

IL MITRA TAUROCTONO DI TARQUINIA: INTERVENTO DI RESTAURO E RIASSEMBLAGGIO CON L'USO DI TECNOLOGIE 3D.

Area tematica: **Problematiche di progettazione e di intervento, o Ricerche e studi applicati.**

Luciana Festa*, **Antonio Iaccarino Idelson****, **Carlo Serino*****, **Flavia Vischetti******

* Restauratrice, ISCR, via di S. Michele 23, 00153, Roma, +393393436934, luciana.festa@beniculturali.it

** Restauratore, Equilibrarte s.r.l., via Centuripe 34, 00179, Roma, +393397172063, iaccarino.a@gmail.com

*** Restauratore, Equilibrarte s.r.l., via Centuripe 34, 00179, Roma, +393478813217, carlo.serino@gmail.com

**** Restauratrice, ISCR, via di S. Michele 23, 00153, Roma, +393384880466, flavia.vischetti@beniculturali.it

Abstract

Nel 2014 i Carabinieri del reparto per la Tutela del Patrimonio Culturale di Roma hanno sequestrato una scultura in marmo raffigurante Mitra Tauroctono. La statua, ancora ricoperta dal terreno di scavo e mancante di vari frammenti, è stata restaurata dall'Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro con la collaborazione di Equilibrarte srl.

Le indagini chimico/fisiche e microscopiche hanno permesso di identificare l'area di provenienza del marmo (Asia Minore) ma non di rinvenire, come ci si sarebbe auspicato, tracce di coloritura originale. Si è dunque proceduto alla rimozione della terra di scavo e all'ablazione meccanica delle concrezioni calcaree rifinita con pulitura laser, rivelando una superficie ben conservata, ricca di tracce di strumenti di lavorazione. Alcune macchie di ossido di ferro dovute all'interro, sono state eliminate con applicazioni di cisteina, metodologia che il Laboratorio di Chimica dell'ISCR sta attualmente sperimentando in collaborazione con l'Università La Sapienza di Roma.

Mentre era in corso l'intervento sono stati recuperati due importanti frammenti della scultura, il braccio sinistro del dio e il cane: il riassetto di queste parti è stato eseguito con perni sfilabili maschio/femmina. Con l'obiettivo di ottimizzare il posizionamento dei perni e le metodologie di foratura del marmo, si è lavorato innanzitutto su un modello 3D ottenuto dalla scansione dei manufatti che ha permesso un rimontaggio virtuale dei frammenti. All'interno del modello così ricomposto sono stati inseriti i perni, verificando con una simulazione agli elementi finiti le sollecitazioni meccaniche della pietra.

Per il braccio è stato necessario orientare l'asse del perno in modo da evitare interferenze con le parti fisse durante il montaggio, perché il polso è molto vicino alla testa del toro e un perno coassiale con il braccio avrebbe impedito l'accostamento del pezzo. Il cane è stato montato con due perni maschio/femmina la cui inclinazione permette di orientare le forze in modo da impedire l'apertura del giunto senza adesivo. Considerando necessario separare il cane dalla scultura a ogni spostamento, il giunto non è stato incollato ma, per rendere più difficile uno smontaggio non autorizzato, su uno dei due perni è stato creato un dispositivo antiapertura.

Per ottenere un'elevata precisione nella fase di esecuzione delle sedi dei perni, sono state realizzate delle maschere in stampa 3D per guidare la punta del trapano, che aderivano perfettamente alle superfici di frattura.

Rinvenimento e restauro

Gli interventi di restauro sul gruppo scultoreo del Mitra Tauroctono proveniente da uno scavo abusivo nell'area archeologica di Tarquinia hanno avuto luogo da ottobre 2014 a febbraio 2015 e si sono svolti presso la ex caserma La Marmora, sede dei Carabinieri del Reparto Operativo per la tutela del Patrimonio Culturale, che ne hanno operato il sequestro.

L'opera, eseguita in un unico blocco di marmo bianco dalle misure massime di cm.154 (l), cm.90,5 (h), cm.43 (p) è perfettamente aderente all'iconografia classica della rappresentazione del dio Mitra, colto nell'atto di uccidere il toro con la spada, mentre un cane e un serpente lambiscono la ferita da cui sgorga copioso il sangue e uno scorpione stringe tra le chele i testicoli del toro. Il gruppo appoggia su un basamento dallo spessore massimo di cm. 7, ricavato dallo stesso blocco di marmo (**fig. 1**).

La scultura si presentava completamente ricoperta da depositi superficiali e incrostazioni terrose e mancante di cospicue parti (braccia, testa, piede sinistro e spada del dio; orecchie, corna, zampa anteriore, zoccolo posteriore e coda del toro, cane e serpente). La superficie della scultura è molto ben conservata e presenta segni di lavorazione molto rifinita su tutti i fronti. Evidenti e ben leggibili sono le tracce lasciate dallo scalpello, dal trapano, dalla subbia e perfino dalla raspa. La testa di Mitra, attualmente perduta, era realizzata separatamente, come evidenziato dalla lavorazione eseguita per l'alloggiamento del collo. Anche due delle parti mancanti, l'orecchio sinistro del toro e il piede sinistro del Mitra erano eseguite disgiuntamente: lo testimoniano la lavorazione della superficie di contatto delle parti e la presenza di fori di sede per perni di ancoraggio, probabilmente in ferro. Il foro dell'orecchio presenta all'interno del piombo che inglobava originariamente un perno a sezione quadrangolare, di cui è visibile l'impronta (**fig. 2**).

In momenti successivi al sequestro sono stati rinvenuti il cane e il braccio sinistro; il primo emerso da uno scavo condotto dalla Soprintendenza per i Beni Archeologici dell'Etruria Meridionale nell'area in cui era stato individuato lo scavo clandestino, il secondo spontaneamente consegnato ai Carabinieri da chi ne era illegalmente in possesso. Il

braccio, privo della mano, combaciava perfettamente con la superficie di frattura all'altezza della spalla, mentre il cane, mancante di parte delle zampe anteriori e posteriori, aderiva alla statua solo in pochi punti. Non è stata rinvenuta invece la parte di basamento della scultura che costituiva l'appoggio delle zampe posteriori del cane, cosa che rendeva difficoltosa la ricollocazione del frammento nella sua posizione originale. Tutte le superfici di frattura, anche se molto nette, si presentavano completamente ricoperte da incrostazioni, quindi prodotte a seguito di eventi non recenti. La presenza di aree di erosione del marmo in corrispondenza della parte posteriore del collo e del fianco del toro fa supporre che durante la fase di giacitura nel terreno la scultura appoggiasse su quel lato.

Vistose macchie marrone ruggine erano presenti in zone circoscritte, fra il collo e la zampa anteriore destra del toro, tra il basamento, i testicoli del toro e lo scorpione. Sulla zampa sinistra anteriore del toro, all'altezza della giuntura, si evidenziava una zona più scura. L'osservazione macroscopica non rivelava presenza di tracce di colore, come confermato dall'esame delle superfici eseguita con l'ausilio del microscopio digitale. Sono stati comunque eseguiti prelievi nelle aree in cui erano visibili le macchie brune: le analisi chimico fisiche hanno confermato la presenza di ossidi di ferro ma in assenza di legante e questo esclude una colorazione intenzionale e attribuisce le macchie a prodotti di ossidazione di metalli casualmente presenti nel terreno di seppellimento. Sono state eseguite sezioni sottili su una piccola scaglia di marmoⁱ allo scopo di identificare la cava di provenienza. Poiché nel caso dei marmi bianchi l'attribuzione risulta molto difficile mediante la sola analisi microscopica, sono state eseguite ulteriori indagini isotopiche che hanno identificato con buona approssimazione la provenienza del litotipo dall'Asia Minoreⁱⁱ.

Si è potuto così dare inizio al delicato intervento di pulitura con la rimozione dei depositi superficiali incoerenti eseguita con pennello morbido e aspirapolvere. Una prima pulitura è stata eseguita con acqua di rete e spazzolino, al cui termine la superficie si presentava quasi interamente ricoperta da incrostazioni calcaree molto aderenti e tenaci. La rimozione di queste ultime era operazione molto delicata, in quanto si rischiava di danneggiare le fini tracce degli strumenti di lavorazione presenti sulla superficie: è stata eseguita meccanicamente con bisturi e specilli e ha richiesto tempi molto lunghi (fig. 3). Le ultime tracce di depositi superficiali residui e più resistenti, presenti nei sottosquadri e all'interno dei piccoli solchi lasciati dalla raspa e dallo scalpello, sono state eliminate mediante l'uso del laserⁱⁱⁱ. Le vistose macchie di ossido di ferro sono state oggetto di test di pulitura eseguiti con soluzioni di tioglicolato o cisteina, applicati ad impacco con compresse di polpa di cellulosa^{iv}. Il risultato migliore è stato raggiunto con soluzione di cisteina al 3% in acqua con tempo di applicazione di 24h (fig. 4).



fig. 1 La scultura prima del restauro.



fig. 2 Il foro dell'orecchio.



fig. 3 Durante la pulitura.



fig. 4 La scultura dopo il restauro e il riassetto dei frammenti.

Problematiche generali per la ricomposizione

Ricomporre una scultura frammentata significa innanzitutto restituire ai frammenti la corretta posizione nello spazio. In alcuni casi collocare i frammenti nello spazio può essere relativamente semplice, altrimenti si può arrivare a una proposta di ricomposizione formale presentata come una scelta critica motivata con le informazioni disponibili in quel momento storico. Individuata la collocazione dei frammenti il problema estetico della percezione è definito.

La condizione più semplice è quella equiparata a un'anastilosi in cui i frammenti possono essere posati uno sull'altro con sufficiente stabilità e in modo da scaricare il peso senza rischi. Si tratta però di una situazione piuttosto rara per le sculture, che hanno spesso sezioni resistenti sottili e linee di giunzione inadatte a una semplice giustapposizione a secco. In alcuni casi potrà essere necessario realizzare delle integrazioni di raccordo, che rientrano nel medesimo processo di presentazione critica, ma il concreto posizionamento di tali elementi nello spazio implica delle scelte di natura diversa e che spesso comportano la necessità di operazioni irreversibili.

Storicamente, la ricomposizione di una scultura implicava spesso la rilavorazione dei frammenti, per creare degli elementi plastici d'integrazione, delle superfici di contatto più regolari o per l'inserimento di elementi metallici che si facessero carico della tenuta meccanica delle giunzioni. La presenza di perni o altri elementi metallici di sostegno è per altro parte delle tecniche esecutive, per cui gli scultori o gli artigiani che in antico si occupavano della ricomposizione, per restauro o per riuso^v, li consideravano una soluzione naturale. Oltre alle perniature legate alle necessità di composizione, come quelle per reggere in posizione una testa su un busto o per raccordare i blocchi nell'architettura, anche in antico si trovano vere e proprie strutture metalliche interne di sostegno, di cui la colonna scanalata del Teatro romano di Priverno (fig. 5) costituisce un esempio interessante, anche per complessità di realizzazione con le tecnologie disponibili.



fig. 5 Struttura interna in ferro in una colonna del teatro romano di Priverno.

L'inserimento di perni o staffe di restauro è un'operazione che modifica in modo importante la materia del manufatto, sia dal punto di vista estetico sia da quello delle sue resistenze meccaniche e della distribuzione dei carichi.

Esempi di trattamenti antichi sono onnipresenti nelle collezioni e sono oggetto di numerose pubblicazioni^{vi}. Il principale problema etico posto dall'inserimento di perni è dato dalla loro irreversibilità, legata alla necessità di forare il materiale originale ma anche alle modalità di adesione tra i blocchi e il perno. Infatti, se l'adesivo strutturale si distribuisce sulle superfici della frattura, nel foro d'alloggiamento e sulla superficie del perno, neanche uno strato d'intervento solubile sarà sufficiente a permettere un'agevole reversibilità del nuovo giunto perché l'adesivo trova molti sottosquadri e il perno resta inaccessibile dall'esterno. Il problema è stato affrontato in altre sedi a partire dagli anni '80 del secolo scorso^{vii}, quando ci si è iniziati a porre il problema della reversibilità di un assemblaggio con perni.

L'altro aspetto del problema, la necessità di realizzare un foro nel materiale originale, è di più difficile soluzione: se, con le tecnologie attuali, non è possibile evitare d'inserire un perno per garantire la sicurezza del giunto, un foro sarà inevitabile. L'asse del perno deve essere coincidente sulle facce degli elementi da congiungere, ponendo un altro problema molto sentito dai restauratori perché le superfici non sono mai piane e parallele, condizione nella quale sarebbe sufficiente forare entrambi gli elementi nel punto prescelto con una direzione ortogonale alla superficie. Un problema operativo che è stato affrontato in molti modi. Il più semplice è l'uso di calco e controcalco delle due facce da forare, accostati e poi forati contemporaneamente per riportare la posizione e l'asse dell'unico foro. Altri sistemi prevedono l'uso di strumenti meccanici appositamente costruiti^{viii} per prendere la forma della superficie e conservare l'informazione ribaltandola su quella opposta. Un corretto orientamento dell'asse permette di evitare dolorose e scomode correzioni in corso d'opera che implicano, tra l'altro, l'aumento del diametro del foro.

Dal punto di vista strutturale il diametro del perno deve essere proporzionato al carico da sostenere, evitando inutili sovradimensionamenti quando non siano previste importanti sollecitazioni dinamiche. Per sua natura un perno lavora bene con le sollecitazioni di taglio, mentre nella direzione assiale la componente strutturale dell'adesivo diventa determinante. L'inserimento di perni è spesso volto a evitare anche che il cedimento dell'adesivo possa causare la caduta del pezzo giuntato, timore ragionevole vista l'instabilità chimica dei materiali usati e la fragilità del giunto stesso, che insiste solo sulla superficie del materiale. Se è possibile inserire un perno con un asse che impedisca il movimento del pezzo secondo le sollecitazioni prevalenti, come la gravità, la funzione di sicurezza del perno avrà maggiore efficacia; inoltre, la direzione dell'asse del perno determina la quantità di forza che si scarica sul perno stesso anziché sul giunto adesivo.

Metodo utilizzato e aspetti innovativi

Per l'assemblaggio del braccio e del cane della scultura del dio Mitra, si è dunque scelto d'impiegare perni reversibili. Sono stati realizzati perni sfilabili maschio femmina in acciaio inox^{ix} di sezione ridotta^x, la cui superficie esterna è incollata nel foro mentre l'asse interno resta libero di scorrere. L'adesivo per tenere unito il giunto è posto solo sulle facce della frattura, protette da uno strato d'intervento in resina acrilica cui è affidata la reversibilità, poiché i perni restano sfilabili (cfr. fig. 9).

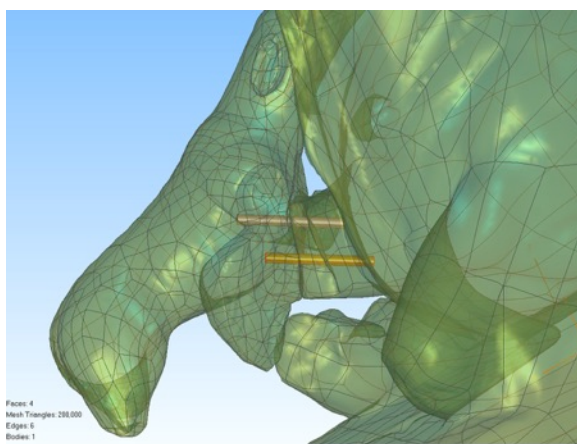


fig. 6 Posizionamento virtuale dei perni.



fig. 7 Il perno inserito nel braccio.

Per studiare i carichi agenti sulla scultura e sui giunti necessari al collegamento dei frammenti distaccati, ci si è avvalsi di una simulazione agli elementi finiti su un modello costituito dalla scansione 3D del manufatto.

La posizione dei perni è stata disegnata nel modello 3D (fig. 6) e la modellizzazione FEM ha consentito di verificare la correttezza delle scelte riguardanti il dimensionamento e l'orientamento dei perni, anche in funzione delle sezioni resistenti del marmo circostante nelle superfici di frattura e degli adesivi usati per l'incollaggio. Com'è naturale, ma giova ricordarlo, questo strumento d'indagine è utilizzabile solo sulla base di una attenta analisi dello stato di conservazione ed è servito a fornire informazioni che si sono aggiunte alla valutazione del restauratore^{xi}.

La progettazione in 3D ha portato con sé anche altri importanti vantaggi operativi. Il primo è la possibilità di simulare, prima di fare il foro, il movimento degli elementi marmorei lungo l'asse obbligato del perno nelle operazioni di montaggio e smontaggio. Il braccio sinistro del Mitra ha un andamento orizzontale dalla spalla alla testa del toro e il suo movimento si trova limitato dalla superficie di frattura verticale e dalla prossimità del polso con la testa dell'animale. L'avvicinamento del frammento può avvenire solo lateralmente, per cui un perno ortogonale alla linea di frattura non avrebbe permesso di montarlo. La posizione del perno, passante per il centro geometrico delle superfici, è stata ruotata finché il movimento del frammento lungo il suo asse rendesse possibile passare oltre l'ostacolo costituito dalla testa. Il perno^{xii} è diretto verso l'alto e lavora a taglio, con il doppio vantaggio di scaricare parte della forza con cui il peso del frammento sollecita il giunto adesivo e d'impedire un distacco accidentale (**fig. 7**).

Il cane ha una piccola superficie di contatto sul ginocchio del toro, molto sollecitata dal peso del frammento che originariamente era scaricato anche sulle zampe posteriori, perdute insieme alla porzione corrispondente del basamento. Le notevoli sollecitazioni imposte dalla posizione a sbalzo del cane ha portato alla decisione di non incollare il giunto perché si possa smontarlo ogni volta che la scultura debba essere spostata. L'orientamento della superficie di contatto e la forma del frammento ha reso necessario inserire due perni per impedirne la rotazione^{xiii}. La direzione dei perni consente di tenere il cane accostato al ginocchio anche senza adesivo (**fig. 8**). Questo avrebbe potuto essere ottenuto anche con sistemi a molla o magnetici^{xiv} in particolare ove fosse stato necessario usare un'inclinazione meno favorevole, ma la loro minore semplicità d'uso ha spinto a cercare d'utilizzare perni sfilabili, lavorando sull'inclinazione per sfruttare il peso del cane come guida dell'accostamento. Per rendere più improbabile uno smontaggio non autorizzato, si è dotato uno dei due perni di un dispositivo di sicurezza realizzato con una piccola vite che, chiusa, permette di sfilare il perno per soli 2 cm (**fig. 9**). Per completare l'apertura è necessario accedere alla sua testa sul collo del perno con una lunga chiave a brugola (**fig. 10**).



fig. 8 I perni con cui è fissato il cane.



fig. 9 I perni prima del montaggio.

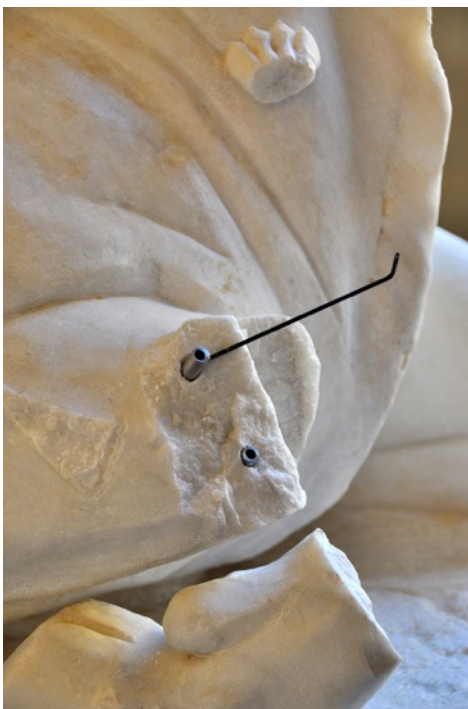


fig. 10 La chiave di sicurezza.

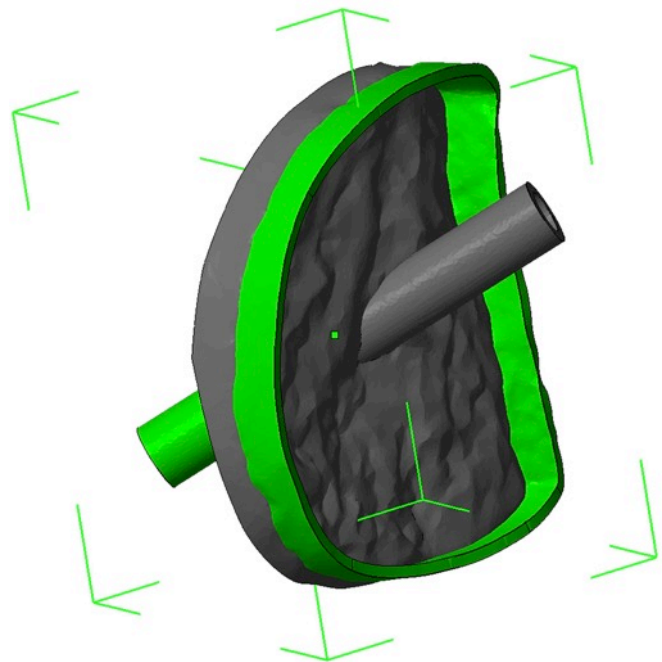


fig. 11 3D delle controforme con la guida per il foro.

La posizione dei perni, disegnata in 3D e verificata con l'analisi FEM, doveva dunque essere precisamente riprodotta sul manufatto per non perdere o ridurre l'efficacia della progettazione. Inoltre, per consentire l'estrazione del cane, i due perni devono essere perfettamente paralleli. L'altro importante vantaggio offerto dalla progettazione in 3D è legato proprio a questo delicato aspetto operativo. Si è infatti pensato di utilizzare la scansione 3D per stampare delle controforme delle superfici di frattura^{xv}, su cui sono costruite delle guide cave, con fori coassiali con il perno, da usare per forare la pietra (**figg. 11, 12 e 13**). Questo ha permesso di eseguire i fori con elevatissima precisione, lasciando solo il minimo gioco necessario per l'adesivo intorno al perno.

La scultura è posata su una base in acciaio realizzata con un telaio in putrelle saldate ed un rivestimento in lamiera smontabile, tenuto in posizione con magneti al neodimio per permettere un facile accesso alla struttura interna predisposta per il sollevamento con le benne del transpallet^{xvi} (**fig. 14**).



fig. 12 la controforma guida per il braccio.



fig. 13 la controforma guida per i due perni del cane.



fig. 14 La struttura della base, poi rivestita di lamiere fissate con magneti.

Rispetto all'approccio più tradizionale ed empirico in cui tutto è fatto da restauratore secondo la propria esperienza e le proprie abilità manuali, un progetto portato avanti con l'uso di queste tecnologie richiede una squadra multidisciplinare. La scansione laser della scultura è stata realizzata da Angelo Rubino dell'ISCR, la scansione ottica delle superfici di frattura e delle altre aree sensibili è stata realizzata da Danilo Salzano di Measure3D, che ha collaborato anche nelle fasi di disegno 3D e prove virtuali di traslazione dei pezzi, la verifica FEM dall'ing. Maurizio Sessa. La progettazione complessiva dell'intervento di riassetto, il coordinamento delle professionalità coinvolte, la realizzazione dei perni e la loro messa in opera, sono state compito di Antonio Iaccarino Idelson e Carlo Serino di Equilibrarte, come anche progetto e realizzazione della base espositiva in acciaio.

Bibliografia

- Melucco Vaccaro, A. *Archeologia e restauro*, Il Saggiatore, Arnoldo Mondadori Milano 1989.
- Bertorello, C. *Un sistema di vincoli mobili per l'assemblaggio di sculture lapidee frammentarie*, *Materiali e Strutture*, anno 2, numero 2, 1992, pp. 67–72.
- Usai, C. *Strumenti per eseguire fori di precisione su sculture lapidee*, *Materiali e Strutture*, anno 2, numero 2, 1992, pp. 73–79
- Pini, R., Siano, S., Salimbeni R., Mazzinghi P., Sabatini G., Guasparri G., Giamello M., Scala A., *La pulitura laser nel restauro conservativo dei manufatti lapidei*, in *Kermes*, n.34, 1999, pp. 29-39
- Serino, C., Iaccarino Idelson, A. *Perni reversibili per l'assemblaggio di manufatti frammentari*, in *Atti del XIX Convegno di Studio su "La reversibilità nel restauro"*, Bressanone 1-4 luglio 2003
- Amber, J. et al., Ed. *Holding it all together, ancient and modern approaches to joining, repair and consolidation*, British Museum, Archetype Londra 2008
- Podany, J., Risser, E., Sanchez, E. *Never forever: assembly of sculpture guided by the demands of disassembly* in: Amber, J. et al., Ed. *Holding it all together, ancient and modern approaches to joining, repair and consolidation*, British Museum, Archetype Londra 2008
- Devreux, G. Spada, S.: *Esperienze nei sistemi di ancoraggio nel restauro dei manufatti lapidei* in : *Lo stato dell'arte*, Congresso dell'IGIC Venezia 2010;
- *APLAR 3. Il laser e i laser. Applicazioni laser nel restauro*, a cura di A. Brunetto, ed. Il Prato, Padova, 2011
- Devreux, G. Spada, S.: *Nuove esperienze nei sistemi di ancoraggio nel restauro dei manufatti lapidei* in : *Lo stato dell'arte*, Congresso dell'IGIC Bologna 2013
- Vitali, A., *Sistemi di rimozione di prodotti di corrosione di metalli da substrati di marmo di Carrara e calcare di Vigliano*, tesi Laurea Magistrale in Scienze e Tecnologie per la Conservazione dei beni Culturali, Università di Roma La Sapienza, a.a. 2012/2013
- Riccardelli, C., et al. *The treatment of Tullio Lombardo's Adam: a new approach to the conservation of monumental marble sculpture*, *Metropolitan Museum Journal* n. 49, 2014.
- Pieragostini, E., *Valutazione comparativa di metodi chimici e biologici per la rimozione di macchie di ossido di ferro da superfici calcaree*, tesi Laurea Magistrale in Scienze e Tecnologie per la Conservazione dei beni Culturali, Università di Roma La Sapienza, a.a. 2014/2015

ⁱ Le sezioni sottili sono state eseguite dal Laboratorio di Prove sui Materiali dell'ISCR.

ⁱⁱ Le indagini isotopiche sono state effettuate presso il CNR di Roma.

ⁱⁱⁱ Il laser impegnato è il modello EOS 1000 SFR prodotto dalla El.En.

^{iv} I test di rimozione delle macchie di ossido di ferro fanno riferimento alle sperimentazioni eseguite per le tesi di laurea in Conservazione dei Beni Culturali di Alessandro Vitali e di Erica Pieragostini dell'Università di Roma La Sapienza e sono stati eseguiti in collaborazione con il Laboratorio di Prove sui materiali dell'ISCR ed Erica Pieragostini

^v A. Melucco Vaccaro 1989 (cit.).

^{vi} Tra queste spiccano gli atti del congresso "Holding it all together, ancient and modern approaches to joining, repair and consolidation", British Museum, Archetype Londra 2008.

^{vii} In un articolo del 1992 di C. Bertorello (cit.), approfittando di un foro preesistente ortogonale all'asse del perno, si proponeva l'uso di una spina per il blocco meccanico del giunto. Un sistema questo che può però essere usato solo in casi eccezionali ma che ben esemplifica l'urgenza della reversibilità, che ha visto la proposta di alcune soluzioni di più libero impiego nel brevetto di Carlo Serino presentato a Bressanone nel 2003 (C. Serino, A. Iaccarino Idelson, "Perni reversibili ...", cit.). Successivamente, altri interessanti esempi di perni ed assemblaggi reversibili sono stati presentati da J. Podany al Congresso "Holding it all together..." tenuto al British Museum di Londra nel 2008 (cit.), e da G. Devreux e S. Spada in due Convegni del Gruppo Italiano dell'IIC, nel 2010 e nel 2013 (cit.).

^{viii} C. Usai (cit).

^{ix} L'uso del titanio è utile solo per i manufatti esposti a importanti sbalzi di temperatura perché permette di evitare sollecitazioni meccaniche grazie ad un coefficiente di dilatazione termica molto simile a quello del marmo. Quello dell'acciaio inox 304 è circa doppio ma, perché questo possa arrivare a sollecitare in modo sensibile l'interno del foro, la differenza di temperatura deve essere alta e il perno deve avere grandi dimensioni iniziali. Il minor peso del titanio diventa vantaggioso solo in situazioni specifiche.

^x Perché, per la loro direzione d'inserimento, sono sollecitati a taglio più che a flessione.

^{xi} L'uso dell'analisi FEM, sempre più semplice da usare grazie all'evoluzione dei software, deve essere seguito da un ingegnere strutturista in collaborazione con un restauratore. Indispensabile per il corretto uso della FEM avere parametri fisici precisi da inserire nel modello per cui, nel lavoro sui beni culturali, i cui materiali sono raramente standardizzabili, richiederebbe un importante lavoro d'indagini preliminari come nel lavoro presentato dal Metropolitan Museum di New York (C. Riccardelli et al. 2014, cit.). Nel nostro caso, come nella maggioranza dei casi in cui i fondi sono normalmente limitati e nella normale progettazione ingegneristica, i dati sono presi da tabelle preesistenti inserendo un fattore di sicurezza più ampio per prevedere forme di degrado.

^{xii} Il perno ha un diametro esterno di 8 mm, l'asse libero ha diametro 5 mm e lunghezza complessiva 120 mm.

^{xiii} Delle stesse dimensioni di quello usato per il braccio.

^{xiv} vedi: C. Serino, A. Iaccarino Idelson, "Perni reversibili per l'assemblaggio di manufatti frammentari", in *Atti del XIX Convegno di Studio su "La reversibilità nel restauro"*, Bressanone 1-4 luglio 2003 e G. Devreux, S. Spada: "Nuove esperienze nei sistemi di ancoraggio nel restauro dei manufatti lapidei" in : *Lo stato dell'arte*, Congresso dell'IGIC Bologna 2013.

^{xv} Stampe in sinterizzazione di polvere di nylon.

^{xvi} Le putrelle sono in acciaio (sezione a U 65x42 mm, spessore 5,5 mm), la lamiera di rivestimento è spessa 2 mm. La zincatura e la verniciatura sono state eseguite a forno con polveri epossidiche.