

Restauro storico artistico e miglioramento sismico: la messa in sicurezza e realizzazione di un nuovo sistema di supporto del pulpito della Passione in bronzo di Donatello della Basilica di San Lorenzo a Firenze.

Antonio Mignemi ^a, Alberto Lemme^b, Carmenzo Miozzi^c, Mattia Mercante^d, Maria Donata Mazzoni^d

^a *Titolare Mimarc S.r.l., Via Giosuè Carducci, 30, 67100 L'Aquila (Italy)*

^b *Libero professionista, Viale Dei Pentri n. 277, 86170 Isernia*

^c *Libero professionista, Via Papa Giovanni XXIII, n. 9/B, 86100 Campobasso*

^d *Opificio delle Pietre Dure, Via Alfani, 78 - 50121 Firenze (Italy)*

Keywords: vulnerabilità sismica, beni artistici, beni culturali, pulpito della Passione

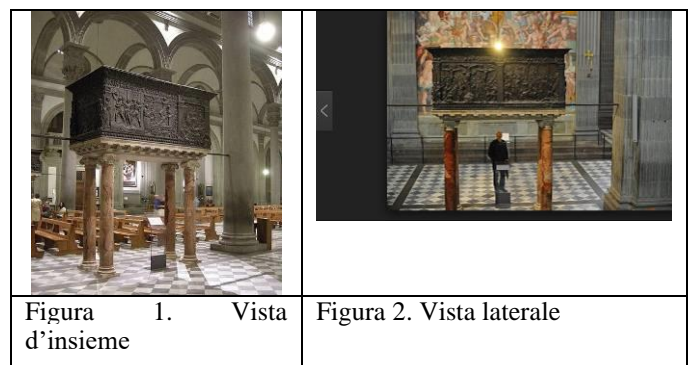
SOMMARIO

Il pulpito della Passione è uno dei due pulpiti bronzei di San Lorenzo a Firenze, opera dello scultore fiorentino Donatello. Essi risalgono a dopo il 1460 e il maestro ne curò la progettazione e il disegno anche se è probabile che le altre fasi vennero curate da aiutanti. Misura 280 cm di lunghezza e 137 di altezza (escluse le colonne), è collocato a sinistra della navata centrale. Le scene bronzee rappresentano gli episodi della Passione di Cristo mentre la scena con la Flagellazione e lo sportello di chiusura con San Giovanni Evangelista intagliati in legno risalgono ai primi anni del XVII secolo. Il lavoro di restauro è stato curato ed eseguito dall'Opificio delle Pietre Dure di Firenze. L'intervento è stato previsto tenendo conto come il restauro storico artistico degli apparati decorativi e architettonici e il miglioramento sismico sono interventi che interagiscono tra di loro e in questo caso si può evidenziare come sia possibile definire una vulnerabilità sismica valutata in funzione delle caratteristiche intrinseche del Bene stesso. Partendo dalla definizione dello stato limite di danno ai beni artistici (s.l.a.)¹ è stata valutata la vulnerabilità del pulpito prima e dopo l'intervento di consolidamento strutturale effettuato dopo il restauro.

collegata al basamento e attraversa il pulpito longitudinalmente.

1 DESCRIZIONE DEL PULPITO, GENESI E STORIA

Il *pulpito della Passione* è uno dei due pulpiti bronzei di San Lorenzo a Firenze, ultima opera dello scultore fiorentino Donatello, all'epoca settantenne. I pulpiti risalgono a dopo il 1460 e il maestro ne curò la progettazione e il disegno anche se è probabile che le altre fasi vennero curate da aiutanti. Le scene bronzee rappresentano gli episodi della Passione di Cristo mentre la scena con la Flagellazione e lo sportello di chiusura con San Giovanni Evangelista intagliati in legno risalgono ai primi anni del XVII secolo. Il pulpito è composto da un basamento marmoreo sorretto da quattro colonne lapidee collegate alle colonne laterali con una barra in acciaio di forma rettangolare che è



Sul basamento poggiano una serie di pannelli bronzei, alcuni di essi collegati tra di loro con staffe in ferro, mentre altre parti vincolate da chiodature in rame sono agganciate ad una struttura interna che garantisce la stabilità.

¹ Linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008

L'intervento è stato previsto tenendo conto come il restauro storico artistico degli apparati decorativi e architettonici e il miglioramento strutturale sono interventi che interagiscono tra di loro e il progetto deve essere integrato e non può essere visto in modo separato. Pertanto in questo caso si può evidenziare bene come sui beni storico artistici è possibile definire una vulnerabilità valutata in funzione delle caratteristiche intrinseche del Bene stesso. Partendo dalla definizione dello stato limite di danno ai beni artistici (s.l.a.), introdotto dalle "Linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008", è stata valutata la vulnerabilità del pulpito prima e dopo l'intervento di restauro.

L'analisi del rischio sismico deve considerare il contenitore, individuato nella Basilica di S.Lorenzo, il supporto su cui è poggiato e lo stesso pulpito valutato globalmente come scatola e localmente come singoli pannelli.

L'impianto della Basilica, opera del Brunelleschi, è a croce Latina a tre navate con cappelle laterali, la navata centrale ha copertura piana mentre le navate laterali sono coperte da volte a vela e al termine della navata centrale il presbiterio è coperto da una cupola. I due pulpiti della Passione e della Risurrezione sono ubicati all'estremità della navata centrale verso il presbiterio al confine tra navata centrale e quelle laterali tra le ultime due colonne di cui una circolare e l'altra, quella terminale, a pianta quadrata. La facciata è a capanna degradante con pietra grezza a vista su cui si aprono tre portali e una apertura tamponata nella parte alta. La Basilica di S.Lorenzo ha una vulnerabilità globale medio bassa² a cui corrisponde un indice di rischio basso considerato anche che Firenze ricade in zona 3 a bassa sismicità.

Il supporto è composto da quattro colonne in pietra su cui è poggiata una lastra in pietra e il pulpito il tutto collegato longitudinalmente alle ultime due colonne dell'aula con una barra di acciaio di circa 60 mm *40 mm. Il collegamento garantisce un efficace controvento in direzione longitudinale mentre è minore in direzione trasversale e, in questa direzione, l'efficacia è affidata alla elasticità della barra di acciaio e ai

collegamenti con il basamento in pietra e con le colonne. Il pulito misura 280 cm di lunghezza e 137 di altezza (escluse le colonne) ed è composto da pannelli in bronzo poggiati sul basamento in pietra è interrotto in corrispondenza del lato lungo da un pannello mobile che consente l'accesso. I pannelli sono piani e il collegamento è garantito dalla struttura di supporto che è stata modificata con il progetto di restauro.



Figura 3. Vista esterna



Figura 4. Vista interna

A causa di un tentativo di furto di alcuni pannelli bronzei era stato installato, al suo interno, un sistema di vincolo in rame mediante una stratificazione di legni di rovere di sezione elevata, da una lamina di ferro e da un successivo strato di legno che ricopriva l'intera superficie interna del bronzo. Questo tentativo di protezione, oltre a coprire l'interno dei preziosi pannelli bronzei appesantiva l'intero basamento lapideo e impediva un restauro generale dell'opera. In figura è riportata una sezione generica e partendo dall'esterno troviamo il pannello bronzeo, il secondo strato di legno a contatto con i pannelli, la lamiera in ferro e lo strato esterno di legno collegato negli angoli con profili angolari in acciaio. I pannelli in bronzo sono collegati alla struttura in legno con chiodi in ferro.

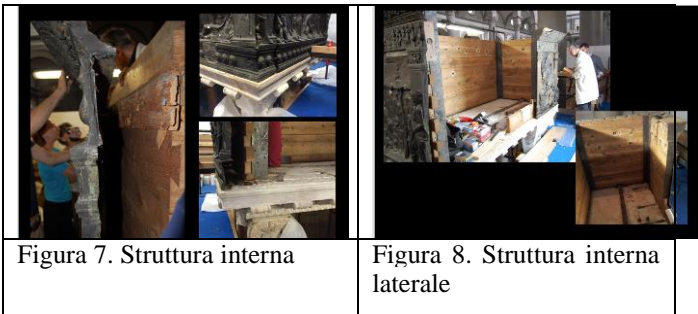


Figura 5. Particolare dispositivo collegamento

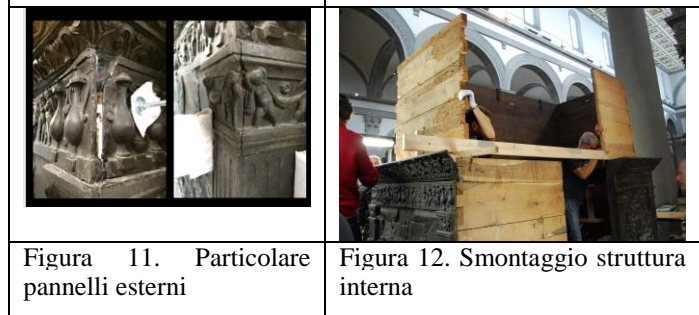
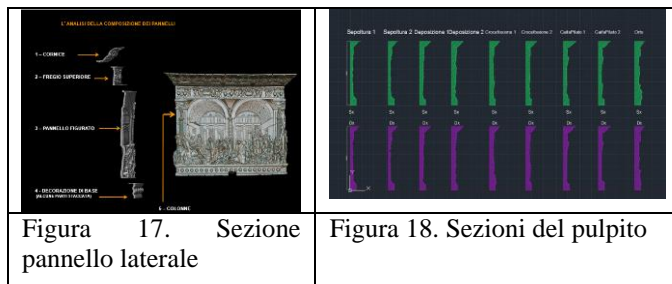
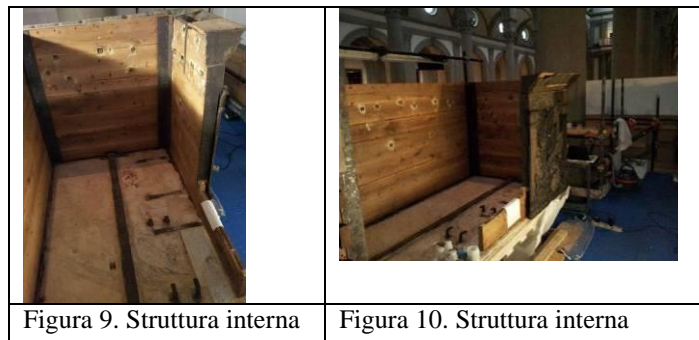


Figura 6. Struttura interna

² Vulnerabilità determinata con la scheda chiese a 28 meccanismi – direttiva 2011 Mibac



Dal rilievo si rileva che lo spessore è variabile da circa 1 cm a circa 2.4 cm e che i pannelli sono composti da una cornice superiore, da un fregio superiore, dal pannello figurato, dalla decorazione di base e da colonne laterali. Le parti sono separate e il vincolo è dato dall'appoggio e da collegamenti puntuali in acciaio applicati nella parte posteriore che in alcuni punti del pannello figurato hanno provocato una riduzione della sezione.

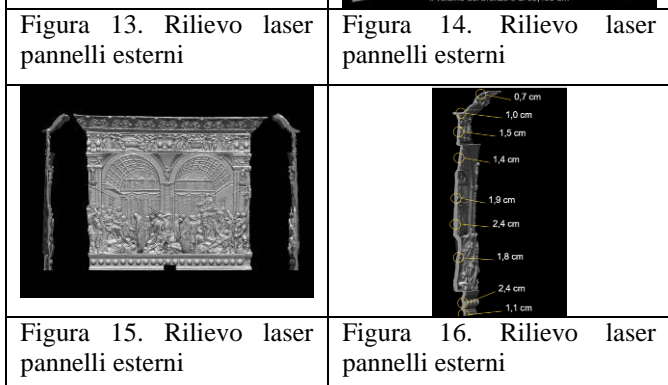
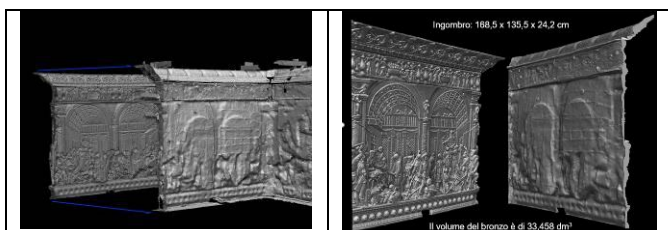


2 VERIFICA DI VULNERABILITÀ SISMICA

Gli interventi descritti nei paragrafi precedenti sono stati realizzati per garantire un collegamento stabile della struttura bronzea con la lastra basamentale e quindi per impedire anche la possibile attivazione di meccanismi di ribaltamento fuori dal piano a causa della scarsa capacità di ritenuta della precaria struttura preesistente in legno. Considerata la peculiarità della struttura rimangono però delle vulnerabilità legate al supporto realizzato con quattro piedritti sormontati da una massiccia lastra in pietra ancorati con un profilato in acciaio alle colonne adiacenti che delimitano la navata centrale della basilica. Se risulta improbabile l'attivazione di meccanismi di ribaltamento nel piano delle citate colonne per l'efficacia del presidio costituito dal profilato stesso che verrebbe sollecitato a trazione ed impedirebbe l'attivazione di meccanismi, non si può invece escludere l'attivazione di meccanismi nella direzione ad essa perpendicolare per il quale il tirante verrebbe chiamato ad esplicare l'azione di ritenuta del pulpito per flessione. A causa delle dimensioni ridotte e quindi la bassa rigidezza del profilo è opportuno stimare il valore dell'accelerazione orizzontale massima a cui può essere soggetto il Bene senza che questo riporti danneggiamenti significativi.

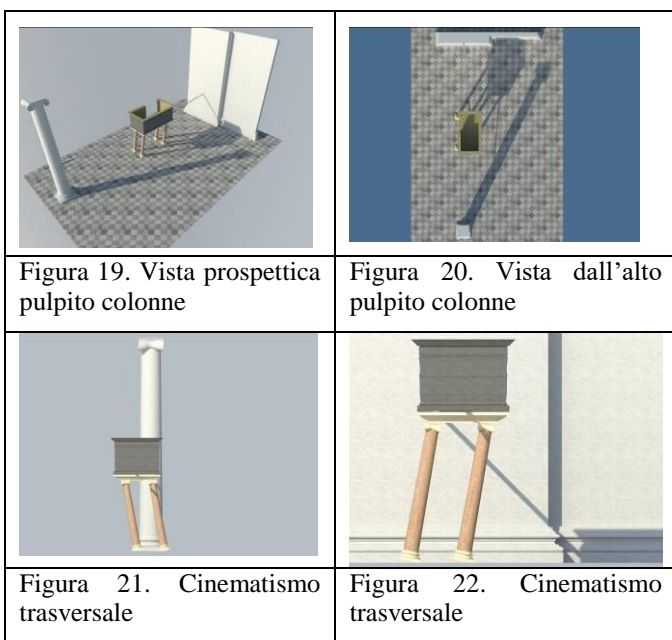
1.1 ANALISI DELLA INSTABILITÀ VERTICALE DEI PANNELLI

I pannelli bronzei sono stati rilevati digitalmente con la duplice finalità di documentare l'opera e determinare i dati geometrici con sezioni virtuali.



A tal proposito, in considerazione della deformabilità del sistema di ritenuta, le verifiche sono state eseguite avvalendosi dell'analisi non

lineare dei meccanismi locali di collasso prevista dalla normativa tecnica approvata con decreto ministeriale 14 gennaio 2008, ad oggi vigente.



Dopo aver individuato i corpi rigidi costituenti la catena cinematica, definiti in corrispondenza della separazione dei piedritti dalla lastra, che si ipotizza solidale con il pulpito, si è provveduto a valutare l'evoluzione del moltiplicatore orizzontale dei carichi al crescere dello spostamento in un punto di controllo che nel presente caso corrisponde al baricentro del pulpito.

Il moltiplicatore di collasso nella configurazione iniziale indeformata, mostrato nell'espressione seguente, è definito come rapporto tra il momento ribaltante e quello stabilizzante, la funzione u rappresenta invece lo spostamento orizzontale del pulpito:

$$\alpha_0 := \frac{(P_3 + P_2 + 4P_3) \cdot \frac{d_1}{2}}{P_3 \left(h_1 + h_2 + \frac{h_3}{2} \right) + P_2 \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right) + 4P_1 \cdot \frac{h_1}{2}} \quad (1)$$

$$u(\theta) := \left(d_1^2 + h_1^2 \right)^{0.5} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\beta_1 + \theta) \quad (2)$$

dove

i pedici 1, 2 e 3 si riferiscono al pulpito, alla lastra e ai piedritti, rispettivamente

con P si indicano i pesi dei vari elementi,

con h si indica l'altezza,

con d il diametro medio dei piedritti,

θ è l'angolo di rotazione in corrispondenza dei piedritti

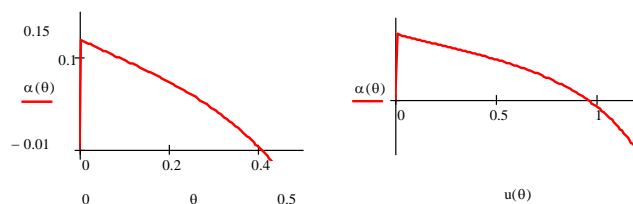


Figura 23: Andamento del moltiplicatore dell'azione sismica orizzontale valutato in funzione dell'angolo di rotazione in corrispondenza dei piedritti (a sinistra) e dello spostamento del pulpito (a destra).

In base alle valutazioni effettuate lo Stato Limite di danno ai beni Artistici (SLA), per il quale è stato assunto lo stesso modello di calcolo previsto per lo SLD, si raggiunge in corrispondenza dell'accelerazione 0.597 m/s^2 che corrisponde a 0.061 g , valore prossimo a 0.065 g indicato dalla vigente normativa per il territorio di Firenze e per un edifici con classe d'uso III (edifici oggetto di affollamento) e il livello di sicurezza, calcolato allo SLA, è pari a circa il 94% di quanto previsto dalle NTC2008 allo stato limite di danneggiamento. Proseguendo con l'analisi si è cercata l'accelerazione in corrispondenza dello stato limite di salvaguardia della vita, ricerca fatta in termini di spostamenti massimi. Nel caso specifico si è scelto di effettuare le valutazioni avendo come limite la plasticizzazione del profilo in acciaio che contribuisce ad un'azione di ritenuta del pulpito e della struttura lapidea, tenendo conto che già per spostamenti compresi tra lo SLA e lo SLV potrebbero esserci rotture parziali nella struttura a partire dalla base dei piedritti per sollecitazioni di pressoflessione e/o scivolamenti rispetto al piano di calpestio della basilica. Si consideri inoltre che in considerazione dell'elasticità dell'elemento in acciaio e della massa del bene tutelato, in caso di azione sismica, rimane l'incertezza dovuta agli effetti di eventuali interazioni con il colonnato della basilica, effetti difficilmente quantificabili.

In riferimento al modello semplificato utilizzato lo spostamento orizzontale massimo del blocco pulpito-lastra risulta essere pari a circa 6.9 cm corrispondente al valore dell'angolo θ pari a circa 1.57° .

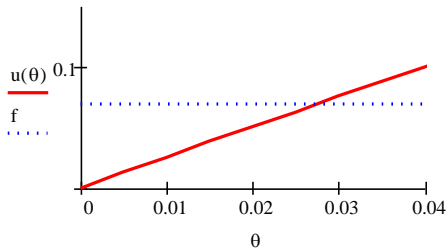


Figura 24. Andamento dello spostamento orizzontale del pulpito in funzione di θ con l'indicazione del limite (linea blu tratteggiata) oltre il quale avviene la plasticizzazione del profilo in acciaio.

Considerato che il periodo proprio di riferimento della catena cinematica è stato stimato in circa 0.9 secondi e quindi lo spostamento di riferimento dato dalla normativa è pari a 2.5 cm, le verifiche allo SLV risultano essere positive nell'ambito del modello semplificato utilizzato.

Tabella 1: Sintesi dei risultati ottenuti per le verifiche eseguite avvalendosi di modello di calcolo per meccanismi di collasso eseguita con un'analisi cinematica non lineare.

Stato	capacità	domanda	indice di sicurezza
SLA	0,061 g	0,065 g	94%
SLV	6,9 cm	2,5 cm	100%

Si rimarca comunque la convenzionalità del metodo e della schematizzazione del calcolo e si precisa altresì che la vulnerabilità del pulpito è comunque imprescindibile dalla capacità della basilica a non danneggiarsi in quanto anche per terremoti di bassa intensità il semplice distacco di elementi non strutturali sovrastanti il pulpito potrebbero risultare dannoso.

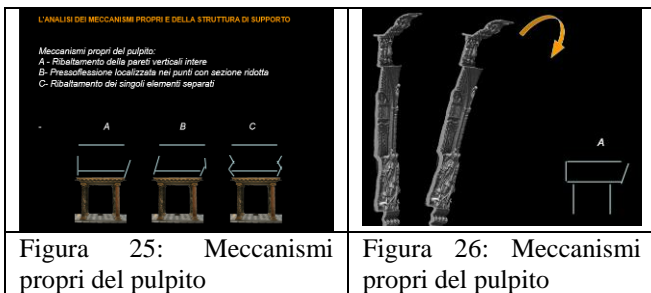


Figura 25: Meccanismi propri del pulpito

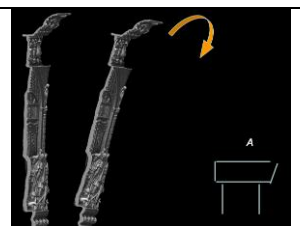


Figura 26: Meccanismi propri del pulpito

A ciò si aggiunge il degrado dei materiali nel corso degli anni.

3 L'INTERVENTO

L'intervento di restauro si è posto l'obiettivo di eliminare il degrado collegato anche alla configurazione statica dei pannelli come evidenziato dall'analisi svolta e dai dissesti

osservati alla base e in corrispondenza degli angoli. Alla base si è verificata la rottura del basamento per distacco di piccole porzioni sollecitate a compressione (circa 50-60 kg/cm²) e negli angoli è presente il ribaltamento dei pannelli, evidenziato la lesioni verticali, per scarsa efficacia del collegamento dovuto alla struttura lignea interna.

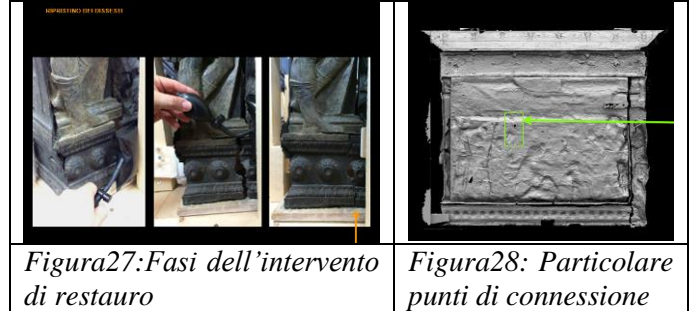


Figura 27: Fasi dell'intervento di restauro

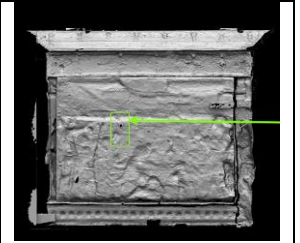


Figura 28: Particolare punti di connessione

Per eseguire l'intervento è stato necessario rimuovere la struttura interna e mettere provvisoriamente in sicurezza le parti bronzee con una imbracatura lignea autoportante. Successivamente sono stati realizzati rilievi 3D per analizzare volume, peso e funzionalità strutturale dei singoli pannelli bronzei necessari per realizzare il nuovo sistema di tenuta su misura previsto con elementi in acciaio inox sagomati in 3D.

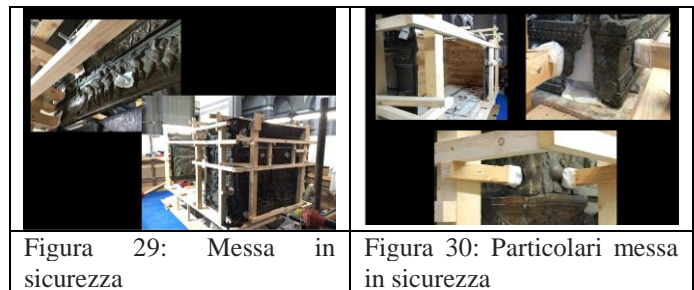


Figura 29: Messa in sicurezza



Figura 30: Particolari messa in sicurezza









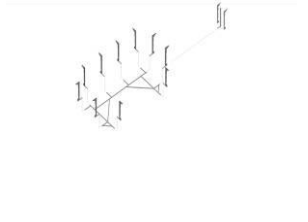
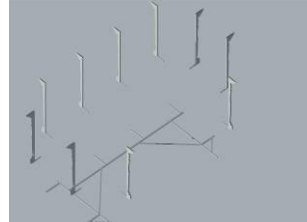
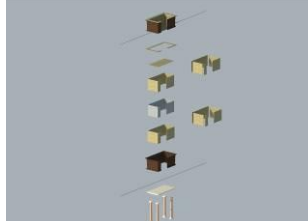
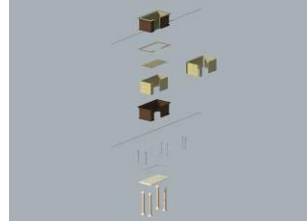
La nuova struttura di supporto è stata progettata per eliminare la possibilità di attivazione dei meccanismi individuati e trasferire il peso dei pannelli alla struttura esterna. Il sistema di rinforzo è composto da elementi in acciaio inox sagomati secondo il profilo interno dei pannelli dalla base alla cornice superiore aventi sezione di 2-3 mm. Gli elementi verticali sono collegati alla base ad un telaio in profili tubolari in acciaio inox da 50 mm e da un profilo tubolare della stessa sezione in corrispondenza del fregio superiore e da collegamenti puntali ai pannelli. Inoltre la configurazione del profilo è stata sagomata per inserirsi all'interno degli avvallamenti dei pannelli per sostenerli verticalmente.

4 CONCLUSIONI

In questo contributo si è voluto rappresentare una metodologia per la ricostruzione di architetture di interesse storico artistico che oltre al restauro e al recupero della forma e dei volumi si pone l'obiettivo di valutare la sicurezza sismica dell'opera. La metodologia di intervento proposta coniuga l'esigenza di ristabilire l'unità potenziale del manufatto senza impiegare materiali nuovi che sarebbero necessariamente differenti dal materiale presente. Inoltre è stata applicata una metodologia per l'analisi dei manufatti e la scelta degli interventi avente l'obiettivo di migliorare la sicurezza nei confronti delle azioni sismiche della parte strutturale e dell'apparato storico artistico in un rapporto equilibrato tra conservazione e sicurezza nel rispetto della direttiva per i BBCC che prevede la verifica allo Stato Limite Artistico. Con questo lavoro, inoltre, si è attivata una sinergia tra architetti, storici dell'arte, restauratori e ingegneri per ottimizzare tecniche e metodologie operative utili per il recupero e la ricostruzione critica del patrimonio storico artistico aquilano danneggiato dal terremoto.

5 BIBLIOGRAFIA

- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – DM 14.1.2008 (GU n.29 del 4.2.2008);
 Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Circ. 2-2-2009, n. 617
 Istruzioni per l'applicazione delle “Norme tecniche per le costruzioni”;
 DPCM 09.02.2011 Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, allineate con le Nuove Norme Tecniche per le costruzioni 2008 (NTC 2008);
 Barbara Sacchi, Istituto per la Conservazione e la valorizzazione dei Beni Culturali, Fenomeni di degrado fisici, chimici, e biologici dei materiali lapidei.

	
Figura 31: Particolari struttura interna	Figura 32: Particolare struttura di sostegno
	
Figura 33: Particolare struttura di sostegno	Figura 34: Particolare struttura di sostegno
	
Figura 35: Particolari struttura di sostegno	Figura 36: Particolari struttura di sostegno
	
Figura 37: Ferramenta per I collegamenti	Figura 38: Particolare struttura interna
	
Figura 39: Sistema di supporto in acciaio inox	Figura 40: Sistema di support in acciaio inox
	
Figura 41: Esploso prima dell'intervento	Figura 42: Esploso dopo intervento