

This is the author's final version of the contribution published as:

Nervo, M.; Pastrone, N.; Re, A.. Il progetto neu_ART: radiografie digitali e tomografie assiali computerizzate su opere di grandi dimensioni. Il caso studio del Crocifisso di Donatello. Ass. Centro Studi Antoniani. 2016. pp: 72-87.

in

Il restauro del crocifisso ligneo di Donatello nella chiesa dei Servi di Padova.
Atti della Giornata di studio (Udine, 2015)

When citing, please refer to the published version.

Link to this full text:

<http://hdl.handle.net/>



ESTRATTO

L'autore ha il diritto di stampare o diffondere copie di questo PDF esclusivamente per uso scientifico o didattico. Il Centro Studi Antoniani si riserva di mettere in vendita il PDF, oltre alla versione cartacea. L'autore ha diritto di pubblicare in internet il PDF originale allo scadere di 24 mesi.

The author has the right to print or distribute copies of this PDF exclusively for scientific or educational purposes. Centro Studi Antoniani reserves the right to sell the PDF, in addition to the paper version. The author has the right to publish the original PDF on the internet at the end of 24 months.

ASSOCIAZIONE CENTRO STUDI ANTONIANI

Piazza del Santo, 11 I-35123 PADOVA (ITALIA)

Tel. +39 049.860.3234 - Fax +39 049.82.25.989

e-mail: info@centrostudiantoniani.it - Sito Web: www.centrostudiantoniani.it

CENTRO STUDI ANTONIANI

59



IL RESTAURO
DEL *CROCIFISSO* LIGNEO
DI DONATELLO
NELLA CHIESA DEI SERVI
DI PADOVA
DIAGNOSTICA, INTERVENTO,
APPROFONDIMENTI

Atti della giornata di studio
Udine, Centro Culturale delle Grazie
15 maggio 2015

a cura di
ELISABETTA FRANCESCUTTI

con la collaborazione di
FRANCESCA MENEGHETTI

PADOVA
CENTRO STUDI ANTONIANI
2016

Il restauro del *Crocifisso* ligneo di Donatello nella chiesa dei Servi di Padova : diagnostica, intervento, approfondimenti : atti della giornata di studio, Udine, Centro culturale delle Grazie, 15 maggio 2015 / a cura di Elisabetta Francescutti ; con la collaborazione di Francesca Meneghetti. – Padova : Centro Studi Antoniani, 2016. – XII, 368 p. : ill. a colori ; 24 cm.

(Centro Studi Antoniani ; 59)

ISBN 978-88-95908-04-5

I: Francescutti, Elisabetta
II: Meneghetti, Francesca

1: Padova – Santa Maria dei Servi – Crocifisso ligneo - Restauro
2: Donatello – Crocifisso – Padova – Santa Maria dei Servi

730.945321 – Ed. 21.

*Ai parrocchiani di Santa Maria dei Servi
vivi e defunti*



Il sito www.donatello.beniculturali.it, realizzato a corredo del presente volume, contiene la campagna diagnostica completa eseguita in occasione del restauro e altri contenuti multimediali.

© 2016 - Centro Studi Antoniani
Piazza del Santo, 11
I - 35123 Padova
E-mail: info@centrostudiantoniani.it
www.centrostudiantoniani.it

ISBN 978-88-95908-04-5



MARCO NERVO* - NADIA PASTRONE** - ALESSANDRO RE***

**IL PROGETTO NEU_ART: RADIOGRAFIE DIGITALI
E TOMOGRAFIE ASSIALI COMPUTERIZZATE
SU OPERE DI GRANDI DIMENSIONI.
IL CASO STUDIO DEL *CROCIFISSO* DI DONATELLO**

INTRODUZIONE

Il restauro del *Crocifisso* ligneo della chiesa dei Servi di Padova ha richiesto una approfondita fase di studio del manufatto da un punto di vista della storia conservativa dell'opera, del suo stato di conservazione e della tecnica esecutiva impiegata nella realizzazione della scultura ligneo policroma. È proprio da queste necessità che è nata la volontà da parte della Direzione Lavori di effettuare una tomografia. Le dimensioni del *Crocifisso* non consentivano tuttavia di ricorrere ai canonici scanner medicali. È stato pertanto richiesto al Centro Conservazione e Restauro "La Venaria Reale" (CCR) di verificare la possibilità di realizzare una TAC completa al manufatto ligneo utilizzando l'unico apparato in Italia in grado di eseguire la misura, all'epoca ancora in fase finale di test presso i Laboratori Scientifici del CCR. Nel luglio 2013 si realizzano quindi le verifiche strumentali e si dà l'avvio all'imponente campagna di presa dati, protrattasi per circa 150 ore senza interruzioni, seguita da un fase ancora più lunga di elaborazione delle oltre 12.000 radiografie acquisite. Complessivamente la TAC al *Crocifisso* ligneo di Donatello ha generato una mole di dati superiore al Terabyte.

* Fondazione Centro per la Conservazione ed il Restauro dei Beni Culturali "La Venaria Reale"; ** Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Sezione di Torino; *** Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Torino e Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Sezione di Torino, per la collaborazione *neu_ART*.

IL PROGETTO DI RICERCA NEU_ART

Il progetto neu_ART¹ nasce dalla collaborazione tra Fondazione Centro per la Conservazione ed il Restauro dei Beni Culturali “La Venaria Reale” (CCR), la sezione di Torino dell’Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) e il Dipartimento di Fisica dell’Università degli Studi di Torino. Presentato nel 2009 al bando regionale per progetti di ricerca in materia di Scienze Umane e Sociali per l’anno 2008, promosso dalla Regione Piemonte - Direzione Innovazione, Ricerca e Università, è risultato ammesso a finanziamento regionale. L’attività di ricerca, sviluppata negli anni 2010-2013, mirava a sviluppare apparati innovativi di diagnostica non invasiva basati sull’uso di raggi X e di neutroni da applicare allo studio, al restauro, alla conservazione e alla valorizzazione dei beni culturali. Fulcro del progetto è stato lo studio, la progettazione e la realizzazione presso i laboratori scientifici del CCR di un innovativo apparato per eseguire radiografie digitali e tomografie computerizzate. Peculiarità di questo apparato è la possibilità di realizzare radiografie di ampie superfici, con un sistema a scansione che permette di visionare in tempo reale l’esito dell’acquisizione. Grazie a questo sistema è possibile radiografare tele e tavole fino a circa 3.1 m x 2.7 m, con una risoluzione di 200 µm, sufficienti per evidenziare la maggior parte dei dettagli tipicamente riscontrabili in manufatti con supporti in tela e tavola. È attualmente in fase finale di test un nuovo rivelatore in grado di migliorare la risoluzione fino a 50 µm, rendendo quindi possibile una più chiara lettura di particolari sub-millimetrici. A differenza delle TAC medicali, impiegate anche per eseguire indagini tomografiche su beni culturali, l’apparato in funzione al CCR è in grado di indagare oggetti alti fino a 2.5 m e larghi fino a 2 m. Inizialmente pensato per realizzare tomografie di arredi² e sculture lignee, il sistema è risultato avere un’elevata flessibilità, permettendo di sottoporre a TAC anche manufatti archeologici quali ad esempio i pani di terra³.

L'apparato radio-tomografico

L’oggetto da analizzare viene interposto tra una sorgente di raggi X in posizione fissa, che produce un fascio conico che abbraccia l’oggetto con

¹ Per maggiori informazioni sul progetto si vedano: *Il Progetto neu_ART. Studi e applicazioni / Neutron and X-ray tomography and imaging for cultural heritage*, a cura di MARCO NERVO (Cronache 4), Editris, Torino 2013; ALESSANDRO RE ET AL., *Results of the Italian neu_ART project*, «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering», 37 (2012), DOI: 10.1088/1757-899X/37/1/012007.

² ALESSANDRO RE ET AL., *X-ray tomography of large wooden artworks: the case study of “Doppio corpo” by Pietro Piffetti*, «Heritage Science», 2: 19 (2014), DOI: 10.1186/s40494-014-0019-9 (11.09.2014).

³ ALESSANDRO RE ET AL., *X-ray tomography of a soil block: a useful tool for the restoration of archaeological finds*, «Heritage Science», 3: 4 (2015), DOI: 10.1186/s40494-015-0033-6 (03.02.2015).

un’apertura angolare che dipende dalla dimensione dell’oggetto e dalla sua distanza dalla sorgente, e un rivelatore che registra l’immagine radiografica.

La parte meccanica del sistema è costituita da tre componenti: un asse a movimentazione verticale che sorregge la sorgente di raggi X, due assi a movimentazione orizzontale e verticale per il rivelatore, in grado a sua volta di ruotare attorno al proprio asse, e una piattaforma rotante su cui è posizionato il manufatto, al fine di acquisire le proiezioni a diversi angoli di incidenza del fascio. La posizione angolare del rivelatore rispetto al suo asse verticale e la sua posizione lungo l’asse orizzontale di scansione sono sincronizzati in modo da mantenere il rivelatore sempre ortogonale alla direzione dei raggi X. Il *software* di controllo della parte meccanica sincronizza inoltre la scansione orizzontale, la lettura del rivelatore e la rotazione della piattaforma su cui è posizionata l’opera in modo da automatizzare l’acquisizione di tutte le proiezioni necessarie per la ricostruzione.

La sorgente di raggi X, modello Eresco 42 MF4 della General Electric, è caratterizzata da un’energia massima dei raggi X selezionabile tra 5 a 200 keV, una corrente massima di 10 mA⁴, macchia focale di 3 mm². Il rivelatore di raggi X, modello C9750-20TCN della Hamamatsu, è un rivelatore lineare costituito da 2560 pixel quadrati di 0.2 mm x 0.2 mm, con un numero di livelli di grigio pari a 4096 (12 bit). Sorgente e rivelatore vengono allineati in modo che il centro del rivelatore sia alla stessa quota verticale della macchia focale della sorgente. Nel caso di acquisizioni per TAC, anche la piattaforma rotante viene allineata con sorgente e rivelatore, in modo tale che la proiezione di ogni punto dell’oggetto che si trovi sull’asse macchia focale-centro del rivelatore si mantenga alla stessa altezza al variare dell’angolo di rotazione della piattaforma. Queste operazioni di allineamento vengono svolte preliminarmente ad ogni TAC e occorre arrivare ad una precisione pari a 0.2 mm di allineamento complessivo.

L’apparato è collocato all’interno di un locale radioprotetto realizzato appositamente nei laboratori scientifici, costituito da pareti schermate in piombo e pareti in muratura (Fig. 1). Tutte le operazioni a sorgente X accesa sono condotte da una sala controllo esterna, da cui si verificano la movimentazione degli assi motorizzati e l’acquisizione delle immagini radiografiche dal rivelatore.

LA TAC DEL CROCIFISSO DI DONATELLO

Effettuare la TAC a un oggetto di notevoli dimensioni richiede un’accurata e attenta fase di preparazione. In primo luogo occorre considerare l’ingombro massimo del manufatto nel piano orizzontale, definendo il ci-

⁴ Con un massimo di 900 W, quindi ad esempio a 200 kV la corrente massima sarà di 4.5 mA.

lindro ideale di rotazione. In prima approssimazione, per TAC effettuate a Crocifissi si considera che la metà della distanza tra le dita della mano destra e quelle della mano sinistra rappresenta la minima distanza possibile tra centro di rotazione della piattaforma rotante e rivelatore, compatibile con il fatto che l'intero manufatto debba poter ruotare attorno all'asse di rotazione senza urtare il rivelatore. Come detto nel precedente paragrafo, l'apparato radio-tomografico installato nei laboratori scientifici del CCR è stato pensato per effettuare TAC a oggetti posti in verticale. Rispetto alle TAC condotte su arredi lignei, il *Crocifisso* di Donatello presentava il problema di non poter stazionare in verticale senza una struttura di sostegno. Nel laboratorio di restauro della Soprintendenza per i beni storici artistici ed etnoantropologici del Friuli Venezia Giulia esisteva già una tale struttura, ma sebbene garantisse il posizionamento verticale del *Crocifisso* aveva un ingombro maggiore del volume occupato dal *Crocifisso* stesso. Questo avrebbe richiesto una maggiore distanza tra oggetto e sorgente, determinando un aumento della magnificazione⁵ dell'immagine e contestualmente l'aumento della penombra⁶, degradando dunque l'immagine radiografica. In generale è dunque preferibile ridurre al minimo la distanza tra oggetto e rivelatore. Per questo motivo è stato necessario progettare una nuova struttura di sostegno, in grado di sostenere il *Crocifisso* in maniera idonea e sicura e con un ingombro minore della scultura stessa. Grazie ad un proficuo scambio tecnico con i partner del progetto neu_ART, il restauratore Angelo Pizzolongo ha realizzato la struttura (Fig. 2)⁷. Come si può osservare, il *Crocifisso* è mantenuto in posizione eretta grazie a due vincoli già esistenti sul manufatto, uno sulla schiena (gancio) e uno al di sotto dei piedi (tenone). La struttura di sostegno è stata progettata in modo da permettere il posizionamento del *Crocifisso* anche in orizzontale, con le braccia poste in verticale. Questo tipo di assetto si è reso necessario per garantire un'adeguata ricostruzione tomografica anche delle braccia. L'acquisizione delle immagini per la TAC è stata avviata il 15 luglio 2013 alle 17 ed è terminata, dopo circa 145 ore ininterrotte di lavoro giorno e notte, il 21 luglio 2013 alle 19.

Parametri e modalità operativa di acquisizione

I parametri di acquisizione vengono stimati attraverso la geometria del sistema oggetto - sorgente - rivelatore, ma verificati prima di avviare le acquisizioni tomografiche. In questa fase preliminare sono state acquisite im-

⁵ La magnificazione, o ingrandimento, è definita come il rapporto tra la distanza sorgente - rivelatore (SDD) e la distanza sorgente - oggetto (SOD). La magnificazione aumenta con il diminuire di SOD (avvicinando cioè l'oggetto alla sorgente).

⁶ La penombra è definita dalla relazione $P = f \times ODD \times SOD^{-1}$: dove f è la dimensione della macchia focale della sorgente e ODD è la distanza oggetto - rivelatore. Al crescere di quest'ultima (avvicinando cioè l'oggetto alla sorgente) aumenta P .

⁷ Si veda il contributo di Angelo Pizzolongo in questa pubblicazione.

magini radiografiche di tutto il *Crocifisso*, al fine di determinare i parametri ottimali per la sorgente in modo da garantire il miglior contrasto possibile nell'immagine. Da questi parametri e dalla dimensione della radiografia lungo l'asse orizzontale di scansione, deriva la velocità a cui si deve muovere il rivelatore e di conseguenza la stima del tempo complessivo per tomografare completamente il manufatto.

L'apparato radio-tomografico è stato concepito per acquisire immagini radiografiche attraverso una scansione lungo un asse orizzontale ortogonale all'asse sorgente-oggetto. La dimensione della radiografia lungo questo asse deriva dall'intervallo di scansione, scelto in modo da garantire che, a qualunque angolo di rotazione, la proiezione del manufatto cada all'interno dell'immagine acquisita. La dimensione verticale dell'immagine invece è fissa e dipende dalla dimensione verticale del rivelatore. Questa dimensione determina il numero di "fasce" orizzontali in cui virtualmente occorre suddividere il manufatto. La scelta tiene conto anche della distanza tra oggetto e rivelatore e della sovrapposizione che si vuole ottenere tra radiografie di fasce adiacenti. Nel caso in esame, il *Crocifisso* è stato suddiviso in 7 fasce quando collocato in verticale e 6 fasce per le braccia, quando collocato in orizzontale.

Per minimizzare i tempi di acquisizione, la dimensione orizzontale delle immagini radiografiche è stata variata a seconda della fascia: per le fasce corrispondenti alla testa e alle spalle è stata utilizzata una dimensione di 1.150 mm, per il resto del corpo e per le braccia una dimensione di 900 mm (testa e spalle determinano un cilindro di rotazione maggiore di quello generato dal resto del corpo e dalle braccia).

Dai parametri geometrici risultava una penombra di dimensioni maggiori della dimensione del pixel del rivelatore, ragione per cui è stato deciso di mediare tra loro 16 pixel adiacenti (*binning x4*). Le radiografie che si ottengono hanno quindi una dimensione del pixel di 0,8 mm.

Dalle radiografie preliminari è risultata adeguata una tensione di alimentazione dell'anodo della sorgente di 180 kV; a questo valore di tensione è possibile associare una corrente massima di 5 mA.

L'ultimo parametro impostato è la sezione angolare di acquisizione. Da studi condotti⁸ è risultato essere sufficiente acquisire immagini radiografiche in 270°, con passi angolari di 0,25°. Nel caso del *Crocifisso* in posizione verticale, questo si traduce in 1.080 radiografie per ciascuna delle 7 fasce. Quando il *Crocifisso* è stato collocato in posizione orizzontale, la sezione angolare è stata limitata a 200°, equivalenti a 800 radiografie per ciascuna delle 6 fasce (3 per ogni braccio).

⁸ MARGHERITA MARTINI, *Raggi X applicati ai Beni Culturali: potenzialità della tomografia, ottimizzazione dei parametri di ricostruzione e casi studio*, tesi di laurea magistrale in Scienze per i Beni Culturali, Università degli Studi di Torino, a.a. 2012-2013, relatore ALESSANDRO RE, pp. 76-83.

Complessivamente sono state acquisite 12.360 radiografie, corrispondenti a circa 140 GB di dati "grezzi".

Il processo di ricostruzione tomografico⁹

Il processo che porta dalle radiografie dell'oggetto alle sezioni tomografiche è lungo e richiede notevoli risorse in termini di elaborazioni al computer.

L'elaborazione dei dati avviene per singola fascia (come detto ciascuna fascia contiene 1.080 o 800 radiografie a seconda della posizione analizzata); le radiografie vengono in primo luogo normalizzate secondo una scala di grigi proporzionale al coefficiente di attenuazione¹⁰. La ricostruzione della sezione orizzontale dell'oggetto (*slice*) è l'operazione che richiede più risorse in termini di potenza di calcolo. Poiché ciascuna sezione può essere ricostruita indipendentemente dalle altre¹¹, i processi di parallelizzazione (sfruttando le CPU del computer o sistemi più evoluti come i *cluster* di computer) permettono di ridurre il tempo di elaborazione complessiva. In totale sono state ricostruite più di 8.000 sezioni.

I programmi di ricostruzione generano sezioni secondo un piano orizzontale. Per permettere di osservare strutture e andamenti interni anche in altre viste, a partire dalle sezioni orizzontali sono state create ulteriori sezioni corrispondenti a tagli verticali fronte-retro e tagli laterali destra-sinistra. La figura 3 mostra le tre tipologie di viste.

Risultati

Per un immediato riscontro con i restauratori, i dati acquisiti sono stati post-prodotti ed elaborati preliminarmente quasi in tempo reale. Questa procedura permette inoltre una verifica dei parametri utilizzati, necessaria anche in considerazione del limitato tempo disponibile per effettuare le ac-

⁹ Per maggiori dettagli sulla procedura di ricostruzione si veda: CHIARA RICCI, *Radiografia digitale e tomografia computerizzata: messa a punto dell'apparato strumentale e analisi su beni culturali*, tesi di laurea magistrale in Scienze per i Beni Culturali, Università degli Studi di Torino, a.a. 2010-2011, relatore ALESSANDRO RE, pp. 38-45.

¹⁰ La normalizzazione avviene attraverso la relazione $I = -\ln [(I - D) \times (W - D)^{-1}]$: dove I è la radiografia, D è la *dark* (radiografia ottenuta a sorgente spenta, serve a normalizzare rispetto al rumore elettronico) e W è il *white* (radiografia ottenuta a sorgente accesa ma senza l'oggetto, serve a normalizzare rispetto alla sorgente e al guadagno dei diversi pixel del rivelatore).

¹¹ Per la ricostruzione sono stati utilizzati algoritmi specifici per la geometria *fan beam*, sebbene il tipo di geometria impiegato per l'acquisizione sia di tipo *cone beam*. Le specifiche geometriche dell'apparato radio-tomografico permettono tuttavia di approssimare la ricostruzione secondo la geometria di tipo *fan beam*. Questo si traduce nella possibilità di ricostruire singolarmente le *slices*, anziché il volume nel suo insieme, operazione ancora più dispendiosa in termini di elaborazione al computer e non possibile per volumi di grandi dimensioni, come il caso in esame.

quisizioni. Al termine di ogni serie di acquisizioni (1.080 radiografie per il corpo, 800 per le braccia) si è quindi avviato e completato il processo di ricostruzione descritto nel precedente paragrafo.

La prima parte dell'opera a essere radiografata, e quindi ricostruita, è stata quella compresa tra la sommità del capo e le spalle. Le sezioni orizzontali di questa porzione del manufatto hanno subito messo in evidenza la possibilità di distinguere tra parte modellata e dipinta e parte lignea scolpita. La parte modellata, costituita da gesso, biacca e pigmenti, risulta infatti molto più radiopaca del sottostante legno (nelle sezioni questo si traduce in una colorazione tendente al grigio chiaro - bianco). Nel legno si evidenziano bene gli anelli di accrescimento, dettaglio che permette ad esempio di definire il taglio impiegato. Procedendo verso il basso, si sono potuti osservare gli incastri delle braccia, già comunque evidenziati in radiografia; in questo caso la TAC permette di determinare meglio dimensione e forma dei tenoni (Fig. 6).

La ricostruzione del busto permette di apprezzare lo spessore e l'estrema omogeneità della parte pittorica nelle parti in cui l'artista è intervenuto modellando il legno intagliato (cf. Fig. 3 nelle tre viste). Nelle stesse immagini si può osservare, caratteristica diffusa in tutta l'opera, l'ottimo stato di conservazione del legno: i danni da insetti xilofagi sono pressoché assenti e i difetti del legno sono in numero limitato. Sempre in tema di stato di conservazione, dalla TAC è stato possibile comprendere meglio forma ed estensione della profonda spaccatura presente sulla schiena, così come è stato possibile dettagliare alcune spaccature presenti in altre parti del manufatto (in particolare nella zona dei glutei) e non osservabili perché al di sotto dello strato pittorico.

Oltre alle braccia, la TAC ha evidenziato che esistono soltanto altre due parti innestate con incastri: la mano destra e l'alluce del piede sinistro (Fig. 4). Osservando la sezione del piede, l'alluce appare più chiaro rispetto al resto del piede, a indicare che probabilmente è stato utilizzato un legno differente¹².

Al termine della procedura di ricostruzione di tutte le porzioni in cui è stato virtualmente suddiviso il *Crocifisso*, tutte le sezioni sono state elaborate con il *software* VGStudio MAX 2.2 della Volume Graphics. Il *software* ricompone tutte le sezioni ricostruite in un unico volume tridimensionale dell'intero manufatto e ne consente la visualizzazione attraverso un *rendering* 3D oppure attraverso delle sezioni secondo piani scelti dall'utente. La visione d'insieme dell'intero volume permette di apprezzare meglio il fatto che sia stato utilizzato un unico tronco per la realizzazione del corpo del *Cristo* (cf. Fig. 5). La possibilità di visualizzare il volume del manufatto li-

¹² La radiopacità di un'essenza lignea dipende dalla sua densità e dunque essenze lignee differenti (se di diversa densità) appaiono in toni di grigio diversi.

gneo in ambiente 3D ha inoltre permesso di estrapolare sezioni anatomiche caratteristiche e fornire dati utili per lo studio anatomico dell'opera.

CONCLUSIONI

Nell'ambito del progetto di ricerca neu_ART, co-finanziato dalla Regione Piemonte, il CCR si è dotato di un apparato radio-tomografico, unico in Italia, realizzato grazie alla stretta collaborazione con la sezione INFN di Torino e il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Torino. Eseguire e analizzare una TAC completa al *Crocifisso* di Donatello, all'interno di una struttura dedicata come il Centro Conservazione e Restauro "La Venaria Reale", ha fornito importanti elementi per lo studio dell'opera.

La TAC all'opera di Donatello, che ha coronato la fase conclusiva del progetto neu_ART, ha richiesto un notevole impegno di personale specializzato, nella fase di acquisizione dati prima e in seguito per l'elaborazione e la ricostruzione tridimensionale del manufatto ligneo policromo¹³.

La stretta collaborazione con la Soprintendenza belle arti e paesaggio per le province di Venezia, Belluno, Padova e Treviso nella persona della dottoressa Elisabetta Francescutti ha reso tutte le fasi di acquisizione, elaborazione e valutazione dei dati un'esperienza indimenticabile sia per la comprensione dell'opera sia per l'assoluto incanto nel trovarsi di fronte a un capolavoro e ai suoi segreti.

SOMMARIO

Le tecniche radiografiche permettono di indagare le opere d'arte in maniera non invasiva. Nel caso di oggetti tridimensionali, come sculture e arredi lignei, la sola immagine radiografica può non essere risolutiva. In questi casi è utile ricorrere alla tomografia assiale computerizzata (TAC), tecnica che permette di visualizzare sia le sezioni interne di cui è costituita l'opera sia l'intero volume tridimensionale. Eseguire una TAC di un manufatto di grande valore storico-artistico e di notevoli dimensioni è tuttavia operazione complessa. La dimensione e il peso massimi dell'opera d'arte sono necessariamente un limite pratico all'uso di TAC medicali. Al Centro Conservazione e Restauro "La Venaria Reale" (CCR) è stato allestito un apparato radio-tomografico che permette di analizzare manufatti di grandi dimensioni in un ambiente controllato. Questo apparato è stato interamente progettato, sviluppato, realizzato e installato nell'ambito del progetto di ricerca neu_ART, co-finanziato dalla Regione Piemonte. Al progetto hanno partecipato il CCR, la sezione di Torino dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) e il Dipartimento di Fi-

¹³ Per la partecipazione durante l'acquisizione dei dati si ringraziano: Giorgia Blanc, Paola Buscaglia, Michela Cardinali, Jacopo Corsi, Novella Coviello, Paolo Luciani, Giorgia Mila, Andrea Perino, Chiara Ricci, Daniela Russo, Valentina Tasso, Sandra Vazquez, Bernadette Ventura.

sica dell'Università degli Studi di Torino. A conclusione del progetto di ricerca si è realizzata la TAC completa del *Crocifisso* ligneo di Donatello. Il personale tecnico specialistico ha lavorato per una intera settimana, giorno e notte, all'acquisizione dei dati. Il processo di elaborazione dell'ingente mole di informazioni raccolte e la successiva ricostruzione del volume del *Crocifisso* hanno richiesto diversi mesi di lavoro. Nel contributo si illustrano le modalità operative dell'esecuzione della TAC e gli esiti delle elaborazioni tomografiche.

Parole chiave: TAC; radiografia; beni culturali; rendering 3D.

SUMMARY

Radiographic techniques allow to study works of art in a non-invasive way. For 3D objects, such as sculptures and wooden furniture, the radiographic image is not sufficient. In such cases it is useful to perform a computed tomography scan (CT), technique that allows to display both the interior parts of a work of art and the whole three-dimensional volume. Perform a CT scan of an artefact of great historical and artistic value and of considerable size is, however, a complex operation. The maximum size and weight of the work of art are necessarily a constraint in the use of a medical CT scan. At the Centro Conservazione e Restauro "La Venaria Reale" (CCR) a radio-tomographic apparatus was installed, allowing to analyse large artefacts in a controlled environment. This apparatus was completely designed, developed, realized and installed in the framework of the neu_ART research project, co-funded by Piedmont Region. CCR, Turin section of the National Institute of Nuclear Physics (INFN) and Physics Department of the University of Turin participated to the project. At the end of the project the complete CT of the Donatello's wooden *Crucifix* was realized. The specialist technicians worked for a whole week, day and night, to the data acquisition. The elaboration of the huge amount of data collected and the subsequent reconstruction of the volume of the *Crucifix* required a lot of months. In the article the operating modes of CT scan and the results of the tomographic elaboration are shown.

Keywords: TAC; radiography; cultural heritage; rendering 3D.

Marco Nervo
Fondazione Centro per la Conservazione
ed il Restauro dei Beni Culturali "La Venaria Reale"
marco.nervo@centrorestaurovenaria.it

Nadia Pastrone
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di Torino
nadia.pastrone@to.infn.it

Alessandro Re
Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Torino
e Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di Torino
alessandro.re@unito.it



Fig. 1: Venaria Reale, interno del locale radioprotetto realizzato nei Laboratori Scientifici del Centro Conservazione e Restauro.
 In alto: sorgente di raggi X montata sull'asse che ne permette il movimento verticale. In basso: rivelatore di raggi X, nascosto dietro a una schermatura di protezione in piombo con una fessura in corrispondenza della regione attiva, montato sul doppio sistema di movimentazione orizzontale-verticale; un terzo motore permette al rivelatore di ruotare attorno al proprio asse; nell'immagine si osserva anche la piattaforma rotante su cui vengono collocati i manufatti da tomografare

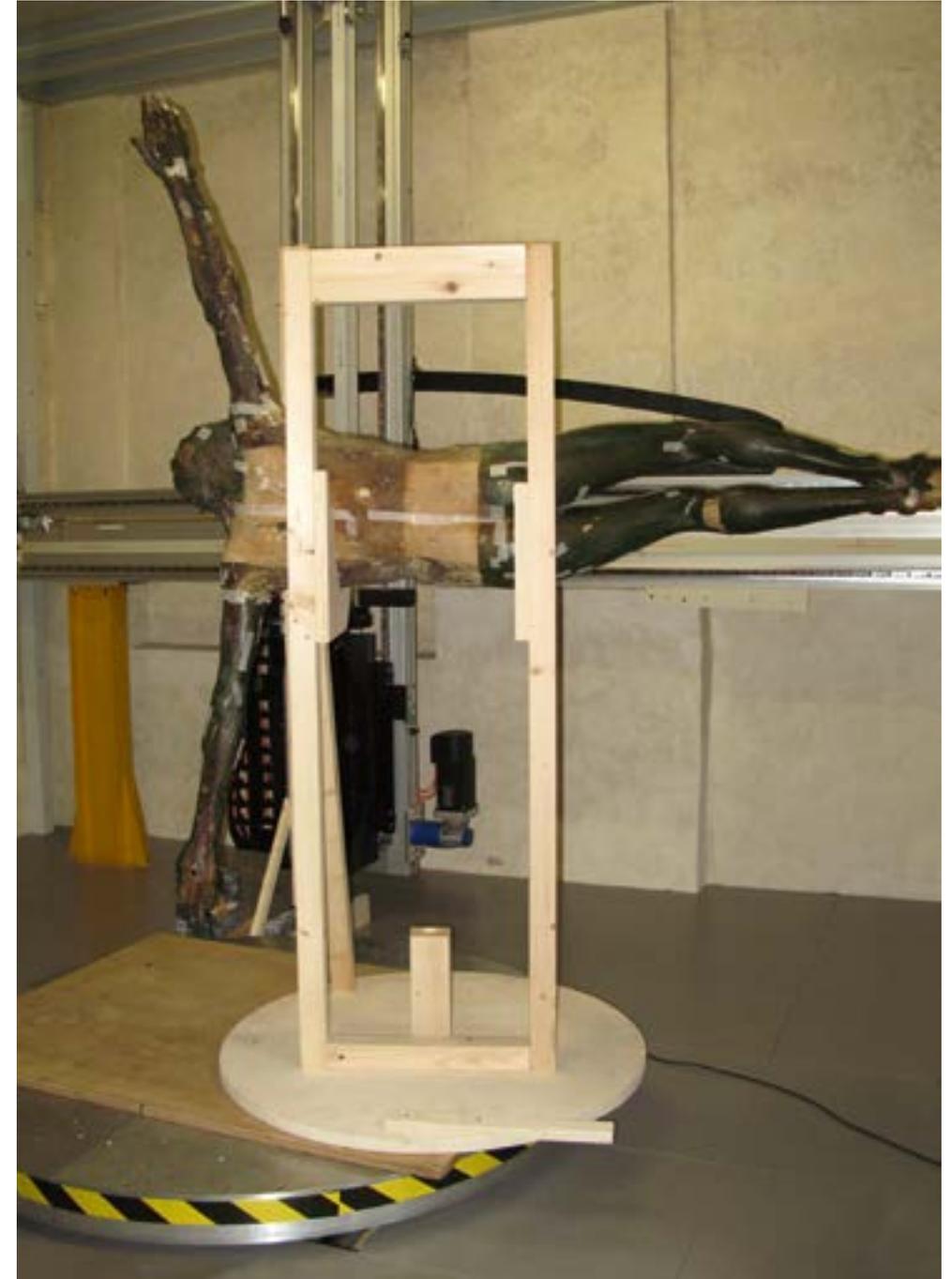


Fig. 2: DONATELLO, *Crocifisso*, Padova, chiesa di Santa Maria dei Servi
 Struttura lignea di sostegno collocata sulla pedana rotante dell'apparato radio-tomografico

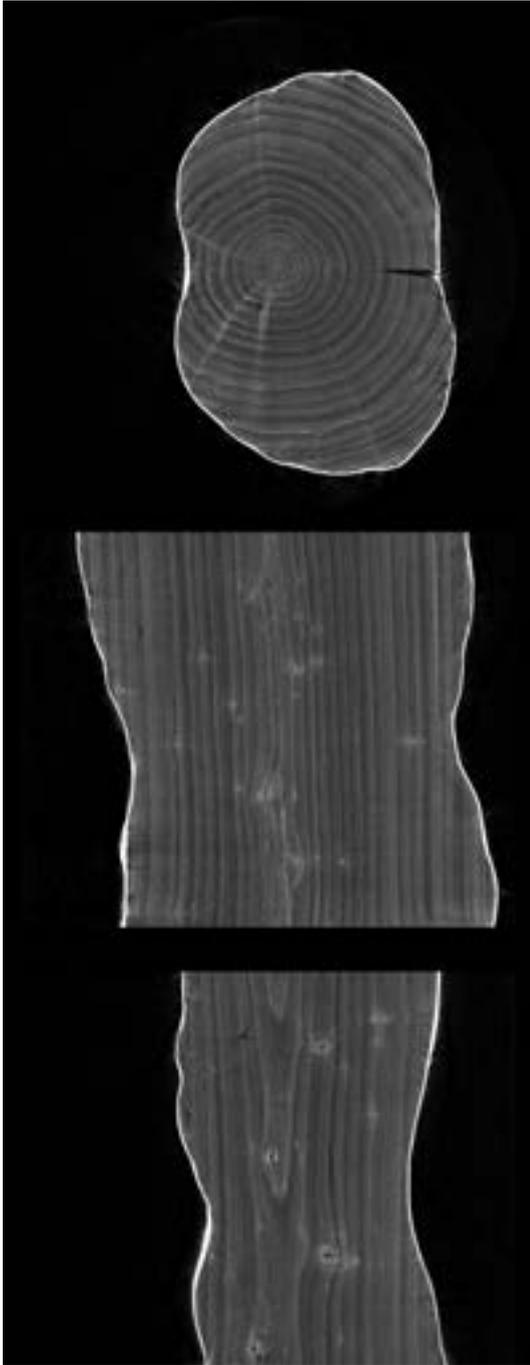


Fig. 3: DONATELLO, *Crocifisso*, particolari delle ricostruzioni TAC del busto
Dall'alto al basso: sezione orizzontale, sezione verticale fronte-retro,
sezione laterale destra-sinistra

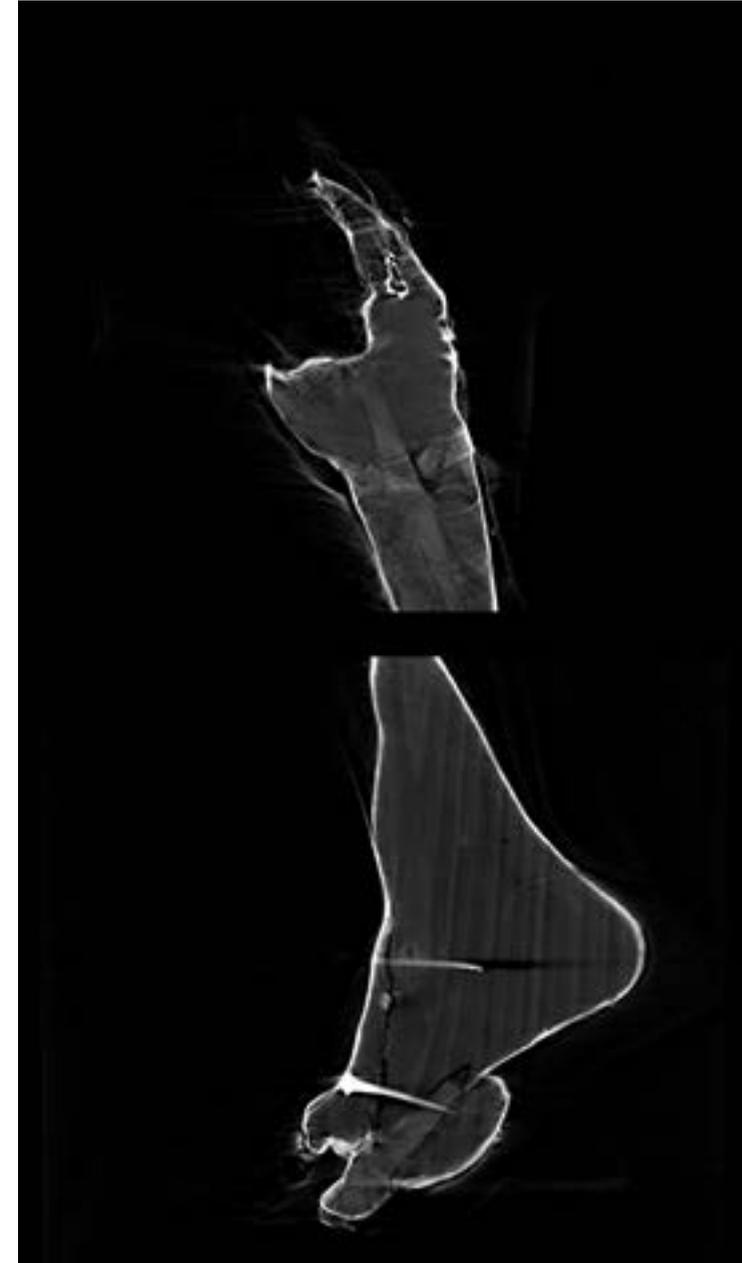


Fig. 4: DONATELLO, *Crocifisso*, particolari delle ricostruzioni TAC degli arti
Dall'alto al basso: sezione longitudinale della mano destra
e sezione laterale del piede sinistro. Nella sezione della mano
si può osservare il perno centrale che vincola la mano al braccio.
Nella sezione del piede si può osservare come l'alluce sia un inserto,
bloccato con un chiodo metallico



Fig. 5: DONATELLO, *Crocifisso*, particolari delle ricostruzioni TAC dell'intero manufatto
 Sezione laterale (a sinistra) e frontale (a destra) del *Crocifisso*.
 Le sezioni sono ottenute a partire dal rendering tridimensionale di tutto il volume del manufatto ligneo



Fig. 6: DONATELLO, *Crocifisso*, particolare della ricostruzione TAC
 Nella sezione orizzontale si osservano la spaccatura nella schiena (al centro dell'immagine), il tenone del braccio sinistro e la relativa sede (molto più profonda del tenone stesso), il midollo