazioni meccaniche, con un aumento significativo sia della resistenza a taglio che dello spostamento massimo rispetto al modello NR (non rinforzato). Stessa cosa vale per il modello UNI_1, anche se in maniera minore.

Per quanto riguarda i modelli parzialmente rinforzati RA e RB, si può vedere come il rinforzo, pur non raggiungendo le prestazioni ottimali dei modelli completamente rinforzati, offre comunque un buon miglioramento della risposta strutturale rispetto al modello NR, posizionandosi ad un livello intermedio. Le due tipologie di rinforzo mostrano comportamenti simili, portando uno a prevalere sull'altro in base alla combinazione considerata.

In tutti i casi si ottiene che, le varianti in cui il rinforzo viene applicato su una sola faccia, consentono di ottenere prestazioni simili alla controparte su due facce, rappresentando una valida alternativa in casi dove vi siano limitazioni pratiche o di costi.

Per avere un quadro sintetico della situazione, si è scelto di raggruppare in un grafico tutte le curve (una per modello) che hanno registrato il maggiore rapporto tra capacità e domanda in termini di spostamento (**Figura 77**).

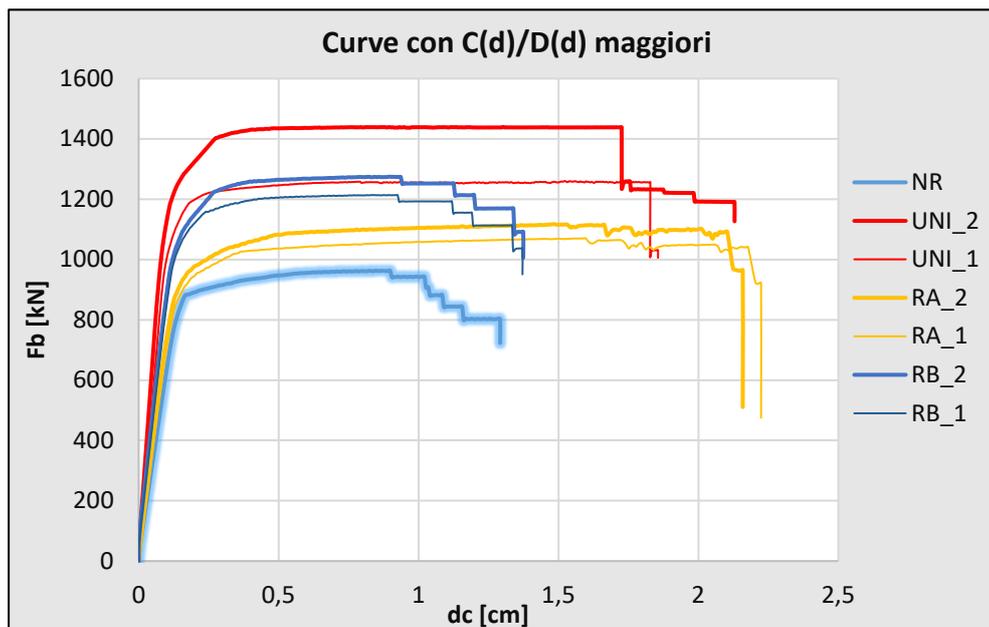


Figura 77- Curve con rapporto tra capacità e domanda maggiori in termini di spostamento del nodo di controllo

Risulta inoltre utile, ai fini della discussione, mostrare i valori di incremento massimi ottenuti per il taglio alla base massimo ($F_{b,max}$) (**Figura 78**) e dello spostamento ($d_{c,max}$) (**Figura 79**) rispetto al modello non rinforzato.

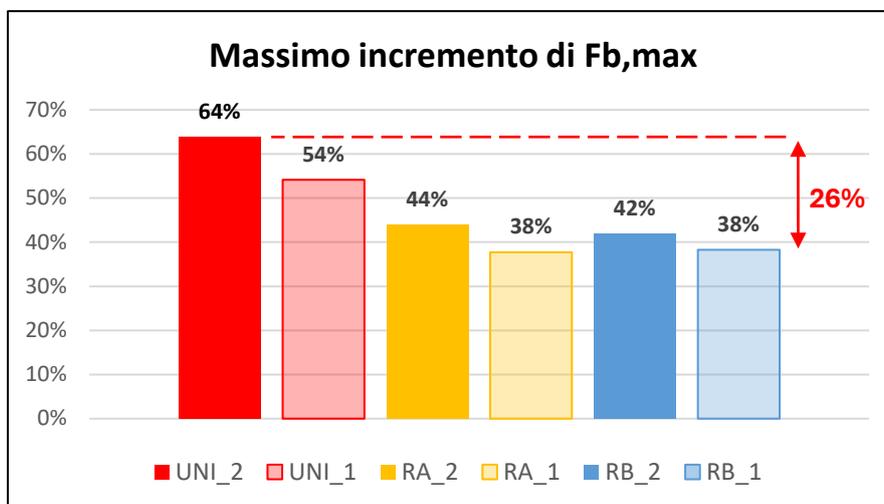


Figura 78- Valori di incremento massimi del taglio alla base T_b

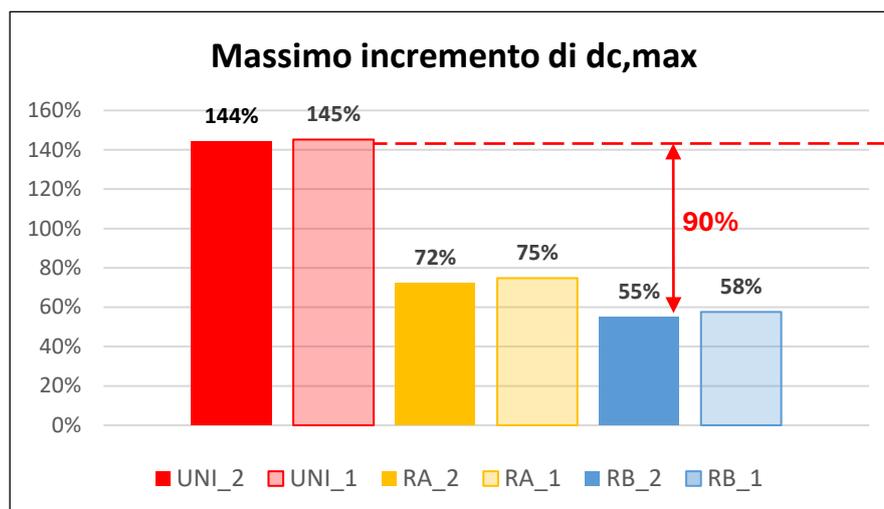


Figura 79- Valori di incremento massimi dello spostamento d_c

L'incremento massimo del taglio alla base si registra nel modello UNI_2, pari al 64% nella combinazione "2_Y_e-", in cui si passa da un valore di 776,9 kN ad uno di 1272,7 kN. Per la configurazione UNI_1, invece, si può notare un incremento minore pari al 54%.

Le altre configurazioni di rinforzo mostrano un incremento pressoché simile tra loro che si aggira intorno al 43% per le configurazioni con due facce rinforzate e al 38% per quelle con una sola faccia rinforzata.

Si può tuttavia notare come la differenza tra i vari modelli sia abbastanza contenuta, pari massimo al 26%.

Per quanto riguarda l'incremento massimo dello spostamento, la figura mostra che il valore più elevato è ottenuto dal modello UNI_1, in cui si ha un incremento del 145% nella combinazione "2_Y-e-", passando da 1,26 cm a 3,09 cm. Valore simile è ottenuto dal modello UNI_2, pari al 144%.

I modelli RA_2 ed RA_1 presentano rispettivamente un incremento massimo pari al 72% e 75%.

Infine, ci sono i modelli RB_2 e RB_1, con valori di 55% e 58%.

Al contrario di quanto visto nella figura relativa all'incremento del taglio alla base, si osserva una tendenza secondo cui i modelli con rinforzo applicato su una sola faccia abbiano risultati migliori in termini di spostamento, effetto probabilmente dovuto alla minore rigidità della struttura rispetto a quella con rinforzo applicato su entrambe le facce.

In questo caso la differenza massima tra i modelli è nettamente maggiore, arrivando ad un 90% tra UNI_1 e RB_2.

CONCLUSIONI

Nella presente tesi si è sviluppato un metodo per stimare l'efficacia di un rinforzo di tipo CRM (Composite Reinforced Mortar) e fibre di vetro, in termini di resistenza a taglio, cercando di colmare un'importante lacuna normativa. Attraverso un modello di regressione polinomiale sono quindi stati calcolati i coefficienti di miglioramento della resistenza a taglio e si sono identificate le variabili che contribuiscono maggiormente ad aumentare questo valore.

In particolare, sono stati stimati i coefficienti migliorativi dell'intonaco CRM proposto dalla DIASEN (Sismactive Thermal System) applicato ad un edificio di riferimento.

So è proceduto quindi con le analisi modali e pushover su un totale di 7 modelli, di cui uno non rinforzato e 6 con configurazioni di rinforzo differenti.

Dalle analisi effettuate è emerso quanto segue:

Analisi di regressione: il modello di regressione ha fornito coefficienti migliorativi, nel caso specifico di muratura in mattoni pieni, che valgono rispettivamente 3 (per rinforzo applicato su due facce) e 2.8 (per rinforzo su una sola faccia).

Inoltre, si è visto come le variabili di maggiore importanza siano le seguenti:

- modulo elastico a trazione della barra
- allungamento a rottura della barra
- spessore del coating
- resistenza a compressione della malta
- area di una maglia della rete di rinforzo
- facce di applicazione

Analisi modale: l'applicazione del rinforzo Sismactive Thermal System non altera significativamente il comportamento dinamico della struttura. I modelli UNI (rinforzo uniforme) sono quelli in cui si è registrata la riduzione del periodo più significativa, mediamente pari al 23%, nei primi tre modi di vibrare. Nelle altre configurazioni di rinforzo RA e RB si ottiene un aumento di rigidità inferiore rispetto ai modelli UNI ma comunque rilevante.

Le configurazioni rinforzate su una sola faccia hanno mostrato una variazione minima del comportamento dinamico, rispetto ai modelli rinforzati su entrambe le facce, con una differenza massima dell'8% tra il modello RA_2 e RA_1 nel 2° modo.

Analisi statica non lineare: In tutte le configurazioni rinforzate si è ottenuto un incremento del taglio alla base (T_b), con un valore massimo del 64% nel modello UNI_2. Stessa cosa è stata notata per lo spostamento massimo ($d_{c,max}$), in cui il miglior incremento si è visto nel modello UNI_1, pari al 145%.

In generale si osserva che i modelli con rinforzo su un solo lato, tendono a mostrare un incremento dello spostamento leggermente superiore rispetto ai modelli rinforzati su entrambi i lati. Al contrario, in termini di taglio alla base, il contributo fornito è inferiore, ma comunque valido.

In conclusione, la ricerca ha mostrato come l'intervento Sismactive Thermal System, e più in generale l'intonaco armato CRM con fibre di vetro, rappresenti un'opzione promettente per il rinforzo delle strutture in muratura, con benefici sia strutturali che economici. I miglioramenti in termini di spostamento e taglio alla base massimi, ottenuti con i rinforzi applicati su una sola faccia, unito al fatto che questa configurazione non altera significativamente il comportamento dinamico della struttura, dimostra come questo tipo di intervento rappresenti un'alternativa più che valida nei casi in cui siano presenti limitazioni economiche o nell'applicazione del rinforzo su entrambi i lati.

L'integrazione di questa tecnologia nelle normative di settore potrebbe favorire una maggiore adozione del CRM, offrendo così agli ingegneri ed ai progettisti strumenti più efficaci per la riqualificazione del patrimonio edilizio storico.

A tal proposito, si raccomanda di estendere il campo di applicazione dei coefficienti migliorativi anche a questi sistemi. Ulteriori campagne sperimentali saranno necessarie per raffinare i modelli predittivi e per adattare i coefficienti a una più ampia gamma contesti applicativi, contribuendo a una revisione normativa in grado di supportare il loro impiego su scala nazionale.

APPENDICE A

Autore (anno)	Codice provino	Tipologia di muratura	Dimensione provino [mm]	Malta intonaco	f _{cc} Resistenza a compressione malta intonaco [Mpa]	f _{ct} Resistenza a trazione malta intonaco [Mpa]	Dimensione maglia rete [mm]	Resistenza a trazione singola barra [kN]	Resistenza a trazione maglia [kN/m]	Modulo elastico a trazione singola barra [GPa]	Allungamento a rottura singola barra [%]	Connettori	Densità muratura (NTC) [kN/m ³]	Presenza sacco	Facce applicazione	Resistenza a trazione muratura ft _m [kN]	τ ₀ [N/mm ²]	τ _r [N/mm ²]	τ _r /τ ₀	G ₀ [GPa]	G _c [GPa]	G _c /G ₀ [N/mm ²]	spessore provino [mm]	spessore coating [mm]	Spessore totale [mm]	S _{coast} /S _{wall}	
Gattesco & Boem	DS-B3-U01	Laterizi pieni	1160 x 1160										18	0		0,38	0,25	0,25		2123,00	2123		250				
	DS-B3-U02	Laterizi pieni	1160 x 1160										18	0		0,29	0,19	0,19		2118,00	2118		250				
	DS-B3-U03	Laterizi pieni	1160 x 1160										18	0		0,39	0,26	0,26		2097,00	2097		250				
	DS-B3-U04	Laterizi pieni	1160 x 1160										18	0		0,44	0,29	0,29		2484,00	2484		250				
	DS-B3-U05	Laterizi pieni	1160 x 1160										18	0		0,32	0,21	0,21		2198,00	2198		250				
	DS-B3-U06	Laterizi pieni	1160 x 1160										18	0		0,45	0,30	0,3		2930,00	2930		250				
	DS-B3-R01	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 33x33 mm	4,425	132,75	30,0	1,75%	a L in GFRP	18	0	2	0,38	0,25	0,45	1,80	2325,00	3563	1,53	250	60	310	0,194
	DS-B3-R02	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 33x33 mm	4,425	132,75	30,0	1,75%	a L in GFRP	18	0	2	0,38	0,25	0,43	1,72	2325,00	3398	1,46	250	60	310	0,194
	DS-B3-R03	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 66x66 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	0	2	0,38	0,25	0,43	1,72	2325,00	3063	1,32	250	60	310	0,194
	DS-B3-R04	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 66x66 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	0	2	0,38	0,25	0,48	1,92	2325,00	3228	1,39	250	60	310	0,194
	DS-B3-R05	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 99x99 mm	4,330	43,30	27,0	1,92%	a L in GFRP	18	0	2	0,38	0,25	0,49	1,96	2325,00	2923	1,26	250	60	310	0,194
	DS-B3-R06	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 99x99 mm	4,330	43,30	27,0	1,92%	a L in GFRP	18	0	2	0,38	0,25	0,46	1,84	2325,00	2982	1,28	250	60	310	0,194
	DS-B3-R11	Laterizi pieni	calce idraulica e additivi	1160 x 1160		4,7	0,77	GFRP 66x66 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	0	2	0,38	0,25	0,42	1,68	2325,00	3799	1,63	250	60	310	0,194
	DS-B3-R12	Laterizi pieni	calce idraulica e additivi	1160 x 1160		4,7	0,77	GFRP 66x66 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	0	2	0,38	0,25	0,41	1,64	2325,00	3797	1,63	250	60	310	0,194
	DS-B3-R13	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,9	1,10	GFRP 66x66 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	0	2	0,38	0,25	0,36	1,44	2325,00	3428	1,47	250	60	310	0,194
	DS-B3-R14	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,9	1,10	GFRP 66x66 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	0	2	0,38	0,25	0,38	1,52	2325,00	3534	1,52	250	60	310	0,194
	DS-B3-R15	Laterizi pieni	calce idraulica	1160 x 1160		4,8	1,20	GFRP 66x66 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	0	2	0,38	0,25	0,36	1,44	2325,00	3025	1,30	250	60	310	0,194
	DS-B3-R16	Laterizi pieni	calce idraulica	1160 x 1160		4,8	1,20	GFRP 66x66 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	0	2	0,38	0,25	0,39	1,56	2325,00	2934	1,26	250	60	310	0,194
	DS-B3-R22	Laterizi pieni	calce idraulica e pozzolana	1160 x 1160		11,7	1,44	GFRP 66x66 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	0	2	0,38	0,25	0,4	1,60	2325,00	3622	1,56	250	60	310	0,194
	DS-B3-R23	Laterizi pieni	calce idraulica	1160 x 1160		11,2	1,76	GFRP 66x66 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	0	2	0,38	0,25	0,46	1,84	2325,00	4067	1,75	250	60	310	0,194
	DS-B3-R24	Laterizi pieni	calce idraulica	1160 x 1160		11,2	1,76	GFRP 66x66 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	0	2	0,38	0,25	0,46	1,84	2325,00	4065	1,75	250	60	310	0,194
	DS-B6-U01	Laterizi pieni		1160 x 1160										18	0		0,48	0,32	0,32		3530,00	3530		250			
	DS-B6-U02	Laterizi pieni		1160 x 1160										18	0		0,41	0,27	0,27		3307,00	3307		250			
	DS-B6-R01	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 33x33 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	0	2	0,44	0,30	0,48	1,63	3418,50	5257	1,54	250	60	310	0,194
	DS-B6-R02	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 33x33 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	0	2	0,44	0,30	0,47	1,59	3418,50	5073	1,48	250	60	310	0,194
	DS-B6-R03	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 66x66 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	0	2	0,44	0,30	0,55	1,86	3418,50	4723	1,38	250	60	310	0,194
	DS-B6-R04	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 66x66 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	0	2	0,44	0,30	0,58	1,97	3418,50	4842	1,42	250	60	310	0,194
	DS-B6-R05	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 99x99 mm	4,330	43,30	27,0	1,92%	a L in GFRP	18	0	2	0,44	0,30	0,54	1,83	3418,50	4451	1,30	250	60	310	0,194
	DS-B6-R06	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 99x99 mm	4,330	43,30	27,0	1,92%	a L in GFRP	18	0	2	0,44	0,30	0,62	2,10	3418,50	4574	1,34	250	60	310	0,194
	DS2-B3-U01	Laterizi pieni		1160 x 1160										18	0		0,30	0,20	0,20		2542,00	2542		380			
	DS2-B3-U02	Laterizi pieni		1160 x 1160										18	0		0,36	0,24	0,24		2654,00	2654		380			
	DS2-B3-R01	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 33x33 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	0	2	0,33	0,22	0,36	1,64	2598,00	3925,00	1,51	380	60	440	0,136
	DS2-B3-R02	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 33x33 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	0	2	0,33	0,22	0,36	1,64	2598,00	3761,00	1,45	380	60	440	0,136
	DS2-B3-R03	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 66x66 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	0	2	0,33	0,22	0,40	1,82	2598,00	3477,00	1,34	380	60	440	0,136
	DS2-B3-R04	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 66x66 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	0	2	0,33	0,22	0,33	1,50	2598,00	3534,00	1,36	380	60	440	0,136
	DS2-B3-R05	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 66x66 mm	7,000	105,00	25,0	1,28%	a L in GFRP	18	0	2	0,33	0,22	0,41	1,86	2598,00	4106,00	1,58	380	60	440	0,136
	DS2-B3-R06	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 66x66 mm	7,000	105,00	25,0	1,28%	a L in GFRP	18	0	2	0,33	0,22	0,44	2,00	2598,00	4409,00	1,70	380	60	440	0,136
	DS2-B3-R07	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 99x99 mm	7,290	72,90	24,3	1,36%	a L in GFRP	18	0	2	0,33	0,22	0,33	1,59	2598,00	3908,00	1,54	380	60	440	0,136
	DS2-B3-R08	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 99x99 mm	7,290	72,90	24,3	1,36%	a L in GFRP	18	0	2	0,33	0,22	0,31	1,41	2598,00	3980,00	1,53	380	60	440	0,136
	DS2-B2-U01	Laterizi pieni		1160 x 1160										18	0		0,27	0,18	0,18		1785,00	1785,00		380			
	DS2-B2-U02	Laterizi pieni		1160 x 1160										18	0		0,33	0,22	0,22		1822,00	1822,00		380			
	DS2-B2-R01	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 99x99 mm	7,290	72,90	24,3	1,36%	a L in GFRP	18	0	2	0,30	0,20	0,31	1,55	1803,50	2793,00	1,08	380	60	440	0,136
	DS2-B2-R02	Laterizi pieni	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 99x99 mm	7,290	72,90	24,3	1,36%	a L in GFRP	18	0	2	0,30	0,20	0,24	1,20	1803,50	2860,00	1,10	380	60	440	0,136
	DI-B3-U01	muratura a sacco paramenti di laterizi		1160 x 1160										18	1		0,26	0,17	0,20		1076,00	1076,00		400			
	DI-B3-U02	muratura a sacco paramenti di laterizi		1160 x 1160										18	1		0,23	0,15	0,17		1139,00	1139,00		400			
	DI-B3-R01	muratura a sacco paramenti di laterizi	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 66x66 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	1	2	0,24	0,16	0,25	1,69	1107,50	1699,00	1,53	400	60	460	0,130
DI-B3-R02	muratura a sacco paramenti di laterizi	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 66x66 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	1	2	0,24	0,16	0,26	1,63	1107,50	1750,00	1,58	400	60	460	0,130	
DI-B3-R03	muratura a sacco paramenti di laterizi	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 99x99 mm	4,330	43,30	27,0	1,92%	a L in GFRP	18	1	2	0,24	0,16	0,28	1,75	1107,50	1630,00	1,47	400	60	460	0,130	
DI-B3-R04	muratura a sacco paramenti di laterizi	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 99x99 mm	4,330	43,30	27,0	1,92%	a L in GFRP	18	1	2	0,24	0,16	0,23	1,44	1107,50	1580,00	1,43	400	60	460	0,130	
DI-B2-U01	muratura a sacco paramenti di laterizi		1160 x 1160										18	1		0,24	0,16	0,16		981,00	981,00		400				
DI-B2-U02	muratura a sacco paramenti di laterizi		1160 x 1160										18	1		0,23	0,15	0,15		601,00	601,00		400				
DI-B2-R01	muratura a sacco paramenti di laterizi	calce idraulica e cemento	1160 x 1160		6,7	0,80	GFRP 33x33 mm	4,465	66,98	29,0	1,85%	a L in GFRP	18	1	2	0,23	0,16	0,22	1,42	791,00	157						

1

G.Castori (2020)

Borri - Castori (2014)

Micelli et al. (2016)

Unipavia (2022)

Longo et al. (2022)

Meriggi et al. (2021)

G30cl_1_2	Pietra tenera (tufo)	1200 x 1200	Calce-cemento (14,2 MPa)	14,2	5,80	GFRP 30x30 mm	3,200	105,60	33,0	4,00%	a L in GFRP	14,5	0	1	0,39	0,26	0,37	1,44	594,83	796	1,34	250	80	330	0,242
G30cl_2_1	Pietra tenera (tufo)	1200 x 1200	Calce-cemento (14,2 MPa)	14,2	5,80	GFRP 30x30 mm	3,200	105,60	33,0	4,00%	a L in GFRP	14,5	0	2	0,39	0,26	0,95	3,70	594,83	1979	3,33	250	40	290	0,138
G30cl_2_2	Pietra tenera (tufo)	1200 x 1200	Calce-cemento (14,2 MPa)	14,2	5,80	GFRP 30x30 mm	3,200	105,60	33,0	4,00%	a L in GFRP	14,5	0	2	0,39	0,26	0,93	3,62	594,83	1734	2,92	250	80	330	0,242
G30l_1_1	Pietra tenera (tufo)	1200 x 1200	Calce (14,5 MPa)	14,5	6,60	GFRP 30x30 mm	3,200	105,60	33,0	4,00%	a L in GFRP	14,5	0	1	0,39	0,26	0,41	1,60	594,83	983	1,65	250	40	290	0,138
G30l_1_2	Pietra tenera (tufo)	1200 x 1200	Calce (14,5 MPa)	14,5	6,60	GFRP 30x30 mm	3,200	105,60	33,0	4,00%	a L in GFRP	14,5	0	1	0,39	0,26	0,48	1,87	594,83	779	1,31	250	80	330	0,242
G30l_2_1	Pietra tenera (tufo)	1200 x 1200	Calce (14,5 MPa)	14,5	6,60	GFRP 30x30 mm	3,200	105,60	33,0	4,00%	a L in GFRP	14,5	0	2	0,39	0,26	0,72	2,81	594,83	1764	2,97	250	40	290	0,138
G30l_2_2	Pietra tenera (tufo)	1200 x 1200	Calce (14,5 MPa)	14,5	6,60	GFRP 30x30 mm	3,200	105,60	33,0	4,00%	a L in GFRP	14,5	0	2	0,39	0,26	0,52	2,03	594,83	1528	2,57	250	80	330	0,242
G40cl_1_1	Pietra tenera (tufo)	1200 x 1200	Calce-cemento (14,2 MPa)	14,2	5,80	GFRP 40x40 mm	2,250	56,25	33,0	4,00%	a L in GFRP	14,5	0	1	0,39	0,26	0,38	1,48	594,83	393	0,66	250	40	290	0,138
G40cl_1_2	Pietra tenera (tufo)	1200 x 1200	Calce-cemento (14,2 MPa)	14,2	5,80	GFRP 40x40 mm	2,250	56,25	33,0	4,00%	a L in GFRP	14,5	0	1	0,39	0,26	0,39	1,52	594,83	367	0,62	250	80	330	0,242
G40cl_2_1	Pietra tenera (tufo)	1200 x 1200	Calce-cemento (14,2 MPa)	14,2	5,80	GFRP 40x40 mm	2,250	56,25	33,0	4,00%	a L in GFRP	14,5	0	2	0,39	0,26	1,05	4,09	594,83	2167	3,64	250	40	290	0,138
G40cl_2_2	Pietra tenera (tufo)	1200 x 1200	Calce-cemento (14,2 MPa)	14,2	5,80	GFRP 40x40 mm	2,250	56,25	33,0	4,00%	a L in GFRP	14,5	0	2	0,39	0,26	0,98	3,82	594,83	2336	3,93	250	80	330	0,242
G40l_1_1	Pietra tenera (tufo)	1200 x 1200	Calce (14,5 MPa)	14,5	6,60	GFRP 40x40 mm	2,250	56,25	33,0	4,00%	a L in GFRP	14,5	0	1	0,39	0,26	0,39	1,52	594,83	598	1,01	250	40	290	0,138
G40l_1_2	Pietra tenera (tufo)	1200 x 1200	Calce (14,5 MPa)	14,5	6,60	GFRP 40x40 mm	2,250	56,25	33,0	4,00%	a L in GFRP	14,5	0	1	0,39	0,26	0,39	1,52	594,83	961	1,62	250	80	330	0,242
G40l_2_1	Pietra tenera (tufo)	1200 x 1200	Calce (14,5 MPa)	14,5	6,60	GFRP 40x40 mm	2,250	56,25	33,0	4,00%	a L in GFRP	14,5	0	2	0,39	0,26	0,74	2,88	594,83	1347	2,26	250	40	290	0,138
G40l_2_2	Pietra tenera (tufo)	1200 x 1200	Calce (14,5 MPa)	14,5	6,60	GFRP 40x40 mm	2,250	56,25	33,0	4,00%	a L in GFRP	14,5	0	2	0,39	0,26	0,82	3,19	594,83	1421	2,39	250	80	330	0,242
MAT-01-U	Laterizi pieni	1200 x 1200										18	0		0,12	0,08	0,08	1080,00	1080			240			
MAT-02-D	Laterizi pieni	1200 x 1200	Calce (Basic M15)	15,0	4,00	GFRP 50x50	3,150	63,00	72,0	3,50%	a L in GFRP	18	0	2	0,12	0,08	0,24	3,06	1080,00	1490	1,38	240	51	291	0,175
MAT-03-S	Laterizi pieni	1200 x 1200	Calce (Basic M15)	15,0	4,00	GFRP 50x50	3,150	63,00	72,0	3,50%	a L in GFRP	18	0	1	0,12	0,08	0,12	1,52	1080,00	1052	0,97	240	20	260	0,077
MAT-04-D	Laterizi pieni	1200 x 1200	Calce (Basic M15)	15,0	4,00	GFRP 35x30	3,520	95,00	72,0	2,00%	a L in GFRP	18	0	2	0,12	0,08	0,23	3,03	1080,00	2512	2,33	240	57	297	0,192
MAT-05-S	Laterizi pieni	1200 x 1200	Calce (Basic M15)	15,0	4,00	GFRP 35x30	3,520	95,00	72,0	2,00%	a L in GFRP	18	0	1	0,12	0,08	0,13	1,73	1080,00	2703	2,50	240	30	270	0,111
MAT-06-S	Laterizi pieni	1200 x 1200	Cemento (Betonfix RCA)	25,0	6,00	GFRP 50x50	3,150	63,00	72,0	3,50%	a L in GFRP	18	0	1	0,12	0,08	0,14	1,83	1080,00	1624	1,50	240	27	267	0,101
MAT-07-S	Laterizi pieni	1200 x 1200	Cemento (Betonfix RCA)	25,0	6,00	GFRP 35x30	3,520	95,00	72,0	1,50%	a L in GFRP	18	0	1	0,12	0,08	0,14	1,79	1080,00	1834	1,70	240	25	265	0,094
PIE-01-U	Pietra irregolare	1200 x 1200										19	0		0,13	0,08	0,08	2092,00	2092			240			
PIE-02-D	Pietra irregolare	1200 x 1200	Calce (Basic M15)	15,0	4,00	GFRP 50x50	3,150	63,00	72,0	3,50%	a L in GFRP	19	0	2	0,13	0,08	0,21	2,45	2092,00	2034	0,97	240	63	303	0,208
PIE-03-S	Pietra irregolare	1200 x 1200	Calce (Basic M15)	15,0	4,00	GFRP 50x50	3,150	63,00	72,0	3,50%	a L in GFRP	19	0	1	0,13	0,08	0,16	1,85	2092,00	954	0,46	240	45	285	0,158
PIE-04-D	Pietra irregolare	1200 x 1200	Calce (Basic M15)	15,0	4,00	GFRP 35x30	3,520	95,00	72,0	2,00%	a L in GFRP	19	0	2	0,13	0,08	0,24	2,88	2092,00	876	0,42	240	67	307	0,218
PIE-05-S	Pietra irregolare	1200 x 1200	Calce (Basic M15)	15,0	4,00	GFRP 35x30	3,520	95,00	72,0	1,50%	a L in GFRP	19	0	1	0,13	0,08	0,16	1,90	2092,00	1902	0,91	240	53	293	0,181
CD-09-S-OR	Laterizi pieni	1200 x 1200	High cement mortar (21,36 MPa)									18	0		0,03	0,02	0,02	150,00	150			280			
CD-11-S-IP	Laterizi pieni	1200 x 1200	High cement mortar (21,36 MPa)	21,4	2,14	GFRP 66x66	5,125	76,87	38,0	1,83%	a L in GFRP	18	0	2	0,03	0,02	0,09	4,30	150,00	795	5,30	300	80	380	0,211
CD-02-U-OR	Pietra irregolare	1200 x 1200	High cement mortar (21,36 MPa)									19	0		0,03	0,02	0,02	29,00	29			480			
CD-06-U-OR	Pietra irregolare	1200 x 1200	High cement mortar (21,36 MPa)									19	0		0,03	0,02	0,02	35,00	35			600			
CD-07-U-IP	Pietra irregolare	1200 x 1200	High cement mortar (21,36 MPa)	21,4	2,14	GFRP 66x66	5,125	76,87	38,0	1,83%	a L in GFRP	19	0	2	0,03	0,02	0,16	9,00	32,00	2787	87,09	480	90	570	0,158
CD-08-U-IR	Pietra irregolare	1200 x 1200	High cement mortar (21,36 MPa)	21,4	2,14	GFRP 66x66	5,125	76,87	38,0	1,83%	a L in GFRP	19	0	2	0,03	0,02	0,21	11,60	32,00	2458	76,81	480	85	565	0,150
CD-10-U-IR	Pietra irregolare	1200 x 1200	High cement mortar (21,36 MPa)	21,4	2,14	GFRP 66x66	5,125	76,87	38,0	1,83%	a L in GFRP	19	0	2	0,03	0,02	0,21	10,20	32,00			600	100	700	0,143
CD-11-A-OR	Pietra irregolare	1200 x 1200	High cement mortar (21,36 MPa)									19	0		0,03	0,02	0,02	83,00	83			620			
CD-12-P-IP	Pietra irregolare	1200 x 1200	High cement mortar (21,36 MPa)	21,4	2,14	GFRP 66x66	5,125	76,87	38,0	1,83%	a L in GFRP	19	0	2	0,03	0,02	0,08	4,10	83,00	668	8,05	620	100	720	0,139
CD-13-P-IP	Pietra irregolare	1200 x 1200	High cement mortar (21,36 MPa)	21,4	2,14	GFRP 66x66	5,125	76,87	38,0	1,83%	a L in GFRP	19	0	2	0,03	0,02	0,12	5,10	83,00	732	8,82	620	20	640	0,031
CD-14-P-IP	Pietra irregolare	1200 x 1200	High cement mortar (21,36 MPa)	21,4	2,14	GFRP 66x66	5,125	76,87	38,0	1,83%	a L in GFRP	19	0	2	0,03	0,02	0,09	3,80	83,00	895	10,78	620	20	640	0,031
S1-NR-1	Laterizi pieni	1240 x 1290										18	0		0,08	0,05	0,05					100			
S1-NR-2	Laterizi pieni	1240 x 1300										18	0		0,07	0,04	0,04					100			
S1-FB8-1	Laterizi pieni	1250 x 1290	Calce (8MPa)	8,0		GFRP 66x66 mm						18	0	2	0,07	0,05	0,34	7,00				100	40	140	0,286
S1-FB8-2	Laterizi pieni	1250 x 1280	Calce (8MPa)	8,0		GFRP 66x66 mm						18	0	2	0,07	0,05	0,40	8,25				100	40	140	0,286
S1-FB13-1	Laterizi pieni	1250 x 1290	Calce (13 Mpa)	13,0		GFRP 66x66 mm						18	0	2	0,07	0,05	0,35	7,16				100	40	140	0,286
S1-FB13-2	Laterizi pieni	1260 x 1290	Calce (13 Mpa)	13,0		GFRP 66x66 mm						18	0	2	0,07	0,05	0,35	7,26				100	40	140	0,286
S1-FB25-1	Laterizi pieni	1250 x 1280	Cemento (25 Mpa)	25,0		GFRP 66x66 mm						18	0	2	0,07	0,05	0,41	8,48				100	40	140	0,286
S1-FB25-2	Laterizi pieni	1260 x 1290	Cemento (25 Mpa)	25,0		GFRP 66x66 mm						18	0	2	0,07	0,05	0,45	9,22				100	40	140	0,286
S1-FBML-1	Laterizi pieni	1250 x 1290	Calce (8MPa)	8,0		GFRP 66x66 mm						18	0	2	0,07	0,05	0,35	7,11				100	40	140	0,286
S1-FBML-2	Laterizi pieni	1240 x 1300	Calce (8MPa)	8,0		GFRP 66x66 mm						18	0	2	0,07	0,05	0,34	6,97				100	40	140	0,286
D1-NR-1	muratura a sacco paramenti di laterizi	1240 x 1290										18	1		0,05	0,03	0,03					100			
D1-NR-2	muratura a sacco paramenti di laterizi	1240 x 1300										18	1		0,07	0,04	0,04					100			
D1-FB8-1	muratura a sacco paramenti di laterizi	1250 x 1290	Calce (8MPa)	8,0		GFRP 66x66 mm						18	1	2	0,06	0,04	0,36	9,40				100	40	190	0,211
D1-FB8-2	muratura a sacco paramenti di laterizi	1250 x 1280	Calce (8MPa)	8,0		GFRP 66x66 mm						18	1	2	0,06	0,04	0,37	9,47				100	40	190	0,211
NHL15-490-L5	Pietra irregolare	1000 x 1000	Calce idraulica M15	22,4		GFRP 80x80 mm						19	0	2	0,07	0,05	0,37	5,00							
laterizi pieni		510 x 510	Malta di calce (9,1 Mpa)	9,1		GFRP						18	0	2			1,40	1,62			4,23	120			

APPENDICE B

f _{cc}	Resistenza a compressione malta intonaco [Mpa]	Area maglia [mm ²]	Resistenza a trazione singola barra [kN]	Modulo elastico a trazione singola barra [GPa]	Allungamento a rottura singola barra [%]	Densità muratura (NTC) [kN/m ³]	Presenza sacco	una faccia	due facce	spessore provino [mm]	spessore coating [mm]	res taglio non rinforzata τ0 [N/mm2]	τ ₀ /τ ₀
0	0	0	0	0	0,00	18	0	0	0	250	0	0,25	1,00
0	0	0	0	0	0,00	18	0	0	0	250	0	0,19	1,00
0	0	0	0	0	0,00	18	0	0	0	250	0	0,26	1,00
0	0	0	0	0	0,00	18	0	0	0	250	0	0,29	1,00
0	0	0	0	0	0,00	18	0	0	0	250	0	0,21	1,00
0	0	0	0	0	0,00	18	0	0	0	250	0	0,30	1,00
6,71	1089	4,425	30	1,75	18	0	0	1	1	250	30	0,25	1,80
6,71	1089	4,425	30	1,75	18	0	0	1	1	250	30	0,25	1,72
6,71	4356	4,465	29	1,85	18	0	0	1	1	250	30	0,25	1,72
6,71	4356	4,465	29	1,85	18	0	0	1	1	250	30	0,25	1,92
6,71	9801	4,33	27	1,92	18	0	0	1	1	250	30	0,25	1,96
6,71	9801	4,33	27	1,92	18	0	0	1	1	250	30	0,25	1,84
4,66	4356	4,465	29	1,85	18	0	0	1	1	250	30	0,25	1,68
4,66	4356	4,465	29	1,85	18	0	0	1	1	250	30	0,25	1,64
6,9	4356	4,465	29	1,85	18	0	0	1	1	250	30	0,25	1,44
6,9	4356	4,465	29	1,85	18	0	0	1	1	250	30	0,25	1,52
4,82	4356	4,465	29	1,85	18	0	0	1	1	250	30	0,25	1,44
4,82	4356	4,465	29	1,85	18	0	0	1	1	250	30	0,25	1,56
11,66	4356	4,465	29	1,85	18	0	0	1	1	250	30	0,25	1,60
11,16	4356	4,465	29	1,85	18	0	0	1	1	250	30	0,25	1,84
11,16	4356	4,465	29	1,85	18	0	0	1	1	250	30	0,25	1,84
0	0	0	0	0,00	18	0	0	0	0	250	0	0,32	1,00
0	0	0	0	0,00	18	0	0	0	0	250	0	0,27	1,00
6,71	1089	4,465	29	1,85	18	0	0	1	1	250	30	0,30	1,63
6,71	1089	4,465	29	1,85	18	0	0	1	1	250	30	0,30	1,59
6,71	4356	4,465	29	1,85	18	0	0	1	1	250	30	0,30	1,86
6,71	4356	4,465	29	1,85	18	0	0	1	1	250	30	0,30	1,97
6,71	9801	4,33	27	1,92	18	0	0	1	1	250	30	0,30	1,83
6,71	9801	4,33	27	1,92	18	0	0	1	1	250	30	0,30	2,10
0	0	0	0	0,00	18	0	0	0	0	380	0	0,20	1,00
0	0	0	0	0,00	18	0	0	0	0	380	0	0,24	1,00
6,71	1089	4,465	29	1,85	18	0	0	1	1	380	30	0,22	1,64
6,71	1089	4,465	29	1,85	18	0	0	1	1	380	30	0,22	1,64
6,71	4356	4,465	29	1,85	18	0	0	1	1	380	30	0,22	1,82
6,71	4356	4,465	29	1,85	18	0	0	1	1	380	30	0,22	1,50
6,71	4356	7	25	1,28	18	0	0	1	1	380	30	0,22	1,86
6,71	4356	7	25	1,28	18	0	0	1	1	380	30	0,22	2,00
6,71	9801	7,29	24,3	1,36	18	0	0	1	1	380	30	0,22	1,59
6,71	9801	7,29	24,3	1,36	18	0	0	1	1	380	30	0,22	1,41
0	0	0	0	0,00	18	0	0	0	0	380	0	0,18	1,00
0	0	0	0	0,00	18	0	0	0	0	380	0	0,22	1,00
6,71	9801	7,29	24,3	1,36	18	0	0	1	1	380	30	0,20	1,55
6,71	9801	7,29	24,3	1,36	18	0	0	1	1	380	30	0,20	1,20
0	0	0	0	0,00	18	1	0	0	0	400	0	0,17	1,00
0	0	0	0	0,00	18	1	0	0	0	400	0	0,15	1,00
6,71	4356	4,465	29	1,85	18	1	0	1	1	400	30	0,16	1,69
6,71	4356	4,465	29	1,85	18	1	0	1	1	400	30	0,16	1,63
6,71	9801	4,33	27	1,92	18	1	0	1	1	400	30	0,16	1,75
6,71	9801	4,33	27	1,92	18	1	0	1	1	400	30	0,16	1,44
0	0	0	0	0,00	18	1	0	0	0	400	0	0,16	1,00
0	0	0	0	0,00	18	1	0	0	0	400	0	0,15	1,00
6,71	1089	4,465	29	1,85	18	1	0	1	1	400	30	0,16	1,42
6,71	1089	4,465	29	1,85	18	1	0	1	1	400	30	0,16	1,48
6,71	4356	4,465	29	1,85	18	1	0	1	1	400	30	0,16	1,23
6,71	4356	4,465	29	1,85	18	1	0	1	1	400	30	0,16	1,23
0	0	0	0	0,00	20	0	0	0	0	400	0	0,17	1,00
0	0	0	0	0,00	20	0	0	0	0	400	0	0,17	1,00
4,66	4356	4,465	29	1,85	20	0	0	1	1	400	32,5	0,17	1,82
4,66	4356	4,465	29	1,85	20	0	0	1	1	400	32,5	0,17	1,88
6,9	4356	4,465	29	1,85	20	0	0	1	1	400	32,5	0,17	1,94
6,9	4356	4,465	29	1,85	20	0	0	1	1	400	32,5	0,17	1,94
0	0	0	0	0,00	19	0	0	0	0	400	0	0,09	1,00
0	0	0	0	0,00	19	0	0	0	0	400	0	0,10	1,00
6,71	1089	4,465	29	1,85	19	0	0	1	1	400	37,5	0,10	2,95
6,71	1089	4,465	29	1,85	19	0	0	1	1	400	37,5	0,10	2,74
6,71	4356	4,465	29	1,85	19	0	0	1	1	400	37,5	0,10	2,53
6,71	4356	4,465	29	1,85	19	0	0	1	1	400	37,5	0,10	2,74
6,71	4356	7	25	1,28	19	0	0	1	1	400	37,5	0,10	3,16
6,71	4356	7	25	1,28	19	0	0	1	1	400	37,5	0,10	3,05
0	0	0	0	0,00	19	0	0	0	0	400	0	0,08	1,00
0	0	0	0	0,00	19	0	0	0	0	400	0	0,08	1,00
6,71	4356	4,465	29	1,85	19	0	0	1	1	400	37,5	0,08	3,38
6,71	4356	4,465	29	1,85	19	0	0	1	1	400	37,5	0,08	3,50
0	0	0	0	0,00	20	0	0	0	0	700	0	0,18	1,00
0	0	0	0	0,00	20	0	0	0	0	700	0	0,15	1,00
6,9	4356	4,465	29	1,85	20	0	0	1	1	700	32,5	0,17	1,76
6,9	4356	7	25	1,28	20	0	0	1	1	700	32,5	0,17	1,88
0	0	0	0	0,00	19	0	0	0	0	400	0	0,08	1,00
0	0	0	0	0,00	19	0	0	0	0	400	0	0,09	1,00
6,9	4356	4,465	29	1,85	19	0	0	1	1	400	37,5	0,09	3,18
6,9	4356	4,465	29	1,85	19	0	0	1	1	400	37,5	0,09	3,18
0	0	0	0	0,00	19	0	0	0	0	400	0	0,03	1,00
0	0	0	0	0,00	19	0	0	0	0	400	0	0,04	1,00
3,64	4356	4,465	29	1,85	19	0	0	1	1	400	37,5	0,04	4,29
3,64	4356	4,465	29	1,85	19	0	0	1	1	400	37,5	0,04	4,57
0	0	0	0	0,00	18	0	0	0	0	250	0	0,23	1,00
0	0	0	0	0,00	18	0	0	0	0	250	0	0,23	1,00
2,7	4356	5,125	38,0	1,83	18	0	0	1	1	250	50	0,23	1,18
2,7	4356	5,125	38,0	1,83	18	0	0	1	1	250	50	0,23	1,29
0	0	0	0	0,00	14,5	0	0	0	0	250	0	0,31	1,00
0	0	0	0	0,00	14,5	0	0	0	0	250	0	0,24	1,00
0	0	0	0	0,00	14,5	0	0	0	0	250	0	0,23	1,00
0	0	0	0	0,00	14,5	0	0	0	0	250	0	0,23	1,00
0	0	0	0	0,00	14,5	0	0	0	0	250	0	0,30	1,00
0	0	0	0	0,00	14,5	0	0	0	0	250	0	0,23	1,00
14,2	900	3,2	33	4,00	14,5	0	1	0	1	250	40	0,26	1,48
14,2	900	3,2	33	4,00	14,5	0	1	0	1	250	40	0,26	1,44
14,2	900	3,2	33	4,00	14,5	0	0	1	1	250	40	0,26	3,70
14,2	900	3,2	33	4,00	14,5	0	0	1	1	250	40	0,26	3,62
14,5	900	3,2	33	4,00	14,5	0	1	0	1	250	40	0,26	1,60
14,5	900	3,2	33	4,00	14,5	0	1	0	1	250	40	0,26	1,87
14,5	900	3,2	33	4,00	14,5	0	0	1	1	250	40	0,26	2,81
14,5	900	3,2	33	4,00	14,5	0	0	1	1	250	40	0,26	2,03
14,2	1600	2,25	33	4,00	14,5	0	1	0	1	250	40	0,26	1,48
14,2	1600	2,25	33	4,00	14,5	0	1	0	1	250	40	0,26	1,52
14,2	1600	2,25	33	4,00	14,5	0	0	1	1	250	40	0,26	4,09
14,2	1600	2,25	33	4,00	14,5	0	0	1	1	250	40	0,26	3,82
14,5	1600	2,25	33	4,00	14,5	0	1	0	1	250	40	0,26	1,52
14,5	1600	2,25	33	4,00	14,5	0	1	0	1	250	40	0,26	1,52
14,5	1600	2,25	33	4,00	14,5	0	0	1	1	250	40	0,26	2,88
14,5	1600	2,25	33	4,00	14,5	0	0	1	1	250	40	0,26	

APPENDICE C

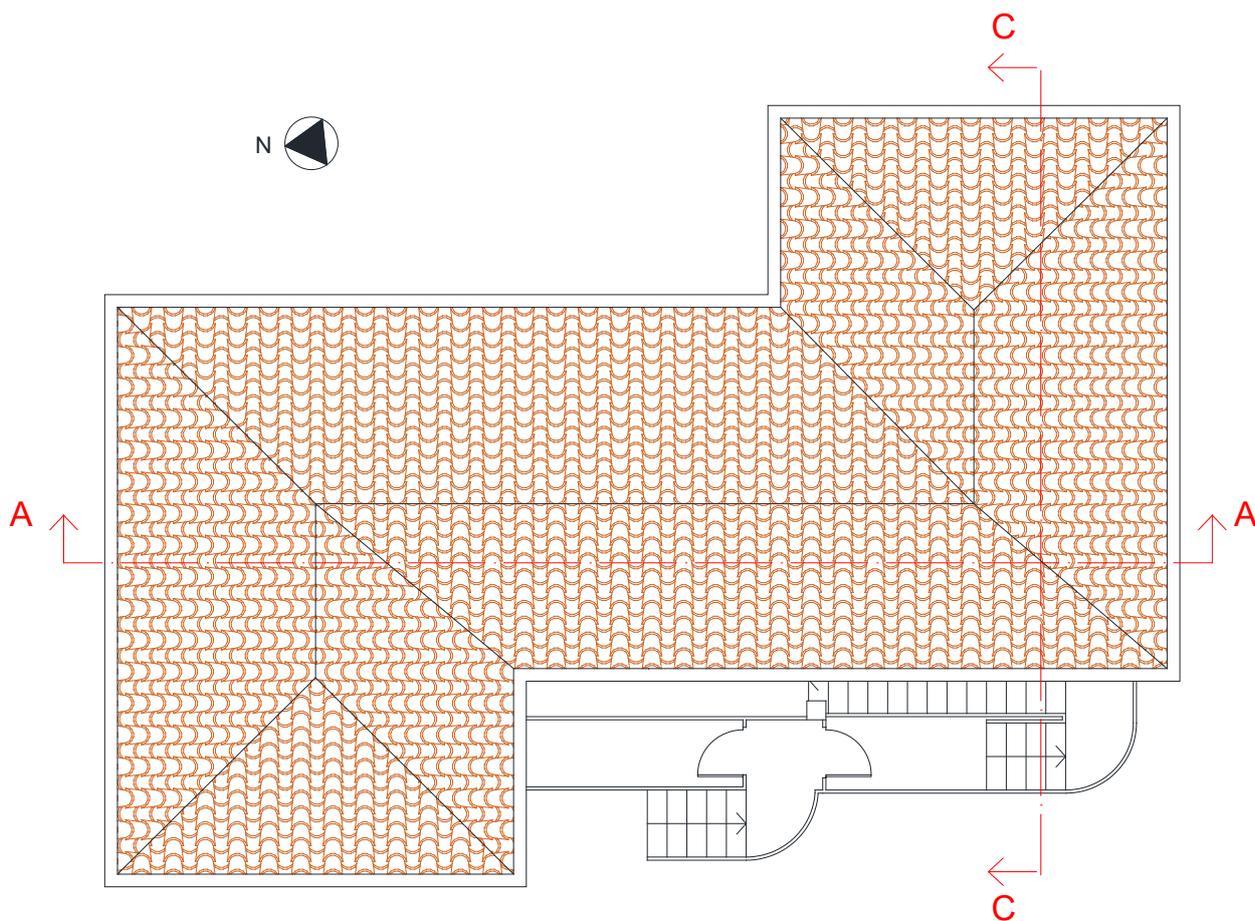


Figura 80- Pianta copertura (fuori scala)

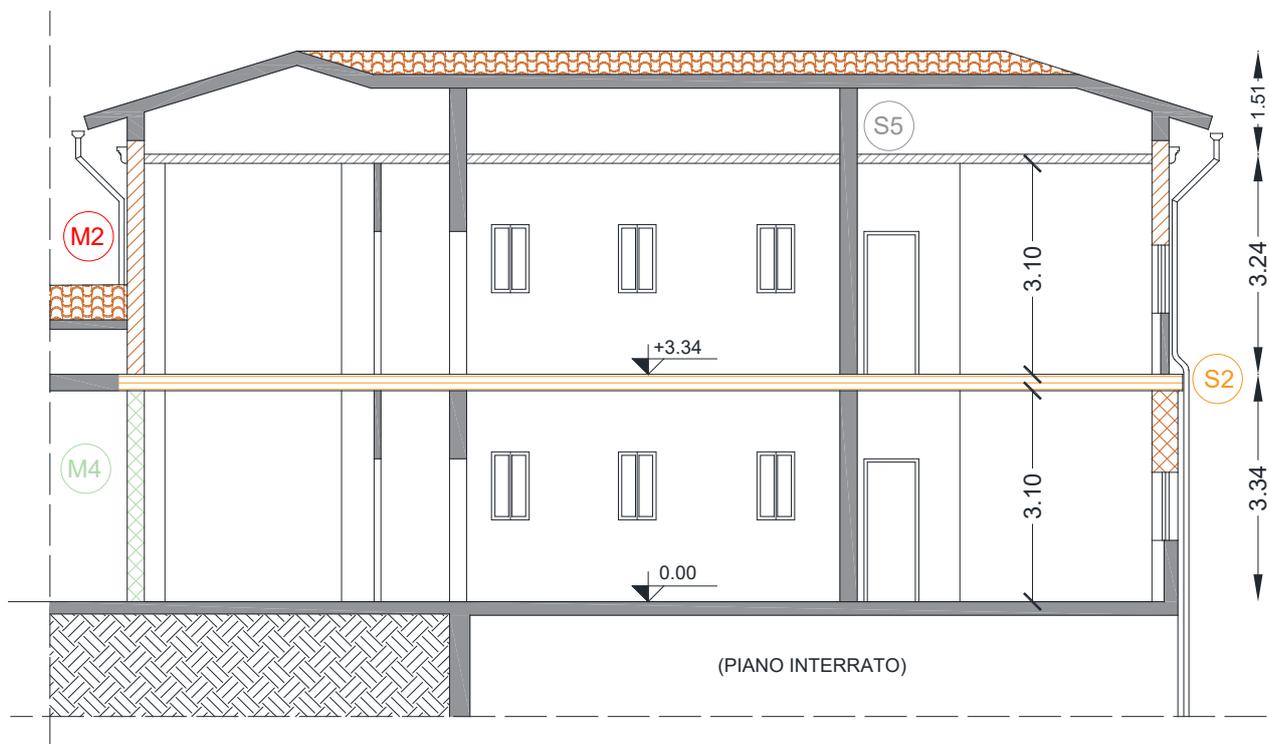


Figura 81- Sezione A-A (fuori scala), misure in metri

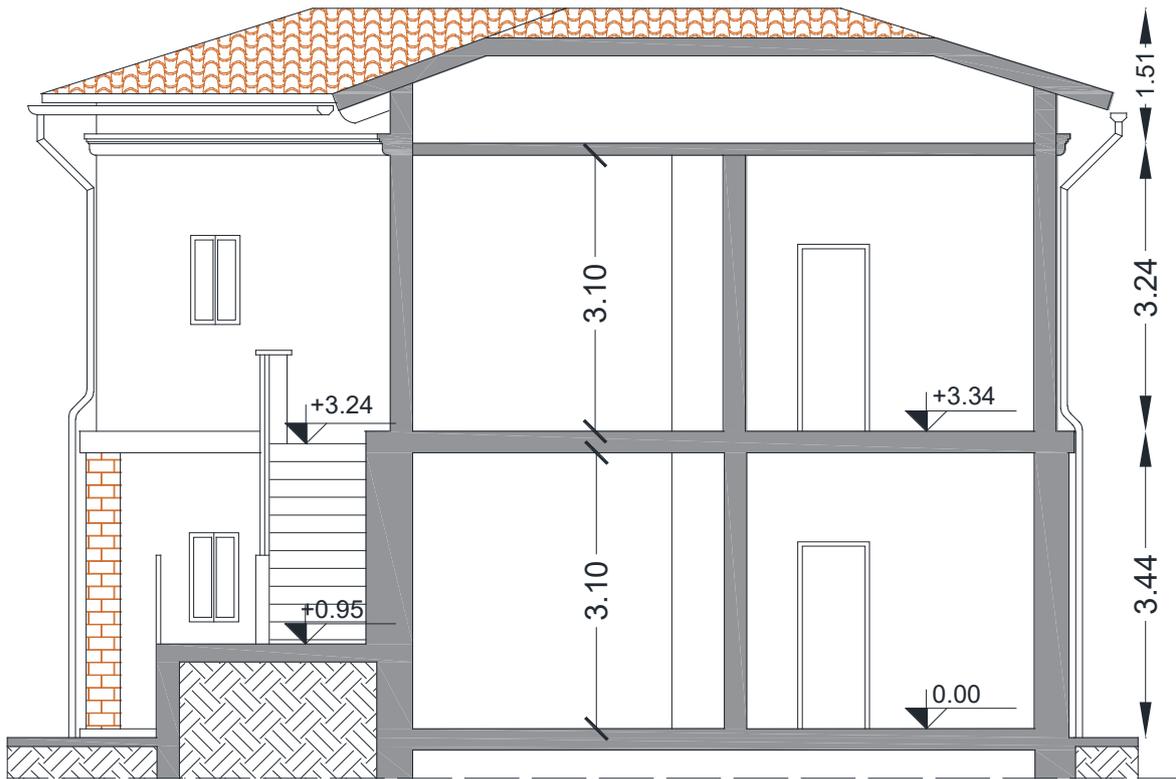


Figura 82- Sezione C-C (fuori scala), misure in metri



Figura 83- Prospetto Ovest (fuori scala)

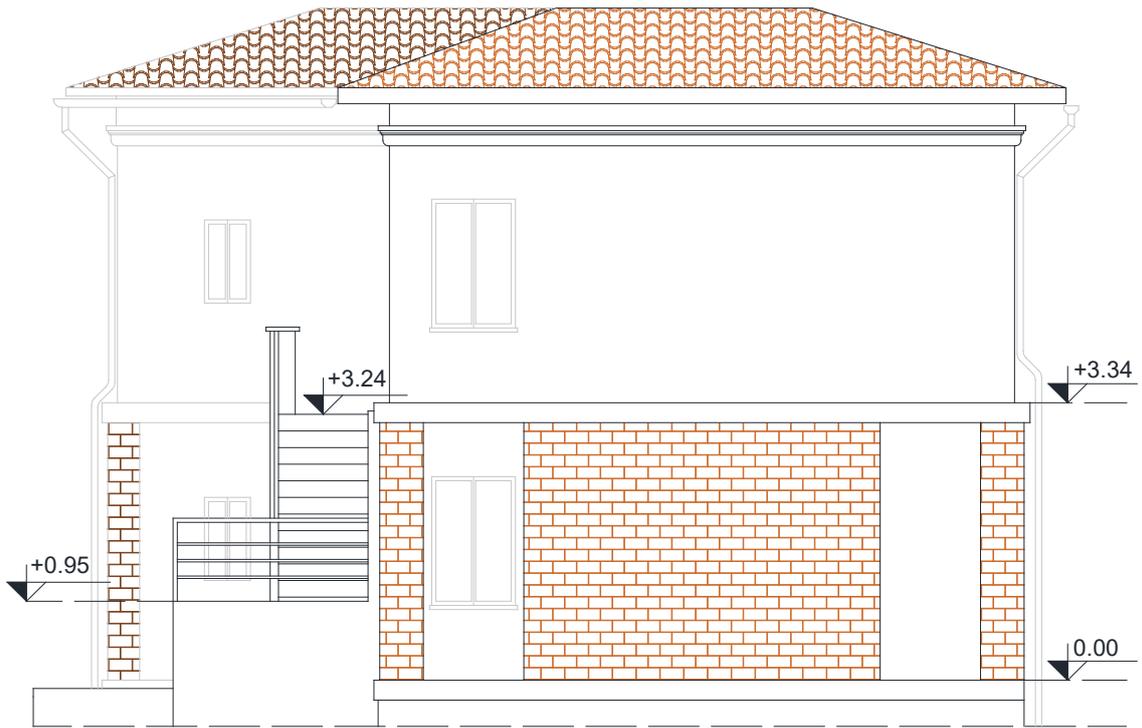


Figura 84- Prospetto Sud (fuori scala)



Figura 85- Prospetto Est (fuori scala)

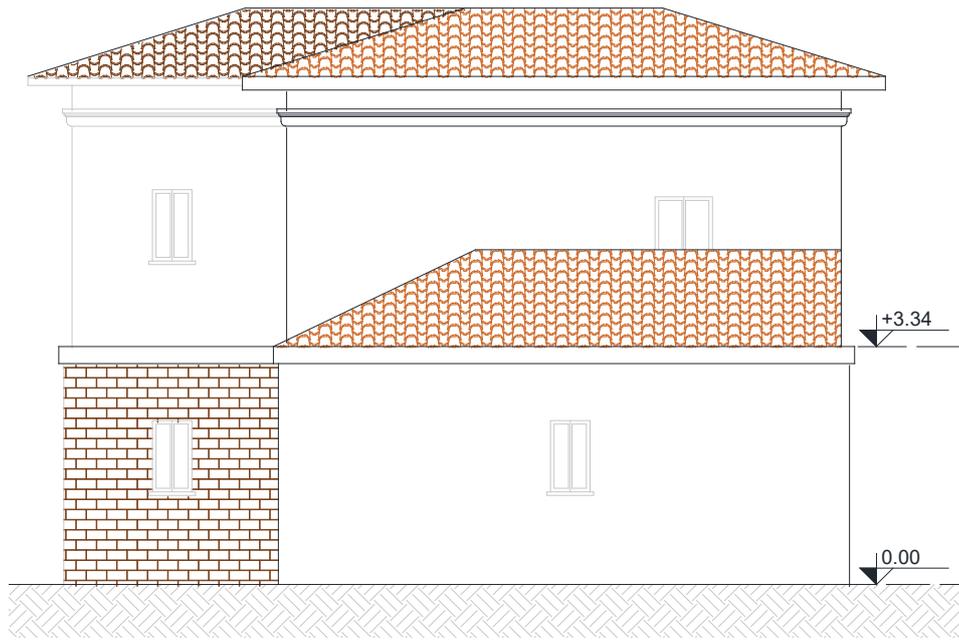


Figura 86- Prospetto Nord (fuori scala)

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1- Percentuale di edifici per tipologia costruttiva a livello regionale.....	3
Figura 2- Comportamento scatolare	7
Figura 3- Resistenza nel piano	7
Figura 4- Resistenza fuori dal piano	7
Figura 5- Tabella C8.5.1: Caratteristiche meccaniche di riferimento della muratura secondo le NTC (Circolare delle NTC 2018, 2019).....	9
Figura 6- Tabella C8.5.2: coefficienti migliorativi massimi applicabili (Circolare delle NTC 2018, 2019)	10
Figura 7- con solaio deformabile e senza cordolo.....	14
Figura 8- con solaio deformabile e cordolo.....	14
Figura 9- con solaio rigido e cordolo	14
Figura 10- Fasi di posa dell'intonaco armato	15
Figura 11- schematizzazione della tecnica di rinforzo in GFRP	18
Figura 12- dettaglio rete in GFRP.....	18
Figura 13- dettaglio connettori ad L in GFRP.....	18
Figura 14- Apparato sperimentale per il test di compressione diagonale montato su un provino.....	20
Figura 15- Modello agli elementi finiti.....	24
Figura 16- Comparazione approccio numerico con valori da normativa (Borri et al., 2022)	25
Figura 17- Caratteristiche edificio di riferimento.....	26
Figura 18- Pianta fuori scala dell'edificio e individuazione della parte considerata	26
Figura 19- Pianta piano terra (fuori scala), misure in metri	27
Figura 20- Pianta piano primo (fuori scala), misure in metri.....	27
Figura 21- Pianta delle tipologie costruttive (fuori scala)	28
Figura 22- Sezioni di pareti, solai e coperture (fuori scala).....	29
Figura 23- Malta Diathonite Sismactive	31
Figura 24- Polites AR 330	31
Figura 25- Elites L.....	31
Figura 26- Codice di R che rappresenta il modello di regressione scelto ed i relativi passaggi.....	37
Figura 27- Intervallo di validità del modello	38
Figura 28- Schematizzazione a telaio equivalente di una parete con apertura e cordolo in spessore di solaio	40
Figura 29- Dettaglio elemento maschio murario	40
Figura 30- Dettaglio elemento fascia.....	40
Figura 31- Metodo Dolce per il calcolo dell'altezza efficace	41
Figura 32- Configurazione di rinforzo UNI_2.....	42
Figura 33- Configurazione di rinforzo UNI_1.....	43
Figura 34- Configurazione di rinforzo RA_2	43
Figura 35- Configurazione di rinforzo RA_1	44
Figura 36- Configurazione di rinforzo RB_2	44
Figura 37- Configurazione di rinforzo RB_1	45
Figura 38- Modello a telaio equivalente della struttura.....	46
Figura 39- Vista solida del modello a telaio	46
Figura 40- Proprietà meccaniche della muratura non rinforzata	48
Figura 41- Valori di calcolo per densità di murature rinforzate	49
Figura 42- Meccanismi di rottura muratura.....	49
Figura 43- Legami costitutivi a flessione e taglio dei maschi murari	50

Figura 44- Legami costitutivi a flessione e taglio delle fasce murarie	50
Figura 45- Legami costitutivi cordoli in cemento armato	50
Figura 46- Analisi dei carichi del solaio piano primo	52
Figura 47- Analisi dei carichi del solaio di sottotetto	52
Figura 48- Analisi dei carichi della copertura	52
Figura 49- Parametri della struttura.....	53
Figura 50- Passo 1 in cui vengono richieste la Classe d'uso della struttura e la località.	53
Figura 51- Scheda relativa alla valutazione della pericolosità sismica	53
Figura 52- Passo 2 in cui si specificano la categoria di suolo di fondazione e la categoria topografica	54
Figura 53- Passo 3 in cui è riportato il riepilogo dei parametri dello spettro e valori relativi ad analisi lineari che, nel nostro caso, non vengono presi in considerazione.	54
Figura 54- Passo 4.....	54
Figura 55- Passo 5 in cui si devono definire le masse sismiche. È disponibile un comando per la definizione automatica: utilizzandolo il programma applicherà automaticamente i coefficienti necessari considerando un peso unitario per i carichi permanenti ed il coefficiente Ψ_2 per i variabili dei solai e per il carico da neve dei solai di copertura.	55
Figura 56- Spettri di risposta elastici	55
Figura 57- Sistema e diagramma bilineare equivalente	57
Figura 58- Pannello che riporta le azioni sismiche, la direzione, il verso e le eccentricità considerate	58
Figura 59- Risultati del modello di regressione	60
Figura 60- Grafico rappresentante R^2 aggiustato	63
Figura 61- Grafici dei residui	64
Figura 62- Formula di regressione.....	65
Figura 63- Caratteristiche del rinforzo Sismactive Thermal System.....	66
Figura 64- Coefficiente migliorativo muro da 380 mm nel caso di due facce di applicazione del rinforzo	67
Figura 65- Coefficiente migliorativo muro da 380 mm nel caso di una faccia di applicazione del rinforzo	67
Figura 66- Aumento percentuale del coefficiente migliorativo nel caso di rinforzo applicato su due facce	68
Figura 67- Aumento percentuale del coefficiente migliorativo nel caso di rinforzo applicato su una faccia	68
Figura 68- Modi di vibrare del modello non rinforzato (NR): Modo 1 (a); Modo 2 (b); Modo 3 (c); Modo 4 (d); Modo 5 (e); Modo 6 (f).	69
Figura 69- Modi di vibrare del modello UNI_2: Modo 1 (a); Modo 2 (b); Modo 3 (c); Modo 4 (d); Modo 5 (e); Modo 6 (f).	70
Figura 70- Modi di vibrare del modello UNI_1: Modo 1 (a); Modo 2 (b); Modo 3 (c); Modo 4 (d); Modo 5 (e); Modo 6 (f).	71
Figura 71- Modi di vibrare del modello RA_2: Modo 1 (a); Modo 2 (b); Modo 3 (c); Modo 4 (d); Modo 5 (e); Modo 6 (f).	72
Figura 72- Modi di vibrare del modello RA_1: Modo 1 (a); Modo 2 (b); Modo 3 (c); Modo 4 (d); Modo 5 (e); Modo 6 (f).	73
Figura 73- Modi di vibrare del modello RB_2: Modo 1 (a); Modo 2 (b); Modo 3 (c); Modo 4 (d); Modo 5 (e); Modo 6 (f).	74
Figura 74- Modi di vibrare del modello RB_1: Modo 1 (a); Modo 2 (b); Modo 3 (c); Modo 4 (d); Modo 5 (e); Modo 6 (f).	75
Figura 75- Diminuzione periodo T nei primi tre modi di vibrare rispetto al caso non rinforzato NR	78

Figura 76- Curve di capacità relative alle 16 combinazioni di carico	82
Figura 77- Curve con rapporto tra capacità e domanda maggiori in termini di spostamento del nodo di controllo	83
Figura 78- Valori di incremento massimi del taglio alla base Tb	84
Figura 79- Valori di incremento massimi dello spostamento dc.....	84
Figura 80- Pianta copertura (fuori scala).....	94
Figura 81- Sezione A-A (fuori scala), misure in metri	94
Figura 82- Sezione C-C (fuori scala), misure in metri.....	95
Figura 83- Prospetto Ovest (fuori scala)	95
Figura 84- Prospetto Sud (fuori scala)	96
Figura 85- Prospetto Est (fuori scala)	96
Figura 86- Prospetto Nord (fuori scala).....	97

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1- Legenda dei valori della formula di regressione	65
Tabella 2- Output modello NR	76
Tabella 3- Output modello UNI_2.....	76
Tabella 4- Output modello UNI_1.....	77
Tabella 5- Output modello RA_2	77
Tabella 6- Output modello RA_1	77
Tabella 7- Output modello RB_2	77
Tabella 8- Output modello RB_1	78

BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Cumo, G. Piras, F. Giustini, e E. Pennacchia, «Stato dell'arte di soluzioni tecnologiche di involucro edilizio esistenti come base per interventi di Deep Renovation del patrimonio immobiliare nel settore abitativo MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO».
- [2] S. Vallucci, E. Quagliarini, e S. Lenci, *Costruzioni storiche in muratura. Vulnerabilità sismica e progettazione degli interventi*. Ancona, 2013.
- [3] I. Boem, D. Micheli, e N. Gattesco, «Enhancement of the seismic performances of historic masonry buildings through glass fiber-reinforced mortar», Trieste, 2016.
- [4] Circolare delle NTC 2018, «CIRCOLARE 21 gennaio 2019 Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.»», 2019.
- [5] N. Gattesco e I. Boem, «Experimental and analytical study to evaluate the effectiveness of an in-plane reinforcement for masonry walls using GFRP meshes», *Constr Build Mater*, vol. 88, pagg. 94–104, lug. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.014.
- [6] A. Borri, M. Corradi, R. Sisti, C. Buratti, E. Belloni, e E. Moretti, «Masonry wall panels retrofitted with thermal-insulating GFRP-reinforced jacketing», *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 49, n. 10, pagg. 3957–3968, ott. 2016, doi: 10.1617/s11527-015-0766-4.
- [7] M. Del Zoppo, M. Di Ludovico, A. Balsamo, e A. Prota, «In-plane shear capacity of tuff masonry walls with traditional and innovative Composite Reinforced Mortars (CRM)», *Constr Build Mater*, vol. 210, pagg. 289–300, giu. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.133.
- [8] N. Gattesco e I. Boem, «Experimental and analytical study to evaluate the effectiveness of an in-plane reinforcement for masonry walls using GFRP meshes», *Constr Build Mater*, vol. 88, pagg. 94–104, lug. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.014.
- [9] A. Borri, G. Castori, e M. Corradi, «Design Criteria for Masonry Reinforcement with Composite Reinforced Mortars (CRM)», in *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications Ltd, 2022, pagg. 498–504. doi: 10.4028/p-k031gd.
- [10] NTC, «Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle 'Norme Tecniche per le costruzioni' di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.»», 2018.
- [11] «R: What is R?» Consultato: 22 ottobre 2024. [Online]. Disponibile su: <https://www.r-project.org/about.html>
- [12] Sanford Weisberg, «Applied Linear Regression», 2014.
- [13] V. Ricci, «Principali tecniche di regressione con R», 2006. [Online]. Disponibile su: <http://www.softarelbero.it/gnudoc/fdl.it.html>
- [14] L. Soliani, «FONDAMENTI DI STATISTICA APPLICATA ALL'ANALISI E ALLA GESTIONE DELL'AMBIENTE (edizione settembre 2001)», 2001.
- [15] B. Mcdonald, «A Teaching Note on Cook's Distance-A Guideline», 2016. [Online]. Disponibile su: <https://www.researchgate.net/publication/2526564>
- [16] 2 S.I. Software e Servizi per l'Ingegneria, «Manuale dell'utente PRO_SAM», 2024.

- [17] G. Castori, E. Speranzini, M. Corradi, S. Agnetti, e G. Bisciotti, «Shear strengthening of masonry panels using a gfrp-reinforced mortar coating», in *Proceedings of the International Conference on Structural Dynamic , EURODYN*, European Association for Structural Dynamics, 2020, pagg. 4358–4372. doi: 10.47964/1120.9357.21645.
- [18] Claudio. Modena, F. . Da Porto, e M. R. . Valluzzi, *Brick and Block Masonry : Proceedings of the 16th International Brick and Block Masonry Conference, Padova, Italy, 26-30 June 2016*. CRC Press LLC Taylor & Francis Group [distributore], 2016.
- [19] A. Penna e G. Guerrini, «Valutazione sperimentale di rinforzi CRM su muratura di pietra RAPPORTO DI PROVA».
- [20] F. Longo, A. Cascardi, P. Lassandro, e M. A. Aiello, «A Novel Composite Reinforced Mortar for the Structural and Energy Retrofitting of Masonry Panels», in *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications Ltd, 2022, pagg. 377–384. doi: 10.4028/p-69y10f.
- [21] P. Meriggi, S. De Santis, S. Fares, e G. de Felice, «Design of the shear strengthening of masonry walls with fabric reinforced cementitious matrix», *Constr Build Mater*, vol. 279, apr. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122452.