

New materials and technologies in in architectural heritage restoration: masonry columns confinement using basalt fibres ropes

Francesco Monni*, Enrico Quagliarini, Federica Greco,
Stefano Lenci

Highlights

The strengthening of facing-masonry columns represents a current challenge in the field of restoration and consolidation of masonry structures. Typical solutions use external jacketing of the column, but in this way the aesthetic original aspect is not respected. An innovative solution is presented by using the reinforcement into the mortar joints. Results show the effective of this technique without compromising the aesthetic aspect.

Abstract

This paper deals with strengthening and consolidation of masonry columns, a long developed issue that also in the past interested restorers and designers in their works. A typical past solution for solving this kind of problem involves the use of a jacketing of the column by metal profiles. Nowadays strips of composite materials have been substituting these last ones but, when it is wanted to maintain the original aspect of the brickwork, this technique cannot be applied, so an experimental campaign about consolidation of masonry columns using a flexible element located in mortar joints has been developed. The results show the effective of this innovative technique in enhancing compressive strength of masonry columns without compromising their aesthetical appearance.

Keywords

Strengthening technique, Repointing, Basalt fibres, Masonry columns

1. INTRODUCTION

The main construction materials of a wide part of the world building historical heritage was masonry. A lot of these masonry structures need to be preserved for their cultural, historical and architectural value and represent the legacy to be inherited by future generations. However, the misinterpretation of the characteristics of masonry, due to the wide grade of their non-homogeneity, makes difficult the effectiveness of the interventions of restorations. Moreover, the use of innovative materials in the field of architectural restoration is becoming more and more widespread, but not always the results of these applications can be considered satisfactory. Therefore, it is even more important to pay attention in performing careful application of recovery and consolidation strategies to prevent a loss of authenticity of the masonry

Francesco Monni

AhrTE Srl – Spin Off UNIVPM,
DICEA - Dipartimento di
Ingegneria Civile, Edile e
Architettura, Università di
Ancona, via Brezze Bianche,
Ancona, 60131, Italia

Enrico Quagliarini

DICEA - Dipartimento di
Ingegneria Civile, Edile e
Architettura, Università di
Ancona, via Brezze Bianche,
Ancona, 60131, Italia

Federica Greco

DICEA - Dipartimento di
Ingegneria Civile, Edile e
Architettura, Università di
Ancona, via Brezze Bianche,
Ancona, 60131, Italia

Stefano Lenci

DICEA - Dipartimento di
Ingegneria Civile, Edile e
Architettura, Università di
Ancona, via Brezze Bianche,
Ancona, 60131, Italia

* Corresponding author
Tel.: +39-339-6088721;
e-mail: f.monni@ahrte.it

historically relevant. This work focuses on the architectural element of the column, in particular facing-masonry column. Many techniques were already applied up to now on masonry columns: wrapping the column with different materials was the most common interventions in the past and the same concept has been used nowadays. First basic confinement techniques involved metal devices. This reinforcement is particularly effective in avoiding the breaking due to the crush of elements undergoing compression stress and in improving the general behaviour, when the intervention is extended to the whole structure. However, the exposure of the metallic elements reduces the long-term durability of this intervention. In order to solve this problem, since the last few years, the use of stainless steel have been proposed and in order to improve the effectiveness of the system was used also a pre-tensioning of the hoops [1]. Recent studies show how the application of the FRP [2, 3] and FRCM [4, 5] offers an interesting opportunity in addition to the traditional techniques. These methods determine a little influence on the mass, warrant a high resistance in comparison with the weight of the bands, are easy to handle, flexible and quick to install. Notably that when the original aspect of the masonry has to be preserved FRP/FRCM wrapping cannot be applied. Following the idea of repointing strengthening method applied to masonry walls [6, 7] recent studies presented experimental researches on masonry columns based on the use of reinforcing elements located into mortar joints [8, 9, 10] in order to hide the intervention. In this paper, an innovative development of the confinement of historical masonry columns using basalt fibres ropes is presented. The idea start from previous experiences about application of the strengthening system of flexible continuous stitchings to masonry walls able to impart to masonry monolithic behaviour and to exert a good confinement effect, even in dry application, on several masonry typologies [11, 12]. Using continuous basalt fibre stitching also the performance against “out-of-plane” actions are improved [13]. Best advantages are represented by the fact that the application is very fast and so cheap, the material used (basalt) presents a high compatibility with masonry and the reinforce is almost totally reversible. The confinement of the masonry columns is proposed through the application of basalt fibres rope (the flexible continuous element) located in column mortar joints. Due to the properties of the material and the way of implementation, the application results in accordance with restoration principles: compatibility, reversibility, authenticity, preservation of historical materials, minimum intervention, control of the visual impact and recognisability of the intervention. This research report the main results obtained from an experimental campaign aimed to investigate the effectiveness of this confinement technique.

1. INTRODUZIONE E STATO DELL'ARTE

Per il loro valore storico, culturale e architettonico, molte delle strutture in muratura che costituiscono il nostro patrimonio edilizio devono essere preservate, ma non è compito facile poiché l'efficacia degli interventi di restauro e consolidamento è spesso minata dal grande livello di eterogeneità del materiale muratura, difficile da interpretare a livello di caratteristiche meccaniche e fisiche. Anche per questo motivo, l'uso di materiali innovativi nel campo del recupero edilizio - che sta diventando sempre più diffuso - non sempre risulta in grado di offrire risultati soddisfacenti. Inoltre è sempre più importante prestare attenzione nel scegliere e mettere in opera sistemi e tecnologie di consolidamento che siano rispettosi dell'autenticità e del valore dell'opera. Questo lavoro si concentra su uno specifico elemento architettonico: la colonna in muratura. Diverse tecniche sono state finora utilizzate sulle colonne in muratura: la “cerchiatura” con differenti tecnologie è stato l'intervento più comunemente utilizzato nel passato e lo stesso concetto è stato ripreso tutt'oggi. La tecnica della cerchiatura consiste nell'applicazione di una “legatura” attorno ad un oggetto del quale si vogliono impedire deformazioni e spostamenti laterali. Grazie alla sua azione di confinamento, la cerchiatura consente all'elemento di incrementare la capacità di sostenere carichi assiali: appare quindi intuitivo ed immediato individuare nelle colonne portanti gli elementi maggiormente interessati dall'applicazione di cerchiature. Nel corso dei secoli passati, tale tecnica è stata applicata alquanto frequentemente utilizzando come materiale l'acciaio: “anelli” metallici venivano applicati sulla faccia esterna del pilastro da cerchiare. L'intervento così realizzato poteva definirsi “passivo” se applicato in maniera da poter esplicitare la sua funzione solamente nel caso in cui cause esterne tendessero ad aggravare il quadro iniziale, o “attivo” se, ad esempio, montato a seguito di una dilatazione indotta termicamente, questo riusciva ad entrare “in carico” già pochissimo tempo dopo l'installazione, ossia quando l'effetto della sollecitazione termica veniva meno. Ai nostri giorni, l'impiego di cerchiature esterne metalliche, specie su colonne di edifici storici di pregio, viene evitato al fine di controllare l'impatto visivo ed anche perché questo intervento non garantisce la durabilità nel lungo periodo, a causa della completa esposizione degli elementi metallici. Nell'ottica di ridurre questa problematica negli ultimi decenni è stato introdotto l'uso dell'acciaio inossidabile e, per migliorare le prestazioni dell'intervento, sono state sperimentate anche tecniche di pre-tensionamento [1]. Studi recenti mostrano come l'applicazione di FRP [2,3] e FRCM [4,5] offrano un interessante opportunità in aggiunta alle tecniche più tradizionali. La tecnologia delle fibre presenta un trascurabile incremento di massa, elevate prestazioni in termini di resistenza, versatilità e velocità di applicazione. Ovviamente, se vi è

2. MATERIALS

The materials used in experimental campaign - for the masonry specimens (bricks and mortar) and for their reinforcement (basalt fibres rope and mortar) - were mechanically characterized, apart from the epoxy adhesive mortar, for which an exhaustive technical sheet was found (Table 2). In Table 1 are shown results on the tests conducted on the others materials.

la necessità di mantenere l'aspetto originale di una colonna in muratura faccia-vista, anche questa soluzione risulta inapplicabile. Seguendo quindi l'approccio della tecnica del repointing [6, 7], studi recenti hanno presentato ricerche sperimentali basate sul consolidamento di colonne in muratura usando elementi di rinforzo posizionati all'interno del giunto di malta [8, 9, 10] per nascondere l'intervento. Nel presente articolo viene presentato uno sviluppo innovativo di queste tecniche di confinamento dedicate alla muratura

| Masonry materials | | | Strengthening materials | | | | |
|-------------------|----------|-----------|-------------------------|----------|------------------|-----------|--|
| Mortar | | Brick | Basalt fibre rope | | Hydraulic mortar | | Epoxy-based mortar |
| f_{bm} | f_{cm} | f_{cm} | ϵ_{fu} | F_{tu} | f_{bm} | f_{cm} | technical sheet (from manufacturer) |
| 1.98 Mpa | 5.16 Mpa | 79.89 Mpa | 0.053 | 3163 N | 3.23 MPa | 31.10 MPa | |

Table 1. Characteristics of materials used to build masonry specimens and for strengthening intervention.

| Epoxy-based mortar – Technical sheet (from manufacturer) | |
|--|---------------------------|
| Characteristics | Value |
| Number of components | 2 (A+B) |
| Workability time | 30 mins |
| Complete hardening a 25°C | 7 days |
| Minimum application temperature | + 5 °C |
| Limit of operative temperature | - 30 / + 90 °C |
| Consistency (A+B) | Tixotropic product |
| Dry residue (A+B) UNI 8309 | > 98 % |
| Compression strength 1 day ASTM D695-02a | > 26 MPa |
| Compression strength 7 days ASTM D695-02a | > 38 MPa |
| Flexural strength 1 day ASTM D790 | > 21 MPa |
| Flexural strength 7 days ASTM D790 | > 23 MPa |
| Concrete adhesion | > 3 (support's break) MPa |

Table 2. Characteristics of the epoxy-based mortar (technical sheet from manufacturer).

2.1 MASONRY SAMPLES

The mix proportions of the mortar (lime:sand:water) used is: 1:0.83:0.28; mortar samples were tested according to the specifications of the European requirements UNI EN 1015-11 [14] and UNI EN 998-2 [15]. Common bricks (240 x 110 x 55 mm) were used for building specimens. The characterization tests of the compressive capacity were performed according to the requirements contained in UNI EN 771-1 [16] and UNI EN 772-1 [17].

2.2 STRENGTHENING MATERIALS

Basalt is a natural material that is found in volcanic rocks originated from frozen lava. Continuous basalt fibres are obtained by melting basalt, are characterized by high modulus, heat resistance, good resistance to chemical attack, and seem to be a good alternative to glass fibres [18, 19].

storica, che utilizza una corda in fibra di basalto. L'idea nasce a seguito di precedenti esperienze in cui l'utilizzo di un elemento continuo flessibile - la corda in fibra di basalto, appunto - è risultato idoneo per conferire un comportamento monolitico ed esercitare un buon effetto di confinamento (anche in applicazioni a secco) su pannelli di muratura di varia fattura [11, 12]. Sempre usando corde in fibra di basalto, sono incrementabili anche le prestazioni per sollecitazioni "fuori dal piano" della parete [13]. I maggiori vantaggi della tecnica proposta sono rappresentati dal fatto che l'applicazione è molto veloce (e quindi economica), il materiale utilizzato (basalto) presenta un'elevata compatibilità con la muratura ed il rinforzo è quasi totalmente reversibile. Il confinamento della colonna in muratura è proposto attraverso l'applicazione della corda in basalto (l'elemento continuo flessibile) posizionato all'interno dei giunti di malta. Grazie alle caratteristiche del materiale ed agli accorgimenti in fase di esecuzione, la tecnica risulta in accordo con le istanze del restauro: compatibilità, reversibilità, rispetto dell'autenticità, conservazione dei materiali originali,

In construction field, basalt is proposed in form of short fibres for insulating material, for reinforced concrete (chopped fibres) or like reinforcing material in rehabilitation of concrete [20] and masonry structures [21]. The basalt fibres can be processed with classic textile transformation to obtain also ropes (Figure 1), unlike other kinds of reinforcing fibres.



Figure 1. The basalt fibre rope.

A mechanical characterization of this product was proposed in [22] and, following the reported suggestions, a series of three tensile tests was carried out on basalt fibres ropes specimens. According to [22], the results of these test is a nonlinear, almost parabolic, correlation between force and displacement with an increase of the stiffness approaching the breaking point. This work aims to evaluate the effectiveness of a strengthening technique based on the use of basalt fibres rope for masonry columns confinement. Two different matrixes were applied. One of the two matrixes used for the reinforcement is a commercial ready-to-use fine granulometry mortar made from hydraulic binders, used for structural consolidations. The second matrix applied is a two-component solvent-free epoxy adhesive mortar. Obviously, the epoxy adhesive mortar shows best bonding performances if compared to the hydraulic mortar, but this one presents a high compatibility with ancient masonry, making this matrix perfectly suitable for this kind of interventions.

3. METHODS

3.1 EXPERIMENTAL PROGRAM

The experimental campaign consisted in execution of compressive tests on nine square section masonry prisms, subdivided as follow: n.3 specimens

minimo intervento, controllo dell'impatto visivo e riconoscibilità dell'intervento. La ricerca riporta i principali risultati ottenuti da una campagna sperimentale su provini prismatici in muratura rinforzati e non, mirata a valutare l'efficacia della tecnica di confinamento.

2. MATERIALI

È stata eseguita una caratterizzazione meccanica dei materiali usati nella sperimentazione - sia quelli impiegati per la costruzione dei provini (malta e mattoni) che quelli impiegati per il loro rinforzo (corda in fibra di basalto, malta da restauro) - ad eccezione della resina epossidica tixotropica, per la quale è stata reperita una scheda tecnica esaustiva (Tabella 2). Le caratteristiche dei materiali utilizzati sono riportati invece nella Tabella 1. Nei paragrafi 2.1 e 2.2 sono riportate le procedure di prova.

2.1 MALTA E MATTONI

La malta (a base di calce idraulica) è stata confezionata seguendo il rapporto legante/sabbia/acqua pari a: 1:0,83:0,28 ed è stata caratterizzata seguendo le modalità normate (procedure di prova e confezionamento provini) dalle UNI EN 1015-11 [14] e UNI EN 998-2 [15]. Mattoni comuni (dimensioni 240 x 110 x 55 mm) sono stati usati come elementi costituenti la muratura, le prove di caratterizzazione sono state condotte in accordo con le prescrizioni contenute nelle UNI EN 771-1 [16] e UNI EN 772-1 [17].

2.2 MATERIALI PER IL CONSOLIDAMENTO

Le fibre di basalto, sotto forma di fibra continua, di tessuto o di rete, sono usate anche come rinforzo per la produzione di fibrorinforzati laminati o pultrusi (barre) o come rinforzo da impregnare in situ con matrici di vario tipo per la creazione di compositi strutturali nelle opere civili. Le fibre

tested with no reinforcement (NC1, NC2, NC3); n.3 specimens reinforced using hydraulic mortar as matrix (CM1, CM2, CM3); n.3 specimens reinforced using epoxy adhesive mortar as matrix (CR1, CR2, CR3). Specimens were built with a square base of 25x25 cm, with 52 cm height (Figure 2a) so with a height to base ratio of about 2. Prisms of polystyrene with thickness 1 cm were positioned in the external side of joints of the columns that would be consolidated (Figure 2b and 2c). This has been done with the aim of avoiding to remove the mortar from the joints for the application of reinforcement, as usually have to done in the repointing interventions. The consequence will be a saving of time, work and damages caused to further operations. To avoid the local damage phenomena, a homogeneous layer of mortar was prepared on the steel plane used to build every specimen (joint “zero”).

“sciolte” (chopped) di basalto, costituiscono un ottimo rinforzo per evitare la fessurazione nei getti di conglomerato cementizio. Sotto forma di lana, possono costituire pannelli e tappetini con ottime caratteristiche di isolamento termo-acustico. Il basalto è un materiale durevole: risultati di test di laboratorio riportati in letteratura [18,19, 20] mostrano come l'esposizione ad ambienti aggressivi (acidi e basici), danneggia maggiormente le fibre di vetro che non quelle di basalto. L'esposizione alle alte temperature non penalizza le prestazioni in termini di resistenza delle fibre di basalto quanto quelle di vetro e di carbonio [21]. Per produrre la fibra di basalto è necessario portare la roccia alla temperatura di fusione (circa 1400 °C), il fuso è quindi estruso per produrre filamenti continui. Le fibre così ottenute, possono essere sottoposte a lavorazioni di “tessitura” che consentono di realizzare anche corde (Figura 1), per le quali esiste



Figure 2. Metric survey (values in cm) of the specimen (a) – The use polystyrene during the samples manufacturing (b and c).

3.2 DESCRIPTION OF THE TECHNIQUE

The intervention of consolidation was applied on six of the nine specimens. The basalt fibre rope was applied in each of the seven joint as explained in Figure 3a and Figure 3b. So “CR” specimens were reinforced using basalt fibres rope and with epoxy mortar, while “CM” specimens were reinforced by applying the hydraulic mortar. A matrix layer of about 4 mm was laid inside each joint after have previously cleaned it. Then the basalt rope has been arranged in the joints, initially placing the central part inside the joint and then manually pulling the end of the cable to ensure a slight state of pre-tension. Then, the rope was overlapped for 10 cm in both directions (total 20 cm) and the joint was filled with the matrix.

una procedura di caratterizzazione e che mostrano buone prestazioni in termini di resistenza [22]. La corda in fibra di basalto usata per il rinforzo dei provini oggetto del presente lavoro, è stata applicata con due diverse matrici: una malta pronta commerciale a base di calce idraulica utilizzata per ripristini strutturali ed una resina epossidica tixotropica bicomponente. Ovviamente la matrice epossidica mostra prestazioni migliori in fatto di aderenza se confrontata con la malta idraulica, anche se a favore di quest’ultima gioca una maggiore compatibilità con la muratura storica del supporto.

3. METODOLOGIA

3.1 PROGRAMMA SPERIMENTALE

Il programma sperimentale è stato basato sull’esecuzione di prove di compressione su nove parallelepipedi

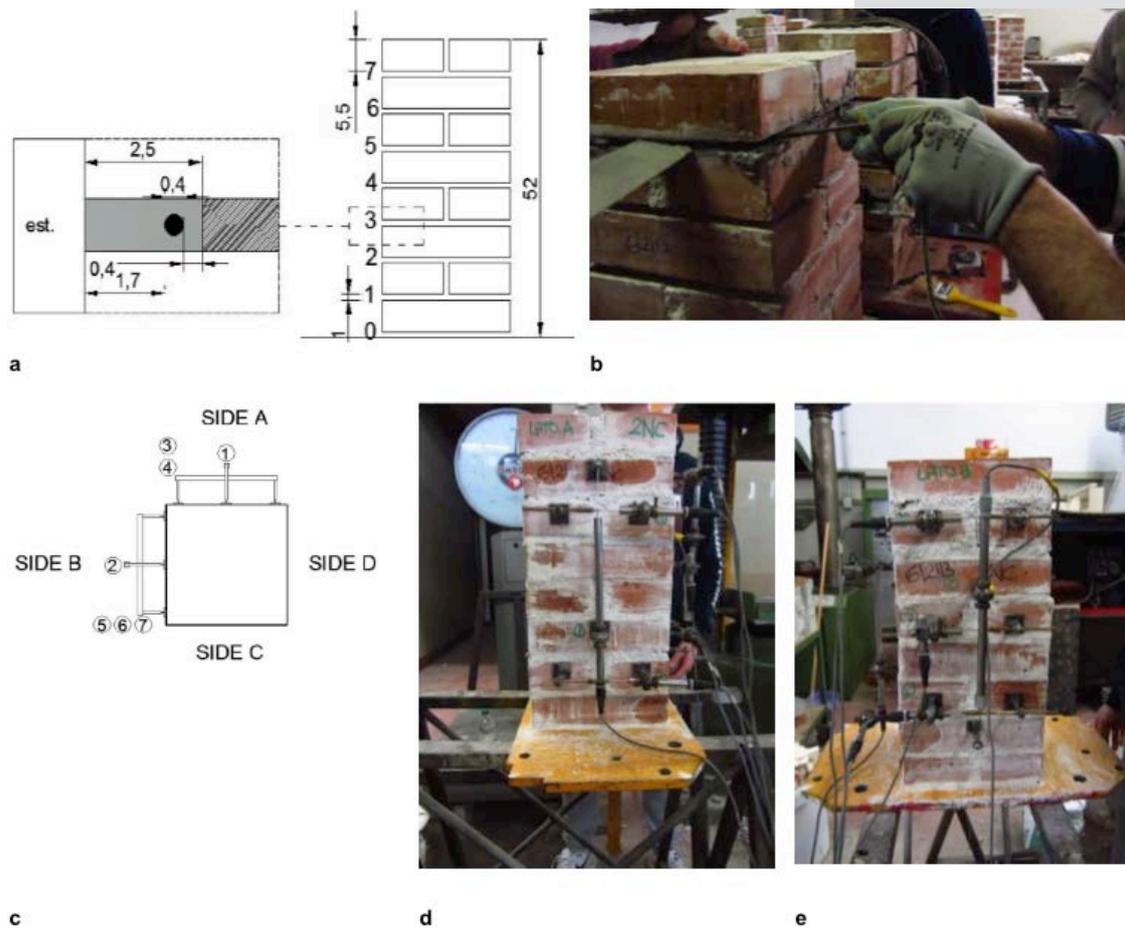


Figure 3. Consolidation of masonry specimens: design (a) and execution (b). Location of displacement transducers: plan view (c) and front views (d – e).

3.3 TEST SET-UP AND PROCEDURE

After building operations, the prisms have been cured in the same place for the same time (60 days) before testing. During this time, environmental temperature and humidity were constantly monitored to guarantee a homogeneous curing. Each side of the specimens was marked (with letters: A, B, C, D) and seven transducers were used for measuring displacements and a load cell was used for load. The location of the transducers is shown in Figure 3c – 3d – 3e. Their positions were maintained for all the experimental phase: in the A-side, there are one vertical transducer (number 1) and two horizontal transducers (number 3 and 4); while in the B-side there are one vertical transducer (2) and three horizontal transducers (number 5, 7 and 6). Compressive tests were executed in conditions of load control with a constant load gradient using a common hydraulic press with a maximum load capacity of 3000 kN and 0.1% of tolerance. Attention was paid to the correct centring of the specimens on the bottom plate of the machine. Moreover, in order to obtain a uniform surface on the top a gypsum layer was applied immediately

in muratura: tre di questi sono stati testati senza alcun consolidamento (NC1, NC2, NC3), tre sono stati testati in condizione rinforzata, usando come matrice la malta di calce idraulica (CM1, CM2, CM3), i restanti tre sono stati testati in condizione rinforzata, usando come matrice la resina epossidica tixotropica (CR1, CR2, CR3).

I provini sono stati realizzati con una base quadrata di 25x25 cm, con un'altezza di circa 52 cm (Figura 2a), con un rapporto altezza/base di circa 2.

Dei piccoli prismi in polistirene, con uno spessore di circa 1 cm sono stati posizionati nei giunti di malta esterni dei prismi che sono stati poi consolidati (Figura 2b). Questo accorgimento è stato preso per evitare di procedere ad una rimozione controllata della malta nel giunto, come in realtà avverrebbe in una reale applicazione. In questo modo, oltre a velocizzare l'applicazione del rinforzo, sono stati scongiurati danneggiamenti accidentali dei prismi che avrebbero potuto influenzare i risultati delle prove.

Per escludere fenomeni indesiderati di concentrazione di sforzi all'interfaccia tra muratura e la piastra di acciaio necessaria alla movimentazione dei provini, uno strato di allestimento in malta è stato preparato su ogni base metallica.

before the tests. Finally, two cameras were positioned, one on the A side and one on the B-side, in such a way as to obtain a continuous record of all test.

4. RESULTS

4.1. COMPRESSIVE CAPACITY

Results of compressive tests are shown in Table 3 where f_c represent the maximum compressive capacity. The capacity in terms of stress was obtained dividing the applied force into the cross section area of the columns. As can be seen in Table 3 the increase of compressive capacity for CR columns is around 40%, while CM columns offer approximately the same results of the unconfined columns. This implies that the hydraulic based mortar is less effective in making the basalt ropes work as confinement, probably because it weakly adheres to the masonry. On the other hand, resin based mortar seems to work better because of its stronger adhesive property on it.

| | f_c | S.D. | Increase |
|-----------------------|-------|------|----------|
| | MPa | - | % |
| “NC” specimens | 10.28 | 3.10 | - |
| “CR” specimens | 14.47 | 1.63 | 40.8% |
| “CM” specimens | 10.31 | 1.59 | 0,00% |

Table 3. Results of the compressive tests (average).

4.2. FAILURE MODE

Figures 4a and 4b shows some pictures representing the failure mode observed in tests conducted on NC specimens, typical of the failure mode due to compressive stress, characterized by principal vertical cracks running throughout all the bricks and resulting in the final failure of the column segment. The mentioned failure mode was modified by the presence of the consolidation system: in CR and CM specimen the failure generally occurs in the region of the column edges and it is concentrated at the local level, as some edge bricks detached from the inner part, leading to the expulsion of the material in this part (Figures 4c and 4d). This crack pattern supports the hypothesis that the system composed by the rope and the matrix carried out its confinement action reducing the number and dimension of cracks, but in some cases, always located at column edge, the stresses caused by compression load were able to exceed the strength of material out of confinement perimeter. After the compression tests, specimens were carefully opened to evaluate the behaviour of the inner part of the column and to check the bond quality

3.2 DESCRIZIONE DELLA TECNICA

L'intervento di consolidamento è stato applicato, come detto, su sei dei nove provini realizzati. La corda in fibra di basalto è stata applicata su ogni giunto (Figura 3a e Figura 3b). Quindi i provini della serie “CR” sono stati rinforzati annegando la corda nella matrice epossidica, mentre per quelli della serie “CM” è stata utilizzata la malta di calce idraulica. Un primo strato di matrice dello spessore di circa 4 mm è stato disposto sulle pareti del giunto dopo la pulizia dello stesso con aria in pressione. Successivamente è stata sistemata la corda in fibra di basalto posizionandola all'interno del giunto e sottoponendola ad un leggero stato di pretesione manuale. Infine, le due estremità della corda sono state sovrapposte su sé stesse per almeno 10 cm in entrambe le direzioni, ottenendo una lunghezza di sovrapposizione di circa 20 cm.

3.3 Procedura ed apparato di prova

Dopo la realizzazione, i prismi di muratura sono stati lasciati stagionare per 60 giorni, tutti nelle stesse condizioni microclimatiche

(l'accortezza di monitorare frequentemente e costantemente ha consentito di poter considerare questa importante fase preparatoria della prova come identica per tutti i provini). Ogni faccia verticale di ogni prisma è stata identificata (utilizzando le lettere A, B, C, D), sette trasduttori sono stati utilizzati per misurare gli spostamenti (localizzati come in Figura 3c, Figura 3d, Figura 3e) mentre una cella ha consentito di registrare in carico applicato. La posizione dei trasduttori è stata mantenuta costante per tutte le prove eseguite ed in particolare: la faccia “A” ha ospitato un trasduttore disposto in direzione verticale (numero 1) e due in orizzontale (numero 3 e 4), mentre la faccia “B” ha ospitato un trasduttore verticale (numero 2) e tre orizzontali (numero 5, 6 e 7). Le prove di compressione sono state condotte in controllo di forza con un gradiente di carico costante. La macchina di prova utilizzata è stata una normale pressa idraulica con una capacità di carico massima di 3000 kN. Particolare attenzione è stata posta nel posizionare il provino al centro dei piatti della macchina. Inoltre, nell'ottica di ottenere una superficie di trasmissione del carico uniforme e di escludere il generarsi di sforzi di pressoflessione, uno strato di gesso è stato applicato sulla faccia superiore di ogni provino immediatamente prima di iniziare la prova. Infine, ogni test è

between substrate and matrix. The fact that brick was broken not only in internal part, but also in the external one, can be considered as demonstration of a good global behaviour of the whole sample. Unreinforced specimens are very crumbled. On the contrary, the consolidated specimens were affected by a smaller crushing, albeit evident, in the central part and a rather jagged in the perimeter. However, in general, columns always broke for achieving the maximum strength of the material and not because of the failure of the basalt rope.

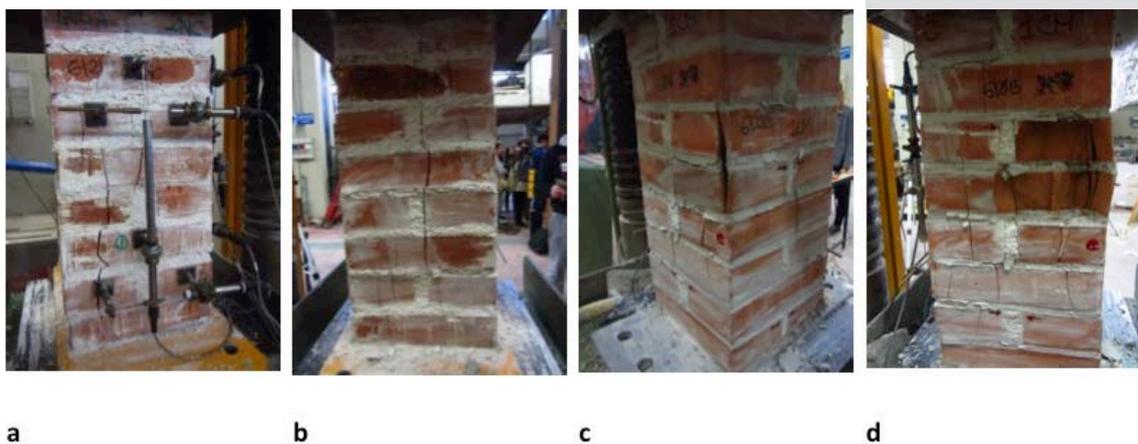


Figure 4. Example of the crack pattern (failure mode) of an unconfined column (a and b) and of a reinforced column (c and d).

5. CONCLUSIONS

This experimental campaign focuses on a particular kind of repointing technique, applied with basalt fibres rope using two different matrices. This technique, remaining invisible externally, does not affect the historical masonry aspect. The proposed system respects all the rules governing the interventions on the historical buildings: (i) minimum intervention and limited visual impact, (ii) compatibility, (iii) authenticity and conservation of materials (it does not replace or transforms the original material). The technique is characterized by an extremely simple, quick way of application, and it means that it is also a low-cost intervention. In perspective to increase the sustainability of the system, a further development should be represented by an application without synthetic adhesives. Therefore, further experimental campaigns should be done in order to test other mortars more performing. As regards the effectiveness of the system, the research can be oriented towards two different directions: application of an initial pretension state in such a way as to allow the rope to make its contribution to the resistance from the beginning of the load application or to evaluate the effect of more than one hoop of rope into mortar joint. In fact, the tests have shown that the failure of

stato documentato per mezzo di due videocamere (poste rispettivamente di fronte al lato "A" ed al lato "B") che hanno fornito una registrazione continua di tutta la prova.

4. RISULTATI

4.1 RESISTENZA A COMPRESSIONE

I risultati delle prove di compressione (valore medio per ogni serie) sono riportati nella Tabella 3, dove con f_c è stata indicata la massima capacità dei provini. La massima tensione sostenibile è stata ricavata dividendo

la massima capacità di carico per l'area nominale del provino. Come si evince dalla tabella, i provini "CR" mostrano un incremento della capacità di carico di circa il 40% rispetto a quelli non consolidati, mentre le colonne della serie "CM" non offrono sostanziali incrementi di prestazioni. Da questi risultati si evince chiaramente come la malta a base di calce idraulica sia meno efficace nel rendere la corda in grado di confinare la muratura, probabilmente a causa della sua modesta capacità di adesione al substrato. Per contro, si può notare come la malta a base epossidica offra buone prestazioni in virtù della sua elevata capacità di aderire alla muratura.

4.2 MODALITÀ DI COLLASSO

Le Figure 4a e 4b mostrano alcune immagini che rappresentano la modalità di collasso osservata nelle prove condotte sulle colonne non consolidate (NC), tipica del superamento dei massimi sforzi di compressione sostenibili, con la formazione di lesioni verticali lungo il provino. Tale modalità di collasso è stata modificata grazie all'applicazione del rinforzo: nei provini della serie CR e CM, la rottura avviene nella regione degli spigoli del provino prismatico ed è un fenomeno prettamente locale, che si manifesta con l'espulsione degli angoli di alcuni mattoni (Figure 4c e 4d). Il quadro fessurativo

the specimens happened when the maximum resistance of the brick elements was reached and that, in the majority of cases, the reinforced system seems to activate too late that is when large displacements happen. Moreover, during the application the operators seem to be able to work with no problem if the rope hoops would be more than one. Definitely, a next step in the experimentation must be to achieve specimens with equal sizes and materials to these and to repeat the tests to get a wider range of experimental data.

6. REFERENCES

- [1] Marnetto R. [et al.], *Il sistema CAM: Cuciture Attive dei Manufatti*, Roma: Edizioni PRE Progetti, 2014.
- [2] Faella C. [et al.], Masonry columns confined by composite materials: Experimental investigation. Composites: Part B, vol. 42, pp. 692–704 (2011).
- [3] Witzany J. [et al.], Failure mechanism of compressed short brick masonry columns confined with FRP strips, *Construction and Building Materials*, vol. 63, pp. 180–188 (2014).
- [4] Carloni C. [et al.], Confinement of masonry columns with PBO FRCM composites. *Key Engineering Materials*, vol. 624, pp. 644–651 (2015).
- [5] Ombres L., Confinement effectiveness in eccentrically loaded masonry columns strengthened by Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) jackets. *Key Engineering Materials*, vol. 624, pp. 551–558 (2015).
- [6] Modena C. [et al.] Design choices and intervention techniques for repairing and strengthening of the Monza cathedral bell-tower. *Construction and Building Materials*, vol. 16, pp. 385–395 (2002).
- [7] Valluzzi M.R. [et al.], Mechanical behaviour of historic masonry structures strengthened by bed joints structural repointing. *Construction and Building Materials*, vol. 19, pp. 63–73 (2005).
- [8] Jurina L., Prove a collasso su colonne cerchiate in muratura. *Proceedings of IF CRASC'09 I Convegno di Ingegneria Forense, IV convegno su Crolli, Affidabilità Strutturale, Consolidamento*, Napoli, 2-4 December (2009).
- [9] Jurina L., Tecniche di cerchiatura di colonne in muratura. *L'edilizia-Structural*, n.164, pp.38-49, DeLettera-Editore (2010).
- [10] Borri A. [et al.] Behavior of masonry columns repaired using small diameter cords. *Key Engineering Materials*, vol. 624, pp. 254–265 (2015).
- [11] Quagliarini E. [et al.] Strengthening three-leaf masonry panel with basalt fibre ropes. First experimental data. *Proceeding of the 5th International congress "Science and Technology for the safeguard of the Cultural Heritage in the Mediterranean Basin"*, Istanbul, Turkey, 22-25 november 2011, Valmar Ed., Roma, pp. 276 – 283 (2012).
- [12] Monni F. [et al.] Basalt ropes: a new product for the rehabilitation of historical masonry. *Proceeding of the International conference on "Preservation, Maintenance and Rehabilitation of Historical Buildings and Structures"*, Tomar, Portugal, 19-21 march 2014, Vol. 2, pp. 1089 – 1097 (2014).
- [13] Monni F. [et al.] Dry masonry strengthening through basalt fibre ropes: experimental results against out-of-plane actions, *Key Engineering Materials*, vol. 624, pp. 584–594 (2015).
- [14] UNI EN 1015-11. Methods of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar (2007).
- [15] UNI EN 998-2. 2010. Specification for mortar for masonry - Part 2: Masonry mortar.
- [16] UNI EN 771-1. 2005. Specification for masonry units Part 1: Clay masonry units.
- [17] UNI EN 772-1. 2002. Methods of test for masonry units. Determination of compressive strength.
- [18] Van De Velde K. [et al.] Basalt fibres as reinforcement for composites, *Proceedings of 10th International Conference on Composites/Nano Engineering*, University of New Orleans, New Orleans, LA, USA, 20-26 July (2003).
- [19] Wei B. [et al.] Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibres. *Materials Science and Engineering A* 527, pp. 4708 – 4715 (2010).
- [20] Sim J. [et al.] Characteristics of basalt fibre as a strengthening material for concrete structures. *Composites: Part B* 36, pp. 504 – 512 (2005).

rilevato supporta l'ipotesi che il sistema composto da corda e matrice eserciti un effetto di confinamento riducendo numero e dimensioni delle lesioni, tuttavia, in alcuni casi, ed in particolare negli angoli del provino, le tensioni provocate dai carichi di compressione sono tali da provocare lo schiacciamento del materiale che risulta posizionato fuori dal perimetro confinato. Una volta conclusa la prova di compressione, ogni provino è stato "aperto" con cautela per valutare meglio a livello qualitativo il comportamento del nucleo interno dello stesso e per controllare la qualità dell'adesione tra substrato e matrice. Il fatto che il mattone abbia raggiunto la rottura non solo nella parte più esterna ma anche in quella interna può essere considerato come una dimostrazione di un comportamento globale dell'intero sistema. I provini non rinforzati hanno subito lesioni da schiacciamento nella loro totalità, mentre quelli consolidati sono caratterizzati da lesioni più modeste, sebbene comunque evidenti, nella parte centrale e piuttosto frastagliate lungo il perimetro. Tuttavia, in generale, le colonne sono arrivate al collasso sempre per aver raggiunto la massima resistenza dei materiali costituenti e non per il collasso della corda in basalto.

5. CONCLUSIONI

Il presente lavoro sperimentale si è occupato di un innovativo sistema di consolidamento dedicato alle colonne in muratura "faccia-vista", basato sull'utilizzo di corde in fibra di basalto annegate in due differenti matrici. La tecnica, che risulta invisibile dall'esterno, non compromette l'aspetto originale della muratura storica ed in particolare rispetta anche altre istanze tipiche di un intervento di restauro: riconoscibilità (il giunto di malta interessato dall'intervento è distinguibile, senza che questo rechi però disturbo alla visione dell'opera), reversibilità, compatibilità, minimo intervento. La tecnica è caratterizzata da un'estrema semplicità e velocità di applicazione, che si ripercuote in una sua concreta economicità. Nella prospettiva di accrescere la sostenibilità del sistema, un ulteriore sviluppo del lavoro può essere rappresentato da successivi approfondimenti tesi ad escludere l'utilizzo di adesivi sintetici ma incrementando le prestazioni del sistema (in sostanza andranno testate matrici inorganiche più performanti). Nell'ottica di accrescere invece l'efficacia del sistema sono in corso ulteriori sperimentazioni per valutare l'effetto dell'applicazione di una pre-tensione iniziale sulla corda e quello di applicare più spire di corda in un unico giunto, magari sfruttando la possibilità di dimensionare la corda "su misura" per l'intervento (i.e. diminuzione del diametro della stessa a favore di maggiori spire applicate all'interno di un unico giunto).

- [21] Papanicolaou C. [et al.] Externally bonded grids as strengthening and seismic retrofitting materials of masonry panels. *Construction and Building Materials* 25, pp. 504 – 514 (2011).
- [22] Quagliarini E. [et al.] Tensile characterization of basalt fibre rods and ropes: A first contribution. *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp. 372–380 (2012).