

INGEGNERIA FORENSE, CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE E CONSOLIDAMENTO

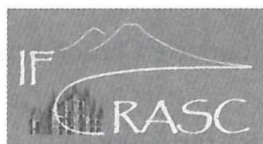
a cura di
Nicola Augenti e Lorenzo Jurina

TOMO 2

Atti del convegno IF CRASC '17 - 14/16 settembre 2017, Milano



Dario Flaccovio Editore



IF CRASC '17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO

INGEGNERIA FORENSE, CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE E CONSOLIDAMENTO

a cura di
Nicola Augenti – Lorenzo Jurina

Politecnico di Milano, 14/16 settembre 2017

ATTI

TOMO 2

Affidabilità strutturale - Consolidamento strutturale



Dario Flaccovio Editore

a cura di N. Augenti - L. Jurina

Ingegneria forense, Crolli, Affidabilità strutturale e Consolidamento - TOMO II

ISBN 9788857907208

© 2017 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

www.darioflaccovio.it

www.webintesta.it

magazine.darioflaccovio.it

Prima edizione: settembre 2017

In copertina

Cattedrale di Santa Maria Argentea a Norcia, crollata in seguito al sisma del 30 ottobre 2016

© Nicola Augenti

Le memorie qui raccolte sono state pubblicate nella forma sottoposta dagli Autori. Eventuali modifiche editoriali sono state eseguite laddove sono stati individuati errori o discrasie tali da compromettere una presentazione omogenea e coerente del testo.

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

Comitato Scientifico

Nicola Augenti (presidente), Jose M. Adam, Redha Attoui, Michele Barbato, Silvano Barberi, Roberto Bichi, Franco Bontempi, Antonio Borri, Claudio Chesi, Bernardino Chiaia, Norbert Delatte, Stefano Della Torre, Carolina Di Biase, Jean-Francois Douroux, Elisabetta Garzo, Ezio Giuriani, Alberto Grimoldi, Lorenzo Jurina, Paulo B. Lourenço, Xinzheng Lu, Bruno Macchiaroli, Guido Magenes, Vincenzo Maiello, Giulio Maier, Giuseppe Mancini, Gaetano Manfredi, Francesco Pirozzi, Antonella Ranaldi, Luca Rinaldi, Maria. D. Robador, Franco Roberti, Rosario Romano, Tiziana Rossetto, Mauro Sassu, Enzo Siviero, Alberto Taliercio, Kong Fah Tee, Tomaso Trombetti, Dimitrios Vamvatsikos, Humberto Varum, Gaetano Vallefucio

Comitato Organizzatore

Nicola Augenti, Lorenzo Jurina (coordinatore), Franco Bontempi, Fulvio Parisi, Stefano Della Torre, Claudio Chesi, Maria Adelaide Parisi, Maurizio Acito, Gabriele Milani, Patrick Bamonte, Sergio Tattoni, Edoardo Oliviero Radaelli, Maurizio Vannucchi, Marco Valente

Segreteria Organizzativa

Antonetta Nunziata, Edoardo Oliviero Radaelli

Llorens M., Llorens J., Bernuz J. Structural assessment of the modernist tiled vaults of the administrative pavilion of the “Hospital de la Santa Creu i Sant Pau”: methodology and preliminary results	569
Llorens M., Señís R., Moreno B., Pavón S. Monitoring of an external prestressing used as a strengthening technique in a historical masonry steeple	581
Maramotti Politi A.L. Perché le rovine sono da ritenersi pregevoli esteticamente? Das Ganze im fragment	593
Mantegazza G., Hadad H.A., Pino V., Nanni A. Performance of FRCC strengthened RC beams	609
Masera G., Imperadori M., Pitalieri E., Redaelli A., Tomasoni D. Carbon nets: structural reinforcement and seismic assessment of existing buildings with carbon strands (CABKOMA)	621
Massacci E., Gemmi B. Consolidamenti subfondali: dalle resine ai micropali attivi	633
Mazziotti A., De Luca A. The Chapel of the holy shroud by Guarino Guarini: structural system of the baroque dome	647
Mazziotti A., Jurina L. Tradition and innovation in the consolidation of rib vaults	659
Mazziotti A., Roca P. Non linear FE analysis for the damage evaluation of Santa Maria del Mar cathedral	671
Menna C., Parisi F., Prota A., Sodano S. Analisi sezionale a fibre di pannelli murari rinforzati con sistemi FRCC	683
Pertot G. Problemi antichi e moderni di vulnerabilità delle statue stanti: note a margine della nuova sistemazione della Pietà Rondanini di Michelangelo Buonarroti nel Castello di Milano	693
Pistone G., Ceravolo R., Lenticchia E. Survival of the historical wing of the former neuropsychiatric hospital of Racconigi (CN)	705

PROBLEMI ANTICHI E MODERNI DI VULNERABILITÀ DELLE STATUE STANTI: NOTE A MARGINE DELLA NUOVA SISTEMAZIONE DELLA PIETÀ RONDANINI DI MICHELANGELO BUONARROTI NEL CASTELLO DI MILANO

G. Pertot

Dipartimento di Architettura e Studi Urbani - DASTU, Politecnico di Milano

SOMMARIO

Le statue stanti (alte e snelle, e con base di appoggio di piccole dimensioni), in pietra, metallo o altri materiali, sono probabilmente i manufatti artistici non edilizi più esposti alle sollecitazioni esterne e richiedono quindi significativi interventi per mitigarne la vulnerabilità. La destinazione a Museo dedicato alla Pietà Rondanini dell'*Hospitale* spagnolo del Castello visconteo-sforzesco di Milano, oggetto di un recente intervento di restauro e conservazione, ha per esempio comportato lo studio e la realizzazione di una complessa soluzione antisismica e antivibrazioni per la celebre statua. Viene in questa sede confrontata con altre metodologie di intervento sulle statue stanti, e vengono proposte alcune considerazioni sulle implicazioni di questo genere di interventi su contesti storici fragili e pluristratificati.



Tom Frantzen, *Agent n° 15 et Vaartkapoen* (alias: “La canaglia del canale”), Bruxelles, 1985.

1. PROBLEMI E (POSSIBILI) SOLUZIONI

Come è noto, il termine *statua* deriva dal verbo latino *statuĕre*, che equivale a *stare facĕre*, letteralmente “far stare in piedi”, ma tale assertiva etimologia non è mai stata di per sé garanzia nei fatti di un’efficace e duratura stabilità. Lo sapevano bene gli antichi, per i quali

tra l'altro le statue *stanti* (ossia le raffigurazioni di persone o gruppi di persone in posizione eretta) a grandezza naturale o amplificata - numerosissime nei contesti urbani, sia all'aperto che al coperto - rappresentavano uno dei più efficaci veicoli di propaganda politica e di trasmissione dei valori civici e religiosi, oltre che una raffinata forma di rappresentazione dei canoni estetici. Come tali erano di norma collocate su basi e piedistalli, o poste entro nicchie o edicole in posizione elevata, così da accentuarne solennità e visibilità.

Per migliorare la stabilità era necessario un attento studio delle proporzioni e della postura, in modo da contenere il più possibile l'inclinazione della composizione e mantenere il baricentro centrato e basso. Norme da cui la *vis* creativa degli artisti tendeva a divergere, imponendo assai spesso il ricorso ad aiuti equilibranti. Nella statuaria metallica, che è cava, si potevano inserire contrappesi interni, ma la statuaria lapidea implicava il mantenimento nella composizione di sostegni dissimulati sotto forma di tronchi, clave, nemici atterrati, pepli, cornucopie, scudi e amorini, a seconda del soggetto rappresentato. In qualche caso anche libri, il che ha portato in dote al Tommaseo scolpito dal Barzaghi per campo Santo Stefano a Venezia un epiteto irripetibile coniato dallo spirito popolare all'indomani dello scoprimento della statua e tuttora in uso. Senza un solido tronco marmoreo di appoggio non sarebbero ritti né il David di Michelangelo né il Napoleone di Canova, per fare qualche esempio, e, senza un colonnotta piazzato dietro le terga, neanche le Tre Grazie.

In ogni caso questo astuto e variegato armamentario nulla o poco poteva nell'antichità in caso di sisma, come attestano le cronache e numerosi ritrovamenti in scavo (Fig. 1), e nulla o poco può anche ai nostri giorni, come purtroppo risulta dai resoconti degli effetti degli eventi più distruttivi. Cadde la statua argentea di Teodosio nel *Forum Tauri* di Costantinopoli per il sisma del 448 (più di sei secoli prima, nel 226 a.C., era caduto anche il Colosso di Rodi, *hors catégorie* nel novero delle statue stanti). Caddero quella della Madonna dalla

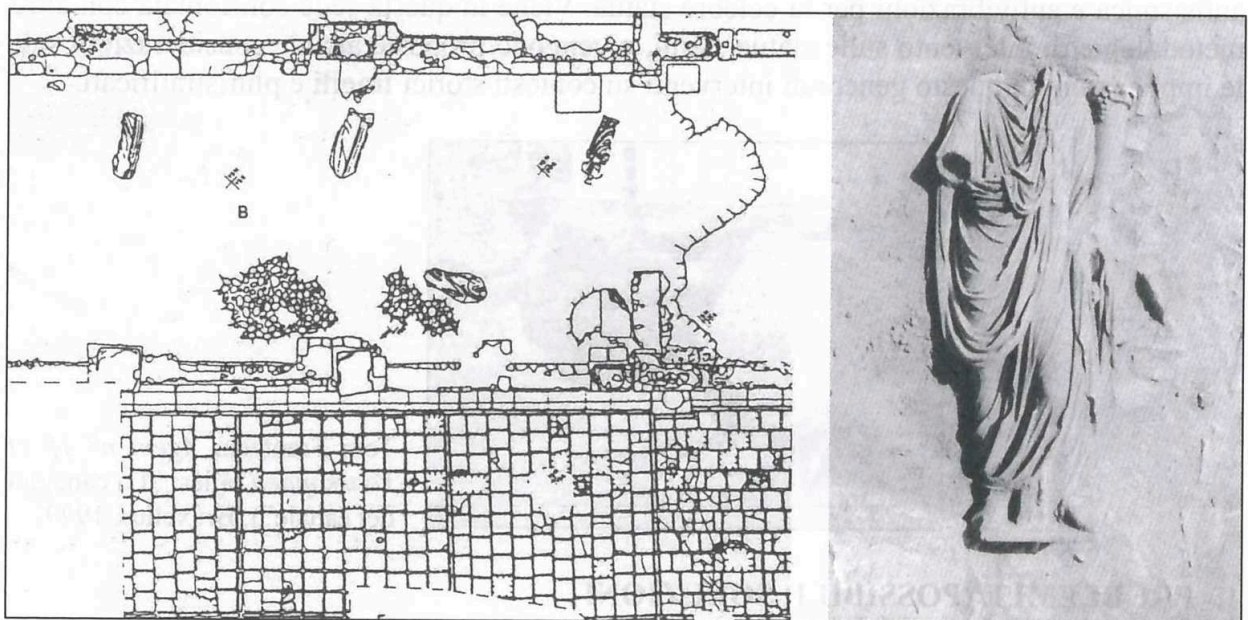


Figura 1. A sinistra: rilievo del foro della romana *Scolacium* (Roccelletta di Borgia - CZ), dove si notano quattro statue cadute in antico per effetto di un sisma, rinvenute durante scavi archeologici. A destra: particolare della statua del *Genius Augusti*. Da: Spadea R. (a cura di), *Da Skyllition a Scolacium. Il parco archeologico della Roccelletta*, Gangemi, Roma-Reggio Calabria, 1989, pp. 124 e 138.

facciata del Duomo di Pisa nel 1322 e quella di San Paolo dalla facciata della basilica di San Giovanni nel 1915 (terremoto della Marsica) e, più recentemente, il sisma che ha colpito l'Emilia nel 2012 ha fatto schiantare al suolo diverse statue della reggia di Colorno (PR) e una delle statue dei giardini Papadopoli a Venezia, mentre il terremoto abruzzese del 2016 ha tra l'altro portato a terra quella di Nicola Filotesio, figlio celebre di Amatrice (Fig. 2). Sono solo pochi casi, meramente esemplificativi, di un elenco che dovrebbe purtroppo essere assai più lungo.

Le statue stanti hanno infatti sempre manifestato, sia in antico che ai nostri giorni, una notevole propensione a cadere a terra dalle loro sedi durante un terremoto.

In altri termini: sono caratterizzate da una spiccata vulnerabilità sismica.

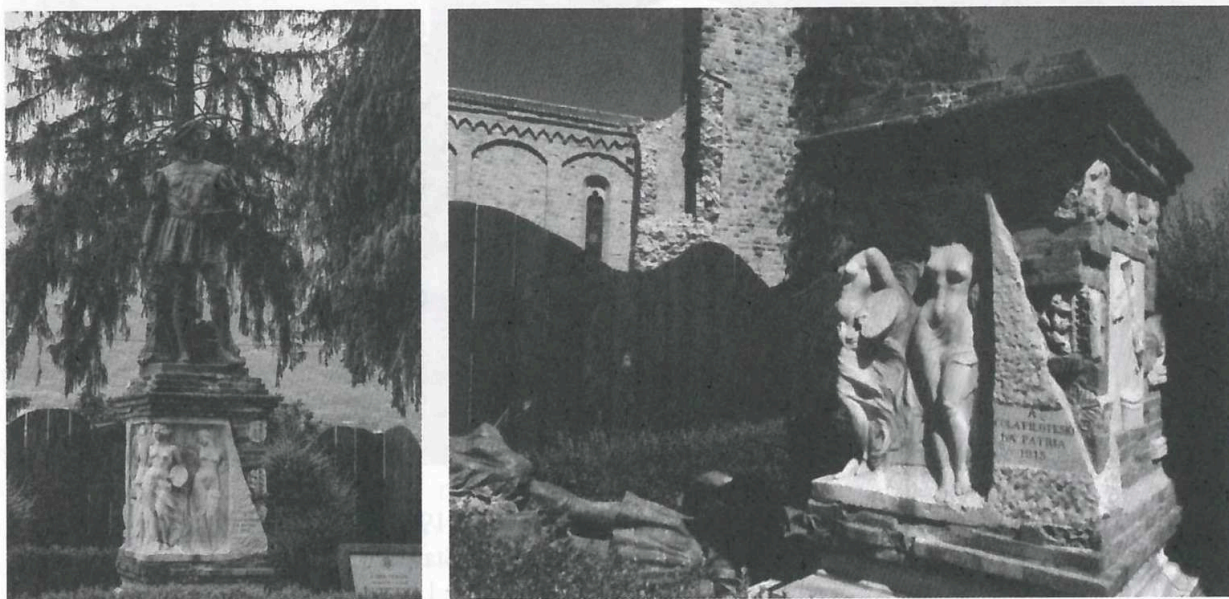


Figura 2. Amatrice (RI), basamento e statua di Nicola Filotesio (“Cola di Amatrice”) prima e dopo il sisma che ha colpito l’Italia centrale nell’agosto 2016

La statua semplicemente collegata al supporto da malta, o collocata in una sede in lieve sottosquadro, per effetto del sisma generalmente cade intera. E di solito si spezza e si frantuma all’impatto con il suolo.

Con qualche ‘fortunata’ eccezione, come nel caso - celebre - del simulacro di Louis Agassiz, naturalista ottocentesco di origine svizzera, collocato sulla facciata dell’edificio del dipartimento di zoologia della Leland Stanford Junior University, che il 18 aprile 1906 (terremoto di San Francisco), dopo essere stata sbalzata dalla sua sede sulla cornice al primo piano, cadde a terra e si conficcò a testa in giù nella pavimentazione del cortile (che ebbe i danni maggiori, mentre della statua si danneggiò solo il naso, che fu in seguito oggetto di un restauro di ripristino).

Agassiz in the concrete fu il titolo dato alla scena immortalata nell’immagine fotografica riprodotta alla pagina successiva (Fig. 3). Qualcuno, ironizzando sulla fama di teorico e di dotto studioso dell’insigne scienziato, sentenziò che “Agassiz was great in the abstract but not in the concrete”, giocando evidentemente sul doppio significato di *concrete* (calcestruzzo-concreto).

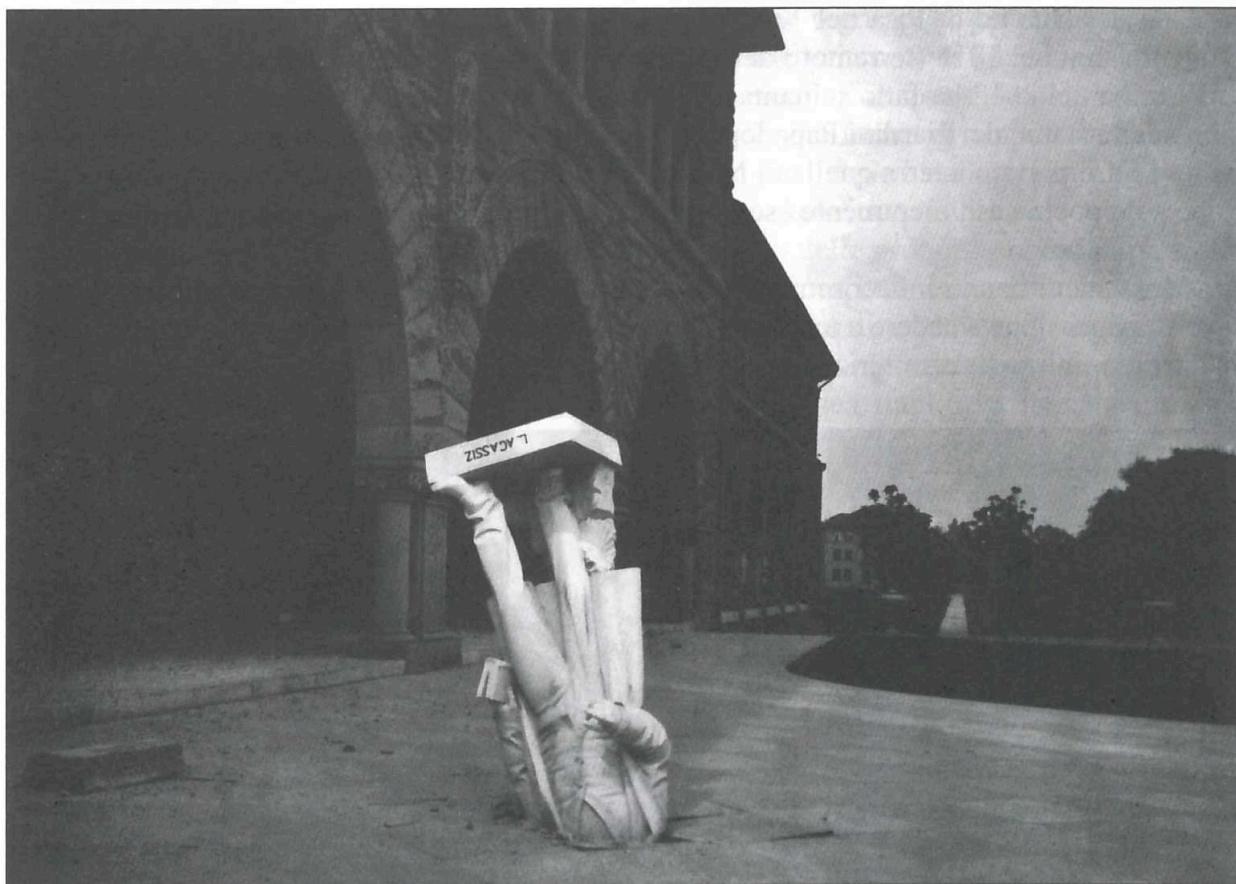


Figura 3. *Agassiz in the concrete*, fotografia scattata nell'aprile 1906 ai piedi del Zoology Building nel campus della Leland Stanford Junior University a Stanford, California - USA (U.S. Geological Survey Photographic Library)

Si sarebbe portati a pensare che i problemi di equilibrio delle statue stanti siano risolvibili incrementando la resistenza della connessione fra basamento/piano di appoggio e statua stessa. Così non è, in quanto l'oscillazione indotta da un sisma di magnitudo significativa su un manufatto alto e snello rigidamente incardinato alla base ha come effetto quello di provocarne la rottura proprio in prossimità dell'attacco (nella prospettiva di una statua antropomorfa: alle caviglie, o poco più su). A questo proposito sono più che fondate le preoccupazioni per i destini del David michelangeloesco, scosso dai sismi che nell'ultimo decennio hanno toccato l'Italia centrale, che mostra appunto una fessurazione (pregressa) nella zona del polpaccio della gamba destra, e per il quale è da tempo allo studio un adeguamento (non solo) antisismico.

Va da sé che da anni si cerca di mettere a punto, anche per le statue, soluzioni per garantire l'isolamento sismico, che si rifanno a studi recenti e meno recenti. Nonostante l'isolamento sismico fosse già praticato, per via empirica, in antichità e che quello che si rifà a parametri scientifici trovi i suoi primi brevetti già nella seconda metà dell'Ottocento, la diffusione dei sistemi di mitigazione degli effetti del sisma è però pratica che solo da pochi decenni ha visto proliferare studi e applicazioni, rivolti in primis a garantire l'incolumità dei viventi ma - sempre di più - anche a salvaguardare il patrimonio storico-artistico delle comunità.

Sono sempre più numerosi i musei e i luoghi di conservazione di statue che si giovano della presenza di isolatori sismici dell'intero edificio, posti a livello delle fondazioni (fra i più noti si ricorda l'Acropolis Museum ad Atene, aperto al pubblico nel 2009). Tali sistemi di controllo passivo delle vibrazioni sismiche (cui si fa cenno - per gli edifici - anche nelle italiane NTC08) sono costituiti da elementi in grado di muoversi se sollecitati dal sisma, e di ritornare poi al punto di partenza, dopo aver assorbito gran parte delle sollecitazioni stesse senza trasmetterle, se non in minima parte, all'elemento sostenuto. Fra i sistemi più diffusi troviamo gli isolatori elastomerici e quelli a scorrimento (semplice senza attrito, o a pendolo, singolo o multiplo, con attrito) o a rotolamento. Sono molto efficaci nei confronti delle sollecitazioni sul piano orizzontale (riduzione oltre l'80%), ma molto meno per quelle verticali, che possono indurre negli oggetti all'interno dell'edificio un effetto *rocking* (dondolio) fino a provocarne il ribaltamento.

Tali sistemi si possono impiegare senza particolari problematiche operative in edifici di nuova costruzione, pur con costi non di poco conto (anche il 20% in più rispetto ad una costruzione tradizionale dato che un isolatore standard per pilastro in CCA costa qualche migliaio di euro) ma sono più difficilmente realizzabili in *retrofit*, ossia su edifici esistenti, e solo a prezzo di più ingenti investimenti. Di fronte alla problematica economica, per la protezione antisismica di gran parte del patrimonio artistico italiano ed europeo che si trova in edifici storici si ricorre tendenzialmente ad interventi sui soli oggetti maggiormente vulnerabili e solo raramente si interviene sull'intero stabile. Generando in tal modo situazioni paradossali, in quanto in questi casi le statue e gli altri oggetti d'arte, pur dotati di isolatori antisismici (anche molto costosi), in occasione del manifestarsi di un forte sisma, sono destinati ad essere travolti delle macerie dell'edificio che li ospita.

Come ha recentemente fatto notare anche Cecile Holberg, direttrice della Galleria dell'Accademia di Firenze, a fronte degli studi per un intervento di isolamento antisismico della statua del David di Michelangelo ivi conservata, "non ha molto senso proteggere singolarmente un'opera, se poi la casa che la custodisce le crolla addosso"(e decisamente poco convincente, in casi come questo, appare la pragmatica e ricorrente celebrazione del "piuttosto di niente..."), ribadita tra l'altro da un noto adagio vernacolare meneghino).

I più importanti interventi per la protezione di oggetti d'arte realizzati negli ultimi anni hanno in ogni caso mutuato principi e tecnologia dalle soluzioni pensate per edifici interi, anche di notevoli dimensioni (va in ogni caso ricordato che l'isolamento antisismico di un edificio ottenuto applicando gli isolatori di più comune impiego non è di per sé sufficiente ad impedire l'azione delle sollecitazioni verticali indotte dal sisma, e che oggetti d'arte come le statue, a prevalentemente sviluppo verticale, hanno comunque bisogno di ulteriori mitigatori per proteggerli dal rischio di *rocking* e di ribaltamento).

Grande diffusione hanno avuto e hanno le tavole di isolamento sismico a scorrimento su superficie piatta. Sono generalmente costituite da tre tavole sovrapposte, di cui quella inferiore fissa e le altre due mobili, ciascuna con possibilità di spostamento lungo una dimensione del piano orizzontale, grazie a guide lineari (a bassissimo attrito, per lo più a ricircolo di sfere, in grado di funzionare anche con carichi di esercizio verticali molto alti) con limitatori di corsa e dispositivi per il ricentramento (Fig. 4). Sono disponibili modelli standard a costi contenuti, anche in piccole dimensioni, e con spessore di pochi centimetri, adatti ad essere collocati all'interno delle teche o sotto i basamenti. Si tratta di isolatori molto efficaci e sono tra l'altro largamente utilizzati dal J. Paul Getty Museum, che dal 1984 conduce

un programma per lo studio e la realizzazione di questo tipo di mitigatori, inizialmente pensati per le collezioni di arte antica esposte al Getty Villa Museum situato fra Los Angeles e Malibu. Il Getty Museum conduce da anni un'attività di divulgazione che ha portato allo svolgimento di una serie di convegni internazionali sul tema *Seismic mitigation for the Museums*, e una politica di collaborazione con enti prestatori di reperti per esposizioni temporanee da tenersi presso le sedi del Getty che prevede che i reperti prestati vengano restituiti completi di una nuova base antisismica realizzata ad hoc (di questo tipo di collaborazione ha recentemente beneficiato per esempio il Museo archeologico di Agrigento, per la statua del Giovinetto di Agrigento e per il Cratere di Gela).

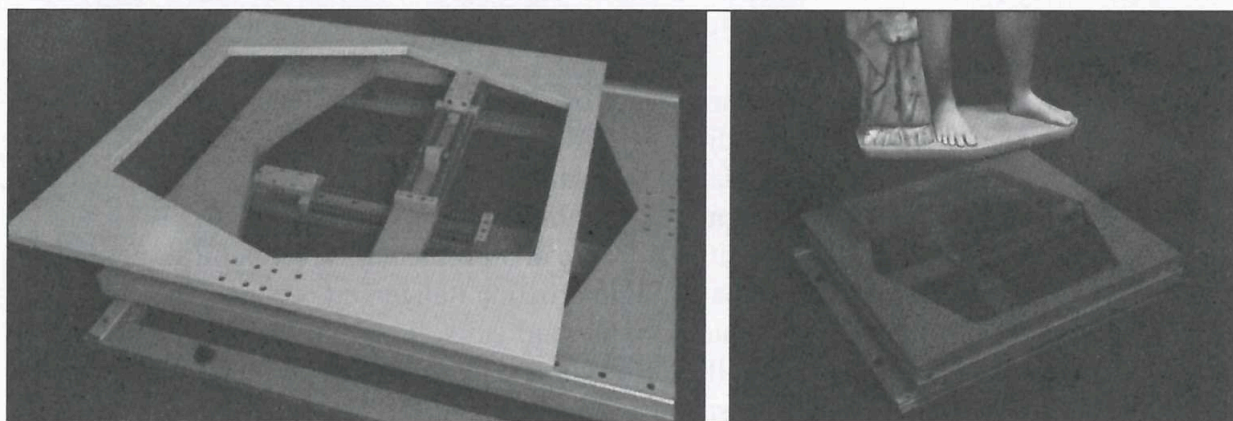


Figura 4. Tavola di isolamento sismico a superficie piatta (J. Paul Getty Trust)

In alternativa ai dispositivi a scorrimento su superficie piatta vengono impiegati elementi a rotolamento, in cui le guide scorrevoli sono sostituite da elementi cilindrici (sistema molto diffuso in Giappone e utilizzato fra l'altro per l'isolamento della versione dell'opera *The Gates of Hell* di Auguste Rodin esposta sulla copertura della parte ipogea del National Museum of Western Art di Tokyo).

Mentre gli isolatori a scorrimento e a rotolamento sono composti da parti in grado di muoversi nel piano ortogonalmente fra loro, gli isolatori a pendolo (*Friction pendulum bearing* - FPB e suoi derivati) sono composti da due parti che scorrono una sull'altra grazie a elementi interposti (calotte o sfere) che si muovono con attrito su superfici curve, le quali, oltre all'attrito, garantiscono anche il recupero della posizione iniziale (autocentrimento o ricentrimento) appena cessate le sollecitazioni del terremoto.

Sfruttano questo principio, fra gli altri, sia l'isolatore a cuscinetti progettato da Earthquake Protection Systems (Vallejo, California) per mitigare gli effetti sismici sulla statua di Hermes con Dioniso neonato nel Museo archeologico di Olimpia che gli isolatori progettati da ENEA per le due statue bronzee da Riace esposte nel Museo nazionale di Reggio Calabria. Queste erano in precedenza dotate di isolatori in gomma ad alto smorzamento delle sollecitazioni sul piano orizzontale, ora sostituite da un piedestallo composto da due blocchi di marmo collegati mediante quattro sfere, anch'esse di marmo (Fig. 5). Si tratta di un sistema a *Rolling pendulum*, doppio, in quanto le sedi ellissoidali per le sfere sono collocate, speculari, sia all'estradosso del blocco inferiore che all'intradosso di quello superiore, sfruttando un'intuizione già oggetto di brevetti ottocenteschi. Un elemento dissipativo centrale per-

mette il ricentraggio, mentre nel blocco superiore è alloggiato anche un dispositivo di smorzamento delle accelerazioni verticali (doppia piastra in acciaio, con interposti dissipatori a trefolo *shock-absorber*, e molle entro guide a pistone, in acciaio), che serve anche da elemento di collegamento della statua alla base.

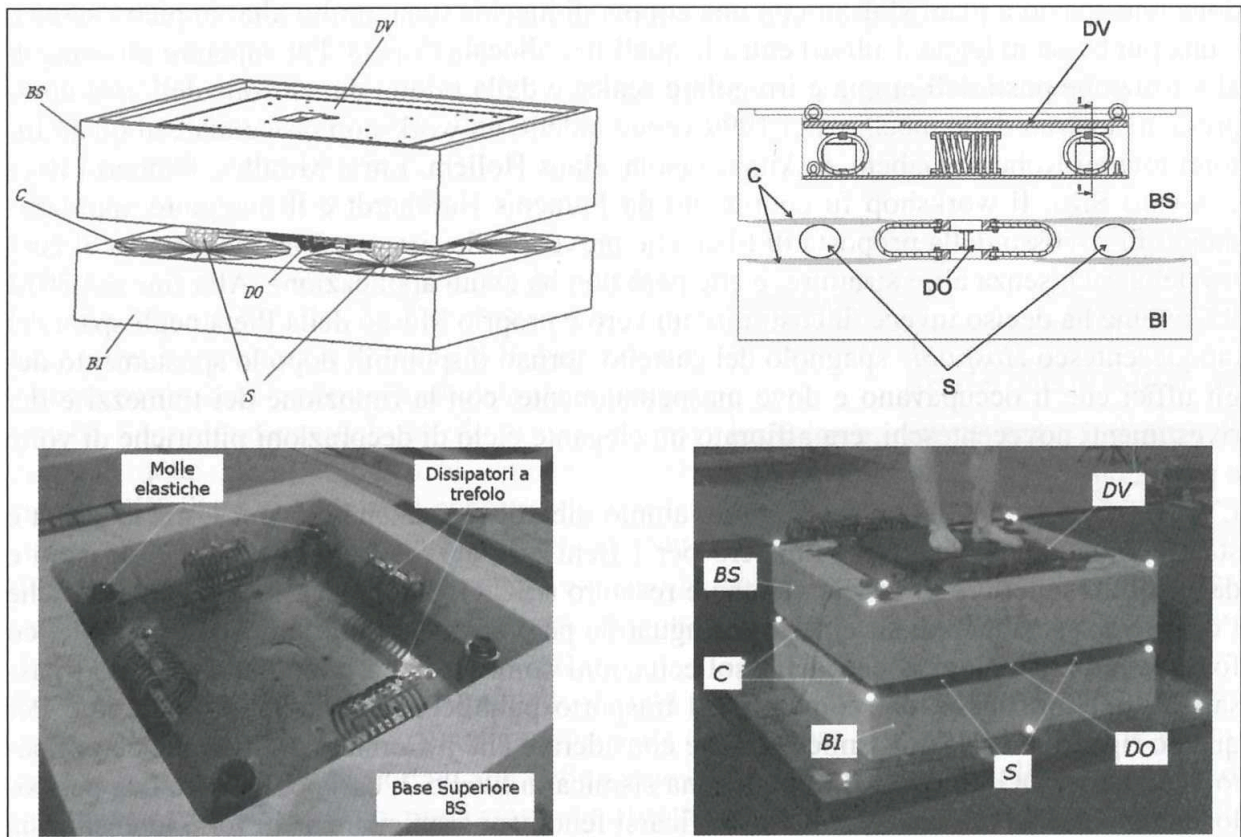


Figura 5. Schemi e immagini degli isolatori per le statue dei Bronzi di Riace (BI: base inferiore; BS: base superiore; S: sfere in marmo; C: sedi concave per le sfere; DV: isolatore verticale; DO: dispositivo orizzontale per il ricentramento) (ENEA)

Con lo stesso criterio l'ENEA ha progettato e realizzato i basamenti per le statue di San Michele arcangelo con il drago e dell'Annunciazione, collocate nel Museo dell'Opera di Orvieto (2014), mentre basamenti dello stesso tipo dovrebbero essere posti a sostegno delle statue dei dodici apostoli all'interno del Duomo della stessa città.

Sono tutti sistemi passivi, che non necessitano di azioni dall'esterno per entrare in funzione, o del tipo misto, ossia in parte passivi ed in parte con meccanismi dotati di un blocco che viene rilasciato quando viene ricevuto un impulso di allerta preventivo da una rete *Seismic early warning*: appena un sismografo di una rete SEW rileva un terremoto invia agli apparecchi collegati alla rete un segnale di sblocco analogico o digitale, il quale per sua natura possiede una velocità di propagazione molto maggiore rispetto a quella delle onde sismiche e le precede quindi sul target di alcuni secondi, anche alcune decine (in rapporto a distanza dall'epicentro, magnitudo e geologia dei siti), permettendo l'attivazione in tempo utile dei sistemi di mitigazione delle sollecitazioni sismiche.

2. LA PIETÀ RONDANINI, IL TERREMOTO, LA METROPOLITANA

La statua michelangiotesca della Pietà Rondanini è stata acquisita dal Comune di Milano nel 1952 per essere destinata alle civiche Raccolte d'arte nel Castello visconteo sforzesco della città. Per la sua esposizione lo studio BBPR stravolse la Sala degli *scarlioni*, ricavandone uno spazio a piani sfalsati con una coppia di nicchie (una, molto alta, in pietra serena, e una più bassa in legno d'ulivo) entro le quali fu collocata l'opera. Per superare gli ostacoli alla fruizione posti dall'ampia e irregolare scalea e dalla ridotta dimensione dell'area compresa all'interno delle nicchie, nel 1999 venne indetto un workshop progettuale al quale furono invitati Roberto Gabetti & Aimaro Isola, Hans Hollein, Enric Miralles, Umberto Riva e Alvaro Siza. Il workshop fu coordinato da François Burkhardt e il maggiore apprezzamento fu riscosso dalla proposta di Siza, che prevedeva la sistemazione della statua al centro della sala, senza altre strutture, e che però non ha avuto applicazione. Alla fine del 2012 il Comune ha deciso invece di costituire un vero e proprio Museo della Pietà negli spazi del cinquecentesco *Hospitale* spagnolo del castello, tornati disponibili dopo lo spostamento degli uffici che li occupavano e dove inaspettatamente, con la rimozione dei tramezzi e dei rivestimenti novecenteschi, era affiorato un elegante ciclo di decorazioni pittoriche di volte e pareti, che recano la data 1576.

L'iniziativa del Comune ha suscitato un ampio dibattito e qualche polemica, ma la scelta è stata comunque avallata dal Ministero per i Beni e le attività culturali e per il turismo e dall'Istituto superiore di conservazione e restauro (ISCR), e nell'occasione si è chiesto che l'opera venisse dotata di sistemi all'avanguardia per contenere gli effetti sia di un ipotetico forte evento sismologico che delle sollecitazioni somministrate quotidianamente dal passaggio, nel sottosuolo, dei convogli del trasporto pubblico metropolitano della città. Per quanto riguarda il rischio sismico si deve considerare che il Comune di Milano è classificato ai sensi del DGR 2129/2014 come zona sismica di livello 3, ossia come area con pericolosità non elevata ma dove possono verificarsi fenomeni sismici anche di forte intensità, sia pure raramente (i documenti e le cronache registrano in effetti nel 1117, novecento anni fa, l'ultimo sisma in grado di provocare crolli di edifici, sisma che ebbe effetti devastanti su Verona e altre città venete).

Il passaggio dei treni nel sottosuolo (due linee della metropolitana milanese) determina invece a intervalli più o meno regolari, per gran parte della giornata, forti vibrazioni, che vengono trasmesse al terreno e alle sovrastanti strutture del castello, e sono avvertibili anche all'esterno. Si aggiunga che i mezzi della Linea 1 (realizzata fra 1957 e 1964) transitano in piena curva, e che la galleria si trova appena al di sotto del piano di campagna, al punto che il muro in cemento armato del tunnel occupa parte di una delle sale ipogee della *ghirlanda*. Ad un livello inferiore corre la tratta Garibaldi-Cadorna della Linea 2, che è stata inaugurata nel 1978, anche se il segmento sotto il castello fu realizzato contestualmente alla Linea 1. Nell'occasione vennero anche predisposte alcune opere di consolidamento delle strutture voltate che separano il piano cantinato dai sovrastanti locali dell'ospedale spagnolo (si tratta di 12 tiranti metallici all'imposta della volta, e di altri 3 all'estradosso della volta stessa, la cui posa ha richiesto la distruzione di parte di un pavimento in cotto della fine del Quattrocento). La Fig. 6, nella pagina successiva, restituisce il rilievo, prima dell'intervento, della sezione del corpo di fabbrica in cui si trova l'ospedale, che occupa tutto il piano terreno del lato sud della piazza d'armi.

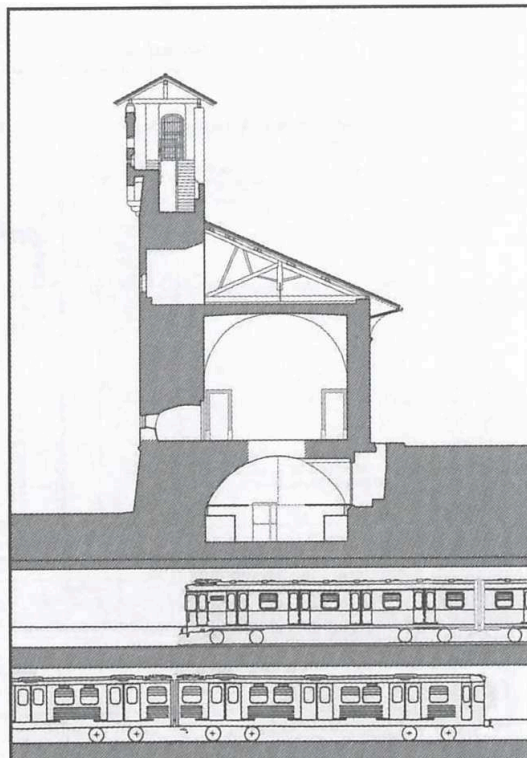
La difficoltà principale che il progetto per una nuova base e per un nuovo piedestallo della Pietà nella nuova sede ha dovuto affrontare è stata quella di dover mitigare sollecitazioni con frequenze dominanti diverse fra loro. Le onde sismiche hanno infatti frequenze dominanti comprese fra 2 e 10 Hz, di breve durata ma di forte intensità (attive soprattutto nelle due direzioni del piano orizzontale), mentre le sollecitazioni indotte dal passaggio dei treni, di bassa intensità ma ripetitive e quasi costanti (attive sia sul piano orizzontale che su quello verticale), sono comprese fra 16 e 80 Hz.

Su questo tema ha lavorato il gruppo di ricerca diretto da Alfredo Cigada, del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano, nell'ambito della campagna di studi e controlli affidata dal Comune e dalla Soprintendenza del castello al Centro beni culturali dello stesso Politecnico, con la supervisione dell'Istituto superiore di conservazione e restauro e, naturalmente, degli enti di tutela (lo Studio Pertot Pracchi Rotondi ha progettato e curato la realizzazione degli interventi di conservazione e restauro dell'Ospedale, mentre la presentazione e l'allestimento museografico delle sale si devono a Michele De Lucchi).

Preventivamente alla stesura del progetto è stata condotta una campagna di monitoraggio delle vibrazioni nella vecchia e nella nuova sede della statua, che ha confermato le ipotesi fatte in prima istanza e ha portato alla definizione di possibili soluzioni e alla valutazione di una trentina di pre-progetti predisposti da altrettante ditte specializzate nel settore della progettazione e della realizzazione di basamenti antisismici e antivibrazioni.

La soluzione selezionata e quindi ingegnerizzata (Fig. 7) e realizzata (Fig. 8) consiste in una piattaforma quadrata (lato pari a 1,50 ml) costituita da una lastra di appoggio assicurata alla struttura (adeguatamente regolarizzata con betoncino speciale), alla quale è connessa l'unità di scorrimento, suddivisa in nove moduli, che può muoversi (quando l'ampiezza sismografica delle onde sismiche superi 2 mm/s con una frequenza almeno a 0,3 Hz) nelle due direzioni del piano orizzontale, su guide a basso attrito a ricircolo di sfere. Il limite di spostamento è di 25 cm per lato. Dispositivi di sicurezza impediscono il superamento di tale limite mentre un collegamento a cinghia ha la funzione di consentire il recupero della posizione iniziale del sistema. La faccia superiore dell'unità di scorrimento è collegata alla lastra di appoggio su cui è collocato il basamento della statua mediante 13 elementi cilindrici in elastomeri a rigidità controllata, che assolvono il compito di mitigare le vibrazioni ambientali. Per la statua è stato predisposto un piedestallo in acciaio appesantito con sabbia, al quale è stata assicurata tramite un dissipatore, per evitare l'effetto *rocking*.

La rimozione del consistente (circa 50 cm) strato di riempimento all'estradosso della volta (risalente agli anni Cinquanta del Novecento), ha consentito di mantenere la piattaforma sotto il livello del nuovo pavimento in legno, che è stato sagomato in modo da permettere lo scorrimento del sistema, entro i limiti prefissati (Fig. 9).



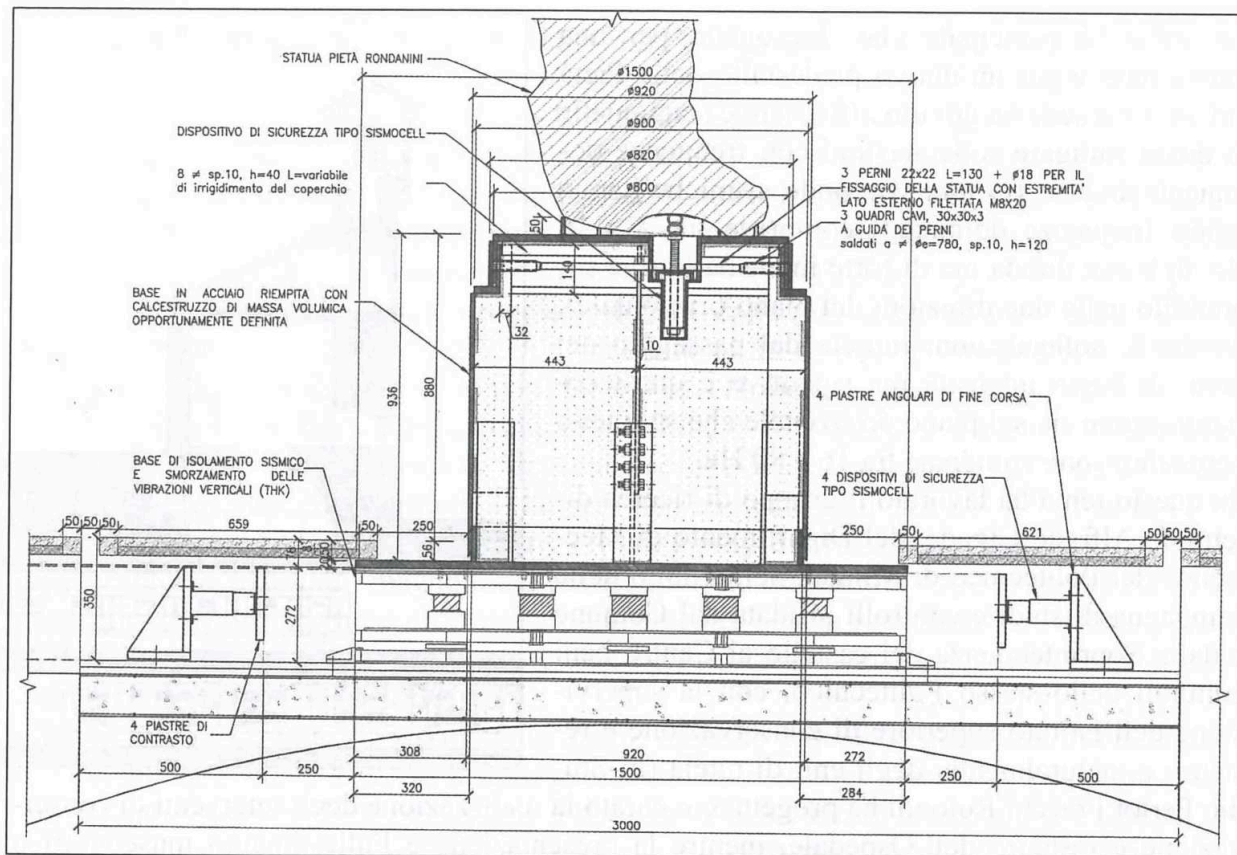


Figura 7. Sezione della piattaforma antisismica e antivibrazioni per la statua della Pietà Rondanini (dettaglio dal progetto Miyamoto International)



Figura 8. Fasi di montaggio della piattaforma (13 dicembre 2014, foto dell'autore)



Figura 9. La Pietà Rondanini di Michelangelo Buonarroti nella sua nuova sede, nell'Ospedale spagnolo del Castello di Milano, a lavori ultimati (maggio 2015, foto dell'autore)

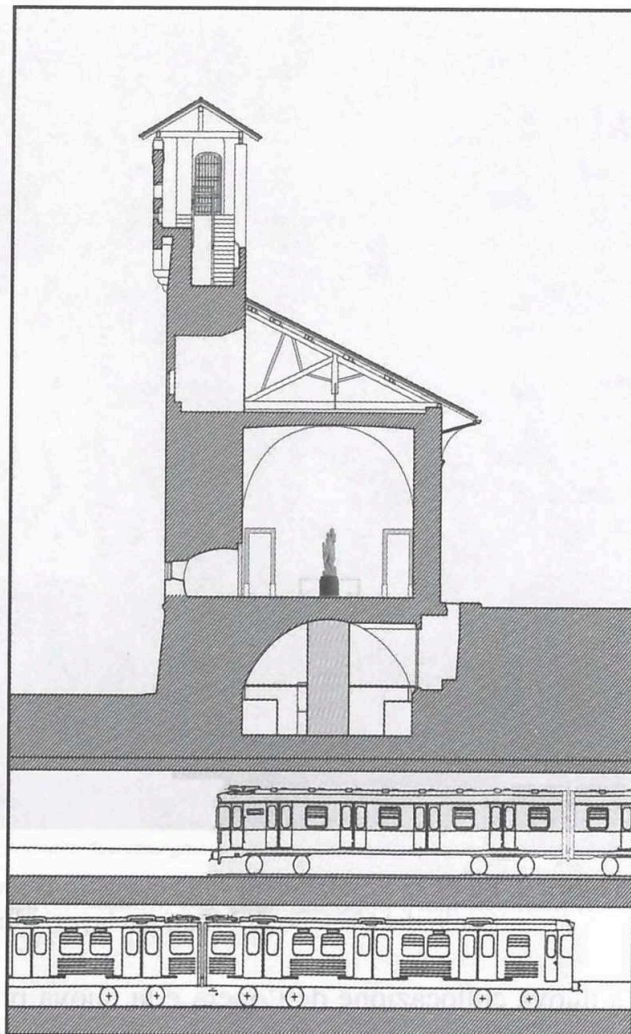
La nuova collocazione dell'opera e la nuova presentazione museografica hanno tuttavia richiesto anche un altro intervento. A fronte del considerevole peso di statua + basamento + piattaforma (nell'insieme circa tre tonnellate), il Comune di Milano ha infatti ritenuto necessario procedere alla costruzione di una struttura di supporto della volta che sostiene il sistema espositivo e l'opera. Nel locale sotterraneo è stato quindi costruito un "pilastro cavo" in muratura, a base quadrata, di due metri di lato, che appoggia sul pavimento e sostiene la volta, in corrispondenza della posizione della statua e della sua base, così da scongiurare possibili cedimenti della volta stessa (si veda l'immagine alla pagina seguente).

3. CONCLUSIONI

Il sistema di protezione della Pietà nella sua nuova sede nei locali dell'Ospedale spagnolo del Castello di Milano garantisce senz'altro, con soluzioni di avanguardia, la protezione dell'opera dalle sollecitazioni indotte dal passaggio quotidiano di convogli ferroviari ad alta frequenza nel sottosuolo e da quelle che potrebbe indurre un forte sisma, alle quali una statua stante è tra l'altro molto più esposta rispetto ad altre tipologie di manufatti. Tuttavia la sua collocazione all'interno di strutture antiche, che si possono ben ritenere ad alta vulnerabilità sismica, qualifica come solo parziale l'intervento effettuato e non esclude che in caso di sisma si possano produrre danni anche molto gravi all'opera e ai suoi supporti a causa

del collasso di copertura, volte e murature perimetrali.

Per contro, la costruzione di un sostegno puntuale per la volta sottostante e lo stesso inserimento della piattaforma antisismica e antivibrazioni nello spessore dell'orizzontamento hanno introdotto un consistente elemento di vincolo, destinato a pesare nel momento in cui si vorrà mutare la destinazione d'uso dei locali o anche solo modificare l'allestimento. Giova ricordare che il recente spostamento della Pietà dalla Sala degli *scarlioni* all'Ospedale spagnolo è stato motivato e giustificato proprio in rapporto alla rigidità e alle limitazioni (in quel caso alla piena fruizione) che caratterizzavano il precedente impianto allestitivo. Si assiste pertanto anche in questa occasione alla reiterazione di un *topos* intrinseco alla museologia moderna, che, nel nome della presentazione di un'opera d'arte, pone in secondo piano i luoghi deputati ad ospitarla. E, di fronte all'esigenza, del tutto condivisibile, di garantire ottimali condizioni conservative, finisce con agire in modo sostanzialmente tecnicistico.



BIBLIOGRAFIA

Cigada A., Cossu M., Sonda D., Zappa E.: Seismic and vibration protection of the statue "Pietà Rondanini" by Michelangelo. *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago del Cile, 9-13 gennaio 2017, in stampa.

Cigada A., Sabbioni E., Siami A., Zappa E.: Modeling and testing of the anti-vibration base for Michelangelo's Pietà Rondanini. Di Miao D., Tarazaga P., Castellini P. (a cura di): *Special topics in structural dynamics, volume 6*, atti del XXXIV IMAC (Orlando, Florida, USA, 25-28 giugno 2016), Springer, 2016, pp. 11-21.

Pracchi V., Pertot G., Rotondi P.: L'arte come spettacolo? Il nuovo allestimento per la Pietà Rondanini al Castello Sforzesco di Milano. *Confronti*, IV(6-7), 2016, pp. 241-251.