

## La Tomografia Computerizzata tridimensionale con raggi X: un nuovo strumento diagnostico per il patrimonio artistico e culturale

### *Three-dimensional X-ray Computed Tomography: a new diagnostic tool for artistic and Cultural Heritage*

Nata nei primi anni Settanta per applicazioni in campo medico, la Tomografia Computerizzata con raggi X attualmente sta assumendo un ruolo di crescente importanza per la diagnostica nel settore dei Beni Culturali. Essa rappresenta infatti una potente tecnica di indagine non distruttiva, capace di visualizzare in maniera tridimensionale il volume e la struttura interna degli oggetti investigati, grazie anche alle moderne tecniche di rendering 3D. In questo articolo verranno presentati i risultati di alcune indagini diagnostiche realizzate dal nostro gruppo di ricerca, in collaborazione con importanti centri di restauro, utilizzando sistemi tomografici trasportabili da noi sviluppati. In particolare saranno trattati casi di studio in grado di evidenziare la versatilità e le potenzialità della tomografia come strumento conoscitivo nel campo del patrimonio artistico e culturale.

*Born in the early Seventies for medical applications, X-ray Computed Tomography is currently playing an increasingly important role in the field of Cultural Heritage diagnostics. It represents a powerful non-destructive investigation technique, capable of displaying in a three-dimensional way the volume and the internal structure of the investigated objects, also thanks to modern 3D rendering techniques. This article presents the results of some diagnostic tests carried out by our research group, in collaboration with major restoration centers, using transportable tomographic systems developed by us. In particular it will deal with case studies that highlight the versatility and potential of computed tomography as a tool of knowledge in the field of artistic and cultural heritage.*



**Maria Pia Morigi**

Graduated in Physics, she is researcher at the University of Bologna. Since 1998, she focuses her researches on innovative acquisition systems for digital radiography and 3D computed tomography with X-rays of different energy. She conducts researches in the field of Cultural Heritage and collaborates with important restoration institutions.



**Franco Casali**

Graduated in Physics in 1959, he has been Director of the Division of Physics and Scientific Computing at ENEA. From 1985 to 2008 he gave lessons at the University of Bologna, related to Nuclear Reactor Physics and Diagnosis and Restoration Techniques. He promoted a Master in diagnostics and restoration of old manuscripts and printed books.



**Matteo Bettuzzi**

Graduated in Physics, PhD in 2003, he works at the Department of Physics of the University of Bologna. He is mainly focused on the development of detection systems for digital radiography and computed tomography with applications in medical, industrial and cultural heritage preservation fields.



**Rosa Brancaccio**

Graduated in Physics, PhD in 2004, she collaborates with the Faculty of Physics and with the Institute of Cultural Heritage Restoration at Fine Arts Academy of the University of Bologna. She actually focuses her researches mainly on survey of Cultural Heritage using 3D tomography.

## INTRODUZIONE

La tomografia computerizzata con raggi X, più comunemente nota come TAC o CT (Computed Tomography), è un'importante tecnica diagnostica non distruttiva, in grado di visualizzare in maniera tridimensionale la struttura interna degli oggetti investigati. Nata nei primi anni Settanta per applicazioni in campo medico, l'analisi tomografica si è poi ritagliata un ruolo di crescente importanza anche in altri ambiti, come quello industriale e, più recentemente, quello dei Beni Culturali.

Per quanto riguarda in particolare il settore dei Beni Culturali, negli ultimi anni è aumentato notevolmente il numero di indagini scientifiche utilizzate per la diagnostica preventiva al restauro e fra queste la TAC risulta particolarmente utile per conoscere

la tecnica di costruzione, la struttura o lo stato di conservazione di un manufatto ed impostare quindi un corretto restauro [1, 2]. Le prime applicazioni della TAC all'analisi di opere d'arte e reperti archeologici prevedevano generalmente l'utilizzo di scanner medicali. Tuttavia gli impianti di tipo ospedaliero, oltre ad essere difficilmente accessibili, sono ottimizzati per indagini in campo medico e di conseguenza permettono di ottenere buoni risultati soltanto nel caso di oggetti con dimensioni e densità simili a quelle del corpo umano, condizione che in molti casi non è verificata. I maggiori problemi nell'applicazione della tomografia al patrimonio artistico stanno infatti nella disomogeneità di forme, dimensioni e materiali costitutivi. Inoltre il trasporto delle opere d'arte all'esterno dei musei nei quali sono conservate

risulta in genere problematico. Questi aspetti sono alla base del forte interesse per lo sviluppo di sistemi tomografici trasportabili, che consentano di effettuare le analisi *in situ*, al fine di garantire la sicurezza delle opere e limitarne gli spostamenti. Per venire incontro a queste molteplici esigenze, negli ultimi dieci anni il nostro gruppo di ricerca ha messo a punto diversi sistemi per radiografia digitale e tomografia computerizzata 3D presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna. Per ottenere buoni risultati, infatti, ogni oggetto deve essere analizzato con un sistema tomografico opportuno. Se la radiazione ha un'energia troppo bassa, non attraversa l'oggetto; se, invece, è troppo penetrante, non viene attenuata in maniera significativa dall'oggetto e pertanto non "trasferisce informazione" sulla sua struttura interna.

Anche le apparecchiature utilizzate per la rivelazione dei raggi X devono essere ottimizzate sia dal punto di vista dell'efficienza che da quello della risoluzione spaziale dell'immagine acquisita. Di conseguenza, per la realizzazione di un buon sistema tomografico sono necessarie competenze multidisciplinari di fisica, elettronica, matematica ed informatica. Tali competenze esistono nel nostro gruppo di ricerca e ci hanno permesso di sviluppare sistemi tomografici di ottimo livello, con i quali sono state effettuate analisi su oggetti di composizione e dimensioni molto diverse [3-8]. Le nostre attività spaziano infatti dalla microtomografia ad elevata risoluzione spaziale (voxel di qualche micron) di campioni con dimensioni ridotte, fino alla TAC di grandi oggetti. In particolar modo il nostro gruppo si distingue nel

panorama nazionale ed internazionale per aver sperimentato per primo i propri sistemi tomografici all'interno di importanti musei o centri di restauro (ad esempio Palazzo Vecchio e Opificio delle Pietre Dure a Firenze e Centro di Conservazione e Restauro "La Venaria Reale" a Torino). Si tratta di esperienze uniche nel loro genere, dove strumentazione all'avanguardia per la tomografia computerizzata è stata dedicata appositamente al settore dei Beni Culturali e progettata in modo da poter operare sul campo. I nostri sistemi tomografici vengono trasportati sul luogo dove si trova l'opera da indagare, collocati in spazi idonei ed installati. Non essendo dei sistemi chiusi, per il loro corretto funzionamento, essi richiedono una fase di calibrazione preliminare, per la quale è necessaria la presenza di ricercatori esperti nell'utilizzo di sistemi

sperimentali per la tomografia computerizzata, di un esperto qualificato per le misure di radioprotezione e spesso di personale tecnico locale che realizzi i necessari aggiustamenti impiantistici.

#### IL SISTEMA TOMOGRAFICO

Nonostante si tratti di una metodica più complessa e costosa rispetto alla radiografia tradizionale, l'utilizzo della TAC è motivato dal fatto che essa permette di superare la principale limitazione della radiografia, ovvero la sovrapposizione nell'immagine di più piani dell'oggetto, con conseguente perdita di informazioni nella direzione parallela a quella di propagazione del fascio di raggi X. La tomografia consente infatti di ottenere immagini di sezioni trasversali del campione investigato, le cosiddette *slice*, che in

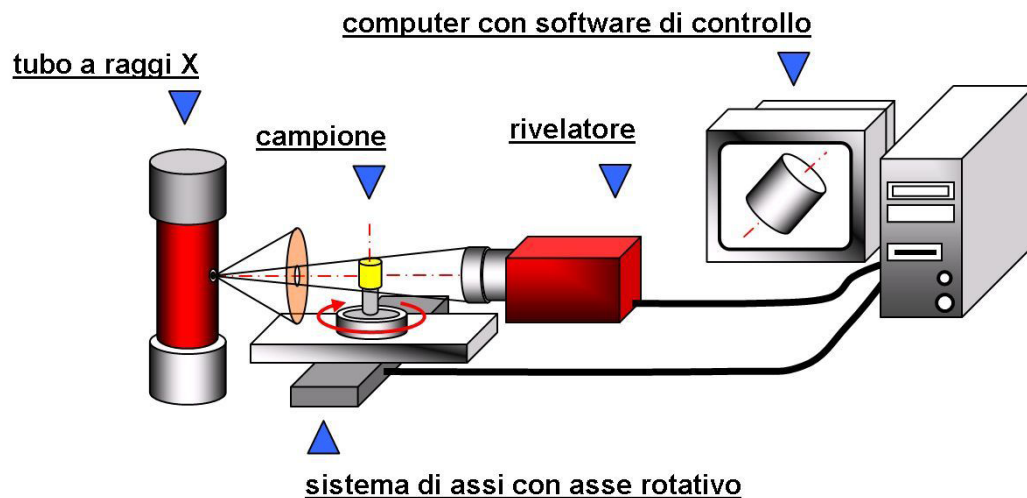


Fig. 1. Schema generale di un sistema tomografico.

pratica rappresentano delle mappe puntuali della densità nella sezione considerata.

Gli elementi essenziali di un sistema tomografico per indagini nel campo dei Beni Culturali sono rappresentati da una sorgente di raggi X, un meccanismo di movimentazione dell'oggetto da investigare, un rivelatore e uno o più computer (Fig. 1). Generalmente un computer si occupa della movimentazione del campione e dell'acquisizione delle radiografie, un altro del processo di ricostruzione tomografica. Durante l'analisi TAC di solito l'oggetto viene fatto ruotare su 360°, con opportuni incrementi angolari. Acquisendo una radiografia ad ogni angolo di rotazione, si ottiene un set di immagini, ciascuna relativa ad una diversa posizione dell'oggetto. Da queste immagini, tramite un programma software

che utilizza opportuni algoritmi matematici, si ricostruiscono le diverse sezioni tomografiche, le già citate *slice*. Riunendo le varie sezioni in un unico volume, è possibile infine ottenere il modello 3D del campione analizzato, sul quale si possono poi operare tagli virtuali con opportuni software di *rendering*, al fine di mettere in evidenza i particolari desiderati. Verranno di seguito brevemente presentati alcuni casi di studio molto diversi fra loro, ma a nostro parere in grado di evidenziare la versatilità e le potenzialità della tomografia come strumento conoscitivo nel campo del patrimonio artistico e culturale.

#### LATOMOGRAFIA DI OPERE D'ARTE DI GRANDI DIMENSIONI

##### Il globo terrestre di Egnazio Danti



Fig. 2. Globo terrestre di Egnazio Danti, Sala delle Carte Geografiche, Palazzo Vecchio (Firenze).

La tomografia in situ di opere d'arte di grandi dimensioni rappresenta una sfida che è stata affrontata dal nostro gruppo di ricerca alcuni anni fa, precisamente nel 2004, quando siamo stati coinvolti in un progetto di indagini diagnostiche in supporto al restauro del grande globo terrestre costruito nel 1567 dal monaco domenicano Egnazio Danti per Cosimo I de' Medici e conservato nella Sala delle Carte Geografiche di Palazzo Vecchio a Firenze (Fig. 2). Per l'epoca in cui fu concepito e per la sua mole di oltre due metri di diametro si tratta di un'opera assolutamente unica. I globi che dall'inizio del XVI secolo si erano diffusi nelle collezioni principesche misuravano al massimo poche decine di centimetri di diametro ed erano solitamente di legno o metallo incisi. Solo nel tardo XVII secolo il veneziano Vincenzo Coronelli

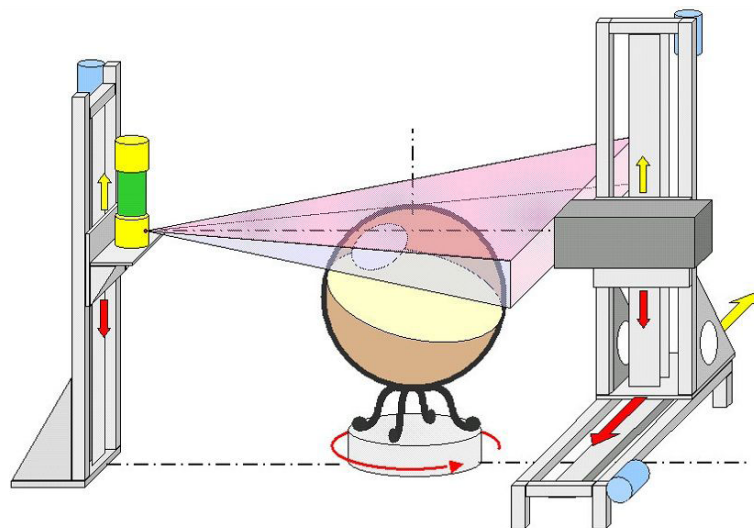
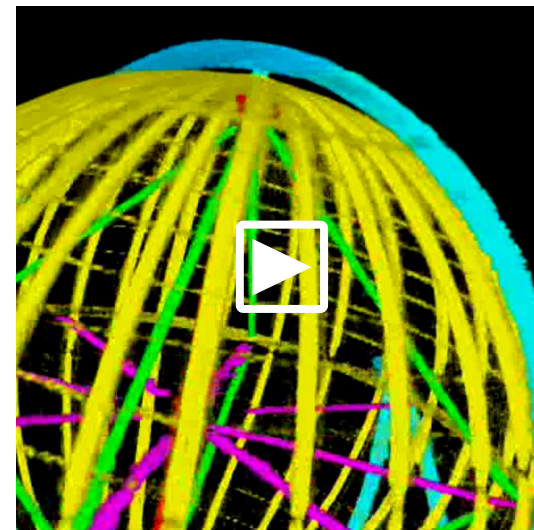


Fig. 3. Schema dell'apparato tomografico sperimentale, progettato per l'analisi del globo di Egnazio Danti: a sinistra il tubo a raggi X, posizionato su un asse di traslazione verticale, al centro il globo sulla piattaforma rotante e a destra il rivelatore, montato su un sistema di assi di traslazione x-y, ciascuno con una corsa di circa 3 m.

realizzò globi anche di dimensioni maggiori di quello di Egnazio Danti, codificando una precisa tecnica di costruzione che non trova riscontro nell'esemplare di Palazzo Vecchio. Prima della nostra indagine le informazioni sull'opera erano molto scarse, ricavate quasi esclusivamente da una descrizione dell'autore stesso: "...è tutta armata dentro di ferri, perché si gran globo non se reggeria da par se..." e inoltre "è fatto con invenzione nuova talmente, che con un sol dito si gran macchina si muove per tutti i versi e si fa alzare e si fa abbassare i poli con facilità grandissima". Dai documenti disponibili non era però possibile risalire in modo dettagliato alla struttura interna dell'oggetto, né dedurne lo stato di conservazione. Per saperne di più, prima di iniziare il lavoro di restauro dell'opera, si è pensato di ricorrere

alla tomografia. Date le dimensioni dell'oggetto, è stato necessario progettare e realizzare una apparecchiatura *ad hoc* e trasportarla sul posto (Figg. 3-4). In particolare, si è dovuto utilizzare degli assi di traslazione sia per il tubo a raggi X, sia per il rivelatore, in modo da effettuare per step successivi la scansione di tutta l'opera. La ricostruzione tomografica del globo ha richiesto l'acquisizione di oltre 31000 radiografie, per un mese circa di misure, condotte in orari prevalentemente serali e notturni. Essendo infatti Palazzo Vecchio meta di turisti, non era possibile durante il giorno effettuare alcuna misura con i raggi X, a causa di problemi connessi con la radioprotezione dei visitatori. Nonostante le difficoltà operative, l'indagine tomografica è stata conclusa con successo ed ha permesso di visualizzare



Video 1. Ricostruzione tomografica del globo di Egnazio Danti (per aprire il video clicca sull'immagine).



Fig. 4. Fotografia del set-up sperimentale nella Sala delle Carte Geografiche di Palazzo Vecchio.

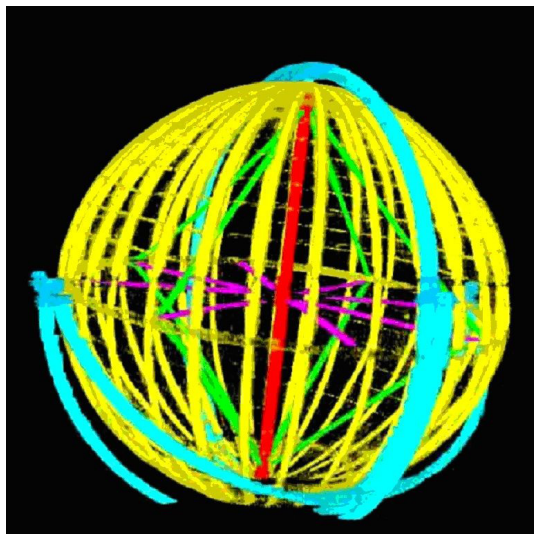


Fig. 5. Ricostruzione tomografica 3D del globo di Egnazio Danti: la struttura metallica interna è chiaramente visibile.

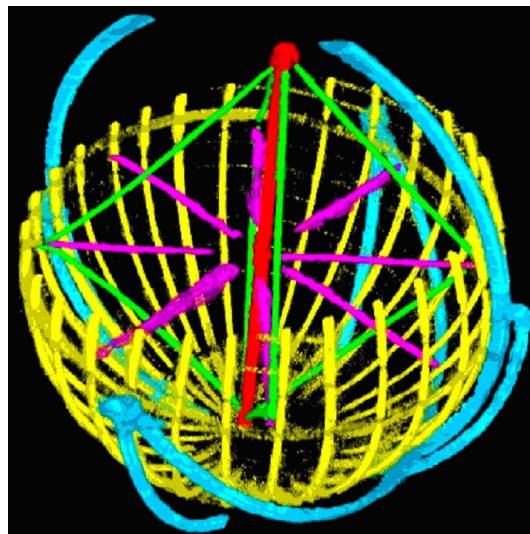


Fig. 6. Taglio virtuale del volume ricostruito: i diversi elementi che costituiscono l'armatura interna sono evidenziati con colori diversi.

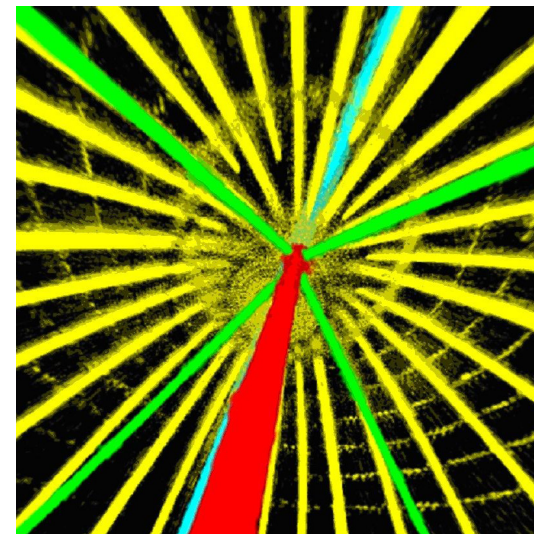


Fig. 7. Particolare del polo Nord del globo: per alleggerire la struttura soltanto metà dei meridiani converge sul polo Nord, l'altra metà converge sul polo opposto.

l'esatta geometria della struttura metallica interna al globo (Figg. 5-6 e Video 1), nonché di conoscere il suo stato di conservazione. E' stato anche possibile stimare il peso dell'armatura interna (circa 350 kg) ed evidenziare dettagli costruttivi particolarmente interessanti (Fig. 7). Si può affermare senza ombra di dubbio che si è trattato di un'indagine sicuramente unica nel suo genere, per via delle dimensioni dell'oggetto investigato e dell'ambiente in cui sono state effettuate le misure.

#### Il globo celeste di Vincenzo Coronelli

Terminata la tomografia del globo di Egnazio Danti, il sistema di acquisizione è stato trasferito presso un laboratorio dell'Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica del CNR di Bologna, dove alcuni

componenti sono stati modificati al fine di renderli più facilmente trasportabili ed utilizzabili anche in ambienti di dimensioni più contenute rispetto alla Sala della Carte Geografiche di Palazzo Vecchio. Con la nuova configurazione il sistema è stato dapprima impiegato per l'analisi tomografica di un dipinto su tavola del XVI secolo, attribuito al pittore Girolamo Marchesi da Cotignola [9], e, successivamente, di un globo celeste, opera di Vincenzo Coronelli. Appartenente all'ordine francescano dei Frati Minori, Vincenzo Maria Coronelli (1650 – 1718) fu cartografo e cosmografo della Repubblica di Venezia, oltre che fondatore dell'Accademia Cosmografica degli Argonauti, la prima società geografica nel mondo. Producesse un gran numero di globi terrestri e celesti di varie dimensioni, fra i quali particolarmente famosi

sono i due globi di quasi 4 m di diametro realizzati dal 1681 al 1683 per il re di Francia Luigi XIV. Lo stesso Coronelli nella seconda parte del Terzo Capitolo dell'*Epitome Cosmografica* si sofferma a descrivere con minuzia di particolari il metodo da lui utilizzato per costruire i globi, parlando di materiali, colle, vernici, tecniche di pittura e di incisione del rame. Il globo da noi sottoposto ad indagine con raggi X è attualmente collocato presso la Biblioteca Comunale di Faenza, in provincia di Ravenna. Tale globo ha un diametro di circa 110 cm e rappresenta le costellazioni e i pianeti così come sono visti da un osservatore posto sulla Terra. Sfortunatamente il globo terrestre "gemello" è andato distrutto in un incendio causato da un bombardamento durante la II Guerra Mondiale. In Fig. 8 è mostrata una fotografia del globo e della

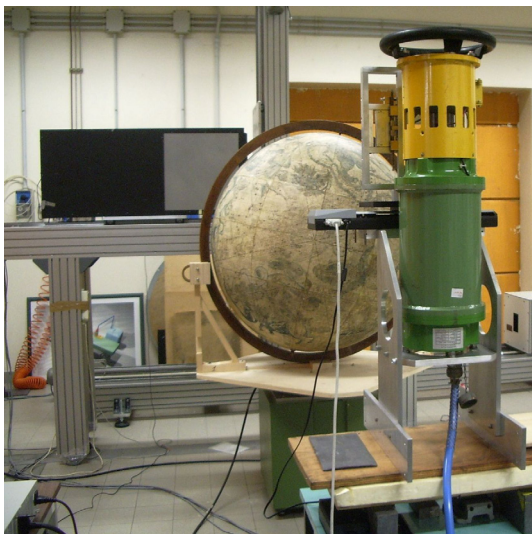


Fig. 8. Globo celeste di Vincenzo Coronelli e set-up sperimentale utilizzato per l'indagine tomografica.

strumentazione utilizzata per le misure.

L'acquisizione di tutte le radiografie necessarie per la ricostruzione tomografica (in totale 24500 immagini) ha richiesto un tempo totale di circa 25 ore. Dalle radiografie è possibile ottenere importanti informazioni sulla tecnica costruttiva del globo e mettere in evidenza un elevato numero di dettagli. La struttura interna del globo è costituita da una trave di sezione quadrata, alla quale sono fissate a diverse altezze alcune coppie di assi di legno che si incrociano in direzioni fra loro ortogonali. Alle due estremità della trave Coronelli ha incuneato un perno di ferro, il cosiddetto perno polare, al quale è fissato il movimento del globo. Per evitare il rischio di spaccatura della trave in seguito all'inserimento del perno, Coronelli ha rinforzato la trave con due giri di filo di ferro (Fig.

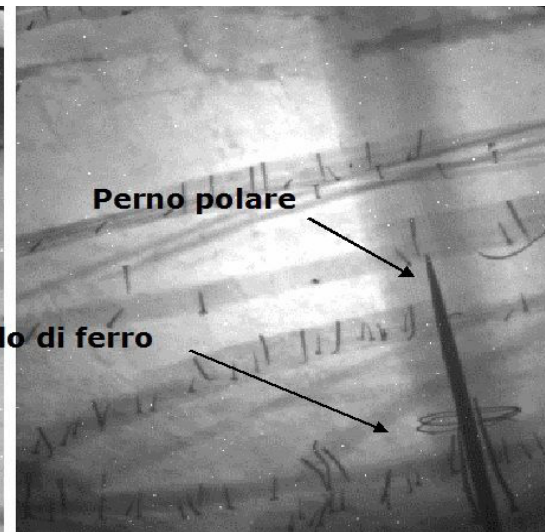
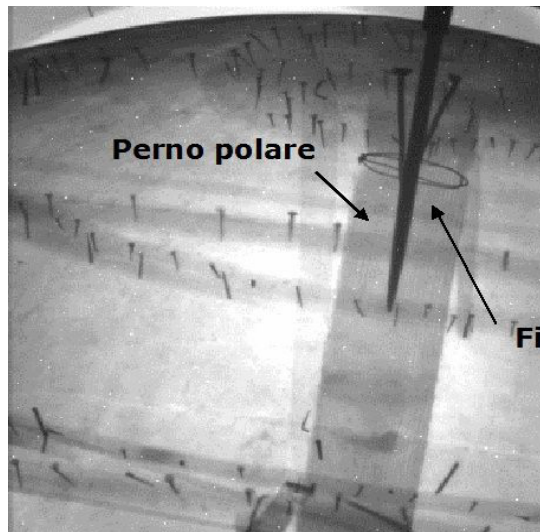


Fig. 9. Immagini radiografiche dei poli del globo di Vincenzo Coronelli: a sinistra il polo Nord e a destra il Polo Sud.

9). Inoltre l'indagine radiografica ha mostrato che alle coppie di assi sono inchiodati dei cerchi di legno (sette in totale) di diverso diametro, alcuni dei quali sono visibili in Fig. 9. Su questi anelli sono state poi inchiodate delle assicelle di legno sottile, accostate l'una all'altra in modo da realizzare una sfera. Dalla Fig. 9 si può anche notare il numero elevato di piccoli chiodi utilizzati dal Coronelli per compiere la suddetta operazione. L'indagine radiografica del globo fornisce importanti informazioni, ma soltanto la tomografia computerizzata rende possibile ricostruire l'intera struttura interna del globo e la sua esatta geometria, visibile in Fig. 10. Inoltre tecniche di "rendering" 3D permettono una manipolazione virtuale del volume ricostruito allo scopo di evidenziare dettagli significativi o di isolare regioni di interesse, come

mostrato in Fig. 11, che pone in evidenza come i vari elementi costituenti lo scheletro del globo sono stati assemblati da Coronelli nella calotta polare superiore.

Grazie ai buoni risultati ottenuti, il sistema tomografico è stato poi trasportato presso l'Opificio delle Pietre Dure di Firenze, dove nel mese di maggio 2007 è stata effettuata una campagna di misure su importanti opere d'arte in corso di restauro, tra cui la *Madonna del cardellino* di Raffaello.

#### La Madonna del cardellino di Raffaello

Come ci racconta Vasari nelle Vite [10], *La Madonna del cardellino* (Fig. 12) fu dipinta da Raffaello nel 1506 circa, in occasione del matrimonio di Lorenzo Nasi

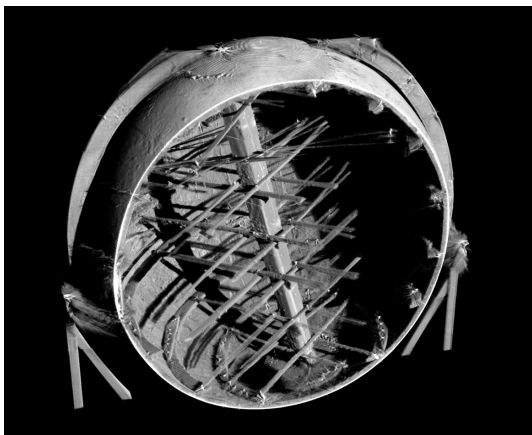


Fig. 10. Ricostruzione tomografica tridimensionale del globo di Coronelli: il taglio virtuale sul volume ricostruito pone in evidenza la struttura interna di legno.



Fig. 11. Ricostruzione tomografica della calotta polare superiore del globo.

con Sandra di Matteo Canigiani. Sfortunatamente palazzo Nasi, insieme ad altri palazzi, rimase coinvolto nello smottamento del monte di San Giorgio, avvenuto secondo Vasari il 17 novembre 1548. Il crollo del palazzo provocò gravi danni al dipinto, che rimase sotto le rovine. Il figlio di Lorenzo, Giovanbattista, definito dal Vasari *"amorevolissimo dell'arte"*, si preoccupò di recuperarne i pezzi e di farli *"rimettere insieme in quel miglior modo che si potette"*. Il dipinto è stato recentemente sottoposto ad un lungo intervento di restauro, conclusosi nel 2008 e preceduto da vari tipi di indagini diagnostiche, tra cui la radiografia su lastra, la riflettografia IR a scansione, la fotografia in luce radente, la fluorescenza UV e la fluorescenza indotta da raggi X. Purtroppo la TAC è stata effettuata a restauro quasi ultimato, non essendo disponibile in precedenza il nostro sistema tomografico ed essendo impossibile utilizzare uno scanner medicale, date le dimensioni del dipinto

(107x77 cm), superiori al diametro del gantry (circa 70 cm), l'anello di rivelatori tipico delle TAC impiegate in campo medico.

I risultati ottenuti con l'indagine tomografica si sono rivelati comunque interessanti, perchè hanno permesso di ricavare informazioni più precise e dettagliate sui danni subiti dall'opera nel crollo di palazzo Nasi e sullo stato di conservazione del supporto.

La ricostruzione tomografica mostrata in Fig. 13, mette bene in evidenza le lacune, le fratture della tavola nella direzione della fibratura del legno, le integrazioni del supporto ligneo, là dove si era perso l'originale. L'angolo inferiore sinistro, a causa dei danni riportati, fu del tutto resecato e ricostruito, mentre tre tasselli di diversa lunghezza sono presenti in alto ed un quarto in basso, in corrispondenza della gamba destra del Bambino e di parte del piede della Vergine. La commettitura dei frammenti non fu

perfetta e rimasero dei dislivelli, ancora oggi visibili. Nel particolare radiografico e nella slice riportati in Fig. 14, risultano anche evidenti le lacune del colore originale, colmate da un rifacimento pittorico del restauratore cinquecentesco. Infatti, come mostrato dalle misure di fluorescenza X, la tavola ha una preparazione a base di piombo, mescolato in molti casi con giallo di piombo e stagno, materiali ad elevata radiopacità [11]. Le zone dove manca tale preparazione, per via delle fratture o delle lacune, risultano più scure e ben evidenti, a causa della differenza di assorbimento nei confronti del fascio di raggi X.

Il supporto ligneo, a causa delle vicende particolari a cui abbiamo accennato in precedenza, è caratterizzato da una situazione piuttosto complessa, anche se in realtà la tecnica di costruzione è molto semplice. Si individua infatti una sola commettitura, essendo il dipinto composto da due tavole di diversa larghezza





Fig. 12. *La Madonna del cardellino* di Raffaello.

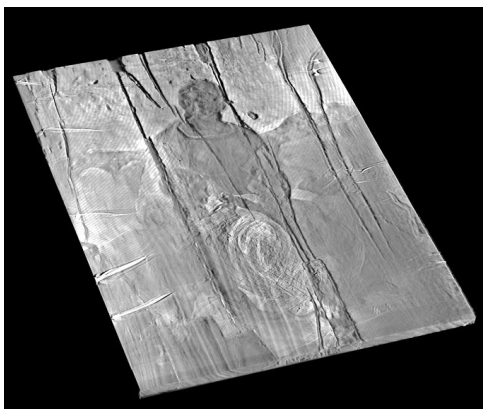


Fig. 13. Ricostruzione tomografica 3D della *Madonna del cardellino*, in cui sono state accentuate le ombre, al fine di mettere in evidenza le discontinuità superficiali.

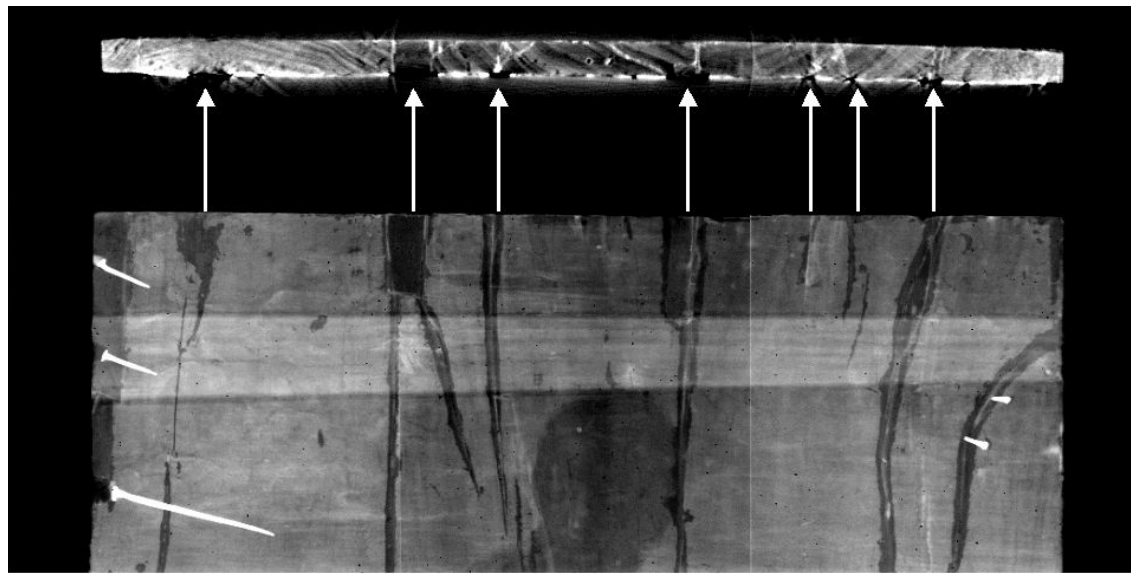


Fig. 14. Particolare radiografico della parte superiore del dipinto e slice tomografica, in cui sono evidenti le fratture della tavola, a cui corrispondono le lacune dello strato pittorico.

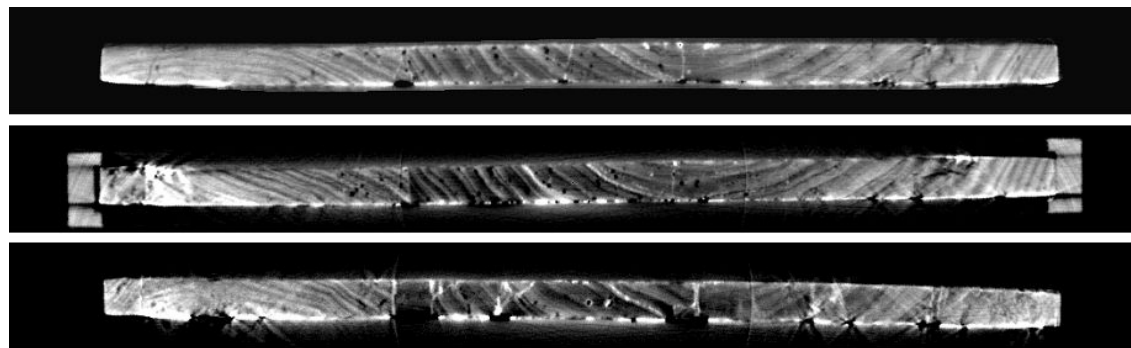


Fig. 15. *Slice* tomografiche in cui le due tavole che costituiscono il dipinto sono chiaramente distinguibili. E' pure evidente la particolare deformazione subita dal supporto ligneo.

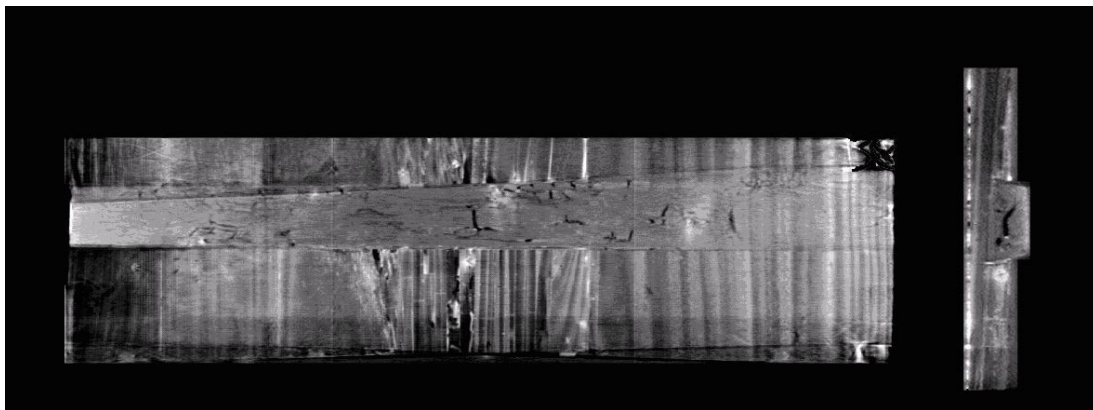


Fig. 16. Sezioni frontale e sagittale della tavola in corrispondenza di una delle traverse poste sul retro del supporto. E' possibile notare la forma trapezoidale della traversa e la presenza nella stessa di numerose gallerie di tarli.

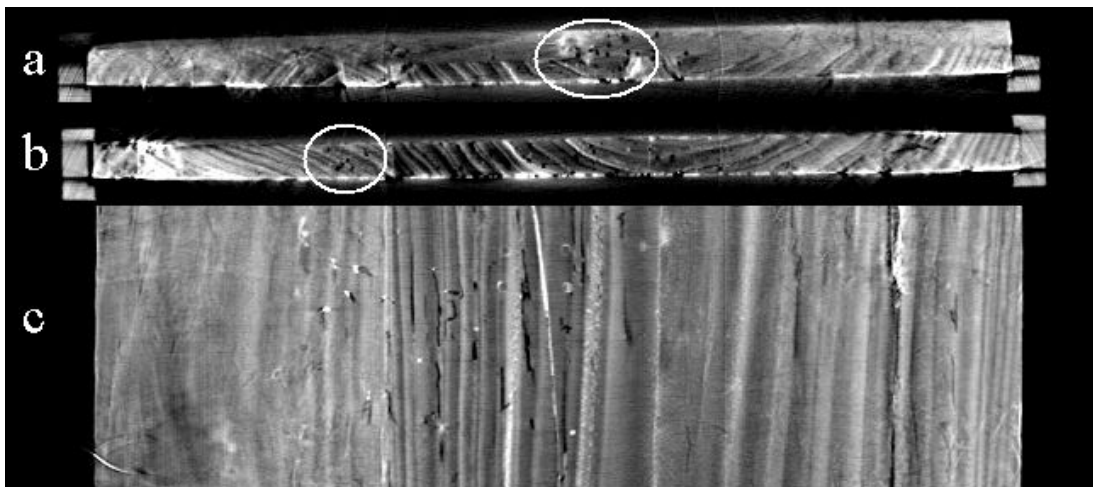


Fig. 17. a) - b) Slice tomografiche che mostrano la presenza di fori e gallerie provocati da un passato attacco di insetti xilofagi; c) Sezione frontale della tavola ad una profondità di circa 1.5 cm dalla superficie pittorica

(rispettivamente 53 cm e 25 cm circa), di spessore pari a 3-3.5 cm. In Fig. 15 sono mostrate tre diverse slice tomografiche, nelle quali risulta facilmente individuabile la linea di commettitura fra le due tavole che compongono l'opera. Dall'osservazione delle venature del legno emerge un particolare insolito ed interessante.

La più piccola è una tavola con anelli di accrescimento abbastanza stretti, ottenuta con taglio tangenziale; la più grande è anch'essa una tavola tangenziale, ma ha la particolarità di essere posta al rovescio, con la faccia esterna verso gli strati preparatori, contravvenendo quindi ad una regola pressoché costante.

Come è noto, le tavole di legno sono soggette col tempo ad imbarcarsi, anche in dipendenza dal tipo di taglio con cui sono state ottenute.

Nel caso della *Madonna del cardellino*, il fatto che le due tavole siano state dipinte una sulla faccia interna e l'altra su quella esterna, informazione che non era assolutamente ricavabile dalla semplice immagine radiografica, ha determinato una particolare deformazione del supporto ligneo, ben visibile nelle slice di Fig. 15.

Sul retro della tavola sono inserite nel supporto, in tracce di forma trapezoidale, due traverse, montate in modo tale da risultare contrapposte. In Fig. 16 sono mostrate una sezione frontale e una sagittale del dipinto, in corrispondenza di una delle traverse. Nella sezione frontale è visualizzato un piano che si trova ad una profondità di pochi mm rispetto al retro della tavola. Nella traversa è possibile notare la presenza di numerose gallerie di tarli, che risultano di colore scuro, perché non stuccate.

Diverse gallerie sono anche presenti all'interno della tavola, come risulta evidente dall'esame di alcune slice ed anche operando dei tagli virtuali sul volume



Fig. 18. Olla fittile di epoca romana contenente monete di bronzo.

ricostruito, in modo da visualizzare l'interno del supporto ligneo. In Fig. 17 sono mostrate due slice e una sezione frontale della parte inferiore della tavola (alla profondità di circa 1.5 cm dalla superficie pittorica), in cui risultano chiaramente visibili gli esiti di un passato attacco da parte di insetti xilofagi.

La TAC effettuata sulla *Madonna del cardellino* assume per noi particolare importanza sia per il prestigio dell'opera, sia perchè ci ha permesso di dimostrare che anche oggetti fortemente asimmetrici come i dipinti su tavola di grandi dimensioni possono essere sottoposti con successo ad indagine TAC, nonostante le forti differenze nell'attenuazione subita dai raggi X quando il dipinto ruota tra la sorgente ed il rivelatore, circostanza che rende particolarmente difficoltosa la scelta dell'energia ottimale del fascio.

#### LATOMOGRAFIA DI OPERE D'ARTE E REPERTI ARCHEOLOGICI IN BRONZO

Tutte le indagini tomografiche illustrate sino a questo punto sono state realizzate utilizzando come sorgente di raggi X un tubo trasportabile, con una tensione di picco di 200 kV, prodotto dalla ditta italiana Gilardoni. Nel caso di opere d'arte e reperti archeologici costituiti da materiali fortemente radiopachi come il bronzo o i metalli in genere, l'energia massima dei raggi X prodotti da un tubo come quello sopra indicato, può risultare insufficiente.

Si rende quindi necessario ricorrere a tubi di tipo industriale, che raggiungono una tensione massima di 450 kV, o addirittura ad un acceleratore lineare, in grado di produrre raggi X con un'energia di qualche MeV.

#### L'olla fittile di epoca romana contenente monete di bronzo

Nel 2000, nel corso degli scavi effettuati nel IV Municipio di Roma presso la Tenuta Radicicoli a Fidene, è stata ritrovata un'area sepolcrale di età romana, attraversata da alcuni tracciati stradali e comprendente in particolare sepolture ad incinerazione. Tra i materiali rinvenuti, databili in età repubblicana ed imperiale, spicca una piccola olla fittile contenente monete prevalentemente di bronzo, miste a terra (Fig. 18). Attualmente la prassi per le indagini su manufatti archeologici di questo tipo comprende analisi di tipo spettroscopico per la caratterizzazione fisico-chimica, analisi di datazione, analisi di tipo sonico, finalizzate all'autenticazione e alla diagnostica dello stato di conservazione

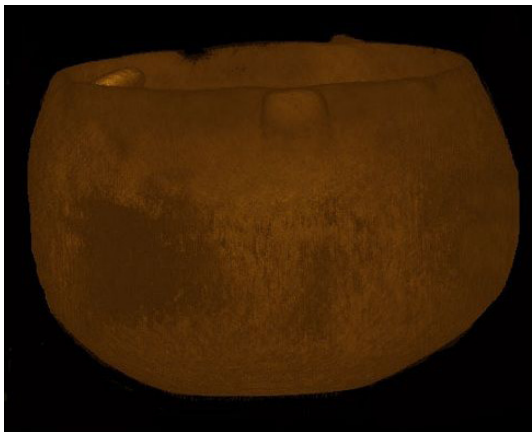


Fig. 19. Ricostruzione tomografica 3D dell'anforetta romana.

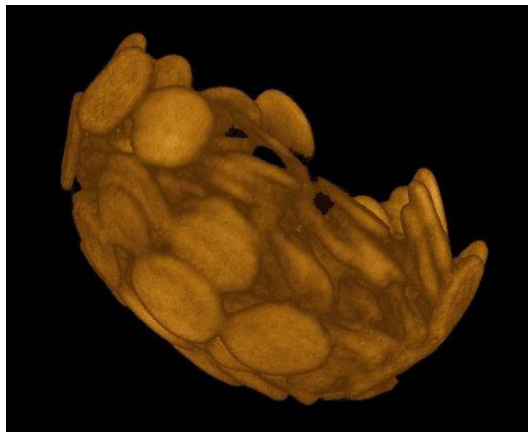
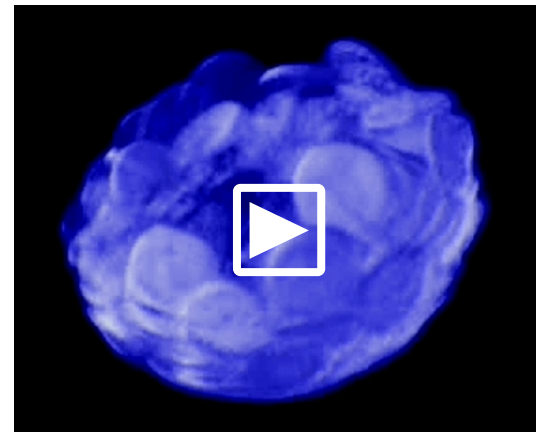


Fig. 20. Visualizzazione delle monete all'interno per mezzo di tecniche di segmentazione.



Video 2. Segmentazione delle monete contenute nell'olla fittile di epoca romana (per aprire il video clicca sull'immagine).

[12, 13] ed analisi di superficie con tecniche di tipo scanner laser 3D [14]. Bisogna però osservare che nessuna di queste tecniche permette di visualizzare la disposizione interna di qualsiasi materiale (terra, monete o altro) contenuto all'interno del vaso oggetto di studio. Di conseguenza l'unico metodo per esaminare il contenuto di questi reperti è l'attuazione di un microscavo per portare gradualmente alla luce i vari oggetti presenti. La metodologia di microscavo prevede che si estraggano con la dovuta cautela i vari materiali e reperti che si incontrano strato per strato, documentandone fotograficamente la posizione interna. E' comunque evidente che in nessun caso si potrebbe riportare ogni oggetto nella sua posizione originale, nè esiste un metodo per determinare a priori la disposizione, le dimensioni e lo stato di conservazione dei reperti. In questo contesto la radiografia e la tomografia 3D rappresentano l'unica tecnica non invasiva per effettuare un'analisi

preventiva del contenuto di anfore, vasi e altri manufatti archeologici.

Nel caso dell'anforetta rinvenuta a Fidene, come si può notare dalla Fig. 18, la larghezza è di circa 11.4 cm. Quindi, scegliendo come asse di rotazione il naturale asse di simmetria del vaso, il massimo spessore di bronzo che i raggi X devono attraversare è di circa 10 cm. Tenendo conto del coefficiente di assorbimento del bronzo, si può ricavare che l'energia necessaria per poter effettuare un'indagine tomografica con raggi X è di qualche MeV. Non disponendo il nostro gruppo di una sorgente adeguata, è risultato necessario utilizzare un Linatron 9-15 MV (Varian), messo gentilmente a disposizione dall'Avio Group - Divisione Spazio di Colleferro (Roma). I risultati dell'analisi tomografica, realizzata nel 2004 con uno dei nostri sistemi di acquisizione, sono mostrati nelle *Figg. 19-20 e nel Video 2*. Vale la pena di sottolineare che un'indagine tomografica su un oggetto di questo

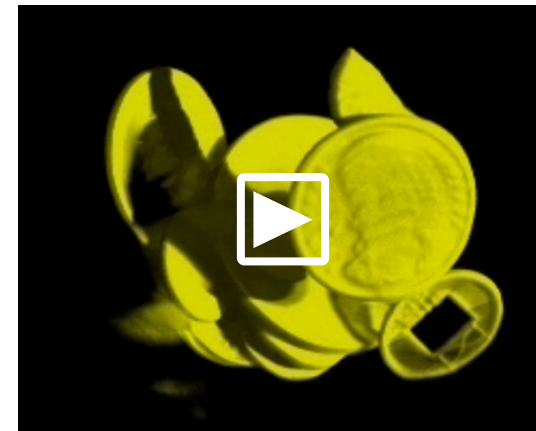
genere rappresenta una novità assoluta. Tuttavia, pur essendo visibile la disposizione delle monete all'interno del vaso, non è possibile visualizzarle separatamente ed osservarne dettagli quali scritte o immagini in rilievo.

Negli anni successivi la ricerca è continuata e nell'ambito del progetto DETECT, finanziato dalla Comunità Europea, è stato sviluppato un sistema per tomografie tridimensionali, ottimizzato per sorgenti di raggi X fino a 450 kV. Con tale sistema, attualmente installato in un laboratorio dell'EMPA (Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research) di Zurigo e usato prevalentemente per applicazioni industriali, è stata effettuata una ricerca per individuare monete di bronzo tra altri oggetti metallici.

Non essendo più possibile sperimentare il sistema sul ripostiglio monetale di Fidene, si è pensato di realizzare un oggetto di prova, costituito da una



Fig. 21. Foto dell'anforetta di test e di alcune delle monete che sono state inserite all'interno.



Video 3. Segmentazione delle monete contenute nell'anforetta di test (per aprire il video clicca sull'immagine).

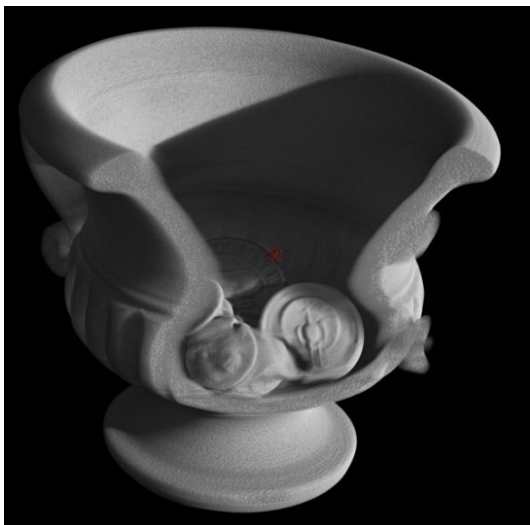


Fig. 22. Tomografia 3D dell'anforetta di test con taglio virtuale del volume ricostruito, per evidenziare l'interno.



Fig. 23. Segmentazione delle monete.

piccola anfora moderna in terracotta, riempita di monete di diversa natura (Fig. 21) e polistirolo. I risultati sono mostrati nelle Figg. 22-23 e nel Video 3. Come si vede chiaramente, in questo caso la risoluzione spaziale risulta nettamente migliore, tanto che, mediante tecniche di segmentazione di immagine, è possibile mettere in evidenza il gruppo di monete all'interno dell'anforetta, visualizzando persino dettagli come scritte e immagini in rilievo sulle monete.

#### La testa in bronzo del Getty Conservation Institute

Alcuni anni fa il nostro gruppo di ricerca ha attivato una collaborazione con il Getty Conservation Institute (GCI) di Los Angeles, per il quale è stato progettato e realizzato un sistema tomografico per indagini diagnostiche su opere d'arte. Il Getty Conservation Institute dispone di un tubo a raggi X con tensione massima di 450 kV, con il quale è possibile effettuare



Fig. 24. Testa in bronzo di età greca, conservata presso il *Getty Conservation Institute di Los Angeles*.

indagini su oggetti in bronzo, purchè lo spessore del metallo non sia superiore a qualche mm. Questo generalmente è il caso delle statue in bronzo di epoca greca o romana. La tomografia 3D di questo tipo di reperti riveste un particolare interesse, per la possibilità di approfondire le conoscenze sulla tecnica usata dagli antichi per le fusioni in bronzo, ed inoltre rappresenta una novità assoluta. In collaborazione con il GCI il nostro gruppo ha effettuato la prima tomografia tridimensionale su una statua antica in bronzo (un Eros del I sec. d.C.), i cui risultati saranno pubblicati a breve. Oltre all'Eros abbiamo realizzato indagini TAC anche su altre opere in bronzo di minori dimensioni, fra cui una testa di età greca (*Fig. 24*). In *Fig. 25* è riportata una delle proiezioni radiografiche utilizzate per la ricostruzione tomografica del volume,

sul quale possono essere poi operati tagli virtuali, come mostrato in *Fig. 26*. Nella stessa Figura è anche visibile una slice, dalla quale si può apprezzare lo spessore molto sottile del bronzo, che denota la maestria dell'artista greco.

#### CONCLUSIONI

Le applicazioni della Tomografia Computerizzata con raggi X non sono più limitate al solo campo medico, ma stanno diventando sempre più frequenti ed importanti anche in altri ambiti, come quello mineralogico, industriale e dei Beni Culturali. In particolare l'utilizzo di questa tecnica non distruttiva per la diagnostica del patrimonio artistico e culturale richiede lo sviluppo di sistemi tomografici versatili e trasportabili, in grado di effettuare le indagini in

situ, là dove l'opera d'arte o il reperto archeologico sono conservati. Presso il Dipartimento di Fisica di Bologna opera da diverso tempo il nostro gruppo di ricerca, che ha acquisito una notevole esperienza nella progettazione e nello sviluppo di sistemi di acquisizione innovativi per la radiografia digitale e la tomografia computerizzata 3D con raggi X. Il nostro gruppo si distingue per il suo operato nel settore dei Beni Culturali, avendo sperimentato per primo i propri sistemi all'interno di importanti musei e centri di restauro, su opere d'arte anche di notevoli dimensioni.

Negli ultimi tempi stiamo registrando un numero crescente di richieste di indagini tomografiche su opere in bronzo o comunque costituite da materiali fortemente radiopachi. Sebbene il nostro gruppo

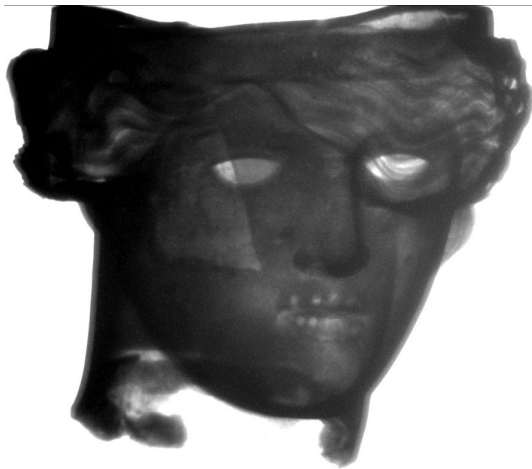


Fig. 25. Radiografia della testa in bronzo.

abbia già ottenuto risultati interessanti in tal senso, molto resta ancora da fare nel campo della tomografia ad alta energia. In particolare anche in questo caso sarebbe importante disporre di un sistema di acquisizione trasportabile, dotato di un acceleratore lineare come sorgente di raggi X. La realizzazione di un sistema di questo genere richiede finanziamenti adeguati, che, nonostante l'interesse dichiarato da più parti per una tale iniziativa, risulta assai difficile reperire. Questa è la nuova sfida che il nostro gruppo di ricerca è deciso ad affrontare.

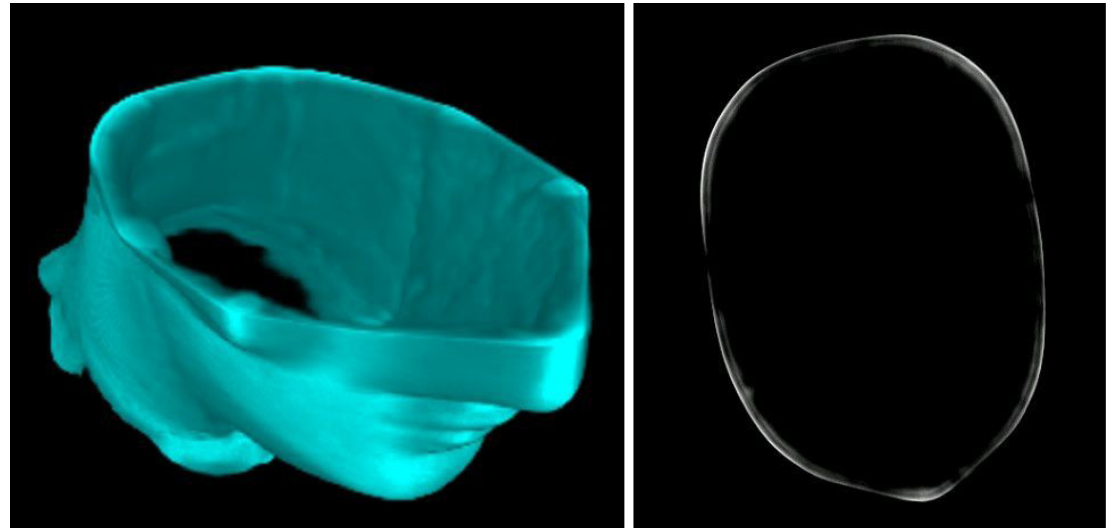


Fig. 26. Ricostruzione tomografica della testa in bronzo e slice tomografica, dalle quali è possibile apprezzare lo spessore molto sottile del bronzo.

#### RINGRAZIAMENTI

Si desidera ringraziare il Comune di Firenze, l'Opificio delle Pietre Dure di Firenze e il Getty Conservation Institute di Los Angeles per avere parzialmente finanziato alcune delle analisi tomografiche illustrate nell'articolo. Un particolare ringraziamento va anche al Dott. Scianna, per la preziosa collaborazione in occasione della TAC al globo celeste di Vincenzo Coronelli.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Casali F., *X-ray and Neutron Digital Radiography and Computed Tomography for Cultural Heritage*, in Physical Techniques in the Study of Art, Archaeology and Cultural Heritage, edited by D. Bradley and D. Creagh, Elsevier, 2006.
- [2] Casali F., Morigi M.P., Bettuzzi M., Brancaccio R., *La tomografia tridimensionale per i Beni Culturali*, 21mo Secolo – Scienza e Tecnologia, n. 1, 2007.
- [3] Rossi M., Casali F., Chirco P., Morigi M.P., Nava E., Querzola E., Zanarini M., *X-ray 3D computed tomography of bronze archeological samples*, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 46, No. 4, 897-903, 1999.
- [4] Bettuzzi M., Brancaccio R., Casali F., Cornacchia S., Giordano M., Morigi M.P., Pasini A., Romani D., *Innovative systems for digital radiography and computed tomography: applications for cultural heritage diagnostics*, in *Physics Methods in Archeometry*, Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi", Course CLIV, ed. by M. Martini, M. Milazzo and M. Piacentini, IOS PRESS Publisher, Amsterdam, The Netherlands, 2004.
- [5] Rossi M., Casali F., Romani D., Bondioli L., Macchiarelli R., Rook L., *MicroCT scan in paleobiology: application to the study of dental tissues*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 213, 747-750, 2004.
- [6] Morigi M.P., Casali F., Bettuzzi M., Bianconi D., Brancaccio R., Cornacchia S., Pasini A., Rossi A., Aldrovandi A., Cauzzi D., *CT investigation of two paintings on wood tables by Gentile da Fabriano*, Proceedings of "10th International Symposium on Radiation Physics", Coimbra, Portugal, 17-22 September 2006.
- [7] Morigi M.P., Casali F., Bettuzzi M., Brancaccio R., Brancaccio R., D'Errico V., *Application of X-ray Computed Tomography to Cultural Heritage diagnostics*, *Applied Physics A*, Volume 100, Issue 3, 653-661, 2010.
- [8] Casali F., Morigi M.P., Bettuzzi M., Berdondini A., Brancaccio R., D'Errico V., *Kongo Rikishi: tomografia computerizzata*, in *Restaurare l'Oriente: sculture lignee giapponesi per il MAO di Torino*, a cura di Pinin Brambilla Barcilon e Emilio Mello, Collana Cronache, Nardini Editore, 2008.
- [9] Bettuzzi M., Casali F., Morigi M.P., Brancaccio R., Rossi A., D'Errico V., Castellani A., Cauzzi D., *X-ray 3D Computed Tomography of Large Old Paintings on Wood Panels: a New Tool for Conservation Analysis*, International Conference on Heritage of Naqada and Qus region, Naqada, 22 - 28 January 2007.
- [10] Vasari G., *Vite de' più eccellenti architetti, pittori, et scultori italiani, dalla Cimabue insino a' tempi nostri*, Firenze 1568 (ed. cons. a cura di Della Pergola P., Grassi L., Previtali G., Novara 1967).
- [11] Riitano P., *Anticipazioni sulla pulitura della Madonna del cardellino*, in *Restauri e ricerche. Dipinti su tela e tavola*, a cura di M. Ciatti e C. Frosinini, Firenze, 2003.
- [12] Cosentino P.L., Capizzi P., Fiandaca G., Martorana R., Messina P., Pellegrino L., *La sicurezza nell'identità dei Beni Culturali*, in *Materiali Lapidei: La firma sonora*, Atti del IV Congresso Nazionale IGIC – Lo stato dell'arte – Siena, 28-30 settembre 2006, 689-694.
- [13] Cosentino P.L., Capizzi P., Fiandaca G., Martorana R., Messina P., Pellegrino L., Razo Amoroz I., *Dice la mamma Rocca..... Metodologie non invasive per il controllo dei manufatti artistici. Tecniche di analisi di materiali nei Beni Culturali*, Carboni Ed., Palermo, 59-63, 2007.
- [14] Karasik A., Smilansky U., *3D scanning technology as a standard archaeological tool for pottery analysis: practice and theory*, *Journal of Archaeological Science*, 35(5), 1148-1168, 2008.