

Basalt fibre continuous stitchings for strengthening the dry stone masonry of the Lossetti Tower in Beura-Cardezza (Italy)

Francesco Monni*, Enrico Quagliarini, Stefano Lenci

Highlights

Dry stone masonry is an ancient construction method that results very weak under eccentric and horizontal loads if presents the lack of elements long enough to cross the thickness of the masonry. Continuous basalt fibre stitchings' technique allows to connect the wall in the transverse direction and to improve the monolithic behaviour of masonry panels. The technique was preferred respect to the more invasive ones because considered the most compatible and reversible. The strengthening design was preceded by a knowledge process of surveying and mechanical tests to obtain a tailored intervention for the building.

Abstract

Dry stone masonry is widely used in rural and mountain regions and its consolidation is a challenge issue if it is wanted to preserve the peculiarities of masonry texture. In this paper is presented the design approach used for consolidation intervention of Lossetti Tower - a medieval dry stone watchtower located in Beura-Cardezza (Italy, Piemonte Region) - using the technique of continuous basalt fibres stitching, consisting in creating a mesh of BF ropes, which pass through the masonry thickness and tie blocks together. A 3D laser scanner survey of the tower was executed and, to evaluate the technique effectiveness, diagonal compression test on masonry specimens was done, in order to develop a tailored design of the strengthening intervention, in perfect compatibility with the original structures.

Keywords

Dry stone masonry, Basalt fibre, Strengthening technique, Tailored design

1. INTRODUCTION

It is well known as stone is one of the oldest construction material known to humankind, and dry stone masonry (DSM) is one of the oldest building method by which structures are constructed from stones without any mortar to bind them together. DSM has been a successful building technique throughout the ages due to the large availability of masonry elements (natural stones) and the minimum equipment required to masons to erect structures characterized also by remarkable size. DSM technology is best known in the context of wall (construction field or garden and retaining walls for terracing), but dry stone artwork, buildings, bridges, and other structures also exist.

DSM is a construction type widely used also in many alpine regions of Northern Italy, especially for vernacular and military buildings, as watchtowers. The



Vol. 3, No. 1 (2017)

Francesco Monni

Ahrte Srl – Spin Off c/o DICEA
- Dipartimento di Ingegneria
Civile, Edile e Architettura,
Università Politecnica delle
Marche, via Breccie Bianche,
Ancona, 60131, Ancona, Italia

Enrico Quagliarini

DICEA - Dipartimento di
Ingegneria Civile, Edile e
Architettura, Università
Politecnica delle Marche, via
Breccie Bianche, Ancona, 60131,
Ancona, Italia

Stefano Lenci

DICEA - Dipartimento di
Ingegneria Civile, Edile e
Architettura, Università
Politecnica delle Marche, via
Breccie Bianche, Ancona, 60131,
Ancona, Italia

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

seismic retrofit of DSM buildings is a very demanding task: almost all the techniques used for common masonry (mortar injections, concrete jacketing, FRP, etc.) seem to be inappropriate if preservation of original aspect is required.

In this paper is presented the design process for consolidation of the medieval watchtower called Lossetti Tower, using the technique of continuous basalt fibres (BF) stitching (better described in a dedicated section), preferred by authorities because considered the most compatible and reversible, and probably the only one able to preserve completely the texture of this DSM structure.

The Lossetti Tower (Figure 1a), built in the Middle Ages age as military watchtower, is located in municipality of Beura-Cardezza in the Ossola Valley (Piemonte Region) where can be seen a lot of rural architectures built with DSM technique. The name of “Lossetti” derives from the one of a small noble family existing in that age. It was part of the medieval fortification system used to control one of the busiest streets of the Middle Ages: the trade route from Switzerland to Milan [1]. Originally, it consisted of four floors of which the intermediate were used as house for the resident small garrison - the fireplace and latrine have been preserved and are visible nowadays - and the remainder were intended for defensive purposes and customs. It is a building out of the ordinary, as it is entirely built in DSM, is formed in the plant by a quadrilateral of about seven meters on each side (thickness of the walls at the base is about 105 cm) and grows up to fourteen meters in height, a considerable height for a DSM building. The stone locally available is the “beola”, a type of gneiss stone easy to be divided in blocks or plates in order to be used for both wall (blocks) and roof (plates). The area is typical for quarries of this particular kind of gneiss stone, so the constructions are related to the historical use of local materials. The best way of practice for restoration of this kind of building is currently object of studies and, from the recognition over time of the need to rediscover and revitalize historic buildings and their historic fabric, several research projects were created, based on use of traditional local techniques and materials. One of main themes of these is the development of compatible technical solutions for the seismic retrofit, without compromising the architectural value [2, 3]. All windows and doors appear coeval, with the exception of the current access to the tower. Over time, the tower has undergone alterations that suggest a change of use and conversion to a warehouse and storage of items. The period of total neglect that followed, and problems of instability caused by the partial collapse of the underlying rock, explains its current condition, with natural degradation characterized by

1. INTRODUZIONE

È noto come la pietra sia uno tra i più antichi materiali da costruzione conosciuti dall'umanità e che la tecnica della muratura a secco sia uno dei più antichi metodi costruttivi per realizzare strutture nelle quali le pietre sono apparecchiate ed adagiate l'una sull'altra senza l'applicazione di malta. Quella della muratura a secco è stata una tecnica costruttiva ampiamente utilizzata nel corso dei secoli sia per la grande disponibilità degli elementi costituenti (pietre naturali) sia perché ha consentito di erigere strutture caratterizzate anche da ragguardevoli dimensioni con un contenuto bisogno di attrezzatura. La tecnologia della muratura a secco è stata maggiormente utilizzata per i muri (divisione di campi o giardini e muri di contenimento per i terrazzamenti), ma non sono assenti testimonianze di un suo utilizzo anche per opere d'arte, edifici, ponti ed altre strutture. Questa tipologia costruttiva è largamente utilizzata anche in molte regioni alpine del Nord Italia, in particolare modo per la realizzazione di edifici tradizionali e militari, come le torri di avvistamento. Recuperare, dal punto di vista sismico, le costruzioni di pietra a secco non è cosa facile: quasi tutte le tecniche utilizzate per la muratura comune (iniezioni di malta, intonaco armato, FRP, etc.) sembrano essere inappropriate quando si vuol conservare l'aspetto originale del manufatto. In questo lavoro viene presentato il percorso progettuale utilizzato per il consolidamento della torre medievale detta “Torre dei Lossetti”, con la tecnica delle cuciture continue in fibra di basalto, preferita alle altre disponibili dalle autorità competenti in quanto considerata maggiormente compatibile e reversibile, e probabilmente la sola capace di preservare interamente la tessitura muraria originale di questa struttura. La Torre Lossetti (Figura 1a), eretta nel Medioevo come torre militare di avvistamento, è situata nel Comune di Beura-Cardezza nella Val D'Ossola (Piemonte). Il nome “Lossetti” discende da quello di una piccola famiglia di nobili esistente in quel periodo. Essa faceva parte del sistema di fortificazione medievale utilizzato per controllare una delle strade più trafficate del Medioevo: la rotta commerciale dalla Svizzera a Milano [1]. Originariamente era composta da quattro piani dei quali quelli intermedi erano destinati a residenza per la piccola guarnigione ivi presente – si sono conservati e sono tutt'ora visibili sia il camino che la latrina – mentre i rimanenti venivano utilizzati per attività di riscossione delle gabelle ed a scopo difensivo. A pianta quadrata con i lati lunghi circa sette metri (le pareti alla base sono spesse circa 105 cm), è una costruzione fuori dal comune perché oltre ad essere interamente realizzata in pietra a secco si sviluppa per la considerevole altezza di quattordici metri. La pietra disponibile nella zona è la “beola”, un tipo di gneiss facilmente divisibile in blocchi o lastre a seconda che venga impiegata per la realizzazione di pareti (blocchi) o tetti (lastre). L'area è tipica per la presenza di cave di questo particolare tipo di gneiss, e questo spiega la correlazione tra gli edifici e l'uso storico di questo

visible bulges and cracks (Figure 1b). For all the above reasons, steel ties and steel cables as confining rings have been recently inserted (Figure 1c).

materiale locale. Attualmente è ancora oggetto di studio la ricerca della miglior prassi di restauro di questo tipo di edifici e, a seguito



Figure 1a (left). The Lossetti Tower. Figure 1b (centre). One of the DSM walls of the tower: are clearly visible serious cracks. Figure 1c (right). Safety devices applied to the tower: steel ties and steel cables.

First, a preliminary phase of knowledge of the building was developed. These data have enabled the preparation of a tailored design of the strengthening system.

2. THE BASALT FIBRE STITCHINGS: A NEW TECHNIQUE FOR STRENGTHENING MASONRY

As shown by several authors [4, 5] historical masonry buildings subjected to earthquake do not show a global structural behaviour. If the building was made through good quality masonry, it has the tendency to split itself in several parts, called macro-elements which respond as single units to seismic action, and for which the main features of the collapse mechanisms are at least approximately known. Once macro-elements and their most probable collapse mechanisms are identified, possible damages can be predicted and countermeasures adopted.

Masonry quality defines if this approach could be considered reasonable: in fact only good quality masonry is able to guarantee monolithic behaviour. On the contrary, if it has been used poor quality masonry, a chaotic failure has to be expected: it is not right to reasoning about failure mechanism activation, and a low intensity earthquake could be enough to determine disastrous collapses. Masonry made following “rule of art” prescriptions can be considered of “good quality”, otherwise, every structural assessment is quite unreliable and the first thing to do is to improve its quality. From the awareness that one of the worst structural defects of an historic masonry

della progressiva constatazione della necessità di riscoprire e rilanciare gli edifici storici e la loro tecnica costruttiva, sono stati messi in piedi ricerche e progetti tesi a sviluppare soluzioni tecniche compatibili per l'adeguamento sismico, senza compromettere il valore storico del bene [2, 3]. Tutte le finestre e le porte appaiono coeve alla costruzione, ad eccezione dell'attuale accesso alla torre. Nel corso del tempo ha subito alterazioni che portano a pensare ad un cambiamento d'uso ed alla riconversione in magazzino. Il periodo di totale abbandono che ne è seguito, unitamente ai problemi di instabilità causati dal parziale cedimento della roccia sottostante su cui si fonda, spiegano la condizione attuale del manufatto e il naturale degrado caratterizzato da visibili rigonfiamenti e crepe (Figura 1b). Per tutte queste ragioni sono stati recentemente installati tiranti e cerchiature realizzate con trefoli di acciaio (Figura 1c).

2. L'INNOVATIVA TECNICA DELLE CUCITURE IN FIBRA DI BASALTO PER IL CONSOLIDAMENTO DELLA MURATURA

Come riportato in letteratura [4, 5] gli edifici storici in muratura investiti da eventi sismici non sempre presentano un comportamento strutturale di tipo globale. Se l'edificio è stato realizzato con una muratura di buona qualità, ha la tendenza a dividersi in “macro elementi”, che reagiscono al terremoto come parti autonome e per le quali sono tendenzialmente note le principali caratteristiche dei meccanismi di collasso. Una volta che i macro-elementi ed i loro meccanismi di collasso più probabili sono stati identificati, è possibile prevedere gli eventuali danni e adottare le contromisure di intervento più adeguate. È la qualità della muratura

wall is the lack of monolithic behaviour, arises the idea of a strengthening technique able to connect the several masonry elements, through continuous flexible stitching executed using BF ropes. In fact, the use of this innovative product was already tested with good results in giving to masonry monolithic behaviour, also in case of “multi-leaf” masonry [6, 7, 8, 9, 10]. The system, that consists in insertion of BF ropes across the masonry panel, following an appropriate and tailored designed path (Figures 2a, b), resulted able to change the failure mode of masonry samples, exploiting material properties, and to determine a transverse strain reduction under compression load. The results of in-situ tests performed on specimens obtained from existing “poor” masonry (built with roughly cut stones and air lime-based mortar, composed by two or three weakly connected leaves), confirm the fact that the intervention is able to impart a monolithic behaviour to the masonry panel and to exert a good confinement effect.

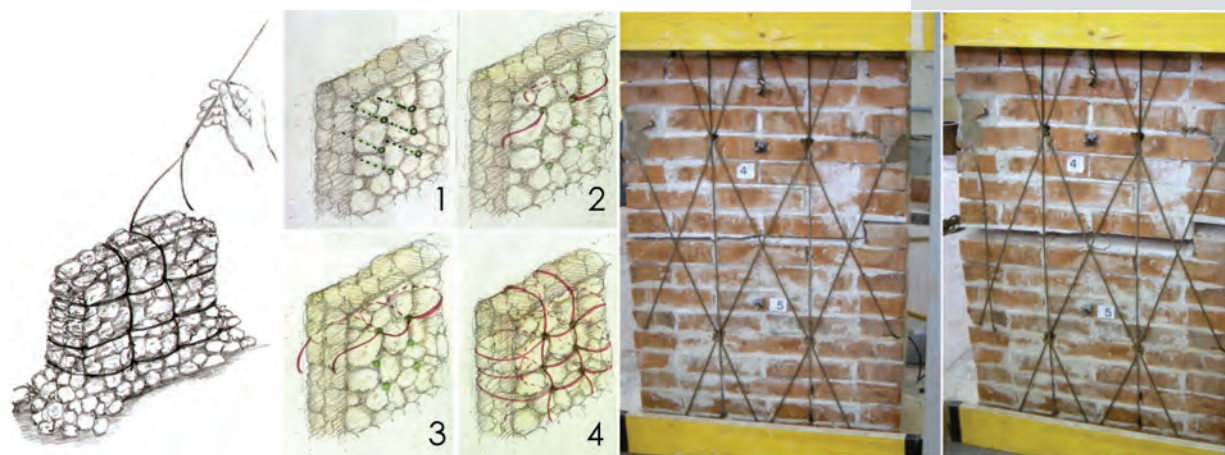


Figure 2a (left). The concept of continuous BF stitchings consolidation system. Figure 2b (centre). Intervention application phases. Figure 2c (right). Experimental test against out-of-plane collapse of masonry panels.

Further, the proposed technique is usable in improving masonry performance against “out-of-plane” actions [11, 12, 13], also in “dry” application, without use of resins (Figure 2c).

The proposed system is sustainable: basalt is a natural material that is found in volcanic rocks, 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 [14, 15]. The application very fast (and so cheap) and respects all the rules governing the interventions on the historical buildings: (i) minimum intervention, (ii) compatibility, (iii) authenticity and conservation of materials (it does not replace or transforms the original material). Due to these advantages, the authors recently proposed to use BF ropes also for strengthening masonry columns [16, 17].

a definire se questo approccio può essere considerato ragionevole: solo se questa è “buona” infatti, è in grado di garantire un comportamento monolitico. Al contrario, se la qualità della muratura è scarsa ci si deve attendere un collasso improvviso e caotico: un terremoto di bassa intensità potrebbe essere sufficiente a determinare dei veri e propri crolli. Può essere considerata di buona qualità la muratura realizzata secondo la “regola dell’arte”, in caso contrario ogni valutazione strutturale risulta abbastanza inaffidabile e, quindi, il primo intervento da eseguire è quello di riportare la monoliticità. Dalla consapevolezza che uno dei peggiori difetti di una muratura storica è la mancanza di comportamento monolitico, è nata l’idea di una tecnica di consolidamento capace di collegare i diversi elementi murari tramite una cucitura continua flessibile eseguita mediante l’utilizzo di corde in fibra di basalto. L’uso di questo prodotto innovativo è stato oggetto di studi, ottenendo buoni risultati nel conferire un comportamento monolitico alla muratura, anche in caso di

muratura a doppio paramento [6, 7, 8, 9, 10]. Il sistema, che consiste nell’inserimento di corde in fibra di basalto attraverso il pannello murario seguendo un adeguato reticolo progettato “su misura” (Figura 2a, b), è risultato capace di modificare la modalità di collasso dei campioni riprodotti in laboratorio e di determinare una diminuzione delle deformazioni trasversali sotto l’azione di carichi di compressione. I risultati delle prove in-situ effettuate su campioni di muratura “povera” esistente (costruita con pietre tagliate grossolanamente e malte a base di calce aerea, composta da due o tre paramenti debolmente collegati), confermano come l’intervento sia in grado di conferire un comportamento monolitico e di esercitare un buon effetto di confinamento. In aggiunta, la tecnica proposta è impiegabile nel miglioramento delle prestazioni della muratura nei confronti delle azioni agenti “fuori dal piano” [11, 12, 13], anche con

In the case of Lossetti Tower, for example, injections or jacketing technique are forbidden because the peculiar characters of the dry stone walls would be hidden, so the BF stitchings technique was chosen as the most compatible and reversible, as the only technique able to preserve completely the dry texture image of the masonry walls. In this way, a dry “tailored engineering” technique was achieved for reinforcing the DSM walls of the tower, in perfect compatibility with the original structures.

3. KNOWLEDGE PROCESS FOR INTERVENTION DESIGN

Before setting the intervention design, a stage of preliminary knowledge of the building was carried out. In particular an accurate geometric survey, a technological study of the masonry texture and a mechanical characterization tests (necessary because there are no data available in the literature on this type of masonry) were performed.

A geometric survey as accurate as possible has become necessary because the BF stitchings system has to be optimized specifically for the monument: it results fundamental to properly design the intervention, optimize procedures and reduce unnecessary costs. So three-dimensional laser scanner survey of the tower was performed. This also allowed the correct representation of the considerable deformation of the walls, not measurable point for point, cracks pattern and degradation map. After developing a quick, methodical form of data extraction directly from the point cloud, avoiding the complex and lengthy procedures of reconstitution, the plans, sections and elevations were generated entirely by the extrapolation of appropriate slices and ortho-photos (Figure 3). The choice of the methodology used is based on a compromise between speed of execution, cost, and relevance of the collected data [18].

The technological study of the DSM of the Lossetti Tower has been very important to understand as the construction mode of this kind of masonry could represent a vulnerability for the building. From a first, external analysis, masonry appear made by selected interlocking medium–large stone slabs, not squared but broken, with a regular texture, arranged in almost horizontal courses and staggered joints (Figure 4a). Small pieces of stone are added in some places for filling the gaps left by the irregular shapes of the surrounding blocks (Figure 4b).

Indeed the walls are made by two load-bearing façades, most of the elements are arranged in the main direction of the wall (“ortostati”) and at intervals, large tie-stones are placed which span both faces of the wall (“diatoni”). These have the role of bonding what would otherwise be two thin walls leaning

applicazioni “a secco”, senza l’uso di resine (Figura 2c). Il sistema proposto è sostenibile: il basalto è un materiale naturale che si trova nelle rocce vulcaniche, le fibre continue di basalto si ottengono dal processo di fusione del basalto, sono caratterizzate da un modulo elevato, resistenza alle alte temperature, buona resistenza agli attacchi chimici e sembrano essere una buona alternativa alle fibre di vetro [14, 15]. L’applicazione è rapida (nonché economica) e rispettosa di tutti i principi che disciplinano gli interventi sulle costruzioni storiche: (i) minimo intervento, (ii) compatibilità, (iii) autenticità e conservazione dei materiali (senza rimpiazzare o trasformare quelli originari). Per tutti questi motivi, è stato recentemente proposto dagli autori l’impiego delle corde in fibra di basalto anche per il consolidamento di colonne in muratura [16, 17]. Nel caso della Torre Lossetti l’utilizzo di tecniche come le iniezioni o l’intonaco armato è stato escluso per evitare di nascondere i caratteri peculiari della muratura a secco, per cui la tecnica delle cuciture in fibra di basalto è stata scelta come la più compatibile e reversibile, unica in grado di preservare completamente l’immagine della tessitura delle pareti in muratura. Sulla base di questi presupposti, l’intervento per rinforzare le pareti della torre è stato progettato in maniera “sartoriale”, ovvero con lo scopo di preservare quanto più possibile le caratteristiche peculiari del manufatto.

3. LA FASE DI CONOSCENZA

Prima di affrontare la progettazione dell’intervento, è stata effettuata una fase di conoscenza preliminare dell’edificio con l’esecuzione di un accurato rilievo geometrico, un studio tecnologico costruttivo e prove di laboratorio per la caratterizzazione meccanica della muratura (non risultano disponibili in letteratura dati riguardanti questa tipologia). Si è reso indispensabile un rilievo geometrico quanto più accurato poiché le cuciture in fibre di basalto devono essere ottimizzate specificatamente per il paramento su cui verranno applicate, non solo per limitarne al minimo l’impatto ma anche per ridurre i costi non necessari. A tale scopo è stato effettuato un rilievo laser scanner tridimensionale della torre. Ciò ha anche consentito la corretta rappresentazione delle considerevoli deformazioni delle pareti, non misurabili puntualmente, del quadro fessurativo ed una mappatura del degrado. Dopo lo sviluppo di un rapido metodo di estrazione dei dati direttamente dalla nuvola di punti, evitando le lunghe e complesse procedure di restituzione, le piante, le sezioni ed i prospetti sono stati generati interamente dalla estrapolazione di “tranci” della nuvola ed ortofoto (Figura 3). La scelta della metodologia utilizzata si basa su un compromesso tra velocità di esecuzione, costo e precisione dei dati raccolti [18]. Lo studio tecnologico della muratura a secco della Torre dei Lossetti è stato fondamentale al fine di comprendere come la modalità realizzativa di questo tipo di muratura può rappresentare una vulnerabilità per l’edificio. Da una prima analisi esterna, la muratura risulta costruita con lastre di pietra di dimensioni medio-grandi, grossolanamente

against each other. The voids between the facing stones are carefully packed with smaller stones (flakes and waste) to make the inside space of building guarded by wind, insects, etc. Greater staggered ashlar stones are used at the corners and better dressed (Figure 4c), probably to provide structural stability [3].

As regards mechanical characterization, two DSM square specimens (dimension: 110 x 100 x 70 cm) were reproduced in laboratory, the BF strengthening stitching was applied on one of these (“C” specimen), while

squadrate, apparecchiate con una tessitura regolare, sistemate in ricorsi quasi orizzontali e con giunti sfalsati (Figura 4a). Piccoli pezzi di pietra sono stati aggiunti in diversi punti al fine di riempire i vuoti lasciati dalle forme irregolari dei blocchi principali circostanti (Figure 4b). In realtà i muri sono costituiti da due facciate portanti, la maggior parte degli elementi sono sistemati nella direzione principale del muro (ortostati) e localmente delle pietre più lunghe sono posizionate a collegare entrambe le facce della parete (diatoni). Queste hanno il compito di connettere quelle che altrimenti sarebbero due sottili

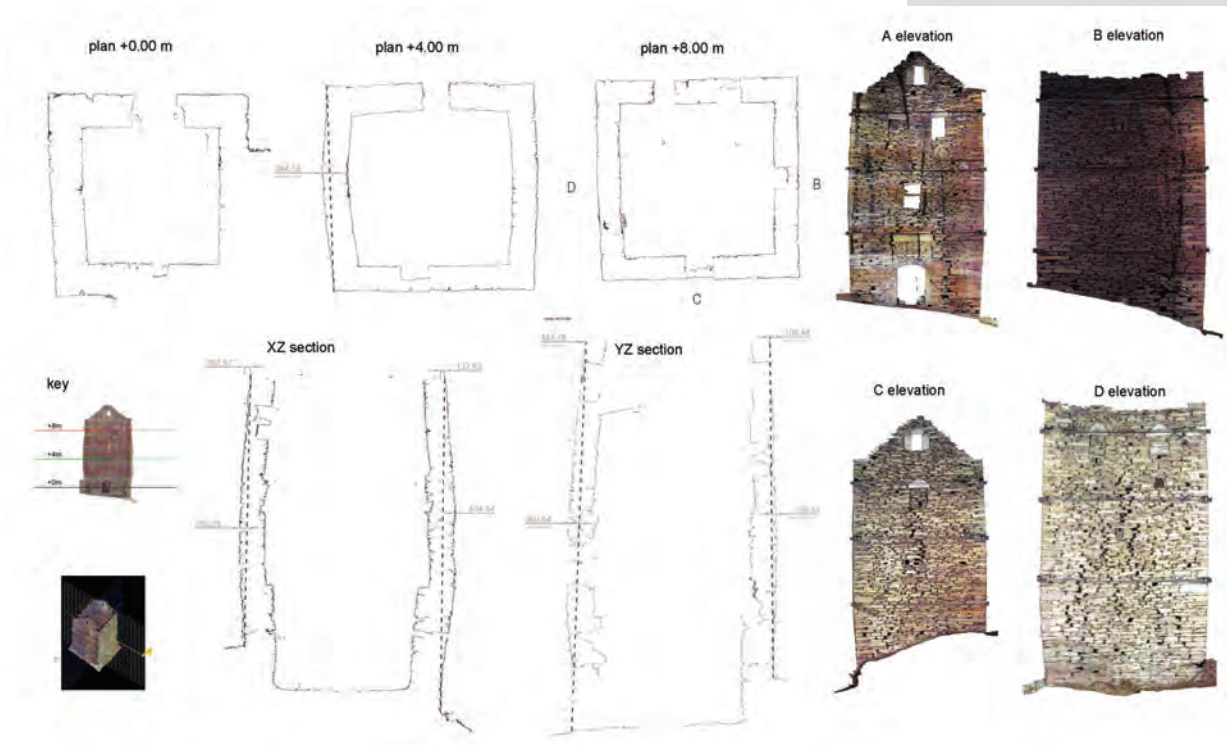


Figure 3. 2D drawings obtained from the point cloud slices: plans, sections and elevations.



Figure 4a (left). Typical DSM texture. Figure 4b (centre). Flakes and small pieces of stone placed for filling the gaps left by the irregular shapes of the surrounding blocks. Figure 4c (right). Reinforced angles.

the other was tested in unreinforced conditions (“NC” specimen), as can be seen in Figure 5. The strengthening stitching technique was performed by choosing a drilling holes disposal (and so the resulting mesh) able to hold as many stones as possible.

pareti semplicemente appoggiate l'una contro l'altra. I vuoti tra queste facciate di pietra sono accuratamente riempiti con pietre più piccole (scaglie e macerie) al fine di rendere lo spazio interno della costruzione “ermetico” rispetto a vento, insetti, ecc. Pietre di dimensioni maggiori e meglio



Figure 5. DSM specimens reproduced in laboratory to be tested under diagonal compression load with (right) and without (left) the BF strengthening stitching.

The specimens were tested under diagonal compression load adapting the diagonal compression test to the in situ conditions (Figure 6), following similar experiences [19, 20]. The specimens were subjected to a compressive force applied on one of its diagonals. The test setup is performed with some steel elements placed on two edges of the panel and two steel bars set diagonally on the two sides of the panel. All the tests were carried out using a hydraulic, manually activated jack.

squadrate sono state utilizzate negli angoli (Figura 4c), con lo scopo di fornire stabilità strutturale [3]. Per quanto riguarda la caratterizzazione meccanica, sono stati riprodotti in laboratorio due campioni di muratura a secco (dimensioni: 110 x 100 x 70 cm). Il consolidamento è stato applicato su uno solo di questi (il campione “C”), mentre l'altro è stato testato in condizioni non rinforzate (campione “NC”), come si può vedere dalla Figura 5. La tecnica di consolidamento è stata eseguita scegliendo una



Figure 6. Test set-up for diagonal compression test conducted on DSM specimens.

During the test the values of the applied load and the diagonal displacements, measured respectively by pressure transducer and Linear Variable Displacement Transducers (LVDT) placed on each side, were recorded. In Figure 7 is reported the diagram that put in relation shear stress (τ) and shear strain (γ), calculated following prescription of [21]. Both specimens seems to have a first “rigid” behaviour, where the specimens tends to settle and react by friction and through the ashlar interlocking, (no cohesion is present since there is no mortar). It is worth to note that this settlement load is practically the same for each specimen. From here, each masonry panel starts to differentiate its response: the “NC” specimen has substantially a perfect plastic behaviour (its ashlars slip along horizontal joints once prevailed over friction and interlocking), while the consolidated one (“C” specimen), instead, start to be stiffened by the BF stitching and a linear behaviour can be observed up to the end of the test, occurred when the BF ropes laying along the tensile stressed diagonal collapsed.

disposizione delle forature (e di conseguenza, una maglia risultante) capace di abbracciare quante più pietre possibili.

I campioni sono stati testati applicando un carico di compressione lungo la diagonale adattando la procedura di prova alle condizioni in situ (Figura 6), sulla base di esperienze simili [19, 20]. Il dispositivo di prova è stato realizzato mediante un telaio di acciaio costituito da due tiranti posizionati in corrispondenza di ogni faccia uniti a delle travi di contrasto posizionate in corrispondenza degli angoli del provino. L'applicazione del carico è avvenuta per mezzo di un martinetto idraulico ad attivazione manuale.

Durante la prova sono stati registrati sia il valore del carico applicato che degli spostamenti lungo la diagonale compressa, misurati rispettivamente mediante un trasduttore di pressione e un trasduttore di spostamento (LVDT) posizionato su ogni lato.

In Figura 7 è riportato il diagramma che collega lo sforzo tangenziale (τ) e la deformazione tangenziale (γ), calcolato applicando la formulazione proposta in [21]. Entrambi i campioni sembrano avere un comportamento iniziale totalmente “rigido”, dove

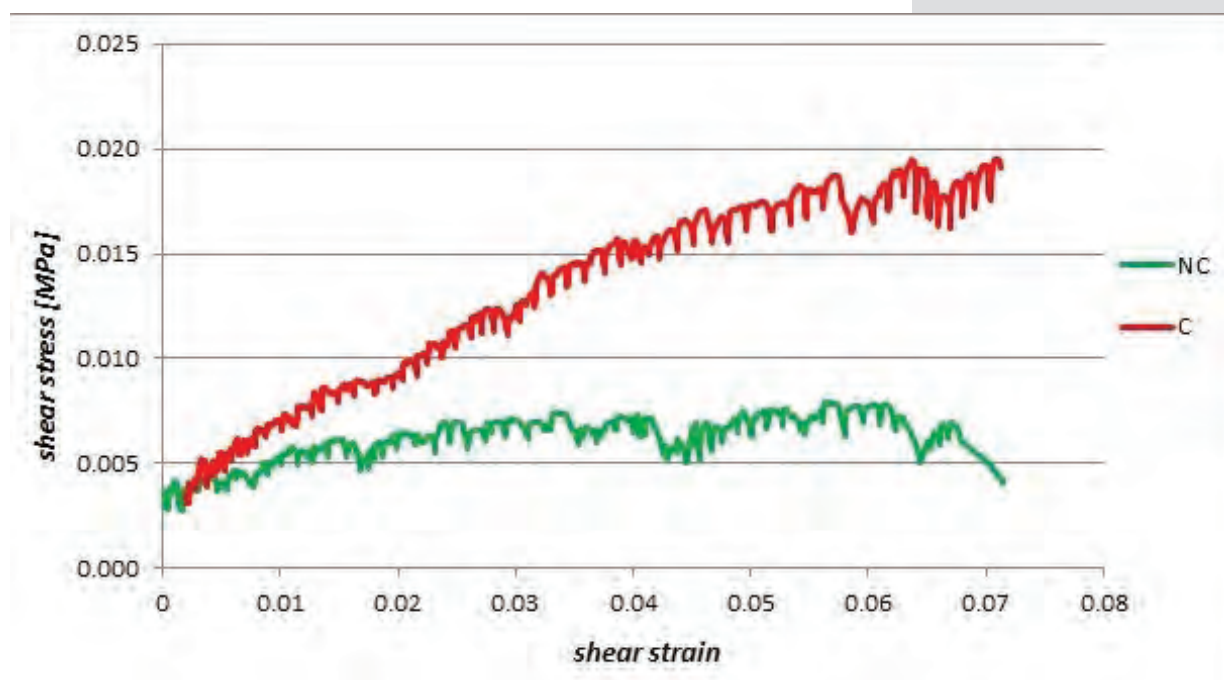


Figure 7. Shear stress–angular strain diagram of the DSM specimens subjected to diagonal compression test.

4. STRENGTHENING INTERVENTION

The conclusions of the knowledge process of interest for the definition of the intervention are:

- the DSM of the tower can be considered as “multi-leaf masonry”, due to the lack of elements so long to so long to cross the wall section and to the poor connection between the external leaves. Therefore it could result very

tendono ad assestarsi e a reagire per attrito e attraverso le interconnessioni (non si parla di coesione dal momento che non c'è malta). Va notato che questo carico di assestamento è praticamente lo stesso per entrambi i campioni.

Successivamente, i due pannelli differenziano la risposta: il non consolidato ha sostanzialmente un comportamento perfettamente plastico (i conci scorrono lungo i giunti orizzontali una volta vinta la resistenza dell'attrito e dell'ingranamento), mentre il campione consolidato

weak under eccentric and horizontal loads, as out-of-plane seismic actions [22, 23] and it is reasonable to suppose that the masonry does not perform as a monolithic structure under seismic loads;

- the DSM texture appears very disconnected, crossed by serious cracks, also because of the lack of the floors that result a little connection between different parts of the structure, meaning high effective lengths of the heavy walls;
- the walls have a very serious plumb line deviation;
- the proposed technique results effective in consolidating and enhance structural performance of the particular kind of brickwork in question.

Exploiting the three-dimensional geometric model - complete to provide all the necessary information of the building - the stitching lay out was designed with a dual purpose: on the one hand, to impart a monolithic behaviour to DSM walls, on the other to contribute to the “box-like behaviour” of the structure. In fact, without monolithic behaviour, a chaotic failure has to be expected, as said, and it is not right to reasoning about failure mechanism activation while the application of continuous BF stitchings can validate the fundamental assumptions that underlie the macro-elements kinematics analysis. Furthermore, in order to rely also on a mutual connection between orthogonal walls, it has been studied a path of the seams for this purpose to place in work on edges (Figure 8).

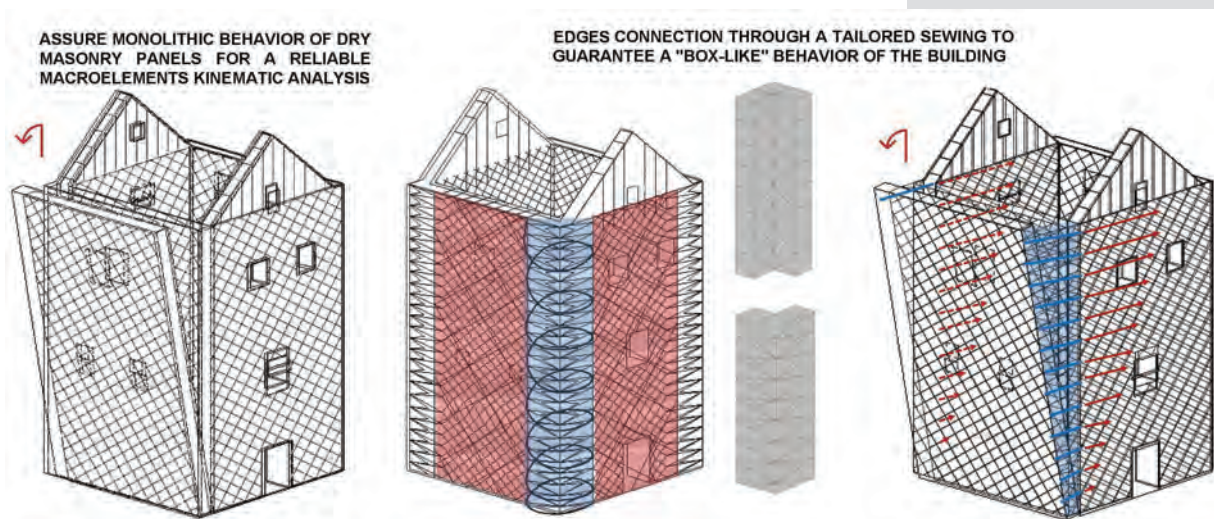


Figure 8. The objectives of the intervention: monolithic behaviour of the DSM panels, and “box-like” behaviour of the building.

Finally, to avoid the problem of sharp edges, which is critical for the fibres, flexible metallic elements were designed and used to protect the basalt ropes from the stones surface and its edges. To be effective, these “funnels” must be of the correct length to ensure good penetration within the masonry (Figure 9).

risente della presenza delle cuciture, e mostra un comportamento lineare ma più rigido, con andamento crescente fino alla fine della prova, che avviene per la rottura della corda disposta lungo la diagonale soggetta a sforzo di trazione.

4. L'INTERVENTO DI CONSOLIDAMENTO

I punti salienti della fase di analisi che hanno guidato la progettazione dell'intervento possono essere sinteticamente riassunti come di seguito:

- la muratura a secco della torre può essere considerata una muratura multi paramento, a causa della mancanza di elementi disposti nella direzione dello spessore del muro, di lunghezza tale da poter fungere da collegamento efficace tra le cortine esterne, pertanto molto vulnerabile nei confronti delle azioni orizzontali, come quelle indotte dal sisma [22, 23] ed è ragionevole pensare che non abbia un comportamento monolitico;
- l'apparecchio murario appare notevolmente disconnesso, attraversato da profonde lesioni passanti, probabilmente anche per la mancanza dei solai che erano in grado di esercitare un seppur lieve collegamento tra le parti e contribuivano a ridurre la lunghezza libera delle pareti perimetrali;
- le pareti della torre soffrono di evidenti e consistenti fuori piombo;
- la tecnica proposta risulta efficace nel consolidare la muratura in pietra a secco e nell'incrementare le prestazioni di questo particolare

tipo di muratura.

Sfruttando il modello geometrico tridimensionale - esaustivo nel fornire tutte le informazioni necessarie sull'edificio - il lay out delle cuciture è stato progettato con un duplice scopo: in primo luogo si è mirato a conferire monoliticità alle

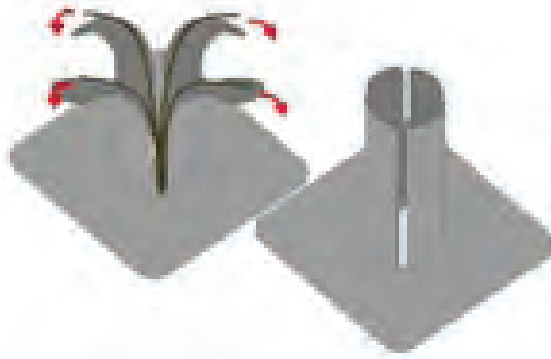


Figure 9. Study drawings and in situ tests for the definition of the final shape of the metallic devices used to avoid the problem of sharp edges.

Thanks to the detail provided during the data acquisition phase, it was possible to obtain a maximum relative deviation between the segments to be added to the length of the “funnels”. With this information, it was possible to design properly the restoration, optimising procedures and reducing unnecessary costs.

5. CONCLUSIONS

This paper presents a case study of strengthening intervention of a DSM building, the Lossetti Tower of Beura-Cardezza, located in Italy, in Piemonte region, with focus on the application of the innovative strengthening technique of continuous BF stitchings.

The described intervention represents an important reference not only because of the kind of masonry used to build the tower, but also due to the fact that this technique was preferred because considered the most compatible and reversible, and probably the only one able to preserve completely the texture of the DSM walls, being very sensible to the need of preserving the building’s identity and authenticity.

The intervention design was based on an integrated work methodology that included geometry information acquisition on the existing structures and the execution of mechanical tests. The result was a tailored design of the strengthening system, with the objective of monolithic behaviour of the bearing panels, and “box-like” behaviour of the building.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank Arch. Gianni Bretto and the municipality of Beura-

murature portanti, in secondo luogo a incrementare il comportamento scatolare della struttura con una particolare disposizione delle corde in corrispondenza degli angoli (Figura 8).

Se infatti, l’assenza di monoliticità non consente di analizzare e controllare nemmeno un comportamento per meccanismi locali, a valle del consolidamento è possibile verificare le prestazioni della struttura con le procedure tipiche dell’analisi cinematica lineare.

Infine, per scongiurare problemi di troncamento delle corde per effetto dei bordi taglienti delle pietre dove queste vanno sistemate, sono stati progettati appositi dispositivi di protezione metallici da inserire nei punti dove la cucitura attraversa lo spessore del muro.

Per essere efficaci, questi dispositivi devono avere dimensioni adeguate alla forma ed alla posizione delle pietre dove devono essere collocati. Solo grazie all’elevato livello di dettaglio ottenuto durante le fasi di rilievo è stato possibile ricavare tutti i dati (come lo scostamento relativo del filo esterno di ogni pietra) per ottimizzare la realizzazione dei “paraspigoli” riducendo i costi non necessari e garantendone l’efficacia (Figura 9).

5. CONCLUSIONI

In questo contributo è stato presentato il caso studio dell’intervento di consolidamento della Torre dei Lossetti di Beura Cardezza (Piemonte, Italia), eseguito mediante l’applicazione dell’innovativa tecnica delle cuciture continue in fibra di basalto. L’intervento descritto rappresenta un importante riferimento, non solo per il tipo di muratura costituente la torre, ma anche per il fatto che questa tecnica è stata preferita ad altre più note ma più invasive, perché considerata come la più compatibile e reversibile tra quelle proposte e probabilmente l’unica in grado di preservare completamente la texture originale della muratura in pietra secca, particolarmente rappresentativa dell’arte di costruire del luogo. Il

Cardezza for their support in this work. The authors are very grateful to Prof. P. Clini and Eng. R. Nespeca for their contribution in survey activities. The students S. Senigalliesi and M. Tittarelli who participated in the various design phases and data analysis are acknowledged. Special thanks are directed to Restauri Innovativi Tecnologici Ilc that performed the intervention, for material supply in laboratory tests.

7. REFERENCES

- [1] Bretto G., *La Torre dei Lossetti di Beura Cardezza, in Manuale per il recupero del patrimonio architettonico di pietra tra Verbano Cusio Ossola e Canton Ticino*, Zerbinatti M. (a cura di), Verbania (Italy): Provincia del Verbano Cusio Ossola, 2014, (in italian).
- [2] Zerbinatti M. et al., *Recovery of stone architectural heritage*. Proc. of the 9th International Masonry Conference, Guimaraes, Portugal, 7-9 July 2014, Paulo B. Lourenço, Barry Haseltine, Graça Vasconcelos (Ed.) International Masonry Society, 2014, ISBN 9789728692872
- [3] Grazzini A., Quagliarini E., *Dry stone masonry: mechanical characteristics and seismic retrofit*. Proc. of the 9th International Masonry Conference, Guimaraes, Portugal, 7-9 July 2014, Paulo B. Lourenço, Barry Haseltine, Graça Vasconcelos (Ed.) International Masonry Society, 2014, ISBN 9789728692872
- [4] Giuffrè A., *Lecture sulla meccanica delle murature Storiche*, Roma: Kappa, 1991, (in italian).
- [5] Doglioni F. et al. (a cura di), *Le chiese e il terremoto*, Trieste: LINT, 1994, (in italian).
- [6] Quagliarini E. et al., *Strengthening three-leaf masonry panel with basalt fibre ropes. First experimental data*, Proc. of 5th Int. Congr. "Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin", Istanbul, Turkey, 22-25 Nov. 2011, Valmar Ed., Roma, 2012, pp. 276-283. ISBN: 9788890563980
- [7] Quagliarini, E. et al., *Masonry strengthening through basalt fibre ropes. Experimental and analytical results*. In Proc. of SAHC 2012 – 8th Int. Conf. on Structural Analysis of Historical Constructions - Wroclaw, Poland, 15th-17th Oct. 2012, Vol. 2, pp. 1905-1913. DWE, 2012, ISBN: 9788371252181.
- [8] Monni F. et al., *Basalt ropes: a new product for the rehabilitation of historical masonry*, in Proc. of the Int. Conf. of Preservation, Maintenance and Rehabilitation of Historical Buildings and Structures, Tomar, Portugal, 19-21 Mar. 2014, Amoeda R., Lira S., Pinheiro C., (Editors), Green Lines Institute, 2014, Vol. 2, pp. 1089-1097, ISBN 978-989-8734-02-0.
- [9] Monni, F., *Basalt fibre stitchings: a new technique for strengthening masonry*. TeMA: Tempo, Materia, Architettura 1, pp. 71-76, 2015, ISSN 2421-4574.
- [10] Quagliarini E. et al. *La pietra che tiene unita la pietra: il Sistema Ticorapsimo® per il consolidamento di murature storiche*. 1st part: Structural 182, pp. 1 - 12, 2nd part: Structural 183, pp. 1 - 13, De Lettera Ed., 2013, ISSN 2282-3794 (in italian).
- [11] Monni F. et al., *Dry masonry strengthening through basalt fibre ropes: experimental results versus out-of-plane actions*, Key Engineering Materials 624, pp. 584 – 594, ISSN: 1662-9795, doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.624.584, 2015.
- [12] Quagliarini E. et al., *A novel and sustainable application of basalt fibres for strengthening unreinforced masonry walls*. Journal of Natural Fibers 14, pp. 97-111, doi: 10.1080/15440478.2016.1163763, 2017.
- [13] Monni et al., *Pre-tensioned basalt fibres ropes stitching for masonry strengthening against vertical bending: a first experimental insight*. Key Engineering Materials, Vol. 747, pp. 119-127, ISSN: 1662-9795, doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.747.119, 2017.
- [14] Quagliarini E. et al., *Tensile characterization of basalt fibre rods and ropes: A first contribution*. Construction and Building Materials 34, pp. 372-380, doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.080, 2012.
- [15] Quagliarini E. et al., *Basalt fibre ropes and rods: durability tests for their use in building engineering*. Journal of Building Engineering 5, pp. 142–150, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2015.12.003, 2016.
- [16] Monni F. et al., *New materials and technologies in architectural heritage restoration: masonry columns confinement using basalt fibres ropes*. TeMA: Tempo, Materia, Architettura 2, pp. 77-86, 2016, ISSN 2421-4574.

progetto di intervento è stato basato su una metodologia di lavoro integrata che ha contemplato l'acquisizione di dettagliate informazioni sulla geometria delle strutture esistenti, un preciso studio della tecnologia costruttiva e l'esecuzione di prove di caratterizzazione meccanica. Il risultato è stato un progetto "sartoriale" del sistema di rinforzo, su misura per il monumento in questione, con l'obiettivo di conferire monoliticità alle pareti portanti e garantire il comportamento scatolare dell'intero edificio.

6. RINGRAZIAMENTI

Gli autori intendono esprimere il loro ringraziamento all'Arch. Gianni Bretto ed al Comune di Beura-Cardezza per il loro supporto nello svolgimento delle attività descritte nel presente lavoro. Sono inoltre grati al Prof. P. Clini e all'ing. R. Nespeca per il loro contributo nell'ambito delle attività di rilievo, ed alle studentesse S. Senigalliesi e M. Tittarelli che hanno partecipato alle attività di progettazione e analisi dei dati. Un ringraziamento speciale, infine, alla ditta esecutrice dell'intervento, la Restauri Innovativi Tecnologici Srl, che ha anche fornito i materiali per le prove di laboratorio.

- [17] Quagliarini, E. et al., *Flexible repointing of historical facing-masonry column-type specimens with basalt fibres: A first insight*. Journal of Cultural Heritage 24, pp. 165–170, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2016.11.003>, 2017.
- [18] Nespeca R. et al., *Laser scanner surveying for accurate planning using an innovative restoration technology. The dry-stone architecture of the Beura-Cardazza Tower*. In Italian Survey & International Experience, Proc. of 36° Convegno Internazionale dei Docenti della Rappresentazione - Parma, Italy, 18-20 sept. 2014, Giandebiaggi P. e Vernizzi C. (Ed.), Gangemi Editore, Roma, 2014, ISBN 978-88-492-2915-8
- [19] Borri A. et al., *Shear behavior of unreinforced and reinforced masonry panels subjected to in situ diagonal compression tests*, Construction and Building Materials 25, pp. 4403–4414, 2011, doi:[10.1016/j.conbuildmat.2011.01.009](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.01.009)
- [20] Brignola A. et al. *Identification of shear parameters of masonry panels through the in-situ diagonal compression test*, International Journal of Architectural Heritage, 3:1, pp. 52-73, 2008, <http://dx.doi.org/10.1080/15583050802138634>
- [21] ASTM E 519-02: Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages. ASTM International: West Conshohocken (PA) 2002.
- [22] Giaretton M. et al., *Out-of-plane shake-table tests of strengthened multi-leaf stone masonry walls*, Bulletin of Earthquake Engineering, 2017, DOI: [10.1007/s10518-017-0125-7](https://doi.org/10.1007/s10518-017-0125-7) 15
- [23] Corradi M. et al., *The use of transverse connectors as reinforcement of multi-leaf walls*, Materials and Structures 50, 2017, DOI [10.1617/s11527-016-0977-3](https://doi.org/10.1617/s11527-016-0977-3)