



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA EDILE

IL RINFORZO DI COLONNE IN MURATURA
ATTRAVERSO REPOINTING FLESSIBILE:
STATO DELL'ARTE E ANALISI SPERIMENTALE

THE REINFORCEMENT OF COLUMN IN MASONRY
THROUGH FLEXIBLE REPOINTING:
STATE OF THE ART AND EXPERIMENTAL ANALYSIS

RELATORE

Prof. Ing. Enrico Quagliarini

CORRELATORE

Ing. Francesco Monni

TESI DI LAUREA DI

Alice Nepi

INDICE

1	RAGIONI E OGGETTO DEL LAVORO	3
2	STATO DELL'ARTE	5
2.1	Comportamento a compressione della muratura	5
2.2	impostazione dell'intervento di recupero	9
2.3	Tecniche di rinforzo	10
2.3.1	Interventi di cerchiatura esterna	11
2.3.2	Interventi nei giunti	28
2.4	Osservazioni sulla letteratura scientifica e criteri di progettazione dei campioni	33
3	MATERIALI E METODI	34
3.1	Malta per la muratura	34
3.2	Mattoni	43
3.3	Corda in fibra di basalto	51
3.4	Resina epossidica	57
3.5	Realizzazione delle colonne in muratura	58
3.5.1	Descrizione e geometria delle colonne da costruire	60
3.5.2	Fasi di realizzazione	62
3.5.3	Rilievo dei provini	70
3.6	Realizzazione dei rinforzi	80
3.6.1	Progettazione e predisposizione del rinforzo con pretensione	81
3.6.2	Controllo dell'umidità'	86
3.6.3	Rinforzo con resina e corda tesa meccanicamente	90
3.7	Prove a compressione sulle colonne	94
3.7.1	Valutazioni sulla resistenza prevista	94
3.7.2	Esecuzione della prova	97
4	RISULTATI DELLE PROVE A COMPRESSIONE	101
4.1	Colonne non rinforzate (UN)	101
4.2	Colonne rinforzate con corde pretese (PTR 40)	108
5	ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI	114
5.1	Prima valutazione	114
5.1.1	Colonne non rinforzate (UN)	116
5.1.2	Colonne rinforzate (UN)	121
5.2	Analisi delle modalità di rottura	126

5.2.1	Colonne non rinforzate (UN)	127
5.2.2	Colonne rinforzate (PTR)	128
6	CONCLUSIONI	131
	Bibliografia.....	132

1 RAGIONI E OGGETTO DEL LAVORO

Attualmente emerge sempre più la necessità di migliorare le prestazioni strutturali degli edifici storici in muratura. In molti casi gli elementi strutturali necessitano infatti di rafforzamento, riparazione e alle volte sostituzione a causa del progressivo invecchiamento e degrado dei materiali, dei traumi e dei danneggiamenti subiti a causa di eventi eccezionali come il sisma o alla carenza di manutenzione.

Sono perciò di fondamentale importanza la conoscenza, la progettazione e la successiva esecuzione di interventi di recupero volti a ripristinare al meglio le prestazioni della componente edilizia nell'ottica della riduzione del rischio sismico e contemporaneamente in grado di perfezionarne il comportamento meccanico-strutturale e al contempo preservarne il valore storico-artistico.

In particolare, il presente lavoro di tesi si concentra sull'elemento costruttivo «colonna».

Il confinamento di colonne in muratura atto ad aumentarne la capacità portante è stato da sempre considerato un metodo facile, economico e veloce da realizzare. Qualora l'elemento da ristrutturare risulti facciavista, le tradizionali tecniche di rinforzo spesso non sono in linea con i principi di intervento del restauro architettonico: rispetto dell'autenticità e controllo dell'impatto visivo.

A tal fine, l'obiettivo del presente lavoro di tesi è quello di effettuare, in primis, un'analisi preliminare di tutte le possibili tecniche di rinforzo innovative e all'avanguardia apparse ad oggi nel mondo del consolidamento, in modo da poter illustrare lo stato dell'arte su questa tematica.

Successivamente si procederà con l'indagine, attraverso una campagna di prove sperimentali e una successiva analisi numerica, di una recente tecnica di cerchiaggio caratterizzata dall'uso di un materiale innovativo inserito nei giunti di malta, il basalto.

Il metodo in questione si propone come valida alternativa alle tecniche tradizionali garantendo il rispetto dell'esistente.

Questa seconda parte si divide principalmente in tre fasi.

La prima fase riguarda l'analisi e la caratterizzazione meccanica, a scopo decisionale e di verifica, dei materiali utilizzati: malta, mattone, corde in fibra di basalto e resina epossidica.

La seconda fase vede l'esecuzione di 33 campioni suddivisi nelle seguenti tipologie:

- RT UN (*Rectangular UNreinforced specimen*): 6 colonne rettangolari non rinforzate;
- CI UN (*Circular UNreinforced specimen*): 3 colonne circolari non rinforzate;
- RT PTR 20, RT PTR 40 (*Rectangular PreTensioned Reinforced*): 12 colonne rettangolari rinforzate con resina e corda di basalto tesa meccanicamente con valori di forza differenti;
- CI PTR 20, CI PTR 40 (*Rectangular PreTensioned Reinforced*): 12 colonne circolari rinforzate con resina e corda di basalto tesa meccanicamente con valori di forza differenti.

La terza fase è caratterizzata dall'esecuzione di prove monoassiali a compressione con successiva restituzione ed elaborazione dei dati al fine di valutare le prestazioni offerte.

E' bene specificare come, una volta preparati tutti i provini, non sia stato possibile per motivi di tempo eseguire la sperimentazione su ognuno di essi. In particolare è stato portato a termine lo studio su:

- n. 6 RT UN;
- n. 3 CI UN;
- n. 1 RT PTR 40;
- n. 3 CI PTR 40.

Nella presente documentazione verrà analizzato il lavoro svolto in merito alle colonne aventi impronta circolare.

2 STATO DELL'ARTE

Al fine di riprodurre colonnine in scala in muratura storica faccia a vista, è stato condotto un accurato studio sulla letteratura inerente tale argomento. Infatti, essendo il nostro territorio contraddistinto da molteplici tipologie murarie, tale ricerca si è rivelata ancor più necessaria. Una volta raggiunto un buon livello di conoscenza dei materiali e delle tecniche di intervento sarà possibile applicare un'adeguata strategia di recupero e consolidamento, in modo tale da impedire la perdita di autenticità del nostro patrimonio edilizio storico.

2.1 COMPORTAMENTO A COMPRESSIONE DELLA MURATURA

Individuare il comportamento della muratura ammette diversi ostacoli in quanto risulta influenzato da diversi fattori, come le caratteristiche delle componenti, le loro dimensioni e il tipo di interconnessioni.

Soprattutto in quelle storiche vengono riscontrate tali difficoltà, sommate alla mancata standardizzazione produttiva, dipesa perlopiù dalla disponibilità di materia prima in loco ma anche dalle abitudini esecutive locali. Il tutto rende meno scontate la conoscenza e, successivamente, la stima delle caratteristiche murarie.

La muratura viene classificata come materiale non omogeneo, anisotropo, asimmetrico e dal comportamento non lineare (legame sforzo-deformazione).

Tale classificazione è dovuta al fatto che si tratti di un composito ottenuto dall'unione di due materiali con diverse caratteristiche meccaniche: il mattone, con una maggiore resistenza a compressione ma con un comportamento fragile e la malta, che risulta essere più duttile ma meno resistente.

Tuttavia, conoscere le caratteristiche dei singoli elementi non è sufficiente per determinare il comportamento della muratura nel suo insieme a causa delle interazioni tra i due componenti.

E' stato osservato [1] come in generale il lavoro a compressione sia dipeso, in diversa misura, dai seguenti fattori:

- Resistenza, caratteristiche deformative e geometria degli elementi resistenti.
- Resistenza e caratteristiche deformative della malta.
- Spessore dei giunti.
- Capacità di assorbimento d'acqua da parte dei mattoni e ritenzione da parte della malta.
- Disposizione degli elementi (sistema costruttivo o "apparecchiatura").

Di conseguenza è possibile constatare sperimentalmente che la reazione di un prisma di muratura, ad uno stato di compressione monoassiale, risulta essere intermedio tra quello degli elementi che lo costituiscono.

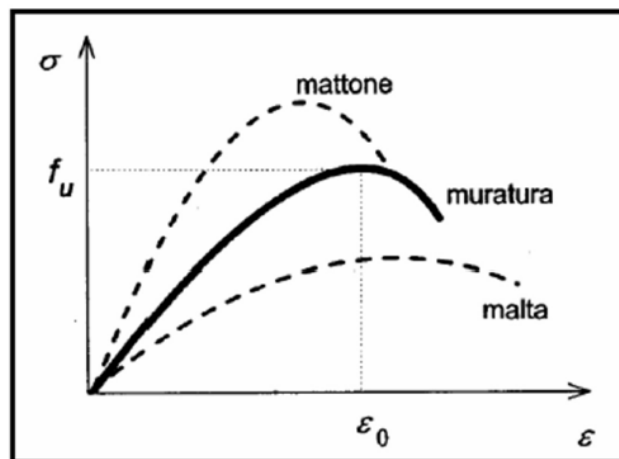


Figura 2.1 Risultato del comportamento della muratura. [1]

Nel prisma soggetto a compressione monoassiale, la malta essendo più deformabile tenderebbe a dilatarsi trasversalmente in misura maggiore rispetto al mattone, dotato di una più rilevante rigidità e un minore coefficiente di Poisson.

Bisogna sempre considerare però che malta e mattone sono connessi tra loro per cui, fino alla perdita di aderenza tra i due, gli spostamenti devono essere nulli.

Come conseguenza il mattone risulta soggetto ad una componente di trazione nel piano orizzontale mentre la malta ad una componente di compressione (Figura 2.2).

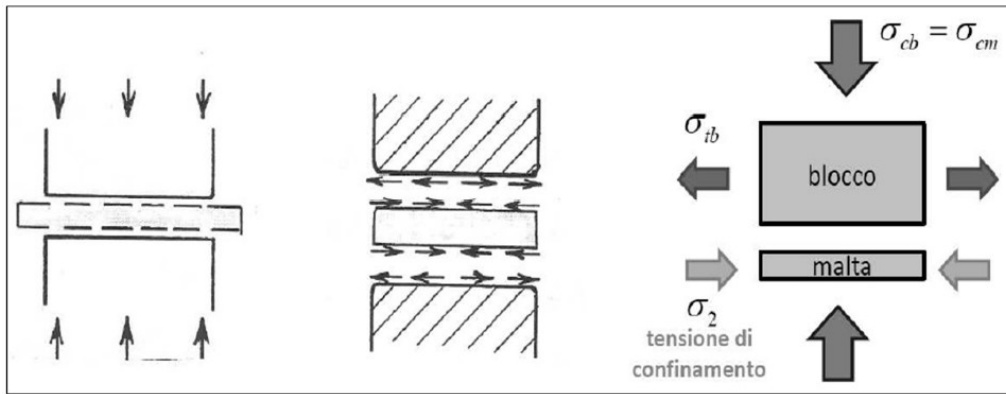


Figura 2.2 Schema di interazione blocco-malta. [1]

Si instaurano dunque stati triassiali di trazione per il mattone, dove la resistenza a compressione risulta essere minore rispetto alla resistenza monoassiale, e stati triassiali di compressione nella malta, dove la resistenza a compressione è maggiore rispetto a quella monoassiale grazie a questa sorta di “confinamento”.

Tali stati triassiali nei singoli componenti provano l'osservazione sperimentale sulla resistenza della muratura, che risulta essere superiore a quella della malta e minore di quella del mattone (Figura 2.3).

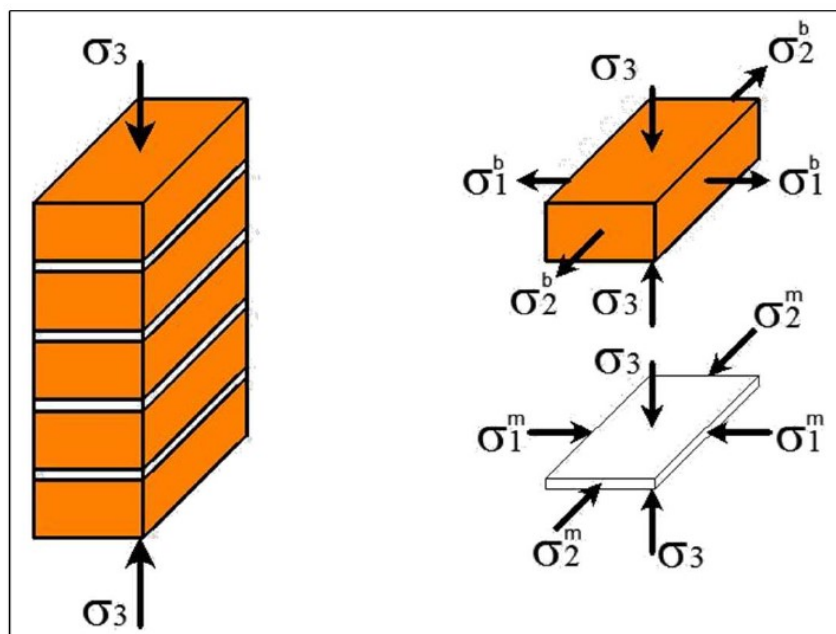


Figura 2.3 Creazione degli stati triassiali di tensione sugli elementi. [1]

Ne deriva la classica modalità di rottura a compressione che si manifesta con la creazione di fessure longitudinali lungo la direzione del carico. Queste si aprono trasversalmente in corrispondenza degli sforzi ultimi di trazione creatisi nei mattoni.



Figura 2.4 Classica rottura a compressione ¹.

¹ <http://www.controllofessure-mq.it/index.php>

2.2 IMPOSTAZIONE DELL'INTERVENTO DI RECUPERO

Questo studio si offre di proporre una campagna sperimentale volta ad ampliare i risultati precedentemente ottenuti [2], [3], [4], [5] riguardanti colonne in laterizio caratterizzate da comportamento meccanico simile a quello della muratura storica, su cui viene applicato un rinforzo di cerchiatura con corde in fibra di basalto.

Per poter procedere con l'impostazione della sperimentazione è stato necessario eseguire un'analisi preliminare in merito a tutte le tecniche di cerchiatura utilizzate fino ad oggi con lo scopo di ottenere un quadro generale dei loro aspetti positivi e negativi ed infine poter comprenderne e confrontarne le risposte meccaniche.

Predisporre un corretto piano di recupero non riguarda solamente il dimensionamento del dispositivo o la scelta della tecnologia da applicare, bensì significa progettare un processo molto più complesso ed articolato che segue le seguenti fasi:

- *Tendenza al minimo intervento.*
- *Ricerca della compatibilità (meccanico-strutturale, fisico-chimica, costruttiva).*
- *Reversibilità.*
- *Rispetto dell'autenticità.*
- *Conservazione della materia.*
- *Controllo dell'impatto visivo.*
- *Riconoscibilità dell'intervento.*
- *Esecuzione dell'intervento; di notevole importanza in quanto una mancanza di accuratezza nell'implementazione incide notevolmente sul risultato previsto.*

2.3 TECNICHE DI RINFORZO

Nell'articolo del professor L. Jurina del Politecnico di Milano [6], è possibile trovare un'esauriente spiegazione in merito al concetto di cerchiatura:

“La cerchiatura è l'applicazione di una *legatura* attorno ad un oggetto con l'obiettivo di limitarne o impedirne le deformazioni laterali e l'insacco della rottura”.

Come già spiegato nel capitolo precedente (2.2), aumentando la compressione laterale in un elemento caricato assialmente si ottiene uno stato limite di tensione tridimensionale, benefico in termini di carico limite.

Nel campo delle costruzioni la cerchiatura viene utilizzata sia per confinare singoli elementi strutturali sia interi edifici o parti di essi.

Tra le varie tecniche una prima classificazione può riguardare:

- La collocazione geometrica, se *esterna* o *interna*. Le cerchiature esterne sono le più diffuse anche se risultano essere invasive dal punto di vista estetico.
- Il materiale utilizzato come acciaio, fibre sintetiche, compositi a base resinosa o cementizia.
- «Quando» il sistema diviene operante. Per questo può essere *passiva* se fornisce sicurezza solo in fase di aggravamento del degrado, oppure *attiva* se entra in funzione al momento della posa.

Per la presente ricerca si è optato per una suddivisione che vede gli interventi di consolidamento suddivisi in tre macro-gruppi:

Interventi di cerchiatura esterna, questa tipologia comprende tutte le tecniche di rinforzo volte a favorire l'incremento di resistenza a compressione mediante elementi lasciati a vista. Sono interventi sicuramente più diffusi ma allo stesso modo risultano essere esteticamente invasivi.

Interventi nei giunti, ovvero tecniche di rinforzo eseguite esclusivamente all'interno dei giunti e/o passanti per lo spessore dell'elemento costruttivo. In entrambi i casi viene preservato il facciavista, avendo cura se necessario di ricoprire lo spessore del giunto rinforzato con la malta.

2.3.1 INTERVENTI DI CERCHIATURA ESTERNA

FASCE IN ACCIAIO

La più antica tra le tecniche di cerchiatura esterna, usata anche oggi, riguarda l'utilizzo di fasce in acciaio che avvolgono la colonna. In passato la legatura avveniva attraverso il riscaldamento e la successiva saldatura a caldo della fascia. Oggi si utilizzano maggiormente chiusure di tipo meccanico come cerniere, bullonature o forchette.

Tali tipi di connessioni lo rendono un sistema passivo o moderatamente attivo in quanto risulta difficile garantire l'aderenza al supporto o imprimere una pretensione alla cerchiatura.

L'intervento risulta particolarmente adatto per colonne a sezione circolare piuttosto che quadrata o di qualsiasi altra forma, in quanto non si dovrebbe far fronte a problemi dettati da una più complicata aderenza con gli spigoli.

Seppur efficace e reversibile, è di grande impatto visivo e altera l'interpretazione dell'elemento originario.



Figura 2.5 Abbazia di Chiaravalle, Milano. [6]



Figura 2.6 Convento di San Girolamo, Spello. [7]

METODO DELLE STRISCE ATTIVE CAM®

Il sistema CAM® mira al rafforzamento della muratura attraverso l'impiego di nastri in acciaio inossidabile che fungono da collegamento tra le orditure della parete interna ed esterna. Prima di essere chiuse ad anello, alle singole fascette viene impressa una certa pretensione e contemporaneamente una leggera precompressione viene applicata alla muratura.

I nastri metallici sono caratterizzati da uno spessore di circa 0,8 mm. Tale dimensione così ridotta conferisce al sistema una modesta flessibilità ed un maggiore assorbimento delle irregolarità del supporto rispetto alla tecnica di cerchiaggio in acciaio.

Questa tecnologia risulta essere poco invasiva e totalmente reversibile, inoltre i risultati ottenuti in termini di resistenza e duttilità sono decisamente positivi.

Rimane tuttavia evidente l'alterazione dell'aspetto originale dell'elemento murario.

Inoltre, se il sistema deve essere applicato su elementi con elevate asperità, le fascette metalliche avendo una loro rigidità non riescono ad adattarsi a tali irregolarità, motivo per cui il sistema lavorerà male. Sarà inevitabile, nel caso di muri più che di colonne, realizzare intonacature che andranno inevitabilmente a declassare il mantenimento facciavista.



Figura 2.7 da [6].



Figura 2.8 da [6].

MATERIALI COMPOSITI FIBRORINFORZATI

Lo sviluppo della tecnica di cerchiatura esterna mira all'attuazione di nuove tipologie basate sull'utilizzo di materiali compositi costituiti da fibre di vario tipo inglobate in una matrice. Nel caso in cui quest'ultima sia organica si parlerà del metodo FRP, mentre qualora si tratti di matrice inorganica si parlerà del metodo FRCM.

IL METODO FRP

Questa tecnica rappresenta una soluzione efficiente per migliorare le prestazioni strutturali della colonna in merito alla compressione assiale combinata a momento flettente, in modo da aumentarne la resistenza e la capacità di deformazione.

Il metodo Fiber Reinforced Polymers (FRP) consiste nell'incollare, attraverso una matrice organica, fasce fibrorinforzate ad alta resistenza sulla struttura. In particolare:

- La *matrice* distribuisce gli sforzi tra le fibre e le protegge. Essa è costituita da resine termoindurenti, generalmente epossidiche o poliestere.
- Le *fasce fibrorinforzate* rappresentano l'elemento resistente del composito grazie alla loro elevata resistenza a trazione. Le più comuni sono in carbonio, basalto, vetro, aramide. Alcuni studi sono stati condotti anche con tessuti in acciaio.

Le fibre sono costituite da filamenti continui molto sottili (diametro circa 10 μm) che commercialmente sono disponibili sotto varie forme (singolo filamento, fascio di filamenti, filo o filato, filo assemblato) e prima del loro utilizzo vengono trasformate in tessuti, distinguibili per configurazione geometrica:

Tessuti monoassiali: fasci paralleli;

Tessuti biassiali: fasci intrecciati secondo due direzioni ortogonali tra loro;

Tessuti multiassiali: fasci intrecciati secondo più direzioni variamente inclinate tra loro.

Questo sistema si contraddistingue per le sue capacità meccaniche grazie all'elevata resistenza a trazione del composito, in grado di migliorarne il comportamento rispetto alle azioni sollecitanti della struttura su cui viene applicato e dove possibile aumentarne anche il grado di duttilità.

Nella progettazione del rinforzo si deve porre attenzione a come questo viene sollecitato, perché se sottoposto a compressione, il composito non incrementa le prestazioni della struttura e potrebbe essere soggetto a distacchi a causa di instabilità locali.

Si presentano diverse criticità nell'applicazione degli FRP come problemi relativi alla concentrazione di tensioni in corrispondenza delle sezioni d'angolo, la scarsa compatibilità chimico-fisica con il supporto murario e la bassa resistenza nei confronti delle elevate temperature in caso di incendio.



Figura 2.9 Rinforzo in CFRP, Arcivescovato di Novara².

² <http://www.problemifondamentali.it/2012/01/il-presente-lavoro-riporta-i-primi.html>

Diverse sperimentazioni sono state condotte con lo scopo di indagare il comportamento a compressione di colonne in muratura confinate con FRP, riferendosi sia alla muratura storica (assemblata con malte di calce) sia alla muratura «moderna» (assemblata con malte cementizie).

Uno dei primi lavori sperimentali e teorici sull'argomento è quello di T.D. Kreaikas e T.C. Triantafillou [8]. Nel documento gli autori presentano i risultati di test a compressione di 42 colonne in muratura di mattoni in argilla assemblati con malta cementizia, formulando inoltre alcune espressioni per il calcolo di stress e tensione ultimi. Il rafforzamento è stato effettuato utilizzando fibre in carbonio (CFRP) e in vetro (GFRP).

Nella documentazione di M. Corradi et al. [9] viene trattato nel particolare il confinamento delle colonne in muratura di mattoni pieni attraverso polimeri rinforzati con fibre di carbonio monodirezionale (CFRP). Una volta eseguiti test di compressione su 24 colonne (metà a sezione quadrata, metà esagonale) sono stati ottenuti soddisfacenti risultati in merito all'aumento di resistenza dell'elemento. In ogni caso però si è verificato un guasto ai bordi (*Figura 2.10*), dovuto al contatto tra spigolo vivo e strato di FRP, che ha tagliato il materiale composito limitandone l'azione di confinamento. Di conseguenza a ciò, la maggior efficienza del rinforzo è stata evidenziata in quei casi in cui l'angolo ottuso delle colonne era maggiore. Questo arrotondamento può essere facilmente ottenuto con l'utilizzo di angolari metallici posti ai quattro bordi (*Figura 2.11*).



Figura 2.10 Guasto ai bordi del rinforzo. [9]

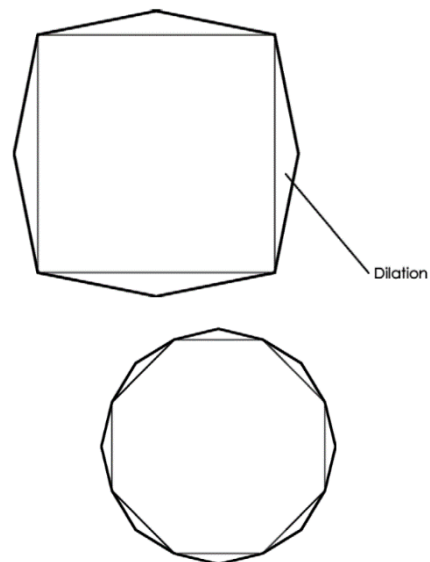


Figura 2.11 Arrotondamento degli spigoli. [9]

Si discosta per la scelta di materiali lo studio di M.A. Aiello et al. [10], in cui sono state testate, attraverso compressione uniassiale, 33 colonne in muratura a sezione quadrata rinforzate con un involucro esterno in FRP. Per la sperimentazione è stata scelta una muratura in pietra calcarea e in mattoni di argilla solida, mentre per il rafforzamento sono stati utilizzati uno o due strati di fibra di vetro. Il risultato finale ha dato un aumento del 16% della resistenza per il campione avvolto con due fogli di GFRP.

Nell' articolo di M. Di Ludovico et al. [11] sono stati confrontati gli effetti del FRP della muratura storica (colonne vuote costituite da elementi in tufo) con quelli della muratura moderna (colonne solide costituite da blocchi in laterizio) ed è stato studiato il rinforzo con diversi tipi di fibre (carbonio, vetro, basalto). I risultati ottenuti hanno evidenziato come l'avvolgimento del BFRP sia risultato più efficace in termini di deformazione assiale. Altra constatazione è stata fatta sull'efficienza complessiva della tecnica FRP, di gran lunga più significativa sulla muratura in laterizio.

In C. Faella et al. [12] troviamo una raccolta di risultati dei test presentati dai precedenti autori in un unico database. Quest'ultimo viene assemblato ad altre sezioni del documento che comprendono l'analisi e la discussione di tre diverse formule di progettazione per colonne in muratura confinate con FRP, ottenute calibrando i risultati sperimentali con le linee guida contenute nel CNR DT-200 [13].

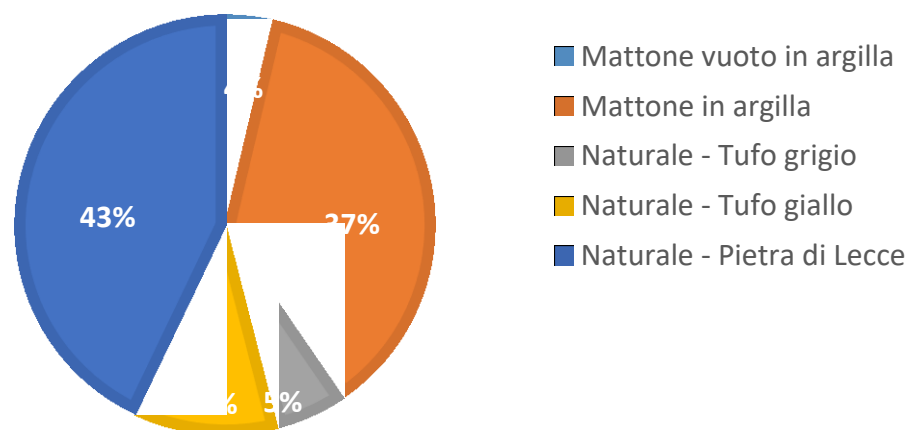


Figura 2.12 Suddivisione dei materiali nel database. [12]

C. Faella et al. [14], [15] hanno riportato un'interessante trattazione in cui viene studiato l'effetto del ridimensionamento mediante prove su elementi medi e in scala reale costituiti da blocchi di calcare assemblati con una malta a base di calce e pozzolana. Le colonne, a sezione quadrata, sono state rivestite con fibra di vetro e di basalto. Dai risultati si evince come il sistema FRP abbia fornito un significativo aumento della capacità di carico.

La pubblicazione di S. De Santis et al. [16] mostra lo studio di un sistema innovativo per il rinforzo esterno di strutture in muratura (*Figura 2.13*), dove vengono anche citate le colonne, che comprende tessuti unidirezionali in acciaio ad alta resistenza a trazione (SRP). I risultati mostrano come questo sistema fornisca un comportamento di trazione e di legame con l'elemento muratura paragonabile a quello del CFRP e superiore a quello del GFRP.

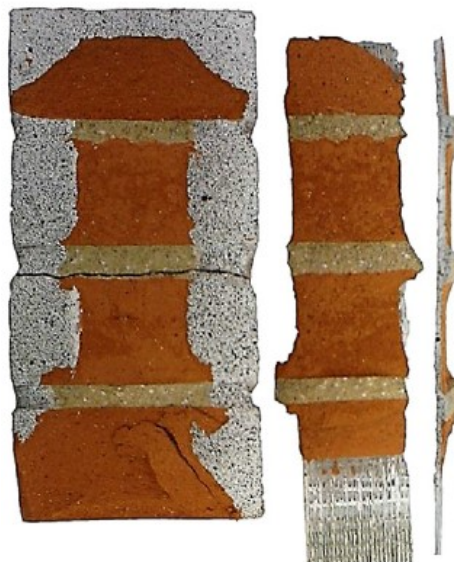


Figura 2.13 Rinforzo in tessuti unidirezionali in acciaio SRG. [16]

D'altro canto questi modelli non possono essere applicati su substrati bagnati e la loro efficacia è limitata alla temperatura di 50-60 °C, al di sopra della quale tendono ad ammorbidirsi. Non hanno perciò resistenza al fuoco. Infine, il piccolo diametro delle corde d'acciaio (*Figura 2.14*) rende la durabilità un aspetto critico nelle prestazioni a lungo termine. La protezione contro la ruggine è assicurata da un rivestimento di zinco o ottone o utilizzando acciaio inossidabile.

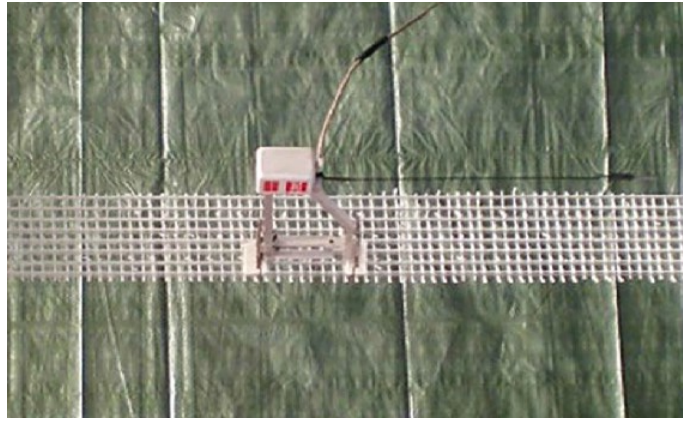


Figura 2.14 Dettaglio delle corde d'acciaio. [16]

In G. Minafò et al. [17] viene presentato uno studio in grado di valutare gli effetti del confinamento in FRP sulle colonne di muratura geometricamente snelle, in quanto la tecnica FRP è stata studiata in letteratura principalmente con riferimento a colonne corte. Viene adottata un'analisi in sezione utilizzando una semplice procedura iterativa analitica, che consente di calcolare i rapporti di snellezza ammissibili in funzione dell'eccentricità (Figura 2.15). Nei test le colonne sono state sottoposte a carico assiale e momento flettente, facendo considerazioni sull'interazione tra instabilità e resistenza.

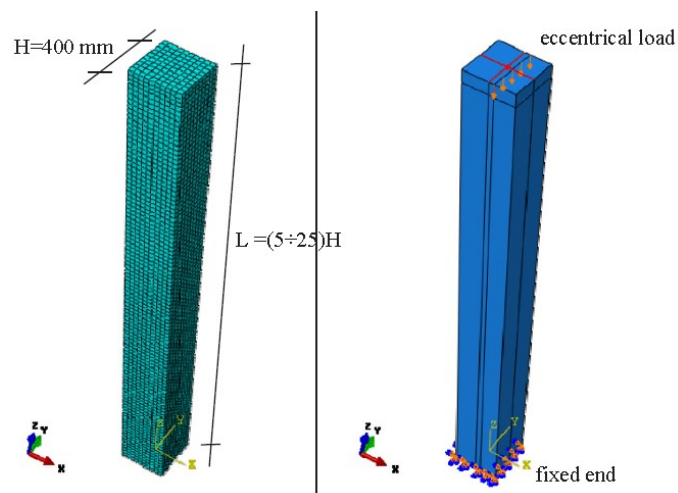


Figura 2.15 Modello analitico per il calcolo dei limiti di snellezza ammissibili. [17]

Curiosa è la trattazione di A. Parghi e S. Alam [18] in cui viene descritto, seppur attraverso un'ampia panoramica, il recente utilizzo di compositi FRP spruzzati (*Figura 2.16*) per il rafforzamento delle strutture in muratura, descrivendone le prospettive per il possibile miglioramento della tecnologia. Il rivestimento è distribuito con fibre di rinforzo orientate casualmente in assemblaggio alla matrice. Questa tecnica può sconfiggere il problema anisotropo del FRP. Inoltre tale sistema ha dimostrato il vantaggio di una facile installazione (polimerizzazione rapida) e di un processo economicamente vantaggioso rispetto alla pratica esistente dei sistemi di retrofitting, come l'uso delle lamiere d'acciaio o delle tipiche guarnizioni in FRP.



Figura 2.16 Applicazione dello spray. [18]

IL METODO FRCM

Anche questa tecnica, molto simile al FRP, offre un'importante ed innovativa soluzione in fatto di prestazioni strutturali, capacità di deformazione e durabilità dell'elemento colonna.

Gli Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) sono materiali compositi fibrorinforzati a matrice inorganica. Tali compositi vengono denominati anche TRC (Textile Reinforced Concrete), TRM (Textile Reinforced Mortars) o anche IMG (Inorganic Matrix-Grid composites). Consistono nell'applicazione di un rivestimento composto da fibre simili a quelle usate negli FRP: carbonio, vetro o innovative come PBO, basalto e acciaio (UHTSS), immerse in una matrice cementizia (*Figura 2.17*).



Figura 2.17 Metodo di posa del sistema FRCM³

Ciò che contraddistingue il sistema FRP da FRCM è la matrice. Mentre per il tipo FRP viene utilizzata la resina epossidica o materiali simili, per il tipo FRCM si ha a che fare con un conglomerato inorganico, a base di cemento o di calce, che riesce ad avere una migliore affinità in termini di aderenza con gli elementi costruttivi della muratura.

Nel documento fornito da A. Cascardi et al. [19] è stato spiegato in maniera semplice e concisa come l'uso della malta fibrorinforzata (FRM) sembri in grado di superare, in alcuni casi, la mancanza del tradizionale polimero rinforzato con fibre (FRP). Infatti la resina polimerica può compromettere la stabilità della muratura e non soddisfare i requisiti di reversibilità, poiché la matrice organica penetra all'interno dell'elemento costruttivo migliorandone permanentemente le caratteristiche originali. Il sistema FRM invece può essere progettato appositamente per ottenere le caratteristiche meccaniche e fisiche specifiche.

Il risultato finale, quindi, riguarderà l'applicazione di una griglia di fibre intorno alla colonna per mezzo della matrice inorganica, contrastandone la deformazione trasversale indotta dal carico assiale.

³ <http://recuperoeconservazione.it/2017/03/09/a-made-expo-2017-tecnologie-e-prodotti-per-il-rinforzo-strutturale-del-calcestruzzo-e-della-muratura/>

Quando compare la prima fessura nella matrice una parte della forza di adesione viene persa con conseguente riduzione della tensione di trazione in alcune parti della griglia. A volte può manifestarsi lo scorrimento delle fibre provocando una progressiva diminuzione della pressione di confinamento.

La matrice inorganica tuttavia mostra un comportamento più fragile rispetto ai polimeri; per questo motivo l'efficacia del sistema è maggiormente influenzata dalla scelta del tipo di malta da adottare.

Gli svantaggi tecnici evidenziati nei sistemi FRP sono principalmente relativi alle alte temperature (incluso l'incendio). La durabilità può essere compromessa non solo in relazione alle condizioni ambientali, come l'umidità, ma anche a causa della limitata traspirabilità dei materiali esistenti. Questo problema è causato principalmente dalla matrice polimerica, che impregna il substrato e non consente all'umidità di lasciare la muratura.

Un'altra fondamentale differenza si basa sul tipo di comportamento meccanico associato alle due tecnologie in questione. A. Cascardi et al. [20] hanno spiegato come sia significativamente diverso sotto l'azione di trazione. I sistemi FRP, ipotizzando un perfetto legame fibre-matrice, risultano caratterizzati da una legge costitutiva elastica lineare che termina a rottura. Viceversa, il comportamento a trazione di FRM è più complesso in quanto è contraddistinto da tre diverse fasi:

1. La matrice sostiene il carico fino a quando si verifica la prima fessurazione.
2. A causa dell'evoluzione del cracking, le sollecitazioni vengono trasferite dalla matrice alle fibre di rinforzo; si ha un certo indebolimento dell'interfaccia fibra-matrice.
3. Il sistema composito si comporta in modo quasi lineare fino a rottura. In questa fase sono ormai le fibre che portano il carico e la crisi si verifica con una progressiva rottura dei filamenti di queste ultime e con il definitivo debonding all'interfaccia fibra-matrice.

La resistenza del sistema FRM è quindi fortemente influenzata dal tipo di fibre, che sono lunghe e tipicamente sotto forma di reti o griglie, dalla disposizione di queste ultime ($0^\circ/90^\circ$) e dalle proprietà della matrice.

Nonostante si tratti di un sistema piuttosto innovativo, nato negli ultimi anni dall'esigenza di voler oltrepassare i limiti del precedente FRP, sono presenti numerosi documenti in letteratura che ne attestano le caratteristiche tecniche e meccaniche. Un esempio viene fornito da L. Ombres [21] dove troviamo una rassegna di test eseguiti su 5 colonne in muratura, di sezione quadrata 250x250 mm e lunghezza complessiva di 650 mm, con carico assiale eccentrico fino al collasso. Due campioni non sono stati confinati, su altri due è stato inserito uno strato di C-FRCM e sul campione restante sono stati applicati due strati della stessa tipologia. Considerando le modalità di guasto e i diagrammi di carico-deformazione è stata valutata l'efficacia dei confinamenti sia in termini di resistenza che di duttilità.

In M. Fossetti et al. [22] viene studiato ed analizzato il sistema B-FRCM. Una premessa è stata fatta in merito al materiale che ne costituisce il rinforzo ovvero il basalto (*Figura 2.18*).



Figura 2.18 Posa della matrice. [22]

La fibra di basalto è ottenuta da rocce basaltiche attraverso un processo di fusione e non contiene altri componenti chimici, questo aspetto rende la produzione a basso costo e allo stesso modo porta come risultato un materiale naturale e compatibile al 100% con la muratura (naturale anch'esso). Le caratteristiche meccaniche di questa tipologia di rinforzo sono paragonabili a quelle della fibra di vetro, oltre al fatto che mostra una buona resistenza all'esposizione chimica e alle alte temperature.

Il documento presenta i risultati (Figura 2.19) di uno studio sperimentale sul comportamento a compressione uniaxiale di 8 colonne in mattoni di argilla; inoltre sono state prese in considerazione due resistenze di muratura, variando la qualità e la composizione della malta.



Figura 2.19 Modalità di guasto: 1. Non confinato; 2. Confinato con BFRCC;
3. Frattura a trazione della maglia con fibra di basalto. [22]

Propedeutico al documento precedente, in un altro articolo di M. Fossetti et al. [23], è stata fatta un'attenta analisi di confronto sperimentale sul comportamento di compressione uniaxiale di 12 colonne in muratura di mattoni in argilla rinforzate con avvolgimenti in FRP, in B-FRCM e con fili d'acciaio (Figura 2.20). Anche qui sono stati considerati due gradi di resistenza della malta.



Figura 2.20 Preparazione dei campioni (da sinistra): 1. Confinato con FRP; 2. Confinato con BFRCC;
3. Confinato con fili di acciaio. [23]

I risultati finali (*Figura 2.21*) hanno portato alle seguenti constatazioni:

- L'efficienza di tutte le tecniche esaminate è stata dipesa dal grado di malta della muratura, i migliori risultati sono stati raggiunti con la malta di basso grado.
- Grandi aumenti di resistenza possono essere ottenuti con FRP, tuttavia è stata riscontrata una modalità di rottura fragile e improvvisa causata dalla concentrazione di stress negli angoli.
- La guaina B-FRCM ha dimostrato di essere efficace in termini di resistenza per le murature con malte di bassa qualità.
- I fili in acciaio hanno permesso al campione di continuare a supportare carichi anche dopo aver raggiunto la resistenza di picco, migliorandone la duttilità complessiva.



Figura 2.21 Modalità di guasto (da sinistra): 1. Confinato con FRP; 2. Confinato con BFRCM; 3. Confinato con fili di acciaio. [23]

Nella documentazione di M. Sant'Andrea et al. [24] è stato presentato un lavoro sperimentale molto simile atto a comprendere il comportamento delle colonne in muratura di sezione quadrata limitata da maglie in acciaio e in fibra di basalto incorporate in una matrice di malta soggetta a carico di compressione concentrico. Ne viene confrontata l'efficacia rispetto colonne non confinate.

F.S. Murgò e C. Mazzotti [25] troviamo una raccolta di simulazioni numeriche 3D calibrate su prove sperimentali. Il modello tridimensionale è stato successivamente utilizzato per simulare il comportamento strutturale non lineare delle colonne con rinforzo FRCM e successivamente confrontate con FRP.

Il numero di test su colonne in armatura confinata con FRCM è molto limitato, specialmente per campioni in scala reale. Per colmare tale lacuna la pubblicazione di G. Maddaloni et al. [26] mette a disposizione un programma sperimentale mirato a studiare il comportamento delle colonne di fondo scala realizzate in blocchi di pietra calcarea confinati con diversi sistemi FRCM. Sono stati discussi i risultati di 4 test inerenti a sistemi FRCM realizzati con rinforzo in fibra di vetro (G-FRCM) e basalto (B-FRCM), incorporato in una malta a base di calce.

L. Ombres e S. Verre [27] è presente un'analisi riferita a colonne in mattoni di argilla confinate con un sistema S-FRCM costituito da reti in fibra di acciaio annegate in malta cementizia (*Figura 2.22*). Delle 6 colonne, di sezione quadrata 250x250 mm e lunghezza complessiva di 770 mm, quattro sono state testate sotto carico assiale e le restanti due sotto carico eccentrico fino al collasso. Inoltre, è stato calibrato un modello 3D (*Figura 2.23*) con i risultati dei test di questo lavoro e di quelli già presenti in letteratura. E' stata verificata una buona efficacia da parte del sistema S-FRCM, sia in termini di resistenza che di duttilità.



Figura 2.22 Dettaglio del sistema S-FRCM. [27]

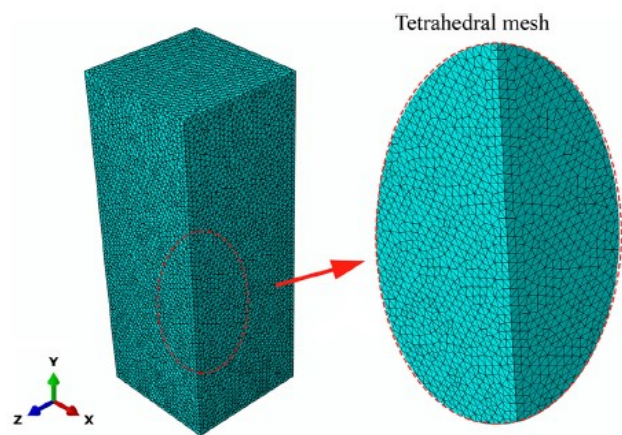


Figura 2.23 Il modello 3D, comunemente utilizzato per la generazione di mesh. [27]

Una ricerca che porta invece l'obiettivo di valutare il ruolo della matrice inorganica è quella di A. Cascardi et al. [28], dove sono stati riportati ed analizzati i risultati sperimentali condotti su 11 colonne in muratura confinate con sistema FRM a base di matrice cementizia. I test sono sotto sforzo di compressione centrato. Sono state considerate tre diverse tipologie di matrice (dunque di malta), aventi diversa resistenza a compressione. La matrice dovrebbe essere in grado di incapsulare e proteggere la fibra e anche di trasferire le sollecitazioni dal substrato a quest'ultima. In questi casi possono anche essere introdotti dei materiali polimerici per migliorare l'adesione tra rinforzo-malta. Questi risultati hanno confermato come un significativo miglioramento delle proprietà meccaniche può essere dipeso dall'utilizzo di un adeguato grado di malta.



Figura 2.24 Dettaglio della rottura della griglia in fibra all'angolo. [28]

Molto simile è la documentazione di G. Minafò e L. La Mendola [29] in cui vengono toccati diverse tematiche:

- I risultati di un'indagine sperimentale sull'effetto degli involucri FRCM riguardo il comportamento a compressione delle colonne in muratura di calcarenite;
- Uno studio preliminare sulle prestazioni meccaniche dello strato di rinforzo, eseguito selezionando tre diversi gradi di malta e verificandoli a flessione e compressione;
- Prove di trazione sul tessuto in fibra di vetro G-FRCM (*Figura 2.25*) e su strisce FRCM per caratterizzare il comportamento del rinforzo;
- Test di undici colonne sotto compressione concentrica, registrandone la deformazione assiale e discutendone i risultati in merito a resistenza e sforzo finale.



Figura 2.25 Rinforzo in fibra di vetro. [29]

2.3.2 INTERVENTI NEI GIUNTI

Il macro-gruppo in questione è incentrato su tecniche basate su corde/fili in acciaio o basalto posizionati nei giunti di malta. Successivamente, viene fatta una più chiara distinzione in merito al repointing dei giunti con un rinforzo che prevede, oltre la cerchiatura, anche il passaggio per lo spessore della colonna.

A differenza delle altre tecniche, si tratta di una soluzione innovativa per quanto riguarda la buona riuscita dell'intervento, sia a livello strutturale che estetico.

Ad oggi infatti, la sfida per gli ingegneri che operano nel campo del recupero resta quella di progettare interventi che, oltre ad essere funzionali e strutturalmente ottimali, siano mirati alla più totale salvaguardia dell'aspetto estetico del bene edilizio.

L'idea di inserire il rinforzo nei giunti (e alle volte anche attraversando la sezione) può fare davvero la differenza, preservando al 100% l'estetica della colonna in muratura, in quanto il materiale usato può essere ricoperto dalla stessa malta che ne costituisce il giunto.

Nella trattazione di F. Monni [30] viene spiegata la tecnica del repointing come particolare metodo di retrofitting volto a migliorare le prestazioni strutturali dei manufatti in muratura preservandone al contempo l'aspetto esteriore, in maniera tale da favorire la caratteristica di "facciavista". A seconda delle esigenze dell'elemento da rinforzare sono disponibili tre tipologie di repointing:

- Il *deep repointing*. Questa tecnica prevede la rimozione della malta danneggiata e la successiva sostituzione con il nuovo conglomerato. L'iniezione può arrivare alla profondità di 70-100 mm. Lo scopo della deep repointing è di assicurare una distribuzione uniforme del nuovo materiale, con migliori caratteristiche tecniche ed estetiche, in modo tale da rinforzare l'elemento costruttivo e allo stesso tempo preservarne l'aspetto estetico.
- Il *repointing strutturale*. La seguente tecnica di repointing, anche nota come "Sistema NSM" (Near Surface Mounted), consiste nel sostituire la malta danneggiata aggiungendo degli elementi di rinforzo incollati per pochi centimetri nei giunti. Questi elementi possono essere di diverse forme e materiali, ad esempio barre di acciaio comuni, barre di acciaio ad alta resistenza, barre composte o lamine sottili. Di conseguenza potranno essere riprodotti il colore della malta e il disegno delle articolazioni. In M.R. Valluzzi et al. [31] vengono descritti i risultati di tale tecnica utilizzando barre in acciaio, con riferimento anche al rinforzo di torri

in muratura. Non è scontato parlare di repointing strutturale quando si ha a che fare con l'elemento colonna, soprattutto se si tratta di sezione circolare anziché quadrata. Risulta complicato, in questo caso, utilizzare come strumento di rinforzo delle barre rigide. Nello studio di D. Tinazzi et al. [32] sono stati riportati i risultati di una campagna sperimentale volta allo scopo di studiare l'efficacia del repointing strutturale attraverso barre FRP.

- Il *repointing strutturale flessibile*. Mentre il "normale" repointing strutturale è più adatto per murature con giunti orizzontali regolari, questa terza tipologia è invece basata sull'uso di elementi flessibili anziché barre. Tale tecnica costituisce un ottimo compromesso per la muratura storica, ottenuta assemblando componenti in pietra irregolari. Infatti, a differenza del più classico repointing strutturale visto in precedenza, questa strategia ha sicuramente una migliore predisposizione, in quanto si tratta di un sistema volto a favorire la completa adesione del materiale di rinforzo con la muratura.

CAVI IN ACCIAIO

Come spiegato nelle varie documentazioni di L. Jurina [7], [6], si tratta di una tecnica riguardante l'uso di cavi circonferenziali di piccolo spessore inseriti nei giunti di malta (*Figura 2.26*). Le prove a collasso hanno interessato 6 colonne in muratura a base ottagonale, di diametro 52 cm e altezza 129 cm. Due pilastri non sono stati consolidati mentre sugli altri quattro sono stati installati quattro cavi post-tesati (trefoli in acciaio inox con diametro 1mm) avvolti con 10 spire in corrispondenza dei giunti orizzontali.



Figura 2.26 Posizionamento dei cavi in acciaio [7].

Due pilastri sono stati cerchiati a giunti alternati, gli altri due in corrispondenza di tutti i giunti. Il cavo è stato disposto all'interno dei giunti dopo averne regolarizzato la superficie. Le spire sono state infine bloccate con morsetti metallici e ricoperte con un sottile strato di malta (facoltativo) ottenendo un risultato estetico apprezzabile.

CORDE IN FIBRA DI BASALTO

E' stato già spiegato come il basalto sia in grado di offrire un'ottima resistenza caratterizzata da un elevato modulo di elasticità, una buona reazione al calore e agli attacchi chimici.

Questo materiale naturale può rappresentare una valida alternativa alle altre tecniche di cerchiatura nei giunti già presenti nel campo dell'edilizia. Una caratterizzazione meccanica della corda BF è stata sviluppata da E. Quagliarini et al. [33], mentre in [34] troviamo uno studio specifico sulla sua durata.

Infine in [35], [2] viene proposta una interessante sperimentazione in merito all'utilizzo di corde flessibili in fibra di basalto come rinforzo nei giunti di malta.

Sono stati studiati due tipi di malta per legare il rinforzo all'articolazione della muratura: a base di calce idraulica e a base di resina epossidica. Le corde, aventi diametro di 4 mm, sono state sottoposte a tre test di trazione. Ogni articolazione orizzontale è stata rinforzata.

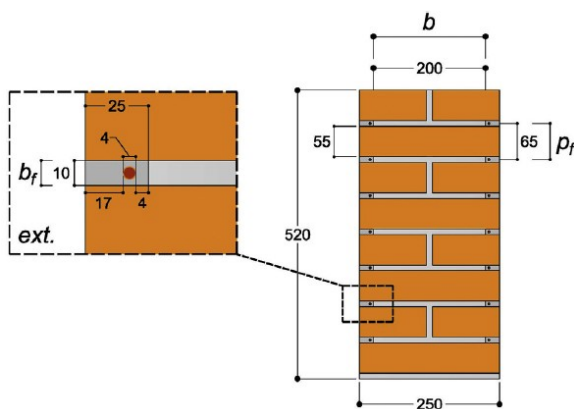


Figura 2.27 Misure dei campioni testati. [2]

La sperimentazione è stata eseguita su 9 colonne in muratura di piccola scala a sezione quadrata e riguarda test di compressione su:

- 3 campioni senza rinforzo (*Figura 2.28*);
- 3 campioni con funi in fibra di basalto su malta idraulica (*Figura 2.29*);
- 3 campioni con funi in fibra di basalto su malta epossidica (*Figura 2.30*).



Figure 2.28, 2.29, 2.30. [2]

MICRO-TREFOLI IN ACCIAIO

Successivamente, con le documentazioni di A. Borri et al. [36], [37], [38] è stato proposto un metodo simile utilizzando cordicelle in acciaio inossidabile di piccolo diametro inserite nei giunti di malta.

La tecnica consiste nel rimuovere inizialmente la malta danneggiata e, se la sezione trasversale della colonna non è circolare, arrotondare gli angoli per evitare la concentrazione di sforzi. Dopo l'arrotondamento vengono posizionati gli angolari in acciaio e la superficie dei giunti viene preparata con nuova malta ad alta resistenza (o resina epossidica). Quindi un cavo di acciaio inossidabile di 3-4 mm di diametro viene ridotto alla lunghezza necessaria e inserito in un foro trasversale nella colonna (*Figura 2.31*). Questo cavo verrà successivamente utilizzato per avvolgere l'elemento costruttivo in base allo schema di rinforzo.



Figura 2.31 Inserimento del cavo in acciaio per il foro trasversale [38].

Le estremità di ogni cordicella sono collegate a un dispositivo meccanico (*Figura 2.32*) necessario per pre-sollecitarlo con una forza di trazione. Questo a sua volta limiterà il materiale in muratura e produrrà un incremento di capacità di carico compressivo della colonna. Dopo circa 24 ore di tempo di polimerizzazione è possibile rimuovere il carico di trazione.



Figura 2.32 Pre-sollecitazione a trazione [38].

2.4 OSSERVAZIONI SULLA LETTERATURA SCIENTIFICA E CRITERI DI PROGETTAZIONE DEI CAMPIONI

Nelle campagne sperimentali sui campioni a colonne i provini utilizzati più frequentemente sono di base quadrata, rettangolare, ottagonale e rotonda. Una prima prerogativa riguarda il rapporto tra le dimensioni di altezza e lati maggiore e minore. Nel caso di colonnine a pianta esagonale e circolare per lato si intende il diametro.

Dai precedenti studi è emerso come sia stata mantenuta sempre costante l'altezza H e variato il lato l facendo particolare attenzione al valore del rapporto H/l approssimabile a 2. Tale impostazione è stata confermata anche per la progettazione dei campioni da realizzare in questa sperimentazione, dove il rapporto H/l non è stato quindi mantenuto costante, aumentando nel caso delle colonnine a base rettangolare il lato maggiore ($l=38$ cm) rispetto al diametro dei provini a base circolare ($l=20$ cm).

3 MATERIALI E METODI

Di seguito vengono riportate le decisioni relative alle scelte e procedure da adottare per la produzione dei campioni in muratura, tenendo in considerazione sia le prove effettuate sui materiali delle campagne sperimentali precedenti sia della presente.

3.1 MALTA PER LA MURATURA

Dalle ricerche effettuate in precedenza (2.1) è risultato come la qualità meccanica della muratura storica risulti scarsa. Quindi partendo dai valori attestati dai produttori, per la realizzazione di provini aventi necessariamente caratteristiche meccaniche simili, sono state scelte una malta premiscelata a base di calce idraulica naturale "Malta antica", prodotta dalla "Vimark s.r.l." e sabbia del Po' di granulometria fine ($d < 0,6\text{mm}$) della "ESINCALCE s.r.l." (Figura 3.1).



Figura 3.1 Materiali componenti la malta.

Avendo deciso di impiegare la stessa miscela di malta utilizzata nelle precedenti campagne sperimentali è noto che i valori di resistenza a compressione della malta premiscelata a 28 gg forniti dal produttore in scheda tecnica appartengono alla classe M1 (≥ 2 MPa).

Essendo questi troppo elevati per simulare l'impiego di una malta storica si è deciso di aggiungere la sabbia del Po nell'impasto andando a diminuirne la resistenza.

Per la quantificazione di tale rapporto sono state prese come riferimento le precedenti esperienze, nelle quali la miscela più adatta per la costruzione di campioni in muratura storica è quella con un rapporto Malta/Sabbia [kg/kg] pari a 1/0.5.

Inizialmente era stato programmato di impiegare 5 L di acqua pulita per ogni sacco di “Malta antica” (25Kg), invece avrebbero dovuto essere aggiunti 3,75 L per ogni sacco di sabbia del Po’ (25Kg), per un totale di 8.75 L per ogni miscela di malta.

Tuttavia in fase esecutiva è stato riscontrato come i sacchi Esincalce avevano un contenuto di sabbia molto bagnata; in uno di questi il peso era addirittura aumentato rispetto i 25 Kg che ci si aspettava di riscontrare inizialmente, arrivando fino a 28 kg. Di conseguenza diversi quantitativi di acqua sono stati variati in corso di miscela.

Di seguito sono riportate alcune fasi di preparazione dell’impasto e una tabella con i dosaggi adottati.



Figura 3.2 Misura del peso della sabbia.



Figura 3.3 Inserimento nell’impasto della malta antica.



Figura 3.4 Preparazione della malta con mixer meccanico.



Figura 3.5 Miscela I pronta per l’utilizzo.

Miscela	Nr. Provini realizzati	Quantitativo di H ₂ O [l]
I	4	6
II	5	5.5
III	5	6
IV	5	6.5
V	5	7
VI	8	6.5
VII	1	6.5

Tabella 3.1 Riepilogo miscele di malta e relativo quantitativo di acqua.

Successivamente sono stati realizzati, in conformità alla normativa UNI EN 1015-11 [39], 2 confezionamenti di provini di malta della II e IV miscela (Nomi: MII, MVI) in modo tale da poter eseguire prove per la determinazione della resistenza a compressione e a flessione.



Figura 3.6 Stampo oliato per facilitarne lo scassero.



Figura 3.7 Inserimento malta.

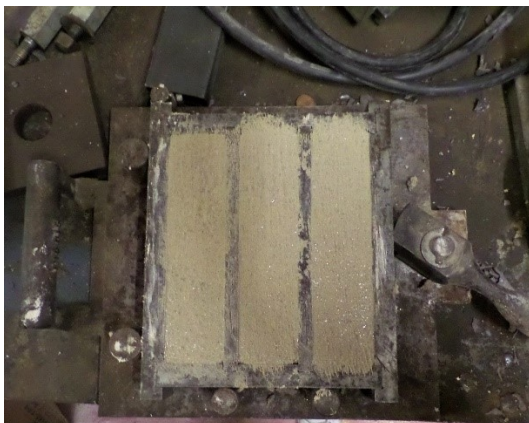


Figura 3.8 M1: Provini ottenuti dalla II miscela.

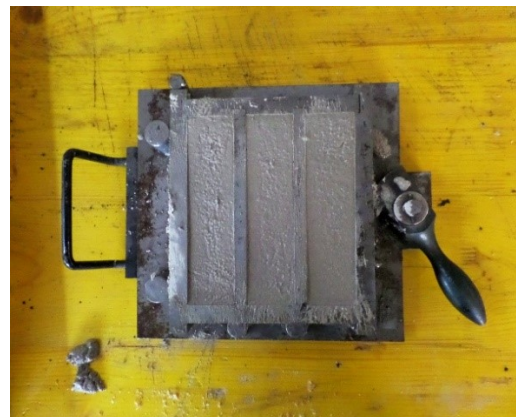


Figura 3.9 M2: Provini ottenuti dalla VI miscela.

Malta	Dimensioni [mm]	Nr.
MII	40x40x160	3
MVI	40x40x160	3

Tabella 3.2 Riepilogo tipologie e dimensioni dei provini confezionati.

La sottostante tabella riporta i tempi e l'evolversi delle condizioni di stagionatura dei campioni di malta.

Malta	Data del getto	Data scassero	Data del test	Stagionatura [gg]
MII	16/04/2019	17/05/2019	20/05/2019	34
MVI	17/04/2019	17/05/2019	20/05/2019	33

Tabella 3.3 tempistiche di prova e stagionatura per ogni tipologia.

Dopo i 28 giorni necessari per la stagionatura, i campioni sono stati testati secondo le prescrizioni della normativa UNI di riferimento [39].

Tali test vengono condotti con il fine di poter fare una caratterizzazione del materiale utile e un suo successivo confronto con i valori ottenuti dalla letteratura scientifica.

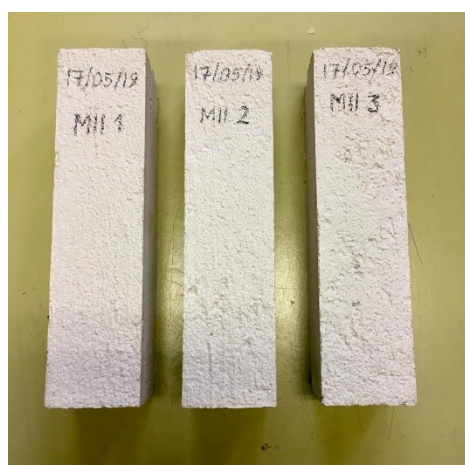


Figura 3.10 Provini ottenuti da MII



Figura 3.11 Provini ottenuti da MVI

La macchina di prova è stata attrezzata e preparata in modo che potesse misurare soltanto il carico massimo applicato.



Figura 3.12 Macchina di prova.

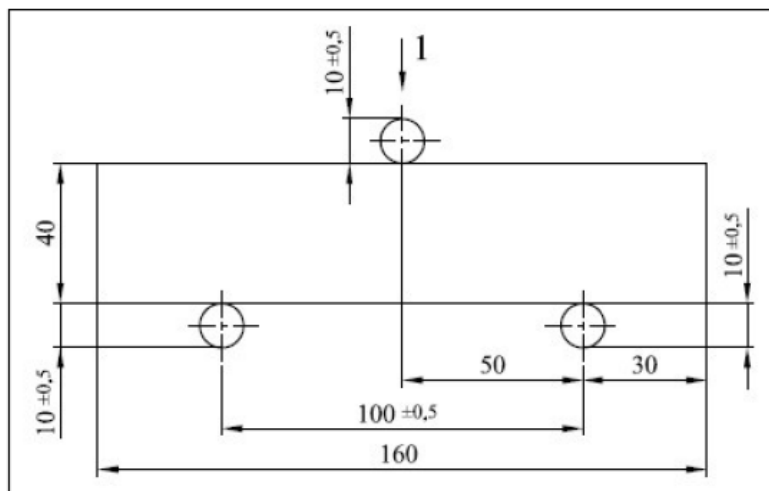


Figura 3.13 Posizionamento basi di prova a flessione. [27]

La prova viene effettuata posizionando il provino su due appoggi e applicando il carico tramite un rullo in corrispondenza della mezzeria della superficie superiore del provino (Figura 3.13).

I provini delle due diverse tipologie di malta sono stati nominati per facilitarne il riconoscimento attraverso una sigla descrittiva della tipologia di miscela e un numero. Le prove sono state condotte progressivamente avendo cura, prima di ogni test, di pulire bene gli appoggi da tutti i residui di aggregato.

La prova è stata considerata conclusa nel momento in cui il provino di malta arrivava a rottura, di conseguenza è stato registrato il valore del carico applicato massimo raggiunto.

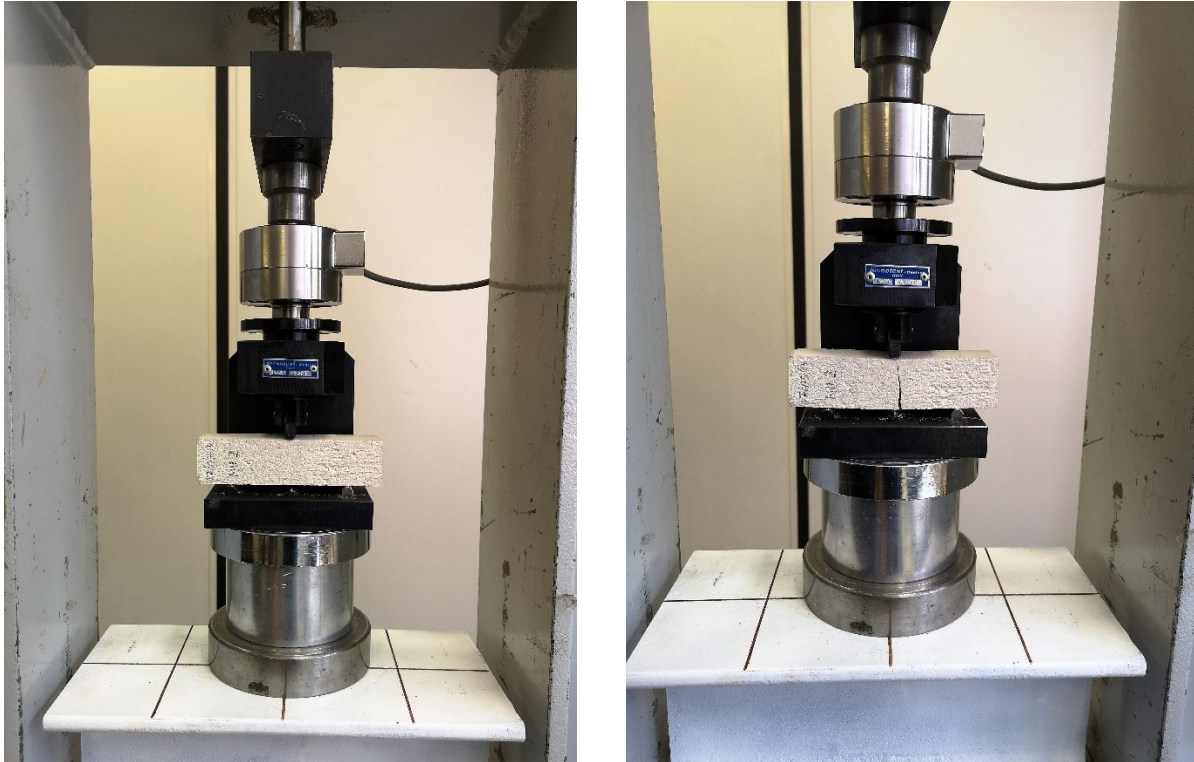


Figura 3.14 Prova a flessione su MII 2.

Per il calcolo della resistenza a flessione f_f , è stata impiegata la seguente formula:

$$f_f = 1.5 \frac{F_{max} \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (3.1)$$

Dove:

- F_{max} , il carico massimo applicato al provino [N]
- l , la distanza tra gli assi dei due rulli di appoggio posti inferiormente, pari a 100 mm
- b , la larghezza del provino [mm]
- d , lo spessore del provino [mm]

Malta	Provino	l [mm]	b [mm]	d [mm]	Fmax [N]	ff [MPa]
MII	MII 1	100	40	40	243,60	0,57
	MII 2	100	40	40	214,80	0,50
	MII 3	100	40	40	246,00	0,58
MVII	MVII 1	100	40	40	242,40	0,57
	MVII 2	100	40	40	204,00	0,48
	MVII 3	100	40	40	300,00	0,70

Tabella 3.4 Risultati prove a flessione sulla malta.

In *Tabella 3.4*, sono riportati i valori medi del carico massimo e la resistenza a flessione media per ogni tipologia di malta:

Malta	Fmax, m [N]	ff, m [MPa]	D.S.	Fmax, m** [N]	ff, m ** [MPa]	D.S. **
MII	234,80	0,55	0,04	241,80	0,57	0,08
MVII	248,80	0,58	0,11			

**= Valori calcolati sul totale dei provini

Tabella 3.5 Riepilogo dei risultati delle prove a flessione.

Successivamente sono state eseguite le prove a compressione utilizzando come provini i semi prismi ottenuti dalla rottura dei provini iniziali sottoposti al test di flessione, per un totale di 12 provini.

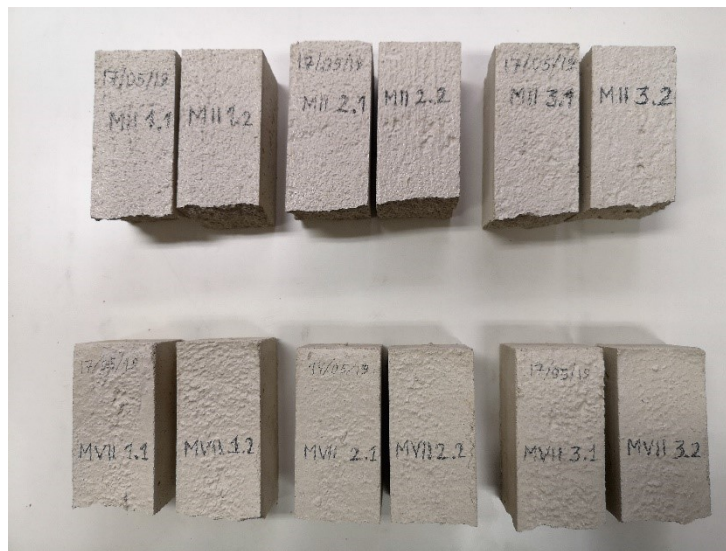


Figura 3.15 Provini derivanti dalla prova a flessione e che saranno sottoposti a quella a compressione.

Per poter svolgere la prova nella stessa macchina di prova è stata sostituita la superficie di applicazione del carico con una piastra 40 x 40 mm.



Figura 3.16 Adattatore per prova a compressore con piastra 40x40 mm.



Figura 3.17 Prova a compressione sul provino di malta MII 2.2.

Come per le prove a flessione, anche in questo caso un occhio di riguardo è stato posto sulla superficie più irregolare (di getto) evitando di metterla in contatto con la piastra.

Per il calcolo della resistenza a compressione f_c è stata utilizzata la seguente formula:

$$f_c = \frac{F_{max}}{S} \quad (3.2)$$

Dove:

- F_{max} : carico massimo applicato al provino [N]
- S : superficie di applicazione del carico, pari a 1600 mm²

Malta	Provino	F _{max} [N]	F _{max, m} [N]	f _c [MPa]	f _{c, m} [MPa]	D.S.	F _{max, m} ** [N]	f _{c, m} ** [MPa]	D.S.**
MII	MII 1.1	3463,20	3454,48	2,16	2,16	0,05	2952,44	1,85	0,35
	MII 1.2	3399,60		2,12					
	MII 2.1	3385,70		2,12					
	MII 2.2	3372,0		2,11					
	MII 3.1	3536,40		2,21					
	MII 3.2	3570,00		2,23					
MVII	MVII 1.1	2887,20	2450,40	1,80	1,53	0,17	2952,44	1,85	0,35
	MVII 1.2	2638,80		1,65					
	MVII 2.1	2360,40		1,48					
	MVII 2.2	2164,80		1,35					
	MVII 3.1	2244,00		1,40					
	MVII 3.2	2407,20		1,50					

**= Valori calcolati sul totale dei provini

Tabella 3.6 Riepilogo dei risultati delle prove a compressione.

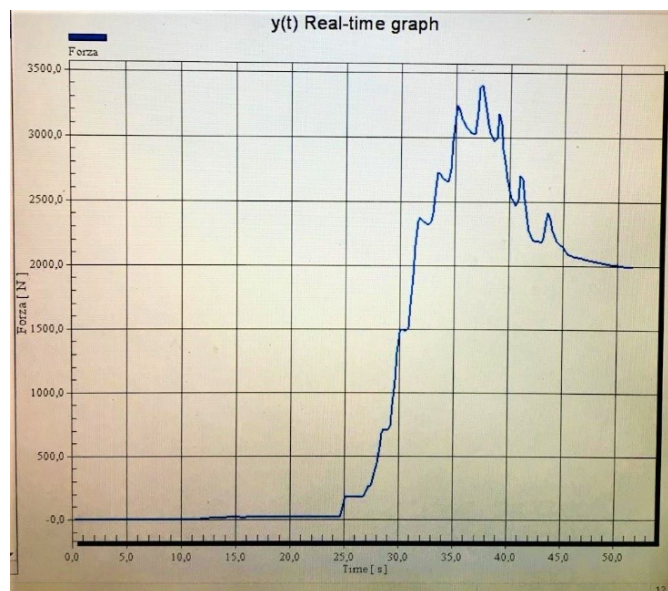


Figura 3.18 Grafico Forza/Tempo relativo alla prova eseguita su MII 1.2.

E' stato visto come i nuovi valori ottenuti di f_{fm} e $f_{c,m}$ non si discostino di molto da quelli relativi alle campagne sperimentali condotte in precedenza [3], [4] e [5].

E' possibile concludere che le miscele di malta impiegate per la realizzazione dei provini presentano un comportamento perfettamente in linea con una muratura storica.

3.2 MATTONI

Gli elementi usati per la costruzione delle colonnine sono di produzione della ditta "Fornaci Briziarelli Marsciano s.p.a". In particolare sono stati scelti:

- Mattoni comuni "Perusia" rosati (*Figura 3.19*), di dimensioni 5,5x12x25cm per le colonne di pianta rettangolari;
- Pezzi speciali con forma di mezzaluna a semi cerchio di dimensioni 5,5x12x20cm per le colonne di pianta circolare.

I pezzi sono di tipo "a mano", in quanto hanno caratteristiche chimico fisiche più verosimili a quelle appartenenti alle murature storiche.

Le prove meccaniche eseguite dalle sperimentazioni antecedenti [3],[4],[5] alla presente riportano i risultati della prima tipologia. Di seguito ne viene riportata anche la scheda tecnica.

Dai risultati si può notare un'omogeneità dal punto di vista di comportamento e di valori massimi raggiunti da ogni campione.

Viene inoltre riscontrata la rottura fragile del materiale come da letteratura.

La resistenza media raggiunta risulta maggiore rispetto a quella prevista nella scheda tecnica.

SCHEDA TECNICA



Tipologia di materiale: Mattone faccia a vista a mano "Perusia" 5,5x12x25

Stabilimento di produzione: Bevagna (PG)		
Tipologia di materiale: Mattone a mano faccia vista 5.5x12x25		
Tipo: Bemento HD per muratura		
Dimensioni 5,5x12x25 cm	Valore medio di categoria T2	Campo di categoria R2
Massa volumica lorda e netta 1633 Kg/m ³	Categoria D2	
Configurazione: Elemento in muratura in laterizio		
Percentuale di foratura %	NPD	
Spessore minimo delle pareti esterne al netto della rigatura (mm) NDP		
Spessore minimo delle pareti interne (mm) NDP		
Resistenza media a compressione 29.3 N/mm ² – Categoria II		
Forza di adesione N/mm ² (fvok)	0.62	
Forza di adesione N/mm ² (fvo)	0.77	
Conduttività termica del blocco (R) 0,29 °K m ² /W		
Conduttività termica equivalente del blocco λ _{eq} (= d / R) : 0,41 W / °K m		
Coefficiente di diffusione al vapore acqueo μ (=δa / δ) : 5 / 10		
Durabilità al gelo e disgelo : Conforme		
Assorbimento d'acqua : 20% Da non lasciare esposto		
Contenuto Sali solubili : Classe S2		
Stabilità dimensionale spostamento dovuto all'umidità mm/m : NPD		
Reazione al fuoco : Euroclasse A1		
Sostanze pericolose : Assenti		



Figura 3.19 Scheda tecnica mattoni Perusia.

E' stato invece necessario eseguire le prove meccaniche sul laterizio speciale a forma di mezzaluna. L'indagine è stata fatta in ottemperanza alle prescrizioni presenti nelle norme UNI EN 772-1 [40] e UNI EN 772-16 [41].



Figura 3.20 Mattone a mezzaluna da cui ricavare provino

I mattoni sono stati tagliati e sagomati tramite lama circolare così da ottenere dei campioni con rapporto $h/l_{min} \geq 0,4$ con $h \geq 40$ mm, come richiesto da normativa.

Seguendo le prescrizioni dell'UNI EN 772-16 è stato necessario misurare lunghezza (l_u), larghezza (w_u) e altezza (h_u) di ogni campione impiegato per la realizzazione delle prove. Questo passaggio risulta essere necessario per verificare la rispondenza al requisito di parallelismo (tolleranza 1 mm ogni 100 mm) e di conseguenza per calcolare la tensione a rottura del laterizio.

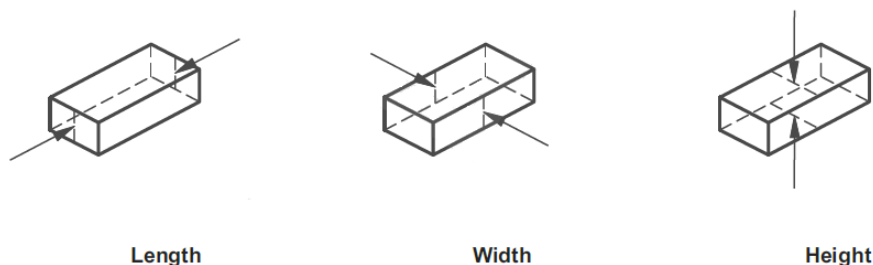


Figure 1b) - Measurement positions

Figura 3.21 Punti di misurazione secondo la norma. [40]

Successivamente sono riportate le dimensioni geometriche dei provini che sono risultati idonei e che quindi potranno essere sottoposti alla prova:

PROVINO	l_{u1} [cm]	l_{u2} [cm]	l_u^* [cm]	W_{u1} [cm]	W_{u2} [cm]	W_u^* [cm]	h_{u1} [cm]	h_{u2} [cm]	h_{u3} [cm]	h_{u4} [cm]	h_u^* [cm]
1	8,10	8,10	8,10	8,10	8,20	8,15	5,60	5,50	5,60	5,50	5,55
2	8,10	8,20	8,15	8,30	8,10	8,20	5,40	5,60	5,40	5,40	5,45
3	8,00	8,10	8,05	8,20	8,20	8,20	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60
4	7,90	7,90	7,90	7,90	7,90	7,90	5,50	5,70	5,60	5,60	5,60
5	8,00	8,10	8,05	7,90	7,50	7,70	5,60	5,50	5,50	5,50	5,53
6	8,00	8,20	8,10	8,00	8,10	8,05	5,40	5,30	5,50	5,40	5,40
7	8,20	8,20	8,20	8,30	8,20	8,25	5,60	5,60	5,70	5,60	5,63
8	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	5,50	5,50	5,60	5,50	5,53
9	8,00	8,00	8,00	8,10	8,10	8,10	5,40	5,60	5,50	5,50	5,50
10	8,20	8,20	8,20	8,30	8,20	8,25	5,60	5,60	5,70	5,70	5,65
11	7,80	7,90	7,85	8,00	7,90	7,95	5,50	5,40	5,40	5,50	5,45

*= ottenuti come valor medio delle misure effettuate come schema della normativa. Per l'altezza h_u le misure son state prese in corrispondenza degli spigoli del campione per la verifica del parallelismo.

Tabella 3.7 Dimensione dei campioni dei mattoni.

I campioni, prima di essere sottoposti alle prove di compressione, sono stati soggetti a opportuno condizionamento. La normativa da indicazioni a riguardo in funzione del tipo di prodotto o anche al tenore di umidità che si vuole ottenere.

Per i nostri provini è stata scelta la tipologia di condizionamento mediante essiccazione in forno, sottoponendoli ad una temperatura di 105°C.

Quando in due pesate consecutive, fatte ad un intervallo di tempo di almeno 24h, la perdita di massa dei provini risulta minore dello 0.2% della massa totale, allora si considera raggiunta la massima costante di ciascun campione.

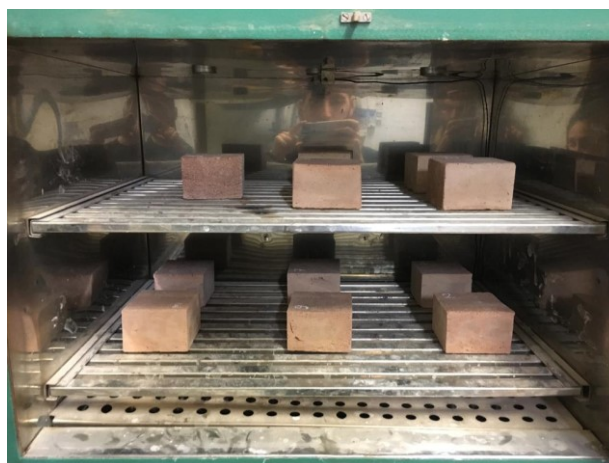


Figura 3.22 Condizionamento dei campioni in forno.

Di seguito sono riportati i dati relativi alle diverse misurazioni del peso dei campioni.

Provino	Peso 1: inizio del test [g]	Peso 2: dopo 24h a 105°C [g]	ω_{12} [%]	Peso 3: dopo 24h a 105°C [g]	ω_{23} [%]	ω_{13} [%]
1	532,5	520	2,35	520	0,00	2,35
2	582	551	5,33	551	0,00	5,33
3	588,5	553,5	5,95	553,5	0,00	5,95
4	532	517	2,82	517	0,00	2,82
5	523	516	1,34	515,5	0,10	1,43
6	548	536,5	2,10	536	0,09	2,19
7	599	590,5	1,42	590	0,08	1,50
8	541	534	1,29	534	0,00	1,29
9	580	543	6,38	542	0,18	6,55
10	583	573,5	1,63	573,5	0,00	1,63
11	509,5	504	1,08	504	0,00	1,08

Tabella 3.8 Peso dei campioni prima e dopo il condizionamento.

Dopo averli lasciati raffreddare a temperatura ambiente i provini sono stati sottoposti alle prove di compressione.



Figura 3.23 Campioni di mattoni pronti per effettuare la prova a compressione



Figura 3.24 Prova a compressione dei campioni di mattoni.

Come è possibile notare dall'immagine soprastante sono stati utilizzati degli spessori di cartone per rettificare la superficie di contatto tra macchina e provino.

Per registrare invece gli spostamenti avvenuti durante la prova è stato utilizzato un tastatore verticale.

La pressione a rottura $f_{b,i}$ viene calcolata utilizzando la seguente formula:

$$f_{b,i} = \frac{F_{max,i}}{A_i} \quad (3.3)$$

Dove A_i è la superficie di applicazione del carico dell' i -esimo elemento.

Qui di seguito sono riportati i grafici risultanti dalle prove seguiti una tabella con tutti i valori ottenuti.

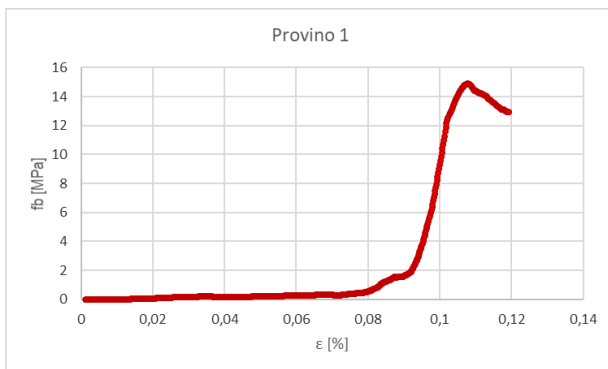


Grafico 3.1 Comportamento campione 1.

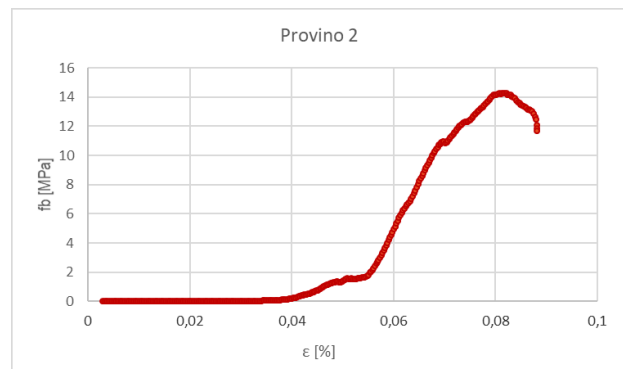


Grafico 3.2 Comportamento campione 2.

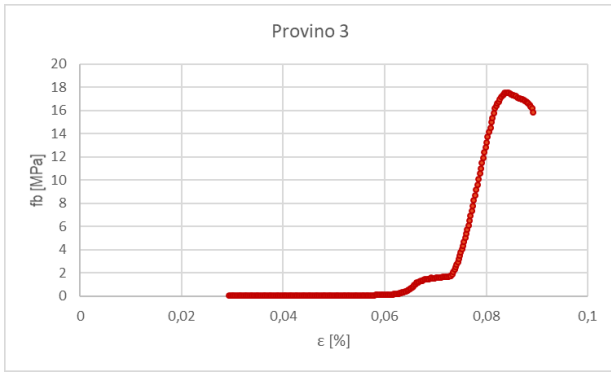


Grafico 3.3 Comportamento campione 3.

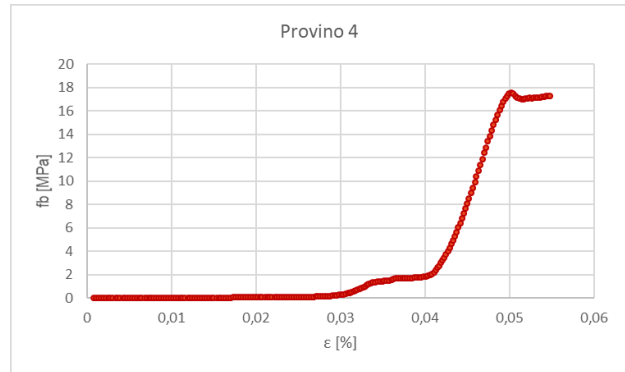


Grafico 3.4 Comportamento campione 4.

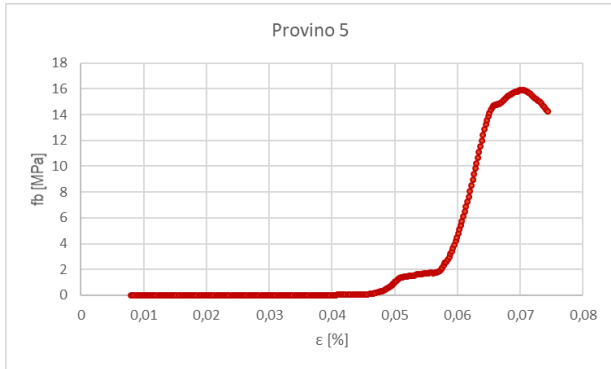


Grafico 3.5 Comportamento campione 5.

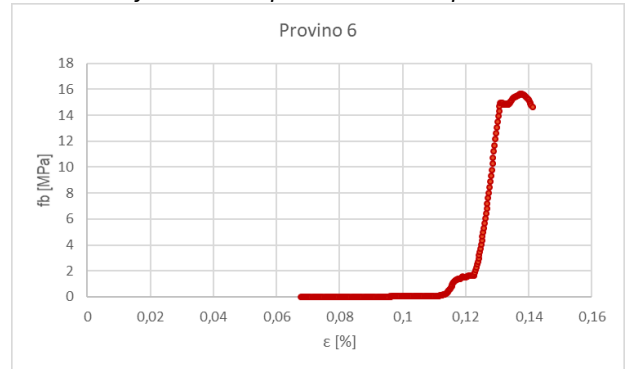


Grafico 3.6 Comportamento campione 6.

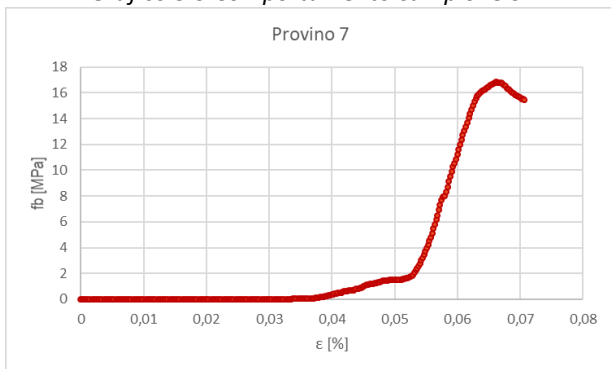


Grafico 3.7 Comportamento campione 7.

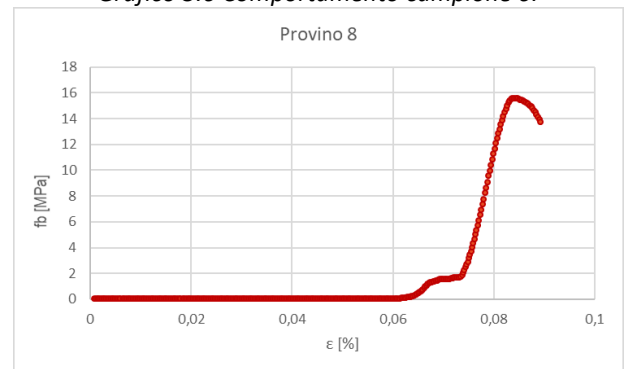


Grafico 3.8 Comportamento campione 8.

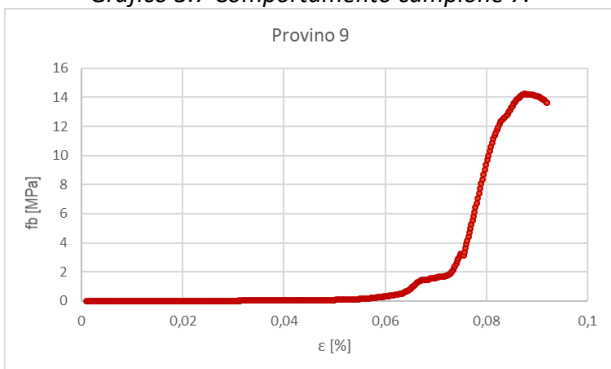


Grafico 3.9 Comportamento campione 9.

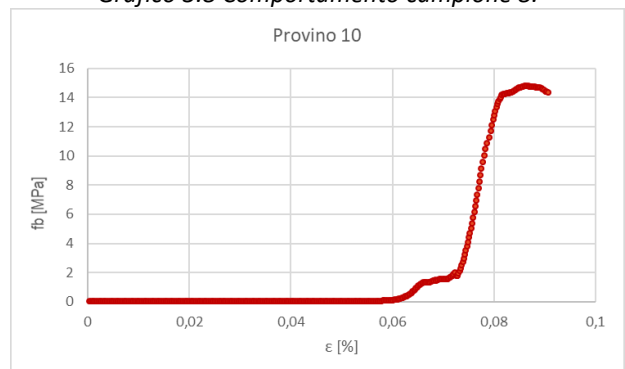


Grafico 3.10 Comportamento campione 10.

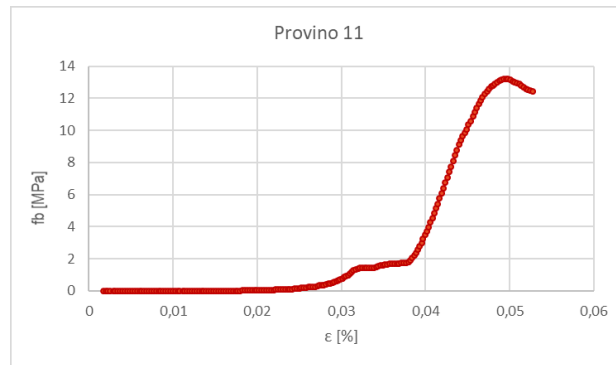


Grafico 3.11 Comportamento campione 11.

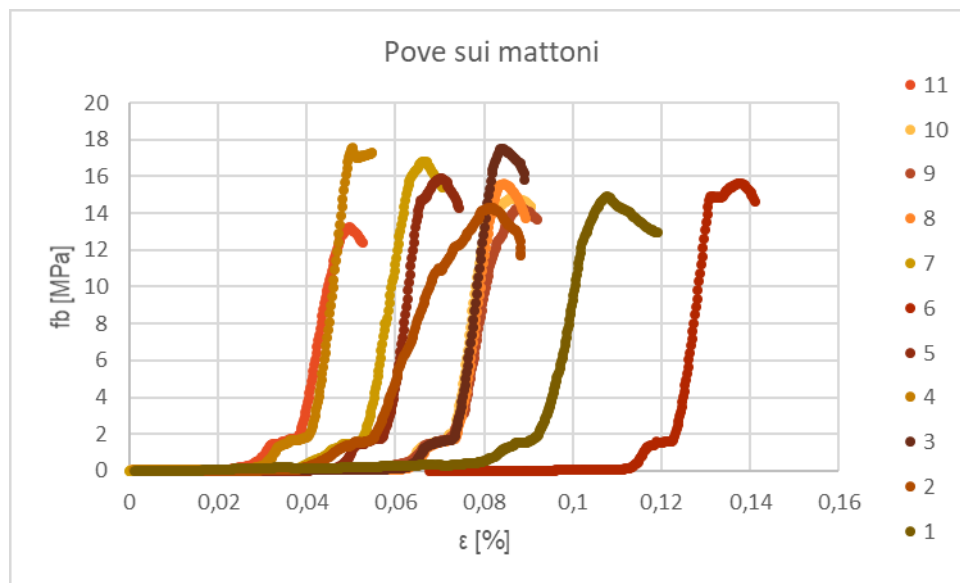


Grafico 3.12 Riepilogo prove a compressione sui provini di mattoni.

PROVINO	A_i [mm ²]	F_{max} [kN]	$F_{max,m}$ [kN]	E_{30-60} [MPa]	f_{bu} [MPa]	$f_{bu,m}$ [MPa]	D.S.
1	6280,4	93,471	98,544	66,40	14,8831	15,49	1,3904
2	6639,5	94,757		101,60	14,2718		
3	6358,9	111,34		101,61	17,5098		
4	5888,9	103,37		172,67	17,5537		
5	6161,0	98,1		113,22	15,9227		
6	6480,0	101,31		54,29	15,6349		
7	6641,0	111,73		133,34	16,8241		
8	6279,4	97,843		87,78	15,5817		
9	6398,0	91,157		83,45	14,2477		
10	6722,5	99,386		84,24	14,7841		
11	6161,0	81,514		142,73	13,2306		

Tabella 3.9 Caratteristiche meccaniche dei mattoni utilizzati per la realizzazione delle colonne circolari.

Dalla serie di prove eseguite viene confermata l'ipotesi come i laterizi a mezzaluna utilizzati per la realizzazione delle colonnine a base circolare presentino caratteristiche meccaniche molto basse. Viene riscontrata la rottura fragile del materiale come da letteratura. Queste caratteristiche sono perfette per simulare una muratura storica.

Prima di essere sottoposti alle prove di compressione i campioni sono stati soggetti ad opportuno condizionamento. Da normativa è possibile procedere secondo diversi metodi, in funzione del tipo di prodotto e in base al grado di umidità da ottenere.

Per i nostri provini è stata scelta la tipologia di condizionamento mediante essiccazione in forno, sottoponendoli ad una temperatura di 105°C.

Quando in due pesate consecutive fatte ad un intervallo di tempo di almeno 24h, la perdita di massa dei provini risulta minore dello 0.2% della massa totale, allora si considera raggiunta la massima costante di ciascun campione.

3.3 CORDA IN FIBRA DI BASALTO

Per questa tecnica di repointing flessibile viene impiegato come elemento di rinforzo la corda di basalto.

I risultati dei test a trazione condotti sul materiale secondo la UNI EN ISO 2307 [42] sono riportati nelle sperimentazioni precedenti [33], [3], [4], [5].

La corda scelta, prodotta dalla "GBF Basalt Fiber Co.", ha un diametro nominale di 4 mm ed è costituita da 8 filamenti intrecciati attorno ad un filamento centrale (Figura 3.26).



Nome prodotto: [corda in fibra di basalto](#)

Codice prodotto: BSnn-mm

Descrizione del prodotto: corda in fibra di basalto è un materiale di tenuta ad alte prestazioni. I prodotti principali sono varie corde rotonde, corde quadrate e corde ritorte.

GBF e istituti di ricerca per sviluppare una tenuta pompe materiali, valvole e collegamento tubolare per impedire gas chimici, perdita di liquido, particolarmente per alcuni liquidi e gas corrosivi ad alta temperatura, liquidi ad alta pressione, gas e acido-base, è una corda di fibra di basalto Materiale di tenuta ad alte prestazioni. I prodotti principali sono varie corde rotonde, corde quadrate e corde ritorte. Sono realizzati con materiali impregnanti come grafite, gomma o politetrafluoroetilene.

Indicatori tecnici della corda in fibra di basalto parziale

nome	Diametro (mm)	Contenuto organico (%)	Densità (g / cm ³)
Corda rotonda	2 - 50	16 - 32	≤1.0
Corda quadrata	4 × 4 - 50 × 50	16 - 32	≥0.8

Figura 3.25 Descrizione materiale fornita dal produttore



Figura 3.26 Rotolo di corda in fibra di basalto

La normativa specifica che per questo tipo di fune è necessario disporre di una lunghezza effettiva $L_e > 400$ mm sulla quale eseguire la prova. Alle due estremità della lunghezza libera devono essere fissati due manicotti, costituiti da tubolari $\varnothing 12$ lunghi 15 cm, che serviranno da aggrappo alla macchina di prova (Figura 3.27).

Per realizzare i tre campioni da testare sono state seguite le seguenti fasi:

- taglio di tre segmenti di corda, lunghi 100 cm ciascuno;
- inserimento della corda nella rondella, nel manicotto e nel tappo di plastica;
- realizzazione del doppio nodo all' estremità della corda;
- chiusura del tappo col manicotto e sigillatura tramite colla a caldo;
- colatura della resina epossidica bi-componente all' interno del manicotto e centraggio della corda interna tramite la rondella sovrastante.

Lo schema del campione e alcune delle fasi che ne hanno caratterizzato la realizzazione sono riportate di seguito:

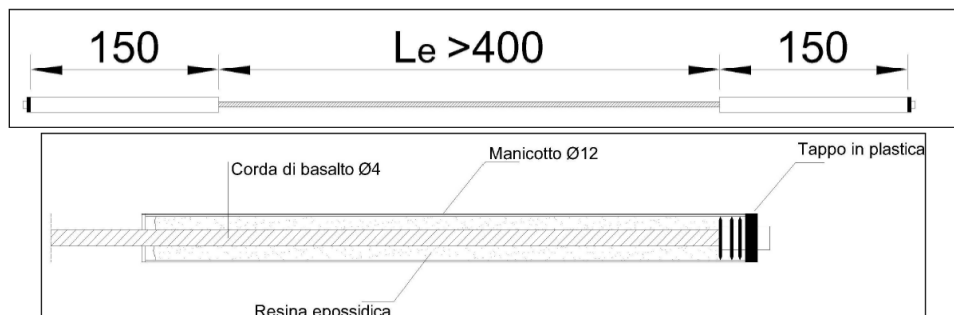


Figura 3.27 Schema dimensionale dei campioni di corda realizzati.



Figura 3.28 Componenti del provino e assemblaggio provvisorio.



Figura 3.29 Colatura della resina epossidica e provini pronti ad essere testati.

	Lunghezza libera effettiva
1	425 mm
2	420 mm
3	402 mm
4	419 mm

Tabella 3.10 Lunghezza libera effettiva di ogni provino.

Per la realizzazione di 3 provini sono state scelte corde di basalto in stato ottimale mentre per la realizzazione di un ulteriore provino è stata utilizzata una corda di basalto scartata durante le fasi di consolidamento poiché appartenente ad un rotolo vecchio di cui le prestazioni erano incognite.

Una volta trascorso il tempo di stagionatura della resina di ancoraggio “KIMITECH EP-IN”, i campioni sono stati sottoposti alla prova di trazione.

La prova viene eseguita su una macchina a trazione “METRO COM” con sistema di acquisizione Zwick/Roell, di capacità nominale di 600 kN e margine di errore dello 0,1%. Ciascun campione è stato posizionato con i manicotti all’ interno delle morse di esercizio della macchina (Figura 3.30).

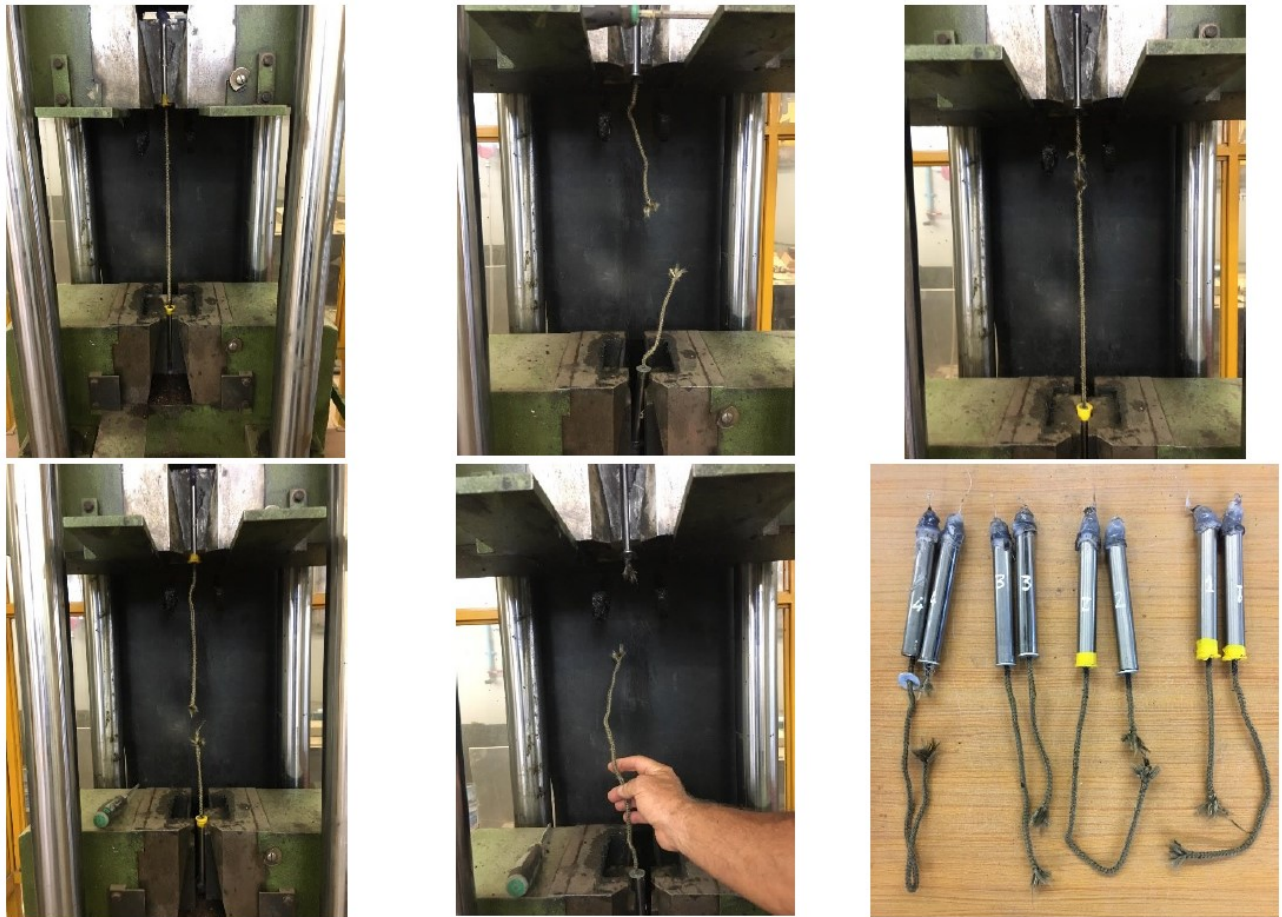


Figura 3.30 Provino teso su macchina, rottura 1, rottura 2, rottura 3, rottura 4, dettaglio provini dopo l'esecuzione della prova.

Nella prova sono stati registrati i valori di forza F [N] applicata e relativa deformazione [mm].

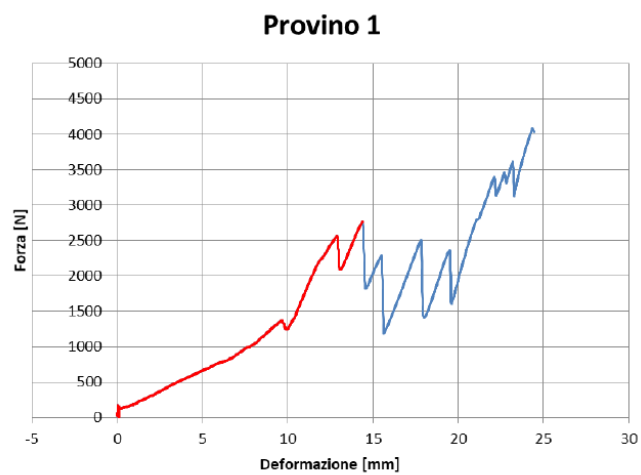


Grafico 3.13 Comportamento campione 1.

Provino 2

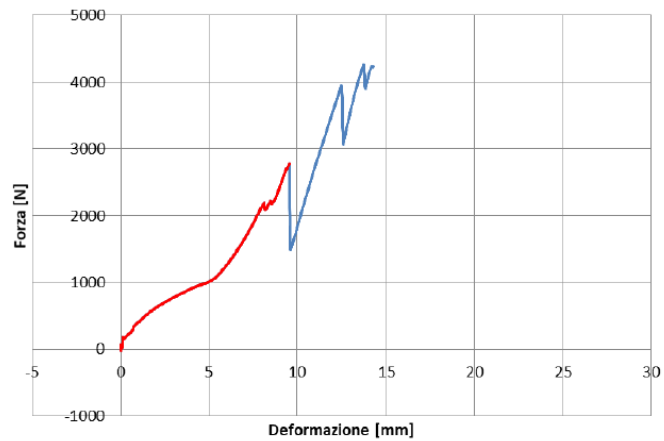


Grafico 3.14 Comportamento campione 2.

Provino 3

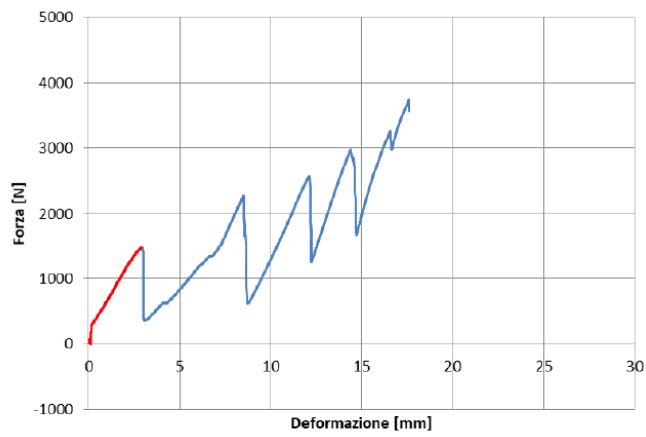


Grafico 3.15 Comportamento campione 3.

Provino 4

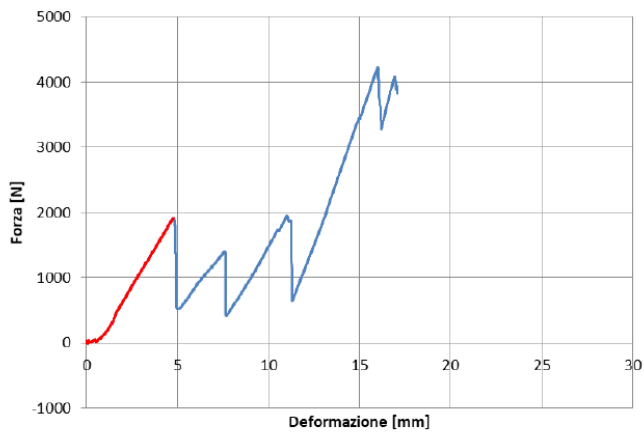


Grafico 3.16 Comportamento campione 4.

Per tutti i campioni è stato riscontrato lo stesso comportamento. Dopo un tratto iniziale continuo avviene il primo cedimento della corda. A questo primo cedimento seguiranno gli altri fino ad arrivare al carico di rottura.

Il carico di rottura è risultato lievemente minore rispetto a quello ottenuto in [43] ma gli spostamenti massimi sono risultati perfettamente in linea.

Nel caso del provino 4 ottenuto da uno spezzone di corda scartato, poiché ricavato da una partita di corda che non garantiva prestazioni adeguate durante il pretensionamento, è stato riscontrato un comportamento molto simile a quello degli altri 3 provini ricavati da corde in perfette condizioni. È possibile concludere dunque che una rottura prematura sia dovuta solo alla presenza locale di sfilacciamenti o danneggiamenti.

3.4 RESINA EPOSSIDICA

Come matrice del rinforzo è stata impiegata una resina epossidica. Il prodotto in questione è la resina “AhrCOS FLK SEMIFLUIDO” della ditta “A.h.r.c.o.s. s.r.l.”.

Si tratta di un materiale adesivo strutturale a bassa viscosità e bicomponente.



Figura 3.31 Resina bicomponente.

AhRCOS®

FLK SEMIFLUIDO

Adesivo strutturale epossidico bicomponente fluido privo di solventi ed esente da cariche e pigmenti con elevate caratteristiche meccaniche.

DESCRIZIONE

FLK SEMIFLUIDO è un adesivo epossidico bicomponente a bassa viscosità. Il prodotto è privo di solventi e non presenta ritiri all'atto dell'indurimento. Ottima adesione a svariati supporti come calcestruzzo, acciaio, laterizio, legno e pietre naturali.

CAMPO DI IMPIEGO

FLK SEMIFLUIDO viene utilizzato come adesivo ed impregnante per realizzazione di sistemi compositi con tessuti in carbonio, vetro, aramide, acciaio, basalto, ecc. della linea UNIC CUT per il rinforzo strutturale di volte, pilastri, travi, solai, murature.

FLK SEMIFLUIDO può essere usato per ancoraggi verticali ed obliqui con alta resistenza allo sfilamento e per ripristino di parti mancanti e consolidamento di strutture portanti in legno con tipologie applicative specifiche (consultare il nostro Ufficio Tecnico)

CARATTERISTICHE DI ADESIONE

Prove eseguite su calcestruzzo classe 500 stagionato a 28 giorni, con leggera sabbatura e applicazione di primer sulle parti destinate all'incollaggio

Prova di rottura a flessione fra prismi di calcestruzzo incollati di testa con FLK - IM: Rottura al 100% del calcestruzzo.

Prova di rottura per taglio di elementi in calcestruzzo incollati con FLK - IM: Rottura al 100% del calcestruzzo.

APPLICAZIONE E MODO D'USO

Le superfici da trattare devono essere perfettamente asciutte, compatte, prive di parti inconsistenti ed esenti da polvere, grasso, vernici ed agenti distaccanti in genere. La superficie deve essere sabbata ed eventualmente livellata con malte tipo BR04 o con malte analoghe per eliminare asperità superiori a 1 mm. Il sottofondo deve avere una resistenza alla rottura su trazione diretta superiore a 1,5 N/mm². Versare il componente "B" (induritore) nel componente "A" (resina) e miscelare con trapano a basso numero di giri (200-300 al minuto) fino ad ottenere un perfetto amalgama, avendo cura di non inglobare aria durante la miscelazione.

Nel caso di miscelazioni frazionate rispettare le proporzioni in peso (non in volume) indicate sulle confezioni. Applicare la resina a pennello o rullo rispettando un consumo di circa 1,6 kg/m² e stendere il nastro o il tessuto della linea UNIC.

Massaggiare con apposito rullo il nastro o il tessuto in modo che la resina fuoriesca dalle fibre e completare, se necessario con ulteriore resina da applicare a pennello, l'impregnazione delle fibre. Se l'applicazione prevede ulteriori strati di rinforzi in fibre, applicare una successiva mano di FLK - IM con un consumo di circa 0,8 kg/m², stendere il nastro o il

tessuto e ripetere il passaggio con il rullo. Se la superficie del rinforzo si deve verniciare, rasare, intonacare o rivestire con protezioni antincendio, consultare il nostro Ufficio Tecnico.

DATI TECNICI

PROVA	UNITA'DI MISURA	VALORE
Numero di componenti	u	2 (a+b)
Tempo di gelo (200 g a 25°C)	Minuti	25
Indurimento completo a 25°C	Giorni	7
Temperatura minima di applicazione	°C	+5
Temperatura limite di esercizio	°C	-30/+90
Resistenza a compressione a 7 gg ASTM D695-02a	MPa	> 50,0
Residuo secco (A+B) UNI 8309	%	>98%
Massima tensione di trazione ASTM D 638	MPa	> 30
Modulo tangente a trazione ASTM D 638	MPa	1760

AVVERTENZE

Applicare con una temperatura tra +5/+35 °C. Prodotto destinato ad uso professionale. Non applicare il prodotto con imminente previsione di pioggia. Le attrezzature impiegate per la preparazione e la posa in opera di FLK - IM devono essere pulite con Solvente prima dell'indurimento. Il prodotto deve essere maneggiato con cautela: utilizzare guanti, creme di protezione ed occhiali per evitare il contatto con la pelle e gli occhi. Le caratteristiche tecniche e le modalità d'applicazione da noi indicate nel presente bollettino sono basate sulla nostra attuale conoscenza ed esperienza, ma non possono comportare nessuna garanzia da parte nostra sul risultato finale del prodotto applicato. Il cliente è obbligato ad accertarsi che il bollettino tecnico sia valido e non superato da successivi aggiornamenti e a verificare che il prodotto sia idoneo per l'impiego previsto.

STOCCAGGIO

Confezioni e stoccaggio.
Contenitori metallici da 6 kg (A+B)

Conservazione:
12 mesi al riparo dall'umidità ed in confezioni integre.



Carbon Fiber Engineering, Idro-Block Sistem ed Advanced Building Technologies sono marchi di proprietà AhrCOS®.

Le informazioni contenute nella presente scheda si basano sulle nostre conoscenze ed esperienze; non possono quindi implicare una garanzia da parte nostra, né responsabilità circa l'impiego dei nostri prodotti, non essendo le condizioni di utilizzo sotto il nostro controllo. In funzione dell'accuratezza delle diverse fasi applicative, sulle quali non abbiamo responsabilità, possono verificarsi delle variazioni. La nostra garanzia si limita pertanto alla qualità e costanza del prodotto fornito di cui alle indicazioni stesse.

Emissione: 27/05/2014 - Rev. 01

Precedentemente in [3], [4], [5] è stata effettuata una caratterizzazione meccanica seguendo la norma di riferimento ASTM D638 [44], che riguarda la prova a trazione su materiali polimerici.

3.5 REALIZZAZIONE DELLE COLONNE IN MURATURA

Per la sperimentazione sono stati realizzati, con l'aiuto messo a disposizione in termini di materiali e mano d'opera dall'impresa di costruzioni C.O.P.P. di Guerrieri Filippo, 33 provini in muratura, 18 dei quali a base rettangolare e altri 15 a base circolare.

Di questo totale 9 colonnine, 6 a base rettangolare e 3 a base circolare, sono state realizzate senza rinforzo, come campioni di riferimento. Tutti i rimanenti sono stati successivamente sottoposti agli interventi di rinforzo strutturale definiti per la sperimentazione.

Dei rimanenti provini, per questioni di tempo, solo una parte è stata successivamente sottoposta agli interventi di rinforzo strutturale definiti per la sperimentazione.

Nella seguente tabella è riportato il quantitativo di provini realizzati e di provini effettivamente rinforzati e poi testati:

		PROVINI REALIZZATI		PROVINI RINFORZATI	
Simbolo del gruppo	Tipologia di colonna	N provini a base rettangolare	N provini a base circolare	N provini a base rettangolare	N provini a base circolare
UR - UnReinforced	Non rinforzata	6	3	3	3
PTR20 - PreTensionedReinforced20	Rinforzata con pretensione al 20%	6	6	0	0
PTR40 - PreTensionedReinforced40	Rinforzata con pretensione al 40%	6	6	1	3

Tabella 3.11 Tipologie di provini realizzati.

I provini sono stati realizzati seguendo le precauzioni necessarie nel rispetto della regola dell'arte.

Differente operazione rispetto la normale posa in opera delle colonne non confinate è stata eseguita per quelle di rinforzo. In tal caso, con lo scopo di ottenere un'intercapedine in corrispondenza dei bordi esterni dei giunti di malta per il posizionamento della corda di basalto, sono stati inseriti dei prismi di polistirene di larghezza adeguata:

- Prismi di 4 cm per tutte le colonne a base rettangolare,
- Prismi di 4 cm per le prime 3 colonne realizzate con base circolare
- Prismi di 2.5 cm per le rimanenti 9 colonne a base circolare, in quanto in fase di realizzazione è stato evidente che porre in opera malta in corrispondenza di una forma circolare con diametro di 12 cm non risultasse sufficiente dal punto di vista strutturale.

Tutte le sagome in polistirene hanno lo stesso spessore del giunto di malta (1 cm).

In questo modo è stato garantito un risparmio dei tempi, ovviando il danno conseguente alla scarnitura manuale del giunto di malta.

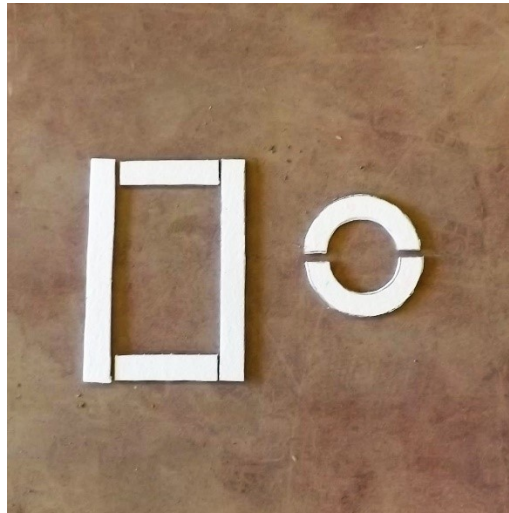


Figura 3.32 Prismi in polistirene di spessore 4 cm.



Figura 3.33 Prismi in polistirene a confronto utilizzati per colonne circolari: dx 4 cm – sx 3 cm.

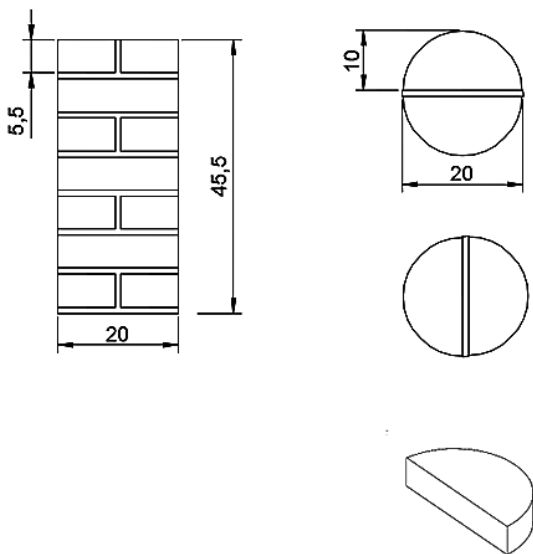
3.5.1 DESCRIZIONE E GEOMETRIA DELLE COLONNE DA COSTRUIRE

Sono state realizzate due tipologie di colonnine: di base rettangolare e di base circolare, il presente lavoro di tesi verterà sull'analisi dei provini di forma circolare.

Come spiegato nel *Capitolo 2.4*, per la scelta del numero e la geometria di campioni è stata condotta un'attenta analisi su tutti gli studi e le sperimentazioni già condotti presenti in letteratura.

Particolare attenzione è stata riposta sulle documentazioni di Corradi, Grazini, Borri [38], Jurina [7], Faella [14], Martinelli, Paciello, Camorani, Aiello, Micelli.

Il range di altezza della colonnina si trova tra i 40 e i 50 cm, con filari di mattoni e giunti di malta orizzontali di spessore pari a 1 cm e realizzate con laterizi mezzaluna a semicerchio (5x12x25 cm).



Altezza (H)	45,5 cm
Lato maggiore (l=d)	20 cm
H/l	2.275
N di mattoni necessari per una colonnina	2x7=14
N di mattoni necessari per 18 colonnine	14x18=252
Prezzo mezzaluna a semicerchio	128 pz/plt € 2,7 pz

Quantitativo necessario malta e sabbia del Po:

Area giunto orizzontale [cm ²]	Volume giunto orizzontale [cm ³]	Volume giunto verticale [cm ³]	Volume TOT [m ³]
$\pi R^2=314$	$A \times 7=2198$	$(5.5 \times 1 \times 20) \times 7=770$	0,003

Considerando 25 q/mc $\rightarrow 25 \times 0.003 = 0.075 \text{ q} \approx 7.5 \text{ kg}$.

Considerando il rapporto Malta/Sabbia del Po pari a una unità di Sabbia per due di Malta allora:

- Sabbia per una colonnina = $\frac{1}{3}$ kg = 2.5 kg → Sabbia totale = 2.5 x 18 = 45 kg.
- Malta per una colonnina = $\frac{2}{3}$ kg = 5 kg → Malta totale = 5 x 18 = 90 kg.

Riassumendo brevemente, i materiali principali adoperati, come illustrato nei paragrafi precedenti, sono:

- Mattoni con forma di mezzaluna 5,5x12x20 cm della "F.B.M. s.r.l.";
- Malta composta da calce idraulica "Vimark";
- Sabbia del Po' di cui sono state impiegate rispettivamente 15 e 8 sacchi.

Altri materiali e attrezzature necessarie per la realizzazione sono stati:

- Tavole 45x55cm metalliche e in legno;
- Fogli di nylon;
- Mixer meccanico per preparare la malta;
- Bilancia di precisione;
- Livella e strumenti da muratore.

3.5.2 FASI DI REALIZZAZIONE

Come aree individuate per la realizzazione dei provini e per le successive sperimentazioni sono state scelte il piazzale del Laboratorio di Strutture dell'Università Politecnica delle Marche e l'officina al suo interno, tali zone presentano dimensioni tali da consentire una disposizione ordinata di campioni ed una pratica e fruibile gestione degli spazi.

I materiali sono stati stoccati nel periodo intercorso tra la loro consegna e la realizzazione delle prove all'interno delle aree del laboratorio.



Figura 3.34 Stoccaggio mattoni.



Figura 3.35 Stoccaggio malta.

Una fase preliminare ha riguardato l'allestimento e la predisposizione dei supporti sopra i quali realizzare i provini, facilitandone il successivo spostamento. Le tipologie di supporto utilizzate sono:

- *Tavole in legno* rettangolari per la costruzione dei provini non rinforzati;
- *Pannelli metallici* rettangolari per la realizzazione dei provini da rinforzare.

Su di essi sono stati opportunamente saldati degli piedritti metallici impiegati poi per la pretensione delle corde di basalto.



Figura 3.36 Messa a livello tavole in legno.



Figura 3.37 Supporti metallici con foglio di nylon.

Sopra ciascuno di questi sostegni è stato posto un foglio di nylon in modo da evitare il contatto diretto tra colonna e supporto.

Per la realizzazione dei provini non rinforzati non è stato necessario bagnare gli elementi in laterizio poiché, come precedentemente detto, la sabbia del Po risultava molto bagnata e la miscela era dunque caratterizzata da una fluidità tale da non rischiare di bruciare la malta.

Nel giorno successivo 16/04/2018 invece, essendosi la sabbia asciugata a causa della ventilazione e del sole, i laterizi sono stati bagnati in modo tale che non assorbissero l'acqua della miscela della malta.

Coerentemente con quanto stabilito in precedenza (rapporto malta/sabbia 1:0.5) il dosaggio degli impasti di malta è stato eseguito con le seguenti quantità:

- Un sacco di 25Kg di "Malta antica";
- Un sacco di 25Kg di sabbia del Po';
- Quantitativo di acqua in un range tra 5.5 e 7 L in funzione della fluidità dell'impasto.



Figura 3.38 Preparazione della malta.

I primi 9 provini realizzati, di cui 3 a base circolare, sono quelli a giunto intero ovvero della tipologia UN.

Prima di tutto è stato steso uno strato di malta della stessa altezza dei giunti successivi, pari quindi a 1 cm, l'operazione è stata svolta per evitare possibili danni locali dovuti ad asperità della base in legno o dell'elemento in laterizio.

E' stata poi verificata la planarità ed effettuato lo squadro del primo filare.

Come ultima operazione le colonnine sono state pulite della malta in eccesso e i giunti sono state raschiati per conferire un aspetto antico e ben curato.

Nelle pagine seguenti è possibile prendere visione delle diverse fasi che hanno caratterizzato la realizzazione dei provini e di una pianta rappresentativa delle colonne con le diverse miscele impiegate nella realizzazione di ciascuna di esse.



Figura 3.39 Posa strato di allettamento e dei primi due mattoni.



Figura 3.40 Controllo della planarità.



Figura 3.41 Colonna senza riempimento giunti esterni.



Figura 3.42 Colonna terminata.



Figura 3.43 Provini UNreinforced.

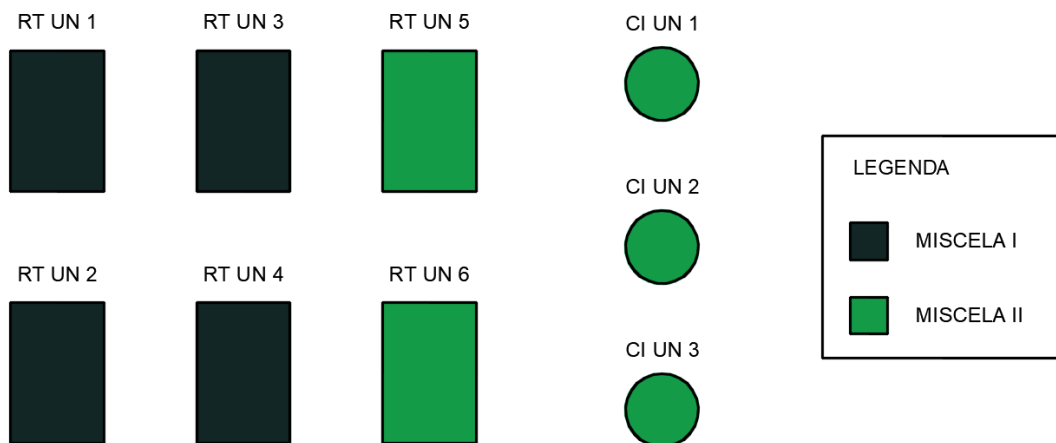


Figura 3.44 Miscele impiegate per provini UNreinforced.

Questi provini che dovranno, dopo la fase di maturazione di 28 giorni, essere rinforzati, sono stati realizzati su supporti metallici opportunamente rivestiti con un foglio di nylon e presentano una particolarità: le strisce di polistirolo sono state posizionate lungo il perimetro di ogni filare e lasciate in quella posizione, creando un'intercapedine finalizzata a facilitare l'intervento di repointing evitando di scarnire i giunti di malta.

Tutti i laterizi in questo caso sono stati immersi in acqua pulita prima della posa per evitare che ne assorbissero troppa dalla malta.

Anche per questi provini sono di seguito riportate immagini descrittive delle diverse fasi di realizzazione.



Figura 3.45 Bagnatura dei mattoni.



Figura 3.46 Posizionamento prismi di polistirene.



Figura 3.47 Sovrapposizione filari di mattoni.



Figura 3.48 Riempimento con malta giunto verticale.



Figura 3.49 Costruzione colonne.



Figura 3.50 Colonna terminata.



Figura 3.51 Provini da rinforzare.

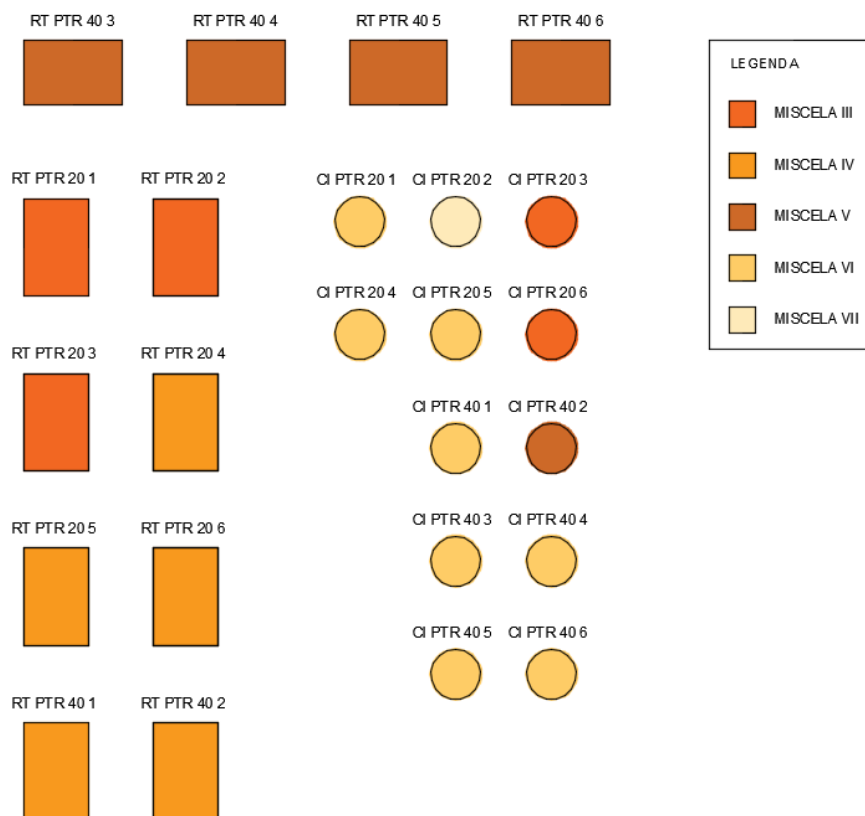


Figura 3.52 Miscele impiegate per provini da rinforzare.

Dopo aver atteso i 28 giorni necessari per una corretta stagionatura, al 34esimo giorno, sono stati rimossi i prismi di polistirolo dalle colonnine che dovranno essere sottoposte al repointing.



Figura 3.53 Rimozione prismi di polistirene.

Nel caso di due colonne a base circolare la rimozione del polistirolo ha evidenziato un difetto di realizzazione. Ciò ha inevitabilmente comportato l'inutilizzabilità dei due campioni per il rinforzo con corde di basalto.

3.5.3 RILIEVO DEI PROVINI

Ultimato il periodo di stagionatura ogni provino è stato rilevato al millimetro con estrema attenzione, con lo scopo di creare delle schede tecniche rappresentative di ogni colonnina che mettessero in luce le differenze tra le geometrie di progetto e quelle effettivamente realizzate.

Tutte le misure sono state prese in più punti e, a meno che non presentassero difetti evidenti, che sono stati opportunamente segnalati, graficamente ne è stata restituita la media in corrispondenza della mezzeria dell'elemento misurato. Le misurazioni hanno interessato:

1. Altezza dell'intero provino in corrispondenza dei quattro spigoli per le colonne rettangolari e delle estremità dei diametri per le colonne circolari.
2. Spessore dei giunti di malta.
3. Spessore dei vuoti necessari per la consolidazione.
4. Dimensioni della base superiore dei provini con segnalazione di pendenze e irregolarità dei laterizi.
5. Misurazione di rientranze, sporgenze e verticalità con filo a piombo, fissato per ogni lato, ad una distanza di 15 cm.

La presenza di giunti irregolari con spessori evidentemente diversi rispetto quelli progettati possono portare a rotture locali, da cui successivamente possono svilupparsi le rotture principali in posizioni diverse da quelle attese.

Il quarto punto è di rilevante importanza perché in fase di prova una superficie irregolare e non omogenea sulla quale applicare il carico potrebbe portare all'attivazione di un meccanismo di pressoflessione piuttosto che di compressione semplice.

Per quanto riguarda l'utilizzo del filo a piombo si è proceduto in due maniere diverse in funzione della tipologia di provino:

- Per i provini a base rettangolare le misure sono state prese sui quattro lati principali e in corrispondenza di due sezioni nella mezzeria del lato lungo e di quello corto. La misura è stata effettuata solo per i laterizi di cui un esame visivo evidenziava delle sensibili irregolarità.
- Per i provini a base circolare sono state misurate le distanze dal filo a piombo di tutti i laterizi in quanto presentavano diffuse irregolarità e fuori piombo. Le misure sono state prese in corrispondenza dei quattro estremi dei due diametri principali.

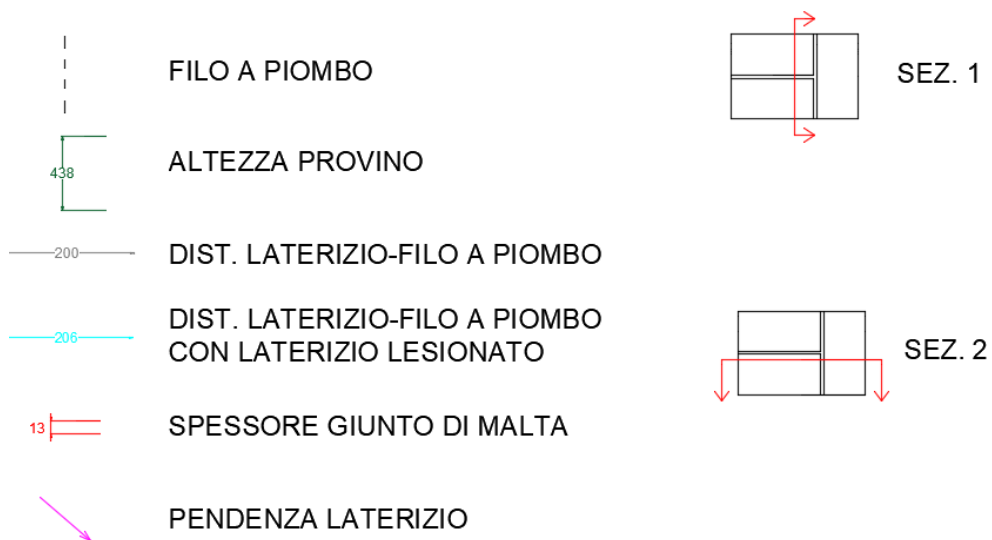
Prima dell'analisi dei fuori piombo è stata verificata, con un'opportuna livella, la planarità sia del piano di supporto della colonna sia della superficie superiore di ogni provino sulla quale è stato legato il piombino.



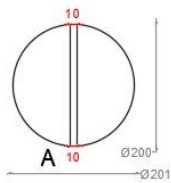
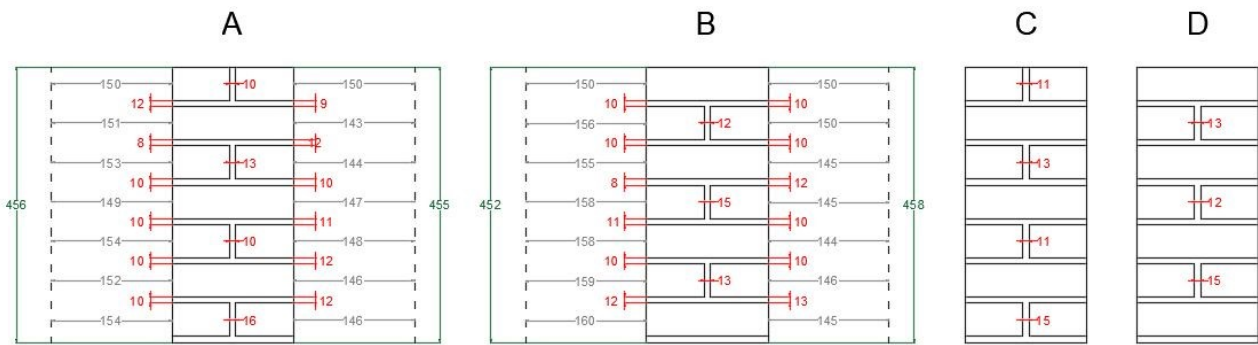
Figura 3.54 Misurazione fuori piombo.

A seguire sono riportate le schede riassuntive di ogni provino:

LEGENDA



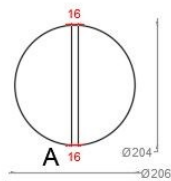
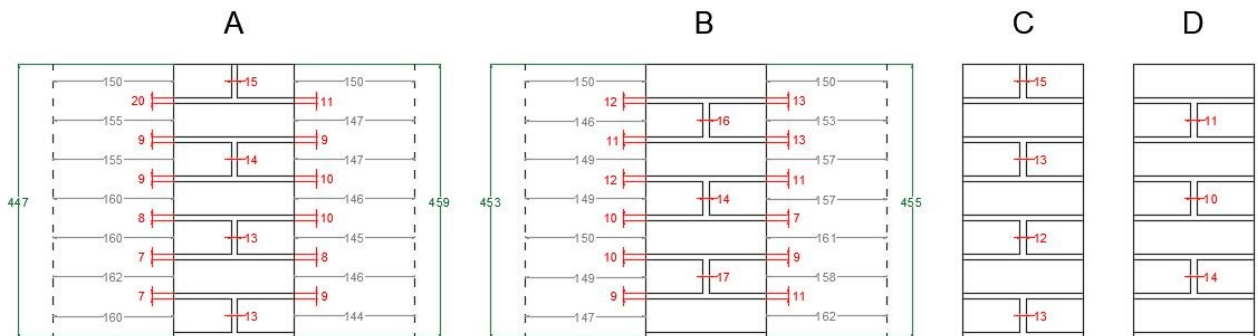
3.5.3.1 CI UN 1



A nominale = 31400 mm²

A reale = 31557,0 mm²

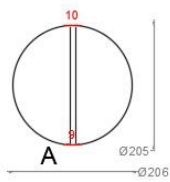
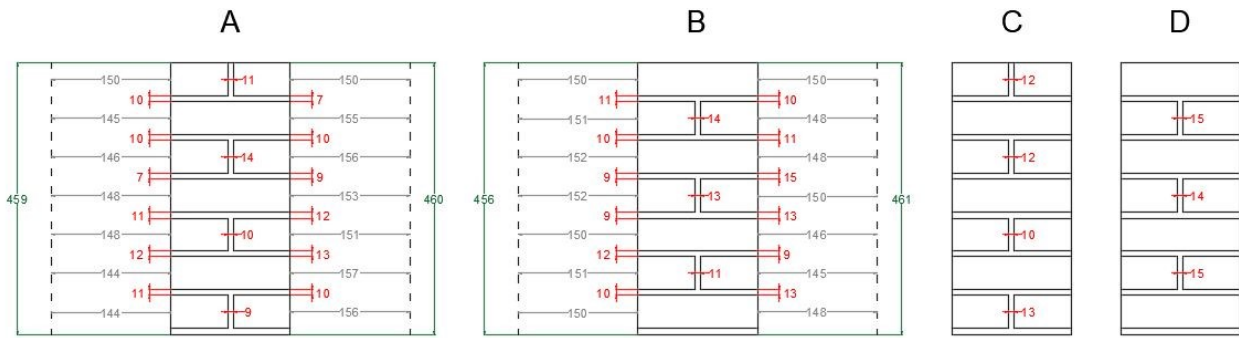
3.5.3.2 CI UN 2



A nominale = 31400 mm²

A reale = 32988,8 mm²

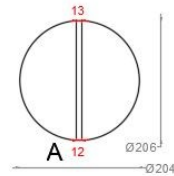
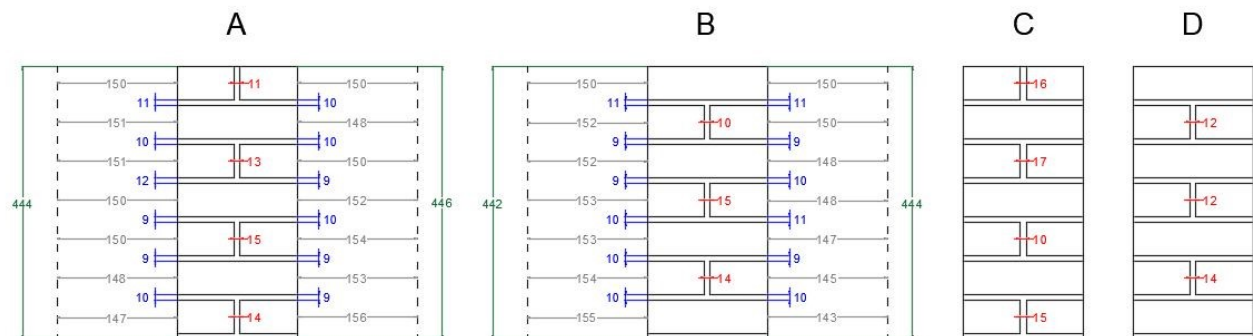
3.5.3.3 CI UN 3



A nominale = 31400 mm²

A reale = 33150,6 mm²

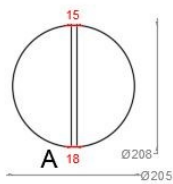
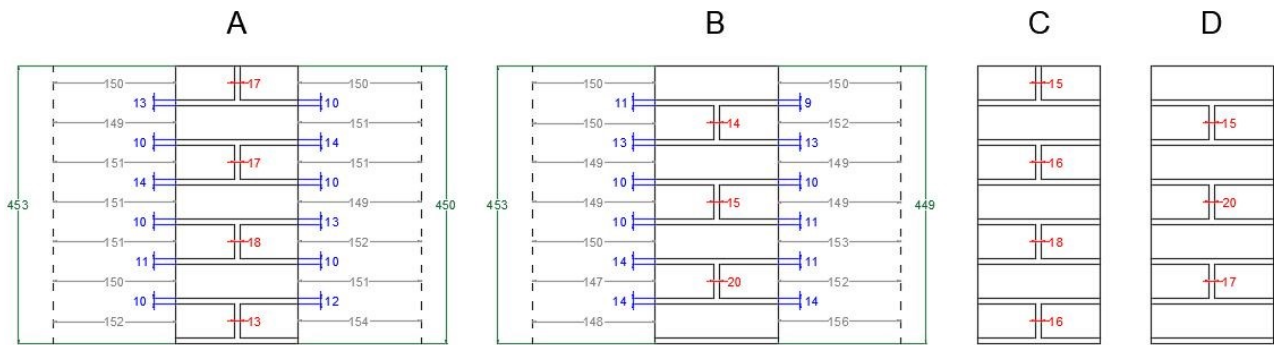
3.5.3.4 CI PTR 20 1



A nominale = 31400 mm²

A reale = 32988,8 mm²

3.5.3.5 CI PTR 20 2



A nominale = 31400 mm²

A reale = 33472,4 mm²

3.5.3.6 CI PTR 20 3

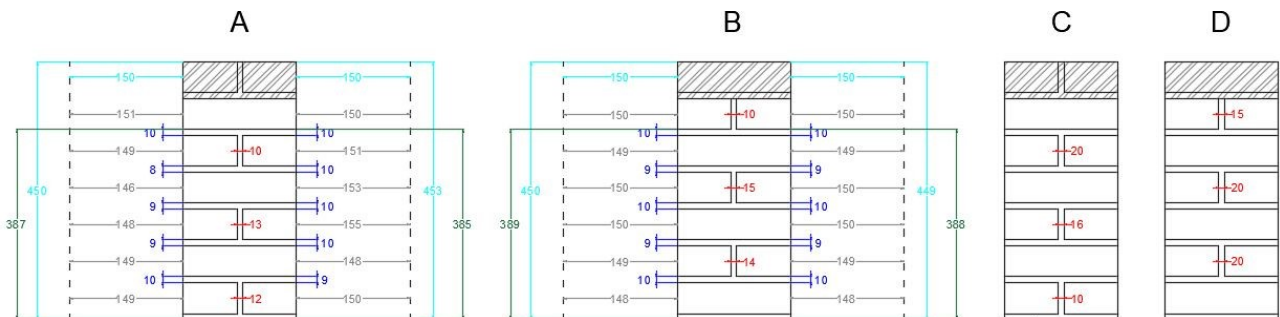
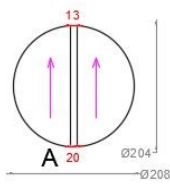
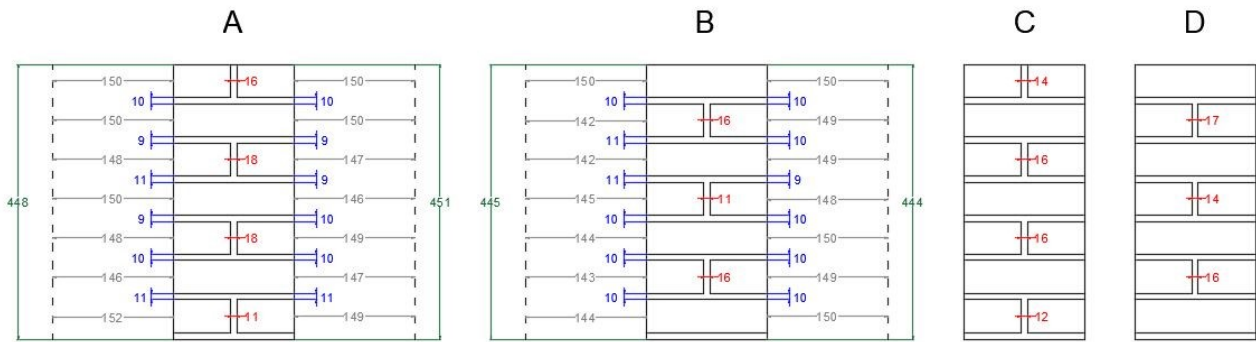


Figura 3.55 Provino danneggiato.

Il provino CI PTR 20 3 durante il periodo di consolidazione è rimasto danneggiato rivelandosi inadeguato per il consolidamento e le successive prove.

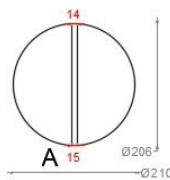
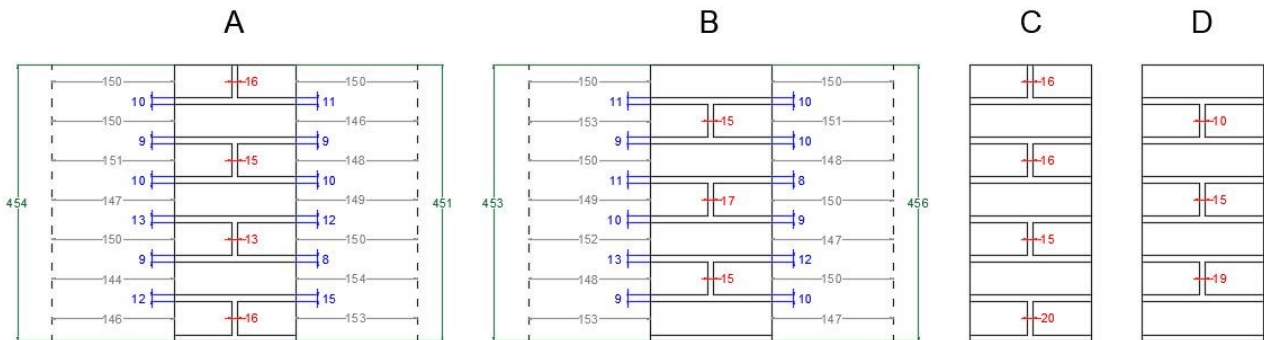
3.5.3.7 CI PTR 20 4



A nominale = 31400 mm²

A reale = 33309,1 mm²

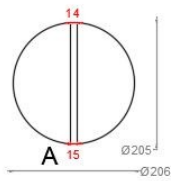
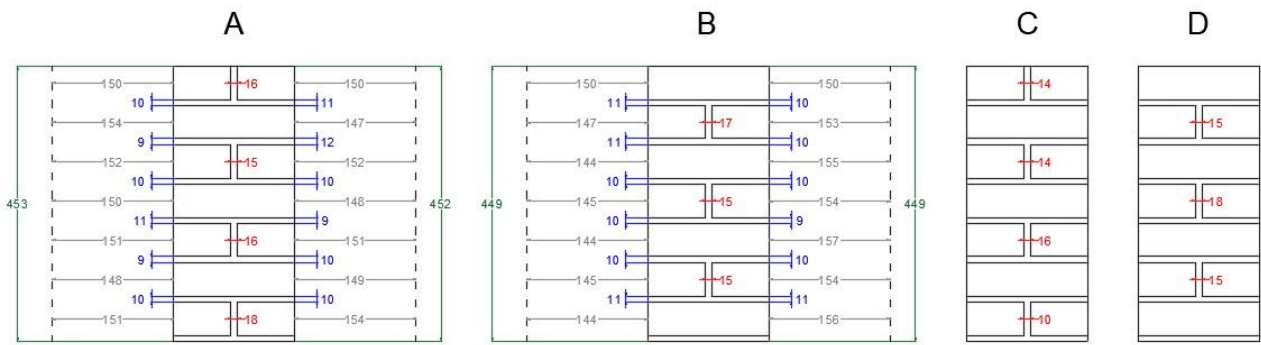
3.5.3.8 CI PTR 20 5



A nominale = 31400 mm²

A reale = 33959,1 mm²

3.5.3.9 CI PTR 20 6



A nominale = 31400 mm²

A reale = 33150,6 mm²

3.5.3.10 CI PTR 40 1

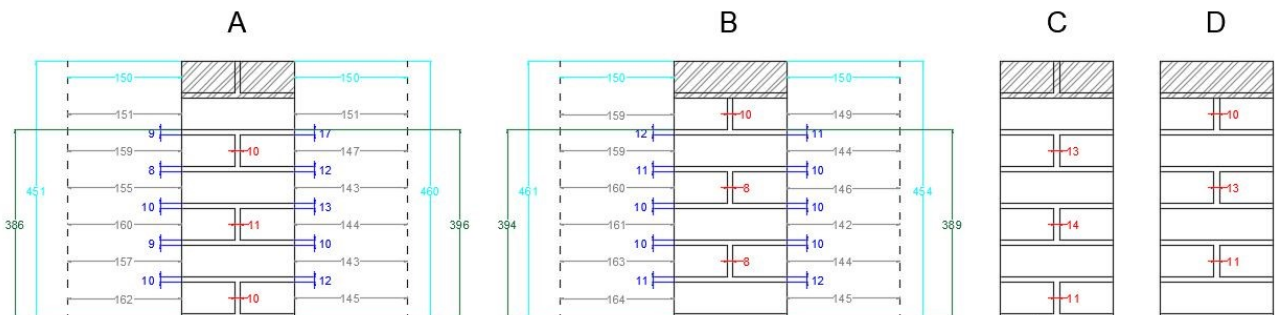
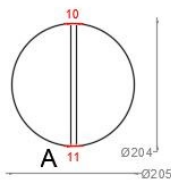
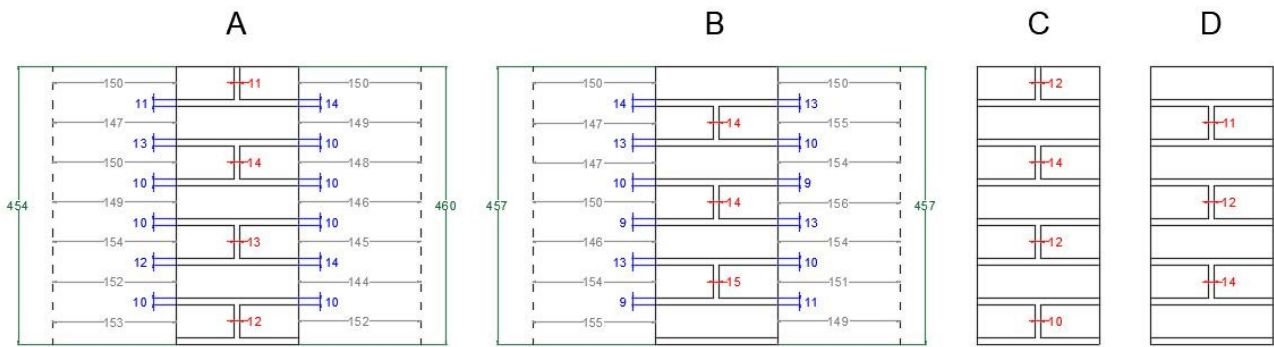


Figura 3.56 Provino danneggiato.

Il provino CI PTR 40 1 durante il periodo di consolidamento è rimasto danneggiato rivelandosi inadeguato per il consolidamento e le successive prove.

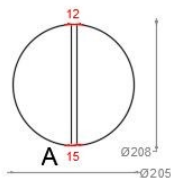
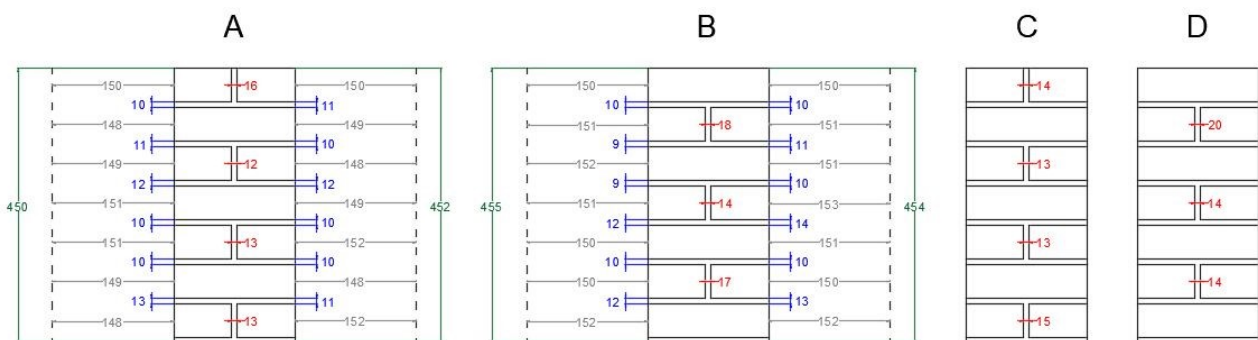
3.5.3.11 CI PTR 40 2



A nominale = 31400 mm²

A reale = 32828,7 mm²

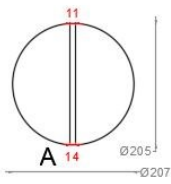
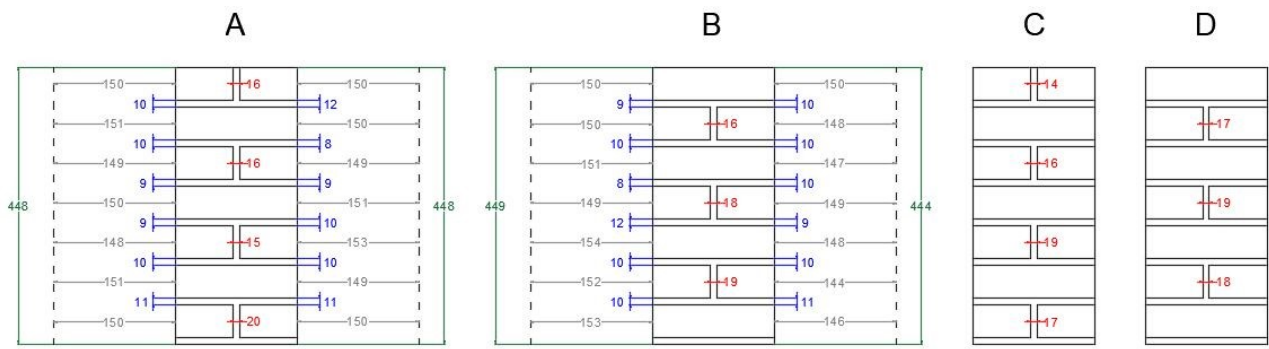
3.5.3.12 CI PTR 40 3



A nominale = 31400 mm²

A reale = 33472,4 mm²

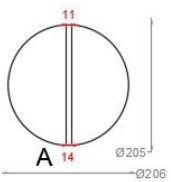
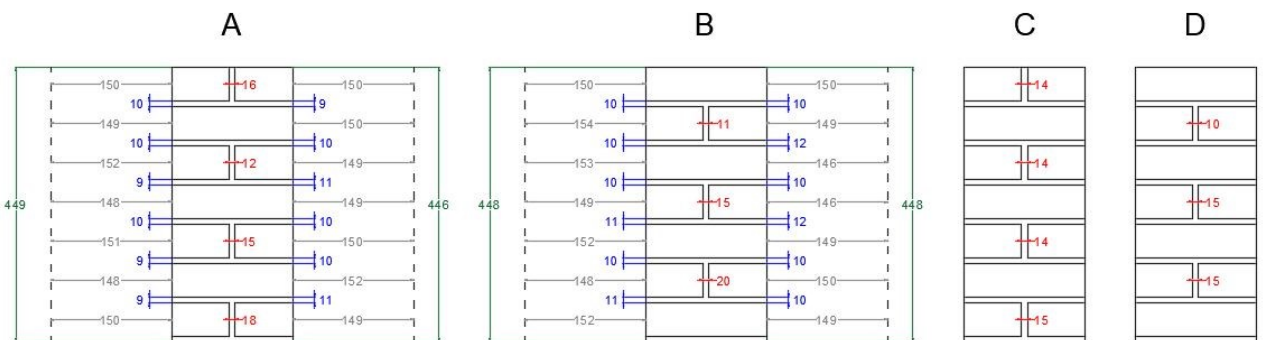
3.5.3.13 CI PTR 40 4



A nominale = 31400 mm²

A reale = 33311,5 mm²

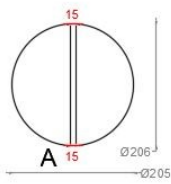
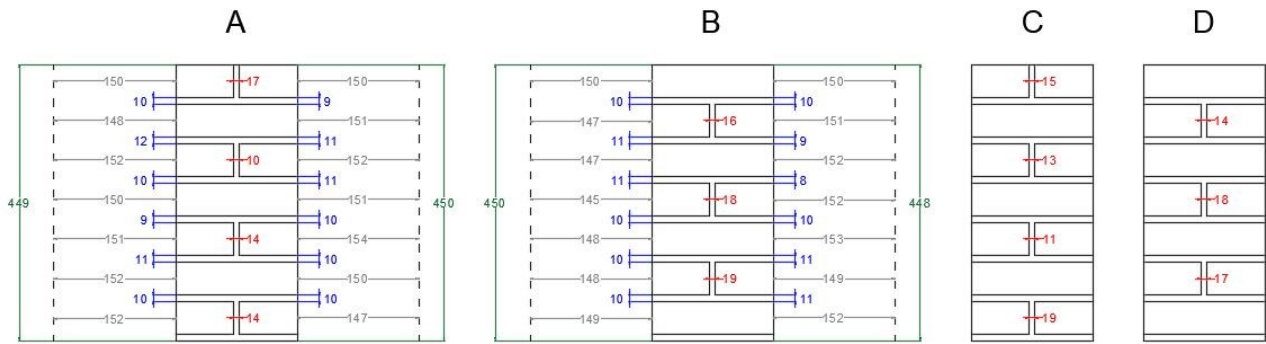
3.5.3.14 CI PTR 40 5



A nominale = 31400 mm²

A reale = 33150,6 mm²

3.5.3.15 CI PTR 40 6



A nominale = 31400 mm²

A reale = 33150,6 mm²

3.6 REALIZZAZIONE DEI RINFORZI

Una volta realizzate le 33 colonne ed attesa una corretta maturazione, 24 sono state destinate alle successive operazioni di rinforzo:

- PTR20, rinforzate con resina e corda tesa meccanicamente (500 N)
- PTR40, rinforzate con resina e corda tesa meccanicamente (1000 N)

Prima di effettuare il repointing nelle colonne sono stati arrotondati gli spigoli interni dei giunti così da creare un raggio di curvatura adatto per una corretta applicazione del rinforzo.

I provini da rinforzare sono stati sottoposti ad una scarnitura su ogni giunto per eliminare le evidenti asperità e le porzioni di malta che avrebbero potuto ostruire il passaggio delle corde in fibra di basalto e per addolcire gli spigoli delle colonne a base rettangolare.

Infine ogni provino è stato pulito con pistola ad aria compressa da detriti e polvere.



Figura 3.57 Scarnitura e pulizia giunti.

Per eseguire il rinforzo è stato necessario l'aiuto di un operaio specializzato in questo tipo di lavorazioni della ditta AhRCOS produttrice della resina epossidica.

3.6.1 PROGETTAZIONE E PREDISPOSIZIONE DEL RINFORZO CON PRETENSIONE

Il rinforzo effettuato consiste in un repointing flessibile mediante l'inserimento di corde di basalto all'interno dei giunti delle colonne.

Questo sistema è finalizzato all'aumento della resistenza a compressione della colonna andando a confinare quello che è nella muratura storica l'elemento più debole, il giunto di malta.

Nella prima campagna sperimentale condotta [2], [45], la corda in fibra di basalto era stata applicata con un singolo avvolgimento comportando in questo modo un confinamento della malta non omogeneo, localizzato solamente nella parte centrale. Di conseguenza è stato visto come l'effetto di confinamento e di rinforzo viene trasferito solo in maniera limitata al mattone.

Nelle successive campagne sperimentali [3], [4], [5] è stato applicato un secondo giro di corde di basalto all'interno del giunto di malta. Questa soluzione, oltre a raggiungere livelli prestazionali maggiori che si trasferiscono direttamente alla superficie del mattone, favorisce una diminuzione dello spessore deformabile di resina epossidica.

Per la presente campagna sperimentale come predisposizione del rinforzo è stata scelta la seconda tecnica.

Nelle immagini di seguito riportate è possibile osservare uno schema del trasferimento delle forze sulla superficie del laterizio.

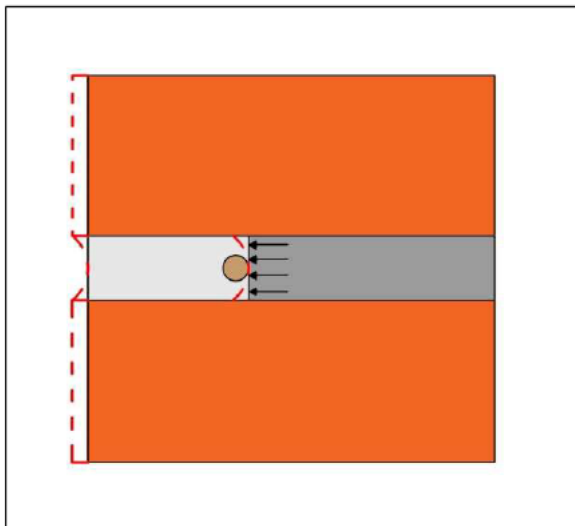


Figura 3.58 Comportamento con singolo giro di corda.

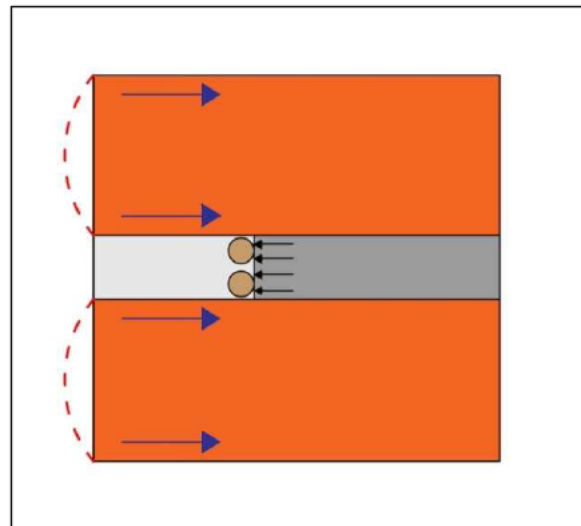


Figura 3.59 Comportamento con doppio giro di corda.

Di seguito è riportato un particolare costruttivo dell'intervento da realizzare.

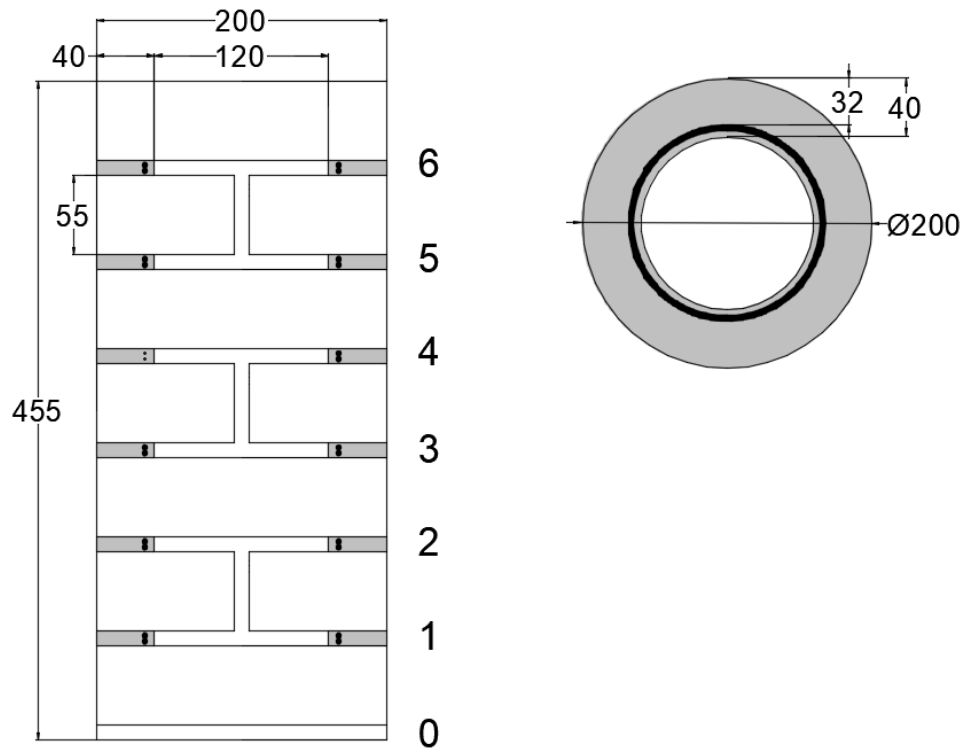


Figura 3.60 Dettaglio costruttivo colonna circolare con polistirene largo 4 cm.

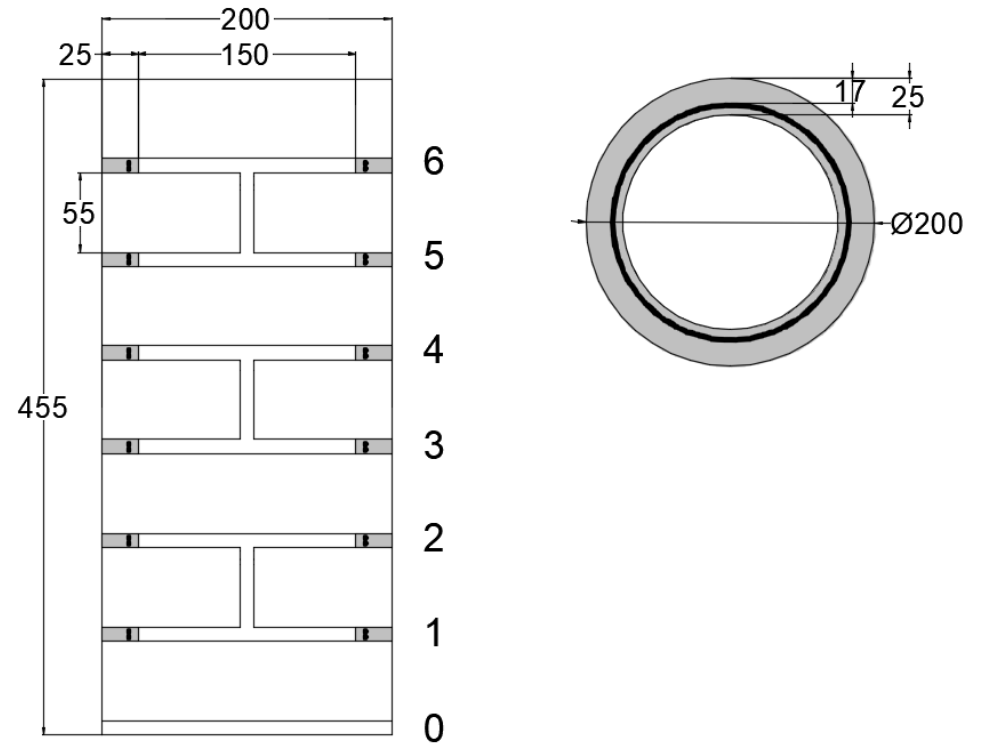


Figura 3.61 Dettaglio costruttivo colonna circolare con polistirene largo 2.5 cm.

Il sistema utilizzato per l'applicazione del rinforzo è composto di due principali elementi:

Il primo è un telaio fisso, all'interno del quale è stato costruito ogni campione, con le seguenti caratteristiche:

- possibilità di mantenere la forza applicata di pretensione per tutta la durata della stagionatura della resina;
- capacità di conservare un'adeguata distanza dalla colonna per permettere un'agevole ristilatura dei giunti.

Il secondo elemento compositivo è un telaio mobile utile a garantire nelle fasi di esecuzione del rinforzo i seguenti punti:

- applicazione della forza di pretensione;
- misura della forza applicata.

Il sistema è realizzato assemblando, tramite saldatura, due montanti laterali con profilo a C che presentano un'asola nella parte centrale e collegati nella parte sommitale da una traversa. Tutte le componenti sono state opportunamente limate per poter in primo luogo applicare il repointing in totale sicurezza ed evitare inoltre lesioni sulle corde di basalto.



Figura 3.62 Telaio assemblato.



Figura 3.63 Limatura delle porzioni taglienti.

Al telaio mobile viene applicata una cella di carico e altri elementi complementari e come accennato precedentemente ha il compito di applicare e misurare la forza che deve essere applicata sulla corda di basalto.

Nella figura sottostante vengono riportate tutte le componenti e le modalità di assemblaggio del telaio mobile.

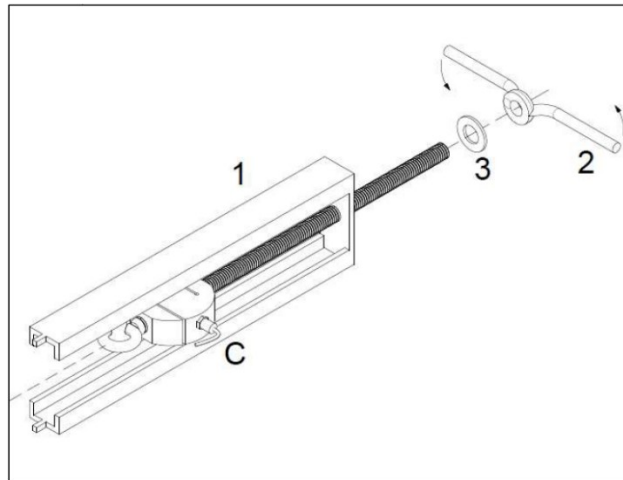


Figura 3.64 Componenti telaio mobile: 1-Omega, 2-Farfalla, 3-Rondella, C-Cella di carico e barra filettata.

Per realizzare il rinforzo sono stati tagliati segmenti di diverse lunghezze. In particolare, per le colonne a base circolare si è scelta una lunghezza pari a 2,30 m.

Questi valori sono stati calcolati facendo un'attenta analisi che considerava la lunghezza minima necessaria per effettuare il consolidamento con un doppio avvolgimento maggiorata di un'opportuna quantità data della distanza dei provini rispetto al telaio fisso in aggiunta alla lunghezza necessaria per la pretensione con il telaio mobile.

Per evitare che le estremità delle corde si sfilacciassero sono state avvolte con del nastro adesivo contenitivo.

In ognuno di questi segmenti è stato eseguito poi un cappio, realizzato attraverso un nodo Bolina, alle estremità per permettere un agevole aggancio alla cella di carico e sono stati posizionati morsetti e rondella per il fissaggio.



Figura 3.65 Misurazione lunghezza e taglio delle corde di basalto.



Figura 3.66 Preparazione estremità della corda.



Figura 3.67 Corde pronte per il repointing.

3.6.2 CONTROLLO DELL'UMIDITA'

Prima di effettuare le prove di tutti i campioni sono stati monitorati i contenuti di acqua espressi in termini percentuali. Solo dopo aver verificato che il quantitativo di acqua contenuto si fosse stabilizzato in un range di valori per cui i provini potessero essere considerati come asciutti si è proceduto con le prove a compressione.

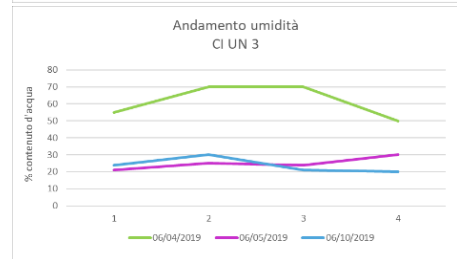
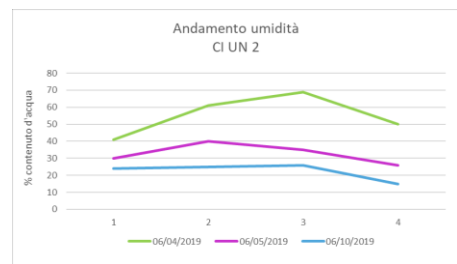
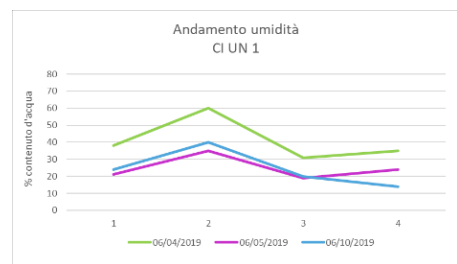
Una eccessiva umidità del provino poteva infatti andare ad influire negativamente sulla sua resistenza a compressione e, per quanto riguarda i provini da rinforzare, poteva ostacolare la corretta adesione della resina epossidica.

Sono stati scelti sempre gli stessi punti per le misurazioni che si sono svolte in più giornate, rispettivamente in corrispondenza del lato B per le colonne a base rettangolare e del lato C per le colonne a base circolare.

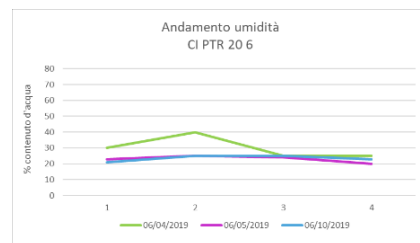
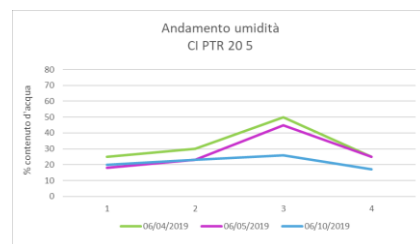
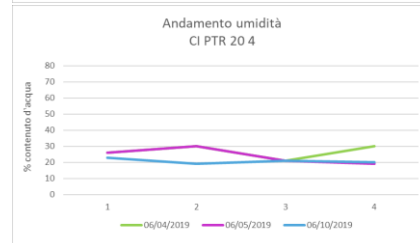
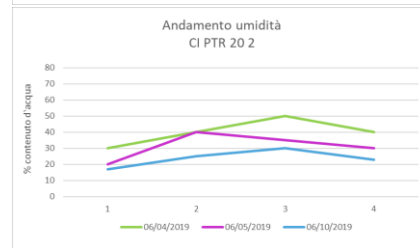
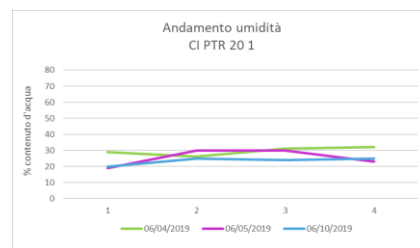


Figura 3.68 Misurazione contenuti d'acqua

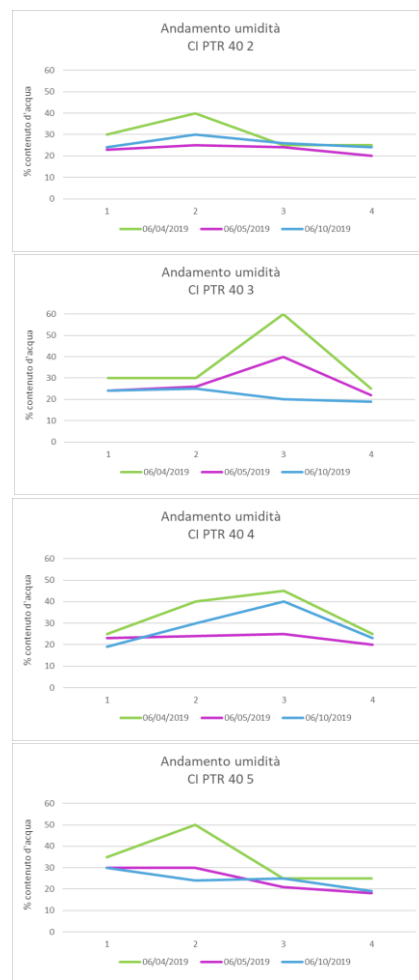
COLONNE NON CONFINATE RT/CI UN					
PROVINI			DATA MISURAZIONE		
FORMA PIANTA	NOME	POSIZIONE MISURA	04/06/2019	05/06/2019	10/06/2019
			[%]		
RETTANGOLARE	RT UN 1	I FILARE	59	35	–
		IV FILARE	60	40	–
		VI FILARE	69	50	–
		VII FILARE	61	25	–
	RT UN 2	I FILARE	41	30	25
		IV FILARE	60	50	60
		VI FILARE	51	35	40
		VII FILARE	45	59	40
	RT UN 3	I FILARE	51	25	37
		IV FILARE	70	55	26
		VI FILARE	60	40	24
		VII FILARE	60	22	23
	RT UN 4	I FILARE	40	40	20
		IV FILARE	70	55	23
		VI FILARE	65	32	19
		VII FILARE	35	26	16
	RT UN 5	I FILARE	39	25	17
		IV FILARE	70	55	26
		VI FILARE	42	40	31
		VII FILARE	55	40	23
	RT UN 6	I FILARE	39	30	23
		IV FILARE	69	35	16
		VI FILARE	70	50	28
		VII FILARE	45	40	15
CIRCOLARE	CI UN 1	I FILARE	38	21	24
		IV FILARE	60	35	40
		VI FILARE	31	19	20
		VII FILARE	35	24	14
	CI UN 2	I FILARE	41	30	24
		IV FILARE	61	40	25
		VI FILARE	69	35	26
		VII FILARE	50	26	15
	CI UN 3	I FILARE	55	21	24
		IV FILARE	70	25	30
		VI FILARE	70	24	21
		VII FILARE	50	30	20



COLONNE CONFINATE CON PRETENSIONE AL 20%					
PROVINI			DATA MISURAZIONE		
FORMA PIANTA	NOME	POSIZIONE MISURA	04/06/2019	05/06/2019	10/06/2019
			[%]		
RETTANGOLARE	RT PTR 20 1	I FILARE	26	19	20
		IV FILARE	31	19	20
		VI FILARE	27	20	18
		VII FILARE	21	25	17
	RT PTR 20 2	I FILARE	25	25	25
		IV FILARE	24	23	19
		VI FILARE	40	25	25
		VII FILARE	25	20	24
	RT PTR 20 3	I FILARE	18	15	15
		IV FILARE	39	25	25
		VI FILARE	26	20	24
		VII FILARE	19	19	20
	RT PTR 20 4	I FILARE	26	26	18
		IV FILARE	25	20	25
		VI FILARE	25	22	20
		VII FILARE	19	20	15
	RT PTR 20 5	I FILARE	20	23	25
		IV FILARE	27	24	20
		VI FILARE	25	22	21
		VII FILARE	19	16	21
	RT PTR 20 6	I FILARE	20	19	20
		IV FILARE	50	20	24
		VI FILARE	39	35	20
		VII FILARE	26	26	19
CIRCOLARE	CI PTR 20 1	I FILARE	29	19	20
		IV FILARE	26	30	25
		VI FILARE	31	30	24
		VII FILARE	32	23	25
	CI PTR 20 2	I FILARE	30	20	17
		IV FILARE	40	40	25
		VI FILARE	50	35	30
		VII FILARE	40	30	23
	CI PTR 20 3	I FILARE	Provino danneggiato, non idoneo alla consolidazione e ad essere testato.		
		IV FILARE			
		VI FILARE			
		VII FILARE			
	CI PTR 20 4	I FILARE	26	26	23
		IV FILARE	30	30	19
		VI FILARE	21	21	21
		VII FILARE	30	19	20
	CI PTR 20 5	I FILARE	25	18	20
		IV FILARE	30	23	23
		VI FILARE	50	45	26
		VII FILARE	25	25	17
	CI PTR 20 6	I FILARE	30	23	21
		IV FILARE	40	25	25
		VI FILARE	25	24	25
		VII FILARE	25	20	23



COLONNE CONFINATE CON PRETENSIONE AL 40%					
PROVINI			DATA MISURAZIONE		
FORMA PIANTA	NOME	POSIZIONE MISURA	04/06/2019	05/06/2019	10/06/2019
[%]					
RETTANGOLARE	RT PTR 40 1	I FILARE	26	26	20
		IV FILARE	39	39	25
		VI FILARE	49	48	30
		VII FILARE	38	38	23
	RT PTR 40 2	I FILARE	21	17	16
		IV FILARE	19	25	28
		VI FILARE	23	24	28
		VII FILARE	14	17	20
	RT PTR 40 3	I FILARE	20	20	21
		IV FILARE	14	14	15
		VI FILARE	19	20	19
		VII FILARE	23	21	24
	RT PTR 40 4	I FILARE	19	19	25
		IV FILARE	25	24	23
		VI FILARE	23	24	23
		VII FILARE	22	22	19
	RT PTR 40 5	I FILARE	15	15	18
		IV FILARE	19	20	19
		VI FILARE	27	26	25
		VII FILARE	19	20	18
	RT PTR 40 6	I FILARE	24	21	15
IV FILARE		40	23	25	
VI FILARE		30	35	23	
VII FILARE		23	25	24	
CIRCOLARE	CI PTR 40 1	I FILARE	Provino danneggiato, non idoneo alla consolidazione e ad essere testato.		
		IV FILARE			
		VI FILARE			
		VII FILARE			
	CI PTR 40 2	I FILARE	30	23	24
		IV FILARE	40	25	30
		VI FILARE	25	24	26
		VII FILARE	25	20	24
	CI PTR 40 3	I FILARE	30	24	24
		IV FILARE	30	26	25
		VI FILARE	60	40	20
		VII FILARE	25	22	19
	CI PTR 40 4	I FILARE	25	23	19
		IV FILARE	40	24	30
		VI FILARE	45	25	40
		VII FILARE	25	20	23
	CI PTR 40 5	I FILARE	35	30	30
		IV FILARE	50	30	24
		VI FILARE	25	21	25
		VII FILARE	25	18	19
	CI PTR 40 6	I FILARE	25	19	22
		IV FILARE	25	21	40
		VI FILARE	20	20	30
		VII FILARE	20	19	20



3.6.3 RINFORZO CON RESINA E CORDA TESA MECCANICAMENTE

I componenti della resina utilizzata sono stati miscelati impiegando un trapano a frusta.

Il rapporto resina/indurente è di 1/0.5, avendo il contenitore di resina una capacità pari a 4 kg e quello di indurente pari a 2 kg, è stato possibile effettuare la miscela mescolando tramite un trapano a frusta il loro contenuto.

A causa dell'elevata fluidità la messa in opera nei giunti è stata effettuata tramite una siringa.

Attraverso le seguenti immagini è possibile prendere visione delle fasi di preparazione della resina.



Figura 3.69 Resina e indurente.

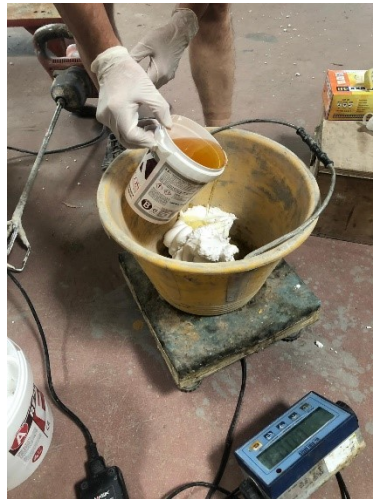


Figura 3.70 Dosaggio dei componenti della resina.



Figura 3.71 Miscelazione resina.

Facendo riferimento alle caratteristiche meccaniche testate in esperienze precedenti sono stati valutati i livelli di pretensione da applicare alle corde di basalto.

Infatti è comprovato dai risultati delle prove precedentemente condotte che le corde in fibra di basalto hanno un comportamento regolare solo nel primo tratto.

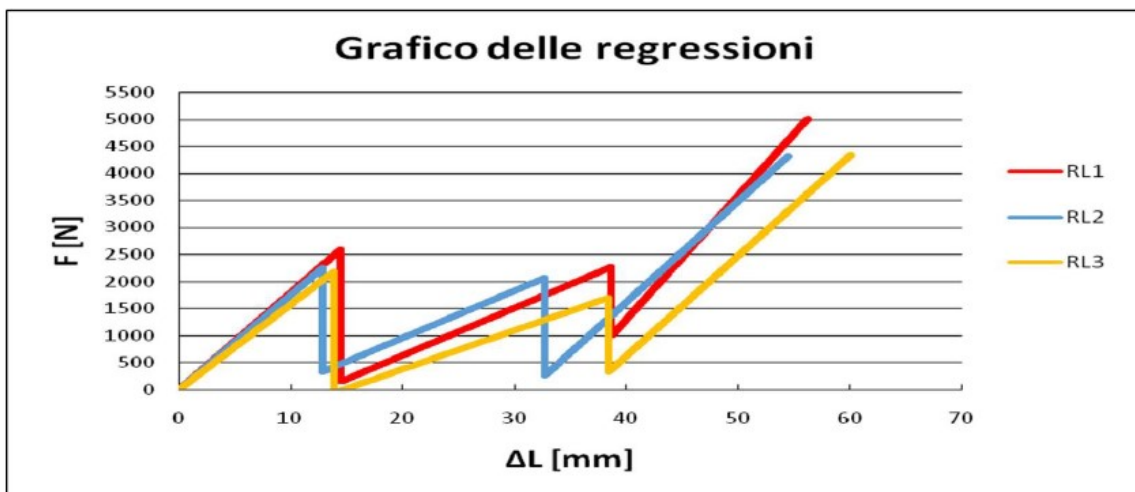


Figura 3.72 Comportamento tramite tratti linearizzati di 3 provini di corda di basalto. [4]

Per questo motivo è stato considerato come carico massimo che la corda potesse raggiungere quello corrispondente al primo cedimento.

Partendo da questo valore sono state poi calcolate le forze di pretensione pari al 20% e al 40% del carico massimo.

	PTR 20	PTR 40
F_{max} [N]	20% F_{max} [N]	40% F_{max} [N]
2500	500	1000

Tabella 3.12 Valori di pretensione scelti per il rinforzo.

Per evitare che si formino momenti torcenti, in grado di causare la rotazione della colonna all'interno dell'intelaiatura fissa, vista l'entità delle forze da applicare alla corda, sono stati utilizzati telai mobili così da ottenere una pretensione simmetrica.

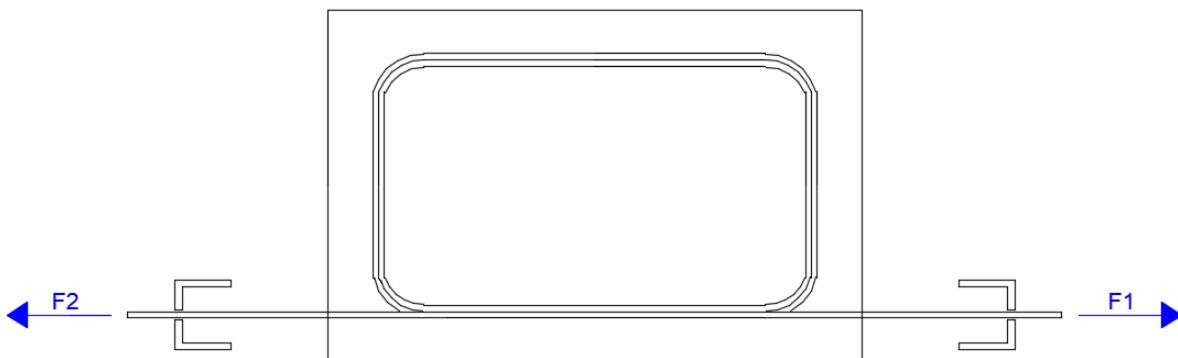


Figura 3.73 Sistema di pretensione simmetrico senza creazione di momenti torcenti.

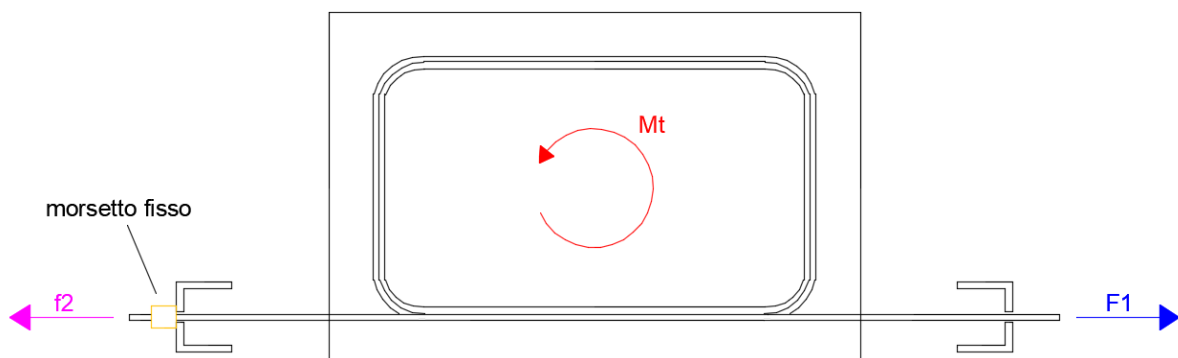


Figura 3.74 Sistema di pretensione asimmetrico con la formazione di un momento torcente.

Il carico viene applicato in maniera progressivo partendo dal primo giunto di malta fino all'ultimo in sommità.

Particolare attenzione è stata riposta in questo procedimento di applicazione del carico, in quanto, con il procedere dell'applicazione nelle corde nei giunti sottostanti già fissate, può verificarsi una perdita di carico.

Sono stati per questo verificati gli spostamenti tra i punti di applicazione delle forze di tiro in corrispondenza dei montanti laterali del telaio fisso.

La tabella di seguito riporta i valori di forza con cui sono state tese le corde in fibra di basalto dei provini rinforzati. Nella classificazione dei giunti il 1° Giunto corrisponde a quello più in basso.

	CI PTR 40 3		CIPTR 40 5		CI PTR 40 6		RT PTR 40 6	
	Cella 0	Cella 1	Cella 0	Cella 1	Cella 0	Cella 1	Cella 0	Cella 1
	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]
1° Giunto	1003	998	1010	1004	1017	1004	990	970
2° Giunto	1120	993	1030	1040	998	1040	1060	1040
3° Giunto	1010	1025	1050	997	1006	1001	1080	960
4° Giunto	1020	1050	1005	1000	1100	1008	1040	1020
5° Giunto	1030	1040	1060	1040	1000	1030	1050	1050
6° Giunto	990	940	1010	1040	980	1006	1030	1010

Tabella 3.13 Forze di pre-tensione applicate alle corde in fibra di basalto.

Come prima fase nella realizzazione del rinforzo si pone in opera uno strato di allettamento di resina su ogni giunto della colonna, l'esecuzione del rinforzo segue poi le fasi seguenti partendo dal basso, dal giunto inferiore:

- Aggancio dell'estremità della corda alla cella di carico;
- Sistemazione del doppio giro di corda all'interno del giunto e aggancio alla cella di carico posizionata nel montante opposto;
- Tesatura meccanica della corda fino al raggiungimento della forza prestabilita;
- Fissaggio attraverso morsetti delle due estremità della corda;
- Sgancio dei telai mobili e ripetizione della procedura sui giunti successivi in elevazione.



Figura 3.75 Applicazione strato di allettamento di resina e aggancio della corda al telaio fisso.



Figura 3.76 Particolare su cella di carico e fuga del giunto con resina.



Figura 3.77 Colonna rinforzata con corde pretensionate al 40%.

3.7 PROVE A COMPRESSIONE SULLE COLONNE

3.7.1 VALUTAZIONI SULLA RESISTENZA PREVISTA

Considerando i risultati delle prove effettuate sui singoli materiali nelle diverse fasi di costruzione possiamo stimare la resistenza a compressione che si prevede abbiano le colonne non rinforzate utilizzando la formula proposta dall' Eurocodice 6 [46].

$$f_k = K \cdot f_b^{0.7} \cdot f_m^{0.3}$$

Dove:

f_k : resistenza a compressione prevista

f_b : resistenza media del mattone Perugia pari a 49,01 MPa

f_b : resistenza media del mattone a mezzaluna realizzato a mano pari a 15,49 MPa

f_m : resistenza media della malta pari a 1,85 MPa (Tabella 3.6)

K : Costante (per la muratura ordinaria $K=0,55$ [46])

Applicando dunque i nostri valori alla formula otteniamo

- Per i provini a base rettangolare $f_k = 10,09$ MPa.
- Per i provini a base circolare $f_k = 4,50$ MPa.

Sapendo inoltre che f_k avente come unità di misura MPa, è calcolabile come il rapporto tra una forza, espressa in N, e l'area di applicazione della forza, espressa in mm^2 , è possibile ricavare il valore di carico massimo previsto per i provini circolari:

$$F = f_k \cdot A = 4,50 \cdot 31400 = 141300 \text{ N} \approx 141,3 \text{ kN}.$$

Un'altra valutazione è stata fatta considerando la i valori di resistenza a compressione forniti dalla **CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7** C.S.LL.PP. Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018. [47]

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 squadriati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

(*) Nella muratura a conci 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.

Tabella 3.14 Valori tensione attesi. [47]

Di conseguenza come è stato fatto precedentemente è possibile calcolare il carico massimo previsto:

Utilizzando il valore di $f_k=2,6 \text{ MPa}$

$$F = f_k \cdot A = 2,6 \cdot 31400 = 81640 \text{ N} \approx 81,64 \text{ kN}.$$

Utilizzando il valore di $f_k=4,3 \text{ MPa}$

$$F = f_k \cdot A = 4,3 \cdot 31400 = 135020 \text{ N} \approx 135,02 \text{ kN}.$$

Un ulteriore confronto può essere effettuato considerando il Cap.8 della NTC 2008- DM 14 gennaio 2008 [48], non più in vigore dello scorso anno, che tratta di costruzioni esistenti. I valori così ottenuti sono a loro volta dissimili da quelli che abbiamo appena calcolato:

Tipologia di muratura	f_m	τ_0	E	G	w
	(N/cm ²)	(N/cm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(kN/m ³)
	Min-max	min-max	min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100 180	2,0 3,2	690 1050	230 350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200 300	3,5 5,1	1020 1440	340 480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260 380	5,6 7,4	1500 1980	500 660	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140 240	2,8 4,2	900 1260	300 420	16
Muratura a blocchi lapidei squadrati	600 800	9,0 12,0	2400 3200	780 940	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	240 400	6,0 9,2	1200 1800	400 600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤ 40%)	500 800	24 32	3500 5600	875 1400	15
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura < 45%)	400 600	30,0 40,0	3600 5400	1080 1620	12
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	300 400	10,0 13,0	2700 3600	810 1080	11
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	150 200	9,5 12,5	1200 1600	300 400	12
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)	300 440	18,0 24,0	2400 3520	600 880	14

Tabella 3.15 Valori di tensione attesi. [48]

Utilizzando il valore di $f_k=2,4 \text{ MPa}$

$$F = f_k \cdot A = 2,4 \cdot 31400 = 75360 \text{ N} \approx 75,35 \text{ kN}.$$

Utilizzando il valore di $f_k=4,0 \text{ MPa}$

$$F = f_k \cdot A = 4,0 \cdot 31400 = 125600 \text{ N} \approx 125,6 \text{ kN}.$$

3.7.2 ESECUZIONE DELLA PROVA

I provini sono stati suddivisi in due gruppi:

Il primo gruppo ha coinvolto le colonne non confinate RT UN 1-2-3 e CI UN 1-2-3, quest'ultime sono state sottoposte ad una compressione monotona fino a rottura. In questo modo è stato possibile ricavare una tensione media di rottura necessaria per avere un termine di confronto per le prove da eseguire sul secondo gruppo di provini.

Le prove del secondo gruppo sono state eseguite sui provini rinforzati CI PTR 40 3-5-6 e RT PTR 40 6.

Nelle tabelle seguenti sono riportati i dati relativi al crono-programma di esecuzione delle prove delle colonnine circolari:

GRUPPO 1: UN Senza cicli			
PROV.	DATA COSTR.	DATA PROVA	STAG. [gg]
CI UN 1	16/04/2019	19/06/2019	64
CI UN 2	16/04/2019	19/06/2019	64
CI UN 3	16/04/2019	20/06/2019	65

GRUPPO 1: PTR Senza cicli			
PROV.	DATA COSTR.	DATA PROVA	STAG. [gg]
CI PTR 40 5	17/04/2019	28/06/2019	72
CI PTR 40 6	17/04/2019	01/06/2019	75
CI PTR 40 3	17/04/2019	01/06/2019	75

** i provini CI PTR 20 3, CI PTR 40 1, CI PTR 40 sono stati danneggiati e conseguentemente ritenuti inadatti alle prove.

È stata scelta per la conduzione delle prove, tra le attrezzature disponibili in laboratorio, la pressa idraulica METRO COM che garantisce il raggiungimento del massimo carico a rottura atteso in quanto consente di ottenere una forza massima di 3000 kN ed una tolleranza dello 0,1%.

Nelle campagne sperimentali precedenti [3], [4], [5] i provini prima di ogni prova erano stati sottoposti ad una precompressione pari a 10 kN. Conoscendo oltre a questo dato l'area di applicazione del carico è stato possibile calcolare il carico da applicare sulle colonne tramite un coefficiente σ :

$$A_c = \pi r^2 = 314 \text{ cm}^2$$
$$F = \sigma \cdot A_c = 5,02 \approx 5 \text{ kN}$$

In base alle prove precedentemente effettuate in altri lavori, la macchina è stata tarata per consentire un avanzamento con una velocità costante pari a 0,02 mm/s, questo valore era utile per garantire un controllo sugli spostamenti.

Questa velocità di prova applicata al nostro caso studio, come sarà poi possibile verificare nelle tabelle riassuntive del *Capitolo 4.1*, è risultata essere leggermente differente e precisamente compresa in un range di valori compreso tra 0,002-0,011 mm/s per le colonnine a base rettangolare e compreso tra 0,001-0,004 mm/s per quanto riguarda i provini a base circolare.

Dopo aver atteso i tempi necessari per la stagionatura della resina le colonne rinforzate sono state liberate dal telaio fisso tagliando le corde a filo in entrambi i lati:



Figura 3.78 Taglio delle corde e rimozione della colonna dal telaio.

Le facce di ogni campione sono state contrassegnate utilizzando le lettere A, B, C e D procedendo in senso orario in modo da facilitare il loro riconoscimento in fase di consolidamento, realizzazione delle prove e di elaborazione dei dati di prova e multimediali.

Prima di essere sottoposti a compressione, sono stati posizionati i trasduttori per il monitoraggio degli spostamenti.

Il sistema di raccolta dati è lo "SPIDER 8" collegato al computer per la registrazione dei risultati.

Lo strumento è dotato di otto canali di acquisizione. Sono stati collegati quindi 6 trasduttori ad ogni provino con la configurazione visibile in *Figura 3.79* e uno direttamente alla pressa METRO COM.

Possono essere quindi ottenuti 6 valori di spostamento [mm] e un valore di forza [kN].

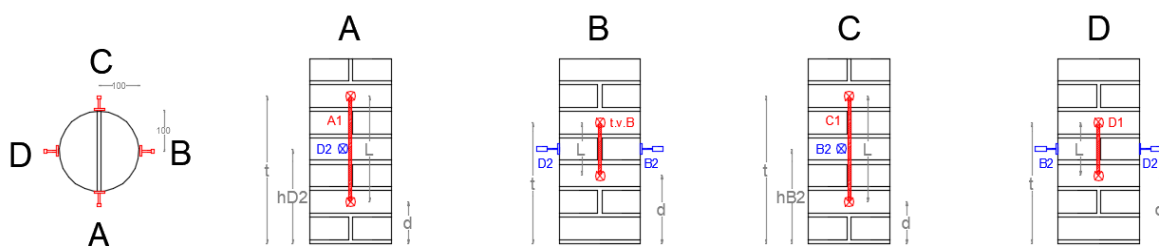


Figura 3.79 Posizionamento dei trasduttori in pianta e prospetto e dei punti di misura.

Dopo aver marcato i punti dove fissare i le piastrine d'appoggio dei trasduttori, quest'ultimi sono stati posizionati e attaccati con colla a caldo come si può vedere nelle immagini sottostanti.



Figura 3.80 Posizionamento dei trasduttori sulle colonne.

Con riferimento alla *Tabella 3.16* sono state prese tutte le distanze per ciascun trasduttore tra le due basi e tra le basi e la piastra, la colonna è pronta per essere inserita sotto la pressa idraulica per l'esecuzione della prova.

		CI UN 1	CI UN 2	CI UN 3	CI PTR 40 5	CI PTR 40 6	CI PTR 40 3
A1	t	374	375	379	365	368	375
	d	121	116	114	110	116	110
	L	255	260	265	270	248	265
B1	t	311	297	305	285	294	295
	d	174	166	170	155	163	170
	L	132	136	135	140	130	130
C1	t	373	374	376	365	367	370
	d	115	125	120	110	107	115
	L	257	255	264	255	256	255
D1	t	310	295	293	290	298	295
	d	175	165	165	160	163	165
	L	141	136	137	135	137	130
B2 tastatore sx	h	240	230	236	225	225	230
	L	-	-	-	17	18	17
D2 tastatore dx	h	237	225	230	230	232	235
	L	-	-	-	25	26	25

Tabella 3.16 Distanze dei trasduttori per le colonne CI UN e PTR.

Dopo averlo posizionato sopra la piastra della pressa idraulica, il provino è stato centrato per permettere un'applicazione assiale del carico. Per ottenere inoltre una superficie sommitale uniforme e regolare è stata applicata una cappa di gesso con sopra un foglio di nylon per evitare l'aderenza tra gesso e pressa.



Figura 3.81 Centramento della colonna sotto la macchina di prova.



Figura 3.82 Realizzazione della cappa di gesso, posizionamento di un foglio di nylon, colonnina pronta per la prova.

Per avere pieno controllo dell'andamento della prova sono state posizionate due camere per le riprese, una frontalmente alla macchina di prova e l'altra diagonalmente in modo da riuscire a riprendere due facce del provino.

4 RISULTATI DELLE PROVE A COMPRESSIONE

In questo capitolo vengono riportati i risultati delle prove sulle colonne UN PTR 20 e PTR 40 oggetto di questa tesi di laurea.

Nel caso delle colonne a base circolare i grafici forza spostamento sono relativi a quattro trasduttori verticali (A1, B1, C1, D1) e a due tastatori (B2,D2) posti perpendicolarmente alla colonnina, fissati alla pressa METRO COM.

Viene per ogni provino riportata la documentazione fotografica durante lo svolgimento delle prove e la restituzione grafica del quadro fessurativo di cui è di seguito riportata la legenda:

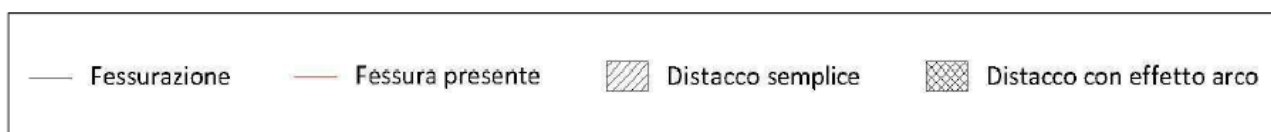


Figura 4.1 Legenda del quadro fessurativo.

4.1 COLONNE NON RINFORZATE (UN)

CI UN 1

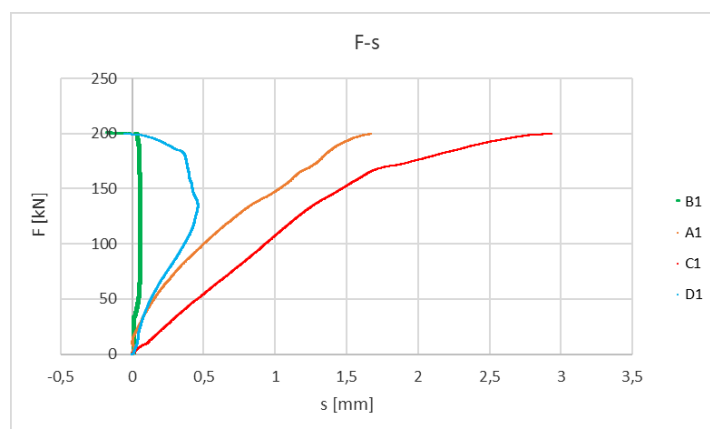


Grafico 4.1 Forza-spostamento della colonna CI UN 1 relativo ai trasduttori verticali (A1,B1,C1,D1).

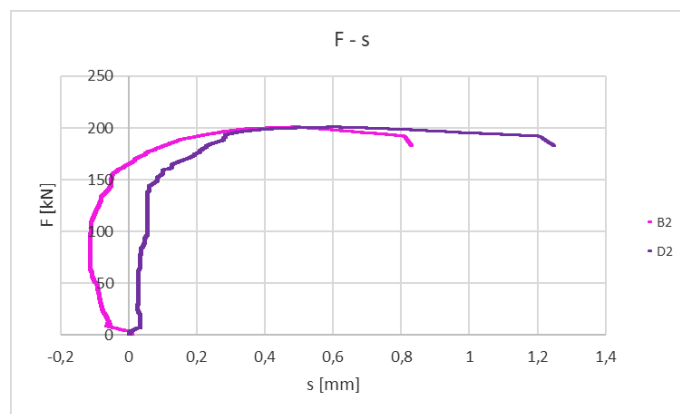


Grafico 4.2 Forza-spostamento della colonna CI UN 1 relativo ai tastatori orizzontali (B2,D2).

Data di costruzione	16/04/2019
Data di rinforzo	-
Data di prova	19/06/2019
Stagionatura	64 gg
Tempo totale di prova	15'7''
Carico di prima fessurazione	150 kN
Carico massima raggiunta	200,44 kN
Tensione di prima fessurazione	2,10 MPa
Tensione di rottura	4,77 MPa
Spostamento verticale con carico max sul lato A (A1)	1,66 mm
Spostamento verticale con carico max sul lato B (B1)	-0,19 mm
Spostamento verticale con carico max sul lato C (C1)	2,93 mm
Spostamento verticale con carico max sul lato D (D1)	-0,05 mm
Spostamento orizzontale con carico max sul lato B (B2)	0,47 mm
Spostamento orizzontale con carico max sul lato C (C2)	0,58 mm
Velocità media di prova [kN/s]	0,23 kN/s
Velocità media di prova [mm/s]	0,002 mm/s

Tabella 4.1 Riepilogo della prova della colonna CI UN 1.

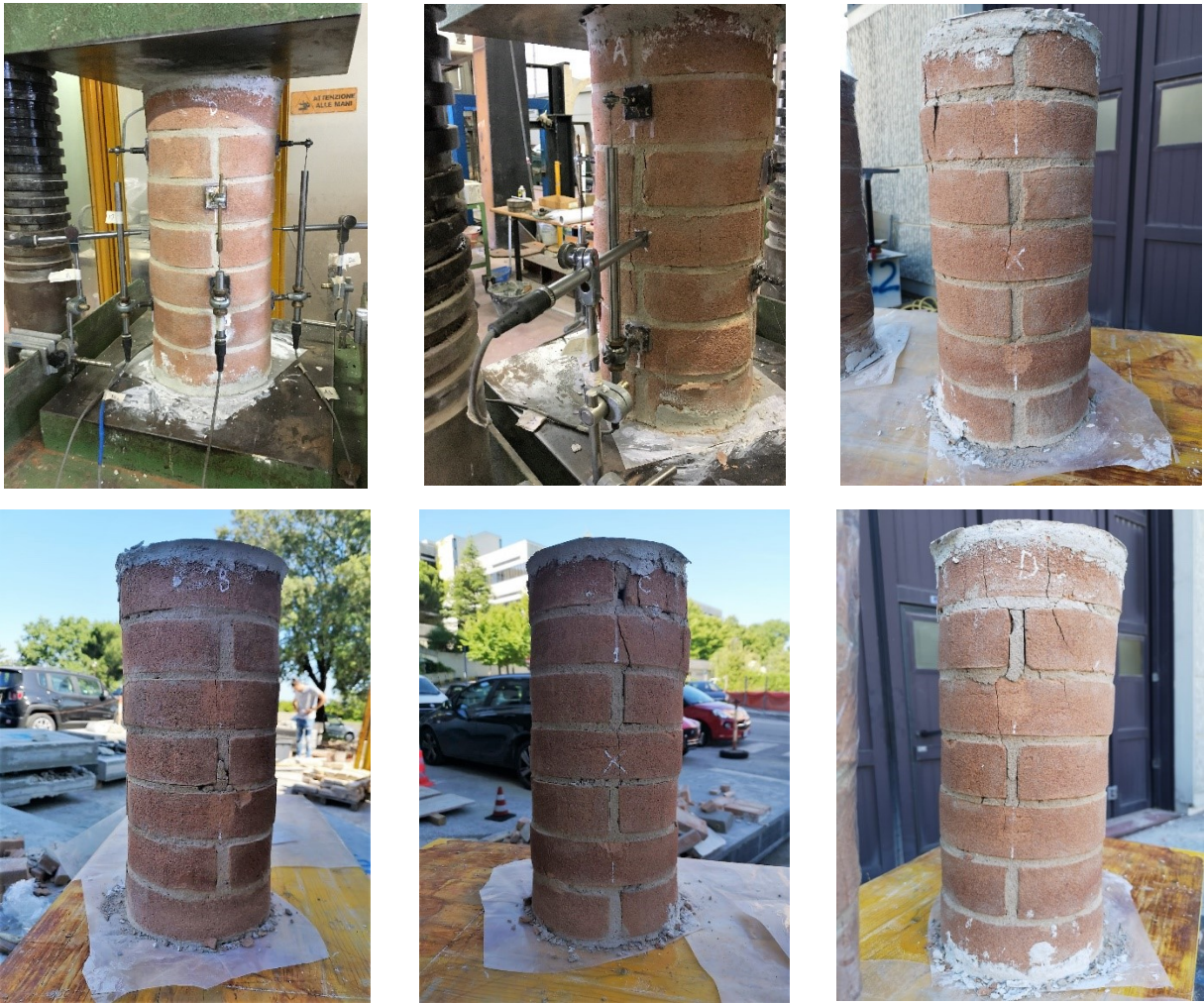


Figura 4.2 Rilievo fotografico della colonna CI UN 1.

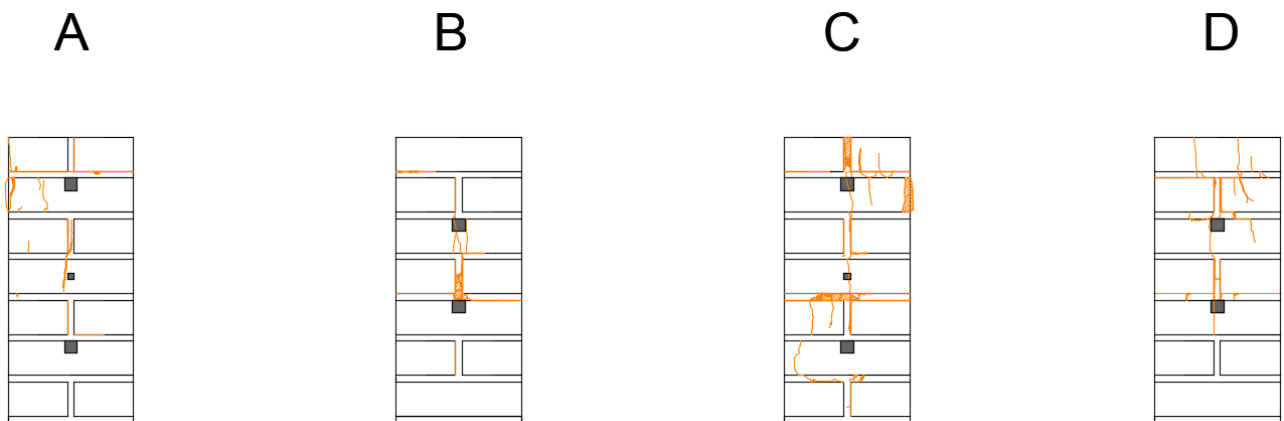


Figura 4.3 Rilievo del quadro fessurativo della colonna CI UN 1.

CI UN 2

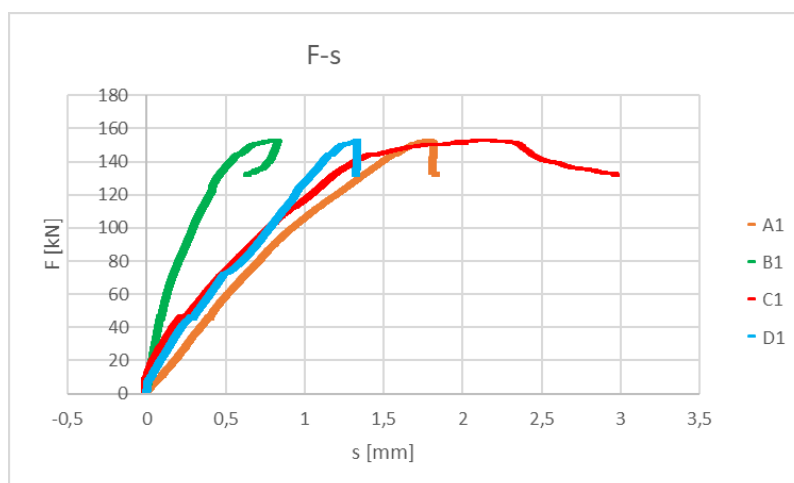


Grafico 4.3 Forza-spostamento della colonna CI UN 2 relativo ai trasduttori verticali (A1,B1,C1,D1).

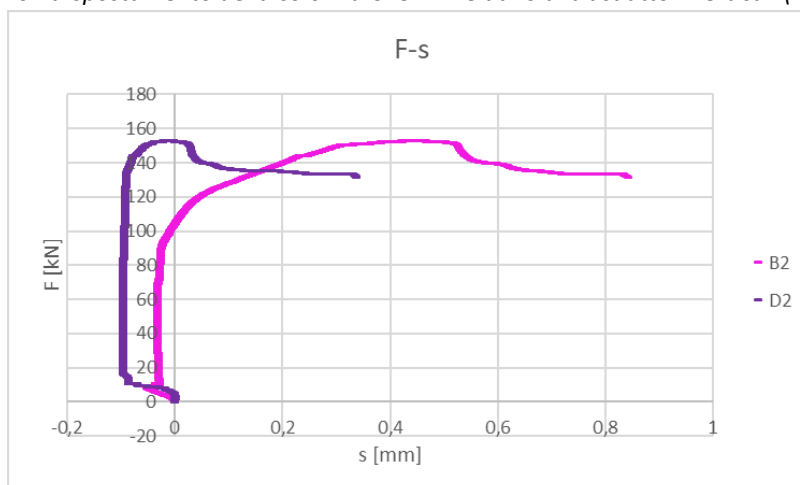


Grafico 4.4 Forza-spostamento della colonna CI UN 2 relativo ai tastatori orizzontali (B2,D2).

Data di costruzione	16/04/2019
Data di rinforzo	-
Data di prova	19/06/2019
Stagionatura	64 gg
Tempo totale di prova	15'9''
Carico di prima fessurazione	110 kN
Carico massima raggiunta	152,61 kN
Tensione di prima fessurazione	3,34 MPa
Tensione di rottura	4,63 MPa
Spostamento verticale con carico max sul lato A (A1)	1,79 mm
Spostamento verticale con carico max sul lato B (B1)	0,82 mm
Spostamento verticale con carico max sul lato C (C1)	2,15 mm
Spostamento verticale con carico max sul lato D (D1)	1,33 mm
Spostamento orizzontale con carico max sul lato B (B2)	0,45 mm
Spostamento orizzontale con carico max sul lato C (C2)	0,0075 mm
Velocità media di prova [kN/s]	0,17 kN/s
Velocità media di prova [mm/s]	0,002 mm/s

Tabella 4.2 Riepilogo della prova della colonna CI UN 2.



Figura 4.4 Rilievo fotografico della colonna CI UN 2.

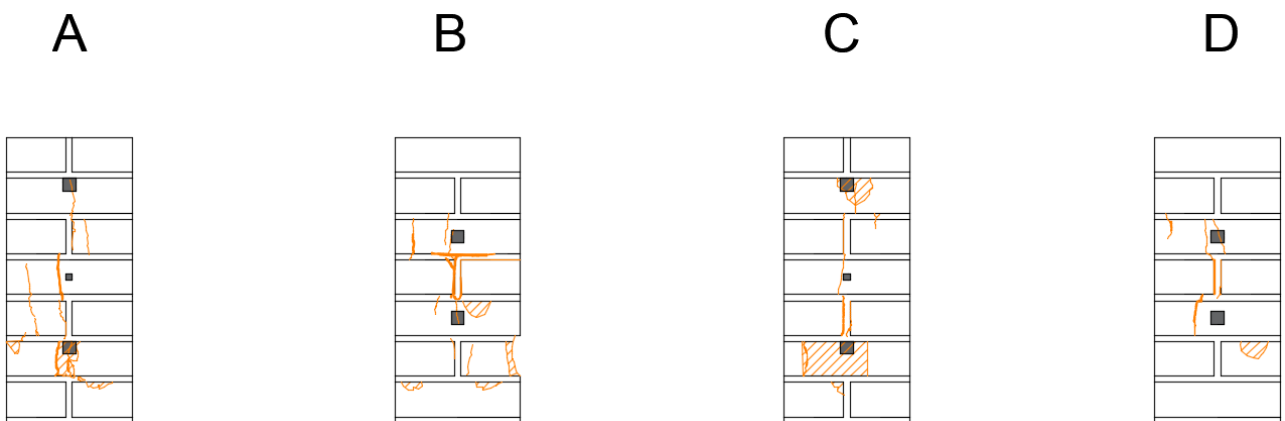


Figura 4.5 Rilievo del quadro fessurativo della colonna CI UN 2

CI UN 3

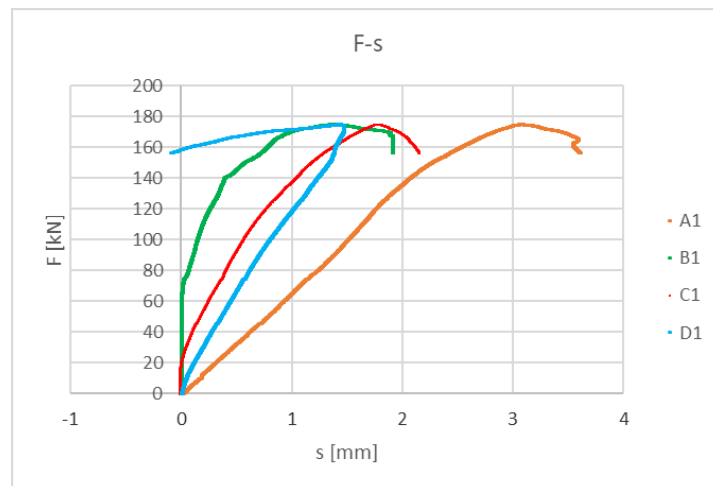


Grafico 4.5 Forza-spostamento della colonna CI UN 3 relativo ai trasduttori verticali (A1,B1,C1,D1).

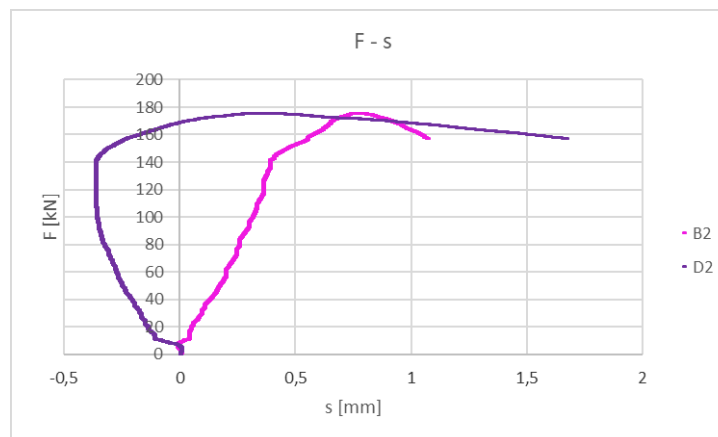


Grafico 4.6 Forza-spostamento della colonna CI UN 1 relativo ai tastatori orizzontali (B2,D2).

Data di costruzione	16/04/2019
Data di rinforzo	-
Data di prova	20/06/2019
Stagionatura	65 gg
Tempo totale di prova	12'2''
Carico di prima fessurazione	9,90 kN
Carico massima raggiunta	175,37 kN
Tensione di prima fessurazione	0,30 MPa
Tensione di rottura	5,29 MPa
Spostamento verticale con carico max sul lato A (A1)	3,06 mm
Spostamento verticale con carico max sul lato B (B1)	1,35 mm
Spostamento verticale con carico max sul lato C (C1)	1,77 mm
Spostamento verticale con carico max sul lato D (D1)	1,43 mm
Spostamento orizzontale con carico max sul lato B (B2)	0,76 mm
Spostamento orizzontale con carico max sul lato C (C2)	0,33 mm
Velocità media di prova [kN/s]	0,26 kN/s
Velocità media di prova [mm/s]	0,004 mm/s

Tabella 4.3 Riepilogo della prova della colonna CI UN 3.



Figura 4.6 Rilievo fotografico della colonna CI UN 3.

A

B

C

D

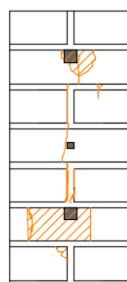
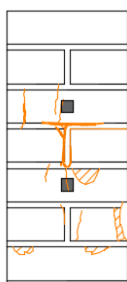
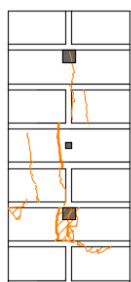


Figura 4.7 Rilievo del quadro fessurativo della colonna CI UN 2

4.2 COLONNE RINFORZATE CON CORDE PRETESE (PTR 40)

CI PTR 40 3

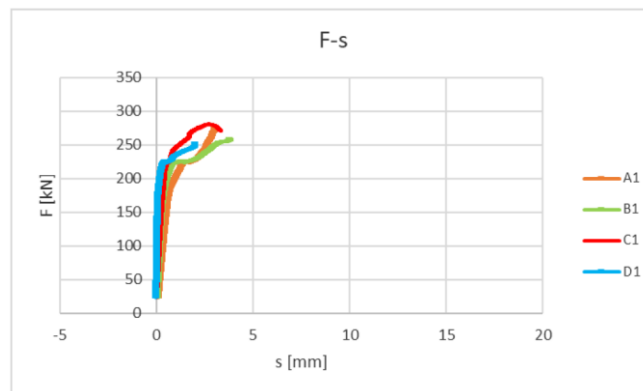


Grafico 4.7 Forza-spostamento della colonna CI PTR 40 3 relativo ai trasduttori verticali (A1,B1,C1,D1).

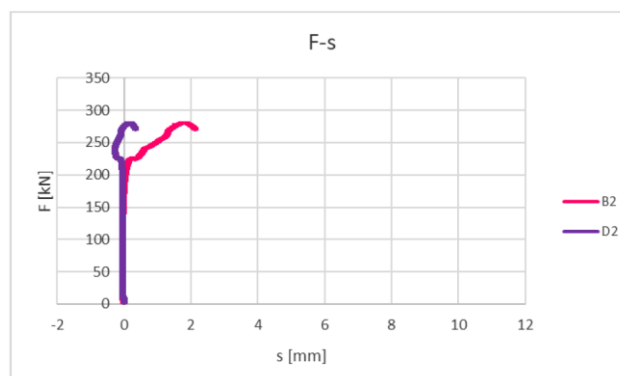


Grafico 4.8 Forza-spostamento della colonna CI PTR 40 3 relativo ai tastatori orizzontali (B2,D2).

Data di costruzione	17/04/2019
Data di rinforzo	21/06/2019
Data di prova	01/07/2019
Stagionatura	75 gg
Tempo totale di prova	98'9"
Carico di prima fessurazione	220 kN
Carico massima raggiunta	280,67 kN
Tensione di prima fessurazione	7 MPa
Tensione di rottura	8,93 MPa
Spostamento verticale con carico max sul lato A (A1)	2,89 mm
Spostamento verticale con carico max sul lato B (B1)	3,77 mm
Spostamento verticale con carico max sul lato C (C1)	2,67 mm
Spostamento verticale con carico max sul lato D (D1)	1,98 mm
Spostamento orizzontale con carico max sul lato B (B2)	1,74 mm
Spostamento orizzontale con carico max sul lato C (C2)	0,14 mm
Velocità media di prova [kN/s]	1,56 kN/s
Velocità media di prova [mm/s]	0.001 mm/s

Tabella 4.4 Riepilogo della prova della colonna CI PTR 40 3.



Figura 4.8 Rilievo fotografico della colonna CI PTR 40 3.

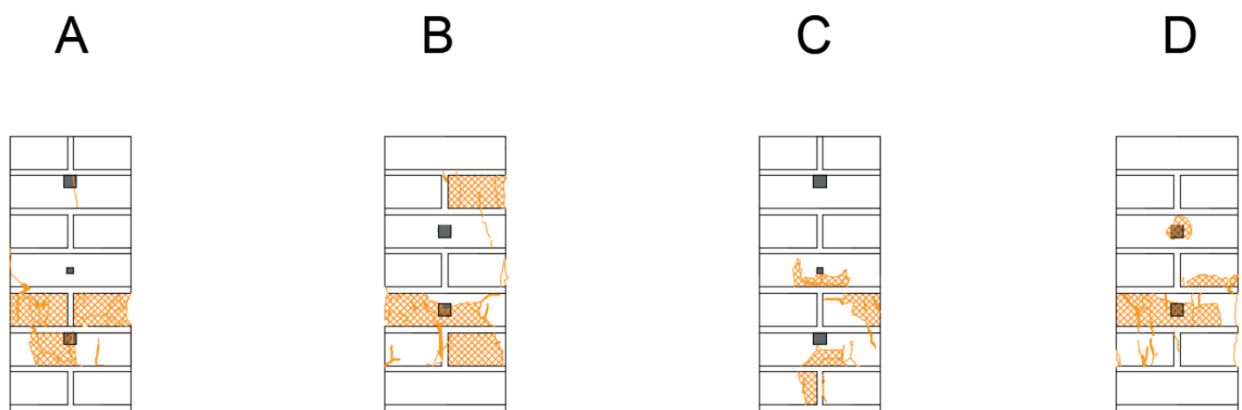


Figura 4.9 Rilievo del quadro fessurativo della colonna CI PTR 40 3.

CI PTR 40 5

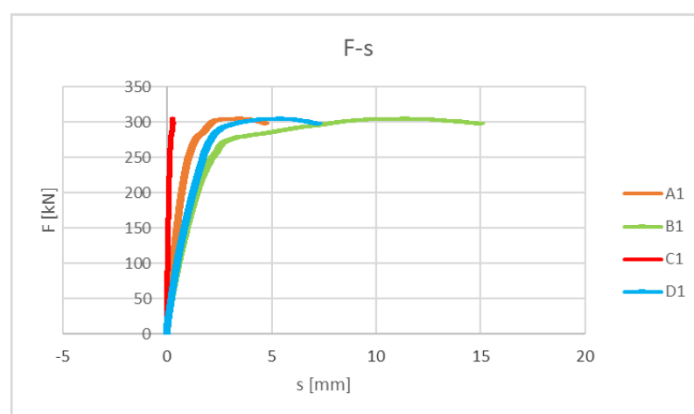


Grafico 4.10 Forza-spostamento della colonna CI PTR 40 5 relativo ai trasduttori verticali (A1,B1,C1,D1).

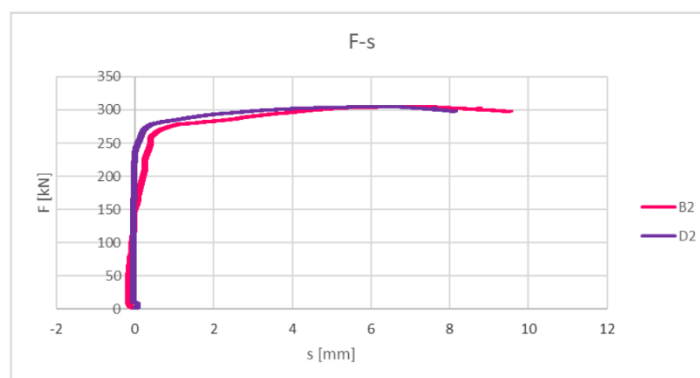


Grafico 4.11 Forza-spostamento della colonna CI PTR 40 5 relativo ai tastatori orizzontali (B2,D2).

Data di costruzione	17/04/2019
Data di rinforzo	21/06/2019
Data di prova	28/06/2019
Stagionatura	72 gg
Tempo totale di prova	46'
Carico di prima fessurazione	282 kN
Carico massima raggiunta	304.97 kN
Tensione di prima fessurazione	8,98 MPa
Tensione di rottura	9,71 MPa
Spostamento verticale con carico max sul lato A (A1)	3,47 mm
Spostamento verticale con carico max sul lato B (B1)	3,77 mm
Spostamento verticale con carico max sul lato C (C1)	11,41 mm
Spostamento verticale con carico max sul lato D (D1)	0,27 mm
Spostamento orizzontale con carico max sul lato B (B2)	5,44 mm
Spostamento orizzontale con carico max sul lato C (C2)	6,85 mm
Velocità media di prova [kN/s]	0,12 kN/s
Velocità media di prova [mm/s]	0.003 mm/s

Tabella 4.5 Riepilogo della prova della colonna CI PTR 40 5.



Figura 4.10 Rilievo fotografico della colonna CI PTR 40 5.

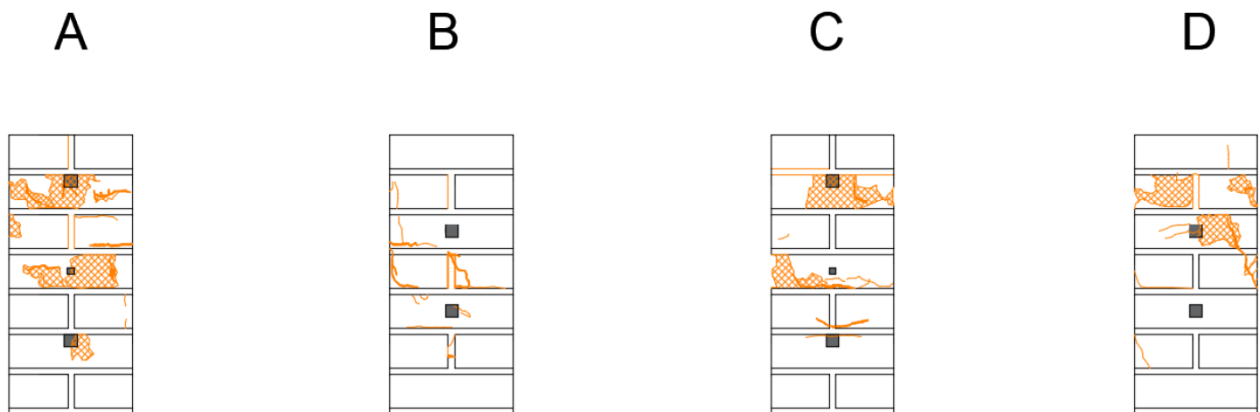


Figura 4.11 Rilievo del quadro fessurativo della colonna CI PTR 40 5.

CI PTR 40 6

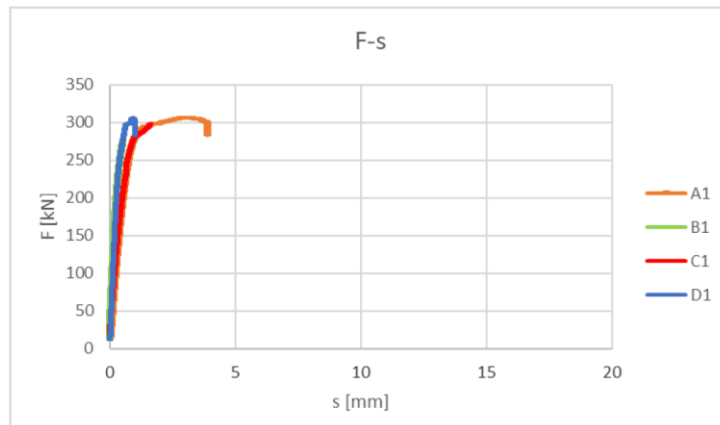


Grafico 4.12 Forza-spostamento della colonna CI PTR 40 6 relativo ai trasduttori verticali (A1,B1,C1,D1).

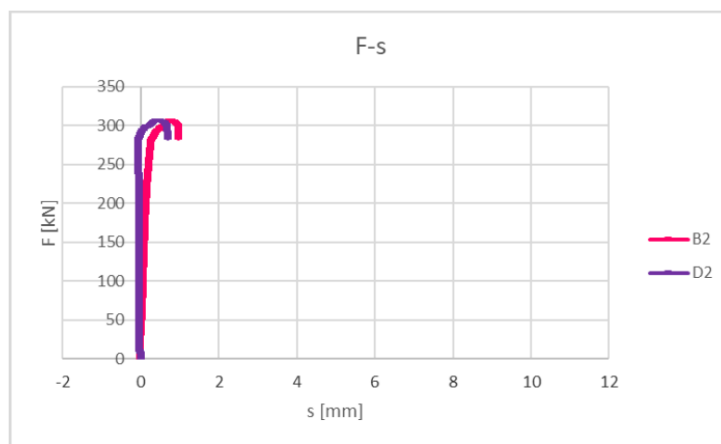


Grafico 4.13 Forza-spostamento della colonna CI PTR 40 6 relativo ai tastatori orizzontali (B2,D2).

Data di costruzione	17/04/2019
Data di rinforzo	21/06/2019
Data di prova	01/07/2019
Stagionatura	75 gg
Tempo totale di prova	31'1"
Carico di prima fessurazione	242 kN
Carico massima raggiunta	306,25 kN
Tensione di prima fessurazione	7,7 MPa
Tensione di rottura	9,75 MPa
Spostamento verticale con carico max sul lato A (A1)	3,01 mm
Spostamento verticale con carico max sul lato B (B1)	0,44 mm
Spostamento verticale con carico max sul lato C (C1)	0,40 mm
Spostamento verticale con carico max sul lato D (D1)	0,91 mm
Spostamento orizzontale con carico max sul lato B (B2)	0,75 mm
Spostamento orizzontale con carico max sul lato C (C2)	0,43 mm
Velocità media di prova [kN/s]	0,26 kN/s
Velocità media di prova [mm/s]	0.001 mm/s

Tabella 4.6 Riepilogo della prova della colonna CI PTR 40 6.



Figura 4.12 Rilievo fotografico della colonna CI PTR 40 6.

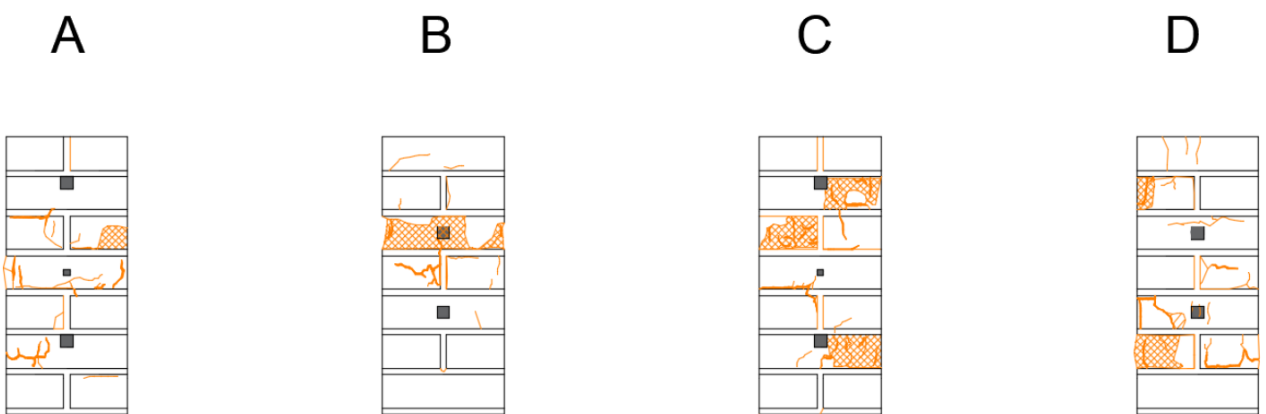


Figura 4.13 Rilievo del quadro fessurativo della colonna CI PTR 40 6.

5 ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI

5.1 PRIMA VALUTAZIONE

In concomitanza con le prove a rottura dei provini sono state fatte delle prime analisi, per ogni colonna, in modo da comprendere come queste effettivamente reagissero sotto la pressa in termini di Tensione-Deformazione (σ - ϵ). La tensione è stata ottenuta come rapporto tra il carico e l'area reale e la deformazione come la distanza misurata da ogni trasduttore diviso la sua lunghezza L.

Nel caso specifico delle colonne circolari, per motivi legati alla geometria, al posto dei trasduttori orizzontali sono stati impiegati i tastatori, motivo per cui il valore di ϵ è stato ottenuto dividendo la sommatoria degli spostamenti registrati per il diametro reale che idealmente li congiunge.

Una volta raccolte le acquisizioni si è provveduto ad eliminare i dati non significativi causati da una deviazione di lettura.

Gli spostamenti di ciascun trasduttore al di sotto della seconda cifra decimale sono stati annullati in quanto dovuti ad errori strumentali.

Inoltre, altro aspetto cui è stata posta attenzione in alcuni grafici ha riguardato un'inversione della tendenza di avanzamento. Per ovviare a ciò è stato eseguito un taglio (*Figura 5.1*) di tutti i valori comprendenti l'inversione. Questo comportamento è dovuto alla creazione di fessure al di sotto della base di attacco del trasduttore che di conseguenza ne hanno generato il totale distacco dalla colonna, dando luogo a risultati di lettura non attendibili.

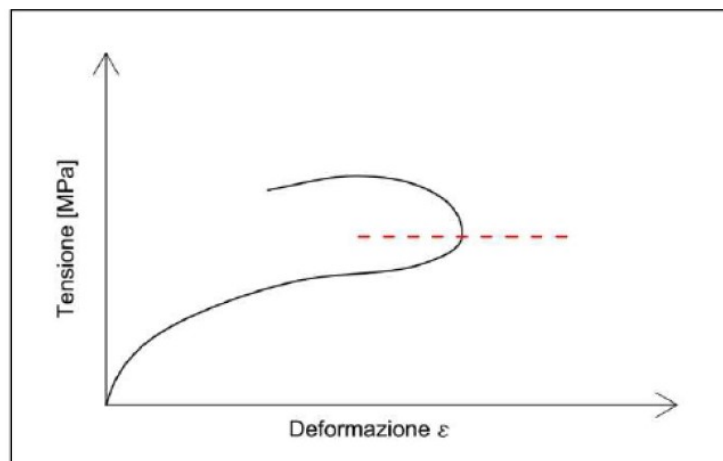


Figura 5.1 Taglio dei trasduttori nei punti di cambio di andamento.

Questo comportamento deriva dall'incurvamento del trasduttore, dovuto alla sfogliatura del mattone, che a parità di abbassamento, rileva spostamenti maggiori o minori a seconda dei casi.

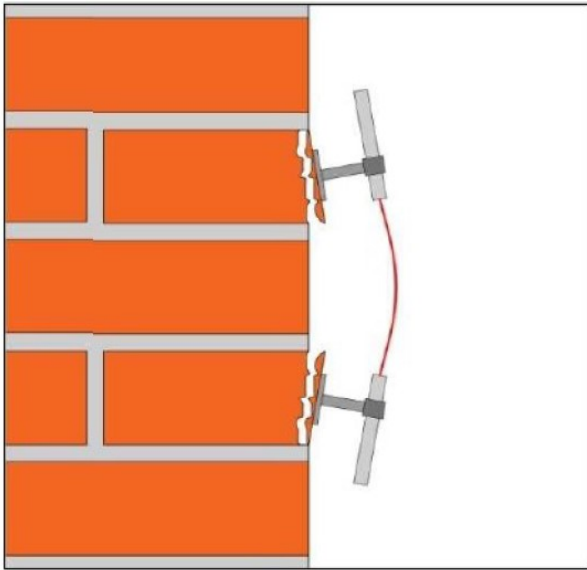


Figura 5.2 Inarcamento del trasduttore dovuto alla sfogliatura del mattone.

Alcuni grafici presentano tratti ad andamento verticale, che indica un materiale infinitamente rigido, o viceversa tratti ad andamento orizzontale.

Questi comportamenti non sono fisicamente possibili e sono un chiaro segno che si è raggiunta la rottura del provino, perciò ogni trasduttore è stato interrotto all'inizio di questi comportamenti se presenti.

5.1.1 COLONNE NON RINFORZATE (UN)

CI UN 1

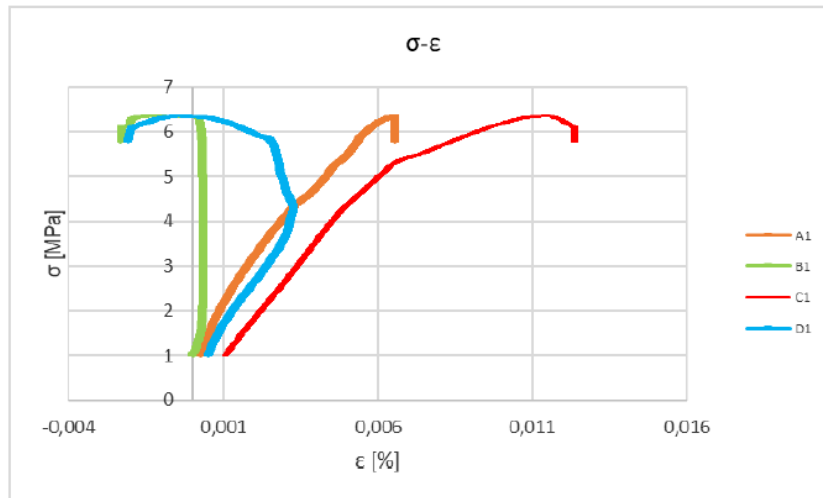


Grafico 5-1 Tensione-Deformazione della colonna CI UN 1 relativo ai trasduttori verticali (A1, B1, C1, D1).

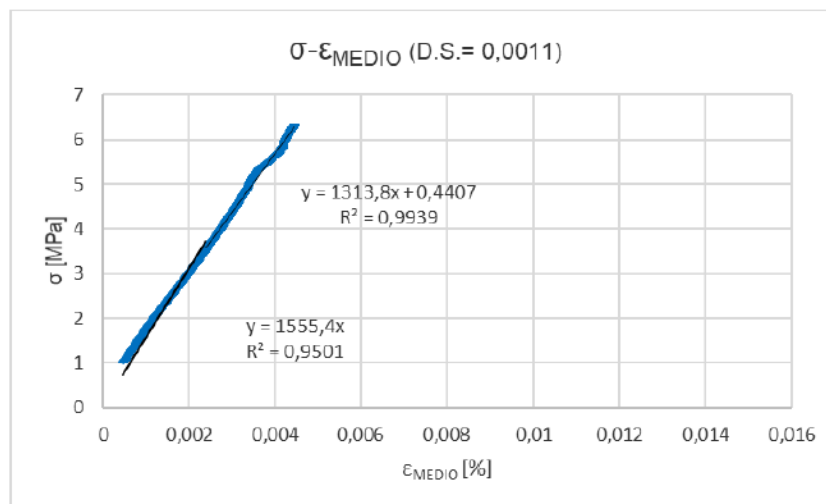


Grafico 5-2 Tensione-Deformazione MEDIA della colonna CI UN 1 relativo ai trasduttori verticali (A1, B1, C1, D1).

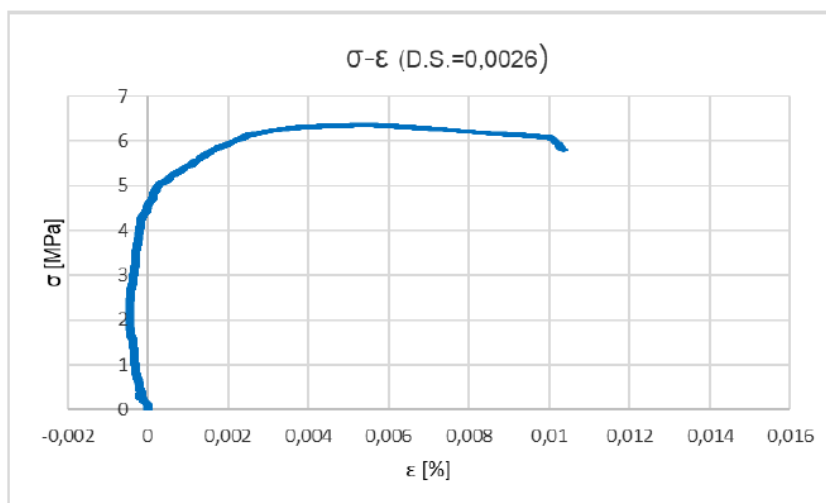


Grafico 5-3 Tensione-Deformazione della colonna CI UN 1 relativo ai tastatori orizzontali (B2, D2).

CI UN 2

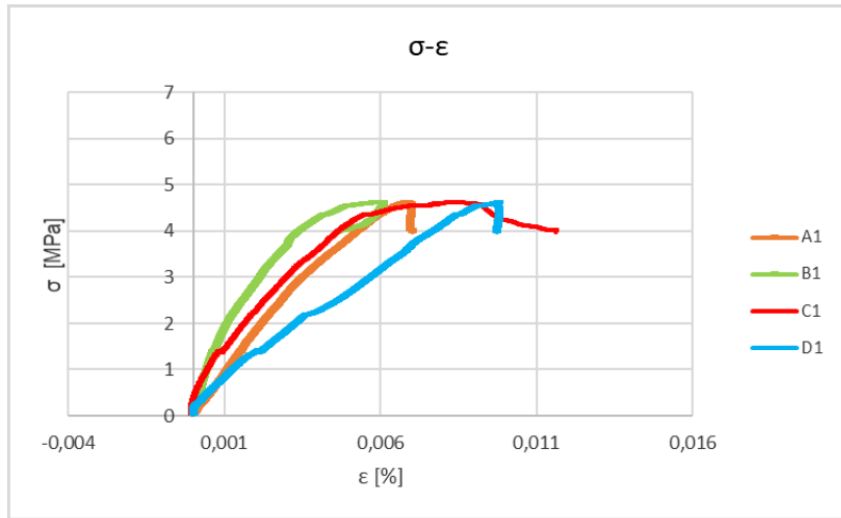


Grafico 5.4 Tensione-Deformazione della colonna CI UN 2 relativo ai trasduttori verticali (A1, B1, C1, D1).

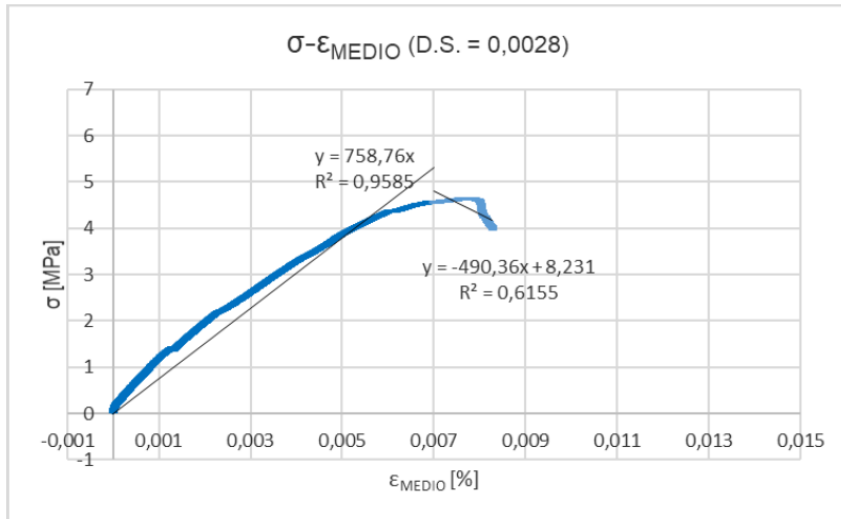


Grafico 5.5 Tensione-Deformazione MEDIA della colonna CI UN 2 relativo ai trasduttori verticali (A1, B1, C1, D1).

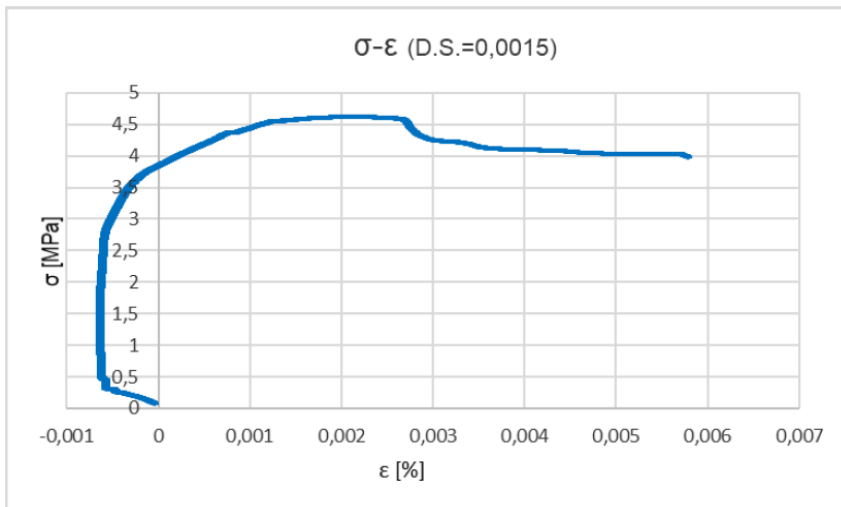


Grafico 5.6 Tensione-Deformazione della colonna CI UN 2 relativo ai tastatori orizzontali (B2, D2).

CI UN 3

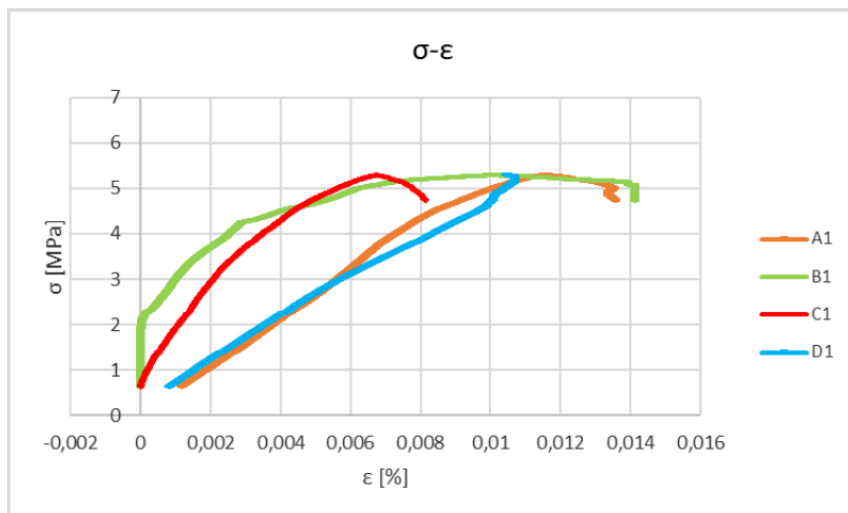


Grafico 5.7 Tensione-Deformazione della colonna CI UN 3 relativo ai trasduttori verticali (A1, B1, C1, D1).

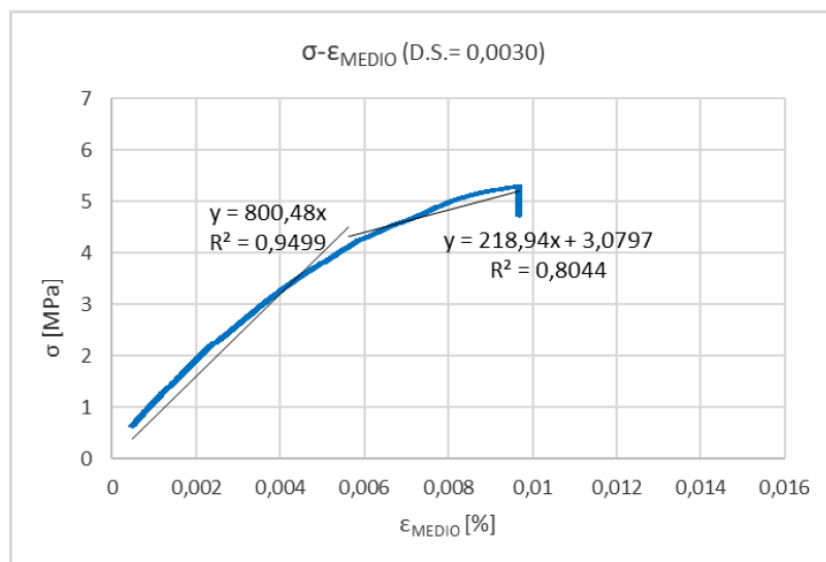


Grafico 5.8 Tensione-Deformazione MEDIA della colonna CI UN 3 relativo ai trasduttori verticali (A1, B1, C1, D1).

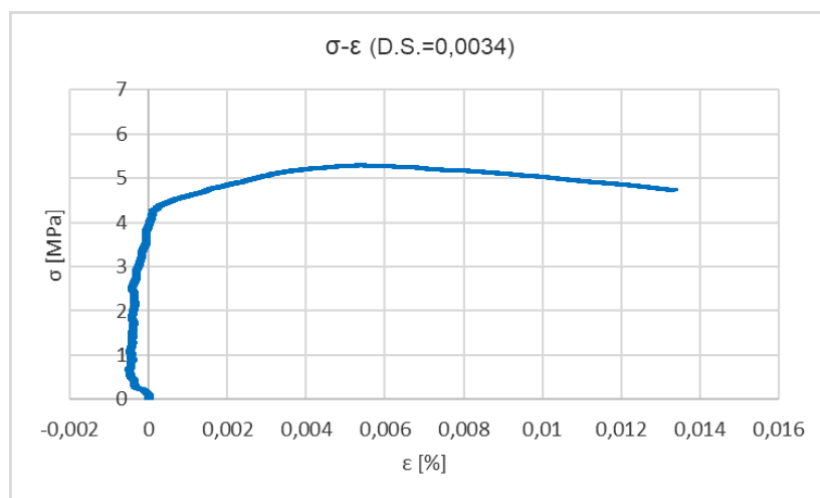


Grafico 5.9 Tensione-Deformazione della colonna CI UN 3 relativo ai tastatori orizzontali (B2, D2).

RIEPILOGO DELLE COLONNE NON RINFORZATE (PTR)

Nelle tabelle di seguito (*Tabella 5.1; Tabella 5.2*) vengono riportate le principali caratteristiche dei provini non rinforzati.

Colonna	σ , max [MPa]	ϵ , max [MPa]	E_{0-30} [MPa]	E_{30-60} [MPa]
CI UN 1	6,38	0,00445	1401,00	1264,00
CI UN 2	4,86	0,00828	1047,10	700,46
CI UN 3	5,58	0,00969	849,10	684,81

Tabella 5.1 Resistenza a compressione e moduli elastici delle colonne a base circolare.

σ , med [MPa]	ϵ , med [MPa]	E_{0-30} , med [MPa]	E_{30-60} , med [MPa]
5,61	0,01	1099,07	883,09

Tabella 5.2 Caratteristiche meccaniche medie delle colonne UN a base circolare.

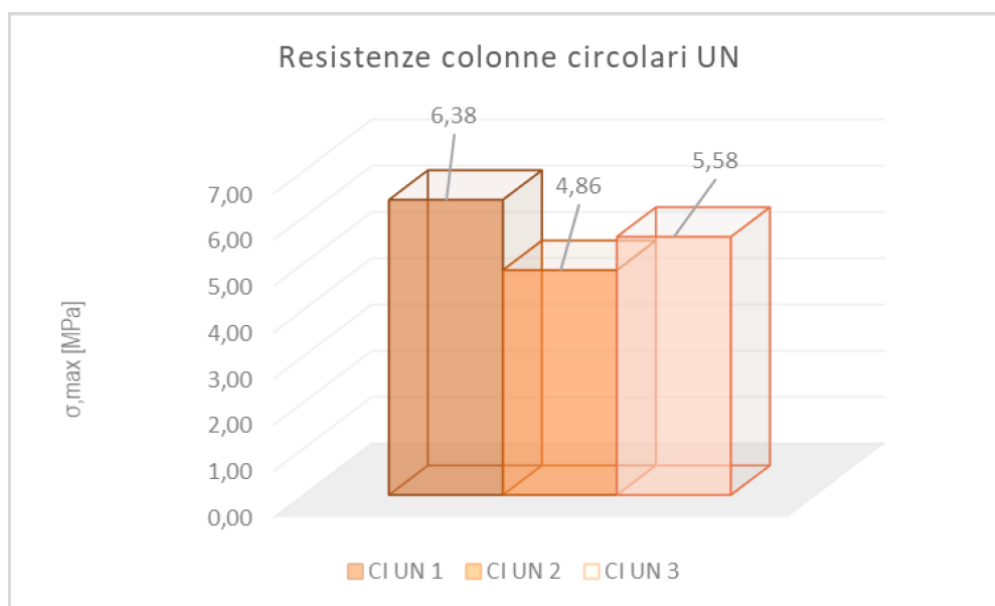


Grafico 5-10 Andamento delle resistenze massime raggiunte delle colonne circolari UN.

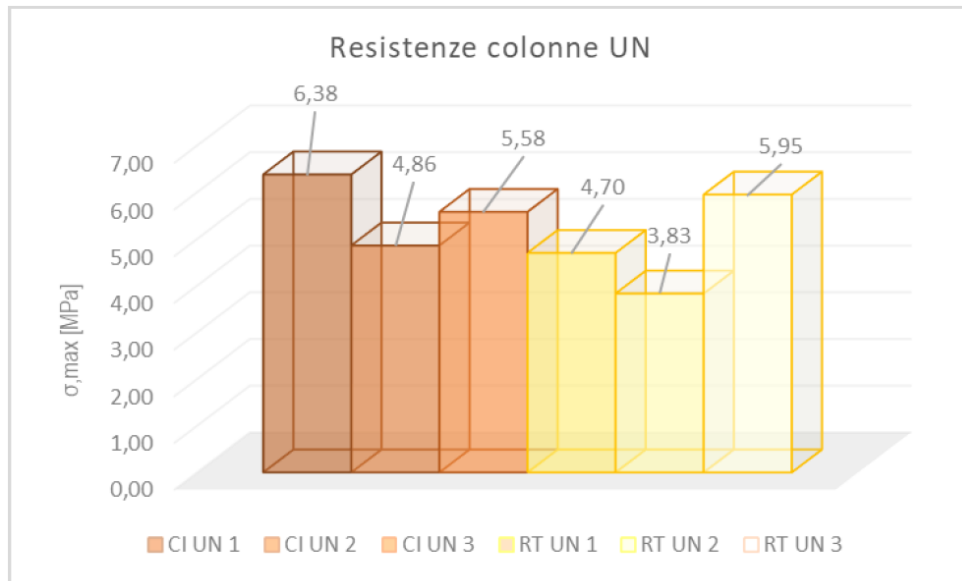


Grafico 5.11 Andamento delle resistenze massime raggiunte delle colonne circolari UN rispetto le rettangolari UN.

5.1.2 COLONNE RINFORZATE (UN)

CI PTR 40 3

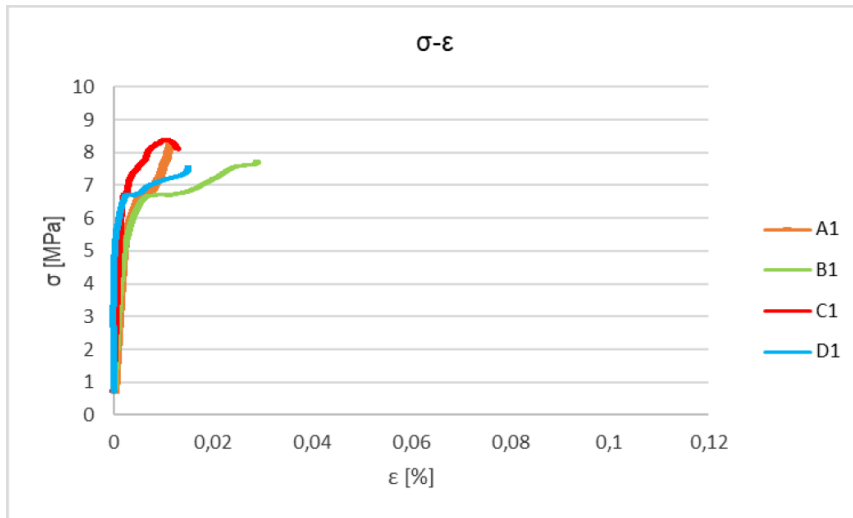


Grafico 5.12 Tensione-Deformazione della colonna CI PTR 40 3 relativo ai trasduttori verticali (A1, B1, C1, D1).

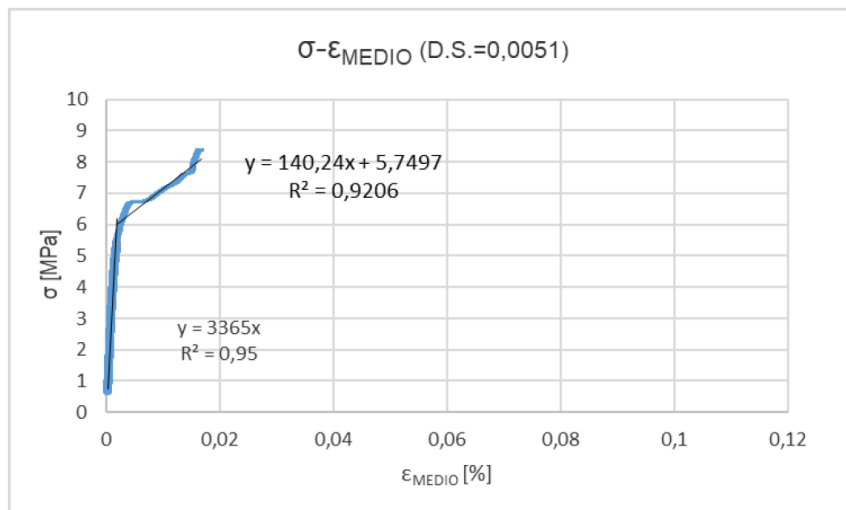


Grafico 5.13 Tensione-Deformazione MEDIA della colonna CI PTR 40 3 relativo ai trasduttori verticali (A1, B1, C1, D1).

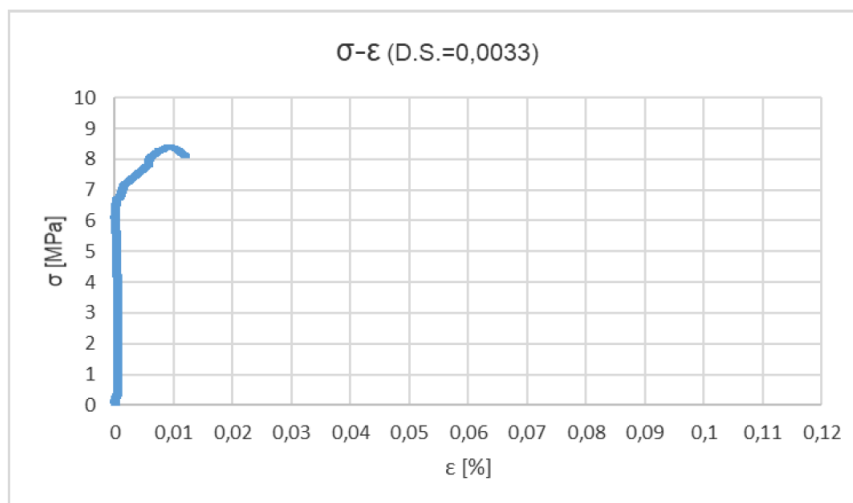


Grafico 5.14 Tensione-Deformazione della colonna CI PTR 40 3 relativo ai tastatori orizzontali (B2, D2).

CI PTR 40 5

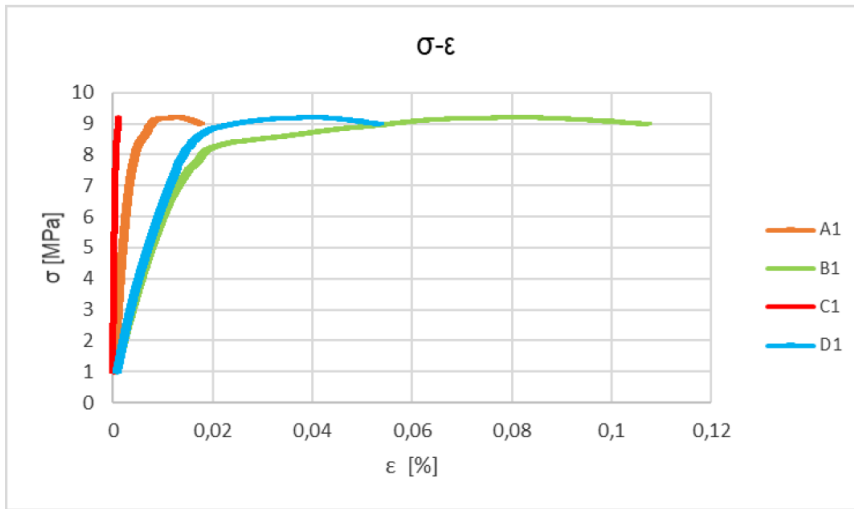


Grafico 5.15 Tensione-Deformazione della colonna CI PTR 40 5 relativo ai trasduttori verticali (A1, B1, C1, D1).

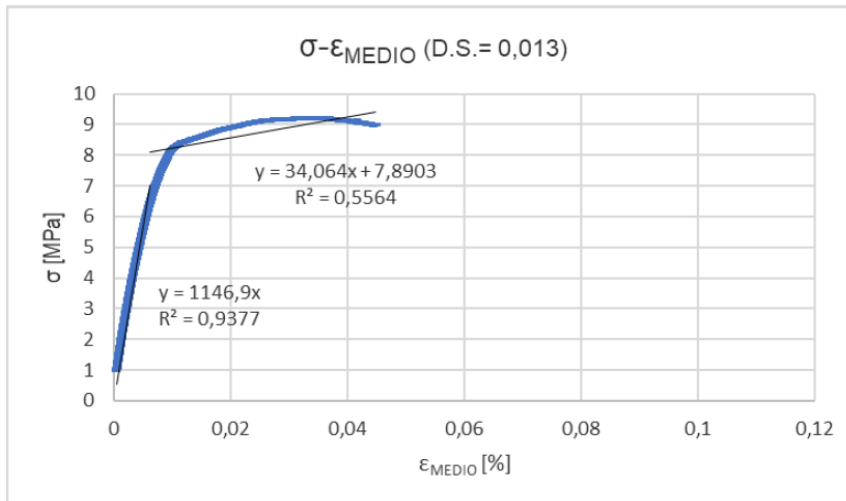


Grafico 5.16 Tensione-Deformazione MEDIA della colonna CI PTR 40 5 relativo ai trasduttori verticali (A1, B1, C1, D1).

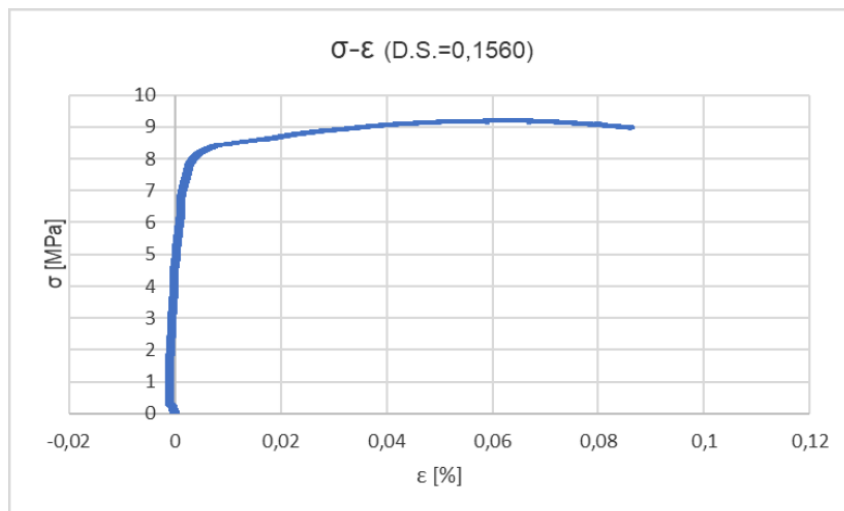


Grafico 5.17 Tensione-Deformazione della colonna CI PTR 40 5 relativo ai tastatori orizzontali (B2, D2).

CI PTR 40 6

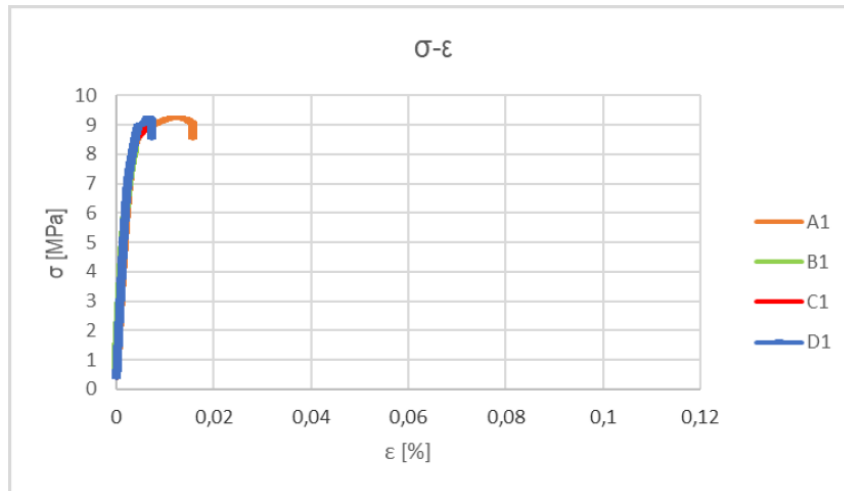


Grafico 5.18 Tensione-Deformazione della colonna CI PTR 40 6 relativo ai trasduttori verticali (A1, B1, C1, D1).

Per quanto riguarda i trasduttori verticali B1 e C1 il grafico è stato tagliato in corrispondenza dell'applicazione del carico pari rispettivamente a 272 kN e 298 kN, valori di forza che hanno causato una grave lesione del provino in corrispondenza del punto di aderenza con il trasduttore e non ha potuto registrare correttamente i dati successivi.



Figura 5.3 Lesione in corrispondenza di B1.



Figura 5.4 Lesione in corrispondenza di C1.

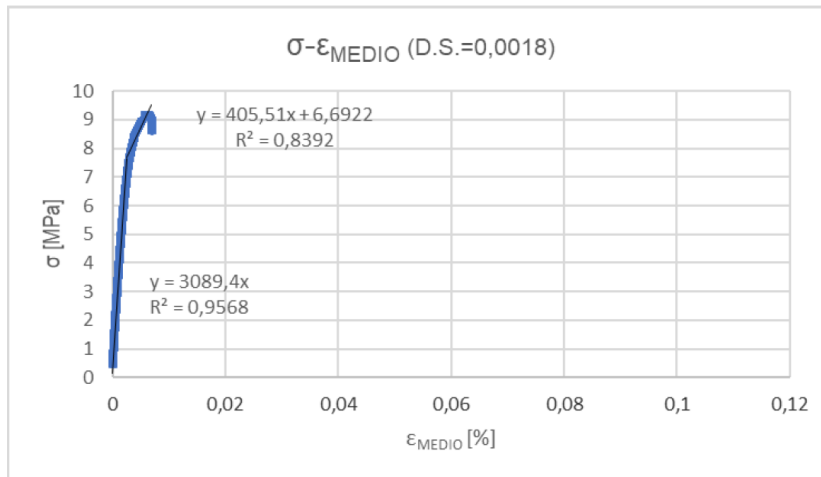


Grafico 5.19 Tensione-Deformazione MEDIA della colonna CI PTR 40 6 relativo ai trasduttori verticali (A1, B1, C1, D1).

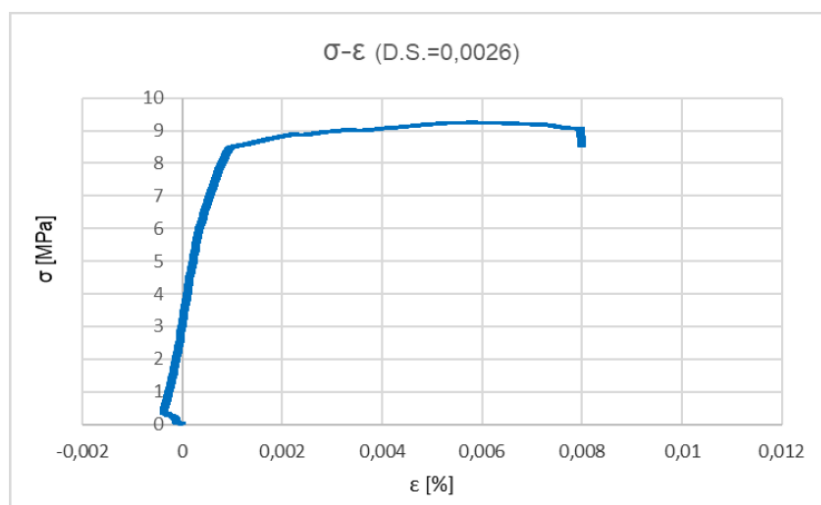


Grafico 5.20 Tensione-Deformazione della colonna CI PTR 40 6 relativo ai tastatori orizzontali (B2, D2).

RIEPILOGO DELLE COLONNE RINFORZATE (PTR)

Nelle tabelle di seguito (Tabella 5.3; Tabella 5.4) vengono riportate le principali caratteristiche dei provini non rinforzati.

Colonna	σ , max [MPa]	ϵ , max [MPa]	E_{0-30} [MPa]	E_{30-60} [MPa]
CI PTR 40 3	8,93	0,01673	4191,80	2753,80
CI PTR 40 5	9,71	0,04487	1201,60	916,77
CI PTR 40 6	9,75	0,00692	3493,90	2663,00

Tabella 5.3 Resistenza a compressione e moduli elastici delle colonne a base circolare.

σ , med [MPa]	ϵ , med [MPa]	E_{0-30} , med [MPa]	E_{30-60} , med [MPa]
9,46	0,02	2962,43	2111,19

Tabella 5.4 Caratteristiche meccaniche medie delle colonne RT PTR 40 a base circolare.

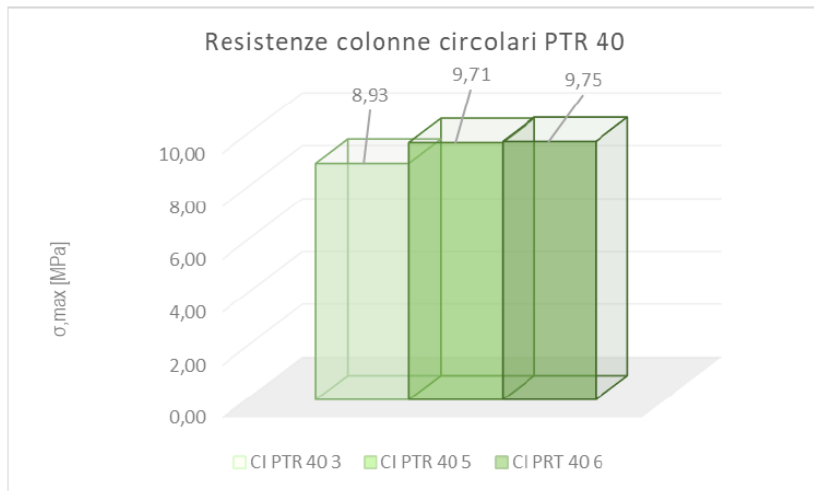


Grafico 5.21 Andamento delle resistenze massime raggiunte delle colonne CI PTR 40.

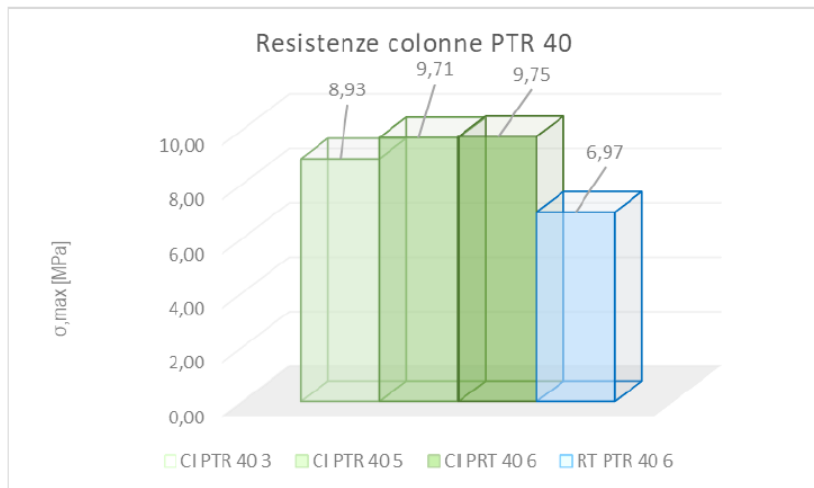


Grafico 5.22 Andamento delle resistenze massime raggiunte delle colonne PTR 40 rispetto la rettangolare PTR 40.

5.2 ANALISI DELLE MODALITÀ DI ROTTURA

Una volta concluse le prove a compressione è stato possibile procedere con l'analisi della parte interna di ogni provino andando a sezionare orizzontalmente le colonne.

Per i provini UN è stato sempre seguito lo stesso iter partendo dal penultimo giunto superiore (giunto 5) e procedendo fino a quelli in mezzera.

Nel caso dei provini rinforzati l'analisi ha riguardato nei casi in cui le lesioni erano significative anche i giunti sottostanti la mezzera.

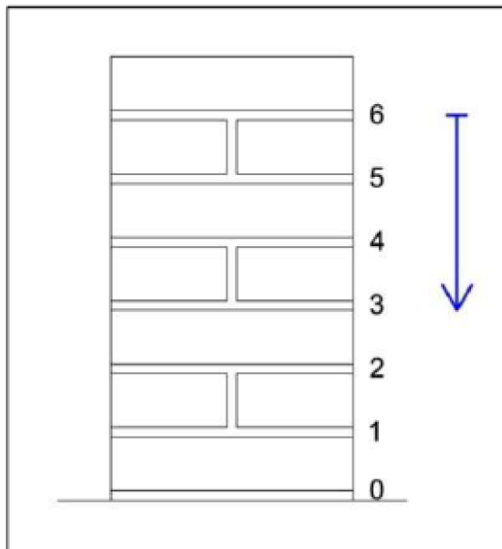


Figura 5.5 Sequenza di analisi.



Figura 5.6 Fasi di sezionamento.

Questa operazione permette di investigare e capire le modalità di rottura e di ricreare, dove possibile la successione del danneggiamento che ha portato alla rottura del provino.

Di seguito è riportato il rilievo fotografico ottenuto per ogni provino esaminato.

5.2.1 COLONNE NON RINFORZATE (UN)

CI UN 1



Figura 5.7 Analisi della parte interna della colonna CI UN 1.

Dalle immagini riportate è possibile notare che le colonne non rinforzate sostanzialmente non hanno modalità di rottura differenti. Tutte infatti mostrano la classica rottura della muratura a compressione, una rottura causata dalla formazione di fessure verticali in prospetto che si estendono in pianta formando una sorta di scacchiera.

È anche possibile notare, soprattutto nel caso di CI UN 1, come, avvicinandoci alla zona centrale in altezza, le fessure sono più ampie a causa di una maggiore deformazione trasversale dovuta all'effetto Poisson.

5.2.2 COLONNE RINFORZATE (PTR)

CI PTR 40 3

GIUNTO 4

Parte superiore GIUNTO 4

Consolidamento mal
eseguito GIUNTO 4



Figura 5.8 Analisi della parte interna della colonna CI PTR 40 3.

Nel caso di CI PTR 40 3 la rottura è avvenuta creando un provino scomposto in delle cortine esterne integre, che in parte sono state espulse e in parte no. Al loro interno è possibile riconoscere una sorta di “sacchetto” formato dalla parte centrale della colonna che presenta anch’esso delle fessure diagonali.



Figura 5.9 Distacco dell'interfaccia e fessure a raggiera.



Figura 5.10 Cortine esterne con al centro il “sacchetto” formato dalla parte centrale.

CI PTR 40 5

Metodo di sezione del
provino



GIUNTO 4



Parte superiore GIUNTO 4



GIUNTO 4



Parte superiore GIUNTO 3



Figura 5.11 Analisi della parte interna della colonna CI PTR 40 5.

CI PTR 40 6

GIUNTO 4



GIUNTO 3



Parte superiore GIUNTO 3



Figura 5-12 Analisi della parte interna della colonna CI PTR 40 6.

6 CONCLUSIONI

Questa campagna sperimentale, con lo scopo di fornire un contributo allo studio e alla ricerca, ha confermato la reale efficacia che la presente tecnica innovativa può offrire al patrimonio architettonico edilizio esistente, in termini di muratura storica.

Fulcro di tale rassegna è il comportamento delle colonne in muratura soggette a compressione semplice. Con le prove eseguite e l'analisi ad esse preliminare si è cercato di contrastare gli effetti di questa compressione intervenendo con il *repointing flessibile* attraverso corde in fibra di basalto, materiale naturale che va ad intervenire direttamente nel giunto di malta preservandone il facciavista.

I risultati hanno dimostrato come questo tipo di intervento, eseguito sia su colonne a base circolare sia su colonne a base rettangolare con corde pretese meccanicamente, risulti essere in grado di apportare benefici tangibili alla muratura, portandola ad un incremento di resistenza a compressione e allo stesso tempo ad un cambiamento delle effettive modalità di rottura.

Per un futuro sviluppo della sperimentazione è bene specificare come si debba porre maggiore attenzione in merito alla massima aderenza tra corde e resina, in modo tale da ottenere una più vantaggiosa collaborazione tra i due materiali.

BIBLIOGRAFIA

- [1] T.P.Tassios, "Parametri che influenzano la resistenza a compressione e la deformazione critica della muratura," vol. c, pp. 405–424.
- [2] E. Quagliarini, F. Monni, F. Greco, S. Lenci "Flexible repointing of historical facing-masonry column-type specimens with basalt fibers: A first insight" *Journal of Cultural Heritage* 24 (2017) 165–170
- [3] Tesi, S. Geminiani, relatore: E. Quagliarini, "Il rinforzo di colonne storiche in muratura mediante cerchiaggio flessibile," Università Politecnica delle Marche, 2017.
- [4] Tesi, M. Schiavoni, relatore: E. Quagliarini, "Il rinforzo di colonne storiche facciavista in muratura mediante repointing flessibile," Università Politecnica delle Marche, 2017.
- [5] Tesi, M. Tirabassi, relatore: E. Quagliarini, "La modellazione di colonne in muratura storica rinforzate mediante repointing flessibile," Università Politecnica delle Marche, 2017.
- [6] P. Ing and L. Jurina, "Cerchiatura di strutture murarie: tecniche tradizionali ed innovative," pp. 1–35, 2008.
- [7] L. Jurina, "Prove a collasso su colonne cerchiata in muratura," *If Crasc'09 I Convegno di Ing. Forense Iv Convegno su Crolli, Affidabilità strutt.* Consolidamento, pp. 2-4, 2009.
- [8] T. D. Kreaikas and T. C. Triantafillou, "Masonry Confinement with Fiber-Reinforced Polymers," *J. Compos. Constr.*, vol. 9, no. 2, pp. 128–135, 2005.
- [9] M. Corradi, A. Grazini, and A. Borri, "Confinement of brick masonry columns with CFRP materials," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, no. 9, pp. 1772–1783, 2007.
- [10] M.A. Aiello, F. Micelli, L. Valente, "FRP confinement of square masonry columns," *J Comp Constr*, 13(5):148–58, 2009.
- [11] M. Di Ludovico, C. D'Ambra, A. Prota, G. Manfredi, "FRP Confinement of tuff and clay brick columns: experimental study and assessment of analytical models," *J Comp Constr*, 14(5):583–96, 2010.
- [12] C. Faella, E. Martinelli, G. Camorani, M. A. Aiello, F. Micelli, and E. Nigro, "Masonry columns confined by composite materials: Experimental Investigation," *Compos. Part B Eng.*, vol. 42, no. 4, pp. 705–716, 2011.

- [13] “CNR–Advisory Committee on Technical Recommendations for construction,” “CNR-DT 200 R1/2013: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing. Materials, RC and PC structures, masonry structures,” 2013.
- [14] C. Faella, E. Martinelli, G. Camorani, M. A. Aiello, F. Micelli, and E. Nigro, “Masonry columns confined by composite materials: Experimental Investigation,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 42, no. 4, pp. 705–716, 2011.
- [15] C. Faella, E. Martinelli, G. Camorani, M. A. Aiello, F. Micelli, and E. Nigro, “Masonry columns confined by composite materials: Design formulae,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 42, no. 4, pp. 705–716, 2011.
- [16] S. De Santis, G. De Felice, A. Napoli, R. Realfonzo, “Strengthening of structures with Steel Reinforced Polymers: A state-of-the-art review,” *Composites Part B*, vol. 104, pp. 87e110, 2016.
- [17] G. Minafò, A. Monaco, J. D’Anna, L. La Mendola, “Compressive behaviour of eccentrically loaded slender masonry columns confined by FRP,” *Engineering Structures*, vol. 172, pp. 214–227, 2018.
- [18] A. Parghi, M.S. Alam, “A review on the application of sprayed-FRP composites for strengthening of concrete and masonry structures in the construction sector,” *Composite Structures*, vol. 187, pp. 518–534, 2018.
- [19] A. Cascardi, M.A. Aiello, T.C. Triantafillou, “Analysis-oriented model for concrete and masonry confined with fiber reinforced mortar,” *Materials and Structures*, 2017.
- [20] A. Cascardi, F. Longo, F. Micelli, M.A. Aiello, “Compressive strength of confined column with Fiber Reinforced Mortar (FRM): New design-oriented-models,” *Construction and Building Materials*, vol. 156, pp. 387–401, 2017.
- [21] L. Ombres, “Confinement Effectiveness in Eccentrically Loaded Masonry Columns Strengthened by Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Jackets,” *Key Engineering Materials*, vol. 624, pp. 551-558, 2015.
- [22] M. Fossetti, G. Minafò, “Strengthening of Masonry Columns with BFRCM or with Steel Wires: An Experimental Study,” *Fibers* 4, vol.15, 2016.
- [23] M. Fossetti, G. Minafò, “Comparative experimental analysis on the compressive behaviour of masonry columns strengthened by FRP, BFRCM or steel wires,” *Composites Part B*, vol.112, pp. 112 e 124, 2017.
- [24] M. Santandrea, G. Quartarone, C. Carloni, X. Lin Gu, “Confinement of Masonry Columns with Steel and Basalt FRCM Composites,” *Key Engineering Materials*, vol. 747, pp. 342-349, 2017.
- [25] F.S. Murgo, C. Mazzotti, “Numerical Analysis of Masonry Confined by FRCM,” *Key Engineering Materials*, vol. 747, pp. 558-566, 2017.

- [26] G. Maddaloni, A. Cascardi, A. Balsamo, M. Di Ludovico, F. Micelli, M.A. Aiello, A. Prota, "Confinement of Full-Scale Masonry Columns with FRCM Systems," *Key Engineering Materials*, vol. 747, pp. 374-381, 2017.
- [27] L. Ombres, S. Verre, "Masonry columns strengthened with Steel Fabric Reinforced Cementitious Matrix (S-FRCM) jackets: Experimental and numerical analysis," *Measurement*, vol. 127, pp. 238-245, 2018.
- [28] A. Cascardi, F. Micelli, M.A. Aiello, "FRCM-confined masonry columns: experimental investigation on the effect of the inorganic matrix properties," *Construction and Building Materials*, vol. 186, pp. 811-825, 2018.
- [29] G. Minafò, L. La Mendola, "Experimental investigation on the effect of mortar grade on the compressive behaviour of FRCM confined masonry columns," *Composites Part B*, vol. 146, pp. 1-12, 2018.
- [30] F. Monni, "Innovative masonry strengthening techniques maintaining the original brickwork appearance: an overview," *Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management*, Cáceres (Spain), 2018.
- [31] M.R. Valluzzi, L. Binda and C. Modena, "Mechanical behaviour of historic masonry structures strengthened by bed joints structural repointing," *Construction and Building Materials*, vol. 19, pp. 63-73, 2005.
- [32] D. Tinazzi, M. Arduini, C. Modena, and A. Nanni, "FRP-Structural Repointing of Masonry Assemblages", *Proceeding 3rd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, Ottawa (Canada), J. Humar and A.G. Razaqpur, Editors, pp. 585-592. 15-18 Aug. 2000.
- [33] E. Quagliarini, F. Monni, S. Lenci and F. Bondioli, "Tensile characterization of basalt fiber rods and ropes: A first contribution," *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp. 372-380, 2012.
- [34] E. Quagliarini, F. Monni, F. Bondioli and S. Lenci, "Basalt fiber ropes and rods: durability tests for their use in building engineering," *Journal of Building Engineering*, vol. 5, pp. 142-150, 2016.
- [35] F. Monni, E. Quagliarini, F. Greco and S. Lenci, "Confinement of brick masonry columns using basalt fibres ropes," *Proceedings of 10th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions SAHC 2016*, Leuven (Belgium), 13-15 Sep. 2016.
- [36] A. Borri, G. Castori, and M. Corradi, "Utilizzo di Trefoli Metallici per il Rinforzo di Colonne Murarie con Mattoni ' Faccia Vista,'" 2011.
- [37] A. Borri, G. Castori, M. Corradi, "Masonry confinement using steel cords," *J Mat Civil Engin*, vol.25, i. 12, pp. 1910-1919, 2013.

- [38] A. Borri, G. Castori, M. Corradi, "Strengthening of fair face masonry columns with steel hooping," *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 47, i. 12, pp. 2117-2130, 2014.
- [39] EN 1015-11, "Metodi di prova per malte per opere murarie Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita," 2007.
- [40] EN 772-1, "Metodi di prova per muratura," vol. 4, 2010.
- [41] UNI EN 772-16:2011, "Metodi di prova per elementi per muratura - Parte 16: Determinazione delle dimensioni," 2008.
- [42] E. N. Italiano, "Corde di fibra Determinazione di alcune proprietà fisiche e meccaniche UNI EN ISO 2307," 2008.
- [43] Irem A. Yilmaz, Pelin E. Mezrea, Medine Ispir, Ihsan E. Bal, Alper Ilki "Confinement of historical brick masonry piers with basalt TRM" *Proceedings of the 2nd International Conference on Protection of Historical Constructions (2014)* 281-287
- [44] ASTM International, "Standard test method for tensile properties of plastics," *ASTM Int.*, vol. 8, pp. 46-58, 2003.
- [45] Tesi, F. Greco, relatore: E. Quagliarini, "Cucire la pietra con la pietra: repointing flessibile per colonne in muratura con fibre di basalto," *Università Politecnica delle Marche*.
- [46] CEN, "Eurocode 6 - Design of masonry structures," Part 1-1 Gen. rules Reinf. unreinforced Mason. Struct., vol. EN 1996-1-, no. April, p. 123, 2005.
- [47] CIRCOLARE 21 gennaio 2019 , n. 7 C.S.LL.PP. Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.
- [48] Cap. 8 della NTC 2008- DM 14 gennaio 2008.

