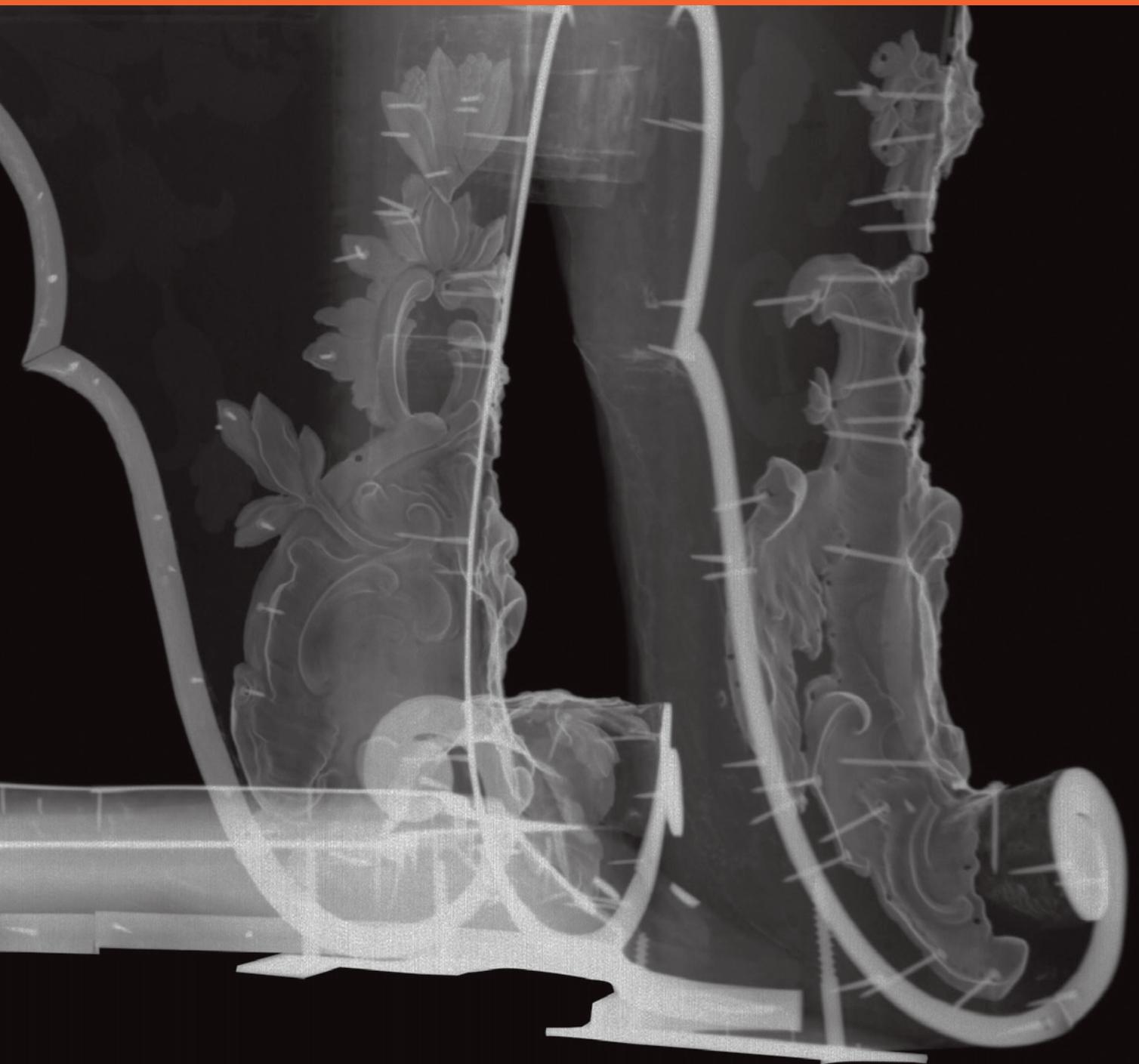




Centro Conservazione e Restauro
La Venaria Reale

Cronache 4

Il Progetto neu_ART. Studi e applicazioni
Neutron and X-ray tomography and imaging for cultural heritage



Cronache 4

Il Progetto neu_ART.
Studi e applicazioni

*Neutron and X-ray tomography
and imaging for cultural heritage*

a cura di Marco Nervo

Cronache 4

Il Progetto neu_ART. Studi e applicazioni

Neutron and X-ray tomography and imaging for cultural heritage

a cura di Marco Nervo



Centro Conservazione e Restauro
La Venaria Reale

Fondazione Centro per la Conservazione ed il Restauro dei Beni Culturali "La Venaria Reale"

PRESIDENTE

Luigi Quaranta

SEGRETARIO GENERALE

Vincenzo Portaluri

DIRETTORE SCIENTIFICO

Edith Gabrielli

SCUOLA DI ALTA FORMAZIONE E STUDIO

Michela Palazzo, *direttore*

Michela Cardinali, *responsabile*

Lara Coniglio, *coordinatore*

LABORATORI DI RESTAURO

Michela Cardinali, *direttore*

Progettazione

Daniela Russo, *responsabile*

Dipinti su tela e tavola

Bernadette Ventura, *coordinatore*

Paola Buscaglia

Marie-Claire Canepa

Gianna Ferraris di Celle

Alessandro Gatti

Soledad Mamani Cornagliotti

Valentina Parlato

Davide Puglisi

Alessandra Raviri Destefanis

Francesca Zenucchini

Dipinti Murali, Stucchi

e Materiali Lapidei

Marie-Claire Canepa, *coordinatore*

Manufatti lignei

Paolo Luciani, *coordinatore*

Roberta Capezio

Lorenzo Dutto

Michela Spagnolo

Valentina Tasso

Manufatti in metalli,

ceramica e vetro

Marco Demmelbauer, *coordinatore*

Manufatti tessili

Roberta Genta, *coordinatore*

Arte moderna e contemporanea

Sandra Vazquez Perez,

coordinatore

Alessandra Bassi

LABORATORI SCIENTIFICI

Annamaria Giovagnoli, *direttore*

Marco Nervo, *responsabile*

Paola Croveri, *coordinatore*

Anna Piccirillo (Università di Torino)

Tommaso Poli (Università di Torino)

IMAGING

Elena Biondi, *coordinatore*

Daniele Demonte

CENTRO DI DOCUMENTAZIONE

Stefania De Blasi, *responsabile*

Sara Abram

Elena Bozzo

Marianna Ferrero

Lorenza Ghionna

Comunicazione

Sara Abram, *coordinatore*

Biblioteca

Antonella Mastropietro

ENTI DI STAFF

Alessandra Bellino, *responsabile*

Finanza & controllo, personale

Alessandra Bellino

Sistemi informativi

Fabio Angelosanto

Acquisti

Domenico Ferragina

Amministrazione e contabilità

Massimo Giacoia

Servizi tecnici

Fatmir Koni

Massimiliano Rizzello

Sicurezza

Filippo Ronsisvalle

Affari legali

Lara Genga

Segreteria di Direzione

e Protocollo

Daniela Lovera

Sistema Gestione Qualità

Vincenzo Portaluri, *ad interim*



In copertina

Particolare della radiografia digitale sul cassettoni del "Doppio corpo" di Pietro Piffetti (Roma, Palazzo del Quirinale).



IL PROGETTO NEU_ART:

Nadia Pastrone, *Responsabile del Progetto e coordinatrice per l'INFN Torino*
Annamaria Giovagnoli, *coordinatrice per il CCR*
Alessandro Lo Giudice, *coordinatore per il Dipartimento di Fisica*
Alessandra Bellino (CCR)
Danila Bortot (INFN)
Paola Buscaglia (CCR)
Daniela Ciuffreda (UNITO)
Giorgio Cotto (UNITO)
Marco Demmelbauer (CCR)
Giovanni Dughera (INFN)
Elisabetta Durisi (UNITO)
Massimo Giacoia (CCR)
Stefano Lusso (INFN)
Paolo Mereu (INFN)
Marco Nervo (CCR)
Francesco Prino (INFN)
Luciano Ramello (Università del Piemonte Orientale e Gruppo collegato INFN, Alessandria)
Massimo Ravera (CCR)
Alessandra Romero (UNITO)
Roberto Sacchi (UNITO)
Graziella Sbarrai (UNITO)
Amedeo Staiano (INFN)
Lorenzo Visca (UNITO)
Lorenzo Zamprota (UNITO)

HANNO COLLABORATO AL PROGETTO:

Elena Biondi, Alessandro Bovero, Michela Cardinali, Stefania De Blasi, Marianna Ferrero, Paolo Luciani (CCR)
Silvano Gallian (Laboratorio di Elettronica - INFN Torino)
Fabio Borotto, Sandro Brasolin, Guido Ferrero, Riccardo Panero (Laboratorio Tecnologico - INFN Torino)
Stefano Bagnasco, Franca De Giovanni (Servizio calcolo e reti - INFN Torino)
Franco Casali, Matteo Bettuzzi, Maria Pia Morigi (Dipartimento di Fisica - Università degli Studi di Bologna)
Federico Evangelisti (INFN Ferrara),
Mauro Gambaccini, Ferruccio Petrucci (Università di Ferrara)

BORSE DI STUDIO,

ASSEGNI DI RICERCA,

CONTRATTI DI COLLABORAZIONE:

Fauzia Albertin
Debora Angelici
Rosa Brancaccio
Fulvio Fantino
Walter Ferrarese
Novella Grassi
Giorgia Mila
Alessandro Re
Chiara Ricci

TESI DI LAUREA:

Chiara Avataneo
Marta Baiguera
Stefania Barbiero
Cristina Bortolin
Jacopo Corsi
Elisabetta Croce
Filippo Del Greco
Silvia Di Giorgio
Stefania Iudica
Silvia Martina
Margherita Martini
Andrea Perino
Chiara Ricci
Francesca Tansella

PROGETTO DI RICERCA FINANZIATO DA:



REGIONE Direzione Innovazione,
PIEMONTE Ricerca e Università

Bando regionale per progetti di ricerca in materia
di Scienze Umane e Sociali per l'anno 2008

RINGRAZIAMENTI

Consorzio di Valorizzazione Culturale La Venaria Reale
Curia Vescovile della Diocesi di Como: don Andrea Straffi, don Daniele Crosta
Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici del Piemonte
Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici del Veneto
Segretariato Generale della Presidenza della Repubblica, prof. Louis Godart
Soprintendenza per i Beni Archeologici dell'Abruzzo
Soprintendenza per i Beni Architettonici e Paesaggistici per le province di Torino, Asti, Cuneo, Biella e Vercelli
Soprintendenza per i Beni Storici, Artistici ed Etnoantropologici del Friuli Venezia Giulia
Soprintendenza per i Beni Storici, Artistici ed Etnoantropologici del Piemonte
Soprintendenza per i Beni Storici, Artistici ed Etnoantropologici per le province di Milano, Bergamo, Como, Lecco, Lodi, Monza, Pavia, Sondrio e Varese
Soprintendenza per i Beni Storici, Artistici ed Etnoantropologici per le province di Venezia, Belluno, Padova e Treviso
Emilio Mello, Dan Schneberk, Isabella Pierigè, Chiara Armigliato

L'attività di ricerca applicata ai Beni Culturali è una delle prerogative definite nello Statuto della nostra Fondazione. Il CCR partecipa dunque a questo Progetto come attore principale, fornendo non solo la "materia prima" su cui condurre le indagini radiografiche e tomografiche ma anche e soprattutto il personale altamente specializzato che sa ricondurre i risultati di queste analisi all'opera d'arte, alla sua storia conservativa, alla tecnica esecutiva e al suo stato di conservazione. Tomografare un intero arredo ligneo di Pietro Piffetti, operazione impensabile fino a pochi anni fa, non è un mero sforzo tecnologico: le informazioni che ne derivano sono di una tale portata da rendere la TAC un valido supporto allo studio delle opere di pregio artistico.

Il CCR, unico nel panorama nazionale dei Beni Culturali, è ora dotato di uno strumento unico che lo pone come punto di riferimento per le radiografie e le tomografie su oggetti di grandi dimensioni. È dunque volontà del CCR mettere a disposizione degli Enti di tutela e dei Musei questo straordinario apparato, affinché altre opere d'arte possano essere studiate con il livello di dettaglio raggiunto grazie al Progetto neu_ART.

Grazie a questo Progetto il CCR si propone a livello nazionale e internazionale come centro di eccellenza per la ricerca applicata ai Beni Culturali, in particolare nel potenziamento delle tecniche non invasive.

Luigi Quaranta

Presidente della Fondazione Centro per la Conservazione
ed il Restauro dei Beni Culturali "La Venaria Reale"

Vincenzo Portaluri

Segretario Generale della Fondazione Centro per la Conservazione
ed il Restauro dei Beni Culturali "La Venaria Reale"

La Sezione di Torino dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, che da sempre ha come obiettivo istituzionale la ricerca, sperimentale e teorica, sulle interazioni fondamentali, si distingue a livello nazionale per una forte vocazione e attenzione alle ricadute tecnologiche delle proprie ricerche. È in questo ambito che nel 2007 è nato l'interesse, da parte di un gruppo di ricercatori di fisica delle alte energie impegnati negli esperimenti CMS e ALICE, presso il CERN di Ginevra, a collaborare con un gruppo dell'Università di Bologna di riconosciuta esperienza nel settore dello sviluppo di tecniche di imaging applicate ai Beni Culturali e con il Centro Conservazione e Restauro "La Venaria Reale". La proficua collaborazione ha portato il gruppo torinese ad applicare e vincere il Bando Scienze Umane 2008 (INFN, Dipartimento di Fisica di Torino e CCR) con il progetto neu_ART, dettagliatamente descritto in questo volume. Questo progetto può essere considerato una perfetta sintesi ed una delle migliori rappresentazioni di cosa sia e a che cosa possa portare una collaborazione interdisciplinare. Diverse erano le aree di ricerca dei fisici dell'INFN e dell'Università di Torino (dalla fisica delle alte energie alla fisica applicata ai Beni Culturali) e sicuramente ancor più culturalmente distanti erano collaboratori e colleghi del CCR, storici dell'arte e restauratori. Da questo florilegio di competenze si forma e si realizza il progetto neu_ART che è stato in grado di integrare i già ricchi laboratori scientifici del CCR con un sistema di imaging a raggi X che rappresenta una eccellenza a livello internazionale. Ed è importante sottolineare come il Nobel per la fisica 2013 sfiori questo progetto, dal momento che alcune delle sofisticate attrezzature utilizzate sono state progettate e realizzate presso il Polo Tecnologico dell'INFN di Torino per la costruzione dei rivelatori di particelle, poi installati nell'esperimento CMS al CERN. È proprio grazie a questi strumenti che nel 2012 è stato osservato il bosone di Higgs, scoperta per la quale Peter W. Higgs e François Englert hanno ricevuto il premio Nobel. È un esempio tangibile di quanto la ricerca fondamentale sia in grado di offrire ricadute tecnologiche apprezzabili anche in tempi molto rapidi.

Amedeo Staiano
Direttore della Sezione INFN di Torino

Il Dipartimento di Fisica dell'Università di Torino è da sempre coinvolto in attività di ricerca di tipo sperimentale ed applicativo che negli ultimi vent'anni si sono estese anche all'archeometria e alla diagnostica per i Beni Culturali. Tuttavia queste attività di ricerca sarebbero sterili se non si affiancasse ad esse la fondamentale opera di formazione di giovani futuri scienziati ed operatori del settore. È per questo motivo che dal 2001 sono stati istituiti presso l'Università di Torino diversi corsi di laurea dedicati ai Beni Culturali sia in ambito scientifico, sia in ambito umanistico, nei quali l'apporto del Dipartimento di Fisica è stato fondamentale. In particolare, dal 2006 il Dipartimento di Fisica è fortemente coinvolto nella didattica e nell'organizzazione del Corso di Laurea che ora è diventato Laurea magistrale abilitante in Conservazione e Restauro dei Beni Culturali voluto dall'Università di Torino e dal Centro Conservazione e Restauro "la Venaria Reale". Il progetto neu_ART, di cui il Dipartimento di Fisica è stato promotore insieme all'INFN e al CCR, è stato l'occasione per unire un progetto di ricerca fortemente multidisciplinare con la formazione professionale di giovani nei diversi settori, da quello della fisica a quello del restauro; prova ne è l'elevato numero di lavori di tesi di laurea, ma anche di dottorato e post-dottorato che hanno caratterizzato il progetto.

L'attività di ricerca, portata avanti dai ricercatori e dai tecnici del Dipartimento e dell'INFN, è stata caratterizzata da una forte sinergia con i restauratori e i tecnici del CCR perché solo in questo modo è stato possibile ottenere i risultati descritti in questo volume. Questa modalità multidisciplinare di lavoro è un esempio da seguire per il futuro e mostra le potenzialità di sviluppo quando mondi all'apparenza distanti uniscono le forze e le idee per la realizzazione di nuove soluzioni e tecnologie applicate.

Anche se nel corso del progetto neu_ART sono stati esplorati nuovi ambiti d'applicazione quali la radiografia differenziale e l'uso di neutroni, l'apparato con i risvolti applicativi più immediati è sicuramente quello collocato presso il CCR. Tale apparato, pur essendo originale, trae spunto dall'esperienza maturata in una precedente collaborazione con l'Università di Bologna che opera da tempo in questo settore. Esso permette l'esecuzione di radiografie digitali e tomografie di opere di grandi dimensioni con un approccio unico nel suo genere che è stato reso possibile grazie soprattutto all'estrema precisione delle meccaniche realizzate dalle officine dell'INFN di Torino. Come mostrato in questo volume, l'apparato ha già avuto un ampio utilizzo, essendo stato impiegato per la diagnostica su preziose opere restaurate presso il CCR, per lo svolgimento di tesi di laurea sia scientifiche che di restauro e per studi scientifici. In breve tempo è divenuto un apparato diagnostico fondamentale per i laboratori di restauro del CCR che si sono così dotati di uno strumento unico in Italia.

Alessandra Romero
già Direttore del Dipartimento di Fisica Sperimentale
Presidente del Corso di Laurea Magistrale in Conservazione e Restauro dei Beni Culturali
e Direttore SUSCOR, Struttura Universitaria in Scienze per la Conservazione,
Restauro, valorizzazione dei beni culturali - Università di Torino

Indice

- 9 Introduzione
A. Giovagnoli, A. Lo Giudice, N. Pastrone

Sezione 1

IL PROGETTO NEU_ART PER LO SVILUPPO TECNOLOGICO E LA RICERCA APPLICATA

- 15 Precedenti esperienze di tomografia computerizzata al CCR
M. Nervo
- 19 L'apparato radio-tomografico
A. Re, R. Brancaccio, J. Corsi, G. Cotto, G. Dughera, W. Ferrarese, N. Grassi, A. Lo Giudice, S. Lusso, P. Mereu, G. Mila, M. Nervo, N. Pastrone, C. Ricci, R. Sacchi, L. Visca, L. Zamprota
- 43 Analisi dei pigmenti con la tecnica del K-edge
G. Mila, F. Albertin, F. Del Greco, P. Mereu, F. Petrucci, F. Prino, L. Ramello, A. Re
- 51 Radiografie e tomografie neutroniche
L. Visca, T. Bücherl, G. Cotto, M. Demmelbauer, E. Durisi, W. Ferrarese, F. Grazzi, A. Lo Giudice, G. Mila, A. Re, R. Sacchi, A. Scherillo

Sezione 2

IL PROGETTO NEU_ART PER LA CONSERVAZIONE, LA TUTELA E LA VALORIZZAZIONE

- 67 La diagnostica scientifica non invasiva. La conoscenza necessaria per preservare, conservare e restaurare un'opera d'arte
M. Cardinali
- Ritratti di Casa Savoia
- 73 La "Stupenda galleria" del Castello di Moncalieri, oggi a Racconigi
L. Gallo, S. Padovani
- 76 Scelte e motivazioni metodologiche dei restauri
R. Medico
- 77 La radiografia digitale come strumento di supporto per la conoscenza e la definizione delle linee di intervento: i Ritratti di Casa Savoia del Castello di Racconigi
P. Buscaglia, J. Corsi, M. Nervo, C. Ricci

- 89 Pietro Piffetti, *Cassettone a ribalta con alzata a due ante*
Studio e restauro del “Doppio corpo” al CCR
L. Morozzi
- 92 La tomografia computerizzata applicata agli arredi lignei
di ebanisteria: il “Doppio corpo” di Piffetti del Quirinale
R. Capezio, P. Luciani, A. Re, C. Ricci, M. Spagnolo, V. Tasso
- 105 Gabriele Capello, detto Moncalvo, *Due piedistalli a colonna*
Scelte e motivazioni metodologiche dei restauri
R. Medico
- 106 L’analisi tomografica eseguita su due colonne lignee
provenienti dal Gabinetto Etrusco del Castello di Racconigi:
interpretazione dei dati tomografici e progettazione
di un intervento di restauro conservativo
F. Cocco, C. Lombardo, M. Martini, C. Ricci, J. Schiavone
- 113 **Manufatti archeologici in metallo appartenenti
a corredi funebri**
Interventi di tutela su corredi funebri abruzzesi
di età tardoarcaica
A. Faustoferri
- 115 Scavo archeologico virtuale di pani di terra:
l’indagine TAC per il restauro di manufatti polimaterici
M. Demmelbauer, M. Martini, C. Ricci
- 121 Autenticazione di manufatti archeologici sospetti di falsità
M. Demmelbauer, V. Demontis, G. Mila, A. Re, L. Visca

Introduzione

Introduction

Annamaria Giovagnoli, Alessandro Lo Giudice, Nadia Pastrone

La conservazione del patrimonio culturale è fondamentale nella nostra società. In questo ambito, la diagnostica non invasiva assume un ruolo fondamentale oltre che per lo studio e la valorizzazione delle opere, anche per la definizione preliminare dello stato di conservazione e delle tecniche esecutive. In particolare le tecniche di immagine con raggi X, già ampiamente sviluppate e diffuse, consentono di ottenere informazioni su ampie aree permettendo di avere una visione complessiva dei manufatti artistici. Sin dalle prime radiografie ottenute da Röntgen si capirono, oltre alle potenzialità della metodologia e le possibili applicazioni anche nell'ambito dei Beni Culturali, anche i limiti dovuti principalmente alla sovrapposizione delle informazioni provenienti da strati diversi. Se questo non rappresentava un problema per oggetti bidimensionali quali i dipinti, lo era invece per oggetti con volume maggiore. I primi tentativi di ottenere anche le informazioni tridimensionali furono fatti introducendo la radiografia stereo stratigrafica già alla fine dell'Ottocento con

buoni risultati in campo medico a partire dai primi decenni del Novecento¹. Seppur la radiografia stereo stratigrafica, anche applicata ai Beni Culturali come con l'apparato messo a punto negli anni cinquanta dall'Istituto Superiore per la Conservazione e il Restauro di Roma, abbia dato interessanti risultati, è solo negli anni settanta, con l'introduzione della tomografia (TC o TAC) in ambito medico, che è iniziata una nuova era nello studio tridimensionale dell'interno degli oggetti. Anche in questo caso il suo ruolo nel campo della diagnostica applicata ai Beni Culturali è andato crescendo nel tempo, soprattutto nell'ultimo decennio, con lo sviluppo di apparati studiati appositamente e sistemi portatili. In particolare, solo recentemente sono stati presi in considerazione apparati per lo studio di opere di grandi dimensioni in quanto le tecniche disponibili presentavano dei limiti. È proprio per affrontare e contribuire a risolvere questa problematica che la sezione di Torino dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), il Dipartimento di Fisica dell'Uni-

Preservation of Cultural Heritage is of high importance in our society. Non invasive diagnostics takes a relevant role not only to study and value artworks but even to preliminary define the conservation status and the manufacturing techniques. In particular X-ray imaging, already extensively developed and widespread, enable to obtain information on large areas allowing a deeper understanding of artworks. Since first radiographies by Röntgen it was clear not only the potentiality of the method but all the possible applications in the field of Cultural Heritage. The limit is obviously the superimposition of elements belonging to different layers. This feature is not a real problem for bi-dimensional objects like paintings, while becomes critical when large volumes are considered. The first attempts to get even the three-dimensional information were made by introducing the X-ray stereo stratigraphy at the end of the nineteenth century with good results in the medical field since the early decades of the twentieth century¹. Although the X-ray stereo stratigraphy

has given interesting results also applied to Cultural Heritage such as with the apparatus developed in the fifties by the Superior Institute for Conservation and Restoration in Rome, it is only in the seventies, with the introduction of tomography (CT or CAT scan) in the medical field, that began a new era in the study of the interior of the three-dimensional objects. Even in this case, its role in the field of diagnostics applied to Cultural Heritage has been increasing over time, especially in the last decade, with the development of equipment specifically designed and of handheld systems. In particular, only recently, apparatus for the study of large works of art have been taken into account since the available techniques showed limitations. To address and help to resolve this issue, the Turin section of the National Institute of Nuclear Physics, the Department of Physics (INFN) of the University of Turin and the Foundation Centre for Conservation and Restoration of Cultural Heritage "La Venaria Reale" (CCR) developed and presented in 2009 the neu_ART

versità degli Studi di Torino e la Fondazione Centro per la Conservazione ed il Restauro dei Beni Culturali "La Venaria Reale" (CCR) hanno sviluppato e presentato nel 2009 il progetto neu_ART, rispondendo 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.

Il progetto, svolto nel periodo 2010-2013, si è collocato all'interno delle rispettive attività e linee di ricerca nei Beni Culturali e ha avuto lo scopo di sviluppare apparati innovativi di diagnostica non invasiva basati sull'uso dei raggi X e dei neutroni da applicare allo studio, restauro, conservazione e valorizzazione dei Beni Culturali. È noto infatti, fin dal congresso sull'uso delle indagini con metodi nucleari nel campo dei Beni Culturali, tenuto a Roma nel 1973², come queste sofisticate tecniche analitiche possano apportare un contributo fondamentale alla scienza della conservazione e creare uno scenario di collaborazione marcatamente interdisciplinare.

La parte principale del progetto è consistita, dopo una prima fase di studio ed ottimizzazione, nell'allestimento presso il CCR di un apparato di nuova concezione per eseguire radiografie digitali e tomografie. Per quanto riguarda le radiografie, l'innovatività dell'apparato risiede nella possibilità di ottenere in tempo reale immagini radiografiche digitali di ampie superfici (tele e tavole dipinte fino a 3.1 m x 2.7 m circa) visionabili direttamente su computer in tempi ridotti (pochi minuti per metro quadrato). Nell'ambito dei Beni Culturali la radiogra-

fia permette di ottenere informazioni sullo stato di conservazione e sulle caratteristiche dei supporti, sugli strati pittorici preparatori (individuazione di dipinti sottostanti, riutilizzo di un'opera precedente come supporto) permettendo anche l'identificazione del corpo originale dell'opera e delle successive parti aggiunte, sui materiali e sulla tecnica pittorica (procedimento delle stesure, qualità del colore, individuazione di pentimenti). Per quanto riguarda la tomografia, l'apparato allestito presso il CCR è unico nel suo genere, distinguendosi da quelli utilizzati in medicina per l'estrema flessibilità, necessaria nello studio di opere d'arte che sono realizzate con materiali diversi e con complessità sempre differente in termini di dimensioni e costituzione. In particolare, il nuovo apparato consente di visualizzare in maniera tridimensionale la struttura di oggetti molto voluminosi, quali arredi e statue lignee, alti fino a 2.5 m e larghi fino a 2 m, ottenendo simultaneamente informazioni sul loro stato di conservazione e sulle tecniche costruttive.

All'interno del progetto è stata inoltre studiata la fattibilità di altre tecniche innovative di imaging con raggi X e con neutroni. In particolare, è stato realizzato un apparato basato sulla tecnica del K-edge (o radiografia differenziale) che sfruttando le differenze di assorbimento dei raggi X in funzione dell'energia da parte degli elementi chimici permette la loro mappatura all'interno degli strati pittorici dei dipinti mobili.

Il raggiungimento dei risultati finali è stato possibile grazie alla stretta collaborazione tra gli Enti coinvolti, al personale messo a

project, responding to a regional call for research projects in the field of Humanities and Social Sciences for the year 2008, promoted by the Piedmont Region - Directorate Innovation, Research and Universities.

The project, which took place in the period 2010 - 2013 within the respective activities and research lines in Cultural Heritage, aimed to develop innovative equipment for non-invasive diagnostics based on X-rays and neutrons to be applied to the study, restoration, preservation and enhancement of Cultural Heritage. It is known, since the Congress held in Rome in 1973² on the use of investigations with nuclear methods in the field of Cultural Heritage, as these sophisticated analytical techniques can make a major contribution to conservation science and to create a markedly interdisciplinary collaboration scenario. The main part of the project consisted in setting at the CCR a new apparatus for digital radiography and tomography, after an initial phase of study and optimization. The innovative nature of the apparatus is the possibility to obtain real-time digital radiographic images of large surfaces (can-

vas and paintings on wood up to about 3.1 m x 2.7 m) viewable directly via computer in a short time (a few minutes per square meter). In Cultural Heritage field X-ray allows to get information on the preservation status and on the characteristics of the media, on the preparatory layers (identification of the underlying paintings, re-use of a previous work of art as a support) even allowing the identification of the original idea of artwork and the additional parts, on the materials and painting technique (methods, colour quality, identification of "pentimenti").

Regarding the tomography, the apparatus set-up at the CCR is unique, different from those used in medicine for the extreme flexibility, necessary in the study of works of art that are made of different materials and with different complexity in terms of size and nature. In particular, the new apparatus allows to view in a three-dimensional way the structure of large volume objects, such as furniture and wooden statues, with height of up to 2.5 m and width of up to 2 m, simultaneously obtaining information on their state of preservation and construction techniques.

disposizione che ha contribuito al cofinanziamento del progetto e alle competenze scientifiche e tecnologiche dei tre partner. Nel corso del progetto sono stati coinvolti 24 strutturati tra ricercatori e personale tecnico-amministrativo dell'INFN e dell'Università e 20 tra restauratori e tecnici del CCR. Sono state assegnate 9 borse di addestramento alla ricerca e assegni di ricerca a giovani neo-dottorati e neo-laureati sotto i trent'anni. Le tematiche sviluppate, sia per quanto riguarda la realizzazione e la caratterizzazione degli apparati che per i casi studio affrontati, sono stati oggetto di 13 tesi di laurea triennali e magistrali in Fisica e Scienza e Tecnologia dei Beni Culturali. Per il raggiungimento degli obiettivi del progetto sono state attivate collaborazioni con le Università di Bologna, di Ferrara e del Piemonte Orientale. Parte dei risultati nel campo dell'imaging con neutroni sono stati ottenuti presso grandi laboratori europei quali il Rutherford Appleton Laboratory di Oxford, con il supporto del CNR-ISC Sezione di Firenze, e il Technische Universität München Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM_II) di Monaco. I risultati preliminari ottenuti negli anni sono stati presentati alla comunità scientifica in 11 conferenze di cui 6 internazionali, svolgendo anche seminari dedicati; in particolare si ricorda quello su invito tenuto presso il Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France, Palais du Louvre, Parigi (Francia) nell'ottobre 2012³. Per quanto riguarda la divulgazione sono stati svolti numerosi seminari rivolti agli studenti della scuola superiore, partecipan-

do ad eventi quali la *Scientific Summer Academy*, o rivolti al grande pubblico come la mostra *"Esploratori dell'Universo"* (organizzata dall'INFN) presso il Museo Regionale di Scienze Naturali di Torino inserita nel percorso di ESOF2010 (EuroScience Open Forum 2010), la Notte dei Ricercatori 2013 e la rassegna DNA-Italia, a cui si è partecipato con la presentazione del progetto e dei risultati ottenuti sia nell'edizione del 2010 sia in quella del 2013.

I contributi presentati in questo volume sono organizzati in due Sezioni. La prima è dedicata alle tre aree di ricerca sviluppate con il progetto neu_ART: la radiografia digitale e la tomografia computerizzata per opere d'arte di grandi dimensioni, la tecnica del K-edge, l'imaging con neutroni. Nella seconda parte del volume sono raccolti alcuni significativi casi studio di opere analizzate con indagini radiografiche e tomografiche. Come si vedrà, i manufatti sottoposti ad indagine sono per tipologia e dimensione davvero molto vari dimostrando l'elevata flessibilità del nuovo apparato radio-tomografico, realizzato nell'ambito del progetto. Alla fine di questa Sezione, viene presentato un caso applicativo di radiografia con neutroni su manufatti metallici, selezionati proprio per testare la tecnica e valutarne le potenzialità nella diagnostica dei Beni Culturali.

L'ultima parte della Sezione 1 si chiude con uno sguardo al futuro. I limiti delle tecniche basate sui raggi X sono noti, emersi e ampiamente studiati anche all'interno del progetto neu_ART. Tali limiti, come è noto, sono in buona parte superabili se al posto dei raggi

Within the project the feasibility of other innovative techniques of imaging with X-rays and neutrons has also been studied. In particular, a set-up has been realized based on the technique of the K-edge (or differential radiography) allowing the mapping of chemical elements within the pictorial layers of the paintings thanks to the differences in X-ray absorption as a function of energy.

The achievement of the final results was possible thanks to the close cooperation between the involved Organizations, to the staff who helped to match-funding the project and to the scientific and technological expertise of the three partners. During the project were involved 24 peoples among researchers and technical staff of the University and INFN and 20 among restorers and technicians of the CCR. Nine fellowships for research training and research grants have been assigned to young doctorates and neo-graduates under thirty. The topics covered, both in terms of the realization and characterization of the apparatus both for the case studies, were the subject of 13 dissertations of master degrees in physics and science and technology of

Cultural Heritage. Collaborations with the University of Bologna, Ferrara and Piemonte Orientale were activated to achieve the project goals. Some of the results in imaging with neutrons were obtained in large European laboratories such as the Rutherford Appleton Laboratory in Oxford, with the support of the CNR-ISC Section of Florence, and the Technische Universität München Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM_II) in Monaco. Preliminary results were submitted during the years to the scientific community in 11 conferences including 6 international conferences, also participating to seminars, as the seminar by invitation at the Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France, Palais du Louvre, Paris (France) in October 2012³. Regarding the dissemination, several seminars for high school students have been carried out by participating in events such as the Summer Scientific Academy, or for the general public as the exhibition "Explorers of the Universe" (organized by the INFN) at the Regional Museum of Natural Sciences in Turin included in the path of ESOF2010 (Euro Science Open Forum

X si utilizzano i neutroni. Ad oggi, tuttavia, questa operazione richiede che gli oggetti vengano analizzati presso i grandi centri di ricerca che dispongono di fasci di neutroni, limitando dunque l'accessibilità delle tecniche di immagine basate su neutroni nel settore dei Beni Culturali. I risultati raggiunti e presentati nel volume rappresentano comunque un ottimo punto di partenza verso un più diffuso impiego di queste tecniche.

2010), the Researchers' Night 2013 and the exhibition DNA - Italy, by presenting the project and the results obtained both in the 2010 both in the 2013 edition.

The contributions illustrated in this volume are organized into two Sections. The first one is dedicated to the three research areas developed within the neu_ART project: digital radiography and computed tomography for large artworks, K-edge technique, imaging with neutrons. In the second part of the volume some significant case studies of works of art analysed using radiographic and tomographic analyses are shown. As will be seen, the objects under investigation are various regarding types and sizes demonstrating the high flexibility of the new radio-tomographic apparatus implemented within the project. At the end of this Section, an applica-

¹ M. REGGIO, *Il controverso e tortuoso percorso verso la terza dimensione in radiologia: analisi storica essenziale delle tappe che hanno preceduto l'avvento della TAC*, in «Fisica in Medicina», nn. 1-2, 2013, pp. 53-64.

² AA. VV., *Applicazione dei metodi nucleari nel campo delle opere d'arte*, Atti del congresso internazionale, Accademia dei Lincei, Roma 1973.

³ *X-ray tomography and radiography of artworks: the experience of the neu_ART project*, 11 ottobre 2012, Amphithéâtre Palissy, C2RMF, Palazzo del Louvre, Parigi.

tion of neutron radiography on metal objects is presented; these objects were selected precisely to test the technique and evaluate its potential in the field of Cultural Heritage.

The final part of Section 1 closes with an eye to the future. The limitations of the techniques based on X-rays are known, emerged and also extensively studied within the neu_ART project. Such limits, as is known, are largely overcome using the neutron instead of X-rays. To date, however, this requires that the objects are analysed at the major research centres having neutron beams, thus limiting the accessibility of imaging techniques based on neutrons in the field of Cultural Heritage. The results reached and presented in this volume represent anyway a good starting point towards a more widespread use of these techniques.

Sezione 1

IL PROGETTO NEU_ART
PER LO SVILUPPO TECNOLOGICO
E LA RICERCA APPLICATA

Precedenti esperienze di tomografia computerizzata al CCR

Previous experience of computed tomography at the CCR

Marco Nervo

Le indagini tomografiche descritte in questo volume non sono le prime occasioni in cui sono state realizzate TAC su opere d'arte di grandi dimensioni presso il Centro Conservazione e Restauro; il progetto neu_ART nasce proprio come diretta conseguenza delle prime esperienze fatte a partire dal 2008. In quell'anno infatti, per la prima volta al mondo, è stata condotta una campagna tomografica su una statua lignea di grandi dimensioni: il Kongo Rikishi¹ (FIG. 1). La scultura, alta più di due metri e attualmente esposta presso il Museo d'Arte Orientale (MAO) di Torino, è in legno policromo e risale al periodo Kamakura (1185-1333 d.C.). Giunta presso i Laboratori del CCR per essere restaurata, ha fin da subito suscitato forti curiosità, soprattutto per quanto concerne l'aspetto tecnico di realizzazione. Trattandosi infatti di una statua lignea giapponese, i restauratori del settore Arredi e Sculture Lignee si sono posti domande sul come fosse realizzata, di quali masselli fosse costituita e del modo in cui questi fossero assemblati tra loro. Dalla sola osservazione della superficie esterna della statua era

possibile ipotizzare solo in parte la modalità costruttiva dell'opera. Era necessario guardare oltre. Si è ovviamente pensato alla tecnica della tomografia computerizzata, ma le enormi dimensioni del Kongo Rikishi non permettevano certo di ricorrere alle normali TAC impiegate negli ospedali o nei centri medici. Era necessario pensare a un sistema realizzato *ad hoc* per oggetti di tale fattura.

Qualche anno prima, il gruppo di ricerca del prof. Franco Casali dell'Università degli Studi di Bologna aveva condotto i primi studi su un sistema tomografico per oggetti di grandi dimensioni, da impiegare proprio nel settore dei Beni Culturali. Il loro "biglietto da visita" era di tutto rispetto: la tomografia completa al Globo di Ignazio Danti, esposto in Palazzo Vecchio a Firenze². Il loro apparato, concettualmente simile solo in parte a quello oggi presente nei Laboratori Scientifici del CCR, è costituito da un asse verticale motorizzato su cui è montata la sorgente di raggi X, da una tavola rotativa su cui collocare l'oggetto da tomografare e da un sistema di assi orizzontale e verticale motorizzati su cui è disposto il sistema di rivelazione.

The tomographic analysis described in this volume were not the first cases in which at the Centro Conservazione e Restauro CTs of large works of art were made; the neu_ART project originated as a direct consequence of the initial experience started in 2008. In that year, for the first time in the world, it was conducted a tomographic campaign on a large wooden statue: the Kongo Rikishi¹ (FIG. 1). The sculpture, tall more than two meters and currently exhibited at the Museo d'Arte Orientale (MAO) in Turin, is made of polychrome wood and dates back to the Kamakura period (1185-1333 AD). It came at the laboratories of the CCR to be restored and it immediately aroused strong curiosity, especially with regard to the technical realization. Since this is a Japanese wooden statue, the restorers of Furniture and Wooden Sculptures sector have wondered on how it was made, what solid woods was made up and the manner in which they were assembled together. From the mere obser-

vation of the outer surface of the statue it was possible to assume only partially the construction method of artwork. It was necessary to look beyond. It was obviously thought about the technique of computed tomography, but the huge size of the Kongo Rikishi did not allow the use of the normal CT employed by hospitals or medical centers. It was necessary to provide a system designed specifically for this kind of objects. A few years earlier, the research group of prof. Franco Casali of the University of Bologna was conducting the first studies on a tomographic system for large objects, to be used in the field of Cultural Heritage. Their "business card" was impressive: a complete tomography of Ignazio Danti's Globe, exhibited in Palazzo Vecchio in Florence². Their apparatus, similar in part with the one now operating in Scientific Laboratories of CCR, is constituted by a motorized vertical axis where the X-ray source is mounted, a rotatable table on which to place the object and a system of



Fig. 1 Kongo Rikishi.
Generale in luce visibile.

Fig. 1 Kongo Rikishi.
General view.

Questo è costituito da uno schermo scintillante di ioduro di cesio con struttura ad aghi accoppiato otticamente a una camera CCD mediante un obiettivo e uno specchio a 45° , impiegato per evitare l'irraggiamento diretto della camera da parte del fascio di raggi X³. A differenza del sistema sviluppato nell'ambito del progetto neu_ART, l'oggetto da tomografare viene virtualmente suddivi-

motorized horizontal and vertical axes on which is placed the detection system. This one consists of a cesium iodide scintillating screen with needles structure optically coupled to a CCD camera through a lens and a 45° mirror, used to avoid the direct radiation of the camera by the X-ray beam³. Unlike the system developed within the neu_ART project, the object is virtually split into parts corresponding to the size of the scintillating screen; for each portion, the object is rotated at fixed angular step (typically 0.5° and 0.25°). After a full rotation (360°), the system of motorized axes moves the detector in a new position repeating the process described above.

Thanks to the former Director of the Scientific Laboratories, dr. Emilio Mello, it was therefore possible to carry out at the CCR the first computed tomography, in collaboration with the group of Bologna, with the Turin section of the National Institute of Nuclear Physics and with the Department of Experimental

so in porzioni, corrispondenti alle dimensioni dello schermo scintillante; per ciascuna porzione, l'oggetto viene fatto ruotare a step angolari prefissati (tipicamente 0.5° e 0.25°). Al termine della rotazione completa (360°), il sistema di assi motorizzati sposta il rivelatore in una nuova posizione e si ripete il processo sopra descritto.

Grazie all'allora Direttore dei Laboratori Scientifici dott. Emilio Mello, è stato dunque possibile realizzare presso il CCR, in collaborazione con il gruppo di Bologna, con la sezione di Torino dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e con il Dipartimento di Fisica Sperimentale dell'Università degli Studi di Torino, la prima tomografia computerizzata. Con i risultati della TAC al Kongo Rikishi è apparso evidente che la strada era ormai segnata: al laboratorio di restauro di Arredi e Sculture Lignee si stava consegnando uno strumento capace di mostrare lo stato di conservazione interno del legno, la disposizione dei masselli, la presenza di chiodi o cavicchi, le venature del legno e la conseguente possibilità di determinarne il taglio adottato. Non era ancora terminata la ricostruzione tomografica di tutto il Kongo Rikishi che già si stava procedendo a una nuova campagna di acquisizione dei dati tomografici su un'altra scultura lignea giapponese, anch'essa destinata al MAO: il Tamon-Ten⁴. Di dimensioni minori rispetto al Kongo Rikishi, rappresentava anch'esso un interessante caso studio e un'incognita dal punto di vista della tecnica costruttiva, trattandosi entrambi i manufatti di sculture lignee realizzate in un ambito culturale tanto distante dal nostro; anche grazie alla tomografia computerizzata è stato possibile mettere in luce analogie e differenze tra la tecnica occidentale e quella orientale.

Il passo successivo è stato nuovamente

Physics of the University of Turin. With the results of the complete tomography of Kongo Rikishi the road was now marked: at the Restoration Laboratory of Furniture and Wooden Sculptures it was delivered a tool capable of showing the inner state of conservation of the wood, the layout of solid blocks, the presence of nails or pegs, the grain of the wood and the consequent determination of the used cut. It was not yet complete the tomographic reconstruction of the whole Kongo Rikishi that was already making a new campaign for the acquisition of tomographic data of another Japanese wooden sculpture, it also exhibited at the MAO museum: the Tamon-Ten⁴. Smaller than the Kongo Rikishi, it was also an interesting case study from the point of view of the construction technique, since both artifacts were wooden sculptures made from a culture so far away; thanks to the computed tomography it was possible to highlight similarities and differences between the eastern

un'impresa epica: la tomografia completa al cassettone a ribalta con alzata a due ante ("Doppio corpo") di Pietro Piffetti, di proprietà della Fondazione Accorsi-Ometto di Torino (FIG. 2). L'opera dell'ebanista piemontese è realizzata con legno intagliato, lastronato in palissandro, con intarsi in avorio e tartaruga e filettature in bosso⁵. Per tomografare completamente questo imponente arredo (350x109x68 cm³) è stato necessario ricorrere a 50 immagini tomografiche, ciascuna delle quali costituita da 1.440 proiezioni radiografiche ottenute ruotando il "Doppio corpo" con uno step angolare di 0.25°⁶. In totale sono state dunque acquisite 72.000 radiografie digitali, che sono state poi processate per ottenere le *slice*, le sezioni virtuali orizzontali dell'oggetto.

Tutte le tomografie fatte precedentemente al progetto neu_ART e qui brevemente riassunte hanno richiesto, per motivi di radioprotezione, la completa inaccessibilità dei Laboratori Scientifici e delle zone limitrofe per tutta la durata delle operazioni. Le potenzialità di questa tecnica applicata ai Beni Culturali erano evidenti, così come era evidente che il CCR si sarebbe dovuto dotare di un proprio apparato, di un idoneo locale per condurre questi studi e di personale tecnico in grado di operare quotidianamente per assolvere alla richieste che, da queste prime esperienze di tomografie computerizzate al CCR, si sono fatte sempre più frequenti.



Fig. 2 Pietro Piffetti. Cassettone a ribalta con alzata a due ante, Fondazione Accorsi-Ometto. Generale in luce visibile.

Fig. 2 Pietro Piffetti. Writing cabinet, Fondazione Accorsi-Ometto. General view.

¹ P. BRAMBILLA, *Kongo Rikishi, periodo Kamakura*, in *Restaurare l'Oriente. Sculture lignee giapponesi per il MAO di Torino*, "Cronache" 1, Firenze 2009, pp. 15-27.

² http://www.xraytomography.altervista.org/globe_CT.htm

³ F. CASALI, M. P. MORIGI, M. BETTUZZI, A. BERDONDINI, R. BRACCACCIO, V. D'ERRICO, *Tomografia computerizzata*, in *Restaurare l'Oriente. Sculture lignee giapponesi per il MAO di Torino*, "Cronache" 1, Firenze 2009, pp. 38-43.

⁴ M-C. CANEPA, V. PARLATO, T. RADELET, B. RINETTI, *Tamon-Ten*,

periodo Edo, in *Restaurare l'Oriente. Sculture lignee giapponesi per il MAO di Torino*, "Cronache" 1, Firenze 2009, pp. 49-57.

⁵ Pietro Piffetti. *Cassettone a ribalta con alzata a due ante (doppio corpo)*, in *Il restauro degli arredi lignei. Lebanisteria piemontese. Studi e ricerche*, a cura di C.E. SPANTIGATI, S. DE BLASI, "Archivio" 2, Firenze 2011, pp. 175-179.

⁶ M. BETTUZZI, F. CASALI, V. D'ERRICO, E. MELLO, M.P. MORIGI, M. RAVERA, A. RE, *La tomografia computerizzata*, in *Il restauro degli arredi lignei*, cit., 2011, pp. 163-166.

and western technique. Next step was again an epic quest: the complete computed tomography of writing cabinet called "doppio corpo" by Pietro Piffetti, owned by Accorsi-Ometto Foundation in Turin (FIG. 2). The work of art of the Piedmont cabinetmaker is made of carved wood, veneered in rosewood, inlaid with ivory and tortoise and threads in boxwood⁵. To obtain a complete CT of this impressive furniture (350x109x68 cm³) it was necessary to use 50 tomographic images, each consisting of 1440 radiographic projections obtained by rotating the "doppio corpo" with steps of 0.25°⁶. In total, therefore, we acquired 72,000 digital X-rays, which were then processed to

obtain the slices, the virtual horizontal sections of the object. All tomographies made before the neu_ART project and briefly summarized here required, for radiation protection reasons, the complete inaccessibility of Scientific Laboratories and the surrounding area throughout the duration of operations. The potential of this technique when applied to Cultural Heritage were evident, as well as it was evident that the CCR should have its own apparatus, a suitable local to conduct these studies and a technical staff able to work daily to fulfill requests that, from these first experiences of computed tomography at the CCR, have increased ever more.

L'apparato radio-tomografico

The radio-tomographic apparatus

Alessandro Re, Rosa Brancaccio, Jacopo Corsi, Giorgio Cotto, Giovanni Dughera, Walter Ferrarese, Novella Grassi, Alessandro Lo Giudice, Stefano Lusso, Paolo Mereu, Giorgia Mila, Marco Nervo, Nadia Pastrone, Chiara Ricci, Roberto Sacchi, Lorenzo Visca, Lorenzo Zamprota

Per progettare opportunamente un intervento di restauro è molto utile, in alcuni casi indispensabile, conoscere il maggior numero possibile di dettagli sull'opera, sul suo stato di conservazione e sulla sua tecnica esecutiva, dettagli che è possibile ottenere anche ricorrendo a raffinate analisi radiografiche e tomografiche dell'oggetto in esame. In particolare la possibilità di applicare tecniche di ricostruzione tomografica a opere d'arte offre la possibilità unica di studiarne la struttura tridimensionale interna e di acquisire preziose informazioni sulle tecniche adottate per la loro realizzazione e sul loro attuale stato di conservazione. L'accesso ad apparecchiature per applicazioni industriali o per diagnostica medica, quando disponibili, è raramente una strada praticabile sia per le limitazioni sulle dimensioni, forme e materiali degli oggetti che è possibile analizzare, sia per la difficoltà di trasportare preziose opere d'arte al di fuori dai laboratori di restauro. Per questo motivo la disponibilità presso il Centro di Conservazione e Restauro (CCR) di un'apparecchiatura per eseguire radiografie e tomografie risulta di

ineguagliabile importanza per le attività del Centro.

L'apparato radio-tomografico digitale descritto in questo capitolo è stato sviluppato nell'ambito del progetto neu_ART ed è stato ottimizzato sulla tipologia di oggetti d'arte in studio e restauro presso il CCR, molto variegati per forme, dimensioni e materiali. Esso costituisce per versatilità e dimensioni dei manufatti analizzabili uno strumento unico nel panorama italiano e pone pertanto il CCR, sia per l'apparecchiatura a disposizione sia per le competenze maturate durante il progetto, all'avanguardia nell'applicazione di queste tecniche di analisi ai Beni Culturali.

Dopo una prima parte introduttiva sui metodi radio-tomografici, verrà trattata nel dettaglio la messa a punto dello strumento, partendo dalla fase di progettazione, passando per la realizzazione e la caratterizzazione dell'apparato, fino ad arrivare alla fase di test su provini realizzati *ad hoc*; l'applicazione dello strumento a casi studio reali verrà invece ampiamente trattata nella seconda sezione del volume.

To properly plan a restoration is very useful, in some cases essential, to know as many details as possible on the artwork, on its state of preservation and on its manufacturing technique, details that are obtainable by means of sophisticated radiographic and tomographic analysis of the object under examination. In particular, the possibility of applying tomographic reconstruction techniques to artworks offers a unique possibility to study their three-dimensional internal structure and to gain valuable information on the techniques used for their realization and their current state of preservation. The access to equipment for industrial applications or for medical diagnosis, when available, is rarely a feasible way and because the limitations on the size, shape and materials of the objects that can be analysed, both because of the difficulty of carrying precious works of art outside the restoration laboratories. For this reason, the availability at the CCR of an equipment for radiography and

tomography is of incomparable importance for the activities of the Centre.

The digital radio-tomographic apparatus described in this chapter was developed as part of the project neu_ART and has been optimized on the type of artworks in study and restoration at the CCR, with very different shapes, sizes and materials. This apparatus is unique in Italy for versatility and size of analysable artefacts, and for this reason it makes the CCR, both for the equipment available and for skills acquired during the project, on the cutting edge in the application of these analytical techniques to cultural heritage.

After a first introductory part about radio-tomographic methods, will be treated in detail the setup of the instrument, starting from the design phase, through the realization and the characterization of the apparatus, up to the test on mockups specially made; the application of the instrument in real case

La radiografia e la tomografia

La radiografia e la tomografia (anche nota come TAC, acronimo di Tomografia Assiale Computerizzata) sono tecniche diagnostiche assolutamente non invasive e non distruttive utilizzate per ottenere un'immagine della struttura e della composizione interna di un oggetto. Fra i campi di applicazione più conosciuti vi è sicuramente quello medico ma, specialmente negli ultimi decenni, queste tecniche hanno visto applicazioni via via crescenti sia nel campo industriale sia in quello dei Beni Culturali. Entrambe queste tecniche si basano su un fenomeno fisico, noto fin dall'inizio del secolo scorso, che consiste nel differente assorbimento di un fascio di raggi X da parte di diversi materiali attraversati. I raggi X sono fotoni di energia compresa tra qualche decina e qualche centinaia di keV, che permette loro di attraversare spessori talvolta consistenti di materiali opachi alla luce. I fotoni interagiscono e vengono assorbiti dagli elettroni degli atomi che compongono il materiale attraversato. L'intensità di un fascio di raggi X che incide su un materiale omogeneo viene pertanto attenuata via via che aumenta lo spessore attraversato secondo una legge esponenziale, detta legge di Lambert-Beer, descritta in modo più dettagliato nel seguito. Il coefficiente di attenuazione lineare, che rappresenta l'attenuazione relativa del fascio per unità di spessore attraversato, dipende dall'energia dei raggi X e aumenta sia all'aumentare della densità del mezzo in cui si propagano i raggi X, sia al crescere del numero atomico degli elementi che lo compongono.

A parità di spessore attraversato l'assorbimento, anche chiamato radio-opacità, è

quindi maggiore per composti densi e ad alto numero atomico, quali ad esempio i metalli, rispetto agli elementi leggeri e meno densi, quali ad esempio il legno. Si osserva che il coefficiente di attenuazione diminuisce al crescere dell'energia dei raggi X; come verrà chiarito nel seguito, l'energia a cui operare è un parametro da ottimizzare a seconda della geometria e del materiale di cui è costituito l'oggetto da radiografare.

Un apparato radiografico si ottiene ponendo, ad un'opportuna distanza dall'oggetto da analizzare, da un lato una sorgente di raggi X, e dall'altro un rivelatore di raggi X, in grado di misurare su un piano perpendicolare al fascio la distribuzione di intensità trasmessa attraverso l'oggetto. L'immagine che si ottiene associando un livello di grigio all'intensità misurata in ciascun punto sul piano del rivelatore prende il nome di immagine radiografica, che nel caso della radiografia digitale può essere opportunamente normalizzata all'intensità misurata nello stesso punto senza l'oggetto frapposto tra sorgente e rivelatore. Questa immagine rappresenta una mappa in due dimensioni dell'assorbimento nella direzione di propagazione dei raggi dalla quale è possibile ricavare la struttura interna del corpo in esame. Comunemente, in analogia con i risultati ottenibili dalla tradizionale radiografia analogica, i livelli di grigio vanno dal nero ove l'intensità è massima (minimo assorbimento) al bianco ove l'intensità è minima (massimo assorbimento).

L'esempio più comune di una immagine radiografica proviene dal campo medico: le ossa, che costituiscono il materiale che assorbe maggiormente i raggi X nel corpo umano, appaiono bianche; il resto del corpo

studies will instead be widely discussed in the second section of the volume.

Radiography and tomography

Radiography and tomography (also known as CT, which stands for Computed Tomography) are non-invasive and non-destructive diagnostic techniques used to obtain an image of the internal structure and composition of an object. Medicine is among the most popular fields of application but, especially in last decades, these techniques have gradually increased the applications both in the industrial field and in the Cultural Heritage. Both these techniques are based on a physical phenomenon, known since the beginning of the last century, which consists in the different absorption of a beam of X-rays by different materials. X-rays are photons of energy between a few tens and a few hundreds of keV, which allows them to cross large thickness of materials opaque to light. The photons interact and are absorbed by the electrons of the atoms constituent the crossed mate-

rial. The intensity of a X-rays beam impinging on a homogeneous material is gradually attenuated while the thickness increases, according to an exponential law, said law of Lambert-Beer, described with more details in the following. The linear attenuation coefficient, which represents the relative attenuation of the beam per unit of thickness, depends on the energy of X-rays and increases both increasing the density of the medium in which they propagate, both increasing the atomic number of the elements composing it.

For the same thickness the absorption, also called radio-opacity, is therefore greater for dense compounds and with high atomic number, such as metals, respect to light elements and less dense, such as wood. It should be noted that the attenuation coefficient decreases increasing the X-rays energy; as will be clarified in the following, the energy to be used, is a parameter to be optimized depending on the geometry and the material of the object to be analysed. A radiographic apparatus is obtained by placing an

(muscoli, tendini, ecc.), che assorbe meno i raggi X, si presenta con diverse tonalità di grigio, mentre l'aria circostante, che praticamente lascia passare indisturbati tutti i raggi X, appare nera.

Quello che si ottiene in una radiografia è quindi una proiezione bidimensionale di un oggetto tridimensionale. Questo non costituisce una limitazione per oggetti molto sottili o che comunque non presentano grandi discontinuità nella direzione in cui si propagano i raggi X, mentre può diventare un fattore limitante per oggetti molto spessi o che presentano una maggior complessità. In questi ultimi casi una singola radiografia può fornire immagini difficili da decifrare, in quanto dettagli posti a profondità diverse lungo lo stesso raggio verranno a sovrapporsi nello stesso punto dell'immagine. Se si desidera separare questi dettagli occorre radiografare l'oggetto da diverse angolazioni e combinare le immagini ottenute per ricostruirne l'immagine in tre dimensioni, chiamata tomografia, o TAC, dell'oggetto. Lo stesso avviene in campo medico: se per vedere la frattura dell'osso di una mano è sufficiente eseguire una radiografia (la mano è relativamente 'sottile' e poco complessa dal punto di vista dei 'materiali' di cui è composta), per vedere dettagli analoghi all'interno del torace o dell'addome, in cui si sovrappongono diversi organi e tessuti, è necessario eseguire una TAC.

Questa tecnica, molto più complessa, si basa sull'acquisizione di molte radiografie dello stesso oggetto eseguite ad angolazioni differenti e ricombinate poi insieme, con opportuni algoritmi, per dare origine ad un'immagine tridimensionale dell'oggetto. In ogni punto dell'immagine tomografica è

rappresentato, attraverso un livello di grigio, il coefficiente di attenuazione ricostruito in quel punto. Per ottenere una tomografia è quindi necessario un movimento rotatorio che permetta l'acquisizione in sequenza di radiografie ad angolazioni differenti. In campo medico questo è ottenuto facendo ruotare la sorgente ed il rivelatore attorno al paziente, mentre per altre applicazioni, che non presentano la problematica di far ruotare un paziente, si preferisce mantenere fissi sorgente e rivelatore e far ruotare l'oggetto in analisi. Proprio questa seconda opzione è stata adottata per l'apparato sviluppato all'interno del progetto neu_ART e che verrà descritto nel seguito.

Il progetto e la realizzazione dell'apparato radio-tomografico

In questo paragrafo viene ampiamente descritto l'apparato radio-tomografico così come è stato progettato e realizzato. Si tratta di una soluzione innovativa rispetto ai normali sistemi radiografici in commercio che permette di eseguire radiografie e tomografie di oggetti di grandi dimensioni utilizzando un unico apparato. Nella FIG. 1 si vede la versione finale del sistema realizzato sulla base del progetto mostrato in FIG. 2. Esso consiste essenzialmente in una sorgente che emette un cono di raggi X che investe l'oggetto da analizzare e in un rivelatore lineare di raggi X, che viene mosso orizzontalmente dal lato opposto dell'oggetto per mezzo di un sistema meccanico ad alta precisione. Questo sistema permette di ottenere una radiografia dell'oggetto in modo analogo a quanto avviene in uno scanner da tavolo per l'acquisizione delle immagini. A seconda

X-rays detector at a suitable distance from the object to be analysed, on the opposite side with respect to the X-ray source; the detector measures, on a plane perpendicular to the beam, the distribution of the transmitted intensity through the object. The image obtained associating a grey level to the intensity measured in each point on the plane of the detector is called radiographic image, which in the case of digital radiography can be appropriately normalized to the intensity measured in the same point without the object interposed between source and detector. This image represents a two dimensional map of the absorption, in the direction of the rays propagation, from which it is possible to derive the internal structure of the body under examination. Commonly, because of the results obtainable from traditional radiography, the grey levels range from black, where the intensity is maximum (minimum absorption), to white, where the intensity is minimum (maximum absorption).

The typical example of a radiographic image comes

from the medical field: the bones, which are the parts absorbing more X-rays in the human body, appear white; the rest of the body (muscles, tendons, etc...), which absorbs less X-rays, presents different shades of grey, while the surrounding air, which practically let all the X-rays undisturbed, appears black.

What you get in a radiography is then a two-dimensional projection of a three-dimensional object. This is not a limitation for objects very thin or that do not have large discontinuities in the direction in which the X-rays propagate, while it may become a limiting factor for objects very thick or that have a higher complexity. In the latter cases a single radiography can provide images difficult to decipher, as details placed at different depths along the same radius will be superimposed in the same image point. If you want to separate these details the object must be analysed from different angles and, combining the resulting images, it is possible to obtain the image of the object reconstructed in three dimensions, called tomography, or CT scan. The same happens in the



A

Fig. 1A-B Il sistema radio-tomografico sviluppato nel progetto neu_ART e attualmente installato presso il CCR.

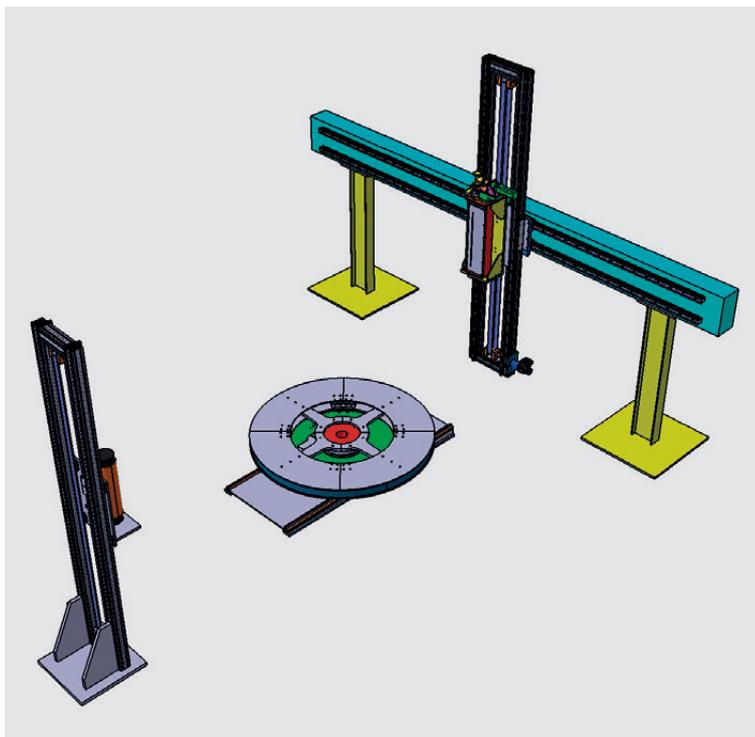
Fig. 1A-B The radio-tomographic system developed in the neu_ART project and currently installed at the CCR.



B

Fig. 2 Schema prospettico delle componenti meccaniche disegnate ad hoc per il sistema radio-tomografico; da sinistra a destra: asse di movimentazione verticale per la sorgente, tavola rotante per il manufatto, asse a movimentazione orizzontale e verticale per il rivelatore con rotazione del rivelatore attorno al proprio asse verticale.

Fig. 2 Prospective outline of the mechanical components specifically designed for the radio-tomographic system; from left to right: vertical axis movement for the source, rotary table for the artefact, horizontal and vertical axis movement for the detector with rotation of the detector around its vertical axis.



che l'oggetto debba poi essere radiografato o tomografato, esso sarà appoggiato su un opportuno sostegno o su una piattaforma rotante.

1. La sorgente e il rivelatore di raggi X

La progettazione del sistema radio-tomografico è iniziata con la valutazione della sorgente di raggi X da impiegare; da questa scelta infatti dipende la progettazione e la definizione di tutte le altre componenti, vale a dire il rivelatore, la meccanica e il locale radioprotetto. Le caratteristiche principali che distinguono i diversi modelli di sorgenti X disponibili in commercio sono l'energia e la corrente massima dei raggi X prodotti, la dimensione della macchia focale¹ e l'apertura angolare del cono di emissione. L'energia massima è stata scelta in modo tale da permettere di analizzare il maggior numero

medical field: a radiography is enough to see the fracture of a bone in a hand (the hand is relatively "thin" and not so complicated from the point of view of the "materials" of which it is composed), while to see similar details within the chest or abdomen, where different organs and tissues overlap, it is necessary to perform a CT scan.

This technique, much more complex, is based on the acquisition of many radiographs of the same object made at different angles and then recombined together, with appropriate algorithms, to create a three dimensional image of the object. Each point in the tomographic image represents, through a grey level, the attenuation coefficient reconstructed at that point. To obtain a tomography is therefore necessary a rotary movement which allows the acquisition of a radiograph sequence at different angles. In the medi-

possibile di opere, a partire dalle tele dipinte fino a grandi statue o arredi lignei. Questa grande variabilità richiede un ampio intervallo di energie disponibili in quanto, come già detto in precedenza, l'energia deve essere ottimizzata in relazione ai materiali e agli spessori da attraversare. Da una valutazione delle opere in restauro presso il CCR fin dalla sua nascita (come spiegato in maggior dettaglio nel paragrafo successivo) si è visto che gli spessori da attraversare con i raggi X erano al più di qualche decina di centimetri di legno. Inoltre bisognava tenere in considerazione che maggiore è l'energia massima dei raggi X emessi dalla sorgente, maggiori avrebbero dovuto essere le schermature e le protezioni. Per queste motivazioni si è deciso di limitare a 200 keV il massimo valore di energia dei raggi X che la sorgente è in grado di produrre. Inoltre si è ritenuto opportuno che la sorgente fosse raffreddata ad aria e non per mezzo di liquidi, per poter permettere una maggior facilità di spostamento. Fra le molte possibilità valutate, la sorgente che più si avvicinava alle esigenze finora descritte era la sorgente General Electric Eresco 42 MF4, che è solitamente impiegata in campo industriale per controlli non distruttivi. Questa permette di variare l'energia massima dei raggi X da 5 a 200 keV

e raggiungere correnti massime di 10 mA². La macchia focale della sorgente è di 3 mm e l'emissione dei raggi X avviene in un cono a sezione ellittica di 40° in verticale per 60° in orizzontale, parametri adatti ad 'illuminare' oggetti di grande volume. Il fascio attraversa una finestra in berillio di 0.8 mm di spessore ed è 'indurito'³ da un ulteriore filtro in alluminio intercambiabile (solitamente spesso 2 mm, adatto per oggetti in legno di medio spessore).

Una volta identificata la sorgente di raggi X si è passati alla scelta del rivelatore. In primo luogo è stato necessario deciderne la tipologia e la geometria. Anche se può sembrare superfluo, vale la pena ricordare che nel campo della radiografia negli ultimi anni c'è stato un passaggio dall'analogico (lastre che richiedevano uno sviluppo chimico) al digitale (che permette risultati in tempo reale), passando attraverso un ibrido (digitalizzazione di lastre a fosfori di memoria). Dal momento che questo apparato sarebbe servito anche per la tomografia, si è esclusa a priori la possibilità di utilizzare qualsiasi tipo di lastra che richiedesse uno sviluppo, optando invece per un rivelatore digitale. Fra questi le geometrie possibili sono sostanzialmente due: ad area o lineare. Entrambe ovviamente presentano vantaggi e svantaggi: il rivelatore

cal field this is achieved by rotating the source and detector around the patient, while for other applications, not presenting the problem to rotate a patient, it is preferred to fix the source and the detector and to rotate the object under analysis. This second option was also adopted for the apparatus developed within the neu_ART project and that will be described below.

The design and implementation of the radio-tomographic apparatus

In this section, the radio-tomographic apparatus is fully described as it has been designed and implemented. It is an innovative solution, compared to normal radiographic system on the market, that allows to perform radiography and tomography of large objects using a single apparatus. FIG. 1 shows the realised final version of the system based on the design shown in FIG. 2. It essentially consists of a source that emits an X-rays cone that invests the object to be analysed and a linear X-rays detector, which is horizontally moved from the opposite side of the object by means of a mechanical system with high precision. This system allows to obtain a radiograph of the object in a way similar to what happens in a desktop scanner for the acquisition of images. If a radiography of the object is necessary, it will be put on a suitable support, while if a CT is required it is placed on a rotating platform.

1. The X-rays source and the detector

The design of the radio-tomographic system began with the evaluation of the X-rays source used; in fact, the design and definition of all other components (the detector, the mechanics and the shielded

local) depends from this choice. The main features distinguishing the different models of X-rays sources commercially available are the maximum energy and current of the X-rays produced, the focal spot size¹ and the angle of emission. The maximum energy was chosen to allow to analyse the largest possible number of artworks, from the paintings on canvas to large statues or wooden furniture. This large variability requires a wide range of available energies because, as mentioned earlier, the energy must be optimized in relation to the materials and thicknesses. An assessment of the restoration works done at the CCR since its birth (as explained in more detail in the next section) shown that the thickness to be crossed by X-rays were at most a few tens of centimetres of wood. It should be noted that the higher the maximum energy of X-rays emitted by the source, the greater should be the shields and guards. For these reasons it was decided to limit to 200 keV the maximum value of X-ray energy that the source is able to produce. Moreover, it was considered more appropriate that the source was air-cooled respect to liquid-cooled, in order to allow easy movement. Among the many assessed possibilities, the source most closed to the requirements described so far was the source of General Electric Eresco 42 MF4, which is usually used in industrial non-destructive testing. This allows to vary the maximum X-rays energy from 5 to 200 keV and reach a maximum current of 10 mA². The focal spot size of the source is 3 mm and the emission of X-rays takes place in a cone of elliptical section (40° in vertical and 60° in horizontal), suitable parameters to "illuminate" objects of great volume. The beam passes through a beryllium

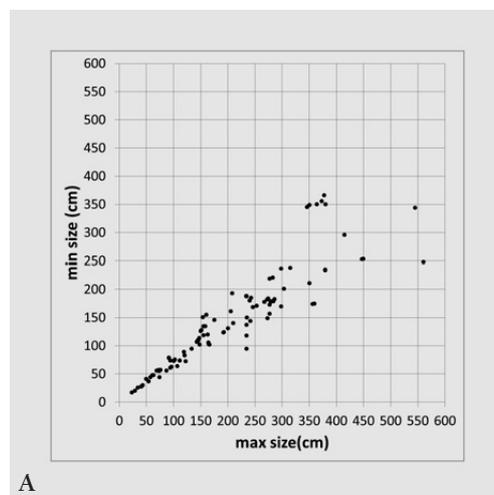
Fig. 3 Dimensioni delle opere in restauro presso il CCR nel periodo 2005-2008:
 A. Tele e tavole;
 B. Oggetti tridimensionali.

Fig. 3 Size of the works of art in restoration at the CCR in the period 2005-2008:
 A. Paintings on canvas and wood;
 B. Three-dimensional objects.

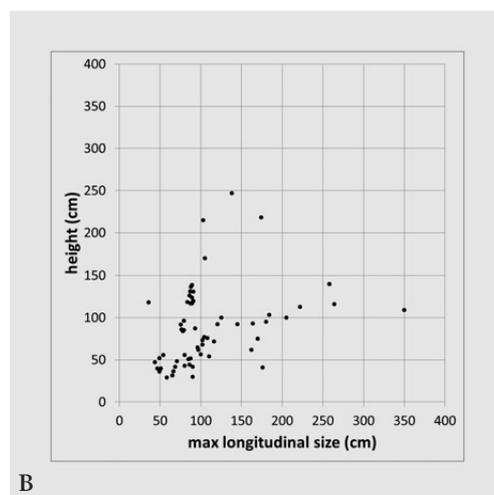
ad area permette di ottenere in pochi istanti radiografie di aree grandi fino a 50 cm × 50 cm, ma per oggetti di dimensioni superiori è necessario acquisire molte immagini e poi comporle in una unica, come in un mosaico; il rivelatore lineare invece richiede un tempo maggiore per la formazione dell'immagine, in quanto necessita di una scansione in movimento, ma ha il vantaggio, oltre ad essere più economico, che la lunghezza dell'immagine può essere scelta in modo da coprire l'oggetto per intero, almeno nella direzione della scansione. Dal momento che, a differenza del campo medico in cui è impossibile mantenere immobilizzato un paziente per tempi molto lunghi, il tempo per eseguire l'analisi di un'opera d'arte non costituisce un vincolo stringente, si è scelto di utilizzare un approccio innovativo scegliendo un rivelatore lineare. Questo tipo di rivelatori è analogo a quello utilizzato negli aeroporti per il controllo di sicurezza dei bagagli ma, mentre in quel caso la scansione si ottiene spostando l'oggetto mediante un nastro trasportatore, in questa applicazione l'oggetto viene mantenuto immobile e viene fatto muovere il rivelatore dietro ad esso. Anche per scegliere il rivelatore sono state valutate più possibilità e il più adatto alle esigenze dello strumento è stato il rivelatore lineare Hamamatsu C9750-20TCN. Questo rivelatore presenta un'area attiva lunga 51.2 cm, formata da una linea di 2560 pixel quadrati di dimensione 200 μm × 200 μm. Il numero di livelli di grigio per ciascun pixel è pari a 4096 (12 bit). Lo scintillatore che permette il rilevamento dei raggi X è a base di gadolinio e presenta una buona risposta ai raggi X fra i 25 e i 450 keV. Dovendo operare anche

window of 0.8 mm thick and is "hardened"³ by an additional interchangeable aluminium filter (usually 2 mm thick, suitable for wooden objects of medium thickness).

Once the X-ray source has been selected, the choice of the detector has followed. Firstly it was necessary to decide both the type and the geometry. Although it may seem unnecessary, it is worth remembering that in the field of radiography in recent years there has been a shift from analogical (plates requiring a chemical development) to digital (which allows real-time results), passing through a hybrid (digitization of plates based on phosphor). Since this system would also serve to tomography, it has ruled out the possibility of using any type of plates that required a development, opting instead for a digital detector. Among these there are essentially two possible geometries: area or linear. Obviously both have their advantages and disadvantages: the area detector allows to get radiographs of areas as large as 50 cm × 50 cm quickly, but for larger items you need to capture many images and then composite them into one, as in a mosaic; the linear detector instead requires



A



B

ad energie superiori a 160 keV è necessario tuttavia aggiungere una schermatura in piombo davanti al rivelatore, per proteggerne i componenti elettronici. Un grande vantaggio di questo rivelatore è la velocità di acquisizione: esso infatti può acquisire

a longer time for the image formation, as it requires a scanning movement, but has the advantage, in addition to being cheaper, that the length of the image can be chosen so as to cover all the object length, at least in the direction of the scan. Since, unlike the medical field in which it is impossible to maintain a patient immobilized for a very long time, the time to perform the analysis of an artwork does not constitute a stringent constraint, it is chosen to use an innovative approach selecting a linear detector. This type of detector is similar to that used in airports for security control of baggage but, while in that case the scanning is achieved by moving the object by means of a conveyor belt, in this application the object is kept immobile and the detector is moved behind it. Many possibilities were evaluated also to choose the detector and in this case the more suited to the needs of the instrument was the linear detector Hamamatsu C9750-20TCN. This detector has an active area 51.2 cm long, formed by a line of 2560 square pixels of size 200 μm × 200 μm. The number of grey levels for each pixel is 4096 (12 bit). The scintillator allowing the detection of X-rays is gadolinium-based and has

ad una velocità che può raggiungere i 50 m/min, anche se, come si vedrà meglio nel seguito, solitamente viene utilizzato a velocità molto inferiori. Il rivelatore risulta sensibile solo ai raggi che incidono su di esso con un angolo in un intervallo di $\pm 2^\circ$ rispetto alla perpendicolare e dunque è stato necessario predisporre un meccanismo in grado di ruotare il rivelatore di $\pm 45^\circ$ durante la scansione in modo da mantenerlo sempre perpendicolare ai raggi incidenti.

2. Il locale radioprotetto

Per dimensionare correttamente il locale che avrebbe ospitato il nuovo apparato per le radiografie digitali e le tomografie computerizzate si è partiti da una valutazione statistica, recuperando le dimensioni delle opere in restauro presso il CCR dal momento della sua fondazione. La valutazione è stata fatta su più di 200 opere, rappresentando su un grafico cartesiano l'altezza e la dimensione massima orizzontale di ciascuna⁴ (FIG. 3). Al momento di definire le specifiche esisteva solo un limite sulla dimensione orizzontale, circa 4 metri, determinata dall'asse che avrebbe permesso il movimento orizzontale del rivelatore. Dal grafico emergeva subito un dato di fatto: nessuno dei locali liberi esistenti al CCR poteva ospitare un apparato in grado di coprire l'intera casistica e nessuno dei laboratori di restauro già impegnati, che dal punto di vista delle sole dimensioni geometriche avrebbero potuto assolvere a tale scopo, poteva essere utilizzato perché risultava comunque impossibile trasferirne le funzioni in altri locali. Era necessario quindi realizzare un nuovo locale sfruttando non già i locali esistenti quanto piuttosto spazi che, opportunamente chiusi,

avrebbero potuto assolvere allo scopo. Come detto il limite massimo in orizzontale era determinato dalla dimensione dell'asse di scansione che, indirettamente, determinava anche il limite massimo dell'altro lato che componeva il piano dell'ideale parallelepipedo che si andava progettando. Il punto da cui viene emesso dalla sorgente il cono di raggi X e la dimensione dell'asse orizzontale determinano infatti la massima distanza a cui deve trovarsi la sorgente affinché il cono stesso possa abbracciare tutto l'asse di scansione. Questo limite era fissato in circa 5 metri, tenendo conto che la sorgente selezionata presenta un angolo di emissione di 60° in orizzontale, ma di cui se ne vogliono sfruttare non più di 40° per evitare eccessive deformazioni nell'immagine proiettata. Il limite in verticale poteva essere invece deciso, in linea teorica, a piacere. Due fattori concorrevano a determinare la massima altezza che avrebbe raggiunto il nuovo locale: l'altezza massima delle opere in restauro presso il CCR e i costi di realizzazione della struttura. Con riferimento ai due grafici di FIG. 3, effettuando un taglio sull'asse delle x per le dimensioni maggiori di 4 metri e sull'asse delle y per le dimensioni maggiori di 3 metri per quanto riguarda le tele e le tavole e un taglio in x e y di 2.5 metri per gli oggetti tridimensionali (per tener conto dell'ingrandimento⁵), non rientravano nelle dimensioni soltanto il 10% delle tele e il 9% delle opere tridimensionali. Le dimensioni così stabilite⁶ permettevano la realizzazione di un locale sufficientemente dimensionato per ospitare la maggior parte delle opere e, aspetto non secondario, permettevano di mantenere i costi entro le stime fatte.

a good response to X-rays between 25 and 450 keV. Since the operations require energies above 160 keV is necessary, however, to add a lead shield in front of the detector, to protect the electronic components. A great advantage of this detector is the acquisition speed: in fact it can acquire at a speed that can reach 50 m/min, although, as will be explained below, it is usually used at much lower speeds. The detector is only sensitive to the X-rays that affect it at an angle in a range of $\pm 2^\circ$ respect to the perpendicular, and therefore it was necessary to provide a mechanism capable of rotating the detector of $\pm 45^\circ$ during the scan so as to keep it always perpendicular incidents rays.

2. The shielded local

In order to properly size the local in which the new apparatus for digital X-rays and CT would be housed we started from a statistical evaluation, recovering the size of the artefacts in restoration at the CCR since its foundation. The evaluation was made over more than 200 works of art, representing on a Cartesian graph the height and the maximum horizontal dimension of each⁴ (FIG. 3). During the specifications

setup existed only a limit on the horizontal dimension, about 4 meters, defined by the axis that would be used for horizontal movement of the detector. The graph immediately shows that none of the existing free local of the CCR could accommodate an apparatus able to cover the entire records and none of the restoration laboratories already engaged could be used because it appeared impossible to move their functions into other labs. It was necessary therefore to establish the new local not in existing locals but in properly closed spaces in order to fulfil the purpose. As said before the horizontal maximum limit was determined by the size of scanning axis that, indirectly, also determined the maximum limit of the other side of the ideal parallelepiped was being planned. The emission point of the X-ray source and the size of the horizontal axis in fact determine the maximum distance at which the source must be located so that the X-ray cone can cover the overall scan axis. This limit was fixed at about 5 meters, taking into account that the selected source has a beam emission angle of 60° horizontally, but using no more than 40° to avoid excessive deformation in the projected image. The ver-



Fig. 4 Il locale radioprotetto con, in primo piano, la porta scorrevole schermata per l'accesso delle opere.

Fig. 4 The shielded local with, in the foreground, the shielded sliding door for the entrance of the artworks.

Il locale, mostrato in FIG. 4, è stato realizzato nel corpo adibito ai Laboratori Scientifici, sfruttando un angolo costituito da due pareti in muratura il cui spessore e la cui composizione erano più che sufficienti a schermare la radiazione che sarebbe stata poi impiegata all'interno del locale stesso. Grazie a questa collocazione era dunque necessario aggiungere solo due pareti verticali schermate e un soffitto a copertura, anch'esso schermato. La sorgente è orientata in modo che il cono di raggi X emesso venga diretto unicamente verso una delle due pareti in muratura e dunque verso le pareti schermate giungono soltanto radiazioni secondarie. Sulla base di questa geometria di funzionamento, delle

tical limit instead could be decided, in principle, as desired. Two factors concurred to define the maximum height that would reach the new lab: the maximum height of the works of art in restoration at the CCR and the costs of the shielded local. Referring to the graphs in FIG. 3, just 10% of the canvases and 9% of three-dimensional works of art did not fit in size, by making a cut on the x-axis for the size larger than 4 meters and on the y-axis for the size larger than 3 meters for canvases and panels and a cut in the x and y-axes for size larger than 2.5 meters for three-dimensional objects (taking into account the magnification⁵). The dimensions so established⁶ allowed to realize an adequately sized laboratory able to house most of the works of art and, not incidentally, allowed to keep the estimated costs.

The lab, shown in FIG. 4, has been realized in the Scientific Laboratories area, using a corner formed by two masonry walls whose thickness and composition is sufficient to shield the radiation that will be used. Due to this location it was therefore necessary to add only two vertical shielded walls and a ceiling, shielded too. The source is pointed so that the X-rays cone is directed only towards one of the two masonry walls and therefore just secondary

specifiche della sorgente impiegata, del tempo stimato di utilizzo dell'apparato e della stima sui tempi di permanenza di personale in prossimità del locale, l'esperto qualificato in materia di radioprotezione ha valutato sufficiente predisporre pareti schermate con 4 mm di piombo⁷.

L'accesso al locale è garantito da una porta scorrevole ad apertura automatica e schermata a copertura di un vano d'accesso di 2 m di larghezza per 3 m di altezza, anch'esso dimensionato considerando i grafici in FIG. 3. Due fotocellule di sicurezza a raggi infrarossi e la costa sensibile di sicurezza sulla spalletta del portone ne garantiscono la massima sicurezza durante le fasi di apertura e chiusura. Nella seconda parete verticale è stata ricavata una finestra dotata di cristallo schermato equivalente a 4 mm di piombo che permette una visione dell'interno del locale anche a sorgente accesa.

Il locale è dotato di un impianto di climatizzazione, avente una duplice funzione. In primo luogo garantisce che le opere sottoposte ad analisi abbiano idonee condizioni di temperatura e umidità relativa dell'aria, in particolare per gli oggetti da tomografare, poiché questa operazione richiede molte ore di acquisizione⁸. In secondo luogo, le stesse condizioni di benessere per i manufatti garantiscono condizioni idonee anche al funzionamento dell'elettronica presente all'interno del locale.

3. Le componenti meccaniche e i software di controllo

Il sistema meccanico per la scansione dei

radiation is directed towards the shielded walls. According to this geometry, to the specifications of the source, to the estimated usage time of the apparatus and to the estimated time spent by personnel near the lab, the qualified expert in radiation protection has evaluated adequate to use shielded walls with 4 mm of Lead⁷.

The access to the lab is provided by an automatic and shielded sliding door covering an access compartment 2 m wide and 3 m high, dimensioned too considering the graphs in FIG. 3. Two infrared safety photocells and a safety edge on the door ensure maximum safety during opening and closing. In the second vertical wall there is a window, made by a shielded crystal equivalent to 4 mm of lead allowing an internal view of the local also with the source turned on. The lab is equipped with an air conditioning system, having a dual function. Firstly it ensures that the works of art under analysis have suitable conditions of temperature and relative humidity of the air, in particular for objects under CT analysis, since this operation requires many hours of acquisition⁸. Second, the same comfort conditions for artefacts also provide suitable conditions for the electronics boards inside the laboratory.

manufatti, interamente progettato, disegnato e realizzato dalla sezione INFN di Torino, è composto da 3 componenti indipendenti: un asse a movimentazione verticale per la sorgente, un asse a movimentazione orizzontale e verticale per il rivelatore con rotazione del rivelatore attorno al proprio asse verticale e una tavola rotante per il manufatto.

L'asse a movimentazione verticale per la sorgente è costituito da profilati strutturali in alluminio e un carrello composto da due coppie di pattini a ricircolo di sfere con guide lineari; la trasmissione per la movimentazione verticale è realizzata mediante cinghia dentata pretensionata; l'azionamento è un servomotore con gruppo di riduzione e la traslazione verticale massima è di 2011 mm. La movimentazione del rivelatore è a doppio asse: un asse verticale, simile a quello della sorgente e con traslazione massima di 2193 mm, è montato su un carrello orizzontale; la movimentazione di quest'ultimo è ottenuta mediante cinghia dentata pretensionata con servomotore e gruppo di riduzione; questo asse, che è dotato di guida ottica per rendere più preciso lo spostamento orizzontale del detector, permette una traslazione orizzontale massima di 3547 mm.

La struttura meccanica è costituita da una trave di alluminio di elevata rigidità appoggiata su una coppia di supporti vincolati a terra. Il rivelatore è poi installato all'interno di una struttura di sostegno che serve anche a schermare l'elettronica del rivelatore stesso lasciando scoperta solo una fenditura che ne espone la parte sensibile. Mediante

un servomotore tale struttura compie un movimento rotatorio sincronizzato alla traslazione sull'asse orizzontale che fa sì che la fenditura sia orientata costantemente in direzione della sorgente, fornendo un'ulteriore protezione da diffusione di tipo Compton di raggi X provenienti da direzioni diverse dall'asse sorgente-rivelatore che disturberebbero l'immagine. Sono inoltre stati integrati nella meccanica descritta due sistemi di ventilazione⁹, uno per la sorgente di raggi X e uno per il rivelatore, per garantire una maggior stabilità evitando problemi di surriscaldamento.

I quattro servomotori impiegati, i relativi azionamenti¹⁰ e il computer di controllo, sono alloggiati in un locale di servizio in prossimità dal locale radioprotetto. Le operazioni svolte dai quattro assi sono programmate su una CLC¹¹ che, tramite un collegamento in fibra ottica con i quattro azionamenti, consente il movimento coordinato degli assi, necessario per sincronizzare la rotazione del rivelatore con la posizione lungo l'asse di scansione. La CLC genera inoltre il segnale per comandare l'inizio dell'acquisizione delle immagini che viene invece gestita, tramite il programma Hipic 9.0 fornito dal costruttore del rivelatore, da un computer posto all'interno del locale radioprotetto. Il sistema è stato realizzato per acquisire le immagini operando la scansione in entrambe le direzioni in modo da ridurre al minimo i tempi morti tra due scansioni successive.

Come già spiegato la tomografia è basata sull'acquisizione di una sequenza di radio-

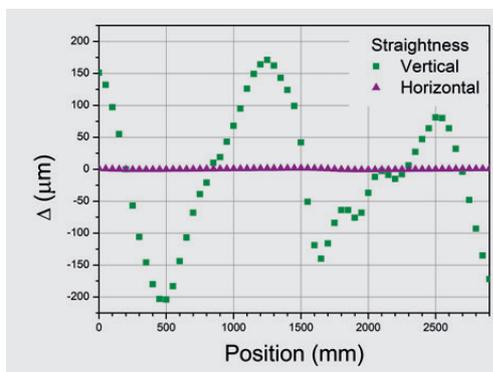
3. Mechanical parts and control software

The scanning mechanical system is entirely designed, engineered and built by INFN Torino. It consists of 3 independent components: an axis with vertical motion for the X-ray source, an axis with horizontal and vertical motion for the detector with a rotation of the detector around its vertical axis and then a rotating table for the artefact. The X-ray source vertical axis is made of structural aluminium profiles and a carriage composed by two pairs of high precision ball runner blocks and guide rails; the vertical motion is achieved with a high reduction ratio gearmotor and a play-free belt transmission. The maximum vertical translation is approximately 2000 mm. The detector is mounted on a dual-axis system: the vertical one, similar to the one of the X-ray source, with a maximum translation of approximately 2200 mm, is mounted on a horizontal carriage. The movement of the latter is obtained by means of a play-free belt coupled with a high reduction ratio gearmotor unit; this axis, whose maximum horizontal translation is approximately 3550 mm, is equipped with incremental linear encoders to precisely control the detector's position. The mechanical structure consists of a high rigidity aluminium beam fixed on a pair of

supports bolted to the ground floor. The detector is installed inside a supporting structure which integrates the electronics' radiation shielding, leaving a slot which exposes the sensitive part. The rotational movement of the detector around its vertical axis is controlled by a servomotor which is synchronized with the horizontal axis movement. The detector is therefore constantly oriented in the direction of the source, providing additional protection by Compton diffusion of X-rays not coming from the source-detector line, thus avoiding image distortions. Two ventilation systems, one for the X-ray source and one for the detector, were also integrated⁹, to ensure a better stability avoiding overheating issues. The four servomotors, the drives¹⁰ and the control computer are housed in a room near the shielded laboratory. The operations carried out by the four axes are programmed on a CLC¹¹ which allows, through a fibre optic connection with the four drives, the coordinated motion of the axes, required to synchronize the rotation of the detector with the position along the scan axis. The CLC also generates the signal for starting the images acquisition, which is instead managed, via the Hipic 9.0 program provided by the detector manufacturer, with a computer located inside

Fig. 5 Misure interferometriche per la caratterizzazione del movimento orizzontale del rivelatore (rettilinearità orizzontale e verticale).

Fig. 5 Interferometric measurements for the characterization of the horizontal movement of the detector (horizontal and vertical straightness).



grafie dell'oggetto che si desidera indagare a diverse angolazioni. È dunque fondamentale la presenza di una piattaforma che sorregga l'oggetto e gli consenta, nello stesso tempo, di compiere una rotazione sul suo asse verticale. La tavola rotante sviluppata utilizza un asse rotante motorizzato di elevata precisione Newport RV 350 PE ed è montata su un carrello per regolare la distanza tra manufatto e rivelatore in base alle dimensioni del manufatto stesso, tra una distanza minima e massima del centro di rotazione dal rivelatore rispettivamente di 0.5 e 130 cm. La struttura della tavola rotante è dimensionata per un carico massimo di 500 kg, con una base di appoggio di diametro 160 cm. Le caratteristiche principali della tavola rotante sono l'altissima precisione e la risoluzione angolare, derivate direttamente dalle caratteristiche dell'azionamento, combinate ad una elevata stabilità in movimento con grandi carichi e dimensioni del manufatto; l'ingombro verticale è inoltre estremamente ridotto, permettendo così di sfruttare a pieno la luce disponibile all'interno del locale. La piattaforma viene gestita dallo stesso computer che controlla tutti gli altri assi meccanici tramite un programma appositamente sviluppato con

the shielded lab. The system has been designed to acquire images by operating the scan in both directions so as to minimize the dead time between two successive scans. As already explained the computed tomography is based on the acquisition at different angles of a sequence of X-rays of the analysed object. The presence of a platform is therefore essential to bear the object and, at the same time, to allow a rotation around its vertical axis. The rotary table uses a Newport RV PE 350 high precision motorized rotary axis and it is mounted on a carriage to adjust the distance between the artefact and the detector according to the size of the work of art itself, between a minimum and maximum distance of the centre of rotation from the detector respectively of 0.5 cm and 130 cm. The structure of the rotary table is sized for a maximum load of 500 kg, with a supporting base of 1.6 m diameter. The very high precision and the angular resolution are the main features of the rotary table, directly derived by the characteristics of the

LabVIEW per questa applicazione: i parametri da impostare prima di iniziare l'acquisizione dei dati sono l'angolo di rotazione e la velocità angolare¹².

Nonostante la meccanica sia di alta precisione, è stata comunque eseguita una verifica del movimento più critico e cioè quello orizzontale del rivelatore. È infatti fondamentale che questo movimento sia il più preciso possibile, dal momento che le dimensioni del pixel del rivelatore sono di soli 200 μm. Per eseguire tale verifica è stato utilizzato un calibratore dinamico Agilent Technologies 5529A, formato da un interferometro laser e diversi gruppi di ottiche per eseguire misure di precisione della velocità, della linearità e della rettilinearità dell'asse.

Le misure di velocità lungo l'asse orizzontale del carrello cui è fissato il rivelatore hanno lo scopo di osservare se lo spostamento avviene con velocità costante lungo tutto l'asse. Questo fatto è fondamentale per ottenere delle buone immagini radiografiche in quanto una velocità costante evita deformazioni nelle immagini radiografiche acquisite. Da questa misura¹³ si è osservato innanzitutto che la velocità effettiva del carrello coincide con la velocità impostata dal software di controllo, ma soprattutto che la velocità può essere considerata costante in entrambi i sensi di percorrenza dell'asse.

Le misure di linearità hanno lo scopo di quantificare l'accuratezza nella misura della posizione del carrello lungo l'asse orizzontale di movimentazione mentre quelle di rettilinearità permettono di verificare se il carrello, durante il movimento, presenta degli scostamenti orizzontali (nella direzione sorgente-rivelatore) o verticali. Le misure di rettilinearità orizzontale sono importanti perché permettono di valutare se la distan-

drive, combined with a high stability in motion with large loads and size of the object; the vertical size is moreover extremely small, thus allowing to fully exploit the available space in the lab. The platform is controlled by the same computer that controls all the other mechanical axes through a program in LabVIEW developed for this application: the parameters to be set before starting the data acquisition are the rotation angle and the angular velocity¹². Although the high precision mechanism, however, a check of the most critical movement was performed, the detector horizontal motion. It is in fact essential that this movement is as precise as possible, since the dimensions of the pixels of the detector is just 200 μm. To verify this a dynamic calibrator Agilent Technologies 5529A was used, consisting of a laser interferometer and several groups of optics to perform precision measurements of speed, linearity and straightness of the axis. The velocity measurements along the horizontal axis of the carriage to which is

za fra rivelatore e sorgente rimane costante durante la scansione mentre quelle di rettilineità verticale permettono di determinare se il rivelatore ha dei movimenti secondari verso il basso o verso l'alto. Le misure eseguite (FIG. 5) permettono di stabilire che lungo tutta la lunghezza della scansione lo scostamento del rivelatore rispetto alla posizione attesa è sempre inferiore ai 200 μm e quindi assolutamente accettabile per questo strumento, come si potrà notare anche dalla qualità delle immagini mostrate nel resto di questo volume.

Sono state inoltre condotte delle misure sulla piattaforma rotante, volte a verificare sia la precisione del movimento angolare effettivo rispetto a quello impostato via software dall'operatore, sia la ripetibilità di tale movimento per prove successive e per entrambi i sensi di rotazione, orario e antiorario.

4. I sistemi di sicurezza e la sala controllo

Il sistema di sicurezza installato copre molteplici aspetti. L'emissione del fascio X è possibile solo a portone di accesso chiuso e in caso di apertura con fascio attivo, questo viene istantaneamente disattivato. Per quanto riguarda la meccanica, tutti gli assi motorizzati sono stati configurati con limiti software sul movimento in modo che l'operatore non possa inserire valori fuori scala; oltre al limite software è comunque presente un sistema di sensori meccanici di fine corsa e due pulsanti di stop di emergenza, uno nel locale radioprotetto e uno nella sala controllo, che permettono il blocco immediato di tutti i motori. Due webcam completano il sistema di sicurezza, inquadrando il movimento del detector e l'oggetto analizzato.

La sala controllo (FIG. 6) è collocata al primo piano ammezzato dei Laboratori Scientifici



Fig. 6 La sala controllo dell'apparato radio-tomografico.

Fig. 6 The control room of the radio-tomographic apparatus.

del CCR e ospita il controller della sorgente, la consolle del computer dedicato all'acquisizione dei dati dal detector e un altro computer dedicato alle preliminari operazioni di analisi dati. Quest'ultimo viene anche utilizzato per visualizzare le immagini live delle due webcam e per controllare, in modalità desktop remoto, il computer collocato nel locale degli azionamenti dei motori.

5. Il software per la ricostruzione tomografica e il cluster

Il software per la ricostruzione tomografica (FIG. 7) utilizzato nel progetto neu_ART è stato interamente sviluppato dal gruppo di ricerca.

La ricostruzione tomografica è in matematica un tipico problema inverso in cui, a partire dalle immagini 2D delle proiezioni acquisite ad angoli diversi si vuole ricostruire il volume 3D da cui esse derivano. Le basi dell'algoritmo di ricostruzione furono gettate nel 1917 da Johann Radon che, ben prima che fosse inventata la tomografia, aveva ri-

fixed the detector have the purpose to observe if motion takes place with constant velocity along the axis. This fact is critical to obtain good X-rays since a constant velocity prevents deformation in the acquired images. By this measure¹³ it is first noted that the actual velocity of the carriage matches the velocity set by the control software and especially that the velocity can be considered constant in both directions on the axis. Linearity measurements aim to quantify the accuracy in the measurement of the position of the carriage along the horizontal axis, while those of straightness allow to verify if the carriage, during the motion, presents horizontal deviations (in the source-detector direction) or vertical. The measures of horizontal straightness are important because they allow to evaluate if the distance between the detector and the source stays constant during the scan, while those of vertical straightness allow to establish if the detector has secondary motion downwards or upwards. The measures (FIG. 5) allow to estab-

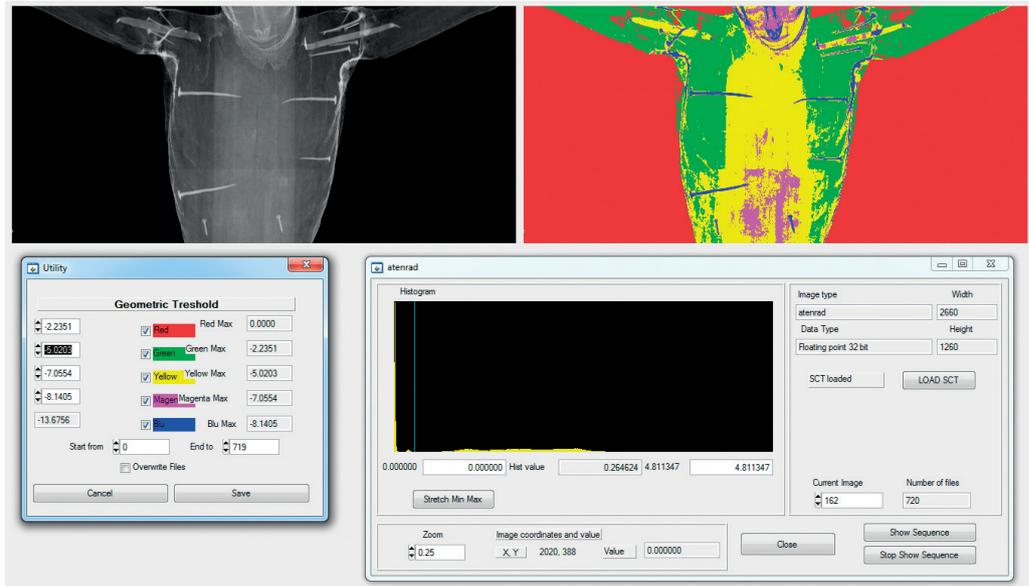
lish that along the length of the scan the deviation of the detector with respect to the expected position is always less than 200 μm and then absolutely acceptable for this instrument, as it will be noticed also from the quality of the images shown in the Volume. Measures on the rotating platform were also carried out, in order to verify both the accuracy of the actual angular motion with respect to the one set by the operator via software, both the repeatability of such movement for subsequent tests and for both directions of rotation, clockwise and counter clockwise.

4. Security systems and control room

The installed security system covers multiple aspects. The X beam emission is possible only when the access door is closed and in case of opening with active beam, the latter is immediately disabled. Regarding the mechanics, all motorized axes have been configured with software constraints on the motion so that the operator cannot enter value

Fig. 7 Schermata del programma per l'elaborazione dei dati tomografici sviluppato all'interno del progetto neu_ART.

Fig. 7 Screenshot of the software for the analysis of tomographic data developed within the neu_ART project.



solo il problema matematico introducendo il concetto di sinogramma e una trasformata che poi fu detta per l'appunto di Radon¹⁴. Purtroppo la soluzione di Radon è valida solo nel continuo, mentre le radiografie digitali sono ovviamente discrete¹⁵. Per questa ragione si ricorre al teorema della slice centrale di Fourier su cui si basa l'algoritmo di *Filtered Back Projection* o FBP¹⁶. In questo algoritmo ciascuna proiezione viene retroproiettata indipendentemente nel volume di ricostruzione dopo un'opportuna convoluzione con una funzione filtro e l'immagine ricostruita risulta semplicemente dalla somma delle retroproiezioni. Poiché ciascuna

proiezione viene elaborata e retroproiettata indipendentemente dalle altre, l'algoritmo FBP si presta efficacemente alla parallelizzazione del calcolo. Le equazioni da usare dipendono dalla geometria di acquisizione e vengono distinti tre casi a seconda che il fascio di raggi X utilizzato per ottenere le radiografie sia parallelo, a ventaglio o conico. Solo in quest'ultimo caso la retroproiezione avviene direttamente in tre dimensioni mentre nei primi due l'algoritmo ricostruisce più semplicemente fette bidimensionali che, una volta sovrapposte, danno luogo al volume ricercato. Benché la geometria dell'apparato descritto in precedenza sia a fascio co-

out of range; in addition to the software limit it however present a system of mechanical sensors of limit switch and two emergency stop buttons, one in the shielded lab and one in the control room, which block all drives. Two webcam complete the security system, framing the movement of the detector and the analysed object. The control room (Fig. 6) is located on the first floor mezzanine of the Scientific Laboratories of the CCR and houses the controller of the source, the console of the computer of detector data acquisition and another computer dedicated to the preliminary data analysis. Later is also used to display live images from the two webcams and to control, in remote desktop mode, the computer placed in the room with the drives.

5. The software for tomographic reconstruction and the cluster

The software for tomographic reconstruction (FIG. 7) used in the neu_ART project was entirely developed by the research group.

In mathematics the tomographic reconstruction is a typical inverse problem in which, starting from 2D projections acquired at different angles, you want to rebuild the 3D volume from which they derive. The basis of the reconstruction algorithm were laid in 1917 by Johann Radon that, long time

before the invention of the tomography, solved the mathematical problem by introducing the concept of a sinogram and of a transform, then called Radon transform¹⁴. Unfortunately, the solution of Radon is valid only in the continuous, while digital radiographs are obviously discrete¹⁵. For this reason the central slice theorem by Fourier is needed, on which the algorithm of *Filtered Back Projection* or FBP¹⁶ is based. In this algorithm, each projection is independently back projected in the reconstructed volume after an appropriate convolution with a filter function and the reconstructed image is simply the sum of the back projections. Since each projection is processed independently from the other and back projected, the FBP algorithm can effectively be parallelized. The equations to be used depend on the geometry of acquisition and three cases are distinguished, depending on whether the X-rays beam used to obtain the radiographs is parallel, fan-shaped or conical. Only in the latter case the back projection takes place directly in three dimensions, while in the first two the algorithm simply reconstructs two-dimensional slices which, when superimposed, give rise to the three-dimensional volume. Although the geometry of the apparatus described above is cone beam, the vertical opening angle of the cone is small enough to approximate

nico, l'angolo di apertura verticale del cono è sufficientemente piccolo da poter approssimare il cono con una sovrapposizione di fasci a ventaglio, con il vantaggio di poter ottenere buone immagini in tempi piuttosto brevi rendendo possibile la parallelizzazione dell'algoritmo in modo semplice e diretto.

Per questi motivi l'algoritmo di ricostruzione implementato è stato quello della FBP e sono stati realizzati anche degli algoritmi *ad hoc* per rimuovere vari tipi di artefatti tipici della tomografia: artefatti ad anello, artefatti metallici, spikes. Per ottenere il volume finale ricostruito è necessario elaborare le varie immagini in fasi successive, descritte brevemente nel seguito.

Le prime operazioni da fare sulle immagini acquisite permettono di eseguire una correzione che tiene conto della disomogeneità del fascio di raggi X e delle caratteristiche del detector¹⁷. Secondo la legge di assorbimento dei raggi X, infatti, la radiografia di un oggetto è un'immagine bidimensionale che misura l'intensità del fascio trasmesso $I[x,y]$, una volta noto il fascio emesso dalla sorgente $I_0[x,y]$ (spesso indicato come "white"), misurabile acquisendo una radiografia senza oggetto. In queste condizioni vale la legge di Lambert-Beer:

$$I[x,y] = I_0[x,y] e^{-\int_l \mu[x,y] dl}$$

the cone with an overlap of fan beams, with the advantage of being able to obtain good images in a rather short time, making it possible to parallelize the algorithm in a simple and direct way.

For these reasons, the implemented reconstruction algorithm was the FBP one and some *ad hoc* algorithms have also been implemented, to remove various types of artefacts typical of tomography: ring artefacts, metal artefacts, spikes. To obtain the final reconstructed volume is necessary to work on the various images in successive phases, which are described briefly below.

The first operations to be done on the acquired images allow to perform a correction that takes into account the inhomogeneity of the X-ray beam and the characteristics of the detector¹⁷. According to the X-rays absorption law, in fact, the radiograph of an object is a two dimensional image which measures the intensity of the transmitted beam $I[x,y]$, when the beam emitted by the source $I_0[x,y]$ is known (often referred to as "white"), measurable acquiring a radiograph without the object. In these conditions the Lambert-Beer law is valid:

$$I[x,y] = I_0[x,y] e^{-\int_l \mu[x,y] dl}$$

dove $\mu[x,y]$ è la distribuzione del coefficiente di assorbimento lineare dei raggi X lungo la direzione della radiografia ed è direttamente proporzionale alla distribuzione della densità dell'oggetto $\rho[x,y]$, che è l'incognita che si vuole ricostruire. Dal momento che si utilizza un rivelatore digitale, è necessario sottrarre il rumore di fondo del rivelatore, $D[x,y]$ (spesso indicato come "dark"), ad ogni immagine acquisita con tale rivelatore, e quindi sia a $I[x,y]$ sia a $I_0[x,y]$.

Per la tomografia, acquisendo diverse radiografie a diversi angoli, si misurano gli integrali di $\mu[x,y]$ lungo diverse direzioni. Si osservi però che la radiografia acquisita non è direttamente proporzionale al coefficiente di assorbimento a causa dell'esponentiale presente nell'equazione 1. Per questa ragione si elaborano le radiografie effettuando la correzione per il *dark* e per il *white* sopra descritta e valutandone il logaritmo, ottenendo così la radiografia attenuata $A[x,y]$ che è invece direttamente proporzionale all'integrale di

$$A[x,y] = -\ln \left(\frac{I[x,y]-D[x,y]}{I_0[x,y]-D[x,y]} \right) \propto \int_l \mu[x,y] dl$$

Dalle radiografie attenuate è poi possibile ricostruire il sinogramma: questo consiste in un'immagine che, fissata una determinata altezza n sul rivelatore, contiene le righe n -esime di tutte le radiografie attenuate registrate ad ogni angolo di acquisizione. Ciò

where $\mu[x,y]$ is the distribution of the linear absorption coefficient of X-rays along the direction of the radiograph and it is directly proportional to the distribution of the density of the object $\rho[x,y]$, which is exactly what you want to obtain. Since a digital detector is used, it is necessary to subtract the noise of the detector, $D[x,y]$ (often referred to as "dark"), to each acquired image, and therefore both to $I[x,y]$ and $I_0[x,y]$.

For tomography, acquiring several radiographs at different angles, we measure the integral of $\mu[x,y]$ along different directions. But note that the acquired radiograph is not directly proportional to the absorption coefficient, due to the exponential present in the Lambert-Beer law. For this reason, radiographs are processed making the correction both for the dark and for the white, as written above, and evaluating their logarithm, thus obtaining the attenuated radiograph $A[x,y]$ which is directly proportional to the integral of $\mu[x,y]$:

$$A[x,y] = -\ln \left(\frac{I[x,y]-D[x,y]}{I_0[x,y]-D[x,y]} \right) \propto \int_l \mu[x,y] dl$$

From the attenuated radiographs is then possible to

significa che all'interno del sinogramma ci sono tutte le informazioni necessarie per ricostruire una slice, cioè una sezione bidimensionale dell'oggetto ad una certa altezza n rispetto al rivelatore.

Sul sinogramma è possibile applicare una serie di algoritmi per rimuovere tipici rumori tomografici, fra cui spikes, artefatti ad anello e artefatti metallici. Gli spikes appaiono nella radiografia attenuata come dei puntini neri e sono determinati da raggi X che abbiano interagito direttamente con il rivelatore causando nella radiografia la lettura di uno o più punti ad elevato segnale. Nel caso dell'apparato descritto in questo capitolo essi non sono presenti. Gli artefatti ad anello, o *ring artefact*, sono invece causati da pixel del rivelatore con diversa efficienza, ad esempio nei casi in cui un pixel risponde con un valore sempre più alto o sempre più basso rispetto ai pixel vicini. Nel sinogramma, essendo un rumore indipendente dall'angolo di rotazione, appaiono come righe verticali e nella slice ricostruita formano un anello, da cui il nome. Vengono rimossi cercando nel sinogramma colonne di pixel con valore costantemente più basso o più alto delle vicine e utilizzando filtri di *edge enhancement*, soglie locali, studio di derivate prime e seconde lungo ciascuna riga del sinogramma¹⁸. Nel caso dell'apparato qui descritto, dal momento che il rivelatore è lineare e non ad area, questi artefatti sono solitamente poco evidenti e sono dovuti perlopiù alle operazioni di correzione con *white* e *dark*. Gli artefatti metallici, o *metal artefacts*, sono causati da particolari nell'oggetto di

elevata densità rispetto al materiale vicino e appaiono nella slice ricostruita come delle "stelle" che mascherano il segnale dei particolari a densità minore nel quale essi siano inseriti. È il tipico caso di un chiodo di metallo nel legno. Per poter ricostruire correttamente anche il segnale a densità minore è necessario agire sul sinogramma o sulle radiografie attenuate per ridurre il segnale più alto. Si applicano in tal senso soglie sui livelli di grigio associati a filtri locali per la ricerca dei contorni¹⁹.

Come detto, per la ricostruzione, è stato implementato l'algoritmo di FBP per un fascio a ventaglio (*fan beam*). L'algoritmo è stato sviluppato interamente dal team del gruppo di ricerca ed è in grado di effettuare ricostruzioni tomografiche in diverse modalità: con asse di rotazione spostato rispetto al centro del rivelatore²⁰, con rivelatore non perfettamente allineato all'asse di rotazione (vettore dei centri), ricostruendo una specifica porzione della slice (*local tomography*), con proiezioni troncate (*halfscan*)²¹ e con angoli di rotazione inferiori a 360°.

Il software di ricostruzione è stato poi parallelizzato per mezzo di tecniche di *high performance computing* (HPC) ed è in grado di ricostruire sia su un computer multiprocessore che su un cluster di computer con sistema operativo Windows HPC. Per velocizzare le operazioni di ricostruzione e sfruttare a pieno le possibilità di parallelizzazione degli algoritmi impiegati è stato acquistato un cluster di 4 computer HP SL390G7, ciascuno dotato di 2 processori da 4 core. Abilitando l'*hyper-threading*, il sistema operativo

reconstruct the sinogram: it consists of an image that, set a specific height n on the detector, contains the n -th row of all attenuated radiographs recorded at each acquisition angle. This means that within the sinogram there is all the necessary information to reconstruct a slice, that is a two-dimensional section of the object at a certain height n with respect to the detector.

A set of algorithms can be applied to the sinograms, to remove typical tomographic noise, including spikes, ring artefacts and metal artefacts. The spikes appear in the attenuated radiographs as black dots and are determined by X-rays that interact directly with the detector causing the reading of one or more points with a high signal. In the case of the apparatus described in this chapter they are not present. The ring artefacts are instead caused by pixels of the detector with different efficiency, for example in cases where a pixel responds with a value always higher or always lower than the neighbouring pixels. In sinograms, being the noise independent from the angle of rotation, they appear as vertical lines and in the reconstructed slice form a ring, from which the name. They can be removed in the sinograms, looking for columns of

pixels with a value always lower or always higher respect to the neighbouring and applying filters for edge enhancement, local thresholds, study of first and second derivatives along each row of the sinogram¹⁸. In the case of the apparatus described here, since the detector is linear and not an area one, these artefacts are usually not very evident and are mainly due to the correction for white and dark. The metal artefacts are caused by high density details in the object, respect to the surrounding material, and appear in the reconstructed slice as "stars" that mask the signal of the lower-density details in which they are inserted. A typical case is the presence of a metal nail in a piece of wood. In order to properly reconstruct also the lower-density signal, it is necessary to act on the sinogram or on the attenuated radiographs to reduce the highest signal. For this thresholds on the grey levels associated with local filters for the detection of contours¹⁹ can be applied.

As written before, for the reconstruction, the FBP algorithm for a fan beam has been implemented. The algorithm has been entirely developed by the team of the research group and is able to perform tomographic reconstructions in different ways:

vede 16 processori per macchina fisica, per un totale di 64 processori. La ricostruzione su cluster è enormemente più veloce rispetto a un singolo calcolatore. Infatti la ricostruzione HPC si avvantaggia non solo di un numero maggiore di processori, ma anche di maggiore memoria e di spazio disponibile su disco fisso²².

La velocità di ricostruzione è un fattore chiave della tomografia applicata applicata a grandi opere d'arte²³; investigare infatti opere di grandi dimensioni con una buona risoluzione spaziale significa acquisire migliaia di immagini con milioni di pixel. Il set di dati di radiografie acquisite da elaborare raggiunge in questi casi dimensioni che vanno da diverse decine di GB ad alcune centinaia di GB. Il tempo di calcolo necessario per ottenere le immagini ricostruite richiederebbe con un normale pc diverse settimane di elaborazione. Un tempo così lungo non è accettabile in quanto i risultati della tomografia devono poter essere fruibili in breve per essere sottoposti all'esame dei restauratori. Il cluster HPC risolve egregiamente questo problema e permette una ricostruzione quasi in tempo reale.

Una volta ottenute tutte le *slices*, benché queste forniscano già moltissime informazioni utili ai restauratori, è molto utile ricostruire il volume tridimensionale. Grazie a questo volume è possibile far ruotare virtualmente l'oggetto per vederlo da tutti i punti di vista e soprattutto fare dei tagli virtuali in qualunque direzione per mettere in evidenza dettagli o strutture difficilmente comprensibili dalle sole sezioni orizzontali.

with an offset between the rotation axis and the centre of the detector²⁰, with the detector not perfectly aligned with the rotation axis (vector of the centres), reconstructing a specific portion of the slice (local tomography), with projections truncated (half-scan²¹) and with rotation angles of less than 360°.

The reconstruction software was then parallelized using high performance computing (HPC) techniques and it is able to reconstruct both on a multiprocessor computer and on a cluster of computers running Windows HPC. To speed up reconstruction and to fully exploit the parallelization possibilities of the used algorithms, a cluster of 4 computers HP SL390G7, each with 2 processors with 4 cores have been purchased. Enabling hyper-threading, the operating system sees 16 processors per physical machine, for a total of 64 processors. The reconstruction on the cluster is dramatically faster than on a single computer. Indeed the HPC reconstruction takes advantage not only of a greater number of processors, but also of greater memory and available space on the hard disk²².

The reconstruction speed is a key factor for tomography applied to the large artworks²³; in fact

Per eseguire queste ultime operazioni è stato acquistato il software commerciale per il *rendering* 3D VGStudio MAX 2.2 della Volume Graphics. Esempi di *rendering* tridimensionale sono mostrati nella sezione dedicata ai manufatti artistici.

Caratterizzazione dello strumento

Nel paragrafo precedente sono state presentate le varie componenti costituenti l'apparato radio-tomografico mentre in questo vengono descritte le misure e le prove effettuate per la caratterizzazione e la verifica del funzionamento del rivelatore e della sorgente di raggi X²⁴. Ciò è necessario al fine di una migliore messa a punto del sistema sviluppato e di una migliore resa nelle analisi realizzate.

La caratterizzazione della sorgente di raggi X ha riguardato sia la verifica delle condizioni di riscaldamento della stessa, sia la valutazione delle eventuali variazioni nell'emissione di raggi X. La temperatura della sorgente è un parametro importante perché, nel corso di una tomografia, questa viene tenuta accesa anche per tempi piuttosto lunghi. Esistono dei limiti operativi nella temperatura massima raggiungibile dalle diverse componenti della sorgente, che non devono essere superati per evitare un danneggiamento delle stesse. I tempi di funzionamento sono stati dunque programmati sulla base dei risultati di diverse prove di funzionamento della sorgente a valori differenti di tensione, corrente e tempo di accensione. La stabilità nell'emissione di raggi X è stata valuta-

the investigation of large-scale objects with a good spatial resolution requires the acquisition of thousands of images with million pixels. The acquired radiographs data set to be processed in these cases reaches sizes ranging from several tens of GB to several hundreds of GB. The computation time required to obtain the reconstructed images with a normal PC would require several weeks of processing. Such a long time is not acceptable because the tomography results should be usable in short time to be submitted to the restorers. The HPC cluster perfectly solves this problem and allows a reconstruction almost in real time.

Once all the slices have been obtained, although they already provide lots of useful information for restorers, it is very useful to reconstruct the three-dimensional volume. This volume allows to view the object from all points of view and also virtual cuts can be done in any direction, to highlight details or structures barely comprehensible only from the horizontal sections. To perform these operations the commercial software for 3D rendering VGStudio MAX 2.2 of Volume Graphics was purchased. Examples of three-dimensional rendering are shown in the section devoted to artefacts.

ta utilizzando il rivelatore di raggi X, la cui caratterizzazione verrà descritta nel seguito, mantenuto fermo di fronte alla sorgente, misurando, a brevi intervalli di tempo, quale fosse l'intensità del fascio di raggi X emesso. L'emissione appare complessivamente stabile ed esente da fluttuazioni o spike.

La caratterizzazione del rivelatore ha riguardato invece molti più aspetti, di cui i più importanti sono sicuramente la risoluzione spaziale e il numero di livelli di grigio effettivi. Prima di eseguire queste verifiche, sono state analizzate la corrente di buio (*dark*), la linearità della risposta del rivelatore e la sua stabilità con il riscaldamento. Per quel che riguarda la corrente di buio, questa si è dimostrata essere indipendente dalla velocità²⁵ di acquisizione e caratteristica di ciascun pixel, con valori che si aggirano fra i 110 e i 230 livelli di grigio (sui 4096 disponibili). La linearità della risposta del rivelatore è stata verificata osservando l'aumento del segnale dovuto ai raggi X al diminuire della velocità di acquisizione. Le misure sono state eseguite utilizzando 19 diverse velocità fra 50 m/min e 0.6 m/min con la sorgente impostata a 100 kV e 8 mA. La correlazione lineare è ottima, con valori di dispersione dei punti intorno alla retta mediamente contenuti entro $\pm 0.6\%$. Il rivelatore è stato sottoposto ad un'analisi del riscaldamento per valutare dopo quanto tempo esso raggiunge una condizione stabile ed è quindi utilizzabile in modo continuativo²⁶. Dall'analisi risulta che impiega circa 40 minuti per raggiungere una condizione stabile.

Passando quindi alla valutazione dei livelli di grigio effettivi del rivelatore, è stata seguita una procedura²⁷, che permette, tramite la misura del segnale rivelato per tempi di

integrazione diversi (in questo caso quindi velocità diverse), di giungere ad un valore del cosiddetto range dinamico del rivelatore. Per questo rivelatore, facendo tale valutazione per i singoli pixel, si ottengono valori fra i 180 e i 210 livelli di grigio effettivi, corrispondenti ad un range dinamico pari a 46 ± 1 dB²⁸.

Infine, per quel che riguarda la risoluzione spaziale del sistema, è stato utilizzato il metodo della *edge spread function*²⁹, basato sull'analisi di una radiografia ottenuta su un bordo molto netto di un materiale molto radiopaco e molto sottile. Il valore migliore possibile di risoluzione ottenuto per questo sistema corrisponde a 200 μm , pari quindi alle dimensioni del pixel del rivelatore.

La procedura operativa

Per la scelta dei parametri operativi da utilizzare per ogni radiografia o tomografia, per questa particolare strumentazione, si parte dalla valutazione della distanza della sorgente dal rivelatore. Questa va impostata in modo che vi sia un giusto compromesso fra la necessità di ridurre l'effetto penombra (allontanando la sorgente dal rivelatore), la necessità di aumentare la quantità di raggi X che raggiungono il rivelatore (avvicinando la sorgente al rivelatore) e la necessità che il cono emesso dalla sorgente abbracci tutto l'oggetto. Una volta stabilita questa distanza si pone l'oggetto il più vicino possibile al rivelatore e si stabilisce così la geometria di acquisizione, che fissa quindi l'ingrandimento e la penombra. Il passo successivo consiste nel valutare l'energia massima dei raggi X che verranno utilizzati per l'analisi. Questa va scelta in modo opportuno affini-

Characterization of the instrument

While in the previous section the different components of the radio-tomographic apparatus were presented, here are going to be described the measurements and tests carried out for the characterization and verification of operational properties of detector and X-ray source. This step is necessary in order to better plan the system development and to improve the performances of analyses.

The characterization of the X-ray source involved both the verification of the conditions of its heating, and the assessment of any changes in the emission of X-rays. The source temperature is an important parameter because, during a tomography, it is kept turned on even for rather long times. There are some limitations in the maximum operating temperature achievable by the various source components, which must not be exceeded to prevent damages. The operating times of the source were therefore planned on the base of various operational test results at different values of voltage, current and time of ignition. The stability in the emission of X rays was evaluated

using the X-ray detector, whose characterization will be described below, held stationary in front of the source, measuring, at short time intervals, the intensity of the beam. The emission appears generally stable and free from fluctuations or spikes.

The characterization of the detector, on the other hand, concerned many more aspects, whose the most important are especially the spatial resolution and the effective number of grey levels. Before these tests, dark current, linearity of detector response and its stability to heating have been analysed. Concerning the dark current, this has proved to be independent of the acquisition speed²⁵ and characteristic of each pixel, with values ranging between 110 and 230 grey levels (instead of the 4096 available). The linearity of the detector response was verified by observing the increase in the signal due to X-rays while the acquisition speed was decreasing. The measurements were performed using 19 different speeds between 50 m/min and 0.6 m/min with the source set at 100 kV and 8 mA. The linear correlation is excellent, with a dispersion of the points around the

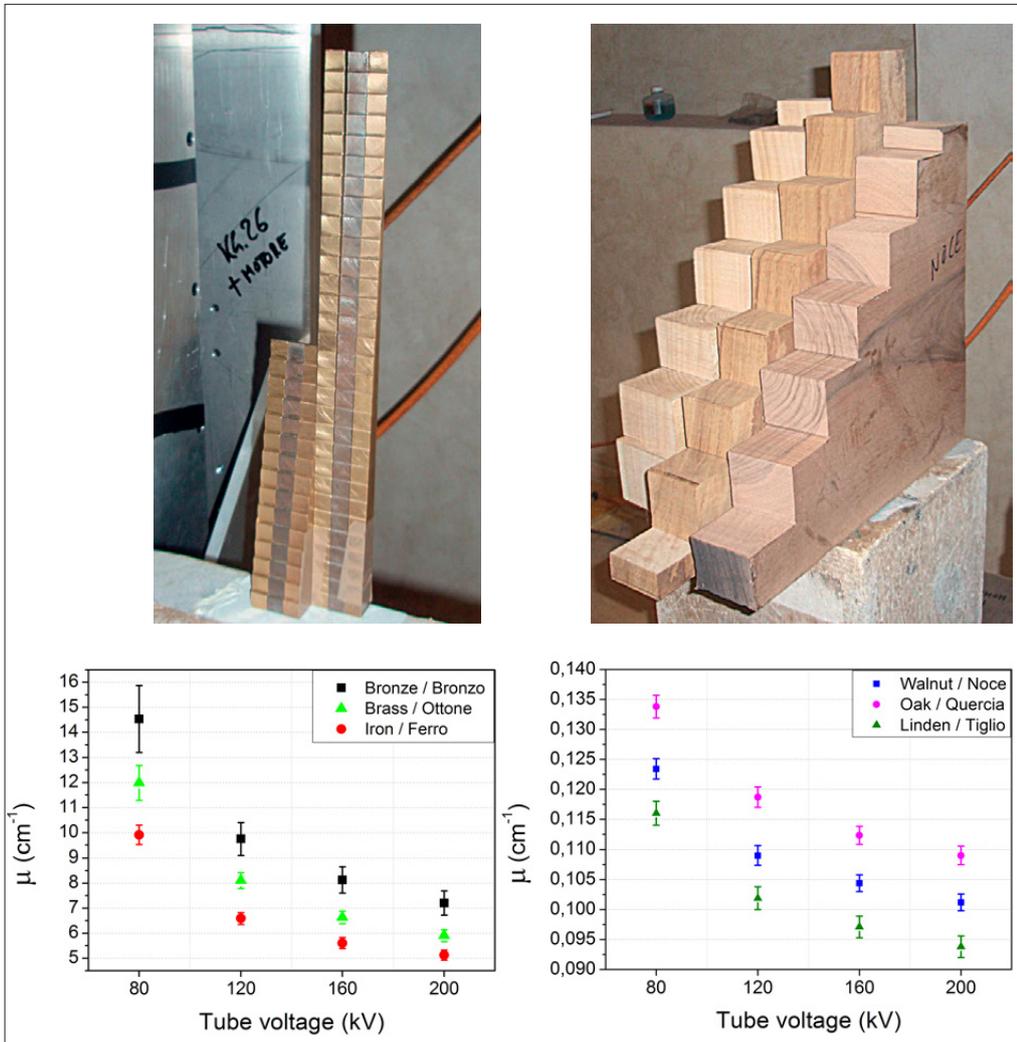


Fig. 8 Fotografia dei provini in metallo e legno e relativi coefficienti di assorbimento.

Fig. 8 Photograph of the mockups in metal and wood and their absorption coefficients.

ché il rivelatore misuri un segnale anche nelle zone più radiopache dell'oggetto (che significa che alcuni raggi X riescono ad attraversare l'oggetto anche nei suoi punti più spessi e più densi). Allo stesso tempo è fondamentale non scegliere un'energia trop-

po alta, altrimenti il contrasto delle immagini ottenute sarà troppo basso, in quanto tantissimi raggi X attraverseranno l'oggetto senza interagire con esso e sarà impossibile percepire differenze di densità. Fissata una certa energia massima per il fascio di raggi

average content line kept within $\pm 0.6\%$. The detector has been subjected to an analysis of the heating to assess how much time it needs to reach a stable condition and is therefore usable in a continuous manner²⁶. The analysis shows that it takes about 40 minutes to reach a stable condition. Regarding the evaluation of detector's effective grey levels, in this work has been used a procedure²⁷ which allows, through the measurement of the detected signal for different integration times (which means then different speeds), to come to a value of the so-called dynamic range of the detector. For this detector, making this assessment for each single pixel, we obtained between 180 and 210 effective grey levels, corresponding to a dynamic range of 46 ± 1 dB²⁸. Finally, as concerns the spatial resolution of the system, the method of the *edge spread function* has been used; it is based on the analysis of a radiograph performed on a very sharp edge of a very radio-opaque and very thin material. The best achievable resolution of this system corresponds to 200 μm , which is therefore equal to the size of the pixels of the detector.

The operating procedure

As concerns the operating parameters needed for each X-ray or CT, for this particular instrumentation, we should start with the assessment of the source-detector distance. This should be set so that there is a fair compromise between the need to reduce the penumbra effect (moving the source away from the detector), the need to increase the amount of X-rays that reach the detector (approaching the source to the detector) and the need that the cone produced by the source covers the entire object. Once established this distance, the object is placed as close as possible to the detector and the acquisition geometry is then set, defining magnification and penumbra. The next step is to evaluate the maximum energy of X-rays that will be used for the analysis. This has to be properly chosen so that the detector measures a signal even in the most radio-opaque areas of the object (this means that some X-rays can pass through the object even in its most thicker and dense parts). At the same time it is important not to choose a too high energy, otherwise the contrast of

X emesso, si imposta la corrente al valore massimo possibile garantito dalla sorgente. A questo punto si può passare ad effettuare alcune prove volte a determinare la minima velocità di scansione del detector, tale per cui il segnale di “white” sia il massimo possibile (si avvicini dunque al canale 4096), ma senza raggiungere la saturazione. Tale velocità sarà diversa di caso in caso, in quanto dipende dalla tensione e corrente della sorgente di raggi X e dalla distanza fra la sorgente e il rivelatore. Per la tomografia tale velocità influenza notevolmente il tempo totale per l’acquisizione dei dati: infatti per ottenere buone immagini tomografiche è bene acquisire molte radiografie, indicativamente un numero pari al numero di pixel della dimensione orizzontale della singola radiografia.

Test radiografici

Per eseguire una radiografia è sufficiente decidere i parametri descritti nel paragrafo precedente e posizionare l’oggetto in modo che sia il più vicino possibile al rivelatore. Per le tele e tavole dipinte solitamente si preferisce porre lo strato dipinto dal lato del rivelatore, in modo che subisca meno deformazioni dovute ad ingrandimento ed effetto penombra. Per verificare la funzionalità dello strumento sono stati eseguiti numerosi test su singoli strati di pigmento, su tele di diversi periodi storici e anche su diversi tipi di preparazioni pittoriche³⁰. I risultati ottenibili saranno mostrati nei capitoli relativi ai

casi studio. In questa sede si mostrano una serie di test per valutare le potenzialità dello strumento sviluppato per l’analisi di diversi spessori e tipologie di materiali impiegati nel campo dei Beni Culturali, in particolare metalli e legni³¹. Per eseguire questo studio sono stati preparati dei provini con spessori variabili in metallo (ferro, bronzo, ottone, con spessori compresi fra 0.1 e 3 cm) e in legno (noce, quercia e tiglio, con spessori compresi fra 2.5 e 38 cm). Dall’analisi delle radiografie eseguite in diverse condizioni operative è stato possibile trarre diverse informazioni utili per eseguire poi radiografie su altri oggetti realizzati in questi materiali. Innanzitutto è stato valutato lo spessore massimo del materiale analizzabile con questo strumento³², che è risultato essere di 32 cm circa per il legno e 0.6 cm circa per il metallo. È inoltre stato valutato il coefficiente di assorbimento dei vari materiali per tensioni diverse (FIG. 8): tale valore permette di valutare a priori le condizioni operative ottimali per eseguire una radiografia su un oggetto, di cui si conoscano il materiale e lo spessore.

Test tomografici

Un aspetto fondamentale per l’acquisizione tomografica consiste nell’allineamento della strumentazione. Dopo aver determinato la geometria di acquisizione, e quindi la posizione della piattaforma, è necessario allineare quest’ultima in modo che il suo piano sia parallelo alla direzione di movimentazione orizzontale del rivelatore e che il suo asse di

the images obtained would be too low, since many X-rays pass through the object without interacting with it and it would not therefore be possible to perceive differences in density. Established a maximum energy for the X-ray beam, the current is set up to the maximum possible value guaranteed by the source. At this point it is possible to start performing some tests to determine the minimum scanning speed of the detector, in order to have a maximum “white” signal (therefore close to the channel 4096), but without reaching saturation. This speed will be different from case to case, as it depends on voltage and current of the X-ray source and on the distance between the source and the detector. For tomography that speed greatly influences the total time for data acquisition: actually, to get good tomographic images is better to acquire several radiographies, a number roughly equal to the number of pixels in the horizontal dimension of the single radiography.

Radiography tests

To perform a radiography is enough to decide the parameters described in the previous paragraph and to place the object as close as possible to the detector. For paintings on canvas and wood usually is better to put the painted layer on the side of the detector, so that it undergoes less deformation

due to magnification effect and penumbra. To test the functionality of the instrument numerous tests have been performed on individual pigment layers, on canvas of different historical periods and also on different types of paintings preparations. The results obtained are shown in the case studies sections. Here we show a series of tests to evaluate the potential of the instrument developed for the analysis of different thicknesses and types of materials used in the Cultural Heritage field, in particular metals and wood. To perform this study, a series of mockups with varying thicknesses of metal (iron, bronze, brass, with thicknesses between 0.1 cm and 3 cm) and wood (walnut, oak and linden, with thicknesses between 2.5 cm and 38 cm) was prepared. From the analysis of radiographies taken under different operating conditions, it was possible to gain several information useful for a correct planning of radiography analysis on other objects made with the same materials. Firstly, the maximum thickness of the material which can be analysed with this instrumental setup³² has been evaluated: results show that it allows to analyse wooden thicknesses up to about 32 cm while for metal just up to about 0.6 cm. Furthermore, it has also been calculated the absorption coefficient of the different materials at different voltages (FIG. 8): this value allows to evaluate *a priori* the optimum

rotazione sia parallelo alla linea di pixel del detector. Questa operazione, che deve essere eseguita con una precisione pari alle dimensioni del pixel del rivelatore (200 μm), può richiedere tempo, ma se non eseguita correttamente pregiudica la possibilità di ottenere delle buone ricostruzioni tomografiche.

Per una tomografia, oltre ai parametri visti in precedenza per la radiografia, è necessario valutarne molti altri, legati principalmente alla rotazione dell'oggetto e al tempo a disposizione per eseguire l'acquisizione dei dati. In particolare per l'apparato descritto, gli ulteriori parametri che rivestono una grande importanza sono la velocità di scansione e di acquisizione del rivelatore (che possono non coincidere), lo step angolare tra una proiezione e l'altra e il range angolare di rotazione coperto³³.

Dal momento che le acquisizioni tomografiche richiedono comunque molto tempo, si è deciso di eseguire dei test preliminari su alcuni provini in legno opportunamente preparati, e poi affinare la conoscenza dello strumento direttamente su casi studio reali, alcuni dei quali verranno trattati in modo più approfondito nel seguito di questo volume.

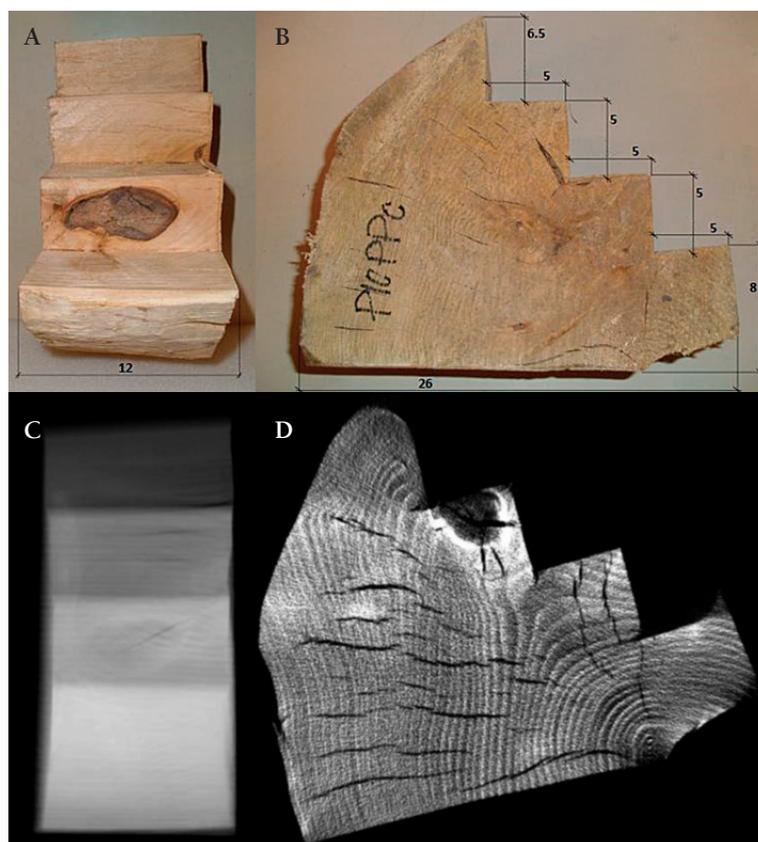
I provini lignei usati per testare il sistema tomografico sono analoghi a quelli utilizzati per i test radiografici e sono stati preparati dal laboratorio di restauro di manufatti lignei del CCR. Tali provini consistono in sezioni di essenze lignei diverse tagliate a gradini in modo da presentare diversi spes-

operating conditions to perform radiographies on an object whose we know material and thickness.

Tomography tests

A key aspect for the tomographic acquisition is represented by the alignment of the instrumentation. Soon after the determination of the acquisition geometry, and therefore the position of the platform, it is necessary to align the latter in order that its plane is parallel to the direction of horizontal movement of the detector and that its rotation axis is parallel to the pixel line. This operation, which must be performed with a precision equal to the size of the detector's pixels (200 μm), could take a long time, but if not properly done it affects the possibility of good tomographic reconstructions.

For a tomography, in addition to the parameters discussed previously for radiography, it is necessary to evaluate many others, mainly related to the rotation of the object and the time available to perform the data acquisition. In particular, for the apparatus presented here, the additional parameters that are of great importance are the scan speed and the acquisition speed of the detector (which may not coincide), the angular step between a projection and the following other and the angular range rotation covered. Since the tomographic acquisitions still require



sori, confrontabili con quelli riscontrati nelle opere restaurate al CCR. Fra i provini preparati sono stati selezionati quello in pioppo (FIG. 9A-B) e quello in quercia (FIG. 10A), legni molto diversi fra loro per densità. Fra i legni utilizzati nel campo dei Beni Culturali il primo è fra i più leggeri, presentando den-

Fig. 9 Provino in legno di pioppo (le dimensioni sono espresse in cm);
A. Vista di taglio;
B. Vista frontale;
C. Radiografia;
D. Sezione tomografica orizzontale.

Fig. 9 Mockup in poplar wood (dimensions are in cm);
A. Cut view;
B. Front view;
C. Radiograph;
D. Slice

a long time, it has been decided to perform preliminary tests on some properly prepared wooden mockups, and then refine the knowledge of the instrument directly on real case studies, some of which will be discussed in more detail in the following chapters of this volume.

The wooden mockups used to test the tomographic system are similar to those used for the radiography tests and were prepared by the restoration workshop of wooden artefacts at the CCR. These mockups are sections of different types of wood cut into steps in order to have different thicknesses, of the same magnitude of those of the objects restored at the CCR. Among the prepared mockups, those in poplar (FIG. 9B) and oak (FIG. 10A) were selected, because of their very different densities. Among the wooden species used in the Cultural Heritage field, the first is one of the lightest, presenting densities³⁴ ranging between 0.45 and 0.60 g/cm^3 , while the second is one of the heaviest, with a density between 0.65 to 1.00 g/cm^3 . The tomographic analysis of these mockups were performed in geometrical conditions similar to those used for larger objects. The oak mockup has been used to test for the first time the so-called "hardware binning". This consists in an acquisition mode of the images that compresses the horizontal direction, but speeding up the acquisition phase. Experimentally,

Fig. 10 Provino in legno di quercia (dimensioni $41 \times 41 \times 5.2 \text{ cm}^3$; i gradini hanno dimensioni di circa $5 \times 5 \text{ cm}^2$, ad eccezione dell'ultimo in basso largo 7 cm); A. Vista frontale; B. Sezione tomografica orizzontale; C-D. Rendering 3D del volume tomografico da diverse angolazioni.

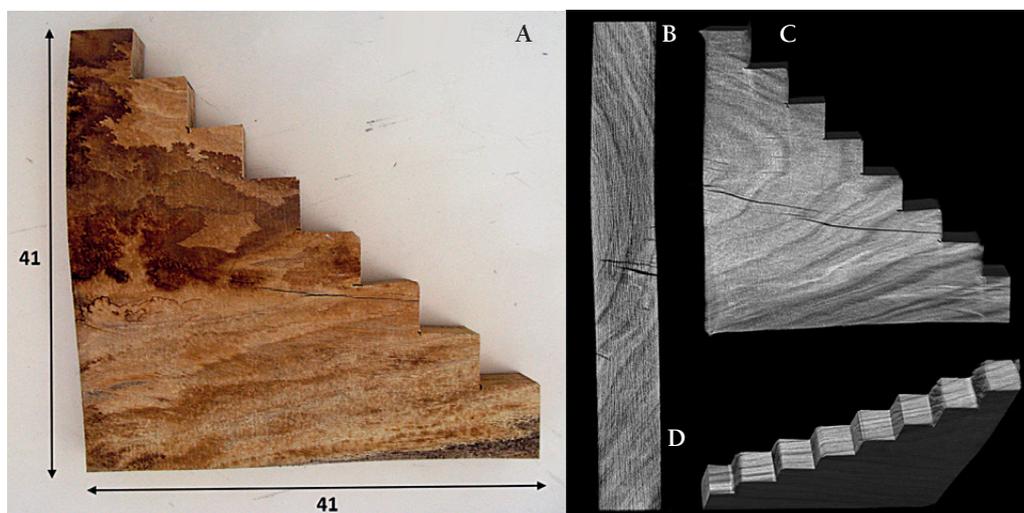


Fig. 10 Mockup in oak wood (dimensions $41 \times 41 \times 5.2 \text{ cm}^3$; the size of the steps is about $5 \times 5 \text{ cm}^2$, except for the last at the bottom that is 7 cm wide); A. Front view; B. Tomographic horizontal section; C and D. 3D rendering of the tomographic volume from different angles.

sità variabili³⁴ fra 0.45 e 0.60 g/cm^3 , mentre il secondo è fra i più pesanti, con densità fra 0.65 e 1.00 g/cm^3 .

Le analisi tomografiche su questi provini sono state eseguite in condizioni geometriche analoghe a quelle utilizzate poi per oggetti molto più grandi. Il provino di quercia è stato utilizzato per testare per la prima volta, in via sperimentale, il cosiddetto “binning hardware”. Questo consiste in una modalità di acquisizione delle immagini che ne comprime la direzione orizzontale, velocizzando però notevolmente la fase di acquisizione. Sperimentalmente è necessario impostare due diversi valori di velocità per la movimentazione e per l’acquisizione del rivelatore, ottenendo quindi delle proiezioni dell’oggetto compresse nella direzione del

movimento. Imponendo ad esempio una velocità di movimentazione doppia rispetto a quella di acquisizione, nel tempo teoricamente impiegato per l’acquisizione del segnale relativo ad un solo pixel, il rivelatore acquisisce il segnale di due pixel affiancati. L’immagine ottenuta è dunque sostanzialmente costituita da pixel di dimensioni non più equivalenti in direzione orizzontale e verticale (nel caso specifico $400 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$). Nel corso della fase di elaborazione è possibile poi effettuare un’operazione di “binning software” nella direzione verticale, ristabilendo le proporzioni dell’immagine. L’impiego della modalità operativa descritta comporta essenzialmente due vantaggi: da un lato il raddoppio del segnale ottenuto per ciascun pixel, dall’altro il dimezzarsi del

it is necessary to set two different speed values for the movement and for the detector’s acquisition, thus obtaining the compressed projections of the object in the direction of the movement. Imposing for instance a moving speed twice of the acquiring one, in the time theoretically used for the acquisition of the signal due to a single pixel, the detector acquires the signal of two adjacent pixels. The image obtained is thus substantially constituted by pixels of different size in the horizontal and vertical directions (in this specific case $400 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$). During the elaboration phase is then possible to perform a “software binning” in the vertical direction, restoring the image proportions. The use of the operating mode described involves essentially two advantages: on one hand, the doubling of the signal obtained for each pixel, on the other hand the halving of time necessary for the acquisition of each image and, consequently, of the overall analysis. This is to the detriment, however, of the spatial resolution achievable on the single radiography, since the pixels of the images appear to be four times larger than the original ones. However, taking into account the penumbra effect (as previously mentioned due to the focal spot of the X-ray source and magnification), this maintains higher values (approximately

$500 \mu\text{m}$) of the resulting size of the pixels ($400 \mu\text{m}$); therefore in these conditions acquiring images with the minimum possible pixel dimension would not bring benefits from the point of view of the actual resolution but, instead, would require longer acquisition and processing times. As it is possible see it in the figures below, the resolution obtained in the final tomographic reconstructions is absolutely appropriate for the details and information sought.

For the tomographic reconstruction of the poplar mockup we show, as an example, a radiography (FIG. 9C) and one of the central slices (FIG. 9D): it is clearly possible to notice fractures, growth rings and structural abnormalities of wood, as the knag on the second step from the top. Even for the oak mockup the reconstruction of the different transverse slices (FIG. 10B) and the 3D rendering (FIG. 10C and D) has provided excellent results: from the images can be actually noticed that also in this case it is possible to clearly distinguish both the veins and the cracks in the wood.

These results have confirmed the suitability of the setup and of the experimental conditions chosen for the analysis of very valuable other works of art. As already mentioned, the other tomographic analyses performed during the neu_ART project were there-

tempo necessario all'acquisizione di ciascuna immagine e, di conseguenza, di quello complessivo richiesto per l'analisi. Questo va a discapito, tuttavia, della risoluzione spaziale ottenibile sulla singola radiografia, poiché i pixel delle immagini finali così ottenute risultano essere quattro volte più grandi degli originali. Tenendo però conto dell'effetto penombra (dovuto come detto alla macchia focale della sorgente di raggi X e all'ingrandimento), questo mantiene valori maggiori (circa 500 μm) della dimensione risultante del pixel (400 μm); pertanto in queste condizioni acquisire immagini con la minima dimensione di pixel possibile non porterebbe benefici dal punto di vista della risoluzione effettivamente ottenibile ma richiederebbe invece tempi di acquisizione ed elaborazione molto più lunghi. Come si potrà notare infatti dalle immagini proposte nel seguito, la risoluzione ottenuta nelle ricostruzioni tomografiche finali è assolutamente adeguata al tipo di dettagli e informazioni ricercati.

Per la ricostruzione tomografica del provino in pioppo si riportano, a titolo d'esempio, una radiografia (FIG. 9C) e una delle slices centrali (FIG. 9D): come si può notare risultano essere ben visibili le fratture, gli anelli di accrescimento e le anomalie strutturali del legno, come il nodo presente sul secondo scalino dall'alto. Anche per il provino in quercia la ricostruzione delle diverse slices trasversali (FIG. 10B) e il rendering 3D (FIG. 10C-D) hanno fornito ottimi risultati: come è possibile notare dalle immagini infatti, an-

che in questo caso è possibile distinguere chiaramente sia le venature che le spaccature del legno.

Tali risultati hanno dunque fornito una conferma circa l'adeguatezza del setup e delle condizioni sperimentali scelte per l'analisi di opere d'arte. Come già anticipato, le successive analisi tomografiche condotte nel corso del progetto neu_ART sono state quindi occasioni molto preziose per sperimentare ed ottimizzare i parametri da adottarsi in fase di acquisizione e mettere a punto le modalità di utilizzo del software di ricostruzione.

I casi studio che più di tutti sono stati un utile banco di prova per il sistema tomografico, nonché una verifica dell'influenza della variazione di alcuni di questi parametri, sono state le due colonne lignee ottocentesche provenienti dal Gabinetto etrusco del Castello di Racconigi, descritte nella seconda parte del volume, e un crocifisso ligneo della fine del XV secolo di provenienza lombarda³⁵.

Uno dei test eseguiti su una delle colonne lignee ha riguardato il range angolare. Tipicamente l'oggetto tomografato dovrebbe compiere una rotazione completa (360°) sul suo asse verticale; dalle prove condotte con range angolari minori si è osservato che, in linea generale, l'adozione di un range pari a 270° è sufficiente per ottenere slices di buona qualità e comporta inoltre un notevole risparmio di tempo. Nel caso delle colonne lignee le immagini delle sezioni trasversali sono state elaborate considerando range angolari di rotazione anche inferiori a 270°, con decrementi di 10° in 10°: data la loro

fore very useful opportunities to test and optimize the parameters to be adopted in the acquisition phase and to develop the use methods of the reconstruction software.

The most useful case studies to test the tomographic system, and to check the influence of the variation of some of these parameters, were the two wooden columns from the nineteenth-century Etruscan Cabinet of Racconigi Castle, described in the second part of this volume, and a wooden crucifix of the late fifteenth century from Lombardy³⁵.

One of the tests performed on one of the wooden column concerned the angular range. Typically the analysed object should make a complete rotation (360°) on its vertical axis; from tests performed with minor angular ranges it was observed that, in general, the adoption of a range of 270° is sufficient to obtain good quality slices and also saving time. In the case of wooden columns, cross sections images have been elaborated considering rotation angular range even lower than 270°, with consecutive decreases of 10°: due to their simple and very smooth shape, for objects of this type can be enough even a range of 180°.

The wooden crucifix was instead used as a first test, after the oak mockup, of the acquisition mode called

"hardware binning" and has confirmed the use of this method also on larger artworks. A further improvement obtained in the final version of the instrument, which concerns the data acquisition phase, is the use of a fixed reference inserted in the field of view for each projection, useful to verify the alignment of all the projections. In the prototype version of the instrument, actually, a sharp marker with clear edges (e.g. a nail) was inserted at the edge of the field covered by X-rays, to be used as a reference to verify the correct synchronization between the movement and the detector's acquisition, and possibly to re-align the various projections during data processing. The improvements implemented on both the movement control and on the reconstruction procedure have however made this precaution unnecessary.

Regarding the acquisition, we can therefore say that the most significant parameter seems to be the value of the angular increment between a projection and the other (to be set as small as possible, compatibly with the time available for the analysis) and that tests made so far suggest in most cases the adoption of an angular rotation range of 270° and one incremental step of a quarter of a degree.

As concerns the aspects most closely related to the reconstruction procedure, considerable progress

forma semplice e molto regolare, per oggetti di questo tipo risulta essere sufficiente anche un range di 180°.

Il crocifisso ligneo è stato invece utilizzato come prima verifica, dopo il provino in quercia, della modalità di acquisizione definita "binning hardware" e ha dato conferma dell'utilizzabilità di questa modalità anche su opere di dimensioni maggiori.

Un ulteriore miglioramento ottenuto nella versione finale dello strumento e che riguarda la fase di acquisizione dati è l'uso di un riferimento fisso da inserire nel campo inquadrato per ciascuna proiezione e da utilizzare per verificare l'allineamento di tutte le proiezioni. Nella versione prototipale dello strumento infatti, veniva inserito a margine del campo investito dai raggi X un marker appuntito e dai contorni netti (ad esempio un chiodo), da utilizzare come riferimento per verificare la corretta sincronizzazione fra la movimentazione e l'acquisizione del rivelatore ed eventualmente ri-allineare le varie proiezioni in fase di elaborazione dati. I miglioramenti attuati sia sul controllo della meccanica, sia sulle procedure di ricostruzione hanno però reso superflua questa precauzione.

Per quel che riguarda l'acquisizione si può quindi dire che il parametro più significativo sembra essere il valore di incremento angolare tra una proiezione e l'altra (da impostare come più piccolo possibile, compatibilmente con il tempo a disposizione per l'analisi) e che le prove effettuate finora portano a suggerire nella maggior parte dei casi l'adozione di un range angolare di rotazione pari a 270° e uno step incrementale di un quarto di grado.

Per quanto riguarda invece gli aspetti più strettamente legati alla procedura di ricostruzione, notevoli sono stati i progressi raggiunti grazie al software sviluppato all'interno del progetto. Innanzitutto il software si è rivelato

un utilissimo strumento per le operazioni accessorie effettuate per ritagliare, ruotare, specchiare o incollare tra loro le immagini: l'impostazione dei parametri necessari risulta infatti essere piuttosto semplice ed immediata, senza contare che la finestra principale offre un'anteprima del risultato atteso, così da poterne verificare l'adeguatezza prima ancora di avviare il processo in questione. Altra operazione che è possibile eseguire è il *binning* delle immagini: anche in questo caso, così come per quello eseguito via hardware, si tratta di sommare due o più pixel adiacenti tra loro in direzione orizzontale o verticale, ottenendo una minore risoluzione ma anche un segnale maggiore. Il *binning* comporta inoltre una riduzione dei tempi necessari per l'elaborazione e un minore spazio sul disco occupato dalle immagini.

L'esperienza maturata all'interno del progetto ha confermato ancora una volta quanto sia fondamentale, al fine di trarre un'interpretazione più completa e approfondita dei risultati, l'interazione continua tra l'operatore che svolge l'analisi tomografica e i restauratori: in molti contesti può essere allora utile effettuare, in un primo momento, una ricostruzione delle slices che, anche se a discapito della risoluzione, sia ottenibile in tempi più rapidi e che possa fornire una lettura d'insieme della struttura interna dell'oggetto. Questo permetterà un confronto più immediato tra le varie figure professionali, fornendo tra l'altro informazioni utili ai restauratori in quelle situazioni in cui sia necessario un intervento sull'opera in tempi ristretti. Si potrà pertanto decidere di effettuare una prima ricostruzione a partire da proiezioni radiografiche che siano state sottoposte ad un'operazione di *binning* 4x4: si otterranno immagini di dimensioni inferiori e con più bassa risoluzione, ma i tempi richiesti per l'elaborazione saranno molto minori. I vantaggi di questa scelta non si

has been achieved thanks to the software developed within the project. First of all, the software proved to be a useful tool for optional operations carried out to crop, rotate, mirror or join the images: the setting of the parameters seems actually quite simple, and moreover the main window provides a preview of the expected result, to check the suitability even before the starting of the process. Other operation that can be performed is the image binning: also in this case, as well as for the one performed via hardware, consists in summing two or more pixels adjacent to each other in the horizontal or vertical direction, obtaining then a lower resolution but also a greater signal. Binning also involves a reduction in the time needed for the processing and less disk space occupied by the images.

The experience gained within the project confirmed once again how important it is, in order to draw a more complete interpretation of the results, the continuous interaction between the operator performing the tomographic analysis and restorers: in many contexts it can then be useful to perform, at first, a reconstruction of slices that, although with poor resolution, is achieved more rapidly and can provide for a first immediate reading of the whole internal structure of the object. This allows a more direct comparison between the various professionals, including providing information useful for conservators in those situations where action on the artefacts is required in a short time. Therefore, we may decide to conduct an initial reconstruction from radiographic projections binned at 4x4: images would

limitano però soltanto alle tempistiche: le prove effettuate hanno mostrato come a volte si possano ottenere, in tal modo, sezioni trasversali dell'oggetto e immagini del volume tridimensionale più leggibili. Sarà allora importante valutare, caso per caso, il livello di dettaglio desiderato per le immagini finali e se, per una data opera, sia realmente necessario ottenere una risoluzione più elevata per il tipo di informazioni attese dall'analisi TAC.

È stata infine testata un'ulteriore modalità di ricostruzione tomografica, definita *local tomography*: si tratta di ricostruire le slices di un oggetto le cui proiezioni siano però troncate per alcuni angoli di rotazione. Questa condizione può presentarsi nel caso di oggetti di grandi dimensioni e, spesso, caratterizzati da larghezze massime molto diverse nelle varie parti. È ciò che si è verificato, ad esempio, per il crocifisso ligneo quattrocentesco, sul quale sono stati effettuati alcuni test a questo proposito: la parte alta del crocifisso è stata infatti ricostruita secondo questa modalità, che permette di concentrarsi su una regione centrale di interesse (in questo caso il torace), tralasciando le parti che troppo si allontanano dal centro di rotazione (come le braccia) e che, se incluse nella ricostruzione, subirebbero un eccessivo effetto di deformazione. Operando secondo questa modalità è possibile acquisire dunque proiezione più corte, che contengano solo la parte centrale dell'oggetto che si vuole ricostruire, con un conseguente significativo risparmio di tempo.

¹ Rappresenta il vertice di emissione del cono di raggi X; minore è la dimensione della macchia focale e migliore è la risoluzione ottenibile, in quanto diminuisce quello che viene definito 'effetto penombra'; questo va però a discapito dei tempi richiesti per l'analisi, in quanto una macchia focale minore significa anche una minore corrente di raggi X e quindi un tempo di analisi maggiore.

It represents the apex of the X-rays cone of emission: the

smaller the focal spot size and the better the resolution achievable, as the "shadow effect" decreases; but in this case the time required for the analysis is higher, since a smaller focal spot size also means a lower current of X-rays and thus a greater time of analysis.

² Con un massimo di 900 W, quindi ad esempio a 200 kV, la corrente massima sarà di 4.5 mA.

With a maximum of 900 W, then, for example, at 200 kV the maximum current is 4.5 mA.

³ L'energia media del fascio viene aumentata eliminando i raggi X a più bassa energia che vengono assorbiti da uno spessore di alluminio e che, per gli usi qui descritti, contribuiscono al rumore complessivo.

The average energy of the beam is increased by eliminating the low energy X-rays which are absorbed by a thickness of aluminum and that, for the uses described herein, contribute to the overall noise.

⁴ Nel caso delle opere tridimensionali è stata considerata l'altezza e la dimensione massima di ingombro sul piano, per le opere bidimensionali (tele e tavole) sull'asse delle x è stata inserita la dimensione massima e su quello delle y la minima, nell'ipotesi che il nuovo locale avrebbe avuto un'estensione in orizzontale piuttosto che in altezza.

For the three-dimensional works of art it was considered the height and the maximum amount of space in the plane, for two-dimensional ones (paintings on canvas wood) on the x-axis has been referred the maximum size and on y-axis the minimum one, under the hypothesis that the new laboratory would have an horizontal extension rather than in height.

⁵ Dal momento che la geometria di emissione dei raggi X è conica, la dimensione della proiezione di un oggetto sul piano del rivelatore dipende dalla distanza fra l'oggetto stesso e la sorgente: minore è la distanza, maggiore è la dimensione della proiezione.

Since the geometry of X-ray emission is conical, the size of the projection of an object on the detector plane depends on the distance between the object itself and the source: the shorter the distance, the greater the size of the projection.

⁶ Considerando anche i vari ingombri della meccanica e della piattaforma rotante su cui si sarebbero collocate le opere con sviluppo tridimensionale, le dimensioni teoriche finali del locale risultavano essere di circa 5 metri x 5 metri nel piano per 3.5 metri di altezza.

Considering the dimensions both of mechanics and of the rotating platform on which the artworks would be placed, the final theoretical dimensions of the room appeared to be about 5 meters x 5 meters (in the plan) and 3.5 meters high.

⁷ Piombo di prima fusione con titolo di purezza 99.9%.

First casting Lead 99.9%.

⁸ A titolo esemplificativo: un manufatto di 2 metri di altezza richiede l'acquisizione di 8 porzioni verticali da circa 30 cm (riferite all'oggetto e considerando una sufficiente sovrapposizione tra le fasce); nell'ipotesi di voler acquisire a passi di 0.25° e per 270°, saranno necessarie 1080 proiezioni per ciascuna porzione verticale. Se ciascuna proiezione richiede in media circa 30 secondi, ne deriva che per ogni porzione verticale sono richieste circa 9 ore, per un totale di circa 70

be smaller and with a lower resolution, but the time required for processing would be much lower as well. The advantages of this choice are not, however, limited just to the timing: the tests carried out have shown that sometimes we can obtain, in this way, slices of the object and three-dimensional volume images more readable. It would then be important to assess, case by case, the level of detail desired for the final images and if, for a given work of art, it is really necessary to obtain a higher resolution.

A further tomographic reconstruction mode has been tested, defined local tomography: the goal is to reconstruct the slices of an object whose projections are cut off for some rotation angles. This condition can arise in the case of large objects and, often, characterized by very different widths in the various

parts. This is what occurred, for example, in the fifteenth century wooden crucifix, on which various tests were conducted: the upper part of the cross was actually rebuilt according to this mode, which lets focus on a central region of interest (in this case the chest), omitting the parts that are too far away from the centre of rotation (like the arms) and which, if included in the reconstruction, would suffer of an excessive deformation effect. Operating in this way it is therefore possible to acquire shorter projections, which contain only the central part of the object that we want to rebuild, resulting in a significant time saving.

ore di acquisizione continuativa per un oggetto sottoposto a tomografia.

For example: an artifact 2 meters tall requires the collection of 8 vertical parts of about 30 cm (referred to the object and considering an appropriate overlap between the parts); assuming an angular step of 0.25° and a total range of 270° , 1080 projections will be used for each vertical part. If each projection requires about 30 seconds, it follows that for each vertical part about 9 hours are required, for a total of about 70 hours of continuous acquisition for an object under CT analysis.

⁹ Maggiori dettagli sono forniti nel paragrafo sulla caratterizzazione dello strumento.

More details are provided in the section on the characterization of the instrument

¹⁰ Sia i servomotori che gli azionamenti sono prodotti commerciali della Bosch-Rexroth, famiglia Ecodrive03.

Both the servomotors and the drives are commercial products of Bosch-Rexroth, family Ecodrive03.

¹¹ Acronimo di "controller card".

Acronym for "controller card".

¹² L'intervallo permesso è $0.5-2.5\%/s$.

The allowed range is $0.5-2.5\%/s$.

¹³ La misura è stata effettuata a velocità diverse, da 1 m/min a 5 m/min.

The measurement was made at different speeds, from 1 m/min to 5 m/min.

¹⁴ J. RADON, *Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte l'angs be-stimmter Mannigfaltigkeiten*, Ber. Verb. Sachs. Akad. Wiss. Leipzig, 69, 1917, pp. 262-277.

¹⁵ È impossibile acquisire infinite immagini con infiniti punti: i rivelatori hanno un numero finito, per quanto possa essere grande, di pixel, così come lo step angolare fra una proiezione e la successiva, per quanto piccolo, non può essere infinitesimo.

It is impossible to acquire infinite images with infinite number of points: the detectors have a finite number of pixel, no matter how large, as well as the angle between a projection step and the next, no matter how small, can not be infinitesimal.

¹⁶ A.C. KAK, M. SLANEY, *Principles of Computerized Tomographic Imaging*, Piscataway, NJ: IEEE Press, 1988.

¹⁷ Utilizzando un fascio conico e non parallelo, il numero di raggi X che arrivano al detector non è lo stesso in tutti punti; eseguendo una correzione delle radiografie per il fascio emesso dalla sorgente si elimina questo effetto. Inoltre con la stessa operazione si va ad eliminare l'eventuale differenza nella risposta dei vari pixel che formano il detector.

Using a cone beam and not a parallel one, the number of X-rays reaching at the detector is not the same in all points; performing a correction of the radiographs to the beam emitted from the source will eliminate this effect. Moreover, with the same operation, any differences in the response of the pixels forming the detector are eliminated.

¹⁸ F. EDWARD BOAS, D. FLEISCHMANN, *CT artifacts: causes and reduction techniques*, in «Imaging in Medicine», vol. 4, n. 2, aprile 2012, pp. 229-240.

¹⁹ *Ibidem*.

²⁰ G.T. GULLBERG, C.R. CRAWFORD, B.M. TSUI, *Reconstruction Algorithm for Fan Beam with a Displaced Center-of-Rotation*, in «IEEE Trans Med Imaging», 5(1), 1986.

²¹ F. EDWARD BOAS, D. FLEISCHMANN, 2012.

²² Nel cluster ci sono 8 dischi da 500 GB e memoria RAM per un totale di 96 GB.

In the cluster there are 8 disks 500 GB each and RAM for a total of 96 GB.

²³ R. BRANCACCIO, M. BETTUZZI, F. CASALI, M.P. MORIGI, G. LEVI, A. GALLO, G. MARCHETTI e D. SCHNEBERK, *Real-Time Reconstruction for 3-D CT Applied to Large Objects of Cultural Heritage on Nuclear Science*, in «IEEE Transactions on», vol. 58, Issue 4, August 2011, pp. 1864-1871.

²⁴ Per maggiori dettagli tecnici: F. DEL GRECO, *Sviluppo e caratterizzazione di sistemi a raggi X per l'analisi 2D e 3D di oggetti di interesse artistico e tecnologico*, Tesi di laurea magistrale in fisica, Università di Torino, Facoltà di Scienze M.F.N., a.a. 2011-2012, relatore A. LO GIUDICE.

²⁵ Questo comportamento fa presupporre che per questo rivelatore il contributo fondamentale al *dark* sia dato dal *readout* noise, mentre è minimo il contributo della corrente termica.

This behavior suggests that, for this detector, the main contribution to dark is given by the readout noise, while the contribution of the thermal current should be minimum.

²⁶ La misura è stata eseguita registrando una sequenza di *dark* ad intervalli di 15 secondi l'una dall'altro, impostando una velocità di acquisizione di 5 m/min (corrispondente ad un tempo di integrazione di 2.4 ms/linea), valore medio tra quelli disponibili, per un totale di 100 linee per immagine. I valori di segnale sono poi calcolati, in modo indipendente per ciascun pixel, utilizzando la media e la deviazione standard del segnale sulle 100 linee.

The measurement was carried out recording a sequence of dark at 15 seconds intervals, setting an acquisition speed of 5 m/min (corresponding to an integration time of 2.4 ms/line), a mean value between those available, for a total of 100 lines per image. The signal values are then calculated, independently for each pixel, using the mean and the standard deviation of the signal on all the 100 lines.

²⁷ M. BETTUZZI ET AL., *Effective dynamic range measurement for a CCD in full-field industrial X-ray imaging applications*, proceedings della International Society for Optics and Photonics (SPIE) 6616, 1L, 2007.

²⁸ Il range dinamico è calcolato come $20\cdot\log(\text{SNR})$, dove SNR è il rapporto segnale/rumore.

The dynamic range is calculated as $20\cdot\log(\text{SNR})$, where SNR is the signal/noise ratio.

²⁹ E.H. BARNEY SMITH, *PSF estimation by gradient descent fit to the ESF*, proceedings della International Society for Optics and Photonics (SPIE) 6059, E, 2006.

³⁰ E. CROCE, *Radiografia digitale per l'analisi dei beni culturali: caratterizzazione della strumentazione per applicazioni su stesure pittoriche*, Tesi di laurea triennale in Tecnologie per i Beni Culturali, Università di Torino, Facoltà di Scienze M.F.N., a.a. 2011-2012, relatore: A. RE; S. BARBIERO, *Radiografia digitale applicata ai beni culturali: caratterizzazione della strumentazione per l'analisi di tele pittoriche*, Tesi di laurea triennale in Tecnologie per i Beni Culturali, Università di Torino, Facoltà di Scienze M.F.N., a.a. 2011-2012, relatore: A. RE; A. PERINO, *Radiografia digitale per l'analisi dei beni culturali: studio degli strati preparatori della pittura su tela*, Tesi di laurea triennale in Tecnologie per i Beni Culturali, Università di Torino, Facoltà di Scienze M.F.N., a.a. 2012-2013, relatore: A. RE.

³¹ S. MARTINA, *Radiografia applicata ai beni culturali: caratterizzazione della strumentazione per l'analisi di materiali lignei e metallici e casi studio*, Tesi di laurea triennale in Tecnologie per i Beni Culturali, Università di Torino, Facoltà di Scienze M.F.N., a.a. 2011-2012, relatore: A. RE.

³² Risultato ottenuto con il valore massimo di energia dei raggi X e stimando che per lo spessore massimo analizzabile solo il 5% dei raggi X incidenti riescono ad attraversare il materiale.

Result achieved with the maximum energy value of X-rays and estimating that, for the maximum thickness, only 5% of the incident X-rays can pass through the material.

³³ Per maggiori dettagli riguardo i risultati di questo paragrafo vedi: C. 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 di Torino, Facoltà di Scienze M.F.N., a.a. 2010-2011, relatore: A. RE; M. 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 di Torino, Facoltà di Scienze M.F.N., a.a. 2011-2012, relatore: A. RE.

³⁴ La densità del legno può variare molto in base alla stagionatura e quindi alla percentuale di acqua presente al suo interno. Nel testo sono riportati i valori minimo e massimo ottenuti da: http://www.engineeringtoolbox.com/weight-wood-d_821.html.

The density of the wood can vary a lot according to the seasoning, and then to the percentage of water present inside it. In the text are used the minimum and maximum values reported on: http://www.engineeringtoolbox.com/weight-wood-d_821.html

³⁵ Il Crocifisso ligneo policromo, proveniente dal Santuario Ave Regina Coelorum di Breglia (CO), è attualmente in corso di studio e restauro nell'ambito della tesi di laurea magistrale di Maria Rita Sampietro, tutor Francesca Spagnoli.

Analisi dei pigmenti con la tecnica del K-edge

Pigment analysis with the K-edge technique

Giorgia Mila, Fauzia Albertin, Filippo Del Greco, Paolo Mereu, Ferruccio Petrucci, Francesco Prino, Luciano Ramello, Alessandro Re

L'analisi non distruttiva dei pigmenti utilizzati nei dipinti su diversi supporti (tela, tavola, ceramica, pergamena, ecc.) permette agli storici dell'arte e ai restauratori di ottenere importanti informazioni sui manufatti. Le tecniche più diffuse sono la fluorescenza a raggi X (XRF) e la PIXE (*Proton Induced X-ray Emission*), entrambe basate su proprietà dei raggi X caratteristici dei singoli elementi chimici, nonché la spettroscopia Raman.

Molti dei pigmenti di interesse storico (precedenti all'introduzione dei pigmenti organici nella seconda metà del 1800) contengono uno o più elementi pesanti (e quindi facilmente rivelabili con raggi X): tra questi ad esempio il Rame (azzurrite $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$, verde-azzurro di malachite $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$), lo Zinco (bianco di zinco ZnO , giallo di cadmio $\text{CdS} + \text{ZnS}$, litopone $\text{BaSO}_4 + \text{ZnS}$, verde cobalto CoZnO_2), l'Arsenico (realgar As_4S_4 , violetto di cobalto $\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2$), lo Stronzio (giallo di stronzio SrCrO_4) e il Cadmio (aran-

cio di cadmio $\text{CdS} + \text{CdSe}$, giallo di cadmio $\text{CdS} + \text{ZnS}$, rosso di cadmio $\text{CdS} + \text{CdSe} + \text{BaSO}_4$).

Principi fisici

La frequenza spettrale della principale riga caratteristica X (chiamata K_α : si tratta della riga di frequenza e intensità più elevata) per un dato elemento di numero atomico Z segue la legge di Moseley (1913):

$$f_K(Z) = c \cdot (Z-1)^2$$

L'energia corrispondente $E_K = hf_K$ (dove h è la costante di Planck) ha evidentemente la stessa dipendenza da Z . La legge di Moseley permette di rivelare la presenza di un dato elemento chimico sia in emissione (mediante le tecniche XRF e PIXE) sia in assorbimento di raggi X. Nel caso dell'assorbimento, si trova che il coefficiente di assorbimento in funzione dell'energia presenta un brusco au-

Non-destructive analysis of pigments used in paintings on various supports (canvas, table, ceramics, parchment, etc.) allows art historians and restorers to obtain important information about the artworks. The most common techniques are X-ray fluorescence (XRF) and Proton Induced X-ray Emission (PIXE), both based on characteristic X-rays from given chemical elements, as well as Raman spectroscopy.

Many pigments of historical interest (preceding the introduction of organic pigments in the second half of 1800) contain one or more heavy elements (easily seen with X-rays): among them e.g. Copper (azurite $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$, malachite $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$), Zinc (zinc white ZnO , cadmium yellow $\text{CdS} + \text{ZnS}$, lithopone $\text{BaSO}_4 + \text{ZnS}$, cobalt green CoZnO_2), Arsenic (realgar As_4S_4 , cobalt violet $\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2$), Strontium (strontium yellow SrCrO_4) and Cadmium (cadmium orange $\text{CdS} + \text{CdSe}$, cadmium yellow $\text{CdS} + \text{ZnS}$, cadmium red $\text{CdS} + \text{CdSe} + \text{BaSO}_4$).

Physical principles

The spectral frequency of the principal X-ray char-

acteristic line (designated as K_α : it is the one having the highest frequency and intensity) for a given element of atomic number Z follows Moseley's law (1913):

$$f_K(Z) = c \cdot (Z-1)^2$$

The corresponding energy $E_K = hf_K$ (h is Planck's constant) clearly has the same dependence on Z . Moseley's law allows one to detect the presence of a given chemical element both by emission (via the XRF and PIXE techniques) and by absorption of X-rays. In the latter case, one finds that the absorption coefficient as a function of energy presents a discontinuity (FIG. 1) at a point called K-edge, that is at an energy $E_{K\text{edge}}$ slightly higher than E_K and still characteristic of the given element.

The fluorescence technique (XRF) is generally employed with a portable instrument to sample the painted surface in some points, less often to obtain a bidimensional map of some small area: in fact, the time needed to obtain such a map with adequate spatial resolution (e.g. with $0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ pix-

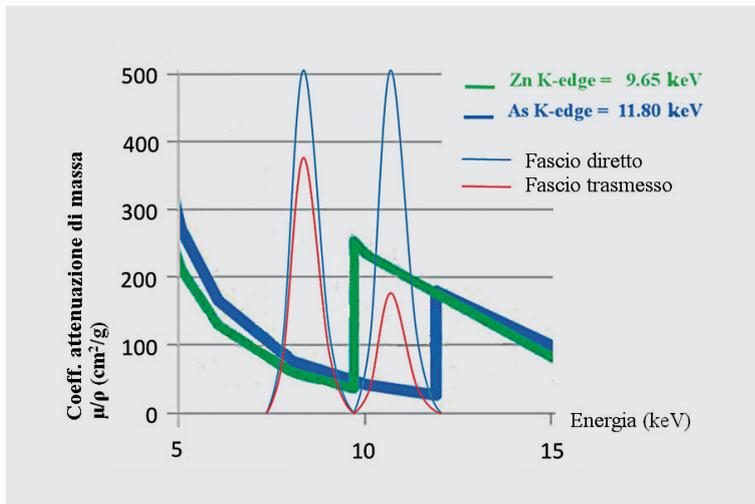


Fig. 1 Principio di funzionamento della radiografia differenziale al K-edge: coefficiente di attenuazione di massa in funzione dell'energia per Zinco (curva verde) e Arsenico (curva blu). Sono mostrati anche dei tipici spettri di fasci quasi-monocromatici di bassa ed alta energia per lo Zinco.

Fig. 1 Working principle of K-edge differential radiography: mass attenuation coefficient vs. energy for Zn and As. Typical spectra for low- and high-energy quasi-monochromatic beams for Zn are shown as well.

mento (FIG. 1) chiamato soglia K-edge in corrispondenza di un'energia E_{Kedge} leggermente superiore a E_K e sempre caratteristica di un dato elemento.

La tecnica di fluorescenza (XRF) viene generalmente utilizzata, con strumenti portatili, per campionare la superficie pittorica in alcuni punti, più raramente per ottenere una mappa bidimensionale su piccole aree: infatti il tempo necessario per ottenere questa mappa con risoluzione adeguata (per es. con pixel di $0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$) a 30 s per pixel supera le 20 ore per un'area di $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$. Dato l'interesse per una mappatura su aree più estese, allo scopo di scoprire strati pittorici nascosti, eventuali pentimenti, e di studiare la tecnica di esecuzione, si sta sviluppando da alcuni anni la tecnica della radiografia differenziale basata sul principio del diverso assorbimento dei raggi X in

els) using 30 s per pixel would exceed 20 hours for an area of $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$. Since there is an interest for larger maps, in view e.g. of discovering hidden layers or pentimenti, and of characterizing the painter's style, since a few years the differential radiography technique is being developed. It is based on the above mentioned principle of the largely different X-ray absorption coefficient on both sides of the K-edge for a given chemical element.

The principle of K-edge differential radiography is illustrated in FIG. 1. One needs to irradiate the object under examination with two quasi-monochromatic X-ray beams, having energies respectively slightly below and above the K-edge one. In both cases one measures a bidimensional map of the transmitted beam. Since the absorption coefficient has a sharp discontinuity for the element under investigation (e.g. Zinc) and only a small decrease for other elements (e.g. Arsenic), a suitable combination of the two images will produce the map of the element in question.

X-ray tubes generate X-rays by sending an electron beam on a target; the produced X-ray have a two-component energy spectrum, a wide one due to *bremsstrahlung*, and a narrow one due to peaks at

prossimità del K-edge per un dato elemento chimico.

Il principio della radiografia differenziale K-edge è illustrato in FIG. 1. Si tratta di inviare sull'oggetto in esame due fasci monocromatici di energie rispettivamente poco inferiore e poco superiore a quella del K-edge, e di misurare in entrambi i casi una mappa bidimensionale dell'intensità del fascio trasmesso. Poiché la variazione di coefficiente di assorbimento è più brusca in presenza dell'elemento allo studio (nell'esempio lo Zinco) mentre sarebbe solo leggera in presenza di soli altri elementi (nell'esempio l'Arsenico), la sottrazione delle due immagini evidenzierà su una mappa l'elemento cercato.

I fasci di raggi X necessari per tali analisi vengono prodotti in tubi a raggi X (tubi radiogeni) inviando un fascio di elettroni accelerati contro un bersaglio metallico; i raggi X prodotti presentano due componenti, una ad ampio spettro energetico dovuta alla radiazione di frenamento (*bremsstrahlung*), l'altra costituita dai picchi di fluorescenza alle energie caratteristiche del materiale del bersaglio. Per ottenere un fascio monocromatico si utilizza la riflessione dei raggi X su cristalli, che permette di estrarre una porzione dello spettro di energia data dalla legge di Bragg:

$$E = n h c / (2 d \sin\theta)$$

dove $n = 1, 2, 3, \dots$ è l'ordine del piano di riflessione all'interno del cristallo utilizzato, d la spaziatura tra due piani cristallini e θ l'angolo di Bragg (angolo tra il fascio e la superficie del cristallo). Variando l'angolo θ è

the characteristic energies of the target material. In order to obtain a (quasi-)monochromatic beam, it is necessary to employ X-ray reflection by a crystal, which allows one to extract a portion of the entire spectrum according to Bragg's law:

$$E = n h c / (2 d \sin\theta)$$

where $n = 1, 2, 3, \dots$ is the order of the reflection within the crystal, d is the spacing among two crystal planes and θ is the Bragg angle (between the beam direction and the crystal surface). By changing the θ angle the desired energy can be selected. This method, when used with a monocrystal, is convenient only if the X-ray source is able to deliver a high intensity primary beam - e.g. if it is a synchrotron radiation machine - since the number of monochromatic photons is a tiny fraction of the primary ones.

In order to obtain a more compact differential radiography system, based on X-ray tubes, while maintaining a reasonable beam intensity, a group of physicists from the University of Ferrara and INFN sezione di Ferrara has developed a method¹ based on mosaic crystals, namely structures

possibile ottenere l'energia desiderata. Questo metodo, con l'utilizzo di monocristalli, è conveniente solo se la sorgente di raggi X è in grado di fornire un fascio primario di intensità elevata – ad esempio con una macchina a luce di sincrotrone – poiché il numero di fotoni monocromatici estraibili rappresenta solo una minuscola frazione di quelli primari.

Per realizzare un sistema di radiografia più compatto basato su tubi radiogeni e mantenere comunque una sufficiente intensità di fascio il gruppo di Università e INFN di Ferrara ha sviluppato un metodo¹ basato sull'utilizzo di cristalli a mosaico, particolari strutture in cui difetti topologici della struttura cristallina determinano la segmentazione di questa in blocchi di dimensioni submicrometriche inclinati tra loro di frazioni di grado con una dispersione gaussiana. Gli effetti di riflessione alla Bragg avvengono separatamente all'interno dei microcristalli e i fasci risultanti si compongono incoerentemente all'uscita. I cristalli a mosaico forniscono una cosiddetta quasi-monocromatizzazione dello spettro, che risulta intrinsecamente più largo rispetto a quello prodotto con la monocromatizzazione completa ma con intensità fino a due ordini di grandezza superiore.

Componenti del sistema

I componenti essenziali di un sistema K-edge sono dunque (1) la sorgente di raggi X quasi-monocromatici, (2) il rivelatore di raggi X, (3) il sistema meccanico di scansione. Nel caso del progetto neu_ART la scelta della sorgente e del rivelatore si è basata sull'esperien-

za maturata dal gruppo di Università e INFN di Ferrara e da una collaborazione internazionale finanziata dal programma ALFA-II dell'Unione Europea². In particolare è stato utilizzato il rivelatore a microstrip a silicio DEDIX³ caratterizzato da una buona efficienza di rivelazione per raggi X da 6 a 50 keV e da una dimensione del pixel di 0.1 mm × 0.3 mm.

Per quanto riguarda il sistema meccanico di scansione, date le dimensioni tipiche delle tele presenti al CCR, è stato progettato un sistema dedicato in grado di spostare solidalmente le sorgenti e il rivelatore portandoli in corrispondenza di una zona prescelta del dipinto e di acquisire mappe di 5 cm × 10 cm mediante scansione nella direzione orizzontale. La corsa del sistema di mappatura sarà di circa 2.5 m in orizzontale e 1.5-2 m in verticale (le dimensioni finali sono, al momento della pubblicazione, in fase di definizione).

Prima di descrivere in dettaglio il sistema progettato per il CCR, si presentano alcuni risultati preliminari ottenuti con il fascio quasi-monocromatico di Ferrara e due rivelatori a stato solido: uno commerciale a CCD e il rivelatore a microstrip DEDIX, indicato in seguito come SSD (*Silicon Strip Detector*).

Utilizzando il rivelatore a CCD è stata verificata la capacità di ottenere mappe quantitative bidimensionali di diversi elementi presenti nei pigmenti: la FIG. 2 riporta il risultato relativo al confronto di quattro diversi pigmenti bianchi stesi sullo stesso supporto di tela. Dei quattro pigmenti, solo due (quelli nella metà di destra della tela) contengono Zinco, precisamente il litopone ($\text{BaSO}_4 + \text{ZnS}$) e il

in which topological defects of the crystal lattice determine its segmentation in sub-micron monocrystals, whose relative orientations have a Gaussian distribution with a RMS of a fraction of a degree. Bragg reflection happens independently within each monocrystal and the separate contributions overlap then incoherently. Mosaic crystals produce a so-called quasi-monochromatic spectrum, intrinsically wider in energy with respect to a true monochromatic beam, but with intensity up to two orders of magnitude larger.

System parts

The main components of a K-edge system are thus: (1) the quasi-monochromatic X-ray source, (2) the X-ray detector, (3) the mechanical scanning system. In the present case of the neu_ART project the choice of source and detector has been based on the experience developed by the Ferrara INFN and University group and by an international collaboration funded by the ALFA-II programme of the European Union². In particular the microstrip silicon detector called DEDIX³ has been used, being characterized by a high detection efficiency for X-rays of energy between 6 and 50 keV and a pixel dimension of 0.1 mm × 0.3 mm.

Concerning the mechanical scanning system, given the typical dimensions of paintings in the CCR, we have designed a system capable of moving source and detector together around the painting, bringing them in any chosen area of it, and of acquiring a map of a 5 cm × 10 cm region by scanning along the horizontal direction. The range of the scanning system will be about 2.5 m in horizontal and 1.5-2 m in vertical (final dimensions are being defined).

Before giving details on the system designed for the CCR, let's examine some preliminary results obtained with the quasi-monochromatic setup in Ferrara and two solid-state detectors: a commercial CCD and the DEDIX silicon strip detector (indicated in what follows as SSD).

Using the CCD detector a test has been run to verify the possibility of obtaining quantitative bidimensional maps of several chemical elements utilized in pigments: FIG. 2 shows the result of a comparison among four different white pigments laid down on the same canvas. Among the four pigments, only two (those in the right half of the canvas) contain Zinc, namely lithopone ($\text{BaSO}_4 + \text{ZnS}$) and zinc white (ZnO). Two images were acquired, at two energies respectively below ("Low") and above

Fig. 2 In alto a sinistra: una preparazione con quattro diversi pigmenti bianchi (Carbonato di Calcio [CaCO₃], Litopone [BaSO₄ + ZnS]; bianco di titanio [TiO₂], bianco di zinco [ZnO]) è sottoposta alla ricerca di Zn. Sono state registrate le radiografie ad energia Low (in basso a sinistra) e High (in basso a destra). La loro sottrazione (in alto a destra) mostra l'accurata mappa selettiva ottenuta per la distribuzione di Zn.

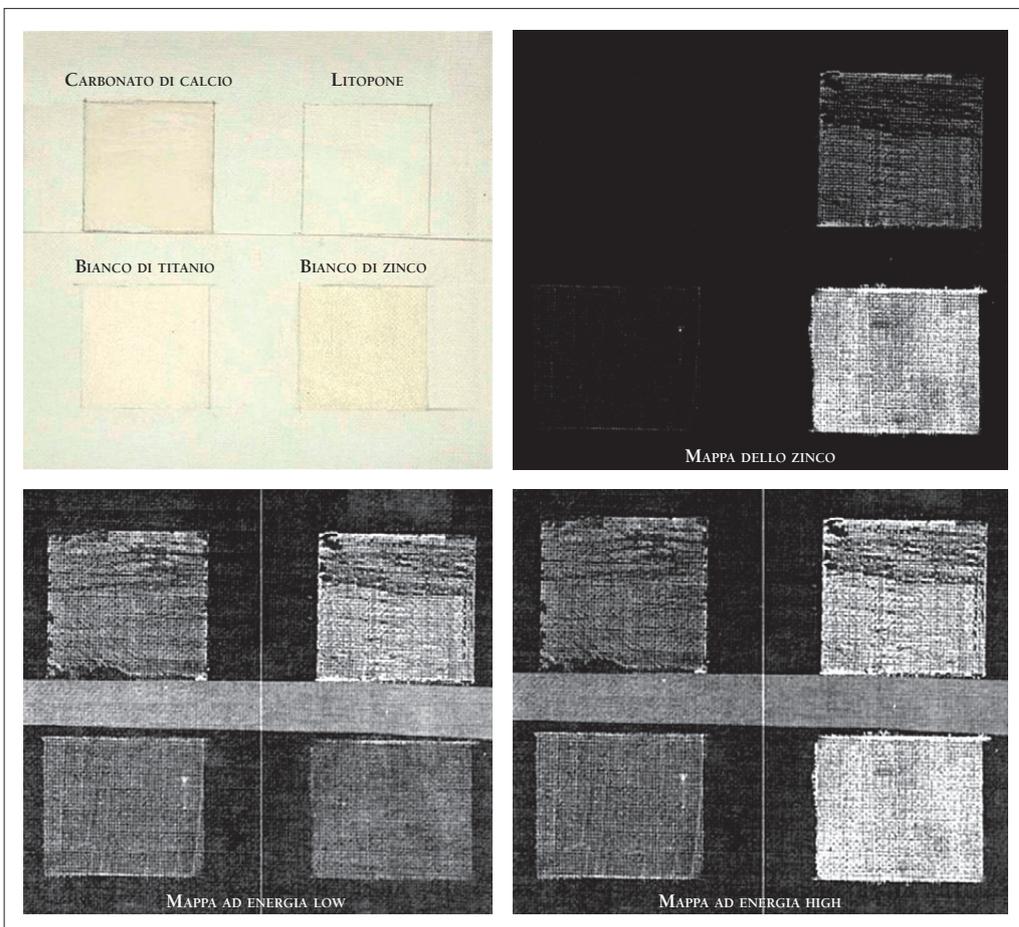


Fig. 2 Upper left: a sample with four different white pigments (Calcium carbonate [CaCO₃], Lithopone [BaSO₄ + ZnS]; titanium white [TiO₂], zinc white [ZnO]) is examined searching for Zn. Low- and High-Energy radiographs (resp. lower left and right) are taken. Their subtraction (upper right) shows the accurate map of Zn distribution obtained.

bianco di zinco (ZnO). Sono state acquisite due immagini a due energie rispettivamente al di sotto ("Low") e al di sopra ("High") del K-edge dello Zinco ed è stata calcolata mediante sottrazione la mappa dello Zinco, mostrata nella parte in alto a destra della figura, in cui il nero corrisponde all'assenza di Zinco e il bianco pieno al massimo livello di Zinco misurato.

Una seconda prova è stata condotta con l'SSD su un piccolo dipinto raffigurante un vulcano realizzato per metà con colori minerali e per metà con colori organici, mostrato

in FIG. 3. Sono state analizzate due porzioni diverse del dipinto: una fascia verticale nel centro alla ricerca di Zinco e una fascia orizzontale in alto alla ricerca del Cadmio. Nel primo caso è stata rilevata la presenza di Zinco (bianco di Zinco) usato come schiarante del verde nella parte di sinistra del vulcano, ma anche nella preparazione di base della tela (struttura a nido d'ape visibile anche nella metà con i pigmenti organici). Le tele commerciali attuali, come quella utilizzata, presentano infatti già una preparazione con bianco di Zinco, da cui la sua diffusa pre-

("High") the Zinc K-edge; then, by subtraction, the Zinc map shown in the upper-right part of the figure was obtained, in which black corresponds to absence of Zinc and white to the highest seen concentration of Zinc.

A second analogous result was obtained with the SSD, using a small test painting representing a volcano, which was made partly (left half) with mineral pigments and partly (right half) with organic ones, as shown in FIG. 3. Two different portions of the painting were analysed using the SSD: a vertical band in the centre in search of Zinc and a horizontal band in search of Cadmium. In the first case Zinc was found in the green region (Zinc white was used as a lightener) but also in the canvas preparation layer (see the honeycomb pattern visible also in the part painted with organic pigments). Existing commercial canvases, such as was used, have in fact already a Zinc white based preparation, as shown by its widespread presence in the map. In the second

case Cadmium was found particularly in the red of the upper part.

The SSD is able to count single photons that have traversed the painting without being absorbed, and measures in each pixel how many photons above a certain energy have been transmitted in a given time; it is usable with a rather wide range of beam intensities and it has a high detection efficiency at the energies of interest. On the other hand the CCD can collect an image in a shorter time but is less efficient at higher energies. A detailed comparison between the performances of the commercial CCD and of the dedicated SSD is made in a separate article⁴. The apparatus generating the quasi-monochromatic beam is shown in FIG. 4 and it comprises:

(a) two medical X-ray tubes delivered by Metaltronica (Rome), i.e. respectively a model XM12 with rotating anode in molybdenum and a model XM1016T with rotating anode in tungsten, both operating in the high voltage range 16-42 kV; they

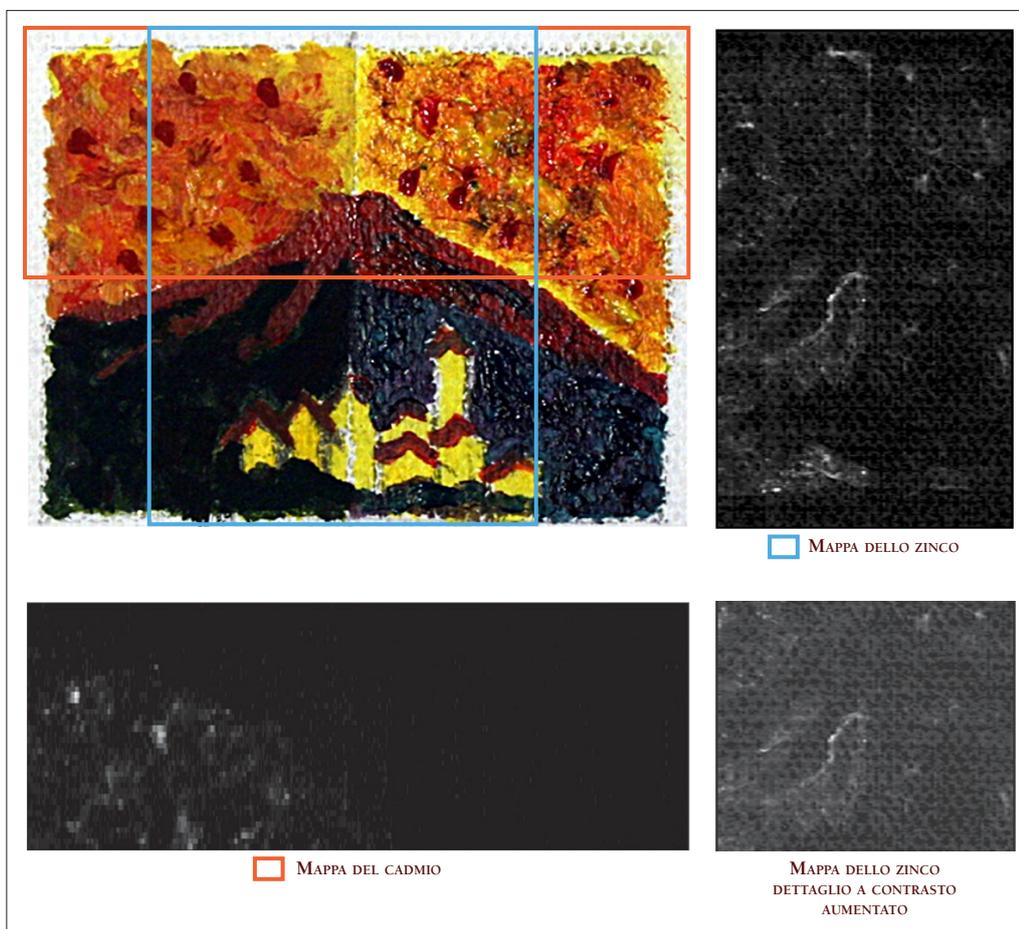


Fig. 3 Analisi di un piccolo dipinto su tela realizzato con pigmenti minerali nella metà di sinistra e pigmenti organici nella metà di destra. Sono mostrate la mappa del Cadmio relativa alla parte alta del dipinto e la mappa dello Zinco relativa alla parte centrale del dipinto.

Fig. 3 Analysis of a small painting on canvas made using mineral pigments for the left part and organic pigments for the right half. Also shown: Cadmium map relative to the upper part of the painting, Zinc map relative to the central part of the painting.

senza nella mappa. Nel secondo caso è stata rilevata la presenza di Cadmio in particolare modo nel rosso nella parte alta del dipinto. Il rivelatore SSD è in grado di rivelare i singoli fotoni che hanno attraversato il dipinto senza essere assorbiti e fornisce per ogni pixel il conteggio dei fotoni sopra una data soglia in energia; è in grado di lavorare con intensità di fascio variabili in un ampio intervallo, inoltre presenta una efficienza di rivelazione elevata a tutte le energie di interesse. Il CCD è in grado di operare con tempi di integrazione minori ma risulta meno efficiente alle

alte energie. Un confronto dettagliato tra le prestazioni del rivelatore commerciale CCD e quelle di DEDIX è riportato in un articolo dedicato⁴.

Il sistema di produzione del fascio quasi-monocromatico è illustrato nella FIG. 4 e si compone, nell'ordine, di:

(a) due sorgenti di raggi X di tipo medicale fornite dalla Metaltronica di Roma, rispettivamente XM12 con anodo rotante in molibdeno e XM1016T con anodo rotante in tungsteno, entrambe operanti nell'intervallo di tensioni 16-42 kV, pensate per ottenere

have been chosen in order to generate quasi-monochromatic beams in the whole range 6-40 keV from the *bremstrahlung* continuum alone, with no interference from characteristic emission peaks (17.48 and 19.61 keV for molybdenum, 8.40, 9.68 and 11.16 keV for tungsten). The tube is chosen according to the desired energy, therefore molybdenum is used below 15 kV and tungsten above. The tubes can be operated in two ways, i.e. fluoroscopy - with currents up to 15 mA and long emission times - and *grafia*, by which more intense emissions up to 180 mA can be obtained for shorter times. The latter is more useful for imaging applications. X-ray emission parameters can be set and monitored in real time through the controller which is common to both tubes, with an uncertainty of ± 0.1 kV on the high voltage reading and of ± 0.05 mA on the current one. Both tubes have a focal spot of 0.3 mm^2 and a cylindrical emission port of 2 cm diameter, followed by a 2 mm thick lead slit with an aperture

of $0.33 \times 8.5 \text{ mm}^2$, mounted on a precision linear slide with a manual regulation over 45 mm perpendicular to the beam. Since both tubes are designed for medical uses, the emission cone has a particular shape, optimized for irradiation of the part under examination while minimizing the dose to the whole body. The cone is cut in the direction perpendicular to the emission port and is oriented on an axis making an angle of few degrees with it. This particular shape implies a certain misalignment of the beam with respect to the system's centre of rotation, which necessitated an ad-hoc compensation at the various energies used for the characterization of the system. (b) the *mosaic crystal* in highly oriented pyrolytic graphite (HOPG), made by Optigraph Ltd. in Moscow, having dimensions $60 \times 28 \times 2 \text{ mm}^3$ and an angular dispersion of 0.28° , with an interplanar distance of 3.365 \AA .

(c) two isocentric motorized *goniometers* by Physik Instrumente in Karlsruhe (DE), positioned below

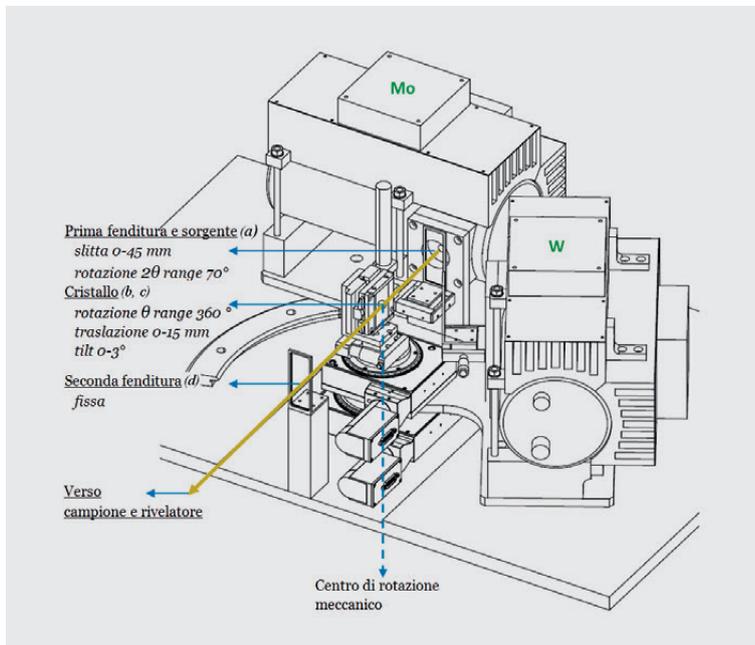


Fig. 4 Disegni meccanici del sistema di produzione del fascio quasi-monocromatico. Sono indicati i due tubi a raggi X (Mo, W) e i quattro movimenti (due rotazioni, una traslazione e una inclinazione) per la scelta dell'energia e per il centraggio del fascio.

Fig. 3 Mechanical drawing of the quasi-monochromatic beam setup, showing the two X-ray tubes (Mo, W) and the four mechanical actuators (two rotation stages, a translation stage and a tilt stage) which allow one to choose the beam energy and its centering.

fasci monocromatici nell'intera gamma 6-40 keV dal solo fondo di bremsstrahlung senza interferenze da parte dei picchi di emissione caratteristica (17.48 e 19.61 keV per il molibdeno, 8.40, 9.68 e 11.16 keV per il tungsteno). La sorgente da usare viene scelta di volta in volta sulla base dell'energia desiderata, si utilizza perciò il molibdeno quando siano di interesse energie al di sotto dei 15 keV ed il tungsteno per energie al di sopra di tale valore. Le sorgenti possono operare con due modalità, *scopia*, caratterizzata da correnti minori di 15 mA e lunghi tempi di emissione, e la più intensa *grafia*, con cui si possono eseguire emissioni di raggi X fino a 180 mA per un tempo massimo di 5 s, adatta all'utilizzo per *imaging*. I parametri di emis-

the crystal, allowing for the setting of Bragg angles in view of the beam monochromatization. The first goniometer rotates the crystal by an angle θ and is able to perform a complete rotation with a resolution of $\pm 0.024^\circ$. The second goniometer rotates both X-ray tubes by the angle 2θ making them slide on a 10 cm radius circular rail up to about 70° . Software limits have been imposed in order to restrict the rotation within the rail. This is the geometrical setup necessary to have the output beam always pointing in the same direction, irrespective of the angle θ and therefore of the energy. The 70° arc allows (given the graphite interplanar distance) for a minimum energy of about 4 keV. Above both goniometers two more precision actuators from Physik Instrumente are positioned: one for horizontal translation (0-15 mm) for the regulation of the crystal position, the other for a vertical tilt (0-3°) in order to be able to compensate for possible misalignment of the detector. All motors are operated via daisy-chained controllers on a single interface with a personal computer. (d) finally, a *second fixed slit* in lead of 2 mm thickness

sione possono essere impostati e monitorati in tempo reale tramite il controller comune alle due sorgenti, predisposto per misurare la tensione effettiva con un'incertezza di ± 0.1 kV e la corrente entro ± 0.05 mA. Le sorgenti hanno entrambe macchia focale di 0.3 mm^2 e una boccia di emissione cilindrica ampia 2 cm, seguita da una fenditura in piombo spessa 2 mm con apertura di $0.33 \times 8.5 \text{ mm}^2$, posizionata su di una slitta micrometrica regolabile manualmente entro 45 mm nella direzione trasversale al fascio. Trattandosi di sorgenti medicali per mammografia, il loro cono di emissione è disegnato in una forma particolare pensata per illuminare la parte del paziente da esaminare minimizzando l'esposizione del resto del corpo. Esso è perciò tagliato nella direzione ortogonale alla boccia di emissione ed orientato lungo un asse inclinato di alcuni gradi da essa. Tale conformazione implica un leggero disallineamento del fascio rispetto al centro meccanico di rotazione del sistema, dei cui effetti si è dovuto tenere conto nella fase di caratterizzazione energetica.

(b) il *cristallo a mosaico* in grafite pirolitica altamente orientata (HOPG), prodotto dalla Optigraph Ltd di Mosca, di dimensioni $60 \times 28 \times 2 \text{ mm}^3$ e con dispersione angolare del mosaico di 0.28° , con distanza interplanare di 3.365 \AA .

(c) due *goniometri* isocentrici motorizzati della Physik Instrumente di Karlsruhe (DE), posti al di sotto del cristallo, che permettono la regolazione degli angoli di Bragg per la monochromatizzazione. Il primo ruota il cristallo intorno al suo centro ad un angolo θ e può compiere rotazioni complete con una risoluzione di $\pm 0.024^\circ$. Il secondo, analogo, ruota

and $2 \times 52 \text{ mm}^2$ aperture, positioned on a mount at 18 cm from the rotation centre in the direction towards the artwork and the detector. All the above elements are mounted on an aluminium plate.

FIG. 5 shows a photograph of the beam generating apparatus, realized by the Technological Laboratory of INFN sezione di Torino from a design by F. Evangelisti (INFN sezione di Ferrara).

Calibration of the quasi-monochromatic beam was performed in the 'ex-Synchrotron' laboratory of INFN in Turin as part of the work towards a Master Thesis⁵ built upon the experience from a similar system in Ferrara⁶ which is documented in the Ph.D. Thesis of F. Albertin⁷. For the energies of interest (Low and High relative to K-edges of several relevant chemicals), motor settings have been optimized and resulting X-ray spectra have been collected using a Si-PIN detector from AMPTEK mounted in the position foreseen for the silicon microstrip detector. An example of the two spectra obtained for Iron's K-edge is shown in FIG. 6.

Coming to the X-ray detection system, it is com-

le sorgenti all'angolo 2θ facendole scorrere su di un binario ad arco circolare ampio circa 70° e di raggio tale che la boccia di emissione delle sorgenti si trova a circa 10 cm dal centro di rotazione. Sono stati imposti limiti software per confinare il movimento all'interno del binario. Questa impostazione geometrica consente al fascio quasi-monocromatico uscente di assumere sempre la stessa direzione, indipendentemente dall'angolo impostato. L'arco di 70° consente, con la distanza interplanare della grafite, di raggiungere energie di monocromatizzazione minime di circa 4 keV. Al di sopra dei goniometri sono posizionati altri due motori di precisione della Physik Instrumente, uno di traslazione trasversale (entro 0-15 mm) per l'eventuale regolazione della posizione del cristallo, l'altro di tilt verticale (entro 0° - 3°) per poter intervenire, in una futura configurazione finale, su eventuali difetti di inclinazione nella posizione del rivelatore. Tutti i motori sono interfacciati con un'unica catena di controller gestibile da PC.

(d) una *seconda fenditura* in piombo, fissa, di 2 mm di spessore con apertura di 2×52 mm², posizionata su di una torretta posta a 18 cm dal centro di rotazione nella direzione di uscita. Tutti questi elementi sono fissati su di un'unica piattaforma in alluminio.

La FIG. 5 mostra una fotografia della piattaforma con il sistema di produzione del fascio, realizzata dal Laboratorio Tecnologico della sezione di Torino dell'INFN su progetto di F. Evangelisti (sezione di Ferrara dell'INFN).

La taratura del fascio quasi-monocromatico è stata effettuata nel laboratorio ex-Sincrotrone dell'INFN di Torino nell'ambito di una tesi di Laurea Magistrale⁵ sulla base dell'esperienza



Fig. 5 Fotografia del sistema di produzione del fascio quasi-monocromatico.

Fig. 5 Photograph of the quasi-monochromatic beam setup.

precedente sull'analogo sistema di Ferrara⁶ a sua volta raccolta nella tesi di Dottorato di F. Albertin⁷. Per le energie di interesse (*Low* e *High* relative ai K-edge di varie specie chimiche di rilevanza pittorica), sono state ottimizzate le posizioni dei motori e sono stati registrati gli spettri ottenuti grazie ad un rivelatore Si-PIN della AMPTEK installato nella posizione prevista per il rivelatore a microstrip. Un esempio dei due spettri ottenuti per il K-edge del Ferro è mostrato in FIG. 6.

Il sistema di rivelazione dei raggi X comprende il rivelatore SSD sostenuto da una struttura di supporto regolabile posta a circa 30 cm dalla seconda fenditura del sistema di produzione del fascio: lo spazio tra la seconda fenditura e il rivelatore è disponibile per inserire il quadro sotto esame. La struttura di supporto è costituita da un carrello elevatore manuale (della ditta Physik Instrumente) per aggiustare la posizione verticale del SSD sul centro del fascio e due motori controllati da PC (anch'essi della ditta Physik Instrumente),

posed of the SSD detector itself mounted on a *detector support structure*, placed at about 30 cm from the exit slit of the beam generation system: the space between the exit slit and the detector is available for insertion of the painting under examination. The support structure includes a manual *elevation stage* (delivered by Physik Instrumente) needed to adjust the vertical position of the SSD at the beam height and two remotely controlled motors (again delivered by Physik Instrumente), respectively for horizontal translation and tilt of the SSD. The latter motors will be used to optimize the position of the detector with respect to the beam at each energy.

Finally, the mechanical scanning system has been designed and its components are being procured. Very briefly, it is based on a rail fixed to the floor of the radiography room at the Centre; on this rail a chariot is mounted, holding on one side the plate with the beam producing system and on the other side the detector platform. The chariot is endowed with a vertical movement (synchronized for beam and detector) in order to reach the area of interest of

the painting, as well as with a fine horizontal movement in order to perform the scanning.

The software includes an *online* control and data acquisition program written in LabVIEW and some *offline* programs (mostly written in C/C++) for various calibration procedures, in particular those for the SSD. In the following only the *online* program will be described.

The control and data acquisition program is divided into three main modules: (i) X-ray sources control, (ii) handling and data acquisition of the Silicon Strip Detector, (iii) mechanical scanning control. Module (ii) has been in use for quite some time and allows (among other functions) one to set the energy threshold for each pixel (in order to have it as uniform as possible for any given K-edge) and the data acquisition time, as well as to perform the acquisition "row by row" of the Low Energy image (then of the High Energy one); at the end of a mechanical scanning, this module returns both images High and Low and combines them in the map for the chemical element under investigation.

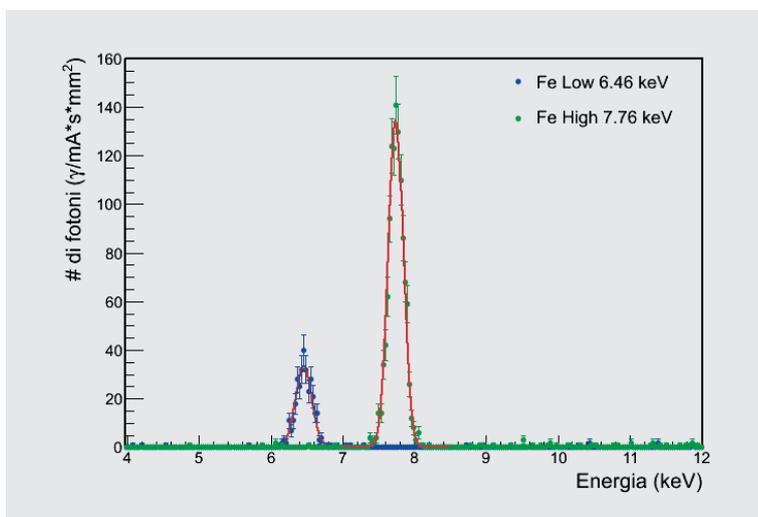


Fig. 6 Spettri di raggi X ottenuti con il tubo al Mo impostato su 40 kV e angoli impostati rispettivamente per la bassa e alta energia al K-edge del Ferro (esposizione di 400 ms).

Fig. 6 Example of X-ray fluxes obtained with the Mo tube set at 40 kV, angles for Fe K-edge low- and high-energy, 400 ms exposure.

rispettivamente per la traslazione orizzontale e il tilt del rivelatore SSD. Questi ultimi sono utilizzati per ottimizzare la posizione del rivelatore sul fascio a ciascuna energia.

Infine, il sistema di scansione meccanica è stato progettato e i componenti sono in corso di acquisizione. Nel progetto, esso si basa su una rotaia fissata al pavimento del locale radioprotetto del CCR, sulla quale scorre un carrello che supporta la piattaforma delle sorgenti da una parte e la piattaforma del rivelatore dall'altra. Il carrello è dotato di un movimento verticale per raggiungere la zona di interesse del quadro e di un movimento fine orizzontale per eseguire la scansione.

Il software comprende un programma *online* di acquisizione e controllo in ambiente LabVIEW e alcuni programmi *offline* (generalmente scritti in ambiente C/C++) per le procedure di calibrazione, in particolare per il rivelatore SSD. Nel seguito è descritto il solo programma di acquisizione e controllo.

Il software è costituito da tre moduli principali: (i) il controllo delle sorgenti, (ii) la gestione del rivelatore SSD, (iii) il controllo della scansione. Il modulo (ii) esiste da tempo e consente di impostare la soglia di rivelazione per ciascun pixel (in modo che la misura sia uniforme in termini di sensibilità di energia) e la durata dell'acquisizione, nonché di effettuare l'acquisizione "riga per riga" dell'immagine Low (in seguito High); completata

Modules (i) and (iii) are still in the development phase. Module (i) is based on a communication protocol (recently delivered by Metaltronica) between a PC serial port and the X-ray sources' controller, by exchange of text messages; at present it has been verified that all the functions available through the controller's console can also be activated via message exchange on the serial line. Module (iii) is rather simple and actually exists as a prototype controlling all motors delivered from PI; the final version will also send synchronization messages to modules (i) and (ii) during mechanical scanning.

Since the three modules need to establish a communication in order to correctly perform the ini-

la scansione, il programma restituisce le due immagini High e Low e le combina per ottenere la mappa dell'elemento allo studio.

I moduli (i) e (iii) sono ancora in fase di sviluppo. Il modulo (i) si basa su un protocollo di comunicazione (fornito dalla Metaltronica) tra la porta seriale di un PC e il controller delle sorgenti, con scambio di messaggi di testo; allo stato attuale è stato verificato che tutte le funzioni disponibili manualmente sulla console siano anche attivabili mediante lo scambio di messaggi sulla linea seriale.

Il modulo (iii) è relativamente semplice e di esso esiste un prototipo in grado di gestire i motori della ditta Physik Instrumente; la versione finale dovrà inviare messaggi di sincronizzazione ai moduli (i) e (ii) durante la scansione meccanica. Poiché i moduli devono comunicare tra di loro per eseguire correttamente le impostazioni iniziali (energia del fascio, posizione del rivelatore, soglia dei pixel) e la sequenza di scansione meccanica, essi verranno eseguiti su un unico PC posto nelle vicinanze del rivelatore. Per il controllo remoto da parte dell'operatore si utilizzerà una estensione KVM (*Keyboard-Video-Mouse*).

¹ P. BALDELLI ET AL., *Application of the K-edge X-ray technique to map pigments of art paintings: Preliminary results*, in «Il Nuovo cimento», 29 C (6), 2006, pp. 663-672.

² C. AVILA ET AL., *Contrast cancellation technique applied to digital x-ray imaging using silicon strip detectors*, in «Medical Physics», 32 (12), 2005, pp. 3755-3766.

³ L. BOLANOS ET AL., *A Digital X-ray Imaging System based on Silicon Strip Detectors working in Edge-on Configuration*, in «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research», A 608, 2009, pp. 410-416.

⁴ F. ALBERTIN, *K-edge radiography: Comparison of two detectors*, in «Il Nuovo Cimento», vol. 34 C, N. 5, 2011, pp. 227-235.

⁵ F. DEL GRECO, *Sviluppo e caratterizzazione di sistemi a raggi X per l'analisi 2D e 3D di oggetti di interesse artistico e tecnologico*, Tesi di laurea magistrale, Università di Torino, Facoltà di Scienze M.F.N., a.a. 2011-2012, relatore A. LO GIUDICE.

⁶ F. ALBERTIN ET AL., *A quasi-monochromatic X-rays source for art painting pigments investigation*, in «Applied Physics», A 96, 2009, pp. 503-510.

⁷ F. ALBERTIN, *K-edge Radiography and applications to Cultural Heritage*, Tesi di dottorato, Università degli Studi di Ferrara, Dipartimento di Fisica, 2011, relatori M. GAMBACCINI e F. PETRUCCI.

tial settings (beam energy, detector position, pixels' thresholds) and most importantly the mechanical scanning sequence, they will run on the same PC located near the detector. Remote control by the operator will be enabled through a KVM (*Keyboard-Video-Mouse*) extension.

Radiografie e tomografie neutroniche

Neutron Radiography and Tomography

Lorenzo Visca, Thomas Bücherl, Giorgio Cotto, Marco Demmelbauer, Elisabetta Durisi, Walter Ferrarese, Francesco Grazzi, Alessandro Lo Giudice, Giorgia Mila, Alessandro Re, Roberto Sacchi, Antonella Scherillo

Introduzione

La radiografia e la tomografia a raggi X sono tecniche di indagine non distruttiva che trovano numerose applicazioni in vari ambiti tra i quali, come ampiamente illustrato nei capitoli precedenti, l'analisi della composizione, della struttura interna e dello stato di conservazione dei manufatti artistici. La disponibilità sul mercato di numerosi tipi di sorgenti e rivelatori per raggi X, con caratteristiche diversificate a seconda dell'impiego previsto, ha reso possibile la realizzazione degli apparati radio-tomografico e per l'analisi con la tecnica del K-edge descritti nei capitoli precedenti.

In anni recenti si è sviluppato un interesse crescente per le radiografie e tomografie effettuate utilizzando fasci di neutroni, specialmente nel campo delle applicazioni industriali. I neutroni interagiscono con la materia in modo profondamente diverso rispetto ai raggi X e, mentre possono facil-

mente attraversare spessi strati di metallo, subiscono un'elevata attenuazione quando incontrano elementi leggeri quali i composti organici (legno, pelle, ossa) e più in generale elementi contenenti idrogeno, boro o litio. I neutroni forniscono quindi informazioni complementari a quelle ottenibili con l'utilizzo dei raggi X e sono particolarmente indicati per l'analisi di spessi oggetti metallici o di elementi leggeri racchiusi in involucri metallici, che risulterebbero opachi ai raggi X.

Di contro, l'utilizzo di neutroni presenta diverse limitazioni che giustificano la sua scarsa diffusione, se paragonato all'uso dei raggi X. Innanzitutto, fasci di neutroni sufficientemente intensi e collimati per applicazioni radiografiche sono disponibili allo stato attuale in un numero esiguo di laboratori: presso reattori nucleari destinati alla ricerca o presso sorgenti di spallazione, ove si utilizzano potenti acceleratori di particelle dedicati. Inoltre le risoluzioni delle immagini ot-

Introduction

X-ray radiography and tomography are non-destructive techniques widely applied in several fields among which, as described in the previous chapters, the analysis of the composition, the inner structure and the state of conservation of artistic artefacts. The commercial availability of X-ray sources and detectors with features tailored for specific applications has been crucial for the design of the radio-tomographic and K-edge systems described in the previous chapters.

In recent years the interest for radiographies and tomographies using neutron beams has been constantly growing, particularly for the industrial applications. The interaction of neutrons with the matter constituents is very different from the interaction of X-rays; a neutron beam can easily cross thick layers of metal but is strongly attenuated when crossing light elements as the organic compounds (wood, leather, bones) or more generally all the compounds containing hydrogen, boron or lithium. Neutrons thus provide information complementary to those obtained with X-rays and are particularly suited for

investigating thick metal artefacts or objects enclosed in a metallic shell, which would result opaque to X-rays.

Unfortunately, the use of neutrons offers several limitations which explains their limited use compared to X-ray. First of all, collimated neutron beams with an intensity large enough for radiographic applications are currently available only in a small number of laboratories as the research nuclear reactors or the neutron spallation sources, where dedicated powerful particle accelerators are used. In addition, the resolution of the neutron images are generally worse than those obtained with X-rays. Finally, the irradiation with a high intensity neutron beam for an extended time may induce in the irradiated samples, especially for those containing particular chemical elements, levels of activity beyond the limits set by safety regulations, which would imply storing the object after the analysis in shielded housings for week or even months before handling again.

The importance of neutrons in archaeology and in cultural heritage is assessed by now; some techniques like the NAA (Neutron Activation Analysis)

tenute sono generalmente inferiori a quelle ottenibili con i raggi X. Infine il bombardamento con fasci di neutroni di alta intensità per un tempo prolungato può, in presenza di alcuni elementi chimici, indurre livelli di radioattività nei campioni analizzati al di sopra dei limiti di legge che impongono la loro custodia in appositi contenitori schermati per settimane o mesi prima di poter essere nuovamente maneggiati.

L'importanza dei neutroni nello studio di beni culturali ed archeologici è ormai nota; alcune tecniche come per esempio l'NAA (Analisi da Attivazione Neutronica) vengono utilizzate in questo ambito sin dagli anni cinquanta del secolo scorso¹, mentre le radiografie con neutroni trovano le loro prime applicazioni già negli anni settanta². Tuttavia è solo lo sviluppo di nuove metodologie, rivelatori e apparati strumentali che ha permesso in tempi recenti di ottenere risultati sempre più interessanti, come le tomografie neutroniche, o alla portata di piccoli reattori. Prova della maturità delle metodologie e dell'interesse in questo ambito è la prima conferenza internazionale promossa dall'IAEA sull'argomento³. Nell'ambito del progetto regionale neu_ART si è proposto di valutare le potenzialità derivanti dall'applicazione delle tecniche radiografiche e tomografiche con neutroni agli oggetti d'arte, con particolare riferimento ai manufatti in metallo, attraverso alcune campagne di misura presso due laboratori stranieri, il laboratorio NECTAR presso il reattore di ricerca FRMII dell'Università Tecnica di Monaco, Germania, e il laboratorio INES presso la sorgente di spallazione ISIS dei la-

boratori Rutherford Appleton, Regno Unito. Entrambe le facilities dispongono di un fascio di neutroni sufficientemente intenso e collimato per applicazioni radiografiche, di opportuni manipolatori per posizionare il campione da esaminare, di un sistema di rivelazione dei neutroni e di un sistema digitale di acquisizione dati. La principale differenza risiede negli intervalli di energia dei neutroni che compongono i due fasci; mentre i neutroni del fascio di INES sono neutroni lenti di bassa energia, chiamati neutroni termici e epitermici, a NECTAR i neutroni hanno energia molto più elevata e maggiore capacità di penetrazione (neutroni veloci⁴).

Gli obiettivi delle misure sono molteplici:

- valutare alcune caratteristiche delle immagini acquisite quali linearità, risoluzione spaziale e range dinamico e la loro dipendenza dal sistema di rivelazione dei neutroni;
- valutare la qualità delle ricostruzioni tomografiche;
- studiare l'attenuazione di intensità del fascio in funzione dello spessore di metallo attraversato per vari tipi di metalli (bronzo, ottone, acciaio, alluminio) e altri composti più leggeri (PET), e confrontare le caratteristiche di penetrazione ottenute con neutroni termici e veloci;
- eseguire radiografie e tomografie di alcuni oggetti artistici quali casi studio per valutare le informazioni ottenibili tramite queste tecniche.

Nel seguito del capitolo, dopo una breve descrizione dei principi fisici alla base delle tecniche di analisi, verranno presentati i risultati ottenuti.

were first applied in this field in the fifties¹, whereas the neutron radiographies were first performed in the seventies². However, the recent development of new methods, detectors and instruments has allowed researchers to obtain more and more interesting results, as the tomographies with neutrons, within reach of smaller reactors. As a proof of the level of development and interest we mention here the first international conference organized by IAEA on these topics³.

The aim of the this workpackage of the neu_ART project has been to determine the imaging potentials of neutron radiographies and tomographies of artistic objects, in particular metallic artefacts, through several measurements performed in two foreign laboratories, the NECTAR facility at the FRMII nuclear reactor of the Technical University of Munich, Germany, and the INES facility of the ISIS spallation source of the Rutherford Appleton Laboratories in the UK. Both facilities feature a high intensity and well collimated neutron beam, well suited for radiographic applications, a set of manipulators to position with high precision the sample to be investigated and a neutron detection system read out through a digital data acquisition. The main difference between the

two facilities is the different neutron energy range of the corresponding beams; the INES beam is made of low energy slow neutrons, called thermal and epithermal, while at NECTAR the neutrons have a much larger energy and penetration depth (fast neutrons⁴). The goals of the measurements were:

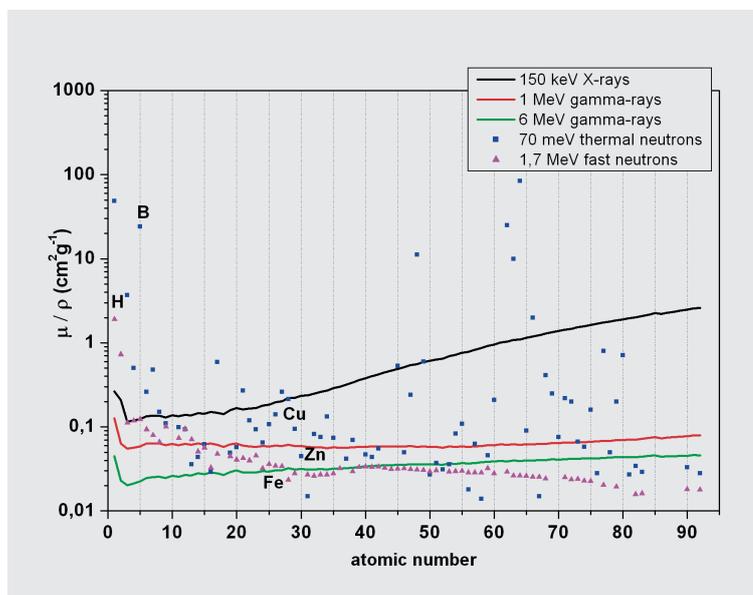
- the evaluation of the performance of the imaging system in terms of linearity, spatial resolution and dynamic range, together with the dependence of these quantities on the neutron detection system;
- the evaluation of the quality of the neutron tomographic reconstructions;
- the study of the attenuation of the beam intensity as a function of the target thickness for different metals (bronze, brass, lead, aluminum) and for lighter compounds (PET) and the comparison of the neutron penetration capabilities with thermal and fast neutrons;
- the analysis and the interpretation of radiographies and tomographies of few artistic objects in order to assess the information which can be obtained with these techniques.

In the following part of this chapter a brief introduction on the physics basic principles will be presented, followed by a review of the main results.

Principi base dell'imaging con neutroni

La radiografia e la tomografia neutronica si basano sul medesimo principio, ampiamente discusso nel contributo sull'apparato radiotomografico, sul quale si basano le radiografie e le tomografie convenzionali a raggi X, ovvero l'assorbimento differenziato di un fascio di neutroni in funzione dello spessore e della composizione del materiale attraversato. Con un opportuno sistema di rivelazione di neutroni, posto perpendicolarmente al fascio e in grado di misurare la distribuzione di intensità trasmessa attraverso l'oggetto, è possibile ottenere una proiezione in due dimensioni, chiamata immagine radiografica, della struttura interna dell'oggetto in esame. La tomografia rappresenta invece una tecnica che, combinando opportunamente molte radiografie del medesimo oggetto per diversi angoli di incidenza, permette la ricostruzione tridimensionale⁵.

La principale differenza tra l'utilizzo di raggi X e di neutroni risiede nel diverso tipo di interazione con la materia. Infatti, mentre i fotoni che compongono i raggi X interagiscono principalmente con gli elettroni degli atomi del materiale attraversato, i neutroni interagiscono direttamente con i nuclei atomici, dando luogo ad una dipendenza dell'attenuazione dal numero atomico Z dell'elemento attraversato completamente differente rispetto ai raggi X, come mostrato in FIG. 1. Si osserva infatti che mentre il coefficiente di attenuazione dei raggi X cresce al crescere di Z , per i neutroni lenti (in figura neutroni termici di 70 meV) non esiste alcuna regolarità e alcuni elementi leggeri quali



idrogeno(H), litio (Li) e boro (B) o pesanti quali il gadolinio (Gd) e cadmio (Cd) hanno coefficienti di assorbimento diversi ordini di grandezza maggiori rispetto a elementi quali alluminio (Al), ferro (Fe) e piombo (Pb), che risultano quasi trasparenti al passaggio di neutroni. Al contrario, il coefficiente di assorbimento dei neutroni veloci (in figura, neutroni di fissione di 1.7 MeV) mostra una dipendenza opposta rispetto ai raggi X, diminuendo al crescere di Z . In entrambi i casi i neutroni subiscono maggiore attenuazione dagli elementi leggeri, trasparenti ai raggi X, rispetto ai metalli, che risultano invece opachi ai raggi X; le due tecniche forniscono quindi informazioni complementari.

La possibilità di discriminare tra i diversi

Fig. 1 Coefficiente di attenuazione di massa in funzione del numero atomico dell'elemento attraversato per neutroni termici, neutroni veloci e raggi X di 150 keV.

Fig. 1 Mass attenuation coefficient as a function of the atomic number of the element crossed by thermal neutrons, fast neutrons and X-rays of 150 keV energy.

Basis of neutron imaging

The principles of neutron and X-ray radiography and tomography are the same except for the different sources of radiation and different mechanism of interaction of the radiation with matter. As discussed in chapter on the radio-tomographic system, different thickness and material composition results in different absorption of the neutron beam through the specimen. Using a neutron detector, positioned perpendicularly to the beam behind the sample, the spatially varying neutron transmission through the object is mapped into a bi-dimensional projection image, called plane radiography, showing the inner structure of the object under investigation. For tomographic neutron imaging, the sample is rotated by 180° in small angular steps and one radiography is performed at each step. A tridimensional representation of the sample can then be mathematically reconstructed by combining all the acquired projections⁵.

The main difference between X-ray radiography and neutron radiography originates from the different interaction mechanism of the radiation with matter. X-rays interact with the electrons in the atomic shells whereas neutrons directly interact

with the nucleus resulting in a completely different dependency of beam intensity attenuation as a function of the atomic number of the specimen, as depicted in FIG. 1. The X-ray attenuation increases with the atomic number Z of the target whereas the attenuation of thermal neutrons (70 meV neutrons in FIG. 1) do not show any correlation with Z . It can be observed that both low Z element (H, Li, and B) and high Z elements (Gd, Cd) have attenuation coefficient few orders of magnitude larger than other elements like aluminum (Al), iron (Fe) and lead (Pb) the latter resulting transparent to neutron radiation. The absorption coefficient of fast neutrons (1.7 MeV fission neutrons in FIG. 1), in contrast to what happen for X-rays, decrease as a function of the atomic number. Both thermal and fast neutron are better absorbed by low Z elements, transparent to X-rays, than from high Z elements, opaque to X-rays. Therefore X-ray imaging and neutron imaging provide complementary information about the composition of the sample.

Thermal neutrons are the most frequent choice for neutron radiography because of the high discriminating potential for differentiating chemical elements. However fast neutrons allow to investigate

elementi chimici rende l'utilizzo di neutroni termici di gran lunga il più diffuso nelle radiografie neutroniche. I neutroni veloci offrono tuttavia una maggiore profondità di penetrazione nei materiali (minore coefficiente di attenuazione) al prezzo di una ridotta capacità di discriminazione.

Sorgenti di neutroni

La fissione nucleare e la spallazione sono i principali processi nucleari in grado di produrre neutroni liberi. La fissione nucleare dell'uranio-235, comunemente utilizzata nei reattori nucleari, è indotta dalla collisione di un neutrone termico con il nucleo atomico di uranio. Il nucleo si divide in due nuclei radioattivi più leggeri liberando 2-3 neutroni, maggior parte dei quali con energia intorno a 2 MeV⁶, e una consistente quantità di energia, circa 200 MeV, sia sotto forma di energia cinetica di altri prodotti di decadimento sia sotto forma di fotoni. Nei reattori nucleari per ricerca, ottimizzati per la produzione di neutroni, uno dei neutroni prodotti dalla fissione è necessario per sostenere la reazione a catena di fissione e uno è disponibile per essere utilizzato esternamente al reattore.

La spallazione è invece indotta dal bombardamento con protoni di alta energia, maggiore di qualche centinaio di MeV, di un bersaglio metallico pesante. L'interazione diretta del protone con i nucleoni (protoni e neutroni) del nucleo bersaglio provoca la loro espulsione dal nucleo con un'energia che può raggiungere quella del protone in-

cidente, e lascia il nucleo bersaglio in uno stato eccitato cui segue un'ulteriore emissione di protoni e neutroni di energia inferiore, dell'ordine di qualche MeV; in totale la reazione può liberare fino a una ventina di neutroni per protone incidente. Una sorgente per spallazione necessita quindi di un potente acceleratore di protoni e offre diversi vantaggi rispetto a un reattore quali la possibilità di spegnere la sorgente, l'assenza di scorie radioattive e il completo controllo della reazione di spallazione operando sull'acceleratore.

Entrambe le reazioni descritte producono neutroni veloci. Per ottenere neutroni termici è necessario un moderatore, ovvero un mezzo che assorba l'energia dei neutroni attraverso le collisioni con i nuclei degli atomi che lo compongono. Materiali moderatori utilizzati sono l'acqua, l'acqua pesante, la paraffina e il polietilene. Nei reattori nucleari il moderatore è spesso lo stesso liquido usato per il raffreddamento.

Apparato sperimentale

L'apparato sperimentale per radiografie e tomografie neutroniche è schematicamente rappresentato in FIG. 2 ed è composto da un sistema per collimare il fascio, un sistema meccanico per traslare e ruotare l'oggetto da studiare ed un sistema di rivelazione, composto da uno schermo scintillante, uno specchio e una telecamera munita di sistema ottico.

La funzione del collimatore è quella di assorbire i neutroni del fascio con traiettorie

large thicknesses of bulk material at the price of a reduced capacity to discriminate between elements.

Neutron sources

Nuclear fission and spallation are the two most important nuclear processes producing free neutrons. Nuclear fission of uranium-235, commonly used in nuclear reactor, is induced by the collision of thermal neutrons with a nucleus of this isotope. The products of each fission are two lighter radioactive nuclei and 2 or 3 free neutrons. The neutrons have an average kinetic energy of about 2 MeV⁶ each and a total amount of about 200 MeV of energy is released from the fission reaction in the form of kinetic energy of the other products of the reaction and photons. In nuclear research reactors, optimized for neutron production, one of the emitted free neutrons is used to sustain the fission reaction and on average one can be extracted from the reactor core to be available for research purposes.

Nuclear spallation is induced by directing a highly energetic beam of protons of several hundred MeV onto a metallic target. The charged particles collide with individual nucleons (i.e. neutrons or protons) of the target nucleus which are then ejected with energy which can reach the incoming proton energy. This process leaves a highly excited residual

nucleus in the target which de-excites by releasing further neutrons or protons with an energy of few MeV each. The whole process, known as spallation reaction, may release up to 10-15 neutrons per incoming charged particle. A spallation neutron source requires a powerful proton accelerator facility. The advantages of using a spallation source rather than a nuclear fission reactor are mostly related to safety concerns: it is possible to turn off instantly the neutron production, no fissile material is needed, no chain reaction need be controlled and less radioactive waste results.

Fast neutrons are generated in both fission reactor and spallation sources. Thermal neutrons are obtained by interaction of the fast neutrons with a moderating medium where the neutron energy is transferred through collisions to the nuclei of the moderator. The best moderators for fast neutrons are composed by the light compounds, most common materials being water, heavy water (D₂O), paraffin and polyethylene. In a nuclear reactor the refrigerator liquid can also play the role of the moderator.

Experimental set-up

The principle of a neutron radiography and tomography facility is sketched in FIG. 2. Neutrons are

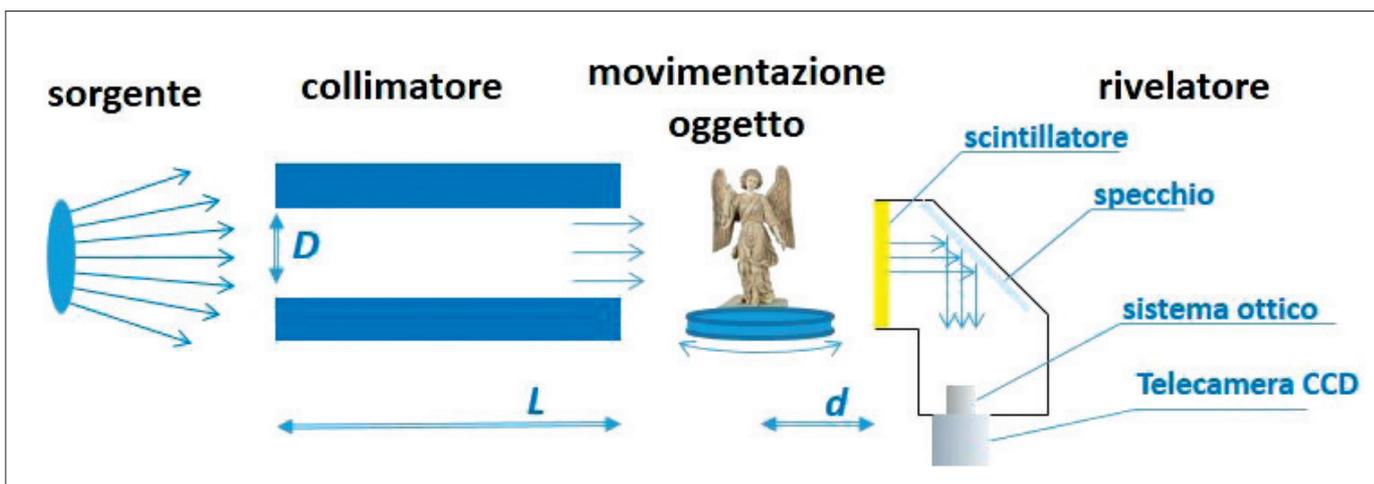
divergenti in modo che i neutroni incidano sul campione seguendo traiettorie il più possibile parallele, condizione necessaria per ottenere immagini radiografiche di qualità. Il rapporto L/D tra la lunghezza L e il diametro D del collimatore è un importante parametro che definisce il grado di collimazione del fascio. Maggiore è il valore di L/D , migliore sarà la definizione e la nitidezza delle immagini ottenute⁷, al prezzo di una minore intensità di fascio utilizzabile. Il valore è quindi un compromesso tra due opposte esigenze, la risoluzione spaziale che richiede un fascio collimato e il contrasto che richiede un fascio intenso.

Al fine di rivelare i neutroni si utilizza uno schermo convertitore, chiamato scintillatore, che riemette parte dell'energia trasferita dai neutroni incidenti sotto forma di luce. Il

fascio trasmesso dà quindi luogo ad un pattern luminoso sullo schermo che viene registrato per mezzo di una telecamera a CCD attraverso uno specchio, necessario per porre la telecamera in posizione riparata dall'irraggiamento diretto del fascio. Il sistema ottico abbinato alla telecamera è adattato alla dimensione del campo immagine, che può variare considerevolmente a seconda dell'applicazione. Ciascun pixel del sensore CCD può essere assimilato ad un rivelatore di neutroni indipendente che registra la luce emessa da una piccola porzione dell'area dello schermo. Il segnale di tutti i pixel viene integrato per tempi abbastanza lunghi da fornire un'immagine con una buona statistica, digitalizzato con un numero definito di bit, e trasferito al PC di acquisizione. Per rappresentare l'immagine acquisita, il livel-

Fig. 2 Schema dell'apparato per radiografie e tomografie con neutroni.

Fig. 2 Layout of the neutron radiography and tomography setup.



guided from the radiation source through a collimator to the object positioned on a manipulator system allowing handling and rotating the sample. A neutron detection system, composed by a scintillation converter screen, a mirror and a CCD camera coupled to optical lenses, is positioned behind the sample and measures the transmitted beam. High quality radiographies requires the path of the radiation particles being as parallel as possible. Collimation is used to remove neutrons from the beam that are not traveling in nearly parallel paths. A parameter useful to characterize the effectiveness of the beam collimation is the L/D ratio (L =collimator length, D =collimator diameter). The higher the L/D ratio, the better will be in terms of definition or sharpness of the image⁷ and the lower will be the number of neutrons reaching the object. The choice of the L/D value will be a compromise between the desired image resolution and the need of producing high contrast images that require a high neutron flux.

Neutrons, for radiographic applications, are usually detected with a scintillation converter screen. Scintillators convert the energy transferred from incoming neutron radiation into another physical quantity, e.g. light. A CCD camera digitally records the light pattern emerging from the screen and

reflected by a mirror such that the camera can be positioned out of the beam to prevent radiation damage. Optical lenses fitted to the camera capture variably sized fields-of-view depending from application requirements. Each CCD detector element (pixel) records independently the light emitted by an area element of the converter screen. After each pixel has cumulated enough signal to create a statistically significant image, the data are digitized, read out and stored in the acquisition PC. To map the spatially varying neutron transmission through the object into a plane radiography, the digital signal is interpreted as a gray level, the final projection thus resulting in a black and white image.

The purpose of the converter screen is to emit a light signal when crossed by a neutrons, the light intensity being proportional to the neutron intensity crossing the area. The screen is composed by a scintillating material embedded into a stable matrix in such a way to achieve good optical and mechanical properties and to optimize the radiation detection. Since neutrons are very difficult to detect by direct interaction with matter, scintillation is the result of the interaction of secondary radiation produced by neutron absorption in the converter matrix. The main features of a scintillation converter screen are: high conversion efficiency of

lo del segnale è trasformato in una tonalità o livello di grigio e l'immagine radiografica risulta quindi in bianco e nero.

Lo schermo scintillatore è formato da un materiale sensibile inserito in una matrice stabile che gli conferisce adeguate proprietà ottiche e meccaniche e ne ottimizza il meccanismo di rivelazione. La luce prodotta non è il risultato diretto dell'interazione neutrone-materiale scintillante, bensì il frutto di una complessa catena di interazioni tra neutrone e matrice che dà luogo a secondari carichi che interagiscono a loro volta con il materiale scintillante. Gli scintillatori hanno diverse caratteristiche vantaggiose per il loro impiego in radiografia: sono caratterizzati da un'alta efficienza di conversione dell'energia rilasciata dai secondari carichi in luce (alta resa di luminescenza), da una buona linearità di risposta (l'intensità della luce emessa risulta proporzionale all'energia depositata), da una risposta rapida e da una buona qualità ottica che consente di realizzare scintillatori di dimensioni accettabili.

Risultati del progetto neu_ART

Nell'ambito del progetto regionale neu_ART sono state svolte diverse campagne di mi-

radiation into light (high luminescence sensitivity), direct proportionality between the energy deposited from the secondary radiation into the matrix and the light intensity emitted (good linearity), prompt reaction upon neutron absorption (fast response), good optical quality and uniformity allowing to manufacture large converter screens.

Results of the neu_ART project

In the context of the neu_ART regional project, different data taking have been set up in the two facilities, INES and NECTAR, where a neutron radiography setup was available. These measurements have been performed with the purpose of verifying the radiographic and tomographic potential on metal artifacts of the two facilities, to evaluate benefits and limits of different scintillator-camera combinations and to achieve some radiographic images and tomographic reconstructions of works of art. In the following, after the description of both apparatus, the main results will be presented.

The INES and NECTAR facilities

INES, the Italian Neutron Experimental Station⁸, is an apparatus designed by the Italian Centro Nazionale delle Ricerche (CNR) for material investigations through diffraction measurements with thermal and epithermal neutrons at the ISIS neutron source of the Rutherford Appleton Laboratories (UK). At ISIS neutrons are produced by spallation through the collision of a pulsed neutron beam, accelerated up to 800 MeV, on a tungsten target. The neutrons are slowed down in the energy range 7.8 meV - 5 eV by

sure presso due laboratori stranieri che dispongono di un apparato per le radiografie neutroniche, INES e NECTAR. L'obiettivo delle misure è stato quello di caratterizzare le prestazioni dei due diversi apparati in relazione all'impiego per radiografie e tomografie di manufatti artistici in metallo, di valutare i benefici e i limiti ottenuti variando le caratteristiche dello scintillatore e della telecamera utilizzati e di ottenere immagini radiografiche e ricostruzioni tomografiche di alcuni oggetti artistici. Nel seguito, dopo la descrizione degli apparati utilizzati, seguirà una rassegna dei principali risultati ottenuti.

Le facilities INES e NECTAR

INES, l'acronimo di Italian Neutron Experimental Station⁸, è un apparato realizzato dal CNR per l'analisi di materiali tramite misure di diffrazione di neutroni termici e epitermici ed è situato presso la sorgente di neutroni pulsata ISIS dei laboratori Rutherford Appleton (UK). Ad ISIS i neutroni sono prodotti per spallazione attraverso la collisione di un fascio pulsato di protoni, accelerato a 800 MeV, con un bersaglio in tungsteno e successivamente rallentati fino ad energie comprese nell'intervallo 7.8 meV - 5 eV grazie a un moderatore composto da acqua a temperatura ambiente. La sezione

the usage of a water moderator operating at room temperature. The cross section of the INES beam, at the sample position, is a square of about 4x4 cm² size with a uniform intensity of 1.1x10⁷ neutrons/cm²-s and an L/D ratio around 100. The INES facility features a mechanical instrumentation, used to translate and rotate the test object and a detector, positioned at a distance between 1 and 10 cm from the object, composed by a scintillator described in the following section and a CCD camera. The latter (The Imaging Source DMK21BF04) is a low price commercial product because the radiation damage imposes frequent replacements. It is segmented in 640x480 pixels, each of them corresponding to a region of about 100x100 μm² of the image field, and works at room temperature. Signals from each pixel are digitalized with 8 bit, corresponding to 2⁸=256 grey levels (nominal dynamic range); the maximum integration time is 30 s. To evaluate possible limits of this camera, a second CCD camera with a larger nominal dynamic range (12 bit) and with the possibility to set wider time intervals for the signal acquisition (Allied Vision Technology Manta G-032B) has been used.

NECTAR, the Neutron Computerized Tomography And Radiography facility, has been designed specifically for radiography and tomography with fast neutrons at the FRMII research reactor of the Technical University of Munich (Germany). Fast neutrons are produced by fission on two uranium enriched converters positioned at 1 m distance from the reactor core, inside the moderator tank and are carefully collimated to reach an L/D ratio about

del fascio di INES, in corrispondenza del campione, è un quadrato di circa $4 \times 4 \text{ cm}^2$ con un'intensità uniforme di circa 1.1×10^7 neutroni/cm²s e un rapporto $L/D \approx 100$. L'apparato dispone di un manipolatore per traslare e ruotare l'oggetto da analizzare e di un rivelatore, posto a distanze comprese tra 1 e 10 cm dall'oggetto, composto da uno scintillatore, descritto nel paragrafo che segue, e da una telecamera CCD. Quest'ultima (The Imaging Source DMK21BF04), un prodotto commerciale a basso costo a causa della frequente sostituzione per il danneggiamento da radiazione, è segmentata in 640×480 pixel, ciascuno corrispondente a una porzione di circa $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ del campo immagine, ed è progettata per lavorare a temperatura ambiente. Il segnale di ogni pixel è digitalizzato con 8 bit che consentono di codificare fino a $2^8 = 256$ livelli di grigio (range dinamico nominale); il massimo tempo di integrazione è di 30 s. Al fine di determinare i limiti imposti della telecamera utilizzata ad INES, una seconda telecamera CCD con un range dinamico nominale superiore (12 bit) e la possibilità di integrare il segnale per tempi più lunghi (Allied Vision Technology Manta G-032B) è stata anche utilizzata per confronto. NECTAR, acronimo di Neutron Compu-

terized Tomography And Radiography, è un apparato disegnato espressamente per radiografie e tomografie neutroniche con neutroni veloci presso il reattore di ricerca FRMII dell'Università Tecnica di Monaco in Germania. I neutroni veloci sono prodotti per fissione grazie a due convertitori in uranio arricchito posti a 1 m di distanza dal nocciolo del reattore, all'interno del moderatore, e opportunamente collimati per ottenere un rapporto $L/D \approx 300$. Oltre al collimatore, lungo la linea di estrazione è presente un filtro in cadmio per assorbire i neutroni termici provenienti dal reattore e un filtro in piombo per ridurre la contaminazione di fotoni di alta energia prodotti nel processo di fissione. La sezione trasversa del fascio in corrispondenza del campione è un rettangolo $37 \times 31 \text{ cm}^2$ con una intensità media di 5.4×10^5 neutroni/cm²s e un'energia media per neutrone di 1.7 MeV. Come nel caso precedente, è presente un manipolatore per traslare e ruotare l'oggetto da analizzare e un sistema di rivelazione con uno schermo scintillante. La telecamera CCD è una ANDOR DV434-BV a basso rumore, sviluppata per applicazioni in astronomia, che opera raffreddata con celle di Peltier. Il campo immagine è segmentato in 1024×1024 pixel, ciascuno corrisponden-

300. Moreover two filters made of cadmium and lead are added to absorb respectively thermal neutrons coming from the reactor and high energy photons produced during the fission process. The beam transverse section at the sample position is a square of $37 \times 31 \text{ cm}^2$ with an average intensity of 5.4×10^5 neutrons/cm²s and 1.7 MeV mean neutron energy. Also in this facility a translator and a rotary stage for the test object handling and a detection system with a scintillator screen are available. The CCD is a low noise camera ANDOR DV434-BV, developed for astronomy applications, cooled by Peltier cells. It is segmented in 1024×1024 pixels, each of them corresponding to $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ of the image field. The nominal dynamic range is 16 bit and it is possible to integrate the signal up to a time of 2000 s.

Properties of the analyzed scintillators

The choice of a scintillator for a radiographic setup depends on the mean energy of the neutron beam and on the instrumentation used to acquire the image. Moreover both the neutron conversion efficiency and the image resolution are strongly related to the thickness of the scintillator screen. One of the main studies performed in the two neutron facilities has been the comparison of different scintillators. They have been properly selected based on the properties described in the following, with the aim of highlighting their detection potential for this kind of application.

Both organic and inorganic scintillators have been tested. Inorganic scintillators, as the zinc sulfide silver doped ZnS(Ag) and the gadolinium oxisul-

fide doped with terbium $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{:Tb}$, have a good neutron conversion's efficiency and therefore are reliable for low neutron flux applications. However they can't give prompt signals. For these materials the scintillation mechanism relies on the energy levels of the crystal lattice and on the presence of impurities embedded into it. Conversely, organic scintillators have a faster response which makes them suitable for imaging purposes. Unfortunately they suffer of a very low luminescence power and so they need of high neutron fluxes. In this case the scintillation mechanism is due to the fluorescence of the material itself.

In the following the main properties of the tested scintillators are reported.

INES

Thermal neutron screen NDG (Applied Scintillation Technology) - It is composed by ZnS(Ag) mixed with lithium fluoride ^6LiF with a relative weight of 2:1. The lithium fluoride is added to the zinc sulfide because it has an extremely high thermal neutron cross section (940 barn). The interaction between neutrons with a lithium-6 nucleus produces a tritium nucleus and an alpha particle which in turn interacts with the zinc sulfide generating scintillation light. Two versions of this scintillator have been tested to evaluate the image resolution and dynamic range dependence on the screen thickness and on the possible presence of a plastic matrix. The scintillation material in the first scintillator type is inserted in a plastic matrix of 450 μm thickness while in the second one is

te a $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ del campo immagine. Il range dinamico nominale della telecamera è di 16 bit e il segnale può essere integrato per tempi molto lunghi, fino a 2000 s.

Caratteristiche degli scintillatori analizzati

La scelta dello scintillatore per un apparato radiografico dipende dall'energia dei neutroni e dal tipo di rivelatore utilizzato per registrare l'immagine. Inoltre lo spessore dello schermo influisce sia sull'efficienza di conversione sia sulla risoluzione dell'immagine. Nell'ambito delle misure effettuate presso i due laboratori si è voluto operare un confronto fra diversi scintillatori, scelti in modo ragionato in base alle caratteristiche dettagliate nel seguito, al fine di verificarne le caratteristiche per questo tipo di applicazione.

Gli scintillatori scelti sono sia a base di composti inorganici sia a base di composti organici. Gli scintillatori inorganici, quali il solfuro di zinco attivato all'argento ZnS(Ag) e l'ossisolfuro di gadolinio attivato al terbio $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$, hanno miglior resa di luminescenza e sono pertanto adatti ad applicazioni con bassi flussi di neutroni, ma sono lenti nel tempo di risposta. In questi materiali il meccanismo di scintillazione è legato agli stati di energia del reticolo cristallino e alla presenza di impurità introdotte ad hoc all'interno dello stesso. Gli scintillatori organici, quali quelli a base di toluene, sono al contrario più veloci, caratteristica che li rende preferibili in applicazioni di imaging,

deposited on a thin aluminum layer of 1 mm with a total thickness of 250 μm .

NECTAR

ZnS(Ag) in polypropylene matrix, thickness 2mm - This is the neutron converter actually used in the NECTAR facility and it has been characterized in order to have a reference point for the other scintillators. The scintillating material is ZnS(Ag) and the luminescence is due to charged particles generated by the interactions between neutrons and nucleus of the polypropylene matrix elements.

Thermal neutron screen NDG (Applied Scintillation Technology) - It is the scintillator $\text{ZnS(Ag):}^6\text{LiF}$ embedded in plastic matrix, 450 μm thick, used at INES. Since it is composed by the same scintillation material of the NECTAR converter screen in a thinner layer, it allows to check the dependence of resolution on scintillator thickness with fast neutrons.

Plastic scintillators (EJ200 EJ212 Eljen Technology) - The main interaction mechanism of fast neutrons with matter is the elastic collision with a hydrogen nucleus and for this reason plastic neutron converters are suitable for their detection. They are composed by poliviniltoluene, an organic scintillator with a very fast response which makes them particularly recommended for radiographic applications.

ma hanno una bassa resa di luminescenza e richiedono pertanto alti flussi di neutroni incidenti. In questo caso il meccanismo di scintillazione è la fluorescenza del materiale utilizzato.

Di seguito sono riportate le caratteristiche degli scintillatori utilizzati.

INES

Thermal neutron screen NDG (Applied Scintillation Technology) - Il materiale scintillante è un composto di ZnS(Ag) miscelato con del fluoruro di litio ^6LiF in un rapporto in peso di due parti a uno. Il fluoruro di litio è aggiunto al solfuro di zinco perché presenta un'elevata sezione d'urto di interazione con i neutroni termici (940 barn). L'interazione del neutrone con il litio-6 genera un nucleo di trizio ed una particella alfa che, interagendo con il solfuro di zinco, generano luce di scintillazione. Sono state testate due versioni di questo scintillatore per valutare l'effetto dello spessore e della presenza della matrice plastica sulla risoluzione e sul range dinamico dell'immagine finale: la prima con materiale scintillante inserito in una matrice plastica con spessore totale di 450 μm , la seconda con materiale scintillante depositato su di un substrato di 1 mm di alluminio per uno spessore di 250 μm .

NECTAR

ZnS(Ag) in matrice di polipropilene, spessore 2mm - È lo scintillatore in uso presso NECTAR ed è stato caratterizzato per avere figure

Two converter screens have been tested, both with a thickness of 20 mm. The first one, EJ200, is the best general purpose organic scintillator because it detects almost all types of radiation fields with a high converter efficiency and an extremely good transparency to its own scintillation light, allowing for layers of very large size. The second, EJ212, is the plastic scintillator mostly used for fast neutron detection in nuclear physics. Unlike the EJ200 screen, it is not sensitive to high-energy gamma rays even though the poliviniltoluene is its main compound. This makes it more suitable for applications where the neutrons to detect are in a mixed neutron-gamma field, as in the NECTAR facility.

Agfa Curix Ortho Regular X-ray converter screen - They are commonly used as support screens in the traditional X-ray radiography where they are inserted into the radiographic case together with the sensitive film. They are composed by gadolinium oxifluoride activated with terbium ($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$), an inorganic scintillator. The gadolinium has a high cross section for thermal neutrons which remains still significant (around 10 barn for the main isotope) for neutrons of 1 MeV energy. They are available as consumer items at a moderate price, also in big sizes. This fact, together with the small thickness of 1 mm, makes them particularly indicated

di merito di riferimento per gli altri scintillatori. Il materiale scintillante è ZnS(Ag) e la luminescenza è causata dai secondari carichi prodotti dall'interazione tra i neutroni e i nuclei degli elementi della matrice di polipropilene.

Thermal neutron screen NDG (Applied Scintillation Technology) – È lo stesso scintillatore ZnS(Ag):⁶LiF in matrice plastica spessa 450 μm utilizzato ad INES che, essendo composto dello stesso materiale scintillante dello schermo presente a NECTAR in uno strato più sottile, consente di verificare con neutroni veloci la dipendenza della risoluzione dallo spessore dello scintillatore.

Scintillatori plastici (EJ200 EJ212 Eljen Technology) – Per i neutroni veloci il principale meccanismo di interazione con la materia è l'urto elastico con nuclei di idrogeno, e per questo motivo gli scintillatori plastici risultano particolarmente adatti per la loro rivelazione. Il materiale di cui sono costituiti è poliviniltoluene, uno scintillatore organico che ha una risposta molto rapida che lo rende particolarmente adatto alle applicazioni del progetto. Sono stati impiegati due schermi, entrambi spessi 20 mm. Il primo, EJ200, è il miglior scintillatore organico per impieghi generici in quanto risponde a tutti i tipi di radiazione, presenta una elevata resa di luminescenza ed una elevata trasparenza alla propria luce di scintillazione che consente di realizzare lastre anche di grandi dimensioni. Il secondo, EJ212, è lo scintillatore plastico comunemente utilizzato per rive-

lare neutroni veloci in applicazioni di fisica nucleare. È costituito anch'esso in gran parte da poliviniltoluene ma rispetto all'EJ200 è insensibile ai fotoni gamma di energia elevata, cosa che lo rende particolarmente adatto in applicazioni in cui i neutroni da rivelare sono in un campo misto neutroni-gamma, come quello di NECTAR.

Agfa Curix Ortho Regular X-ray converter screen - Nella radiologia X tradizionale sono ampiamente conosciuti e utilizzati schermi di rinforzo che vengono inseriti nella cassetta radiografica insieme alla pellicola. L'Agfa Curix Regular è uno schermo di rinforzo alle terre rare contenente ossisolfuro di gadolinio attivato al terbio (Gd₂O₂S:Tb), uno scintillatore inorganico. Il gadolinio presenta una sezione d'urto di cattura elevata per neutroni termici, che comunque risulta essere ancora importante, intorno ai 10 barn per l'isotopo più abbondante, per i neutroni di energia dell'ordine del MeV. Tali schermi sono disponibili come materiale di consumo a costi contenuti, anche in grandi dimensioni. Tutte queste caratteristiche unite allo spessore limitato di circa 1 mm, lo rendono particolarmente degno di attenzione per una caratterizzazione approfondita presso NECTAR.

Risultati: linearità, risoluzione e range dinamico

Per lo studio della linearità dei diversi sistemi di imaging (scintillatore e telecamera) sono state registrate ad INES e NECTAR im-

for an in-depth characterization at the NECTAR facility.

Results: linearity, resolution and dynamic range

Images of the radiation field, in the following called open beam, have been acquired at INES and NECTAR with increasing exposure times. They have been used to study the linearity of all the available imaging systems composed by different combinations of scintillator and camera. The average of grey levels (signal) and the corresponding standard deviation (noise) have been computed inside a uniform area of 10x10 pixels, using the assumption that the signal fluctuation among 100 consecutive pixels of an image is equal to the fluctuation of grey levels of a single pixel for a sequence of 100 images.

The results indicate that at INES, by using the DMK21BF04, the 450 μm thickness scintillator and the maximum integration time of 30 s, it is possible to exploit only half of the camera nominal dynamic range. On the contrary the camera MANTA G-0328, combined with the same scintillator, allows to reach the saturation when the signal is acquired at the maximum exposure time of 60 s. For all the scintillator-camera pairs the linearity between the signal and the exposure time is verified up to the maximum grey level. The highest angular coefficient has

been achieved with the thicker scintillator (DMK: 3.77 ± 0.03 grey levels/s; MANTA 72.4 ± 0.2 grey levels/s) which features the best neutron conversion efficiency: a small fluctuation of the neutron flux leads to a more significant variation of grey levels.

At NECTAR, open beam images have been acquired at for different exposure times (from 0.1 to 2000 s) by combining the ANDOR camera with all the scintillators described in the previous section. For all the combinations, the signal resulted linearly dependent on the exposure time and the maximum angular coefficient (8.82 ± 0.04 grey level/s) has been achieved with the 2 mm thick scintillator of ZnS(Ag) in polypropylene matrix.

The signal-to-noise study showed in all the tested imaging systems a general trend which can be described by a power function with a fractional exponent, indicating that the main contribution to noise originates from statistical fluctuations on the number of photons hitting the camera. This noise increases with the signal; if the assumption of signal fluctuations following a Poissonian statistics is made, the signal-to-noise ratio as a function of signal should follow the functional form $y = A \cdot x^{0.5}$. Moreover the effective dynamic range (L), i.e. the number of grey levels which can be effectively distinguished taking into account the noise contribu-

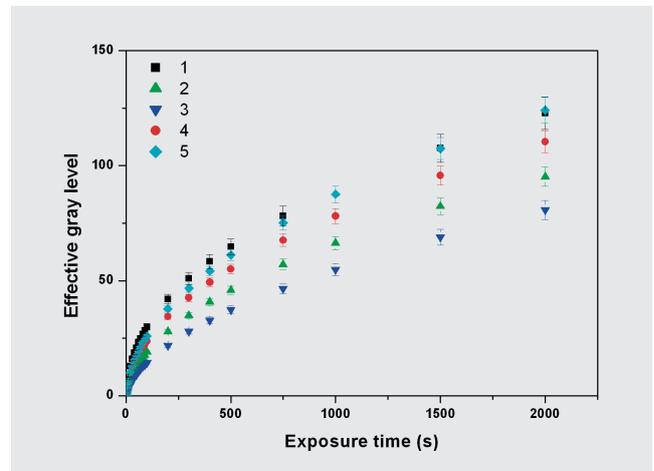
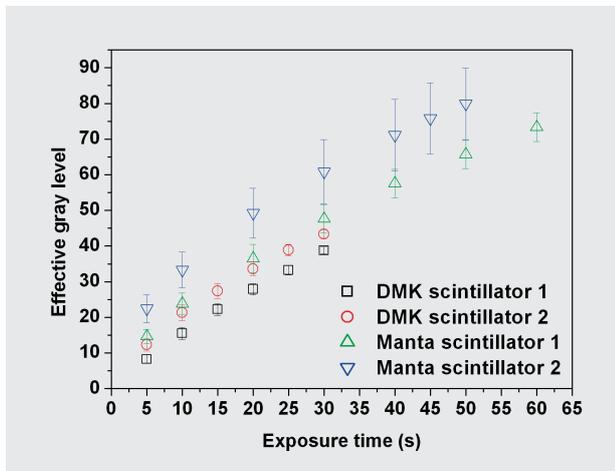


Fig. 3 Livelli di grigio effettivi in funzione del tempo di integrazione del segnale per le diverse combinazioni CCD – scintillatore. A sinistra: risultati ottenuti ad INES (scintillatore 1 = Thermal neutron screen NDG 250 mm; scintillatore 2 = Thermal neutron screen NDG 450 mm); a destra: risultati ottenuti a NECTAR (1=ZnS(Ag) in matrice di polipropilene spessore 2mm, 2=Thermal neutron screen NDG 450 mm; 3= Agfa Curix Ortho Regular X-ray converter screen; 4= Scintillatore plastico EJ200 5=Scintillatore plastico EJ212).

Fig. 3 Number of effective grey levels as a function of the signal integration time for different combinations CCD-scintillator. On the left: results of INES (scintillator 1=Thermal neutron screen NDG 250 μ m; scintillator 2=Thermal neutron screen NDG 450 μ m). On the right: results obtained at NECTAR (1=ZnS(Ag) thickness 2mm; 2=Thermal neutron screen NDG 450 μ m; 3=Agfa Curix Ortho Regular X-ray converter screen; 4=plastic scintillator EJ200; 5=plastic scintillator EJ212).

magini del campo di radiazione, nel seguito chiamate *open beam*, variando il tempo di integrazione del segnale. L'analisi delle immagini è stata fatta calcolando su ciascuna di esse il valor medio dei livelli di grigio dei pixel (segnale) e la relativa deviazione standard (rumore), su una regione di 10x10 pixel, sotto l'ipotesi che la fluttuazione del segnale tra 100 pixel adiacenti di una singola immagine sia equivalente alla fluttuazione dei livelli di grigio del singolo pixel in 100 immagini acquisite in tempi successivi.

I risultati indicano che a INES, utilizzando la telecamera DMK21BF04, lo scintillatore spesso 450 μ m ed integrando il segnale per il tempo massimo consentito di 30 s, si riesce a sfruttare solo metà del range dinamico nominale della telecamera. Al contrario, con la telecamera MANTA G-032B accoppiata allo stesso scintillatore si raggiunge la saturazione quando il segnale viene integrato

per il tempo massimo di 60 s. Per tutte le combinazioni l'andamento del segnale in funzione del tempo di integrazione risulta lineare fino alla saturazione con una pendenza maggiore quando si utilizza lo scintillatore più spesso da 450 μ m (DMK: 3.77 \pm 0.03 livello di grigio/s; MANTA 72.4 \pm 0.2 livello di grigio/s), ad indicare una migliore efficienza di conversione: una piccola variazione del flusso di neutroni comporta quindi una maggiore variazione dei livelli di grigio.

Presso NECTAR le immagini di *open beam* sono state ottenute combinando la telecamera ANDOR con gli scintillatori descritti nella sezione precedente e variando il tempo di integrazione del segnale da 0.1 s a 2000 s. In tutti i casi è stata verificata la linearità del segnale in funzione del tempo di integrazione con la pendenza massima (8.82 \pm 0.04 livello di grigio/s) con lo scintillatore ZnS(Ag)

tion, has been computed for all the camera-scintillator combinations. L is related to signal (S) and noise (N) by the equation:

$$L = \int_a^b \frac{ds}{N(s)}$$

where a and b are respectively the highest and the lowest limit of the available signal range. Comparisons between the different imaging systems have been performed with the same exposure time (FIG. 3) because, as mentioned above, the dynamic range increases with the integration time. The INES highest dynamic range (80 effective grey levels) corresponds to the combination MANTA camera – 450 μ m thickness scintillator. At NECTAR the ZnS(Ag) scintillator in polypropylene matrix with a thickness of 2 mm and the two plastic scintillators EJ200 EJ212 have a similar behavior achieving respectively 123 \pm 7, 110 \pm 5, 124 \pm 6 effective grey levels at the exposure time of 2000 s. The spatial resolution, expressed in terms of FWHM, has been computed for all the imaging systems by using the image of a sharp edge as described in the literature⁹. At INES, the best spa-

tial resolution (182 \pm 11 μ m) has been obtained with the DMK camera combined with the thinner scintillator of 250 μ m. At NECTAR the best spatial resolution (659 \pm 7 μ m) has been achieved with the thermal neutron screen NDG of 450 μ m thickness; this value is larger than the resolution obtained at INES with the same scintillator. In fact, although the spatial resolution is related to the L/D ratio (the higher is L/D, the lower is the spatial resolution) and this ratio is higher at NECTAR, each pixel at INES corresponds to 100x100 μ m² of the image field compared to 300x300 μ m² at NECTAR. By using the 2 mm thickness ZnS(Ag) scintillator in polypropylene matrix, it is possible to solve at NECTAR details of 900 μ m; however this spatial resolution worsens up to 2 mm with the two plastic scintillators because of their large thickness.

Finally, the characterization has been completed with a neutron radiography of step wedges of bronze, brass, steel, aluminum and PET manufactured on purpose for this analysis. For all the combinations camera-scintillator the beam intensity attenuation has been studied as a function of the

in matrice di polipropilene spesso 2mm. Lo studio del segnale/rumore in funzione del segnale ha rivelato in tutti i sistemi testati un andamento che può essere approssimato con una potenza ad esponente frazionario. Questo indica che il contributo principale al rumore deriva dalle fluttuazioni statistiche dei fotoni che colpiscono la telecamera e quindi aumenta al crescere del segnale; infatti assumendo che le fluttuazioni seguano la statistica di Poisson, l'andamento segnale/rumore in funzione del segnale dovrebbe avere un andamento tipo $y = A \cdot x^{0.5}$.

Per tutte le diverse combinazioni telecamera-scintillatore è stato poi determinato il range dinamico effettivo (L), ovvero il numero di livelli di grigio effettivamente distinguibili tenendo conto del rumore. L dipende dal segnale S e dal rumore N attraverso la relazione:

$$L = \int_a^b \frac{ds}{N(s)}$$

dove a e b sono rispettivamente il limite inferiore e superiore del range del segnale utile. Dal momento che il range dinamico aumenta al crescere del tempo di integrazione i confronti tra i diversi sistemi di imaging sono stati fatti a parità di tempo di integrazione del segnale (FIG. 3). Per INES il range dinamico più elevato (80 livelli di grigio effettivi) si ottiene utilizzando la telecamera MANTAG-032B con lo scintillatore più spesso da 450 nm. Presso NECTAR lo scintillatore ZnS(Ag) in matrice di polipropilene spesso 2mm e i due scintillatori plastici EJ200 EJ212 risultano ave-

re comportamenti confrontabili raggiungendo rispettivamente 123 ± 7 , 110 ± 5 , 124 ± 6 livelli di grigio effettivi per 2000 s di esposizione.

Infine, la caratterizzazione dei sistemi di imaging è stata completata con la determinazione della risoluzione spaziale, in termini di FWHM, usando l'immagine di un bordo netto di un sottile materiale radiopaco⁹. Per INES la risoluzione spaziale migliore (182 ± 11) μm è stata ottenuta con la telecamera DMK abbinata allo scintillatore più sottile di 250 nm. Per quanto riguarda NECTAR la risoluzione spaziale migliore (659 ± 7) μm è stata ottenuta con lo scintillatore Thermal neutron screen NDG da 450 μm . Questo valore risulta circa il doppio rispetto a quello ottenuto ad INES con il medesimo scintillatore. Infatti, sebbene la risoluzione spaziale sia strettamente legata al rapporto L/D (maggiore è L/D, minore è la risoluzione spaziale) e questo rapporto sia molto superiore a NECTAR rispetto ad INES (circa 300 vs circa 90), bisogna ricordare che ad INES ciascun pixel corrisponde circa a $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ del campo immagine mentre a NECTAR ciascun pixel corrisponde a circa $300 \times 300 \mu\text{m}^2$. Presso NECTAR, se si utilizza lo scintillatore ZnS(Ag) in matrice di polipropilene dello spessore di 2 mm si riescono a risolvere dimensioni dell'ordine di 900 μm , mentre la risoluzione spaziale peggiora fino a circa 2 mm utilizzando i due scintillatori plastici a causa del loro elevato spessore. Per completare la caratterizzazione dei sistemi di imaging sono state radiografate delle scalette opportunamente realizzate in

thickness of material. FIGURE 4 shows the results obtained at INES and NECTAR. In both cases the experimental data follow the exponential attenuation Lambert-Beer's law, the main difference being the maximum beam penetration depth which is higher at NECTAR (5mm), and the different elemental separation potential. This can be clearly observed at INES where the different beam attenuation of bronze, brass and steel is clearly evidenced by the angular coefficients of the straight lines which represent, in logarithmic scale, the exponential behavior of the beam attenuation as a function of the material depth. These straight lines are hardly distinguishable at NECTAR.

Results: tomographies

Given the increasing interest for neutron tomographic applications, a bronze cube of 25 mm side (FIG. 5) has been realized with faces of different thickness, ranging from 4 to 2 mm which correspond to the typical thickness of bronze statues. Moreover two bronze rods and one of aluminum with square section of $3 \times 3 \text{ mm}^2$ and 15 mm height, have been inserted inside the cube

together with two circular drills of 1 mm diameter in its thinner face to simulate respectively the presence of internal structures and metal casting air bubbles. The tomography of the cube has been performed at INES with the DMK camera and the thermal neutron screen NDG of 250 μm thickness. The cube has been positioned on a rotary stage and the angular step has been set to 0.7° . Images have been acquired with an exposure time of 16 s. The tomographic reconstruction has been performed by the usage of the techniques already described in chapter on the radio-tomographic apparatus. In FIG. 5 a horizontal section of the cube and the 3D rendering are shown. It is evident from the reconstructed section that it is possible to resolve details of a millimetric scale and to locate all the metallic structures inside the cube. Only the aluminum rod is not easily visible because of the cross section which is about one order of magnitude lower for aluminum than for steel.

Finally, a bronze hand, shown in FIG. 6, has been prepared at the CCR, using ancient techniques of metal artifact casting, to evaluate the neutron tomography potential on works of art. The tomogra-

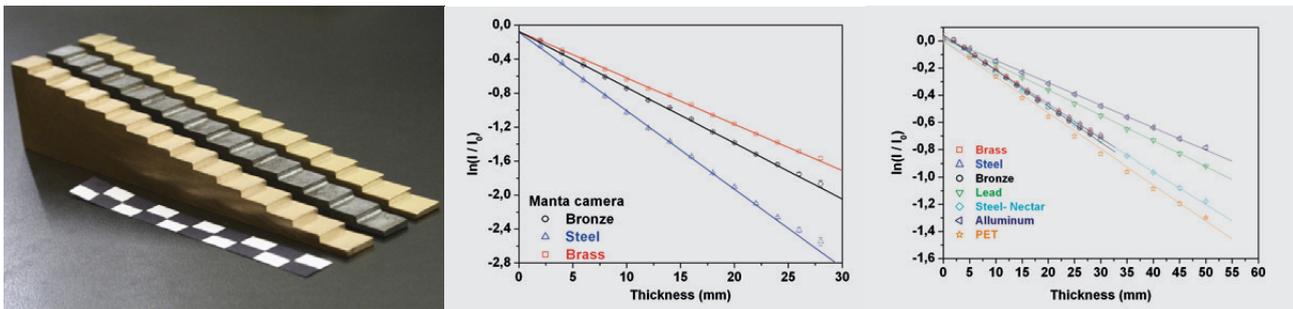


Fig. 4 A sinistra: scalette in bronzo, acciaio e ottone; al centro: profili di assorbimento del fascio di neutroni in funzione dello spessore dei gradini delle scalette ottenuti presso la facility INES con il sistema di imaging formato da telecamera MANTAG-032B e scintillatore Thermal neutron screen NDG da 450 μm ; a destra: profili di assorbimento del fascio di neutroni in funzione dello spessore dei gradini delle scalette ottenuti presso la facility NECTAR con lo scintillatore ZnS(Ag) in matrice di polipropilene spesso 2mm.

Fig. 4 Left: bronze, lead and brass step wedges. Center: relative beam intensity as a function of the step thickness obtained at INES with the imaging system composed by the MANTAG-032B camera and Thermal neutron screen NDG 450 μm thick scintillator. Right: relative beam intensity as a function of the step thickness obtained at NECTAR with the ZnS(Ag) scintillator 2 mm thick.

bronzo, ottone, acciaio, alluminio e PET ed è stata poi studiata l'attenuazione dell'intensità del fascio dei neutroni in funzione dello spessore attraversato.

In FIG. 4 sono riportati i risultati ottenuti presso le due facilities. In entrambi i casi i dati sperimentali seguono l'attenuazione esponenziale prevista dalla legge di Lambert-Beer. Le differenze principali riguardano invece la differente profondità di penetrazione, maggiore a NECTAR (5 cm), e la diversa capacità di discriminare i materiali. Ad ISIS si osserva infatti un assorbimento differenziato per bronzo, ottone e acciaio, come mostrano le diverse pendenze delle rette che rappresentano, in scala logaritmica, l'andamento esponenziale dell'assorbimento in funzione dello spessore attraversato. Le rette corrispondenti risultano invece sovrapposte per i neutroni veloci di NECTAR.

Risultati: tomografie

Visto l'interesse per applicazioni tomografiche, è stato realizzato un cubo in bronzo di 25 mm di lato (vedi FIG. 5) con facce spesse da 4 a 2 mm per simulare lo spessore tipico delle statue di bronzo. Inoltre, su una delle due facce più sottili sono presenti due fori circolari da 1 mm di diametro per simulare la presenza di bolle d'aria e all'interno sono inserite tre barre a base quadrata, 3x3x15 mm³, due di acciaio ed una di alluminio per simulare la presenza di strutture interne.

La tomografia del cubo è stata realizzata ad INES con la telecamera DMK e lo scintillato-

re Thermal neutron screen NDG da 250 μm . Il cubo è stato disposto su una piattaforma rotante, sono state acquisite immagini per 16 s a passi angolari di 0.7° e la ricostruzione tomografica è stata condotta utilizzando le tecniche già descritte capitolo sull'apparato radio-tomografico. In FIG. 5 è riportata una sezione orizzontale del cubo e il rendering 3D. È possibile distinguere dettagli su scala millimetrica ed individuare quasi tutte le strutture metalliche presenti all'interno del cubo. Solo la colonna di alluminio non risulta chiaramente visibile dal momento che la sezione d'urto dell'alluminio è circa un ordine di grandezza inferiore rispetto a quella dell'acciaio.

Al fine di valutare le potenzialità della tomografia neutronica su oggetti artistici, è stata infine realizzata presso il CCR una mano in bronzo, mostrata in FIG. 6, utilizzando tecniche di fusione usate nell'antichità. La tomografia di questo oggetto è stata realizzata a NECTAR acquisendo 180 proiezioni della mano ad intervalli angolari di 1°. Ogni proiezione è stata ottenuta acquisendo 4 immagini di 60 s, per un totale di 13 ore di acquisizione. I risultati sono riportati in FIG. 6 ove si possono osservare sia il rendering 3D della mano sia tre sezioni, assiale, trasversale e orizzontale. Si può osservare come la tomografia neutronica consenta di evidenziare lo spessore del guscio esterno e alcuni elementi della struttura interna quali la presenza di fili metallici di dimensione millimetrica e la presenza di elementi leggeri a bassa densità che costituiscono la terra di fusione.

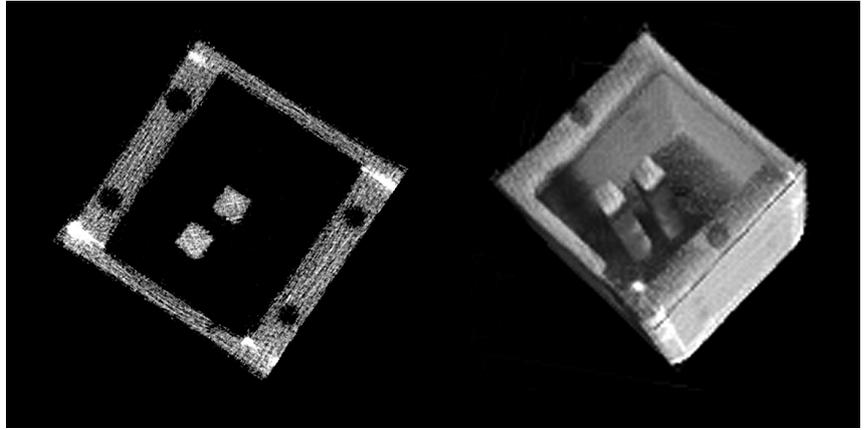
phy of this object has been realized at NECTAR by acquiring 180 projections with an angular step of 1°. Each projection has been obtained with the sum of 4 images with 60 s exposure time, for a total time acquisition of 13 hours. Results are reported in FIG. 6 where the 3D rendering and three different sections (axial, transverse and horizontal) are shown. Neutron tomography allowed to reconstruct the thickness of the external shell and some internal structures as the presence of metallic filaments of millimetric size and of low density materials which compose the casting sand.

¹ R.J. SPEAKMAN, M.D. GLASCOCK, *Acknowledging fifty years of neutron activation analysis in archaeology*, in «Archaeometry», 49, 2 (2007), pp. 179-183.

² O.R. HILLING, *Neutron Radiographic Enhancement Using Doping Materials and Neutron Radiography Applied to Museum Art Objects*, in «Practical Applications of Neutron Radiography and Gauging, ASM Special Technical Publication», 586, 1975, p. 268.

³ 1st International Conference on Neutron Imaging and Neutron Methods in Archaeology and Cultural Heritage Research NINMACH2013, September 9-12, 2013.

⁴ Si intendono termici i neutroni con energie comprese tra 5 meV e 0.5 eV ed epitermici quelli di energie superiori,



fino a qualche keV. I neutroni veloci coprono comunemente un ampio intervallo di energie compreso tra qualche keV e qualche MeV.

Conventionally, the energy range of thermal neutrons is between 5 meV e 0.5 eV while epithermal neutron energies extend up to few keV. Fast neutrons cover a broad energy range between few keV and few MeV.

⁵ Le tecniche e i programmi utilizzati per la ricostruzioni delle immagini radiografiche e tomografiche sono descritti nel capitolo sull'apparato radio-tomografico al quale si rimanda per i necessari approfondimenti.

The techniques and the programs used for the reconstruction of the radiographic and tomographic images are described in the chapter on the radio-tomographic system; for further reading please refer to that chapter.

⁶ L'elettronvolt (eV) è l'unità di misura dell'energia utilizzata in fisica atomica e nucleare; $1\text{eV}=1.6\times 10^{-19}\text{J}$. Inoltre valgono le seguenti equivalenze: $1\text{meV} = 10^{-3}\text{eV}$, $1\text{keV} = 10^3\text{eV}$, $1\text{MeV} = 10^6\text{eV}$

The electronvolt (eV) is an energy unit used in atomic and nuclear physics; $1\text{eV}=1.6\times 10^{-19}\text{J}$. In addition, $1\text{meV} = 10^{-3}\text{eV}$, $1\text{keV} = 10^3\text{eV}$, $1\text{MeV} = 10^6\text{eV}$

⁷ La penombra geometrica, definita come l'allargamento dell'immagine di un bordo netto a causa di effetti geometrici legati alla collimazione del fascio, è infatti data da $d/(L/D)$ dove d è la distanza tra l'oggetto e il rivelatore.

The geometric penumbra, defined as the broadening of a sharp edge image caused by the geometric effects of the beam not being collimated, is given by $d/(L/D)$ where d is the distance between the neutron detector and the object.

⁸ M. CELLI, D. COLOGNESI, F. GRAZZI, M. ZOPPI, *Notiziario Neutroni e Luce di Sincrotrone*, 11, 2006, 6 (<http://www.cnr.it/neutronielucedisincrotrone>); F. GRAZZI, M. CELLI, S. SIANO, M. ZOPPI, *Il Nuovo Cimento C* 30, 59, 2007.

⁹ E.H. BARNEY SMITH, *PSF estimation by gradient descent fit to the ESF*, proceedings of International Society for Optics and Photonics (SPIE) 6059, E, 2006.

Fig. 5 A sinistra: foto del cubetto. A destra: ricostruzione di una sezione orizzontale (destra) e rendering 3D (sinistra).

Fig. 5 Left: picture of the cube. Right: reconstruction of an horizontal section (right) and 3D rendering (left).

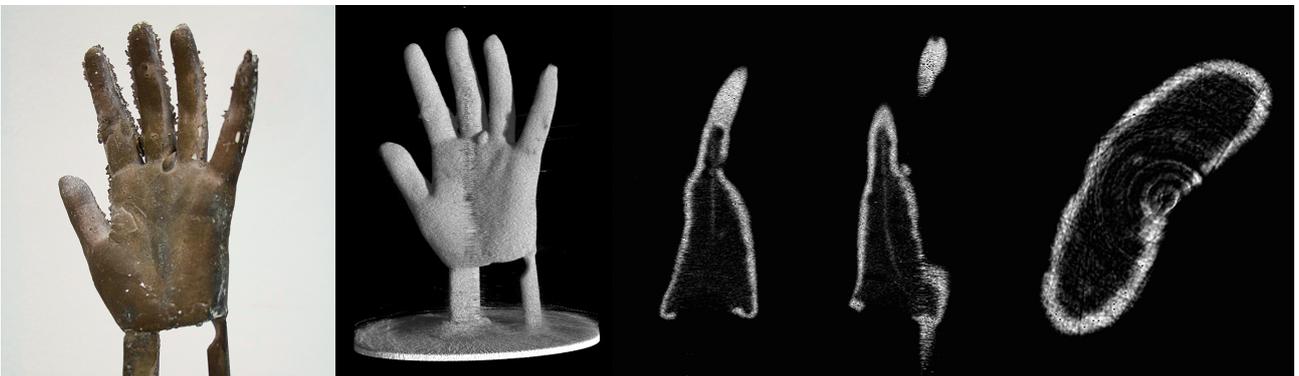


Fig. 6 Da sinistra a destra: fotografia della mano, rendering 3D, sezione assiale, sezione trasversale e sezione orizzontale.

Fig. 6 From left to right: picture of the hand, 3D rendering, axial, transversal and horizontal sections.

Sezione 2

IL PROGETTO NEU_ART
PER LA CONSERVAZIONE,
LA TUTELA E LA VALORIZZAZIONE

La diagnostica scientifica non invasiva. La conoscenza necessaria per preservare, conservare e restaurare un'opera d'arte

The scientific non-invasive diagnostic. The necessary knowledge to protect, preserve and restore a work of art

Michela Cardinali

*L'analyse scientifique est un petit chemin
entre la grande voie de l'histoire et celle de la poésie,
mais c'est un chemin de notre temps*
(André Malraux, 1964)¹

Le prime radiografie su lastra condotte presso istituzioni museali sono documentate già negli anni dieci del Novecento: nel 1916 ne fece uso il Kunsthistorisches Museum di Vienna, nel 1919 il Louvre di Parigi, nel 1924 l'Alte Pinakothek di Monaco², mentre in Italia la piena affermazione dell'indagine radiografica su opere pittoriche risale agli anni trenta del Novecento, grazie al dibattito scaturito dalla *Conférence Internationale pour l'étude des méthodes scientifiques appliquées à l'examen et à la conservation des Œuvres d'Art*, tenutasi a Roma nel 1930, e alle prime applicazioni nel campo del restauro, tra cui si può citare il caso dei dipinti della Galleria Estense di Modena, pubblicati da Giulio Carlo Argan nel 1935³. Occorre anche ricordare l'innovativa operazione messa a punto dall'Istituto Centrale del Restauro all'inizio degli anni cinquanta, che prevedeva la documentazione sistematica di opere di Caravaggio mediante l'impiego di tecniche ai raggi X⁴.

The first X-rays analyses made in museums are documented since the first decade of the 20th century: in 1916 they were used at the Kunsthistorisches Museum in Vienna, in 1919 at the Louvre in Paris, in 1924 at the Alte Pinakothek in Monaco², while in Italy the full establishment of radiographic analysis of paintings dates back to the thirties of the 20th century, thanks to the debate arising from the *Conférence Internationale pour l'étude des méthodes scientifiques appliquées à l'examen et à la conservation des Œuvres d'Art*, organized in Rome in 1930, and to the first applications in the restoration field, among which we can mention the case of the paintings in the Galleria Estense in Modena, published by Giulio Carlo Argan in 1935³. It should also be noted the innovative operation setting up by the Central Institute of Restoration in the early fifties, which included the systematic documentation of Caravaggio's works of art by the use of X-ray techniques⁴. Some specific case studies are reported in the well-known essay by Roberto Longhi published on the opening of the 1972 edition of the *Storia del restauro*

Alcuni casi specifici di applicazione sono riportati nel noto saggio di Roberto Longhi pubblicato in apertura dell'edizione del 1972 della *Storia del restauro e della conservazione dei beni culturali* di Alessandro Conti⁵. Il restauro della *Dama con l'unicorno* di Raffaello, trasformata da un intervento storico in Santa Caterina, è divenuto un fondamentale caso di studio attestante il consolidarsi dell'interdisciplinarietà in sede di ricerche storiche e di restauro insieme all'utilizzo strumentale di analisi scientifiche (riflettografie e radiografie) volte a rispondere ai quesiti posti dalla lettura dell'opera⁶. Sebbene siano molteplici i campi di applicazione, la fase di studio preliminare a un intervento di restauro di opere d'arte rimane il principale impiego delle diverse tecniche radiografiche e tomografiche. La loro applicazione permette di ottenere dati approfonditi sulla storia conservativa del manufatto per mezzo dell'individuazione, localizzazione e ricono-

e della conservazione delle opere d'arte by Alessandro Conti⁵. The restoration of the *Dama con l'unicorno* by Raffaello, transformed during a historic intervention in Santa Caterina, became an important case study confirming the consolidation of interdisciplinary approach in the historical and restoration research with the use of scientific analyses (reflectography and X-rays) aimed to answer the questions arising from the interpretation of a work of art⁶. Although there are many fields of application, the main use of radiographic and tomographic techniques is the preliminary study of a restoration. Their application allows to obtain in-depth data on the conservation history of the artwork through the identification, localization and recognition of previous interventions and restoration materials, with their relative mapping. These analyses also allow to compare the nature of the original materials with the degradation processes that affect their stability, through the study of the state of conservation and of the decay products. Thanks to the indisputable results obtained so far with the non-invasive techniques and the economic

scimento degli interventi precedenti e dei materiali di restauro, con relativa mappatura. Tali indagini permettono inoltre di comparare i dati riguardanti la natura dei materiali originali con i processi di degrado che ne compromettono la stabilità, attraverso lo studio dello stato di conservazione e dei prodotti di degrado.

Grazie agli indiscussi risultati ottenuti fino ad oggi con la diagnostica scientifica di tipo non invasivo e all'impegno economico sostenuto dalla Regione Piemonte per la ricerca scientifica in questo campo, con il progetto neu_ART si sono potute sviluppare e consolidare le conoscenze di tecniche applicative attraverso analisi comparate e lo sviluppo e integrazione di sistemi di natura sofisticata, in grado di rispondere in modo ancora più specifico alle domande poste dal mondo della conservazione. I casi di studio affrontati per sviluppare nell'ambito del progetto neu_ART il potenziale di queste tecniche diagnostiche, di cui si presentano alcuni significativi esiti nei contributi di seguito riportati, mettono in luce il valore delle informazioni che è possibile ottenere in modo da conoscere e documentare il nostro patrimonio e garantirne una corretta conservazione e preservazione.

L'utilizzo di questi sistemi di indagine innovativi è di primaria importanza per ricostruire, con il supporto dei dati emersi dalla ricerca storica e documentale, un quadro completo delle vicende conservative e per la comprensione della tecnica di esecuzione e dei materiali costitutivi, momento di comprensione fondamentale per l'individuazione e la definizione, già in fase progettuale, delle metodologie più idonee per l'esecuzione degli interventi. Una conoscenza oggettiva, non affidata a una

'sensibilità' individuale, ma nata dal confronto di dati tecnico-scientifici ottenuti da professionalità diverse, che interagiscono per formulare una diagnosi corretta⁷.

Le tecniche avanzate di acquisizione ed elaborazione dell'immagine al pc, ad esempio, risultano estremamente utili per indagare superfici ampie senza ricorrere all'assemblaggio di tutte le immagini riprese singolarmente. Le informazioni che si possono trarre dall'applicazione delle tecniche radiografiche riguardano principalmente lo stato di conservazione del supporto e degli strati preparatori e cromatici (spesso trasformati, celati o resi poco leggibili da più materiali sovrapposti durante interventi di restauro passati), oppure il processo creativo, restituendo dati utili anche all'analisi stilistica dell'opera.

Ai fini dello studio dei supporti tessili o lignei dei dipinti e delle sculture, le informazioni che sono state ottenute dalle indagini sono molteplici e qui possiamo ricordare l'identificazione macroscopica della specie legnosa costitutiva del supporto con l'individuazione di difetti del legno (nodi) o delle caratteristiche della tela originale (trama, densità, riduzione, titolo del filato) e l'evidenza del numero degli elementi costitutivi e il loro sistema di assemblaggio⁸. Analogamente, gli approfondimenti scientifici condotti sugli strati superficiali delle opere hanno permesso di ottenere fondamentali informazioni per lo studio della tecnica esecutiva degli artisti, documentando l'impostazione grafica sottostante gli strati pittorici e individuando pentimenti e immagini relative a un precedente utilizzo del supporto (FIG. 1). È stato inoltre possibile rilevare tutte le modifiche apportate durante interventi di restauro

support of the Regione Piemonte for the scientific research in this field, within the neu_ART project it was possible to develop and consolidate the applied techniques through comparative analyses and integration of sophisticated systems able to respond even more specifically to questions in the world of conservation. The case studies, chosen to develop within the neu_ART project the potential of these diagnostic techniques and of which results are presented in the following contributions, highlight the value of information that it can be possible to obtain to know and document our heritage and ensure its proper conservation and preservation.

The use of these innovative systems of investigation is a key tool to reconstruct, with the support of the historical research and documentation, a comprehensive framework for the preservation history and to understand the execution technique and the original constituent materials, an important moment for the identification and definition, already in the project phase, of the most suitable methods for the interventions. An objective knowledge, not entrusted by an individual "sensitivity", but arisen by the comparison of scientific and technical data obtained from differ-

ent professional competences, who work together to make the correct diagnosis⁷.

The advanced techniques of image acquisition and processing with the PC, for example, are extremely useful to investigate large areas without having to put together all the images taken individually. The information that can be drawn by the radiographic techniques relates mainly the analysis of the state of preservation of the support and of the preparatory and chromatic layers (often transformed, hidden or made unreadable by materials added during previous restoration), or the creative process, giving useful data also for the stylistic analysis of work of art.

For the study about textile media or wooden paintings and sculptures, the information obtained with the analyses include the identification of wood species constitutive of the support with the identification of wood defects (knots) or the characteristics of the original canvas (texture, density, reduction, yarn count) and the evidence of the number of building blocks and their assembly system⁸. Similarly, the in-depth scientific studies made on the surface layers of the artworks allowed to obtain fundamental information for the study of the artists painting technique,



precedenti, volte alla trasformazione delle dimensioni e dell'aspetto originali. I fenomeni di degrado di cui è stato possibile fornire una mappatura (localizzazione e estensione) sono stati lacune, fessurazioni, distacchi, rotture e *craquelure* (diffusione e conformazione).

La tomografia assiale computerizzata, attraverso la riproduzione della struttura interna di opere tridimensionali, anche di grandi dimensioni, permette un esame dettagliato di tutte le caratteristiche interne del manufatto grazie

alla diversa radiopacità dei materiali costituenti⁹. Le informazioni che si possono ottenere riguardano sia la tecnica di esecuzione e lo stato di conservazione, sia la presenza di materiali estranei inseriti nella struttura nel corso di interventi di manutenzione o restauro. La particolare forma dell'apparato per radiografia e tomografia computerizzata sviluppato all'interno del progetto neu_ART permette di ovviare ai limiti degli apparati in uso in ambito medico e di indagare differenti tipologie di

documenting the graphic below the painting layers and images of a previous use of the support (FIG. 1). Moreover, it was possible to detect all the changes made during previous restoration, aimed to modify the size and the original appearance. Degradation phenomena of which it was possible to provide a mapping (position and extension) were gaps, cracks, detachments, breaks and *craquelure* (distribution and conformation).

The computed tomography, through the reproduction of the internal structure of three-dimensional objects, even of large size, allows a detailed examination of all the internal characteristics of the artwork thanks to the different radiopacity of the constituent materials⁹. The information that can be obtained concern both the execution technique and the state of preservation both the presence of other materials introduced into the structure during previous maintenance or restoration. The particular shape of the apparatus for radiography and computed tomography developed within the neu_ART project allows to overcome the limitations of the medical equipment and to investigate different types of artefacts, as archaeological finds, ceramics or terracotta objects from

ethnoanthropological collections, mummies and other fossil or osteological finds. This allowed to evaluate the potential of the system developed and to provide, to personnel dedicated to the conservation and restoration of works of art, the information otherwise not accessible with a simple visual inspection or other investigation techniques.

A particular field of application is archaeology. Only recently, the importance of the technique has been highlighted by two British institutions: the Department of Conservation at the British Museum published a text dedicated exclusively to applications on objects of cultural interest, with particular reference to materials coming from archaeological excavations, such as metals, ceramics and bone finds; even the Cultural Heritage, an advisory body of the Government, drawn up a small text¹⁰ containing some guidelines for the implementation of radiographic studies of metal artefacts from excavation, in order to popularize the potential of this diagnostic procedure among archaeologists, restorers and museum curators. In archaeology field in fact, where often because of the nature of the discovery and the state of conservation of artefacts it is necessary to take a portions

Fig. 1 Anonimo, *Ritratto di Felix Bouton* (Torino, Palazzo Madama - Museo Civico d'Arte Antica). Radiografia digitale. L'indagine ha permesso di rilevare la presenza di un dipinto precedente e di documentare il riutilizzo della tela.

Fig. 1 Anonymous author, *Portrait of Felix Bouton* (Torino, Palazzo Madama - Museo Civico d'Arte Antica). X-ray. The study has revealed the presence of a previous painting and to document the reuse of the canvas.

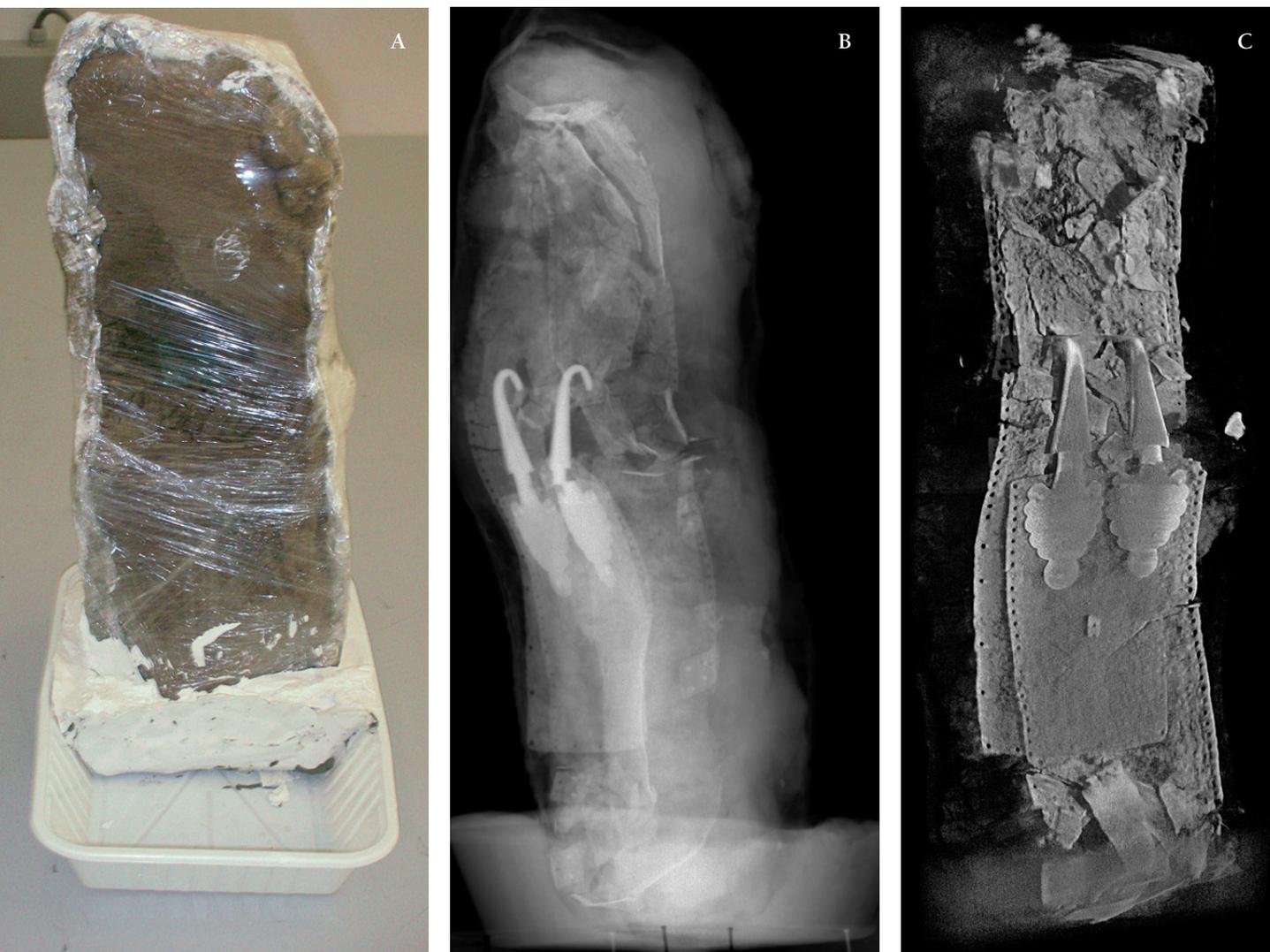


Fig. 2 Prelievo di terreno. Necropoli di Villalfonsina, Località Morandici (Abruzzo).

- A. Luce visibile prima del restauro.
- B. Radiografia.
- C. Rendering 3D.

Fig. 2 Sampling of soil. Necropolis Villalfonsina, Location Morandici (Abruzzo).

- A. General picture before restoration.
- B. X-ray.
- C. 3D rendering.

manufatti, come reperti archeologici, oggetti in ceramica o terracotta, manufatti provenienti da collezioni etno-antropologiche, mummie ed altri reperti fossili o osteologici. Questo ha permesso di valutare le potenzialità della strumentazione sviluppata e di fornire al personale addetto alla conservazione e al restauro delle opere informazioni altrimenti non accessibili con una semplice analisi visiva o con altre tecniche di indagine.

Un particolare campo di applicazione è quello dei reperti archeologici. Solo negli ultimi

anni l'importanza della tecnica è stata messa in evidenza da due istituzioni britanniche: il Department of Conservation del British Museum ha pubblicato un testo dedicato esclusivamente ad applicazioni su oggetti aventi interesse culturale, con particolare riferimento alle categorie di materiali che provengono da scavi archeologici, come metalli, reperti osteologici e ceramiche; anche il Cultural Heritage, organo con funzione consultiva del Governo, ha redatto un piccolo testo¹⁰ contenente alcune linee guida per la realizzazione di indagini

of the soil in which objects lie, digital radiography and CT allow to obtain the data required to know the morphology and the distribution within the soil. Due to the different absorption of X-rays for each material, it is possible to distinguish, using a grey scale, the shapes of objects still embedded in the earthy matrix, to locate decorations present on the surface of artefacts and to obtain some preliminary information on the different constituent materials. This information permits to realize the micro-excavation, taking into account of what is to be preserved and to document the positioning of the work of art inside the sampling

area, providing significant data for the study of the archaeological artefacts and the site in which they were found (FIG. 2A-C).

The comparison of data obtained using advanced X-ray systems with other non-invasive techniques (multispectral) and with the historical and technical knowledge of artefacts allow to deepen the study of the works of art without sampling valuable parts of the original material. All the non-invasive techniques are one of the main sources of information necessary to the complex historical, scientific and technical reading of works of art and to preservation of Cultural Heritage.

radiografiche su reperti metallici provenienti da scavo, al fine di divulgare tra archeologi, restauratori e conservatori di museo le potenzialità di questa indagine diagnostica. In ambito archeologico, infatti, dove spesso per la natura stessa del rinvenimento e lo stato di conservazione dei manufatti si rende necessario il prelievo delle porzioni di suolo in cui giacciono gli oggetti, la radiografia digitale e la TAC consentono di ottenere i dati necessari per conoscere morfologia e distribuzione all'interno del materiale terroso. Grazie al differente assorbimento dei raggi X, a seconda dei materiali attraversati, è possibile distinguere, ricorrendo ad una scala di grigi, le forme di oggetti ancora inglobati dalla matrice terrosa, individuare decorazioni eventualmente presenti sulla superficie dei manufatti e recuperare alcune informazioni preliminari sui diversi materiali costituenti un'opera. Tali informazioni permettono di realizzare il micro-scavo tenendo conto di ciò che dovrà essere preservato e di documentare il posizionamento dell'opera rispetto all'area prelevata, fornendo dati significativi per lo studio archeologico dei manufatti e del sito nel quale sono stati rinvenuti (FIG. 2A-C).

Il confronto dei dati ottenuti attraverso l'uso di sistemi avanzati di tipo radiografico con altri sistemi di diagnostica non invasiva (multispettrale) e con le conoscenze storico-tecniche dei manufatti indagati permetteranno di approfondire lo studio delle opere senza l'ausilio di prelievi di preziose parti di materia originale. Tutte le tecniche diagnostiche non invasive costituiscono una delle principali fonti di informazione necessarie alla complessa lettura storica, tecnica e scientifica delle opere d'arte e alla conservazione del patrimonio culturale.

¹ L. MUCCHI, A. BERTUZZI, *Nella profondità dei dipinti. La radiografia nell'immagine pittorica*, Milano 1993, p. 9

² Per un approfondimento storico sulle prime applicazioni delle analisi scientifiche alla diagnostica artistica, cfr. M.

CARDINALI, M.B. DE RUGGIERI, C. FALCUCCI, *Diagnostica artistica: tracce materiali per la storia dell'arte e per la conservazione*, Roma 2002.

³ G.C. ARGAN, *Ricognizioni radiografiche di alcuni quadri della R. Galleria Estense di Modena*, in "Bollettino d'arte", XXIX, n. 4, 1935, pp. 202-204. Come ricorda Matteo Panzeri, Mauro Pelliccioli fu tra i primi restauratori italiani a ricorrere all'uso delle radiografie per l'intervento sulla Pala di Castelfranco di Giorgione nel 1934, cfr. M. PANZERI, *La tradizione del restauro a Bergamo tra XIX e XX secolo: Mauro Pelliccioli, un caso paradigmatico*, in Giovanni Secco Suardo, *La cultura del restauro tra tutela e conservazione dell'opera d'arte*, in "Bollettino d'arte", supplemento al n. 98, Roma 1996, p. 96.

⁴ G. BASILE, *Cesare Brandi e la ricerca scientifica per il restauro*, in *Cesare Brandi. Teoria ed esperienza dell'arte*, Atti del convegno di Siena, 12-14 novembre 1998, Milano, pp. 47-50. Per le tecniche radiografiche in uso presso l'Istituto si può vedere C. BRANDI (a cura di), *Mostra di dipinti restaurati. Angelico, Piero della Francesca, Antonello da Messina*, catalogo della mostra, Roma, Palazzo Venezia, marzo 1953. Per il contesto fiorentino si veda U. BALDINI, *Restauri di dipinti fiorentini in occasione della mostra dei quattro maestri del Rinascimento*, in "Bollettino d'arte", XXIV, Roma 1954, pp. 221-226 e 240, nota 7; S. RINALDI, *Diagnostica nel 1940: le indagini agli Uffizi su due tavole di Botticelli e Tiziano*, in "Bollettino dell'Istituto Centrale del Restauro", N. S., n. 13, Roma 2006, pp. 27-47.

⁵ A. CONTI, *Storia del restauro e della conservazione delle opere d'arte*, Milano 1988 (1 ed. 1972).

⁶ Per approfondimenti si vedano: P. SPEZZANI, *Riflettoscopia e indagini non distruttive. Pittura e grafica*, Milano 1992; P. MOLLI, C. SECCARONI, *Tecniche radiografiche applicate ai beni culturali*, Roma 2004; A. ALDROVANDI, M. PICOLLO, *Metodi di documentazione e indagini non invasive sui dipinti*, Padova 2007; M. MILAZZO, N. LUDWIG, *Misurare l'arte. Analisi scientifiche per lo studio dei beni culturali*, Milano 2010.

⁷ R. VAROLI PIAZZA (a cura di), *Sharing Conservation Decision. Un Corso ICCROM: esperienze a Confronto*, Roma 2007.

⁸ Opere su supporto ligneo: cavicchi, perni, ranghette, chiodi e la presenza dell'incamottatura o di strati di materiale di natura organica utilizzati in sostituzione del tessuto (pergamena, carta ecc.); opere su supporto tessile: tipologia di cucitura.

Works on wooden support: dowels, pins, *ranghette*, nails and the presence of "incamottatura" or layers of organic material used in place of textile (parchment, paper etc.); works on textile support: type of seam.

⁹ Si rimanda agli approfondimenti diagnostici realizzati per lo studio e la conservazione del "Doppio corpo" di Pietro Piffetti, conservato nel Palazzo del Quirinale, e delle due colonne intarsiate del gabinetto etrusco del Castello di Racconigi.

Please refer to the diagnostic investigations carried out for the study and restoration of "Doppio corpo" by Pietro Piffetti, from the Palazzo del Quirinale in Rome, and the two wooden columns from the Etruscan cabinet in Racconigi Castle.

¹⁰ V. FELL, Q. MOULD, R. WHITE, *Guidelines on the X-radiography of archaeological metalwork*, London 2006.



FILIPPO. II. detto SENZA T

Ritratti di Casa Savoia

Ente Proprietario: Ministero per i Beni e le Attività Culturali (Castello di Racconigi)

Dipinti a olio su tela restaurati dal Centro Conservazione e Restauro nel 2011-2012.
Castello di Racconigi (CN)

Umberto III il Beato, R1519, 217,5x117,5 cm; *Ritratto di Pietro*, R 1491, 218x118 cm; *Agnese*, R 1484, 218,5x118,5 cm; *Bona di Berry*, R 1503, 225x122 cm; *Beatrice di Braganza*, R 5542, 217,5x116,5 cm; *Amedeo II*, R 1515, 216,5x118,5 cm; *Caterina di Baviera*, R 1523, 204,5x102,5 cm; *Ancilla*, R 1507, 217,5x128,5 cm; *Adelaide di Susa*, R1509, 218x118,5 cm; *Amedeo VII*, R 1504, 202,5x100,5 cm; *Amedeo VIII*, R 1512, 204x130 cm; *Amedeo IX*, R 5538, 203x101 cm; *Edoardo*, R 1534, 217,5x120,5 cm; *Filippo I*, R 1515, 217,5x124,5 cm; *Filippo II*, R 1501, 223,5x128,5 cm; *Francesca di Valois*, R 6478; 222,5x123,5 cm; *Filiberto I il Cacciatore*, R 1513, 205x88 cm; *Filiberto II il Bello*, R 5541, 218,5 x 122,5 cm; *Carlo II*, R 5529, 217x117,5 cm; *Carlo Emanuele I*, R 5539; 204,7x114,3 cm; *Caterina d'Asburgo*, R 5532, 204,8x113,8 cm; *Vittorio Amedeo I*, R 5534, 218x120,5 cm; *Cristina di Francia*, R 5535, 218x118,5 cm; *Maria Giovanna Battista*, R 6476, 217x113,5 cm; *Carlo Emanuele III*, R 6469, 217,5x118,5 cm; *Anna d'Orleans*, R 6468, 217 x 115 cm; *Carlo Emanuele II*, R 6467, 205x107 cm; *Anna Cristina di Sulzbach*, R 6474, 217,5x126 cm; *Polissena d'Assia Rheinfels*, R 6473, 218,5x118,5 cm; *Elisabetta di Lorena*, R 6470, 218x125 cm; *Vittorio Amedeo Grassi*, *Beatrice di Ginevra*, R 1518, 205x97,5 cm; *T. Lorenzone*, *Maria Teresa d'Austria*, R 1493, 218,5x127 cm; *F. Marabotti*, *Maria Cristina di Borbone*, 1848, R 1369; *F. Marabotti*, *Carlo Felice*, 1848, R2861, 206x116 cm; *T. Lorenzone*, *Vittorio Emanuele I*, R 2865, 205x115,5 cm

La «stupenda galleria» del castello di Moncalieri, oggi a Racconigi

Laura Gallo, Samantha Padovani

I dipinti presi in esame fanno parte di un più ampio nucleo attualmente conservato presso il castello di Racconigi¹. Le tele, uniformi per dimensioni e raffiguranti personaggi di Casa Savoia, sono legate dalla catena inventariale S.M., a partire dal numero 28, Beroldo (R 1524), fino ai dipinti ottocenteschi². Per ricostruire la serie è inoltre possibile fare riferimento al numero riportato da un antico cartellino, scritto in inchiostro nero, incollato sul retro dei singoli dipinti (a eccezione di quelli ottocenteschi, che ne sono privi).

Nel 1879 i quadri erano conservati al castello di Moncalieri, al primo piano, nella Galleria n. 70³. Nell'inventario di quell'anno la serie è composta da 87 dipinti, documentati anche, fin dai primi anni settanta dell'Ottocento, da un altro inventario non datato, ma precedente al 1872, che li registra nella Galleria a ponente, dal numero 209 al 296⁴. Già nella prima metà dell'Ottocento Goffredo Casalis aveva avuto modo di visitare la «stupenda galleria», in cui aveva potuto vedere «i ritratti, in grandezza naturale, di tutti i Sovrani

Sabaudi con le loro consorti»⁵. Tutti i quadri della serie risultano, nell'inventario del 1879, scaricati nel gennaio del 1920 presso il castello di Racconigi, dove si trovano tuttora a eccezione di alcuni non più presenti fin dagli anni cinquanta del Novecento⁶. Fra i dipinti oggetto dell'attuale restauro il ritratto di *Bona di Berry*, R 1503 (così come quelli di *Filippo II*, R 1501, di *Amedeo VII*, R 1504, e di *Francesca di Valois*, R 6478), non è coerente con la serie presa in esame, come si evince dai numeri della catena inventariale riferibile al 1879⁷.

La serie è stata via via accresciuta fino all'Ottocento. Alcuni ritratti seicenteschi sono copie di altre tele: ne è un esempio *Carlo III* (R 5529), confrontabile con un dipinto di analogo soggetto esistente nelle collezioni del Quirinale⁸ e con un'altra tela che all'inizio degli anni trenta del Novecento era di proprietà privata⁹. Nel caso di *Emanuele Filiberto* (R 5531), il prototipo è il dipinto oggi conservato alla Galleria Sabauda, assegnato a Giacomo Vighi, detto l'Argenta¹⁰; *Carlo Ema-*

Ritratto di Filippo II.
Dopo il restauro.

Portrait of Filippo II.
After restoration.

nuele I (R 5539) è una derivazione dal dipinto di Giovanni Caracca, oggi al Museo Civico di Casa Cavassa di Saluzzo¹¹: a Racconigi se ne trova un'altra versione (R 5536) ancora più affine all'opera saluzzese¹². Il *Ritratto di Vittorio Amedeo I* (R 5534) è ritenuto da Michela di Macco replica della seconda metà del '600 da un originale non identificato forse di Pellegrino Brocardo¹³. Il dipinto appare inoltre ampliato probabilmente negli anni settanta del Settecento per renderlo omogeneo alla serie moncalierese¹⁴. I ritratti, nella maggior parte dei casi, sono infatti stati oggetto non solo di ripetuti restauri¹⁵ fino a metà '900 (ad opera, ad esempio, di Onorato Pierino Verdoja¹⁶), ma hanno anche subito sensibili modifiche nel corso del tempo (ampliamenti, inserimento o variazione dell'iscrizione identificativa del personaggio ritratto¹⁷, uniformazione dello sfondo), aspetti confermati dall'attuale campagna di indagini.

Già Cesare Enrico Bertana aveva individuato la presenza di una galleria di ritratti un tempo a Moncalieri e poi trasferita a Racconigi, non collegandola tuttavia a questa serie¹⁸. Alcune ricerche più recenti hanno interessato una parte delle tele in questione in occasione della mostra *La Reggia di Venaria e i Savoia* (2007-2008), evidenziandone l'appartenenza alla galleria moncalierese sulla base di un elenco conservato presso la Biblioteca Reale, datato 1780¹⁹. Il documento riporta tuttavia solo i ritratti dei principi, da *Beroldo* a *Carlo Emanuele III*. Non vi compaiono invece le principesse, dato che induce a pensare per queste ultime a una provenienza da altre residenze. Altri documenti relativi a un intervento di restauro condotto all'inizio degli anni settanta del Settecento da Pietro Paolo Wehrlin elencano, in un caso, 28 ritratti di principesse sabaude su cui il pittore sarebbe dovuto intervenire prima di inviarle a Moncalieri²⁰, in un altro, altri otto ritratti femminili²¹, per un totale di 36 dipinti. Wehrlin afferma di aver compiuto ampliamenti delle tele o di avervi aggiunto l'iscrizione con il nome dell'effigiata. Si tratta probabilmente dei lavori necessari alla costituzione della galleria di ritratti voluta nell'ambito del riallestimento del castello di Moncalieri intrapreso da Vittorio Amedeo III²². Interessanti relazioni esistono inoltre fra le tele di alcune principesse sabaude e quelle delle principesse inserite a gruppi di due o tre in un unico quadro, anch'esse conservate a Racconigi, restaurate ed esposte in occasione della mostra di Venaria: la *Caterina di Baviera* (R 1513), ad esempio, è identica alla figura identificata come *Maria di Brabante*, nel dipinto raffigurante le tre mogli di Amedeo

V (R 1499)²³. All'interno della serie è possibile distinguere diversi gruppi: al primo appartengono i dipinti risalenti al XVII secolo (ad esempio *Amedeo II*, R 1489, *Umberto III*, R 1519, *Filippo I*, R 1515, *Filippo II*, R 1501, *Filiberto I*, R 1513), in cui compare una più antica iscrizione identificativa del personaggio inserita sullo sfondo, oggi non centrata e pertanto spesso mutila. Per quel che riguarda le principesse, che provengono certamente da una serie diversa, le più antiche mostrano una maggiore raffinatezza di esecuzione. Alcune tele servirono probabilmente come modello per integrare eventuali lacune presenti nella serie dinastica: è questo il caso di *Beatrice di Ginevra* (R 1518), in cui il restauro ha messo in luce la firma di Vittorio Amedeo Grassi²⁴, copiata da un altro ritratto facente parte della medesima serie, *Maria di Brabante* (R 1492).

Alla fine del XVIII secolo appartengono i ritratti di *Francesco Giacinto* (R 6465), *Carlo Emanuele II* (R 6467), *Vittorio Amedeo II* (R 6475), *Anna d'Orleans* (R 6468), *Carlo Emanuele III* (R 6469) e quelli delle sue tre mogli *Anna Cristina di Baviera Sulzbach* (R 6474), *Cristina Polissena d'Assia Rheinfels* (R 6473), *Elisabetta Teresa di Lorena* (R 6470)²⁵ e, infine, quello di *Vittorio Amedeo III* (R 6472), tutti caratterizzati dal gusto orientato verso modelli francesi²⁶. Per questo gruppo è possibile fare il nome di Giovanni Panealbo, al servizio di Vittorio Amedeo III in qualità di «pittore in ritratti», e a cui sono riferiti alcuni ritratti realizzati per la Galleria di Moncalieri tra il 1786 e il 1788, ricordati nel *Diario* di Carlo Felice e riportati da Vesme²⁷. Fra questi sono anche quelli di Amedeo VIII e Amedeo IX, notizia che sembra essere confermata dai risultati delle indagini svolte durante il restauro, che hanno evidenziato affinità di materia pittorica con il gruppo settecentesco²⁸.

Seguono infine le opere risalenti a metà e fine '800: i ritratti di *Maria Clotilde Adelaide di Francia* (R 1368) e di *Carlo Emanuele IV* (R 1370) di Costantino Sereno; di *Vittorio Emanuele I* (R 2865) e di *Maria Teresa d'Austria* (R 1493) di Tommaso Lorenzone; di *Maria Cristina di Borbone* (R 1369) e di *Carlo Felice* (R 2861) di Francesco Marabotti; di *Carlo Alberto* (R 2829), *Maria Adelaide di Lorena* (R 2836) ed *Elisabetta Maria* (R 6660) di Angelo Capisani; di *Maria Teresa di Toscana* (R 2820) e di *Ferdinando duca di Genova* (R 6595), di Felice Barucco²⁹; infine di *Vittorio Emanuele II* (R 6596) di Rodolfo Morgari³⁰. Proprio il ritratto di Morgari veniva commissionato sul finire degli anni settanta dell'Ottocento per chiudere l'intera serie³¹.

¹ Sono attualmente in corso studi finalizzati alla schedatura OA dei singoli dipinti. Una parte della serie non è ancora stata sottoposta a restauro.

² Elisabetta Maria di Angelo Capisani, con cui si chiude il gruppo, porta il numero S.M. 116.

³ Casa di S.M. *Inventario degli Oggetti d'arte esistenti nel R. Castello di Moncalieri di proprietà privata di S.M.*, 1879, Soprintendenza per i Beni Architettonici e Paesaggistici del Piemonte.

⁴ Archivio di Stato di Torino (ASTo), Riunite, Casa di Sua Maestà, Inventari, 12835, *Inventario dei dipinti esistenti al Real Castello di Moncalieri*.

⁵ G. CASALIS, *Dizionario geografico-storico-statistico commerciale degli Stati di S.M. il Re di Sardegna*, Torino, X (1842), p. 521.

⁶ *Inventario dei mobili del Real Castello di Racconigi*, 31 marzo 1951, Racconigi, Castello reale.

⁷ Sul retro della tela di Bona di Berry non solo non compare l'antico cartellino presente in quasi tutti gli altri dipinti della serie, ma anche la catena inventariale S.M., che in questo caso dovrebbe riportare il n. 68 (cfr. *Casa di S.M. Inventario*, 1879, f. 11v., Soprintendenza per i Beni Architettonici e Paesaggistici del Piemonte), è diversa e riporta il n. 176. Lo stesso si può dire per Amedeo VII, Filippo II e Francesca di Valois: tutti questi dipinti non arrivano inoltre a Racconigi nel 1920, ma il 12 marzo 1890, come attesta l'inventario del 1879.

⁸ L. LAUREATI, *Anonimo attivo in Piemonte nel XVII secolo*, in L. LAUREATI, L. TREZZANI (a cura di), *Il patrimonio artistico del Quirinale. Pittura antica. La Quadreria*, Milano 1993, scheda n. 227, p. 198.

⁹ Il dipinto era presso il castello di Margarita (CN), proprietà Lovera di Maria, come mostra una fotografia conservata in Biblioteca Reale a Torino (BRT), *Iconografia Sabauda*, fotografia I/63.

¹⁰ C. LANZI, *Giacomo Vighi, detto l'Argenta*, in P. ASTRUA, A. BAVA, C.E. SPANTIGATI (a cura di), «Il nostro pittore fiamengo». *Giovanni Caracca alla corte dei Savoia (1568-1607)*, catalogo della mostra, Torino 2005, scheda n. 8, pp. 84-85.

¹¹ E. PIANEA, *Giovanni Caracca*, in E. CASTELNUOVO (a cura di), *La Reggia di Venaria e i Savoia. Arte, magnificenza e storia di una corte europea*, catalogo della mostra, vol. II, Torino 2007, schede nn. 2.12, 2.13, p. 35.

¹² G. SLUITER, *Giovanni Caracca*, in «Il nostro pittore fiamengo», cit., 2005, scheda n. 16, pp. 102-103.

¹³ M. DI MACCO, *Pittore piemontese*, in M. DI MACCO, G. ROMANO (a cura di), *Diana trionfatrice. Arte di corte nel Piemonte del Seicento*, catalogo della mostra, Torino 1989, scheda n. 20, p. 20.

¹⁴ Come sembra attestare anche la presenza del blu di cobalto (post 1775), rilevata dalle analisi multispettrali condotte dal Centro Conservazione e Restauro.

¹⁵ All'inizio dell'Ottocento sono documentati restauri eseguiti da Stefano Chiantore a «tutti i quadri esistenti tanto nel salone che nelle gallerie e camere del Real Castello di Moncalieri», cfr. A. BAUDI DI VESME, *Schede Vesme. L'arte in Piemonte dal XVI al XVIII secolo*, vol. I, Torino 1963, pp. 308, 310.

¹⁶ L'indicazione dell'intervento del restauratore compare sui ritratti di *Beatrice di Ginevra* (R 1518) e di *Pietro II* (R 1491).

¹⁷ Come sembra sia accaduto al *Ritratto di Carlo II* (R 5533), identificato, seppur dubitativamente, con *Filippo IV d'Asburgo*, cfr. L. CALZONA, *Pittore spagnolo...*, in «Il nostro pittore fiamengo», cit., 2005, scheda n. 20, pp. 112-113.

¹⁸ C.E. BERTANA, *Note sull'arredo degli appartamenti reali del castello di Moncalieri nel XIX e XX secolo*, in F. PERNICE (a cura di), *Il castello di Moncalieri. Restauri 1989-1990*, Torino 1990, pp. 103-118, in part. p. 105; Id., *Le fonti*

iconografiche sabaude da Beroldo a Vittorio Emanuele II, in «Bollettino di numismatica», serie I, XIII, 24, 1995, pp. 29-35, in part. p. 33.

¹⁹ R. VITIELLO, *Pittori attivi alla corte dei Savoia*, in *La Reggia di Venaria e i Savoia*, cit., 2007, II, pp. 8-11. Per Pietro Paolo Wehrin cfr. M.B. Failla, *Lo stabilimento del restauro de' quadri e la Galleria dei Classici Italiani nel Palazzo Reale di Torino degli anni venti del XIX secolo*, in P. D'ALCONZO (a cura di), *Gli uomini e le cose. I. Figure di restauratori e casi di restauro in Italia tra XVIII e XX secolo*, Atti del convegno nazionale di studi, Napoli 2007, pp. 157-169.

²⁰ BRT, *Registri Recapiti*, 1772, II, ff. 995-996.

²¹ *Ibidem*, 1773, II, f. 541.

²² P. ASTRUA, *Le scelte programmatiche di Vittorio Amedeo duca di Savoia e re di Sardegna*, in S. PINTO (a cura di), *Arte di corte a Torino. Da Carlo Emanuele III a Carlo Felice*, Torino 1987, pp. 65-100, in part. p. 88.

²³ Su queste opere si veda M.B. Failla, R. VITIELLO, *Pittori attivi alla corte dei Savoia*, scheda in *La Reggia di Venaria e i Savoia*, cit., 2007, II, pp. 12-13. Occorre però precisare che non si tratta probabilmente delle tele oggetto del documento di Wehrin: il pittore infatti elenca ritratti di singole figure femminili; inoltre afferma che le opere erano destinate a Moncalieri. Le tele con i ritratti di gruppo delle mogli dei sovrani non solo non riportano sul retro la catena inventariale relativa alle opere presenti nel Castello di Moncalieri S.M. (tant'è che non si trovano inserite nell'inventario del 1879), ma al contrario sono caratterizzate da un'altra sigla: PPR. Si tratta di dipinti che già intorno al 1870 erano conservati nel Castello di Racconigi, come documenta la *Rubrica per nomi di autore degli oggetti d'arte esistenti nelle Reali Residenze del Piemonte (1870-1899)*, cfr. ASTo, Casa di Sua Maestà, *Inventari*, mazzo 12924, ff. non numerati.

²⁴ C.E. BERTANA, *Note sull'arredo...*, cit., 1995, p. 33. La firma di Grassi si ritrova anche nel ritratto di *Amedeo IV* (R 1486): «1788, 20 settembre. "Grassi apporta les portraits d'Amé IV et de Béatrix de Genève"», cfr. BRT, *Casa Savoia V*, 15, 1.1.1788-17.5.1789, f. 218.

²⁵ Queste ultime pubblicate in *Iconografia e collezionismo sabaudi*, catalogo della mostra, Torino 1982, pp. 32-33.

²⁶ In particolare il *Ritratto di Vittorio Amedeo III* è copia fedele dell'originale di Raphael Mengs, conservato presso la Reggia di Versailles, di cui nel museo francese esiste anche il *pendant*, dello stesso autore, ritraente la moglie del sovrano (cfr. C. CONSTANS, *Musée National du Château de Versailles. Catalogue des Peintures*, Paris 1980, p. 96, nn. 3275-3276). Sui ritrattisti attivi negli anni di Vittorio Amedeo III si veda A. GRISERI, *Un progetto per il guardamobili di Vittorio Amedeo III*, in «Studi Piemontesi», XXXII, 1, 2003, pp. 83-97.

²⁷ *Schede Vesme*, III, 1968, pp. 772-774, in part. p. 773. Fra i dipinti citati da Vesme è anche un ritratto di *Madama Felicita*, no presente in questa serie, ma forse identificabile con quello conservato presso il *Convitto Principessa Felicita di Savoia, un tempo Convitto delle vedove e nubili di civil condizione*. Il quadro (2,05 x 1,18 m), che ci permette stringenti confronti con i ritratti delle tre mogli di Carlo Emanuele III, venne esposto alla mostra del Barocco piemontese nel 1963 come opera di Giovanni Panealbo.

²⁸ Cfr. il contributo che segue.

²⁹ Per i profili biografici degli artisti citati si veda *ad vocem* G.L. Marini (a cura di), *Dizionario dei pittori piemontesi dell'Ottocento e del primo Novecento*, in corso di stampa.

³⁰ I dipinti risultano acquistati in diverse occasioni presso le esposizioni della Promotrice di Torino, cfr. ASTo, Riunite, *Casa di Sua Maestà*, Ministero Real Casa, Direzione provinciale della Real Casa, Mazzo 8943, carte sciolte.

³¹ *Ibidem*.

Scelte e motivazioni metodologiche dei restauri

Roberto Medico

Sin dal secolo XIV Casa Savoia aveva manifestato interesse e importanza per le immagini dinastiche, riprodotte in pittura, scultura e nelle monete, quale veicolo celebrativo della dinastia. Lo confermano gli stessi inventari che, stilati topograficamente, riportano in modo dettagliato la descrizione delle sale destinate appositamente ai ritratti. E proprio gli inventari e i documenti d'archivio ci permettono di ricostruire nel corso degli anni la movimentazione delle opere tra le varie sedi dinastiche, con i nuovi allestimenti legati al gusto del sovrano e alla reggia da lui privilegiata.

Noemi Gabrielli, nel volume del 1971 *Racconigi*, nella parte destinata all'iconografia sabauda, scrive che «il castello era destinato nelle intenzioni dei suoi proprietari, a divenire sede delle collezioni iconografiche sabauda...». Infatti quando gli eredi di Casa Savoia vendono nel 1980 allo Stato italiano il castello, il suo arredamento e l'attiguo parco, ritenuti un complesso storico e artistico, nell'art. 9 dell'atto di compravendita richiedono espressamente «che la parte acquirente si impegni a trasformare la residenza in Museo permanente aperto a studiosi e al pubblico impegnandosi a non alienare né trasferire altrove i mobili, i quadri, arazzi, tappezzerie e oggetti esistenti...». I termini richiesti dell'avvenuta compravendita hanno permesso di mantenere integra la collezione iconografica e per questo, quando si è riaperta la Reggia di Venaria, il castello di Racconigi è diventato il referente privilegiato per i prestiti necessari all'allestimento, prestiti che, grazie a una convenzione con il Consorzio di Valorizza-

zione La Venaria Reale, nel corso degli anni hanno permesso di restaurare e studiare in modo approfondito le opere richieste.

Nel caso dell'ultimo prestito riguardante le 36 tele di soggetto iconografico, le scelte metodologiche sono state condivise dalla Direzione Lavori, effettuata a cura di chi scrive, in continuo proficuo confronto con i referenti del Centro Conservazione e Restauro. Le diverse tipologie di opere individuate all'interno del nucleo di ritratti in oggetto ha reso necessario decidere, già in sede di progettazione del restauro, una campagna diagnostica approfondita non solo per valutare lo stato di conservazione, ma le eventuali affinità materiche tra gruppi di opere, considerando particolarmente significativa l'eterogeneità delle stratigrafie e dei materiali rilevati. La complessità cui ci si è trovati di fronte per ogni singolo dipinto ha richiesto decisioni mirate e calibrate caso per caso, nel confronto costante con le altre opere della serie. I rifacimenti, le variazioni iconografiche, i ripetuti restauri, gli ampliamenti e, in alcuni casi, i tentativi di uniformare i dipinti per crearne una serie omogenea, hanno reso necessario procedere lentamente per individuare corretti interventi e uso di materiali appropriati; per questo si sono rivelati estremamente utili i test radiografici preliminari che in certi casi hanno consentito di definire l'entità dei degradi della materia pittorica sottostante, suggerendo il mantenimento dello status quo dell'immagine. Tutto quanto sopra ha permesso di raggiungere gli obiettivi prefissati e arricchire un bagaglio di conoscenze e collaborazioni reciproche.

The paintings analysed in this paper are part of a larger set currently preserved in the Castle of Racconigi. The canvases are uniform in size and portray members of the House of Savoy. In 1879 the paintings were stored in the Castle of Moncalieri, on the first floor, in the Gallery n. 70. All the paintings in the series were moved in January 1920 to the Castle of Racconigi. The series was gradually increased until the 19th century. Some 17th century portraits are copies of other famous paintings. The portraits, in most cases, have suffered repeated restorations and changes over time

(enlargements, changes of the writings designating the portrait, uniformity of the background), as confirmed by analysis carried out during the restoration. Within the series it's possible to distinguish different groups: the first includes the paintings dating from the 17th century in which an ancient inscription, often incomplete, that identifies the character was found. The princesses certainly come from a different series. Another group of portraits dating from the late 18th century is followed by paintings made during the 19th century, often dated and signed.

La radiografia digitale come strumento di supporto per la conoscenza e la definizione delle linee di intervento: i Ritratti di Casa Savoia del Castello di Racconigi

Digital radiography as a support tool in knowledge and definition of intervention guidelines: House of Savoy Portraits in Racconigi Castle

Paola Buscaglia, Jacopo Corsi, Marco Nervo, Chiara Ricci

Premessa

Come indispensabile step successivo all'acquisizione e rielaborazione dei dati raccolti in occasione dei primi test condotti su provini, il progetto neu_ART ha previsto l'individuazione di casi studio reali al fine di verificare l'effettiva efficacia della strumentazione, tarando risultati e procedure sulla base dei risultati emersi¹. I provini prodotti *ex novo* infatti, per quanto realizzati tenendo conto della prassi esecutiva e delle informazioni reperibili in letteratura tecnica, oltre a presentare differenze nell'invecchiamento dei materiali rispetto alla materia originale, sono di norma concepiti in forma semplificata nelle stratigrafie; l'utilità di operare in prima istanza su campioni prodotti *ad hoc* sta nella possibilità di tarare la strumentazione su stratigrafie semplici, che eliminino le complicità di eterogeneità di materiali, permettendo di avere riferimenti certi sui singoli materiali considerati. Nell'ambito dell'intervento di conservazione e restauro di 36 dipinti su tela, facenti parte di una più ampia serie proveniente

dal Castello di Racconigi e raffigurante esponenti di Casa Savoia, è stato possibile individuare un nutrito gruppo di opere particolarmente significative per la complessità delle stratigrafie e l'eterogeneità di materiali rilevati; si trattava infatti di dipinti ridotti a serie omogenea mediante ridimensionamenti/ampliamenti, ridipinture, ulteriori interventi manutentivi e di restauro, diffusi sulle superfici, di media o elevata entità, sia al di sopra sia al di sotto degli strati protettivi (colori ad olio, tempera, colori legati con vernici). Era inoltre necessario un approfondimento conoscitivo finalizzato sia alla ricostruzione delle alterne vicende conservative e delle evidenti discrepanze cronologiche e stilistiche, sia alla definizione delle principali linee guida per l'intervento di recupero della corretta leggibilità della materia originale e per la restituzione estetica dell'intera serie.

Già in sede di progettazione è stata prevista una campagna diagnostica approfondita, funzionale alla valutazione dello stato di conservazione e all'individuazione di even-

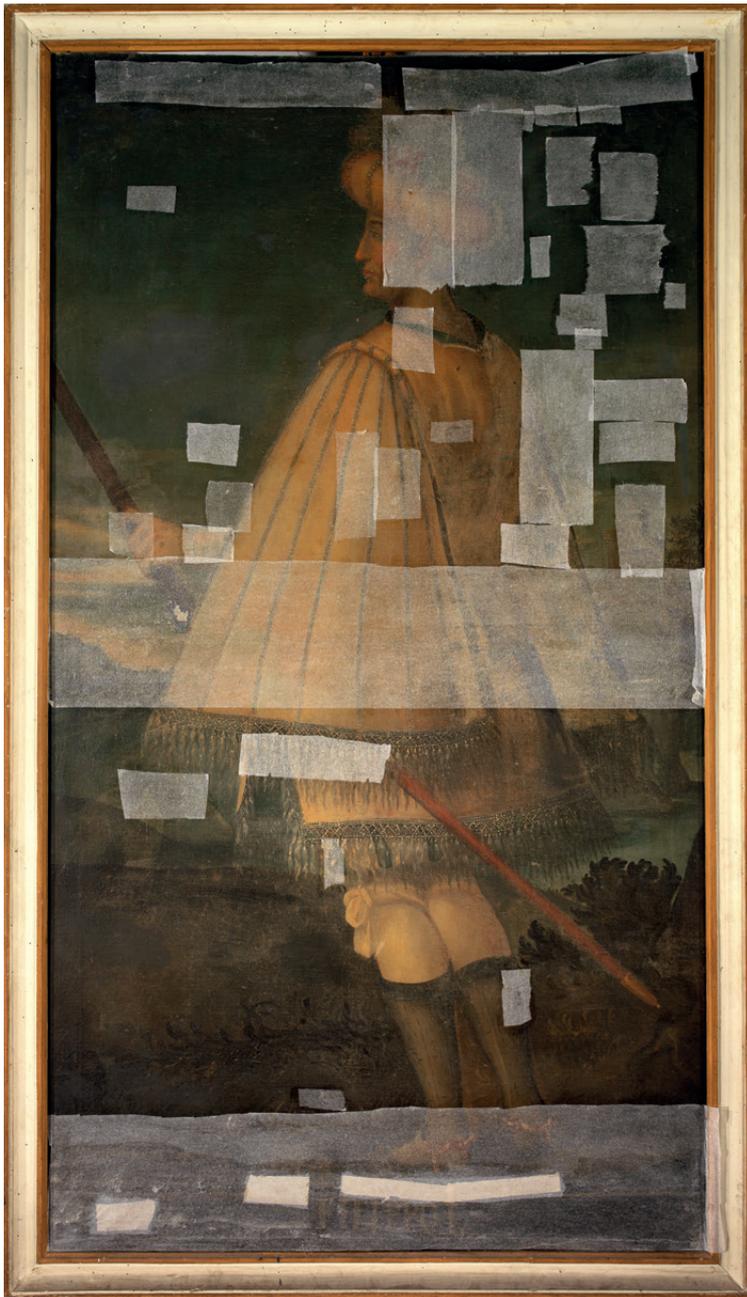
Introduction

The second step provided by neu_ART project after acquisition (and processing) of data obtained from tests on mock-ups has been focused on real case studies to verify the effective efficacy of the equipment and to upgrade its processes¹. In fact the mock-ups, produced referring to traditional executive technique, still present strong differences from real cases, such as ageing of materials and simplification in stratigraphies (operating on mock-ups permit to evaluate the results for each single material, without the complications of heterogeneous stratigraphies).

According to this statement a group of case studies has been individuated among a larger project of conservation and restoration of 36 paintings on canvas coming from Racconigi Castle, considered significant for the complex stratigraphies and materials on the surfaces. This paintings

have been transformed in homogeneous series after strong interventions of reshaping, enlargement (sometimes with the use of canvas from other paintings), re-paintings, layering of different and considerable interventions on the surface (in materials and size, both on oil paint and on varnish). The Property, furthermore, declare its strong desire of knowledge about the series, due to the complex history and to the chronological and stylistic discrepancy, as well as the need to define consciously the guide lines of intervention.

The scientific campaign of analysis had as main objectives the evaluation of conservative state of original layers and the characterization of materials of intervention, looking for similarities among different works of art. In between the first structural intervention on the paintings (after condition reports) the first non-invasive scientific



tuali affinità materiche tra gruppi di opere. Contestualmente a una prima fase di recupero della stabilità strutturale (previa schedatura tecnica conservativa), sono state condotte, in modo sistematico, analisi non invasive, multispettrali e scientifiche, che hanno permesso di ottenere una panoramica generale dello stato di fatto di ciascuna opera e delle criticità presenti.

L'acquisizione delle immagini radiografiche in differenti condizioni² si è dimostrata estremamente utile e ha reso possibile la valutazione in tempo reale di molteplici caratteristiche (assemblaggi di supporti tessili di armatura, riduzione e filati differenti; disomogeneità di spessore, o assenza parziale, dello strato preparatorio; stratificazioni pittoriche) e il costante confronto dei risultati emersi con quanto verificato dai restauratori in sede di apertura dei primi tasselli di pulitura.

Indagini radiografiche.

Primi risultati funzionali all'intervento

Sebbene la campagna di analisi multispettrali e scientifiche non invasive puntuali (in particolare la fluorescenza indotta dai raggi X, XRF) abbia permesso una prima caratterizzazione dei materiali presenti e fornito una mappatura della localizzazione e

FIG. 1 Filippo I.
 A. Prima del restauro
 B. Particolare dell'analisi radiografica. Al di sotto della ridipintura si rileva la presenza di un trattamento pittorico differente, ove si identificano animali rappresentativi dello status del personaggio.

FIG. 1 Filippo I.
 A. Before restoration
 B. Detail of X-ray. Under the superficial pictorial layer is evident the presence of a different pictorial treatment; some animals (representative of the subject status) are visible.





distribuzione dei rimaneggiamenti più superficiali a carico delle pellicole pittoriche, la complessità di sovrapposizioni, nonché gli spessori variabili e le caratteristiche materiche dei rifacimenti, non hanno consentito una acquisizione di dati sufficiente alla corretta valutazione dello *status quo* della materia nascosta.

analyses have been conducted to obtain a general overview about the state of conservation of the paintings and to individuate the critical issues. The acquisition of radiographic images at different conditions² has proven useful in developing the intervention project and permitted the evaluation in real-time of specific characteristic (assembly of different canvas; differences in thickness or absence of the preparatory layer; pictorial layering), giving the restorers a chance of constant comparison of these results with the ones emerged in the first tests of cleaning intervention.

X-ray investigations. First results functional to define the line of intervention

The multi-spectral and scientific analyses (x-ray

A monte della definizione delle linee guida per l'intervento, rimanevano dunque irrisolti alcuni dubbi, già rilevati dai restauratori del Laboratorio Tele e Tavole del CCR: in fase di messa in sicurezza delle opere e test di resistenza ai solventi, infatti, si era osservata la compresenza di materiali eterogenei su ciascuna opera. Gli ampliamenti

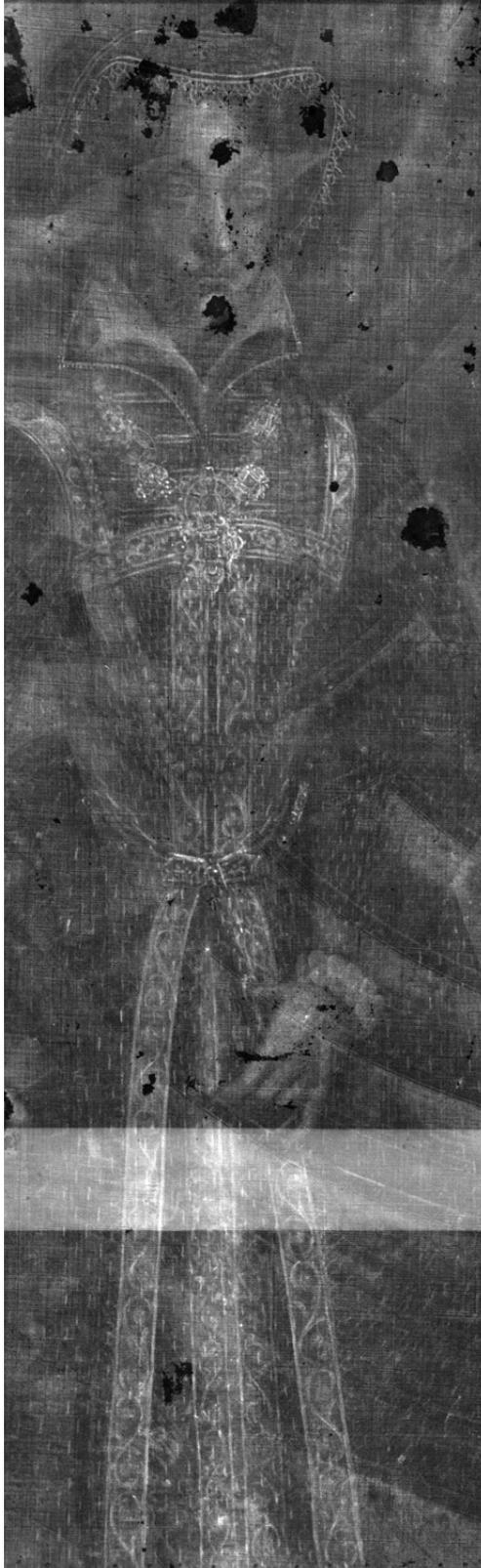
fluorescence, in particular) gave a first characterization of the materials (constitutive and of intervention) and an idea about their entity, in some cases permitting some hypothesis about the layering of materials on the surface. Their complex stratification, and their different nature and thickness, highlighted the necessity of new diagnostic analyses to have a complete evaluation on the *status quo* of the hidden original materials. The evidences of reshaping and of modifying were visible in the physical characteristic of supports (canvas of different weaving in each support, sometimes recovered from older paintings), and in the presence of heterogeneous materials in a single layer, with different thickness and incongruity of superficial roughness (declaring the

FIG. 2 Bona di Berry. A. Dopo il restauro. B. Analisi radiografica. In corrispondenza della porzione superiore si individua un tendaggio e in corrispondenza delle porzioni laterali si rileva un impianto architettonico (colonne), non visibili prima dell'intervento di restauro in quanto coperti da una pesante ridipintura.

FIG. 2 Bona di Berry. A. After restoration. B. X-ray. It's possible to focus on the presence of a hanging in the superior part of the picture, and in the lateral parts an architecture in the background is visible. Both are covered by a thick layer of painting.

FIG. 3 Ritratto di Ancilla, particolare dell'analisi radiografica. Si rileva, rispetto all'immagine in luce visibile, un trattamento pittorico differente della veste del personaggio rappresentato, coperto a causa di cambiamento di status sociale (vedovanza).

FIG. 3 Portrait of Ancilla, detail of X-ray. A different pictorial treatment is visible in correspondence of the dress, changed in line with a social status change of the subject (widowhood).



presence of hidden different pictorial treatments) localized in the portions restored more times. The traditional procedure in intervention suggest the restorers to proceed with caution even if it forces them to explore in empirical way the nature of materials using tests of resistance to heat, humidity and solvents, to individuate the correct processes to remove gradually the superficial layers, trying to attribute (at least in hypothesis) each layer to a specific moment of intervention, evaluating the nature of materials relating the answers to the different solvents. This preliminary operations regard the intervention practice, but

ti, oltre a presentare differenze di tessitura in più porzioni di supporto, in alcuni casi, dopo risultavano ottenuti attraverso porzioni di recupero; si registravano inoltre differenze (sia per materiali costitutivi sia per spessore) nell'ambito di uno stesso strato, non solo in preparazione (totale, localizzata, o assente), ma anche in pellicola pittorica, con vistose incongruenze nella rugosità superficiale all'osservazione in luce radente e transilluminazione (fattori dichiaranti la presenza di trattamenti pittorici sottostanti, a volte anche di morfologia differente) e spessori anche sostanzialmente differenti in corrispondenza delle porzioni maggiormente rimaneggiate.

La prassi operativa tradizionale, in questi casi, spesso costringe gli operatori a esplorare empiricamente la natura dei materiali su cui intervenire, conducendo, a seguito dei test di resistenza a calore e umidità, test di solubilità per l'individuazione della corretta miscela solvente e la contestuale rimozione (graduale e differenziata) degli strati soprammessi alla pellicola pittorica, in modo da ricondurre (almeno in ipotesi) ogni strato a uno specifico momento di intervento nella storia dell'opera. Sebbene queste operazioni preliminari rientrino a pieno titolo nella prassi di intervento, i dati emersi e, in particolare, l'apertura di tasselati di pulitura esplorativi forniscono informazioni solo parziali circa lo stato generale della superficie interessata e non permettono una valutazione complessiva a priori dello stato di conservazione generale della materia sottostante.

Tenuto conto di tali problematiche, nonché della necessità di definire livelli di intervento in linea con le richieste della Direzione Lavori³, la possibilità di condurre test radiografici preliminari ha fornito un ulteriore margine di riflessione e permesso di "fotografare" opere come veri e propri *collages*, sporadicamente solo per ciò che riguardava i supporti tessili, nella maggior

the data emerged, especially in cleaning tests, give only a partial information about the characteristic of the hidden surface and about its general state of conservation.

Considering that as a problematic point, and taking into account the definition of a correct level of cleaning following the Supervision of Works requests³, the chance to realize radiographic analysis gave an ulterior point of reflection, permitting to document these work of art as *collages* made of different canvas supports and different pictorial treatments.

In general it has been identified a consistent in-

parte dei casi anche per le stratigrafie pittoriche.

In generale è stato possibile individuare un consistente intervento, antico, di armonizzazione come serie omogenea a carico delle pellicole pittoriche più antiche, adeguate alle necessità di quadreria e alle caratteristiche delle opere di più recente fattura (a questo contemporanee), con la sovrapposizione di campiture di fondo pressoché monocrome, a copertura di fondali drasticamente differenti tra loro (architettonici o paesaggistici) o di scritte antiche, sostituite con la ridipintura (o totale aggiunta, come ampliamento, di supporto tessile) delle porzioni inferiori, trasformate in iscrizioni identificative dei soggetti rappresentati⁴.

Si sono inoltre riscontrati strati di intervento differenti, quali completi rifacimenti con variazioni iconografiche significative, a volte indicativi di un cambiamento di status politico/sociale del personaggio rappresentato, più frequentemente da attribuire alla volontà di occultamento di fondali paesaggistici con presenza di animali penalizzati da ridimensionamenti o compromessi per stato di conservazione⁵.

Valutazione del contributo delle analisi condotte. Casi studio significativi

Condotti i necessari approfondimenti su stato di conservazione e morfologia degli strati più interni della pellicola pittorica grazie alle radiografie, i risultati emersi hanno orientato la Direzione Lavori su specifiche scelte in relazione ai singoli casi (sulla base dello stato di conservazione e sulla possibilità di restituzione estetica fruibile da un pubblico non informato), a privilegio, laddove possibile, della materia originale. Frequentemente la scelta ha riguardato la sola rimozione di ridipinture frutto di successioni manutentive o riconducibili alla volontà di inquadramento delle opere in una serie omogenea, in quanto

intervention, ancient, finalized to the restitution as an homogeneous series of the original pictorial treatments, adjusted to the necessity of the collection and to the works of art present in the series: we can connect this intervention to the monochrome re-paint of architectures and landscapes, and to the identification of inscriptions localized in those portions⁴. We also found intervention layers to be attributed in some cases to a will of change in iconography (contextual to a change of social/religious/politic state), in more occasion to hide figures or landscapes penalized by the ancient reshaping or too fragmentary⁵.



Fig. 4 Umberto III.
A. Particolare dei tasselli di pulitura esplorativi.
B. Analisi radiografica.



Fig. 4 Umberto III.
A. Detail: explorative cleaning tests.
B. X-ray.

compromettevano la piena godibilità del soggetto rappresentato, che risultava ritagliato nei profili e cambiato, in alcuni casi, nell'impostazione prospettica⁶ (FIGG. 1-3). Meno frequentemente si sono riscontrati stravolgimenti iconografici: in questi casi si è creduto opportuno il mantenimento dei rifacimenti e la conseguente documentazione accurata dello *status quo* dello strato sottostante.

Nel caso del ritratto di Umberto III il Beato si è osservata una differenza, visibile in RX,

nella morfologia e nella cromia della veste (FIG. 4); per il ritratto di Ancilla, invece, la radiografia ha evidenziato una netta differenza materica tra porzione originale (superiore), più spessa e ove si riscontrava per la veste un trattamento pittorico diverso, e la porzione di ampliamento (inferiore), ove si è rilevato il solo strato visibile (veste vedovile), discrepanza ipotizzata in sede di osservazione in luce trasmessa e, successivamente, di acquisizione puntuale degli elementi presenti in sede di analisi scientifica XRF, ma difficilmente documentabile e verificabile senza analisi più approfondite. Nonostante la volontà di recuperare i trattamenti pittorici originali, in entrambi i casi si è ritenuto opportuno mantenere le ridipinture (FIGG. 4-5). L'indagine radiografica condotta sul ritratto di Beatrice di Ginevra inoltre ha contribuito, con la verifica dell'assenza di strati sottostanti, all'eliminazione di dubbi emersi in sede di osservazione e studio stilistico del dipinto: l'opera, a firma di Vittorio Amedeo Grassi (pittore restauratore settecentesco) lasciava spazio a due ipotesi differenti, ovvero il rimaneggiamento di un'opera più antica o la riproduzione *ex novo* dello stesso soggetto. L'assenza di tracce di trattamento pittorico sottostante ha spinto la Direzione Lavori a una più approfondita ricerca in archivio e nei depositi afferenti alla sede originaria di conservazione del dipinto, conclusasi con il ritrovamento del modello originale del soggetto duplicato da Grassi e oggetto di intervento nell'ambito del progetto⁷.

In altri casi le analisi radiografiche condotte hanno permesso di definire con maggiore precisione l'entità dei degradi a carico della materia pittorica sottostante, suggerendo il mantenimento dello *status quo* dell'immagine, con una semplice revisione della superficie pittorica (FIG. 6). In questi casi si è proceduto, dopo la rimozione del particolato atmosferico e dello sporco grasso coerente alla superficie, con l'assottigliamento graduale dei ritocchi più recenti e dello strato protettivo alterato, mantenendo le porzioni di ridipintura più antiche in corrispondenza delle anatomiche, frammentarie in strato originale.

Infine si è evidenziata un'ulteriore casistica, dove si sono individuate successioni di lievi ma diffusi rimaneggiamenti con colori a olio, anche antichi, stesi direttamente sulla pellicola pittorica e sulle prime ridipinture, a modifica ogni volta parziale delle anatomiche dei volti e delle vesti, oltre ai fondali rappresentati. In particolare, il ritratto di Filippo II ha permesso di evidenziare un

FIG. 5 Carlo III.
A. Particolre dopo il restauro.
B. Analisi radiografica.

FIG. 5 Carlo III.
A. Detail after restoration.
B. X-ray.





palinsesto compositivo eterogeneo, ottenuto con ritagli di tele dipinte di differente fattura, funzionali al ridimensionamento del soggetto in armonia con il resto della serie. In tale sede sono state assemblate tele di differente cromia (una fascia laterale di colore rosso, evidentemente proveniente da un altro dipinto, probabilmente porzione di un tendaggio, una seconda fascia laterale, di minori dimensioni, una fascia inferiore recante la scritta identificativa del soggetto),

FIG. 6 Filiberto II.
 A. Prima del restauro.
 B. Analisi radiografica.
 Si osservi in particolare quanto emerso in corrispondenza del trattamento pittorico del tavolino, al di sotto del quale in origine era un baule. In sede di intervento si è creduto opportuno mantenere la ridipintura corrispondente a causa del pessimo stato di conservazione della materia sottostante.

FIG. 6 Filiberto II.
 A. Before restoration.
 B. X-ray. Focus on the evidence of great degradation of the lateral portion in the original layer: in the superficial pictorial treatment there is a small table but it hides a chest under the superficial layer. During the cleaning intervention the degradation of the

original material has been considered high, and it has been decided to maintain the superficial layer.

Evaluation of the analyses contribution. Significant case studies

The results of X-rays suggested the Supervision of Works to define specific choices related to single cases (considering the state of conservation of each work of art and the possibility to propose a legible image to a uneducated public), endorsing, when possible, the original layer. In many occasions the choice focused on a removal of the pictorial restorations' sequence finalized to obtain homogeneous series, because of their low quality and their interference with the subject represented, often cut in profiles and simplified in perspective⁹ (FIGS. 1-3). In some occasions we found iconographic twisting, representative, as said before, of important histori-

cal changes in political or social positions: in those cases it seemed opportune the maintenance of the changes, and the consequent documentation of the hidden layer, because considered representative of their history. Specifically the portrait of Umberto III presented a difference in the treatment of the dress, not only in the morphology (visible in x-ray) but also in the colour (visible during the cleaning tests). The Ancilla portrait's X-ray, on the other hand, underlined a difference between the superior portion (original), thicker and composed by two different pictorial treatments on the dress, and the inferior one (due to an intervention), where it has been found only the visible pictorial treatment (widowhood dress). This



Fig. 7 Filippo II.
 A. Prima del restauro.
 B. Analisi radiografica.
 Si osservi in particolare la porzione laterale sinistra, ove emergono il paesaggio alle spalle del personaggio e lo scudo crociato in basso, non visibili in luce naturale, oltre a un vistoso ripensamento del trattamento pittorico del leone.

Fig. 7 Filippo II.
 A. Before restoration.
 B. X-ray. Focus on the left part of the picture, where it is possible to see a landscape in the superior part, the Savoy' shield and a change in pictorial treatment of the lion.

successivamente ridipinte per garantire una lettura lineare dell'immagine. La radiografia ha inoltre permesso di individuare alle spalle del soggetto rappresentato un dettagliato paesaggio e la presenza, in corrispondenza della porzione inferiore, dello scudo crociato rappresentativo di Casa Savoia (FIG. 7).

difference, supposed during the documentation in transmitted light and during the XRF analyses but not documentable without additional investigation, has been certified with X-rays. The Supervision of Works decided to maintain those intervention in both cases, despite the wish to recover the original pictorial treatments (FIGS. 4-5). The X-rays on Beatrice di Ginevra portrait contributed, in a different way, to solve some stylistic doubts revealing the absence of hidden pictorial layers. The observation of this painting, signed by Vittorio Amedeo Grassi (a 17th century painter-restorer from north Italy), raised up two different hypothesis on its origin: it could be the result of a restoration by Grassi himself on an ancient painting, or it could be a copy (by his

Criticità e ambiti di approfondimento

Uno dei vantaggi di questo nuovo sistema radiografico digitale consiste nella visualizzazione in tempo reale dell'immagine, direttamente in fase di acquisizione, permettendo così di focalizzare l'attenzione su porzioni specifiche della stratigrafia in

hand) of an ancient portrait used as a model; the absence of layers under the visible pictorial treatment suggested the Supervision of Works to start a new research (in archive and in the Racconigi's storage), concluded with the finding of the ancient painting used as a model by Grassi⁷. In other cases X-rays permitted to define precisely the level of degradation of the constitutive materials, suggesting a no-intervention and a simple refreshing of the image in cases of high degradation, avoid an empirical evaluation of the general state of conservation just from localized cleaning tests (FIG. 6). In those cases the intervention considered only the superficial cleaning of the varnish from dust and greasy dirt, and a consequent gradual removal

analisi. La possibilità di rielaborare virtualmente l'immagine aumentando o riducendo i contrasti in scala di grigi consente di isolare, senza quasi interferenza di altri strati, il livello della stratigrafia di specifico interesse, permettendo così la produzione di più immagini rappresentative (supporti tessili, strati pittorici più interni, strati pittorici superficiali), utili sia alla mappatura dello stato di fatto di ciascuna porzione, sia alla valutazione delle corrispondenze dei singoli degradi, con una graduale sovrapposizione delle immagini. Inoltre, l'alta risoluzione dell'immagine restituita permette ingrandimenti significativi, con la possibilità di verificare le caratteristiche dei supporti tessili originali anche in presenza di foderature totali o parziali (riduzione, armatura) e di dettagliare i più lievi cambiamenti di impostazione dell'immagine⁸. Il confronto con i dati raccolti in occasione dei test su campioni ha agevolato la comprensione di alcune criticità emerse e, in particolare, di esempi in cui la radiografia non ha consentito la netta individuazione di porzioni cromatiche, sebbene presenti (come verificato in sede di rimozione delle sostanze sovrammesse): nella maggior parte dei casi si trattava di campiture a base di terre, di spessore sottile, spesso abbinata a strati preparatori contenenti biacca.

of the recent altered retouching and the recent varnish, maintaining the ancient intervention over an original layer damaged and fragmentary. Finally has been highlighted sequences of light changes of the images made by ancient re-paintings whit oil colours directly on the original layer or on the first interventions, each time modifying details of anatomies and dresses, and of the backgrounds. In particular the portrait of Filippo II permitted to individuate an heterogeneous composition, made of pieces of ancient paintings, and re-painted to be in line with the other paintings series. Specifically it presented differences in the colour layer of the pieces of canvas (a lateral red stripe, probably coming from a pictorial description of an hanging, a second lateral one, and a third, in the inferior portion, with the identifying inscription of the subject), that were treated to obtain an harmonious image. Radiography furthermore individuated a landscape on the background of the subject and a shield, symbol of Savoy House (FIG. 7).

Criticality and follow-up ranges

We can affirm that one of the advantages of this new radiographic system consist in the immediate acquisition of the image, permitting to focus the attention on specific stratigraphic portions. The chance of editing images working on the grey scale, brightness and contrast gives the precious opportunity to isolate, more or less without interference of other layers, the portion to be analysed, and to produce different images of single layers (supports, internal or superficial pictorial layers),

I risultati delle prove sperimentali hanno mostrato una sostanziale differenza della risposta rispetto ad almeno tre differenti variabili, ovvero presenza di pigmenti a base di metalli pesanti, densità degli elementi e spessore della stesura. Nel dettaglio si è rilevata una sostanziale radiopacità per stesure a base di mercurio, piombo, antimonio e cadmio, dato riscontrato anche in occasione della difficoltà di lettura delle opere di Racconigi che presentavano strati pittorici con campiture a base di terre su preparazioni con alte percentuali di bianco di piombo; la presenza di cadmio in ridipintura, inoltre, ha rappresentato una ulteriore complicanza. Il dato relativo allo spessore del materiale è da considerare significativo, specie se rapportato a opere con una storia conservativa complessa, dove lo stato di conservazione della pittura presenta diffuse abrasioni o consunzione della materia da attribuire a precedenti puliture troppo aggressive. Tenuto conto della non interferenza del supporto tessile con la lettura degli strati superficiali, confermata dai risultati di un'ulteriore campagna di acquisizione su provini, realizzata in sede di tesi triennale, è apparso di estremo interesse un approfondimento su campioni rappresentativi di strati preparatori ottenuti con differenti mi-

useful both to mapping the state of each part and to evaluate the connection between degradations in different layers, gradually over-lapping the images obtained. Furthermore the high quality of the image permits significant magnifications and gives the chance to verify the material characteristic of original canvas supports even if in presence of new supports of restoration, and to detail even light changes in the resolution of the image⁸.

The comparison between the data obtained in the experimental step on mock-ups, then, permitted the comprehension of some problems focused during the analysis on real cases, when the X-rays didn't reveal the presence of hidden pictorial layer even if present (as verified in cleaning intervention): most of cases were portions with earth pigments, thin thickness, often posed on layers with lead-based pigments in the mix. The experimental tests confirmed that it does exist a significant difference in the x-ray irradiation answer based on three variables, such as the presence of pigment with heavy metals inside, the density of the layer, and its thickness.

In detail a strong radiopacità has been individuated on mock-ups based on mercury, lead, antimony and cadmium, as we found also for the not so easy rendering for some Racconigi cases, where we found pictorial layers based on earth pigments and prepared with high percentage of lead-based pigment; the presence of cadmium in the superficial layers (recent restorations) represented an ulterior difficulty.

Also the evidence of the thickness of the layers

scele di pigmenti, di spessore variabile, misurabili; i risultati, ancora in corso di elaborazione, potrebbero integrare in misura interessante la banca dati relativa alle stesure di colori puri⁹. In linea generale, sembra plausibile considerare, a parità di spessori, la minore interferenza di stesure preparatorie a base di argille (bolo, caolino) rispetto a quelle ottenute per miscela di pigmenti in olio, verosimilmente più radiopache e, almeno parzialmente, più interferenti con i materiali pittorici immediatamente successivi, specie se di spessore sottile.

Conclusioni

Il caso studio della serie di ritratti di Casa Savoia, per complessità delle scelte metodologiche condotte e compresenza di materiali tanto eterogenei da richiedere una definizione delle procedure di intervento anche *in itinere*, ha rappresentato un'enorme opportunità di studio e approfondimento per i restauratori e gli studenti coinvolti, oltre a stimolare ampie riflessioni circa i meccanismi di degrado dei differenti materiali sovrapposti. Il contributo delle analisi radiografiche condotte è stato sostanziale per procedere con consapevolezza nella fase di pulitura e restituzione estetica delle opere¹⁰. È opportuno sottolineare in conclusione il ribaltamento della funzione delle analisi radiografiche: laddove la definizione dell'immagine ottenuta permettesse una lettura agevolata della materia originale, in presenza di interventi di restauro storici significativi, l'immagine radiografica potrebbe rappresentare un'alternativa alla rimozione di strati di intervento, nell'ottica del minimo intervento possibile.

should be considered important, especially in case of works of art compromised by a high level of degradation, where original materials present a strong consumption (probably due to older intervention of cleaning).

Considering the absence of interference by the canvas support in reading the surface layers, confirmed by another tests conducted on mock-ups for a triennial thesis, appeared to be interesting another test on mock-ups, representative of different types of ground layers, in variable thickness and measurable; the data, in elaboration, should integrate with data coming from the samples of pure colours⁹: in general it seems probable to consider, in case of similar thicknesses, the minor interference of ground layer based on clay in comparison with the ones obtained mixing different pigments in oil, probably strongly interfering with pictorial layers, especially if thin in thickness.

Note tecniche

TENSIONE ANODICA: 90 kV

CORRENTE ANODICA: 10 mA

VELOCITÀ DI SCANSIONE: 1 m/min

¹ E. CROCE, *Radiografia digitale per l'analisi dei beni culturali: caratterizzazione della strumentazione per applicazioni su stesure pittoriche*, tesi triennale in Scienza e Tecnologie per i Beni Culturali; S. BARBIERO, *Radiografia digitale applicata ai beni culturali: caratterizzazione della strumentazione per le analisi pittoriche*, tesi triennale in Scienza e Tecnologie per i Beni Culturali (relatori di entrambe: A. RE e A. LO GIUDICE).

² In particolare si è agito su tensione e corrente della sorgente e sulla velocità di scansione del detector.

³ Specifically source's voltage and current and detector's acquisition speed were setting up.

⁴ Si rimanda al contributo di Roberto Medico in merito alle scelte metodologiche del restauro.

Please refer to the contribution made by Roberto Medico on the methodological choices and objectives pursued on the occasion of the restoration.

⁵ Anche in corrispondenza di tali porzioni, già frutto di un intervento successivo per uniformare la serie di opere, si sono riscontrate successioni di stesure a correzione delle iscrizioni, fino a un numero di tre livelli differenti, a volte solo a saturazione di uno stato conservativo frammentario, a volte con il completo cambiamento della lingua dell'iscrizione, altre volte invece a specificare la discendenza o, nel caso dei ritratti femminili, l'unione con un esponente di casa Savoia.

It's really significant the presence of different pictorial layers also in the inferior portions of the paintings, modified probably during the ancient intervention to give a sense of celebration to the portraits: each new identifying inscription present at least three different layers, sometimes due to a bad state of conservation, sometimes to a need of change in language or in social state (lineage or marriage). This evidence may be useful to understand the complex succession of interventions individuated on these paintings.

⁶ Filippo I e Filiberto I (oltre ad Ancilla e Amedeo III) sono i due casi più eclatanti, dove, al di sotto di ingenua e schematiche rappresentazioni paesaggistiche, si è individuata la presenza di animali evocativi dello status dei personaggi (cani da caccia) e di paesaggi (nel caso di Filippo I) riconducibili a scorci di città amministrata dall'effigiato.

Conclusions

The Racconigi portraits case studies represented a great occasion of study and follow-up for the professionals involved in the project; furthermore it stimulated new considerations about degradation mechanism between heterogeneous materials when arranged in stratigraphy; thanks to this co-existence it has been necessary to define the intervention processes *in itinere*, considering the different answers of materials to treatment tests.

The contribution of X-rays analysis has been essential to proceed in a correct and conscientious way in cleaning and in pictorial integration phases¹⁰.

We consider necessary to reflect on a double function of X-rays: were the obtained image could permit an easier reading of hidden layers, in case of significant historical intervention of restoration, it should represent an important alternative to layers removal, following the idea of minimum intervention.

Filippo I e Filiberto I are interesting examples of this process: under elementary landscapes we found animals, sometimes symbol of a politic quality (dogs) or landscapes referring to real places (Filippo I) managed by the person represented.

⁶ Filippo I; Filiberto I; Amedeo VII; Bona di Berry.

⁷ Si sono osservate esclusivamente aree trattate al di sopra dello strato protettivo, traccia di interventi successivi di adeguamento delle porzioni abrase di pellicola pittorica originale, documentate con riprese fotografiche in luce UV.

The portrait object of intervention presented only restoration on the varnish layer and on the pictorial surface to hide abrasions of the original material, as the UV analysis highlighted.

⁸ La possibilità di ingrandire dettagli e produrre singole stampe dell'immagine assemblata e degli specifici dettagli di interesse può rivelarsi utile sia per il monitoraggio dell'intervento, sia per una condivisa valutazione dell'opportunità di rimozione con la Direzione Lavori in sede operativa.

The chance to enlarge details, and to produce single prints of what considered of interest should be useful in monitoring the intervention and in discussing different solutions of intervention with the Supervision of Works.

⁹ In occasione di tale sperimentazione, che sarà argomento di approfondimento per una tesi triennale, si è creduto opportuno riprodurre, tra le altre, almeno tre tipologie

riscontrate anche in sede operativa sulle opere di Racconigi, tra cui preparazioni argillose e a base di pigmenti con metalli pesanti, in modo da verificare l'effettiva differenza di risposta anche in occasione di miscele di più materiali.

The occasion of this third experimentation on mock-ups will be object of a new triennial thesis; we considered useful to realize three of the typical stratigraphic sequence found on some Racconigi paintings, trying to verify the effective difference in case of different materials mixing.

¹⁰ A conclusione di tutto il progetto è emersa l'opportunità di condurre analisi radiografiche a monte dell'intervento specie in caso di serie numerose di opere, in modo da integrare i risultati delle più frequenti analisi multispettrali e individuare preventivamente eventuali criticità. Per i dipinti di Racconigi, disallestiti in forma programmata per piccoli gruppi di opere, è stato possibile arrivare a una valutazione complessiva della stratificazione degli interventi solo a conclusione del progetto.

In the final part of the project rose up the opportunity, for the future, to proceed with radiographic analysis before defining the intervention processes and objectives, especially if in presence of numerous works of art belonging to the same collection; in this way it should be possible to individuate in advance the criticalities. A total evaluation on the Racconigi portraits' cases, turned over in small groups of works for the second part of the intervention, it has been possible only in the final part of the project.



Cassettone a ribalta con scansia a due ante (“Doppio corpo”)

Pietro Piffetti (Torino, 1701-1777)

XVIII SECOLO, SECONDO QUARTO

Legno intagliato, lastronato con legni, avorio, tartaruga, madreperla.

Filettature in ottone. Ornamenti in legno scolpito e dorato.

Decorazioni metalliche sbalzate. Specchi. Tessuto interno.

Misure totali: 312x128x62 cm; misure ribalta: 102x119,5x60 cm

Roma, Palazzo del Quirinale, inv. PR 373; DP 1668

Studio e restauro del “Doppio corpo” al CCR

Luisa Morozzi

L'occasione dell'esposizione nel 2011 alla mostra “La Bella Italia” del prezioso “doppio corpo” di Pietro Piffetti, oggi nelle raccolte della Presidenza della Repubblica, ha dato luogo all'iniziativa del suo restauro, promosso dal consigliere per la Conservazione del Patrimonio Artistico prof. Louis Godart con la direzione scientifica della scrivente, eseguito dal Centro per la Conservazione e il Restauro dei Beni Culturali “La Venaria Reale”¹. L'Istituto di Venaria nel mettere in campo le eccellenze del restauro e le innovative metodologie di indagine si è affermato come valido centro di riferimento per lo studio e il restauro degli arredi di ebanisteria piemontese e in particolare delle opere di Piffetti. La collaborazione avviata tra il Segretariato Generale della Presidenza della Repubblica e il Centro di Venaria per la messa a punto di una metodologia di intervento che ha fatto appello alle professionalità e alle competenze a lungo maturate nel settore del restauro del mobile trova pienamente ragione nell'auspicabile prosecuzione del progetto di studio e intervento conservativo sugli altri quattro importanti manufatti del minusiere piemontese conservati nel Palazzo del Quirinale: i due cassettoni con le placche eburnee istoriate e la superba coppia di piedistalli terminati nel 1737, un tempo destinati a sostenere due gruppi scultorei in avorio (*Ratto di Proserpina* e *San Michele arcangelo*) oggi dispersi, ricordati nel 1805 nella Galleria del Beaumont nel Palazzo Reale di Torino.

In epoche precedenti diversi interventi e manutenzioni aveva subito il “doppio corpo” riguardanti la finitura e le dorature, incollaggi di tessere d'avorio e madreperla

sollevate, probabili rimaneggiamenti o aggiunte come il coronamento dorato forse non originale e la messa in opera del rivestimento tessile in raso blu all'interno delle scansie, già documentato nell'inventario del 1860. Problemi si sono presentati sotto il profilo delle scelte di metodo rispetto alla policromia degli avori e alle vernici di finitura. L'esperienza maturata dal laboratorio di Venaria, che aveva eseguito il restauro del mobile “gemello” della Fondazione Accorsi-Ometto, ha consentito di affinare le metodologie adeguate da applicare per l'intervento sul mobile del Quirinale. L'applicazione di indagini altamente tecnologiche ha permesso di confrontare i dati emersi con quanto era stato acquisito nel corso delle precedenti campagne di restauro su arredi di Piffetti, provenienti dai musei torinesi e nazionali. Le tecnologie sperimentali avanzate come la tomografia computerizzata (TAC) hanno apportato informazioni importanti sulla struttura del mobile, sul suo stato di conservazione e sui materiali costitutivi. Le indagini diagnostiche correlate hanno potuto verificare le metodologie operative del Piffetti: dall'analisi dei materiali preziosi si è riscontrato il disegno preparatorio sottostante in corrispondenza del petalo di un fiore intarsiato in avorio – tecnica frequentemente impiegata in altre opere dell'ebanista – così come si è potuto individuare l'espedito tecnico, utilizzato anche in altri mobili, dell'impiego di un foglio di carta dipinto con pigmenti al di sotto delle scaglie di tartaruga.

La formazione professionale di Pietro Piffetti rimane per il momento non ancora precisamente delineata in assenza di tracce documentali. Il tirocinio a Roma con il fratello

Pietro Piffetti, “Doppio corpo”, Roma, Palazzo del Quirinale, dopo il restauro.

Pietro Piffetti, “Doppio corpo”, Roma, Palazzo del Quirinale, after restoration.

Francesco probabilmente nel terzo decennio del Settecento gli dette modo di apprendere modalità costruttive e decorative di ebanisti francesi e intarsiatori olandesi nell'abilità di impiegare una grande varietà di legni esotici, oltre all'avorio, la madreperla e la tartaruga, per la fabbricazione di veri capolavori². Nel 1731 Piffetti rientra a Torino e il 13 luglio di quell'anno viene nominato «primo ebanista» del re Carlo Emanuele III di Savoia. Il complesso capolavoro di ebanisteria del Quirinale pur se non documentato dalle antiche carte fu approntato per la corte sabauda, come testimoniano gli inventari del Palazzo Reale di Torino (1811) e del Castello di Moncalieri risalenti agli anni 1848-50, 1860 e 1880³. Prima del definitivo trasferimento a Roma – avvenuto fra il 9 agosto e il 20 settembre 1888 in occasione della sistemazione dell'appartamento al Quirinale per il soggiorno dell'Imperatore Guglielmo II di Germania – il mobile sostò per un breve lasso di tempo nel palazzo di Amedeo di Savoia duca d'Aosta. Il prezioso manufatto tornò nuovamente a Torino nel 1963 quando fu esposto al Palazzo Reale in occasione della grande mostra sul Barocco Piemontese, curata da Vittorio Viale.

Gli studi recenti hanno posto in relazione l'arredo con un documento di pagamento del 1789 per un restauro effettuato dall'ebanista torinese Giovanni Battista Galletti⁴. Questi si fece carico del trasporto e montaggio del mobile al Palazzo Reale di Torino, del restauro nella sua bottega e poi di nuovo del trasferimento del prezioso arredo all'Appartamento Reale della Reggia di Venaria. Alla luce della lettura di quel documento, è stata ipotizzata una sua originaria collocazione nell'appartamento reale di Venaria, completamente rinnovato nel 1737 in concomitanza con le terze nozze di Carlo Emanuele III⁵. Il mobile viene probabilmente restaurato nuovamente nel 1838 quando l'ebani-

sta Giuseppe Boeri riceve un pagamento di 572,10 lire per «aver riparato, e messo in nuovo una scrivania libreria, e zoccolo del Piffetti. Cioè tre membri placati in avorio d'india, e tartaruga mancanti di molti pezzi d'ogni sorta con dodici e più tirattori al didentro averla rigravata intieramente tanto figure fiorami e scritte averla ripollita e messa in nuovo»⁶. Il riferimento alle «scritte» ha fatto ipotizzare che si tratti proprio del nostro cassettoncino.

La ricerca delle fonti iconografiche impiegate dal Piffetti per lo straordinario apparato decorativo con placche d'avorio rappresentanti scene allegoriche e iscrizioni ha mostrato che le nove scene istoriate, accompagnate da ottave, sono ispirate dagli *Emblemata* oraziani⁷. La maggior parte dei disegni per le vignette del cassettoncino a ribalta è tratta dalle incisioni del pittore fiammingo Otto Vaenius (1556 c.-1629) inserite nella successiva edizione delle massime oraziane, commentate dal poeta genovese Pietro Benedetti (1612)⁸. Nel fastoso mobile del Quirinale l'intricato concatenarsi di fitte trame decorative dipendenti da modelli di ornato francesi e tedeschi si compone in un linguaggio già in chiave rococò venato da accenti propriamente piemontesi nell'impiego delle scenette istoriate, disposte secondo un severo programma di esortazioni morali, corroborate da scritte in latino e italiano. La collocazione cronologica intorno al secondo quarto del XVIII secolo per il prezioso arredo, forse destinato a un sovrano - Carlo Emanuele III o il futuro Vittorio Amedeo III, nato nel 1726 - è suggerita dal raffronto con il mobile di simile modello della Fondazione Accorsi-Ometto di Torino, firmato e datato "Petrus Piffetti inve./fecit et sculpsit/ Taurini 1738", connotato da un partito decorativo meno stupefacente e da un numero minore di placche eburnee istoriate con scene attinenti al tema nuziale⁹.

The exhibition "La Bella Italia", held in 2011 in the Royal Palace of Venaria, was the opportunity to promote the restoration of the "Doppio corpo" by Pietro Piffetti, now in the collections of the Presidency of the Republic. The Conservation and Restoration Center of Venaria has fielded the excellence of the restoration and innovative survey methodologies for the study of the Piedmont cabinet-making and in particular of Piffetti's works.

The "Doppio corpo" has undergone in the past several interventions of maintenance and restoration. The artwork presented some problems about methodology of intervention regarding the polychrome ivory and the varnishes. The experience gained by the CCR, that restored also the "Doppio corpo" of Accorsi-Ometto Foundation, was useful to find the appropriate methodologies to be applied to the

Quirinale furniture. The high-tech investigations have allowed us to compare the data obtained with what was acquired during the previous restoration of Piffetti's furniture. Advanced experimental technologies such as computed tomography (CT) have supplied important information about the structure of the furniture, its state of conservation and constituent materials. Diagnostic studies have also clarified the executive technique of Piffetti: through analysis of precious materials it was found the preparatory drawing under the petal of an ivory flower – as frequently used in other works of the cabinetmaker; it was also possible to identify the technical device, frequently used in other pieces of furniture, of a painted sheet of paper applied below the tortoiseshell.

¹ L. MOROZZI, scheda 3.2.10 (P. Piffetti, *Cassettone a ribalta con scansia a due ante*), in *La bella Italia. Arte e identità delle città capitali*, catalogo della mostra a cura di A. PAOLUCCI (Reggia di Venaria, Scuderie Juvarriane, 17 marzo-11 settembre 2011), Milano 2011, p. 172.

² A. GONZÁLEZ-PALACIOS, *Pietro Piffetti: nuove idee e vecchie parole*, in *Un capolavoro di Pietro Piffetti*, Torino 2010, pp. 11-12.

³ L. MOROZZI (a cura di), *Gli Appartamenti imperiali nella Manica Lunga*, Il Catalogo delle opere d'arte del Quirinale. I, Roma 1998, pp. 205-208, n. 45.

⁴ 2 giugno 1789: «per aver trasportato al R.le Palazzo la Scrivania, e scansia del fu Piffetti con averla smontata, e tornata a montare al detto Real Palazzo in compagnia di tre garzoni, e quattro uomini [...] Per averla ritornata a smontare, e trasportata alla mia bottega [...] Per aver aggiustato la Scrivania suddetta e Scansia con averla lustrata e pulita e rapportato n. 30 ovalini di Madreperla, ottone ed avorio, ebano, e violetto mancanti alla medesima [...] Per essermi trasferito da questa città all'appartamento della Venaria R.le in compagnia di due garzoni per ivi collocare, e situare la suddetta Scrivania e Scansia. ». Cfr. G. FERRARIS, A. GONZÁLEZ-PALACIOS, *Pietro Piffetti e gli ebanisti a Torino 1670-1838*, Torino 1992, pp. 90-94, 241.

⁵ S. GHISOTTI, C.E. SPANTIGATI, *Mestieri preziosi alla corte dei Savoia*, in *La Reggia di Venaria e i Savoia. Arte, magnificenza e storia di una corte Europea*, catalogo della mostra a cura di E. CASTELNUOVO, Torino 2007, vol. I, p. 309.

⁶ R. ANTONETTO, *Il mobile piemontese nel Settecento*, Torino 2010, vol. I, p. 215, nota 4.

⁷ A. CIFANI, F. MONETTI, *Fonti iconografico-letterarie e metodologia di lavoro dell'ebanista torinese Pietro Piffetti. Contributi documentari per la sua vita e scoperte per il cassettone a ribalta del Palazzo del Quirinale ed altri mobili*, in «Bollettino d'arte», XC, 2005, n. 131, pp. 23- 52.

⁸ Gli *Emblemata* ebbero numerose ristampe dopo la prima edizione (Antwerp 1607). Piffetti utilizzò l'edizione seguente, che riproduce i versi di Pietro Benedetti (O. VAN VEEN, *Quinti Horatii Flacci Emblemata: imaginibus in aes incisus, notisque illustrata studio Othonis Vaeni*, Antwerp 1612). Dal medesimo volume trasse ispirazione per altre creazioni successive: la scrivania, firmata e datata nel 1741, del Museo Correr di Venezia e il tavolino da studio, firmato e datato nel 1758, del Museo Civico di Torino.

⁹ A. CIFANI, F. MONETTI, *Pietro Piffetti fra il Quirinale e la Fondazione Accorsi*, in «Il Quirinale. Rivista di Arte e Storia», VI, 2010, n. 9, pp. 93-112.

Pietro Piffetti, "Doppio corpo", Roma, Palazzo del Quirinale, particolare dopo il restauro.

Pietro Piffetti, "Doppio corpo", Roma, Palazzo del Quirinale, detail after restoration.



La tomografia computerizzata applicata agli arredi lignei di ebanisteria: il “Doppio corpo” di Piffetti del Quirinale

Computed tomography applied to cabinet making wooden furniture: the “Doppio corpo” by Piffetti at Quirinale Palace

Roberta Capezio, Paolo Luciani, Alessandro Re, Chiara Ricci, Michela Spagnolo, Valentina Tasso

Il lavoro intrapreso con il progetto neu_ART per la messa a punto e la caratterizzazione di un apparato strumentale per le radiografie digitali e le tomografie computerizzate ha fin da subito trovato un valido “banco di prova” grazie alla possibilità di tomografare un’opera che presenta una certa eccezionalità, sia per le dimensioni sia per l’assoluto pregio della manifattura: un arredo ligneo oggi conservato nel Palazzo del Quirinale a Roma, risalente alla metà del XVIII secolo e realizzato dall’ebanista piemontese Pietro Piffetti. La TAC in questione è stata dunque da un lato un’opportunità per verificare le potenzialità del sistema e le problematiche ancora da affrontare e, dall’altro, occasione per approfondire la figura di questo artista e le peculiarità del suo *modus operandi*¹.

The work undertaken within the neu_ART project for the development and characterization of an experimental apparatus for digital X-rays and computed tomography has immediately found a valid “test bench” thanks to the possibility to perform a CT on an exceptional work of art, both for its size and for the absolute value of manufacturing: a wooden furniture now in the Quirinal Palace in Rome, dating from the mid-eighteenth century and created by the Piedmont cabinetmaker Pietro Piffetti. The CT was thus an opportunity to verify the potential of the system and the problems to be addressed and, secondly, an opportunity to deepen the knowledge about this artist and the peculiarities of its *modus operandi*¹.

The description of the artwork

Large in size (312x128x62³ cm), the furniture consists of a bottom drawer with flap and a shelf with two doors, made of poplar (*Populus* sp.) and, for some structural elements, walnut (*Junglas Regia*). The surface is veneered in rosewood (*Dalbergia* sp.), a precious wood, almost disappearing under a richly decorated with mother-of-pearl inlay, carved ivory, tortoiseshell, brass and gilded copper. The big central oval of the shelf and other eight scenes inserted in the lower part are made by carved and painted ink ivory, all the scenes taken from the “Em-

La descrizione dell’opera

Di grandi dimensioni (312 x 128 x 62 cm³), l’arredo è costituito da un cassettone inferiore con ribalta e da un’alzata che sorregge una scansia a due ante, realizzati in legno di pioppo (*Populus* sp.) e, limitatamente ad alcuni elementi strutturali, in noce (*Junglas Regia*). La superficie è lastronata in palissandro (*Dalbergia* sp.), legno più pregiato, e sembra quasi scomparire sotto una ricchissima decorazione a motivi geometrici, *rocailles*, volute, tralci e corolle floreali, realizzate con intarsi in madreperla, avorio inciso, tartaruga, ottoni e rame dorato. In avorio inciso e dipinto a inchiostro sono anche il grosso ovale centrale della scansia e altre otto scene inserite nel corpo inferiore, tutte tratte dagli “Emblemata Horatiana” dell’olandese Otto Vaenius, opera

blemata Horatiana” by Otto Vaenius, a work having a great success and numerous reprints in Europe between the 17th and 18th centuries. The shaped and flared outwards flanks give impulse to the upper part and verticality to the overall structure. The distinctive ornament is represented by a polychrome ivory and mother-of-pearl on which floral decorations and mirror converging towards an oval plaque carved ivory are composed. The interior is framed by boards that make up a regular structure and lined with blue tissue. In the central part there are two free-standing figures, made in carved and gilded wood, represented holding up the shelf, but without any support function; to the right, a female figure wearing around his neck a wreath probably symbolizes the summer, and to the left the male figure, adorned with a garland of vine branches, alluding to Autumn. The furniture culminates with a tympanum with carved and gilded acanthus leaves. The body of the flap has rounded corners and houses inside compartments and drawers, with gilded knobs of small human heads and animals appearance; it has two drawers at the bottom and stands on four supports, decorated with gilded copper applications and connected by a platform. On the top drawer two gilded bronze handles are applied, while on the bottom drawer there are no rods but a simple gilded bronze nozzle.

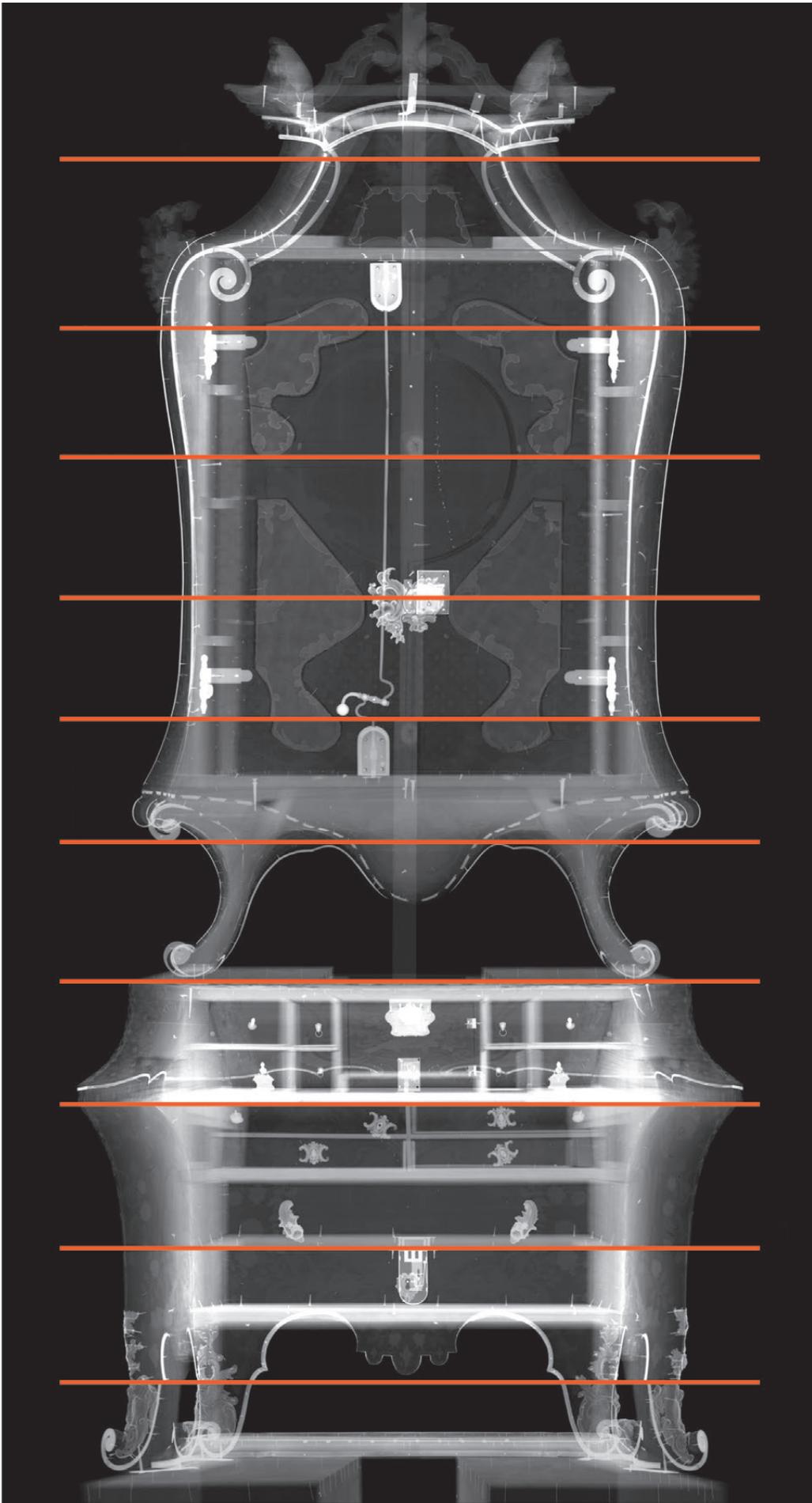


Fig. 1 Radiografia completa dell'arredo.

Fig. 1 Complete X-ray of furniture.

che ebbe un notevole successo e numerose ristampe in Europa tra Seicento e Settecento. I fianchi sagomati e svasati verso l'esterno, accanto al grembiale decorato a motivi *rocaille* e a nastro, donano alla struttura del corpo superiore slancio e verticalità. L'ornamento caratterizzante è rappresentato da un fondo a graticcio in avorio policromo e madreperla su cui si articolano decorazioni floreali, volute e inserti di specchio convergenti verso una placca ovale in avorio inciso. L'interno è invece riquadrato da assi che compongono una struttura regolare e foderato con tessuto blu. Ai piedi dell'alzata, poggianti su due volute, spiccano due figure a tutto tondo, in legno intagliato e dorato, rappresentati nell'atto di sorreggere la scansia, ma senza alcuna funzione di sostegno; a destra una figura femminile che porta al collo una corona di fiori simboleggia probabilmente l'Estate, mentre a sinistra la figura maschile, ornata da una ghirlanda di tralci di vite, allude all'Autunno. L'arredo culmina con un timpano a volute e foglie d'acanto intagliate e dorate. Il corpo della ribalta ha angoli smussati e ospita al suo interno vani e cassettoni, con pomelli dorati dall'aspetto di piccole teste umane e animali; presenta nella parte inferiore due cassette e poggia su quattro sostegni a ricciolo, ornati da applicazioni in rame dorato e raccordati da una pedana. Sul cassetto superiore sono applicate due maniglie in bronzo dorato, mentre sul cassetto inferiore non sono presenti tiranti ma una semplice bocchetta anch'essa in bronzo dorato.

The CT analysis

The decision to carry out a CT on the "Doppio corpo" aimed to deeply investigate the internal structure and to extract useful information on construction techniques of Pietro Piffetti. The execution of the analysis, however, shown various operational difficulties: firstly, the problems related to the complexity of the work itself, because of the considerable size and variety of the materials used in it; secondly, the short time available for analysis (time between the dismantling of the exhibition "La Bella Italia" in which the "Doppio corpo" was exposed and the subsequent transfer to the Quirinale Palace) and, linked to that, the uncertainties due to the overload of continuous work the new apparatus would be subject for the first time. The tomographic analysis was carried out from September 13 to 19, 2011, for a total of about 155 hours. In the days before, however, it was necessary to make several preliminary tests to determine the best acquisition geometry and the optimum measurement conditions, in addition to the alignment of the rotating platform².

Results

The information obtained thanks to the CT analysis on the furniture are numerous and have always

L'analisi tomografica

La scelta di sottoporre il Doppio Corpo del Quirinale a un'analisi TAC mirava, come si è detto, a indagare più a fondo la struttura interna di un mobile piuttosto raro nel suo genere e a ricavare informazioni utili sulle tecniche costruttive di Pietro Piffetti. L'esecuzione dell'analisi ha posto però varie difficoltà operative: in primo luogo le problematiche legate alla complessità dell'opera in sé, a causa delle notevoli dimensioni e della varietà dei materiali in essa impiegati; in secondo luogo il poco tempo a disposizione per l'analisi (compreso tra il disallestimento della mostra "La Bella Italia" in cui il Doppio Corpo era esposto e il successivo trasferimento di quest'ultimo al Quirinale) e, collegate a ciò, le incognite dovute al sovraccarico di lavoro continuativo a cui, per la prima volta, sarebbe stata sottoposta la nuova strumentazione. L'analisi tomografica si è svolta nei giorni dal 13 al 19 settembre 2011, per un totale di circa 155 ore di lavoro. È stato però necessario, nei giorni precedenti, effettuare diverse prove e test preliminari per determinare la migliore geometria di acquisizione e le condizioni di misura ottimali, oltre all'allineamento della piattaforma rotante².

I risultati ottenuti

Le informazioni desunte sull'arredo grazie all'analisi TAC sono molteplici e hanno sempre richiesto un riscontro incrociato

been crossed with the information obtained from the X-ray and photographic documentation (FIG. 1). A constant comparison was also essential between the various tomographic images, that is between the different slices obtained in the three spatial directions (axial, frontal and sagittal sections) and three-dimensional volumes. The CT was carried out by dividing the "Doppio corpo" in thirteen strips: seven for the upper part, four for the drawers and two for the figures in gilded wood. The wooden parts characterized by a higher thickness have provided poor detail in the images, because of the higher attenuation of X-rays and the consequent low signal. Numerous metal parts (nails, screws, hinges, locks, decorations) produced instead streaks and abnormal noise signals, said metal artifacts³.

Spacer and shelf

The upper part provided a lot of information, both about the Piffetti's construction technique, both of previous restorations. The blue tissue that lines the inside of the shelf, presumably not original and added perhaps during the transfer of the furniture in Rome at the end of nineteenth century, has not been removed. Regarding the inner structure and the construction technique, it is immediate to understand the difference between the outer shaping

con le informazioni ricavabili dalla documentazione fotografica e dalle radiografie. Un confronto continuo è stato indispensabile anche tra le varie immagini tomografiche, ovvero tra le diverse sezioni ottenute nelle tre direzioni spaziali (sezioni assiali, frontali e sagittali) e i volumi tridimensionali; ciascuna di queste ha potuto infatti mettere in luce particolari diversi o chiarire la struttura di un dato elemento, visto da un altro punto di vista.

La TAC è stata realizzata suddividendo il Doppio Corpo in tredici fasce: sette per il corpo superiore, costituito da alzata e scansia, quattro per il cassettone e due per le figure in legno dorato. Le parti in legno caratterizzate da un maggiore spessore hanno fornito, a causa della maggiore attenuazione dei raggi X e a un conseguente segnale modesto, uno scarso dettaglio nelle immagini; le numerose parti metalliche (chiodi, viti, cerniere, serrature, decorazioni) hanno prodotto invece striature anomale e segnali di disturbo, detti *metal artifacts*³ (FIG. 2).

Alzata e scansia

Il corpo superiore è certamente quello che ha fornito il maggior numero di informa-

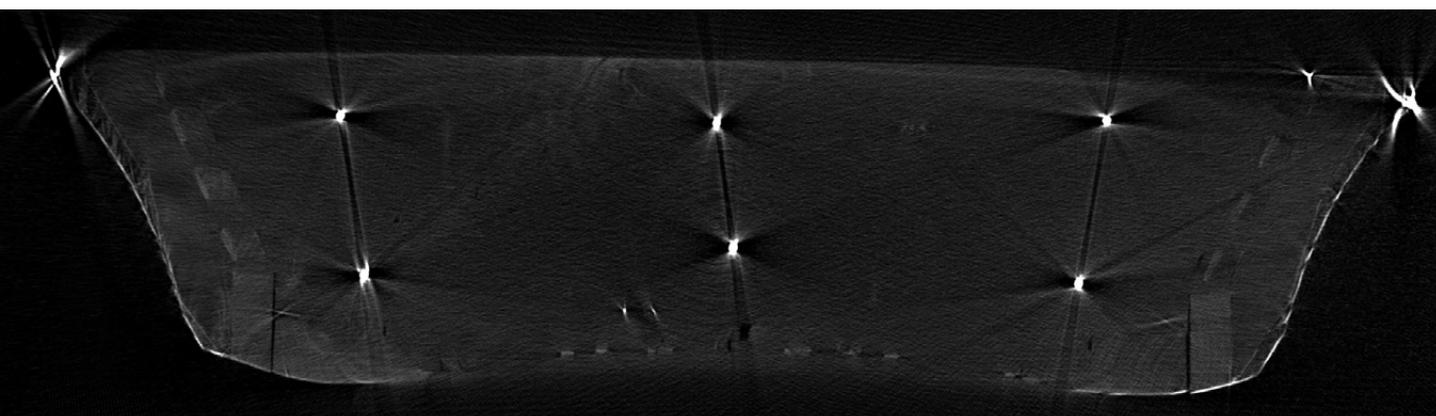
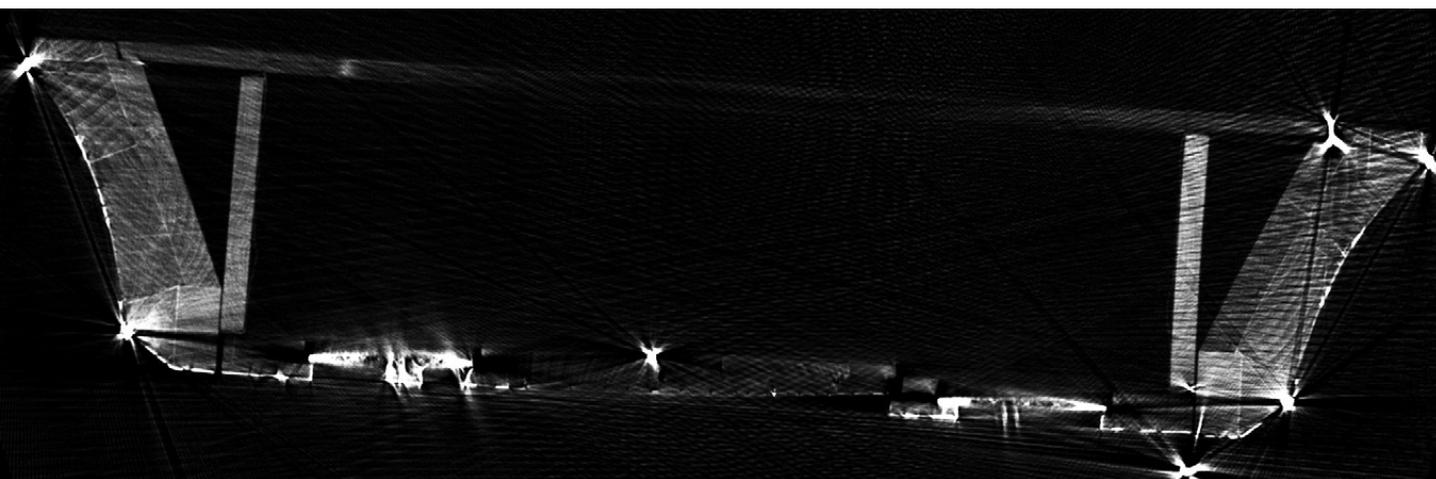
zioni, sia riguardo la tecnica di costruzione usata da Piffetti, sia su precedenti interventi di restauro realizzati sul mobile nel passato. Il tessuto blu che riveste l'interno della scansia, presumibilmente non originale e inserito forse in occasione del trasferimento del mobile a Roma a fine '800, non è stato rimosso in quanto intervento ormai storicizzato. Per quanto riguarda la struttura interna e la tecnica costruttiva, è immediato cogliere la differenza tra la sagomatura esterna dei fianchi della scansia e il vano interno, riquadrato da assi che compongono una struttura regolare. Tale struttura è, appunto, rivestita da un tessuto blu, fissato agli assi tramite chiodini. Dalle immagini tomografiche è emerso che i fianchi sono cavi (FIG. 2), e presentano tre distanziali di forma triangolare, posti da ambo i lati a tre differenti altezze: rispettivamente in corrispondenza della parte alta della placca centrale in avorio, della parte bassa di questa e al disopra delle cerniere inferiori. Essi sono inseriti in canali ricavati nei fianchi esterni della scansia e, molto probabilmente, incollati sull'asse di fondo. Gli assi che costituiscono i fianchi laterali del vano interno presentano ciascuno 23 coppie di fori a distanza regolare per l'inserimento di

Fig. 2 Sezione assiale: si notano i fianchi cavi della scansia.

Fig. 2 Axial section: the hollow flanks of the shelf are noticed.

Fig. 3 Sezione assiale: si notano le giunzioni del tipo "a coda di rondine", che congiungono i fianchi della scansia all'alzata.

Fig. 3 Axial section: the "dovetail" joints, connecting the flanks of the shelf to the spacer, are noticed.



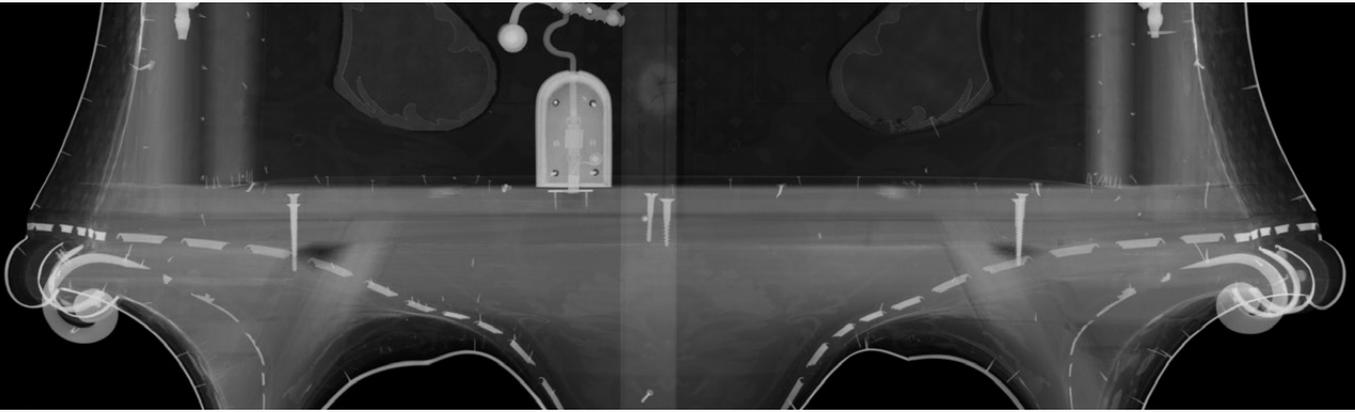


FIG. 4 Radiografia frontale: sono evidenziate le sei viti.

FIG. 4 Frontal X- ray: six screws are highlighted.

perni reggi-piano. I due assi sembrano essere mantenuti in posizione solamente grazie a due viti (una per parte), a testa tonda, ciascuna inserita in uno dei fori dei reggi-piano, posti a circa mezza altezza: nel fianco sinistro la vite si trova però un po' al di sopra del distanziale centrale (tra i tre visti prima), mentre nel fianco destro si trova subito sotto tale distanziale. Le due viti sono facilmente identificabili sia nella radiografia frontale, sia nelle sezioni assiali del volume corrispondente. Sempre dalle sezioni tomografiche (e in particolare nelle sezioni assiali) si è scoperto che i fianchi esterni della scansia sono assemblati all'alzata tramite giunzioni a coda di rondine, che assicurano un'unione molto salda (FIG. 3).

of the flanks of the shelf and the inner space, framed by panels composing a regular structure. This structure is, in fact, covered by a blue tissue, attached to the panels using small nails. The tomographic images showed that the flanks are hollow (FIG. 2) and have three spacers with triangular shape, placed on both sides at three different heights, respectively in correspondence of the upper part of the central plate in ivory, of the lower part of it and above the lower hinges. They are inserted in canals obtained in the outer sides of the shelf and probably glued on the rear panel. The panels constituting the lateral sides of the inner compartment have 23 pairs of holes at regular distances for the insertion of support pins. The two panels seem to be only kept in place by two screws (one per side), round head, each one inserted into one of the holes in the shelf support, placed at about half-height: the screw on the left side, however, is just above the central spacer (between the three seen before), while in the right side is immediately below the spacer. The screws are easily identifiable both in frontal radiograph, both in axial slices. Still by tomographic slices (and in particular in the axial ones) it was discovered that the outer sides of the shelf are assembled to the spacer through dovetail joints, which ensure very strong union (FIG. 3). The base of the shelf, instead, is fixed to the spacer through six screws (with flared flat cut head), arranged in two rows (FIG. 4): in the back row they are exactly aligned, in the front one, instead, the two lateral screws are slightly advanced than the central one. Both in the front and in the

La base della scansia è invece fissata all'alzata tramite sei viti (a testa svasata piana a taglio), disposte su due file (FIG. 4): nella fila posteriore esse sono esattamente allineate; in quella anteriore, invece, le due viti laterali sono leggermente più avanzate rispetto alla centrale. Sia nella fila anteriore sia in quella posteriore la vite centrale è più corta delle due laterali. Per confronto con le viti impiegate nel Doppio Corpo di proprietà della Fondazione Accorsi-Ometto di Torino, di simile fattura e considerate originali, si ipotizza invece che quelle del mobile del Quirinale siano state sostituite in un momento successivo, durante il quale probabilmente è stato rifatto anche il fondo dei cassetti, che presenta infatti viti simili.

rear row the central screw is shorter than the two lateral ones. For comparison with the screws used in the "Doppio corpo" owned by Accorsi-Ometto Foundation in Turin, similar in workmanship and considered original, it is assumed instead that the screws of the furniture of the Quirinale Palace have been replaced later, when probably also the bottom of the drawers has been redone, having in fact similar screws. 3D rendering and axial, frontal and sagittal sections highlight the above observations. "Dentello" joints were employed to fix the two supports of the spacer to the horizontal plane that supports the shelf (FIG. 5). The tomographic images (in particular the axial and frontal ones) help to identify inside each support two oblique blocks, placed side by side, which form the supporting structure; one of these, which extends over the entire length, is characterized by a different radiopacity: the blocks are probably made of walnut wood, which has a density higher than the poplar, and therefore suitable for structural support function. This is a construction technique quite original and, for now, unique among Piffetti's artworks. Still observing the tomographic images, it is possible to identify two 'slats' that seem to be embedded in the base of the shelf and for which it was not possible, for now, to hypothesize a function. These 'slats' are arranged in a direction orthogonal to the front of the shelf, and their dimensions are respectively of about 200 mm long, 17 mm wide and 9 mm thick. It was then deepened the central decorative element of the spacer included between two oblique supports: the

Si trova immediato riscontro di quanto detto nelle immagini 3D e nelle sezioni assiali, frontali e sagittali.

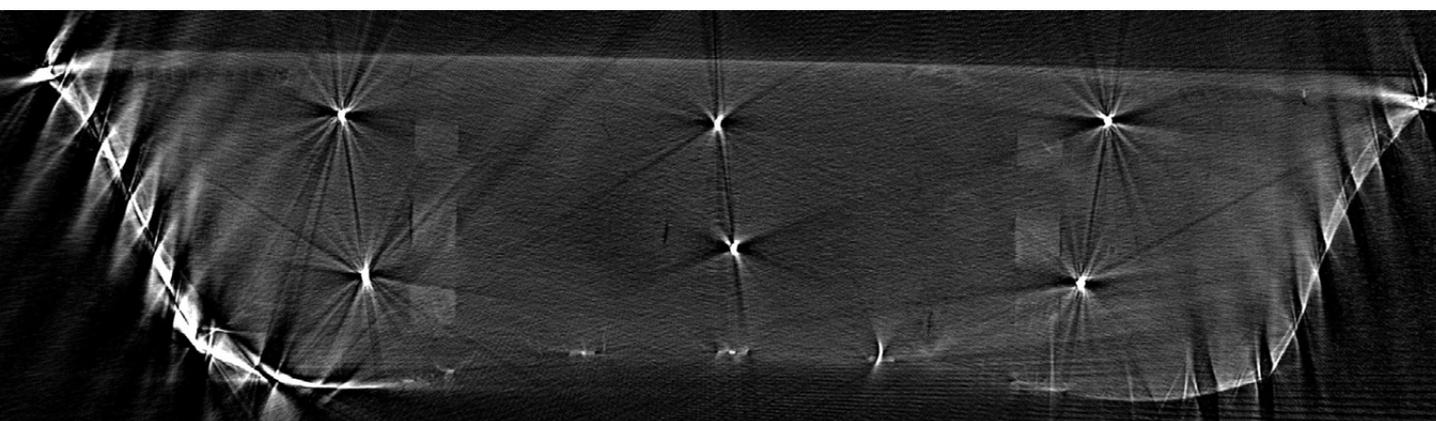
Per fissare i due sostegni dell'alzata al piano orizzontale che sorregge la scansia sono state impiegate giunzioni a dentelli (FIG. 5). Le immagini tomografiche (in particolare le sezioni assiali e frontali) consentono di identificare all'interno di ciascun sostegno due masselli obliqui, affiancati, che ne costituiscono la struttura portante; uno di questi, che si prolunga per tutta l'estensione, è caratterizzato da una radiopacità differente: si tratta infatti probabilmente di masselli in legno di noce, che presenta densità maggiore di quella del pioppo, adatto quindi per funzione di sostegno strutturale. È, questa,

una tecnica costruttiva piuttosto originale e, per ora, unica tra le realizzazioni di Piffetti. Sempre osservando le immagini tomografiche, si individuano due "listelli" che sembrano essere incassati nella base della scansia e per i quali non si è riusciti, per ora, a ipotizzare una funzione. Questi sono disposti in direzione ortogonale al fronte della scansia e le loro dimensioni sono rispettivamente pari a circa 200 mm di lunghezza, 17 mm di larghezza e 9 mm di spessore.

È stato poi approfondito l'elemento decorativo centrale dell'alzata, o grembiale, proteso verso il basso e compreso tra i due sostegni obliqui: le sezioni assiali e frontali svelano che esso non presenta una struttura cava, ma piena al suo interno. Non è pur-

Fig. 5 Sezione assiale: si possono identificare i dentelli che congiungono i sostegni dell'alzata alla base della scansia.

Fig. 5 Axial section: the teeth connecting the support of the spacer to the base of the shelf can be identified.



axial and frontal sections show that they don't present a hollow structure, but a full one. Unfortunately it is not possible to obtain other details (for example, on the presence of more wooden blocks glued together) because of the considerable thickness of crossed wood and, consequently, the low resulting signal. In frontal slices the small nails used to attach the brass decorations are recognized. One of the parts proved to be most interesting in the analysis of the shelf, however, is certainly the oval central plate in ivory. It is supported uniquely by the left door and consists of three different "layers" superimposed. Sorted from the surface inwards, observing in particular the axial sections, they are found:

- a veneering in ivory (thickness of about 4-5 mm);
- a first wooden support, thinner than the next (about 12 mm thick) and hence called "thin support";
- the real "support", constituted by the structure of the door and made up of two parts joined through teeth, which have "mezzo legno" joints. The right half is made by a single piece, while the left is composed of two elements nearly triangular, placed respectively above and below the intermediate crossbar of the door.

The "support" and "little support" are probably assembled with circular pegs, as it can be suggested examining the frontal slices and three-dimensional rendering (FIG. 6). The ivory plate has multiple longitudinal fractures, characteristic of the material, also evident to a simple visual observation and, of course, found in the tomographic images of both frontal and axial sections. The frontal slices too

highlighted a previous restoration in correspondence of these longitudinal fractures: there is in fact a row of small nails not visible from outside, almost certainly inserted to resolve a crack created in the "little support". It can be assumed that such intervention has resulted in the partial or total removal of the ivory plate to allow the insertion of small nails, inserted alternately from outside to inside and vice versa, to keep together the two sides and attach them to the support. Another previous restoration work, easily identified by X-ray, consists of the insertion of three wedges in the right half of the support of the plate, probably to counteract the deformation. Comparing the tomographic slices and X-rays the structure of the doors of the shelf was then hypothesized. Both the two doors are primarily constituted by two vertical strut, to which an horizontal upper crosspiece and a lower one are joined by means of mortise and tenon joints; in correspondence of these joints, circular section pegs are recognizable, places as support of the joints. The left door has a third horizontal intermediate crosspiece, which is connected to the strut in a similar way; the right door has the same crosspiece, but in this case it is considerably shorter. Looking at the tomographic images the mortises on the lower part of the strut can be easily identified; harder it is to find the mortises of the upper crosspiece, probably because of the overlap with the decorative brass spirals of the top of shelf. For each door there are two other panels fixed in diagonal, one between the upper crosspiece and the intermediate one and the

troppo possibile ricavare molti altri dettagli (ad esempio sull'eventuale presenza di più masselli in legno incollati tra loro) a causa del notevole spessore di legno attraversato e, di conseguenza, dello scarso segnale ottenuto. Nelle sezioni frontali si possono riconoscere i chiodini impiegati per fissare le decorazioni superficiali in ottone.

Una delle parti rivelatesi più interessanti nell'analisi della scansia è però, sicuramente, la placca centrale in avorio, di forma ovale. Essa è sostenuta unicamente dall'anta di sinistra ed è costituita da tre diversi "strati" sovrapposti. In ordine dalla superficie verso l'interno, osservando in particolare le sezioni assiali, si trovano:

- una lastronatura in avorio (di spessore pari a circa 4–5 mm);
- un primo supporto in legno, più sottile rispetto al successivo (spessore 12 mm circa) e per questo definito "supportino";
- il "supporto" vero e proprio, costituito dalla struttura portante dell'anta e formato da due parti unite per mezzo di denti, che a loro volta presentano giunzioni a mezzo legno. Di queste, la metà di destra è costituita da un unico pezzo, mentre quella di sinistra è a sua volta formata da due elementi di forma pressoché triangolare, posti rispettivamente al di sopra e al di sotto della traversa intermedia dell'anta.

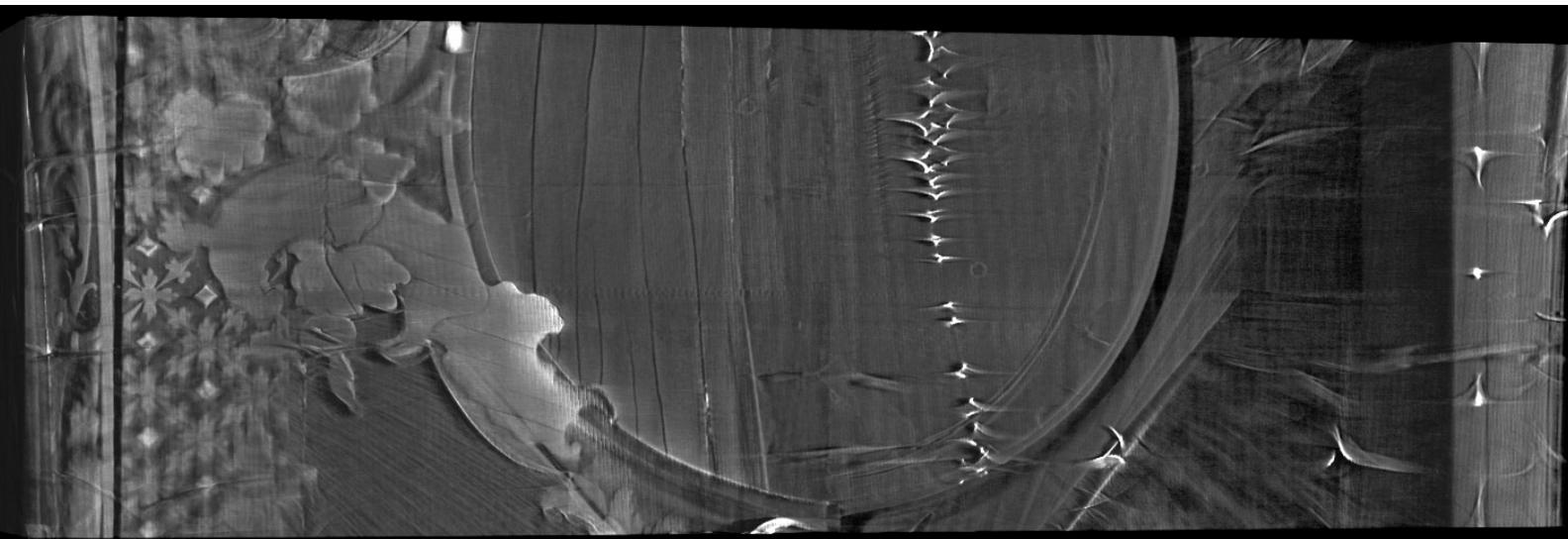
Il "supporto" e il "supportino" sono probabilmente assemblati con cavicchi circolari, dei quali è possibile ipotizzare la presenza esaminando le sezioni frontali e le immagini tridimensionali (FIG. 6).

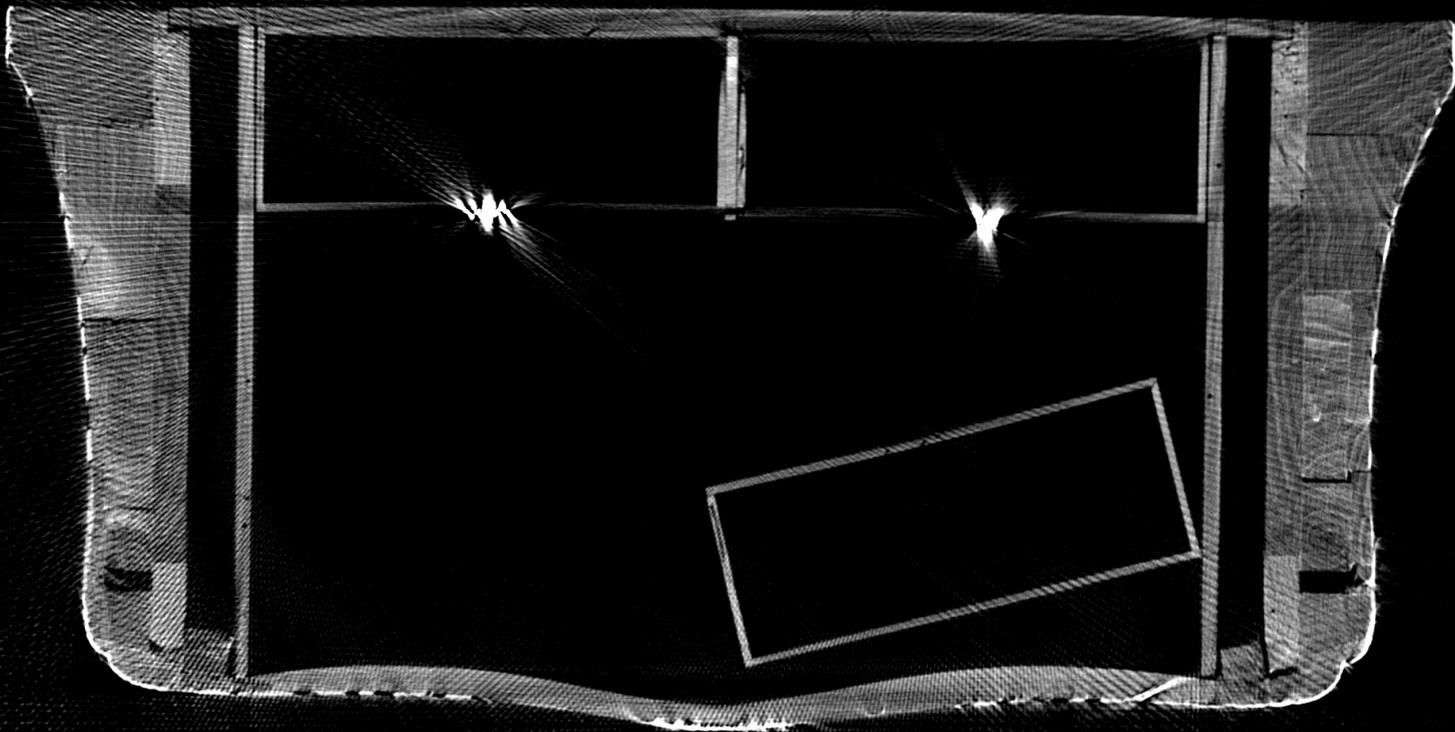
La placca di avorio presenta molteplici fratture longitudinali, tipiche del materiale, evidenti anche alla semplice osservazione visiva e, naturalmente, riscontrabili nelle immagini tomografiche sia delle sezioni

frontali sia di quelle assiali. Sempre le sezioni frontali hanno messo in luce un precedente intervento di restauro in corrispondenza di una di queste fratture longitudinali: è presente infatti una fila di chiodini, non visibili dall'esterno, inseriti quasi certamente per rimediare a una spaccatura che si era creata nel "supportino". Si può supporre che tale intervento abbia comportato la rimozione, totale o parziale, della placca in avorio per consentire l'inserimento dei chiodini, piantati alternativamente dall'esterno verso l'interno e viceversa, per tenere insieme le due parti e fissarle al supporto. Altro precedente intervento di restauro, più facilmente identificabile dalle radiografie, è costituito dall'inserimento di tre cunei nella metà destra del supporto della placca, probabilmente per contrastarne la deformazione. Raffrontando le sezioni tomografiche e le radiografie è poi stata ipotizzata la struttura delle ante della scansia. Ciascuna delle due ante è innanzitutto costituita da due montanti verticali, a cui sono unite tramite giunzioni a tenone e mortasa una traversa orizzontale superiore e una inferiore; in corrispondenza di queste giunzioni sono riconoscibili cavicchi a sezione circolare, posti a ulteriore rafforzamento della giunzione. L'anta di sinistra presenta una terza traversa orizzontale intermedia, collegata ai montanti in modo analogo; lo stesso vale in realtà anche per l'anta di destra, ma in questo caso la traversa intermedia è decisamente più corta. Osservando le immagini tomografiche si possono identificare facilmente le mortase poste nella parte bassa dei montanti e a metà altezza; più difficile è trovare quelle della traversa superiore, probabilmente per la sovrapposizione con le spirali decorative in ottone della parte alta

FIG. 6 Rendering 3D.

FIG. 6 3D rendering.





della scansia. Per ciascuna anta vi sono poi altri due assi fissati in diagonale, rispettivamente uno tra la traversa superiore e quella intermedia e l'altro tra quella intermedia e la traversa inferiore, tramite cavicchi a sezione circolare. Complessivamente, i due assi diagonali dell'anta sinistra e i due dell'anta destra descrivono una forma romboidale. All'interno di questo rombo è montato il supporto della placca descritto sopra. Le parti rimanenti delle due ante, esterne al supporto della placca ovale, sono costituite da assi verticali incollati ai montanti. Scorrendo le sezioni assiali e concentrando l'attenzione sull'anta sinistra della scansia, si può trovare inoltre, all'altezza della coppia intermedia di reggi-piano e immediatamente sopra l'inserito inferiore in specchio, un esempio di giunzione a linguetta riportata tra uno di questi assi verticali e il montan-

te. L'analisi tomografica ha infine permesso di mettere in luce lo stato di conservazione dell'opera: nello specifico, sono visibili in più punti della scansia segni di attacchi di insetti xilofagi, particolarmente evidenti nel coronamento superiore. Mentre nelle radiografie non erano così facilmente riconoscibili, nelle varie sezioni tomografiche si possono notare numerosi fori e gallerie, di diametro circa pari a 2–3 mm: considerate tali dimensioni, è possibile ipotizzare che essi siano causati da insetti appartenenti alla famiglia degli Anobidi (*Anobiidae*), comunemente detti "tarli", che rientrano a loro volta nell'ordine dei *Coleoptera*.

Cassettone a ribalta

Anche per quanto riguarda il cassettone a ribalta, la TAC ha permesso di ricavare im-

other between the intermediate crosspiece and the lower one through circular section pegs. Overall, the two diagonal panels of the left door and those of the right one describe a diamond shape. Inside this rhombus the support of the plate described above is mounted. The remaining parts of the two doors, externally with respect to the support of the oval plate, are constituted by vertical panels glued to the strut. The tomographic analysis also allowed to

highlight the state of preservation: specifically, signs of attacks by xylophagous insect are visible on the shelf, particularly evident in the upper crowning. While on X-rays they were not so easily recognizable, many holes and tunnels, with a diameter of about 2-3 mm, can be seen in the slices: considering such a size, it can be assumed that they are caused by insects of the family of Anobiids (*Anobiidae*), commonly called "woodworm".

Fig. 7 Sezione assiale: si osserva il vano che ospita i quattro cassetti segreti; si nota in particolare che uno di essi si è spostato, forse in fase di movimentazione del cassettone, dalla sua corretta collocazione.

Fig. 7 Axial section: the compartment housing the four secret drawers is shown; one of this has shifted by the proper place, perhaps during the moving of the writing cabinet.

portanti informazioni. Per quanto riguarda la struttura interna del cassettone, l'analisi tomografica ha naturalmente messo in mostra la presenza, già nota, di piccoli cassetti e vani segreti. Nella parte alta, in corrispondenza della ribalta, due di questi sono posti come doppio fondo dei cassetti che presentano una mostrina curvilinea. Ai lati di questi primi due, altri due piccoli cassetti sono incassati in nicchie apposite ricavate nei fianchi del cassettone. Osservando le sezioni assiali emerge anche la struttura della ribalta: essa è formata da due montanti verticali e da un piano centrale unito a questi tramite giunzioni a dente e canale. La rotazione della ribalta avviene proprio intorno alla base di questo piano. Nel corpo inferiore, in aggiunta ai due grandi cassetti che si aprono sull'esterno, sono inoltre presenti altri quattro cassettoni nascosti: essi si trovano al di sopra dei due cassetti a vista e al di sotto del ripiano orizzontale della ribalta, che può essere spostato per consentirvi l'accesso. Il vano in cui sono inseriti questi quattro cassettoni è regolare ed è delimitato lateralmente da due sottili pareti verticali, separate dai fianchi esterni da una piccola intercapedine (FIG. 7).

Una delle bocchette delle serrature dei cassettoni era mancante e si credeva fosse andata perduta; le radiografie hanno permesso invece di identificarla e recuperarla dal fondo del mobile, in cui era rimasta incastrata. Sempre riguardo alla struttura interna del cassettone, le sezioni assiali hanno rivelato che i fianchi non sono costituiti da un unico pezzo, ma sono composti da più masselli, aggiunti progressivamente risalendo dal piede al piano di ribalta, per conferire

ai fianchi la sagomatura desiderata. Per i vari masselli si può vedere la venatura e dedurre la direzione in cui sono stati tagliati per ottenere la sezione; essi non sono tutti disposti nello stesso modo: sono infatti presenti masselli che mostrano in sezione una faccia a taglio trasversale e altri che mostrano un taglio tangenziale o ancora un taglio radiale. Quattro di questi masselli, posti in corrispondenza dei quattro angoli del vano che ospita i cassettoni segreti, presentano una radiopacità leggermente maggiore degli altri: essi sono probabilmente costituiti da legno di noce, caratterizzato da una densità superiore a quella del legno di pioppo. A livello strutturale, è ancora possibile, a partire dalle sezioni frontali, indagare la struttura interna della serratura del cassetto inferiore, tra i due a vista citati sopra.

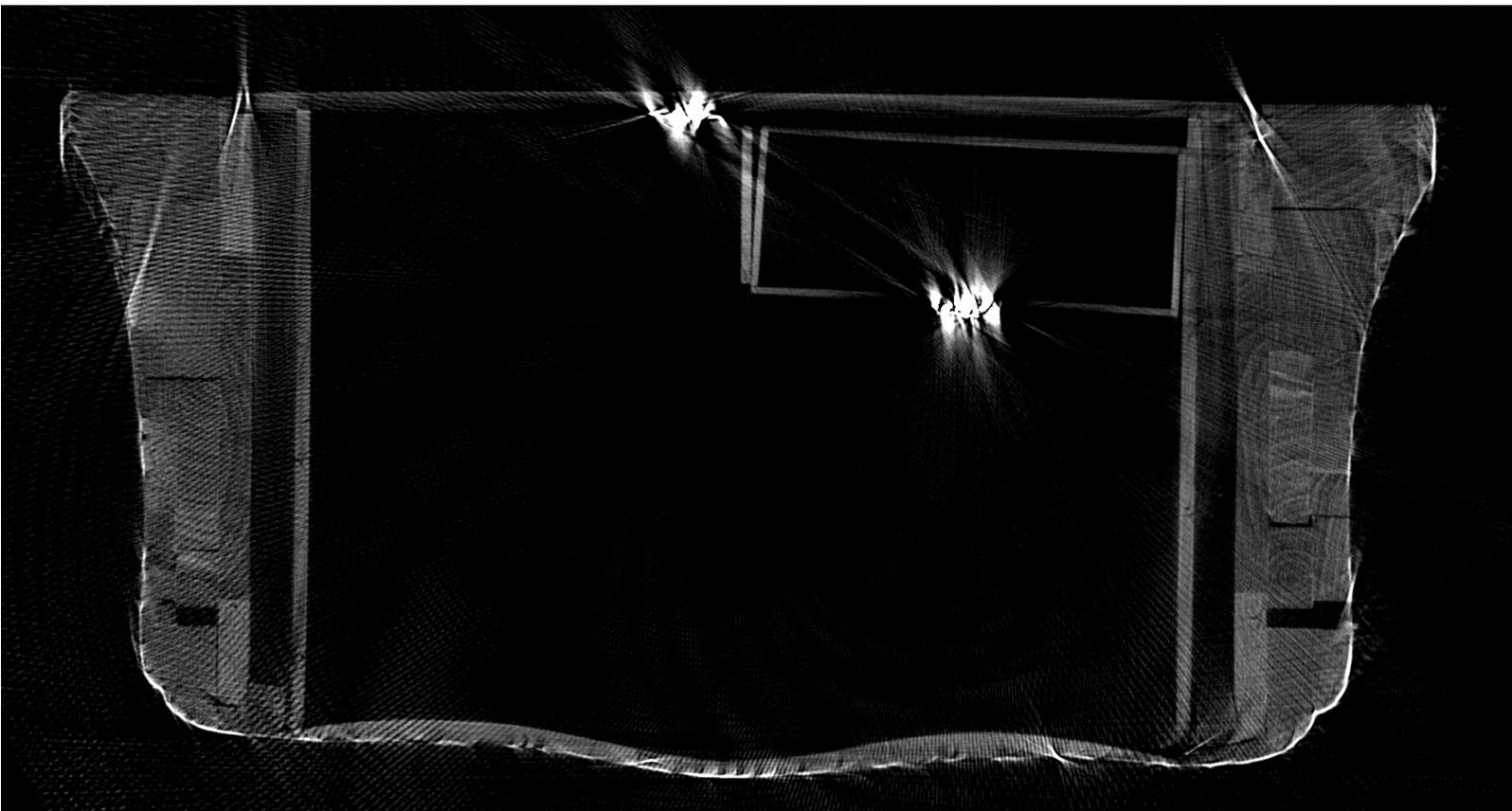
In generale, occorre evidenziare come per la parte inferiore del cassettone la qualità delle immagini tomografiche risulti seriamente compromessa dalla gran quantità di artefatti provocati dalle decorazioni di rame dorato applicate sui quattro sostegni a ricciolo del cassettone stesso. Dalla corrispondente radiografia è possibile tuttavia individuare i numerosi chiodi tramite cui queste decorazioni metalliche sono fissate ai sostegni lignei.

Anche per il cassettone sono state ricavate informazioni riguardo allo stato di conservazione. In più punti, quali ad esempio i fianchi del mobile, le pareti laterali e il retro dei cassetti segreti, si osservano fori e gallerie lasciati da insetti xilofagi, probabilmente anobidi, come già visto per la scansia. Dall'osservazione delle sezioni assiali e sagittali risultano particolarmente

Writing cabinet with flap

Also for the writing cabinet the CT allowed to obtain important information. Regarding the internal structure, the CT analysis shown the presence, already known, of small drawers and secrets. In the upper part, in correspondence of the flap, two of these secrets are placed as false bottom of the drawers with a curvilinear shape. Near them, two other small drawers are recessed in niches obtained into the flanks of the writing cabinet. Observing the axial slices the structure of the flap is shown: it is composed of two vertical struts and a central panel assembled through a "dente e canale" joint. The rotation of the flap takes place around the base of this panel. In the lower part, in addition to the two large drawers which open to the outside, four other small hidden drawers are present: they are located above the two drawers and below the horizontal surface of the flap, which can be moved to access it. The space in which these four small drawers are inserted is regular and it is bounded laterally by two thin vertical walls,

separated from the outer flanks by a small interspace (FIG. 7). One of the plaques of the locks of the small drawers was missing and was believed to be lost; X-rays allowed instead to identify it and recover it from the bottom of the cabinet, where it got stuck. Still regarding the internal structure of the cabinet, the axial slices revealed that the flanks are not constituted by a single piece, but they are composed of multiple blocks, added gradually rising from the foot to the flat, to give the desired shaping. The grain of the blocks is visible and the direction of the cut of the section can be deduced; the blocks are not arranged in the same way: there are in fact blocks showing in section a transverse cut and others showing a tangential cut or a radial one. Four of these blocks, placed at the four corners of the compartment housing the secret drawers, have a slightly higher radiopacity than others: they are probably made of walnut wood, characterized by a higher density than poplar wood. In general, it should be noted as the quality of slices for the lower part of the drawer is com-



te degradati i quattro masselli in legno di noce posti agli angoli del vano che ospita i cassetti. L'analisi TAC ha inoltre evidenziato la presenza di vuoti tra i masselli che costituiscono i fianchi: si notano in particolare due cavità di forma rettangolare, una per lato, di dimensioni pari a qualche centimetro (FIG. 8). Esse potrebbero costituire punti di fragilità della struttura, soprattutto per quanto riguarda il fianco destro, in cui la

cavità comunica, per un certo tratto, con la lastronatura esterna.

Figure lignee a tutto tondo

L'analisi delle due figure lignee ha messo in evidenza la loro struttura. Entrambe sono costituite da più masselli incollati tra loro: la figura maschile è composta da otto masselli, quella femminile da nove (FIGG. 9 e 10). I

FIG. 8 Sezione assiale: particolare che mostra le cavità rettangolari nei fianchi del cassettone.

FIG. 8 Axial section: detail showing the rectangular hollows in the flanks of the writing cabinet.

promised by the large number of artifacts caused by the gilded copper decorations applied on the four supports of the writing cabinet. From the X-rays, several nails used to fix metal decorations to wooden supports is however identified. Also for the writing cabinet information about the state of preservation were obtained. In several areas, such as the flanks of the cabinet, the lateral walls and the back of the secrets drawers, holes and tunnels left by xylophagous insects are observed, probably Anobiids, as already seen for the shelf. By observing the axial and sagittal sections the four blocks in walnut wood in the corners of the compartment housing the drawers are particularly degraded. The CT analysis also showed the presence of voids between the blocks constituting the flanks: two hollows with rectangular shape, one for each side, few centimetres long, are in particular noticed (FIG. 8). They could constitute points of fragility of the structure, especially with regard to the right flank, in which the hollow is connected with the external veneering.

Free-standing wooden figures

The analysis of the two wooden figures showed their structure. Both consist of several blocks glued together: the male figure is made up of eight blocks, the female of nine (FIGS. 9 and 10). The blocks are arranged with the grain in different direction. The composite structure of the two figures should not amaze: it is indeed usual in the wooden sculpture to start from a main block, adding gradually blocks of smaller size, arranged progressively to form the desired final volume. The presence of a nail on the right temple is another structural data found for the female figure; for the male figure instead a big knot in the wood can be recognized. Even for the two wooden sculptures the CT allowed to verify the state of preservation, highlighting holes indicating an attack by xylophagous insects, most noticeable for the female figure.

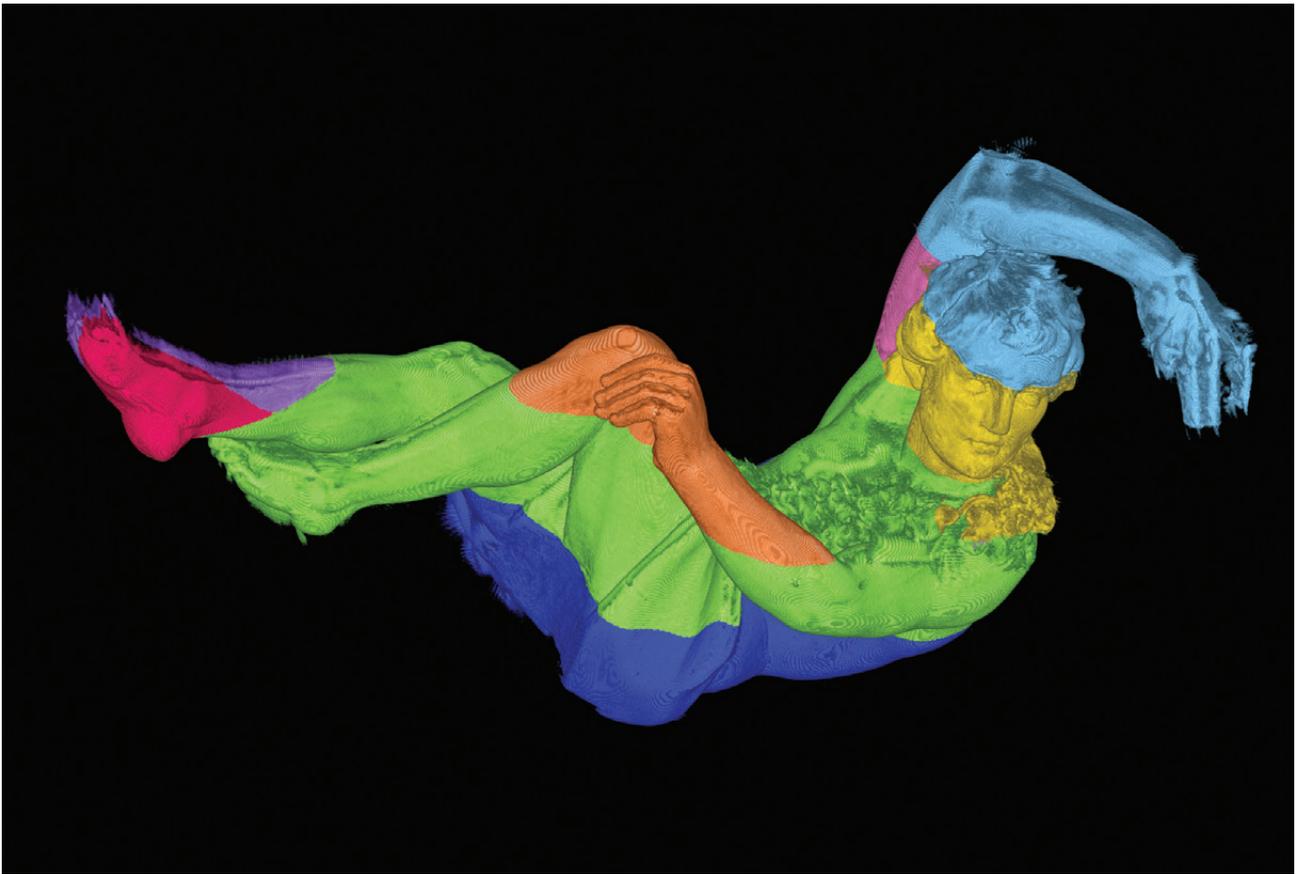
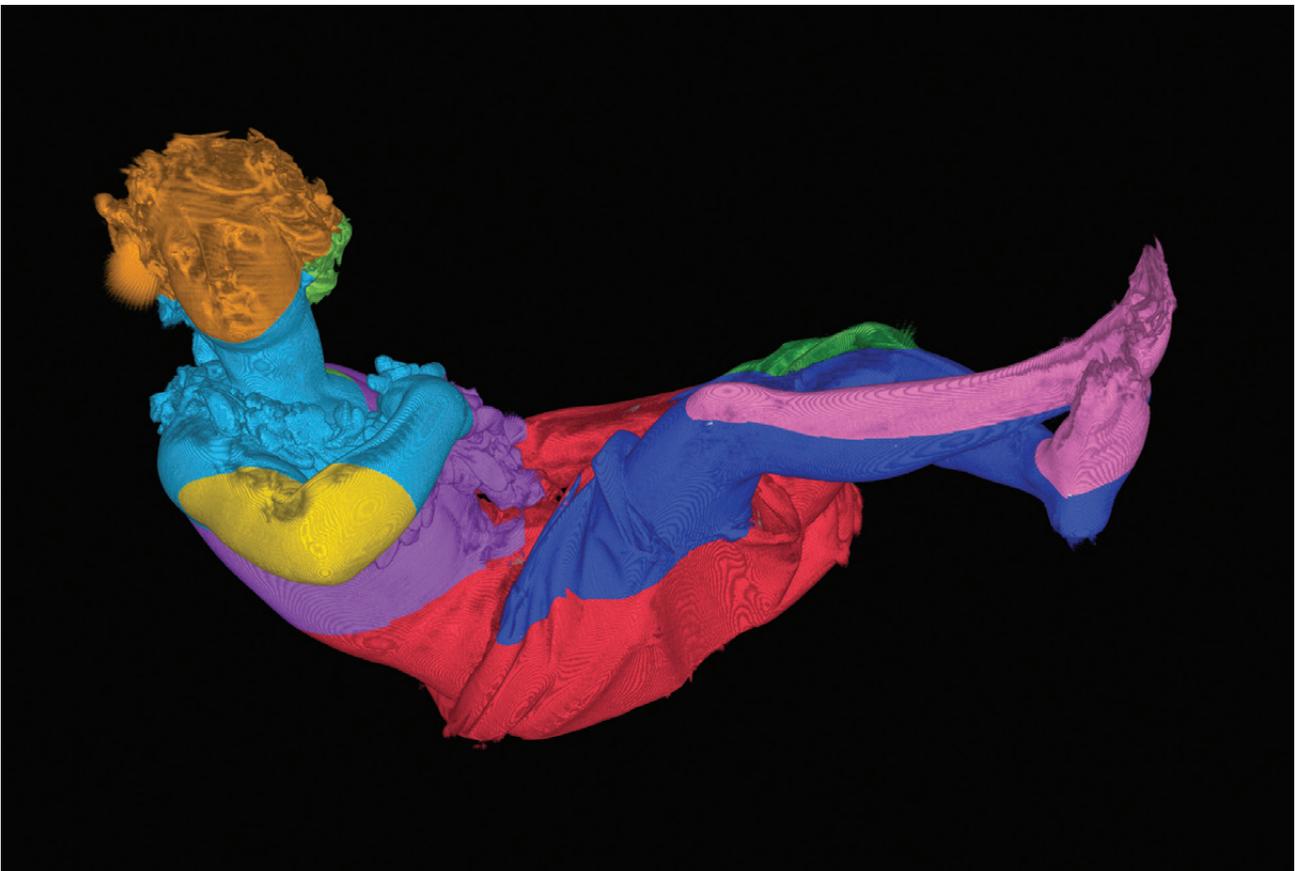


FIG. 9 Rendering 3D:
i colori evidenziano
gli otto masselli di cui
è costituita la figura
maschile.

FIG. 9 3D rendering:
the colours show
the eight blocks
of the male figure.

FIG. 10 Rendering 3D:
i colori evidenziano
i nove masselli di cui
è costituita la figura
femminile.

FIG. 10 3D rendering:
the colours show
the nine blocks
of the female figure.



masselli sono disposti con le venature variamente direzionate. La struttura composita delle due figure non deve in realtà stupire: è infatti usuale nella scultura lignea partire da un blocco principale, a cui si aggiungono man mano masselli di dimensioni minori, disposti progressivamente a formare il volume finale desiderato. Altro dato strutturale rilevato per il personaggio femminile è la presenza di un chiodo ad altezza della tempia destra; per il personaggio maschile è

possibile riconoscere invece un grosso nodo del legno. Anche nel caso delle due sculture lignee la TAC ha consentito di verificare lo stato di conservazione, evidenziando i fori che segnalano un attacco di insetti xilofagi, più evidenti per la figura femminile.

¹ Il "Doppio corpo" di Piffetti è stato il primo manufatto sottoposto a indagine tomografica, con una versione preliminare dell'apparato oggi presente nel locale radio-protetto.

The "Doppio corpo" by Piffetti was the first artwork investigated with CT analysis, with a preliminary version of the apparatus now present in the shielded local.

² C. 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 di Torino, Facoltà di Scienze M.F.N., a.a. 2010-2011, relatore: A. Re; S. Di Giorgio, *Radiografia digitale e tomografia computerizzata per i beni culturali. Caratterizzazione strumentale e applicazioni su casi studio*, Tesi di laurea triennale in Scienza e tecnologia per i Beni Culturali, Università di Torino, Facoltà di Scienze M.F.N., a.a. 2010-2011, relatore: A. Lo Giudice.

³ B. De Man, J. Nuyts, P. Dupont, G. Marchal, P. Suetens, *Metal streak artifacts in X-ray computed tomography: a simulation study*, in «IEEE Transactions on Nuclear Science», vol. 46, issue 3, 1999, pp. 691-696.

⁴ SDD: distanza sorgente-detector; SOD: distanza oggetto-sorgente; ODD: distanza oggetto-detector.

SSD: source-detector distance; SOD: source-object distance; ODD: object-detector distance.

Note tecniche

TENSIONE ANODICA: 180 kV

CORRENTE ANODICA: 5 mA

VELOCITÀ DI SCANSIONE: 5 m/min

SDD / SOD / ODD⁴: 2943 mm /
2135 mm / 808 mm

STEP ANGOLARE: 0.5°

ANGOLO DI ROTAZIONE: 360°

NUMERO DI PROIEZIONI PER FASCIA: 720

NUMERO DI FASCE: 13 (4 per il cassettoni, 7
per la scansia, 2 per le figure lignee)

NUMERO TOTALE DI PROIEZIONI: 9360



Due piedistalli a colonna

Gabriele Capello, detto Moncalvo (Moncalvo, 1806 - Torino, 1877)

1844-1847

Noce, ebano, legno del Brasile, agrifoglio, pero, sandalo, spiniero

Misure: altezza 144 cm; diametro massimo 44 cm

Castello di Racconigi (CN), Gabinetto Etrusco, nn. inv. R 6222; R 6223

Scelte e motivazioni metodologiche dei restauri

Roberto Medico

Il 24 gennaio 1833 Carlo Alberto affida a Pelagio Palagi «la totale direzione dei lavori d'ornato e d'ambigliamentamento da farsi nel Castello di Racconigi», compreso il Gabinetto Etrusco, nel quale l'armonia progettuale dell'ambiente voluta dal Palagi include anche gli arredi lignei affidati a Gabriele Capello, detto "Il Moncalvo"¹. Ed è proprio grazie all'abilità di intarsiatore per le opere eseguite per il Gabinetto che Capello riceve, nel 1834, una serie di gratifiche economiche, gli viene assegnata la medaglia d'oro dalla giuria dell'Esposizione di Torino del 1838 e la *prize medail* all'Esposizione Universale di Londra del 1851, dove aveva esposto un tavolo, una sedia e una delle quattro colonne «finemente intarsiata con varie essenze pregiate, inserita su una struttura inserite interna in noce». Il lavoro risulta accuratissimo, come viene confermato dalle quattro parcelle di pagamento: «Fatto un piedestallo per sovrapporvi dei vasi Etruschi, composto di due corpi, uno che fa basamento di forma ottagonata decorato di zoccolo (...), termina il detto corpo ottagonato con cimasa formata da una goletta rovescia con listello, tondino ovale e dado e sopra il plinto il tutto interpolato di Ebano e bresile, sul plinto posa il secondo corpo cilindrico decorato di una base corintia (...) il fusto è diviso in tre scomparti, due alti 0.19 sotto e sopra decorati di un ornato delicatissimo composto di due sfingi d'ebano disegnate con tanti filettini ora bianchi, ora del fondo bresile, ora d'ebano, (...) fra

dette sfingi vi è un gran caspetto di ebano da cui nascono altri ornati pure di ebano che fanno il giro totale del fusto decorandolo in modo il più elegante e variato, (...) lo scomparto di mezzo è decorato da un giro di 8 figure ricavate da vasi raccolti nelle opere di detto stile esistenti nella Re Biblioteca»².

L'approccio allo studio e al progetto di restauro conservativo delle due colonne è stato sicuramente favorito dalla dettagliata descrizione dell'esecuzione dei manufatti. L'indagine tomografica ha precisato la costituzione della struttura e dei sistemi di vincolo e ha permesso, tra l'altro, di smontare in fase d'intervento i due corpi costituenti la colonna. Le analisi hanno anche confermato la struttura dei fusti, costituiti da un massello unico, con alternanze tra legno primaticcio e tardivo; la riduzione volumetrica del legno ha coinvolto le parti costituenti le cornici, soggette a molte spaziature, e le tarsie, che presentano sollevamenti e mancanze.

La Direzione Lavori, a cura di chi scrive, ha condiviso le scelte metodologiche dell'intervento che hanno previsto la verifica dello stato di conservazione delle opere, il rilevamento di danni molto più consistenti di quanto percepibile superficialmente, l'individuazione delle cause e la messa a punto delle soluzioni conservative più adeguate. Si è ritenuto opportuno non integrare le tarsie mancanti, limitandosi al consolidamento e alla riduzione dei sollevamenti di quelle presenti.

The carved wooden columns analysed in this contribution are part of the furnitures of the Etruscan Cabinet in the Racconigi Castle, used as a study by the King Carlo Alberto and realized between 1834 and 1847. The execution of the furnitures, designed by the royal architect Pelagio Palagi, is committed to Gabriele Capello called Moncalvo, a famous cabinetmaker working for the renewal of the Savoy residences promoted by Carlo Alberto. The artworks were used as a pedestal for four Etruscan vases coming from Palagi's collection, purchased by Carlo Alberto to complete the setting of the Cabinet.

¹ F. DALMASSO, *Pelagio Palagi nel Palazzo Reale di Torino e notizie relative a Racconigi*, in *Pelagio Palagi artista e collezionista*, catalogo della mostra, Torino 1976, pp. 203-213; E. COLLE, *Pelagio Palagi e gli artigiani al servizio della corte sabauda*, in "Arte a Bologna. Bollettino dei Musei Civici d'Arte Antica", 5, 1999, pp. 58-109; Id., *Pelagio Palagi progettista fra cultura classica, arti applicate e decorazione*, in *Pelagio Palagi alle collezioni comunali d'arte*, a cura di C. BERNARDINI, Bologna 2004, pp. 29-31. Per Gabriele Capello cfr. R. ANTONETTO, *Gabriele Capello «Moncalvo». Ebanista di due re*, Torino 2004; Id., *Gabriele Capello Moncalvo: la vita e gli scritti*, Torino 2006, con bibliografia precedente.

² R. MEDICO, scheda n. 211, in *Etruschi. L'ideale eroico e il vino lucente*, catalogo della mostra a cura di A. MANDOLESI e M. SANNIBALE, Milano 2012, pp. 258-259, con bibliografia precedente.

Gabriele Capello, detto Moncalvo, Colonne intarsiate del Gabinetto Etrusco, Racconigi (CN), Castello. Generale in luce visibile prima del restauro.

Gabriele Capello, detto Moncalvo, *Column of the Etrurian Studio*, Racconigi Royal Castle. General picture before restoration.

L'analisi tomografica eseguita su due colonne lignee provenienti dal Gabinetto Etrusco del Castello di Racconigi: interpretazione dei dati tomografici e progettazione di un intervento di restauro conservativo

The tomographic analysis carried out on two wooden columns from the Etruscan Cabinet in the Racconigi Castle: interpretation of the tomographic data and planning of a conservative restoration

Francesca Cocco, Claudia Lombardo, Margherita Martini, Chiara Ricci, Jonathan Schiavone

Nel corso delle ricerche preliminari le due opere di Gabriele Capello, ampiamente trattate in letteratura, sono state analizzate dal punto di vista storico artistico per contestualizzarle all'interno dell'ambiente in cui sono inserite. L'analisi è stata condotta in occasione di frequenti sopralluoghi, che hanno permesso di rapportare le informazioni storiche rilevate con l'attuale contesto del Gabinetto Etrusco.

L'approccio critico all'intervento di restauro, che inizia necessariamente con un'osservazione dell'opera e dell'ambiente in cui è inserita, spesso conduce il restauratore a porsi alcune domande sulla storia conservativa dell'opera e sui conseguenti fenomeni di degrado osservati.

Nel nostro caso, molte risposte sono state fornite dalle indagini scientifiche effettuate che, oltre a rappresentare un valido supporto per la progettazione dell'intervento sul manufatto, hanno permesso di esaminare a fondo la natura dei materiali e della strut-

tura lignea, chiarendone alcuni aspetti conservativi.

L'analisi e lo studio di tutti gli aspetti considerati in questo lavoro hanno permesso di indirizzare e guidare le scelte in fase di intervento verso un approccio strettamente conservativo, realizzato con l'impiego di materiali e modalità esecutive stabiliti in base ad alcuni reali limiti operativi. Il restauro delle colonne del Gabinetto Etrusco si colloca quindi come ultima tappa di un lungo percorso conoscitivo volto a restituire all'oggetto una corretta fruibilità.

Dall'analisi dei risultati emersi dall'indagine tomografica, in rapporto ai dati ottenuti dallo studio degli oggetti, è stato possibile definire chiaramente la costituzione della struttura e i sistemi di vincolo. Sono emerse altresì informazioni legate allo stato conservativo dei manufatti che evidenziano le problematiche portate sia da fattori biotici che abiotici. La lettura congiunta delle radiografie bidimensionali e delle *slices* ha permesso

During preliminary researches the two works of Gabriele Capello have been analysed both from a historical and an artistic point of view in order to contextualize them in their environment.

The study developed along with several inspections, that allowed to compare historical information obtained with the actual context of the Etruscan Studio.

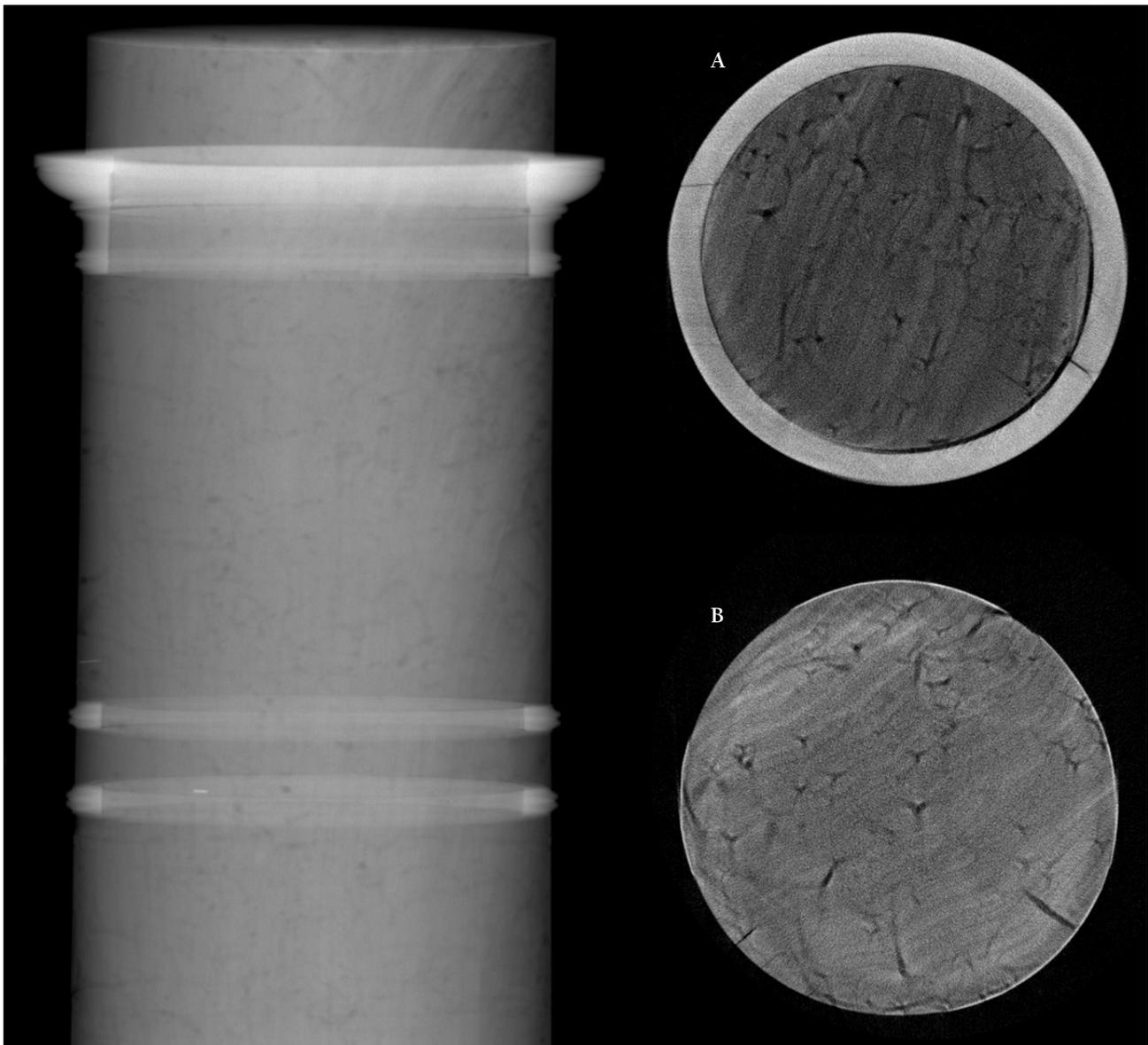
The incisive approach of restoring measures frequently leads the restorer to ask himself some questions on the conservative history of the work and on the resulting phenomena of degradation observed.

In the present case, a lot of answers have been given by scientific surveys conducted that, not only gave a valid support for the planning of the intervention on the object, but allowed to deeply examine the nature of the materials and of the woody structure, clari-

fying some of the conservative aspects. The analysis and the study of all the considered aspects in this intervention allowed to guide and address the choices toward a strictly conservative aspect, realized using materials and execution methods established according to some real operating limits.

The restoration of the column of the Etruscan Studio is the last step of a longer cognitive path aimed at giving back to the object his usability.

Thanks to the study of the results given by the tomographic survey, comparing them with the data obtained from the study of the object, it is possible to define clearly the structure and the constraint scheme. Other information, linked to the conservative state of the object, emerged during the survey, underlines the set of problems brought by biotic and abiotic factors. The combined analyse of the two-



di relazionare correttamente i dati alla struttura tridimensionale. Grazie alle informazioni fornite dalla tomografia è stato possibile, ad esempio, smontare in fase d'intervento i due corpi costituenti ogni colonna, agevolando così le operazioni di restauro.

Materiali e tecniche riscontrate sul fusto. Supporto e tarsia

L'analisi ha confermato che ognuno dei due fusti è costituito da un massello unico senza porzione midollare. L'andamento degli anelli

di accrescimento, ben visibile dalle *slices*, lascia presumere in entrambi i casi che si tratti di un taglio sul quarto ricavato da un ceppo di notevoli dimensioni; risultano evidenti le alternanze tra legno primaticcio e tardivo, sottolineate dalle variazioni di radiopacità in rapporto alla differente densità dei tessuti legnosi. Anche il rivestimento a tarsia si distingue per una maggior radiopacità rispetto al massello del fusto¹.

In prossimità dell'attacco delle cornici si osserva una riduzione della circonferenza del fusto: questa è riconducibile alla presenza di

FIG. 1 Tracce degli scassi nel fusto (radiografia).
A. Ovalizzazione del massello che costituisce uno dei due fusti (slice).
B. Fessurazione da ritiro (slice).

FIG. 1 Traces of trenching in the stock (x-rays).
A. Oval shape of the solid wood that forms one of the stocks (slice).
B. Shrinkage cracking (slice).

dimensional X-rays and the slices allowed to relate correctly the data to the three-dimension structure. Thanks to the data obtained by the tomography it has been possible, for example, to disassemble during the intervention the two different bodies that form the column, easing the restoration operation.

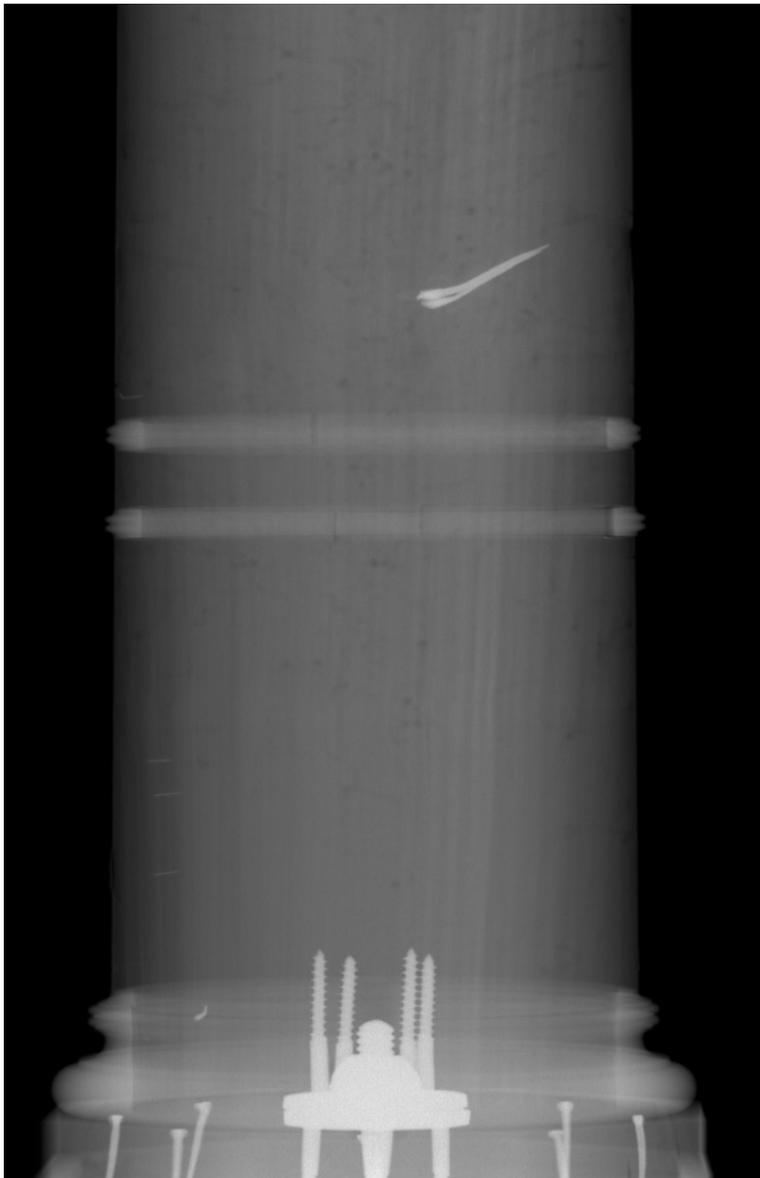
Materials and techniques observed on the stock. Support and inlay

The analysis confirmed that each one of the two stocks is form by a sole solid wood without a core portion. The trend of the growth rings, clearly visible from the slices, indicates that in both cases we

scassi in cui alloggiavano le cornici più aggettanti (FIG. 1). Proprio le cornici sottolineano la contrazione volumetrica del supporto: si evidenzia infatti la presenza di due spaziature tra cornice e supporto, localizzate sulla circonferenza in posizione opposta e contraria. La loro presenza segnala in modo evidente il tipo di deformazione cui il massello è andato incontro, definendo un'ovalizzazione² (FIG. 1A). Le cornici applicate si caratterizzano per una maggiore radiopacità rispetto al supporto, probabilmente in virtù della densità del materiale e dunque indice del fatto che le specie arboree impiegate sono differenti. Sono visibili, tra le parti costituenti le cornici, tutti i punti di giunzione che, a causa delle tensioni sviluppate dal supporto, presentano molte spaziature. Nello sviluppo della porzione centrale del fusto la tarsia, oltre a presentare numerose lacune, pare interessata da diversi sollevamenti. Lin-

FIG. 2 Giunto metallico che vincola il fusto al basamento (radiografia).

FIG. 2 Metallic joint that secures the stock to the base (x-ray).



dagne tomografica non riporta variazioni sostanziali di radiopacità tali da individuare le diverse densità delle tessere lignee presenti; non è possibile quindi differenziare le specie impiegate basandosi sull'osservazione della loro radiopacità.

Su entrambi i fusti sono presenti alcune fessurazioni con andamento longitudinale (FIG. 1B), orientate verso il centro del massello e riempite nella porzione più esterna con un materiale compatibile per radiopacità a quello delle tarsie³.

Materiali e tecniche riscontrate sul fusto. Elementi metallici

Nella parte inferiore di ognuno dei due fusti, e su quella superiore di ogni basamento, si evidenzia la presenza di una ghiera metallica vincolata al massello per mezzo di quattro viti (FIG. 2). Il giunto che vincola

are in presence of a cut on the forth obtained by a stump of relevant dimensions; alternations of early wood and late wood are very evident, underlined by the variations of radiopacity in relation to the different density of the woody tissue. Also the inlay distinguishes itself for a greater radiopacity than the one of the solid wood of the stock¹.

Close to the connection of the frames, we can see a reduction of the circumference of the stock: this is due to the presence of trenching where the most jutting frames house (FIG. 1). The frames underline also the volumetric contraction of the support: it is highlighted indeed that the presence of spaces between the frame and the support, localized on the circumference in opposite and contrary position. Their presence stresses the kind of deformation that the solid wood has been through, defining a more oval shape² (FIG. 1A). The frames applied are characterized by a greater radiopacity than the support, probably due to the density of the material and thus index of the use of different woody species. We can also see, among the different parts that constitute the frames, all the connection points that, due to the tensions created by the support, show a lot of spaces. During the development of the central portion of the stock the inlay, not only shows various spaces, but it also shows several lifting.

The tomographic analysis does not report substantial variations of radiopacity relevant enough to identify the different densities of the woody tesserae; this is because it is not possible to differentiate the species used using only the study of their radiopacity.

On both stocks we can see some fissures with a longitudinal trend (FIG. 2B), oriented through the centre of the solid wood and fill in the most external portion with a material compatible for radiopacity to those of the inlay³.

Materials and techniques observed on the stock. Metallic elements

On the inferior part of the base, we can see a metallic ferrule secured to the solid wood with four screws (FIG. 2). The joint that secures the stock to the base is formed by two metallic ferrules, one on the stock and one on the base, both secured to the solid wood

il fusto al basamento è costituito quindi da due ghiera metalliche, una sul fusto e una sul basamento, entrambe fissate al massello per mezzo di quattro viti, filettate per 1/3 dell'altezza. La ghiera inferiore, ancorata al tappo del basamento, è costituita da una piastra metallica in cui è inserito un tondino filettato. La ghiera inferiore invece è ancorata al tappo del basamento e costituisce il vincolo da cui diparte la vite. Mentre sulle *slices* gli elementi metallici generano artefatti che interferiscono con la lettura dei dati generando artefatti, sulle radiografie vengono evidenziati in modo chiaro.

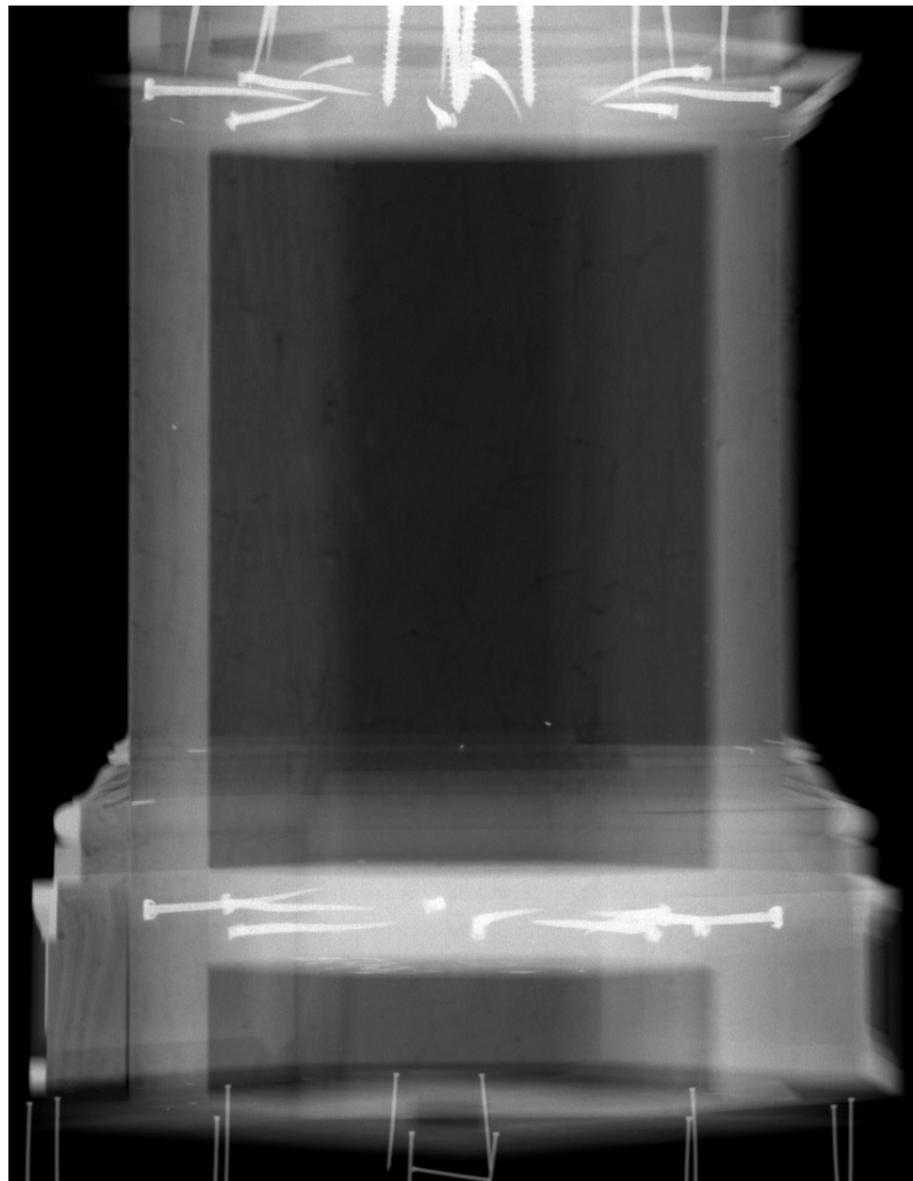
Ulteriori elementi metallici posti in evidenza dalla radiografia sono i chiodi utilizzati in fase di assemblaggio (FIG. 3). Questi hanno la funzione di fissare il tappo alla struttura; a tale scopo sono inseriti sia nello spessore che nella faccia superiore dell'elemento. I chiodi presentano sezione e testa rettangolare e uno sviluppo in lunghezza irregolare. Alcuni sono inseriti obliquamente nel massello⁴. Sul fusto sono stati inseriti diversi chiodi e graffe metalliche di modeste dimensioni, riconducibili a interventi di manutenzione pregressi. L'inserimento di questi elementi metallici ha permesso sia di fissare alcune cornici distaccate dal supporto che di mantenere alcune tessere della tarsia in posizione (FIG. 4A).

Materiali e tecniche riscontrate sul basamento. Supporto e tarsia

Le prime *slices* relative al basamento hanno permesso di comprendere l'effettivo sviluppo del tappo all'interno del vano che costituisce la base del piedistallo. Il tappo ottagonale sembra essere stato ricavato da un taglio radiale di una tavola di notevole spessore. Le dimensioni del diametro dell'elemento variano in altezza determinando un restringimento della sezione inferiore; questa riduzione porta il tappo a inserirsi perfettamente nel cavo formato dalla struttura interna del

with four screws, threaded for 1/3 of the height. The upper metallic ferrule is characterized by the presence of a spherical cap, which internally hosts the location of the main screw of the joint. The lower metallic ferrule, anchored to the cap of the base, is constituted by a metal plate in which is inserted a threaded rod. On the slices instead, the metallic elements produce artifacts that interfere with the analysis of the data generating artefacts; on the X-rays they are clearly underlined.

More metallic elements highlighted by the X-rays are the nails (FIG. 3). These are used to fix the cap of the structure; for this purpose they have been inserted also on the gauge of the upper face of the



vano. Sugli spessori sulle tavole costituenti la struttura ottagonale è evidente l'andamento degli anelli di accrescimento che sottolineano il chiaro intento di accostare i masselli con la vena contrapposta: questa disposizione denota un'accurata scelta dei segati e l'intenzione di disporli in modo tale che, bilanciando le forze che potrebbero causare deformazio-

FIG. 3 Presenza di chiodi, con funzione strutturale, all'interno del basamento (radiografia).

FIG.3 Presence of nails with structural functions, inside the base (X-ray).

element. The nails show a rectangular section and rectangular head and an irregular development in length. Some of them have been insert obliquely in the solid wood⁴. Several nails and metallic clips of small dimension, coming from previous maintenance interventions, are shown on the stock. The inclusion of these metallic elements allowed both to fix some frames detached from the support both to keep some pieces of the inlay in place (FIG. 4A).

Materials and techniques identified on the base. Support and inlay

The first slices related to the base allowed the understanding of the real development inside the

FIG. 4 Basamento.
 A. Presenza di chiodi di manutenzione applicati al basamento (*slice*).
 B. Disposizione a vena contrapposta dei masselli utilizzati per le cornici (*slice*).
 C. Differente radiopacità delle diverse specie lignee utilizzate nella realizzazione delle modanature (*slice*).
 D. Attacco entomologico particolarmente presente nelle zone di alburno (*slice*).

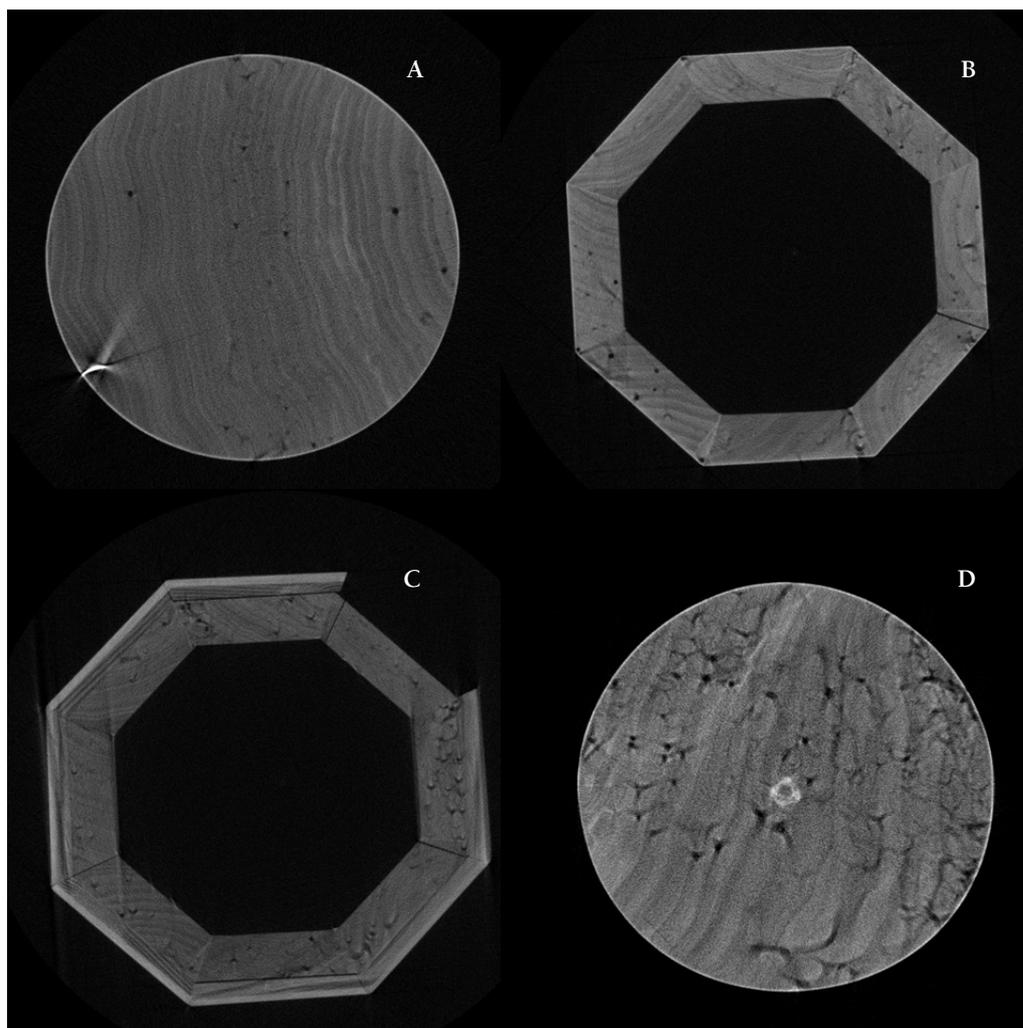


FIG. 4 Base.
 A. Presence of maintenance nails applied to the base (*slice*).
 B. Opposite vein arrangement of solid woods used for the frames (*x-ray*).
 C. Different radiopacity of different woody species used during moulding (*slice*).
 D. Entomological attack particularly relevant in the alburnum areas (*slice*).

ni, prevenivano un potenziale movimento dei masselli e il loro conseguente distacco (FIG. 4B). Si rileva inoltre la presenza di alcune filzette di legno inserite in prossimità dei giunti angolari, probabilmente per rettificare la forma ottagonale della struttura. Le cornici del basamento non sono inserite in uno scasso ricavato sul supporto, bensì sono accostate a esso. Il dato più evidente che emerge osservando sia le *slices* che le radiografie è la presenza di specie arboree differenti. Alcune di queste sono distinguibili in base alle differen-

ti radiopacità, altre invece si caratterizzano per la venatura (FIG. 4C). Anche il tappo inferiore del basamento è vincolato con chiodi alla struttura ottagonale, tuttavia non presenta scanalature o incastri. Nella parte inferiore al tappo sono visibili due fori passanti.

Attacco entomologico del fusto e del basamento

L'indagine tomografica eseguita sull'oggetto, oltre a fornire preziose informazioni sui ma-

compartment which forms the base of the pedestal. The octagonal cap seems to be obtained from a radial cut of a board of relevant dimensions. The dimensions of the diameter of the element vary in height creating a constriction of the lower section; this reduction leads the cap to insert perfectly in the hollow created on the internal structure of the compartment. On the gauges on the board creating the octagonal structure it is clear that the trend of the growth ring underlines the intention of pulling over the solid woods with the opposite vein: this arrangement indicates the intention of an accurate choice of sawed and dispose them in a way

in which they can prevent a potential move of the solid woods and their resulting separation (FIG. 4B). It has also been observed the presence of some woody inserts, inserted close to the corner joints, probably to rectify on the octagonal shape of the structure. The frames of the base are not included in a trenching obtained on the support, but placed close to it. The most evident fact is the presence of different woody species. Some of them are noticeable thanks to the different radiopacity, others are characterized by the vein (FIG. 4C). Also the inferior cap of the base is secured with nails to the octagonal structure, however, no grooves or

teriali e sulle tecniche di realizzazione delle due opere, ha permesso di valutare l'entità e la concentrazione dell'attacco entomatico. Già dalle prime *slices* della parte superiore di entrambi i fusti si evidenzia la presenza di numerose gallerie: sono presenti sia gallerie principali, di dimensioni maggiori, sia gallerie secondarie organizzate in reticoli (FIG. 4D). L'attacco appare più evidente nelle porzioni superiori dei fusti e diminuisce man mano che si procede verso il basso. In queste zone sono presenti numerosissime gallerie che insistono sotto le tessere lignee, portando alla decoesione del supporto. L'attacco interessa maggiormente le tarsie composte da specie più tenere e quindi maggiormente appetibili. Le *slices* mettono in evidenza un attacco preferenziale concentrato nelle zone del supporto costituite da alborno.

Anche la struttura del basamento appare parzialmente interessata dall'attacco entomatico: il degrado portato dagli insetti xilofagi è ben visibile nella parte superiore, mentre in prossimità del pavimento le gallerie diminuiscono notevolmente. Le cornici applicate della porzione inferiore del basamento infatti non presentano gallerie⁵.

L'analisi dell'opera, che inizialmente si riferiva alla sola mappatura dei fori di sfarfallamento, indicava un'estensione relativamente accettabile dell'attacco entomatico. L'osservazione delle *slices* e delle radiografie ha permesso, invece, di quantificare la reale estensione dell'attacco biotico, sviluppatosi maggiormente all'interno. Queste valutazioni hanno consentito di intraprendere uno studio che, mettendo in relazione ciò che è presente sulla superficie del manufatto (i

fori di sfarfallamento) con ciò che in realtà si ritrova all'interno (le gallerie larvali), vuole approfondire le cause e le modalità relative a questa tipologia di degrado, cercando di indentificarne le variabili quali la diversità delle specie arboree impiegate, dei valori di umidità, la presenza differenziale dell'attacco. Lo studio è attualmente in corso.

Note tecniche

TENSIONE ANODICA: 200 kV
 CORRENTE ANODICA: 4.5 mA
 VELOCITÀ DI SCANSIONE: 2 m/min
 SDD / SOD / ODD: 2943 mm /
 2640 mm / 303 mm
 STEP ANGOLARE: 0.25°
 ANGOLO DI ROTAZIONE: 360° (colonna 1) /
 190° (colonna 2)
 NUMERO DI PROIEZIONI PER FASCIA: 1440
 (colonna 1) / 760 (colonna 2)
 NUMERO DI FASCE: 4 per colonna
 NUMERO TOTALE DI PROIEZIONI: 5760
 (colonna 1) / 3040 (colonna 2)

¹ FM. COCCOLO, *Studio interdisciplinare finalizzato all'intervento di restauro di Colonna lignea del Gabinetto Etrusco di Gabriele Capello. Castello di Racconigi*, Tesi di laurea, Università degli Studi di Torino, Corso di Laurea in Conservazione e Restauro dei Beni Culturali, a.a. 2011-2012, relatore: Claudia Lombardo, p. 104.

² *Ibidem*.

³ *Ibidem*.

⁴ *Ibidem*, p. 105.

⁵ *Ibidem*, p. 106.

joints are present. In the inferior part of the cap, two holes are visible.

Entomological attack of the stock and of the base

The tomographic analysis executed on the object, not only gave precious information on the materials and the techniques used to realize both works, but also allowed to evaluate the entity and the concentration of the entomological attack.

Already from the first slices of the superior part of both stocks we can see the presence of several tunnels: both main tunnels and secondary galleries in organized patterns are present (FIG. 4D). The attack seems more evident on the superior portions of the stocks, and it decreases slowly toward the inferior part. In these areas there are several tunnels that insist behind the woody tesserae leading to the decohesion of the support. The attack focuses on the marquetry made by tender species and therefore more desirable. The slices highlight a preferential attack concentrated in the areas of support

consist of sapwood. Also the structure of the base seems partially interested by the attack: the degradation brought by xylophages insects is clearly visible in the superior part, coming closer to the floor the tunnels, it remarkably decreases instead. The frames applied to the inferior portion of the base in fact do not show tunnels⁵.

The analysis of the works of art, which initially referred to only map the flickering holes, indicates a relatively acceptable extension of the attack. The observation of slices and radiographs allowed, however, to quantify the real extent of the biotic attack, developed mostly within the objects. These evaluations allowed to start an analysis that, combining what was on the surface of the work and what really was on the inside, tries to deepen the causes and the modalities of this kind of degradation, trying to identify the variables. The analysis is still on.



Manufatti archeologici in metallo appartenenti a corredi funebri

NECROPOLI DI ETÀ TARDOARCAICA

Luoghi di provenienza: San Salvo (Colle Martino), Caporciano (Cinturelli), Avezzano (Cretaro), Villalfonsina

Ente proprietario: Soprintendenza per i Beni Archeologici dell'Abruzzo

Interventi di tutela su corredi funebri abruzzesi di età tardoarcaica

Amalia Faustoferri

I materiali oggetto di questo contributo sono venuti alla luce a seguito a interventi di tutela messi in atto dalla Soprintendenza per i Beni Archeologici dell'Abruzzo che ha effettuato in un caso (Villalfonsina) saggi preliminari all'impianto di un vigneto, nell'altro (S. Salvo) il controllo in corso d'opera trattandosi di uno sbancamento propedeutico alla realizzazione di un edificio industriale.

Il patrimonio di Villalfonsina è stato purtroppo gravemente depauperato agli inizi degli anni Sessanta del Novecento a causa dell'utilizzo di grandi mezzi meccanici nelle colture tipiche della zona, l'olivo e la vite. Eppure la sua ricchezza era ben nota, visto che i primi scavi vi sono stati condotti nel 1914¹ quando in loc. Morandici furono individuati diversi nuclei di sepolture, uno dei quali localizzabile proprio nello stesso appezzamento in cui la Soprintendenza è intervenuta tra il 2008 e il 2009 riportando alla luce 18 tombe relative a un'ampia necropoli utilizzata tra i secoli VI e IV a.C.².

In quattro delle sepolture maschili era presente il cinturone in lamina di bronzo, ma solo nel caso della tomba 49 la grande quantità di resti organici ancora visibili faceva optare per l'asportazione con "pane di terra" e analoghe considerazioni hanno suggerito di procedere alla stessa maniera nel caso della tomba 4 di S. Salvo, una località fino ad anni assai recenti praticamente sconosciuta alla letteratura archeologica. Grazie a una serie di interventi di archeologia urbana³ e di attento controllo delle nuove edificazioni è stato invece possibile disegnare per il suo territorio un quadro assai articolato che vede l'attuale zona industriale disseminata di impianti rurali di epoca romana con le relative piccole necropoli di tombe a cappuccina. Non mancavano tuttavia notizie di una frequentazione più antica, documentata dal rinvenimento di un'olla tardoarcaica a poca distanza da una delle grandi fabbriche ivi esistenti, e a tale fase sembra riferirsi il nucleo di tombe scoperte nel 2006 durante le attività di controllo grazie alle quali possiamo aggiungere un tassello importante nella geografia archeologica di S. Salvo.

Delle 4 tombe individuate e scavate in tale occasione due erano a cappuccina (nn. 2 e 3), prive di corredo e dunque non databili con sicurezza, e due a fossa terragna contenenti maschi adulti deposti entrambi con cinturone in lamina di bronzo e lancia con punta in ferro e relativo *sauroter*. Il corredo personale comprendeva anche un coltellino/rasoio in ferro che in un caso (n. 1) è stato rinvenuto in una teglia di bronzo posta su una sorta di sgabello in legno all'altezza delle caviglie, nell'altro (n. 4) in una scodella in impasto deposta all'altezza della testa del defunto. Ambedue le tombe avevano il piano di deposizione a una considerevole profondità⁴ ed erano state riempite con ciottoli medio-grandi che, dopo il disfacimento del tavolato ovvero della cassa lignea utilizzati per la sepoltura, hanno gravemente danneggiato gli inumati e gli oggetti di corredo.

L'immagine restituita da tali tombe è quella del Sannita di fine V-IV sec. a.C. quale lo conosciamo dalle raffigurazioni vascolari⁵ e da tante tombe di area centro-meridionale, accompagnato solo da un'arma da getto (lancia, giavelotto) e da una o più fibule, in bronzo o in ferro, oltre che dal corredo rituale costituito da vasellame da mensa in ceramica e/o in bronzo, spesso contenente resti di pasto. Rientra nel corredo personale anche il cinturone in lamina di bronzo, che non può essere inserito nella categoria delle armi ma è indice forse dello status stesso di uomo libero, vista la sua presenza in tombe infantili: il cinturone sarebbe dunque una sorta di "indumento sociale" attribuito ai maschi giovani in una fase piuttosto precoce della loro esistenza e questa sua valenza simbolica spiegherebbe anche i "restauri" antichi, particolarmente vistosi proprio nel caso dell'esemplare da Colle Martino di S. Salvo⁶.

La cronologia dei cinturoni è legata alla tipologia dei ganci, che a sua volta dipende dalla possibilità di avere a disposizione corredi intatti con materiale datante. L'esemplare dalla tomba 49 di Villalfonsina ha piastrine costituite da palmette a nove petali distinte attraverso gruppi di incisioni trasversali dai ganci a freccia con alette ad apici

pronunciati (tipo 2B Suano; I.2.A. Sannibale)⁷ e dovrebbe rientrare tra i tipi più antichi, realizzati già nel V sec. a.C., ma la sua datazione potrà essere precisata solo a seguito dello studio del corredo, nel quale si contano una coppa a vernice nera con stampigliature e uno *skyphos* sovradipinto, forse importato dall'area apula, che non dovrebbero

risalire oltre la metà del IV sec. a.C.⁸; quello dalla tomba 4 di Colle Martino ha invece piastrine conformate a corpo di cicala relativamente allungato e ganci a freccia con alette decorate da una fitta puntinatura (tipo 4B Suano; II.2 Sannibale)⁹ e sembra collocabile ancora nella prima metà del IV sec. a.C.

The archaeological artefacts analysed in this paper emerged thanks to a conservation intervention promoted by the Soprintendenza for Archaeological Heritage of Abruzzo that carried out in one case (Villalfonsina) preliminary testing for the plant of a vineyard, in the other (S. Salvo) a control action during the construction of an industrial building.

In four of the male tombs there was a belt with bronze plate, but only in the case of grave 49 the large amount of organic remains allowed the removal with "soil clod" (earth surrounding the object). The same method was used in the case of the tomb 4 of S. Salvo, a place unknown to archaeological studies until recent years.

Among the four tombs exminated, two had no grave goods and for this reason they were difficult to date; the other two were earth graves containing adult males buried with bronze belts and spears with iron tip. These tombs can be connected to the Samnites of V-IV century BC. The belt is a kind of "social clothing" given to young males and its symbolic value can also explain the old restorations, as shown by the artefact from Colle Martino di S. Salvo. The chronology of the belts is related to the type of hooks. The artefact from the grave 49 of Villalfonsina should be among the oldest types, made in the V century BC, but its dating could be specified only through the study of grave goods; the one from the tomb 4 of Colle Martino seems to be assigned to the first half of the IV century BC.

¹ Per tali scavi si veda R. PAPI, *Materiali archeologici da Villalfonsina (Chieti)*, in «Archeologia Classica» 31, 1979, pp. 18-95.

² D. AQUILANO, *Villalfonsina (CH), loc. Morandici. La necropoli arcaica e tarsoarcaica. Notizie preliminari*, in «Quaderni di Archeologia d'Abruzzo» 1, 2009, pp. 278-280.

³ Culminati nella realizzazione del Parco Archeologico del Quadrilatero comprendente anche un museo nel quale sono esposti i reperti rinvenuti durante gli scavi.

⁴ La tomba n. 1 a ca. 340 cm dall'attuale piano di campagna, la n. 4 a ca. 280 cm.

⁵ G. SCHNEIDER-HERRMANN, *The Samnites of the Fourth Century BC*, London 1996.

⁶ M. SUANO, *Alcune osservazioni sui cinturoni in bronzo di tipo sannitico, in Samnium. Archeologia del Molise*, catalogo della mostra, Roma 1991, pp. 135-139; EAD., *Il cinturone sabellico-sannita come abbigliamento sociale*, in *Studi sull'Italia dei Sanniti*, Roma 2000, pp. 183-191; M. ROMITO, *I cinturoni sannitici*, in *ibidem*, pp. 192-198.

⁷ M. SUANO, *Sabellian-Samnite Bronze Belts in the British Museum*, London 1986; M. SANNIBALE, *Le armi della Collezione Gorga al Museo Nazionale Romano*, Roma 1998, pp. 142ss.

⁸ Ovviamente tali oggetti costituiscono solo il *terminus post quem* per la sepoltura che però, come spesso accade, può contenere anche materiale più antico.

⁹ M. SUANO, *Sabellian-Samnite Bronze Belts*, cit., 1986; M. SANNIBALE, *Le armi*, cit., 1998.

Scavo archeologico virtuale di pani di terra: l'indagine TAC per il restauro di manufatti polimaterici

Virtual extraction of “soil clod” from archaeological sites: the tomographic analysis for the restoration of multi-material artifacts

Marco Demmelbauer, Margherita Martini, Chiara Ricci

Il lotto oggetto di affidamento è costituito da manufatti metallici in bronzo e ferro provenienti da diverse necropoli abruzzesi rinvenute in provincia di L'Aquila (Caporciano loc. Cinturelli, Avezzano loc. Cretaro, Opi loc. Val Fondillo) e Chieti (San Salvo loc. Colle Martino, Villalfonsina loc. Moran-dici). I manufatti sono particolarmente vari per quanto riguarda tipologia e destinazione d'uso; in virtù delle tradizioni guerriere delle antiche popolazioni, dalle necropoli sono emerse armi di diverse fogge: pugnali quasi sempre con il rispettivo fodero (talvolta rinvenuti infoderati, altre volte parzialmente o completamente sguainati), le punte di lancia e di giavelotto, dei *pila*, gladi, una *machaira* e una testa di mazza. La ricchezza delle popolazioni dell'antico Abruzzo è espressa dal diffuso rinvenimento nelle tombe di manufatti finemente decorati utilizzati come accessori di vestiario; tra questi sono presenti alcuni cinturoni maschili in lamina continua di bronzo con raffinati ganci terminali, realizzate a fusione piena e decorate ad incisione e punzonatura. I margini della lamina presentano forature su cui originariamente

era cucito uno strato di cuoio avente la funzione di rendere più confortevole l'uso della cintura.

Durante la fase di scavo archeologico è possibile prelevare i manufatti in modo diretto, avendo cura di prendere ogni singolo frammento che emerge dal terreno, oppure si può procedere in modo indiretto, attraverso il prelievo dell'oggetto in un blocco unico insieme al circostante contesto di giacitura. La prima soluzione è applicabile a manufatti di piccole dimensioni e in buono stato di conservazione, mentre il prelievo a “pane di terra” è indicato quando gli oggetti siano complessi, formati da molti elementi reciprocamente collegati, oppure fortemente degradati, corrosi o molto frammentati. In questo caso il successivo trasporto in laboratorio e il microscavo permetteranno di lavorare in modo più accurato, con più tempo e nelle migliori condizioni al fine di salvaguardare tutte le informazioni storiche e tecnologiche.

Sin da una prima analisi dei cinturoni è emerso un quadro globale particolarmente complesso poiché la stessa tipologia di ma-

The CT analyses were performed on a “soil clod” coming from a group of metal artefacts in bronze and iron from different Abruzzo's necropolis discovered in the province of L'Aquila (Caporciano loc. Cinturelli, Avezzano loc. Cretaro, Opi loc. Val Fondillo) and Chieti (San Salvo loc. Colle Martino, Villalfonsina loc. Moran-dici). The artefacts are very different in type and use; according to the war's traditions of ancient peoples, weapons of different shapes were found in the necropolis: daggers mostly with the respective sheath, lance and javelin, *pila*, gladi, a *machaira* and a mace head. The wealth of the people of ancient Abruzzo is testified in the tombs by the presence of finely decorated artefacts used as clothing accessories; among these are present decorative, elegant and wide metal belts for men. They are comprised of engraved double buckles and a continuous-metal belt strap, perfo-

rated to allow attachment of a leather liner for comfort.

Extraction of artefacts from archaeological sites can be done in two ways: directly or indirectly. Small objects may be recovered directly, taking care to remove each fragment separately from the soil or surrounding material; this method is usually employed for smaller, well-preserved items. Indirect extraction is used for larger artefacts and it is accomplished by removing a large “soil clod” (earth surrounding the object); this method is reserved for situations in which the objects are either complex and composed of multiple pieces or highly degraded, corroded, fragmented or fragile. Removal of the piece in its surrounding material allow a safe transport and the micro-work required to preserve historical and technological information takes place in a controlled environment. The recovery of these



FIG. 1 Cinturone (inv. 218159). "Pane di terra" prima e durante il microscavo in laboratorio.

FIG. 1 Belt (inv. 218159). "Soil clod" before and during the micro-excavation in the laboratory.

nufatto in lamina metallica e le sue modalità di sepoltura avevano indotto specifiche forme di degrado molto consistente. In fase di sepoltura, infatti, la sottile lamina di bronzo cingeva il corpo del defunto a diretto contatto, cosicché non solo questa era sottoposta agli attacchi chimici della decomposizione organica, ma doveva sopportare anche gli sforzi meccanici indotti dalla pressione del terreno sopra un corpo in disfacimento. Nel tempo ciò ha determinato una progressiva accentuazione della curva del cinturone sino al suo completo schiacciamento con parallelamente la corrosione della lamina

belts was particularly complex because of both to their metal composition and to the manner in which they were buried. The belts were in direct contact with the deceased and so were exposed to the chemical effects of organic decomposition and the pressure of the heavy soil above the body; these dual stresses impacted the curvature of the belts until they became completely flat. At the same time, the heavy corrosion resulted in flaking and splintering of the metal into small chippings. Fortunately, the decision to extract the artefacts indirectly by moving a good-sized soil clod (FIG. 1) allowed to recover the material information and to reconstruct almost completely the pieces.

The initial CT image (FIG. 2) provided information on the complexity of the recovery; the general overview of the soil clod contents showed the position of the various elements and their fragmentation as well as the stratification of materials. The buckles with their distinctive decoration and the overlapping metal straps were clearly visible, including the distortion of the curved portion of the belts. It was clearly that the points with the greater curvature were almost entirely destroyed and lost.

ha reso il metallo sempre più mineralizzato e fragile, a tal punto da frammentarsi in minute schegge. Fortunatamente la scelta di prelevare alcuni di tali cinturoni con il sistema del "pane di terra" (FIG. 1) ha permesso di preservare molti dei dati materiali e ricostruire pressoché totalmente quanto rimasto degli oggetti.

Il preliminare impiego della TAC (FIG. 2) ha consentito di avere un quadro generale del contenuto del blocco di terra, in modo che fosse possibile valutare in anticipo le problematiche da affrontare, lo stato di frammentazione del manufatto, i vari elementi costitutivi e le stratigrafie esistenti. È stato possibile distinguere nettamente i ganci con le loro decorazioni e la sovrapposizione delle lamine (FIG. 2); si è pure osservata la grave deformazione delle strutture, ma è parso subito chiaro che, nei punti di maggiore curvatura, la struttura della lamina si era quasi completamente distrutta e persa. Attraverso un'opportuna modifica dei toni chiari e scuri nelle immagini radiografiche e nelle ricostruzioni tomografiche si è riusciti a far emergere efficacemente i frammenti metallici dalla circostante terra di sepoltura. L'attenta osservazione della TAC ha fatto emergere dubbi su alcune circoscritte zone inspiegabilmente più spesse rispetto a quelle limitrofe: nel corso dell'intervento di restauro si è potuto comprendere come tali ispessimenti della lamina fossero riconducibili a operazioni di riparazione effettuate in antico. In tale ambito stupisce osservare come spesso tali manutenzioni fossero finalizzate a perpetrare esclusivamente l'uso dello specifico manufatto, senza eccessiva

Careful observation of the CT images raised questions about certain areas of the metal that were inexplicably thicker than the adjoining metal. During the restoration process, it became evident that these thicker areas represented repairs to the belts performed to prolong the life of the objects. Incredibly, these repairs were done without taking care of the original aesthetic quality of the objects. Repairs of the cracks in the straps were made through the use of hammered bronze rivets or with replacement bronze straps attached with rivets of the same material: this latter repair is shown clearly in the CT (FIG. 2).

The virtual analysis of the soil clod allowed an examination in crosswise and lengthwise direction and permitted a virtual stratified micro-recovery. After conducting the virtual recovery, the actual stratigraphic recovery was performed, comparing the archaeological evidence with information coming from scientific analyses. The vertebrae of the deceased were observed between the belt straps and they contributed to the distortion and the fragmentation of the belts itself. Because of the high porosity, the bones were barely distinguishable in the CT image, but it could be assumed their pres-

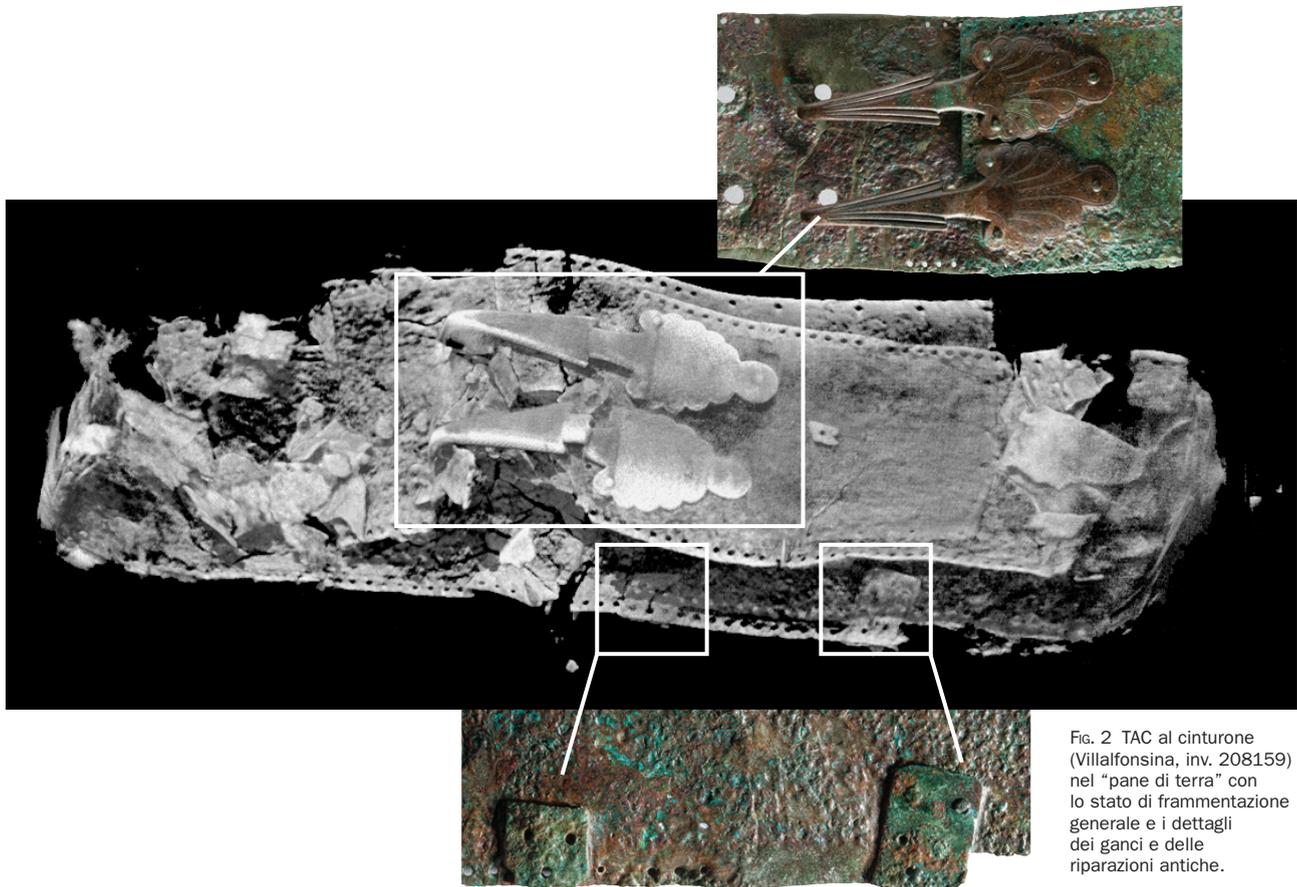


Fig. 2 TAC al cinturone (Villalfonsina, inv. 208159) nel "pane di terra" con lo stato di frammentazione generale e i dettagli dei ganci e delle riparazioni antiche.

Fig. 2 CT image of the belt (Villalfonsina, inv. 208159) in the soil clod showing fragments of the metal strap and the details of the buckles including ancient repairs.

cura degli aspetti estetici. Le riparazioni venivano infatti realizzate con soli rivetti bronzei ribattuti nel caso di fessurazioni della lamina, oppure con nuove lamine in bronzo trattenute con rivetti dello stesso materiale; proprio quest'ultimo caso è emerso in modo molto evidente dalla TAC (FIG. 2).

La possibilità di gestire in modo virtuale il pane di terra ha consentito di selezionarlo trasversalmente e longitudinalmente esaminando preventivamente la composizione degli strati ed effettuando una sorta di mi-

croscavo stratigrafico virtuale. Il microscavo è stato successivamente effettuato concretamente, procedendo in modo stratigrafico e confrontando le evidenze archeologiche con le informazioni fornite dalle analisi scientifiche. Tra le lamine erano ancora osservabili le ossa della colonna vertebrale del defunto che, appoggiandosi sul cinturone, avevano contribuito alla sua grave deformazione e frammentazione; in virtù della elevata porosità, tali ossa erano difficilmente riconoscibili nella TAC e si potevano individuare

ence based on the hollow space inside the burial soil (FIG. 3).

Analysis of the CT images suggested the presence of additional porous and cracked layers around the artefact, different to the homogeneous and compact layer made by sand-like burial soil (FIG. 4). In fact, it was established that the porous layer under the bronze was a large piece of leather, completely degraded and disintegrated but clearly recognizable since the corrosive copper had fossilized it.

Another organic layer, found under the belt, can be related to the base stratum of the grave: occasionally, this level is made by wood, but in this case it consisted of an unidentified organic material, probably a shroud over an organic layer put at the bottom of the grave (FIG. 4 and 5). Unfortunately, the X-ray opacity of very porous elements – wood, tissue, leather, bones – is similar and it is impossible to distinguish these different materials; only metal parts are clearly identifiable from the surrounding soil.

Through stratigraphic excavation, selective removal of the different layers was carried on, accompanied by recording archive, drawing and photograph information. The removal of organic layers was made

through veiling and hardening with acrylic resin (Palaloid B72 at 10%) which kept the sensitive material intact (FIG. 5). With the micro excavation it was possible not only to place each tiny fragment in its original position but also to recover the underlying leather layer; this level of recovery is an unusual achievement since such fragile material is usually lost in the excavation process.

With respect to the condition of the metal, the environment caused corrosion in the form of pustules covering a large surface. In some areas was recognized the presence of chlorides (in the form of nanokite with a translucent waxy appearance and probably the presence of atacamite or paratacamite with a light green powdery aspect), which are known to cause cyclic corrosion processes particularly harmful to bronze¹. Unfortunately the use of CT is not particularly useful in recognizing the mineralization condition of metal.

The restoration process involved a multidisciplinary group of professionals: a team of restorers closely cooperated with photographers, computer graphics experts, physicists and chemists. The use of CT for the soil clods was particularly interesting

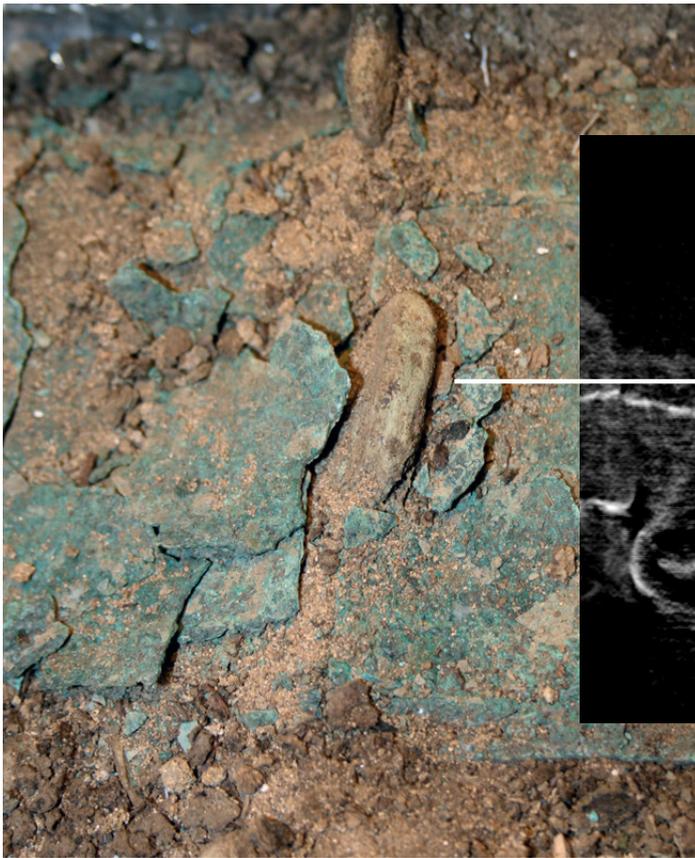


FIG. 3 TAC e immagine in luce visibile del cinturone inv. 218159: particolare delle vertebre che hanno forato la lamina di bronzo.

FIG. 3 CT image and photo of the belt (inv. 218159), detail of vertebrae bones that cut the belts.

in modo approssimativo solamente per la presenza di un apparente vuoto all'interno della terra di giacitura (FIG. 3).

L'osservazione della TAC aveva suggerito la presenza di strati più porosi e fessurati presso il manufatto, contrapposti allo strato omogeneo e compatto riferibile alla terra di giacitura di natura sabbiosa (FIG. 4). Si è po-

tuto infatti verificare che lo strato poroso al di sotto del bronzo era una estesa presenza di cuoio completamente degradato e decoeso, ma ancora nettamente distinguibile perché reso in parte "fossile" dalla presenza dei prodotti di corrosione del rame.

Inoltre, al di sotto del cinturone è stato rinvenuto un ulteriore strato organico probabilmente attribuibile al letto di deposizione posto sul fondo della tomba: talvolta si è trovato uno strato di legno, nel caso specifico invece è stato rinvenuto uno strato organico di natura ignota riconducibile forse al vestiario del defunto frammisto ad una struttura organica di natura vegetale sul fondo della cassa (FIGG. 4-5). Purtroppo la differenza di radiopacità di elementi molto porosi quali legno, tessuto, cuoio e ossa non è tale da consentire un puntuale riconosci-



FIG. 4 TAC e immagine in luce visibile del cinturone inv. 218159: particolare dello strato organico.

FIG. 4 CT image and photo of the belt (inv. 218159), detail of the organic layer.



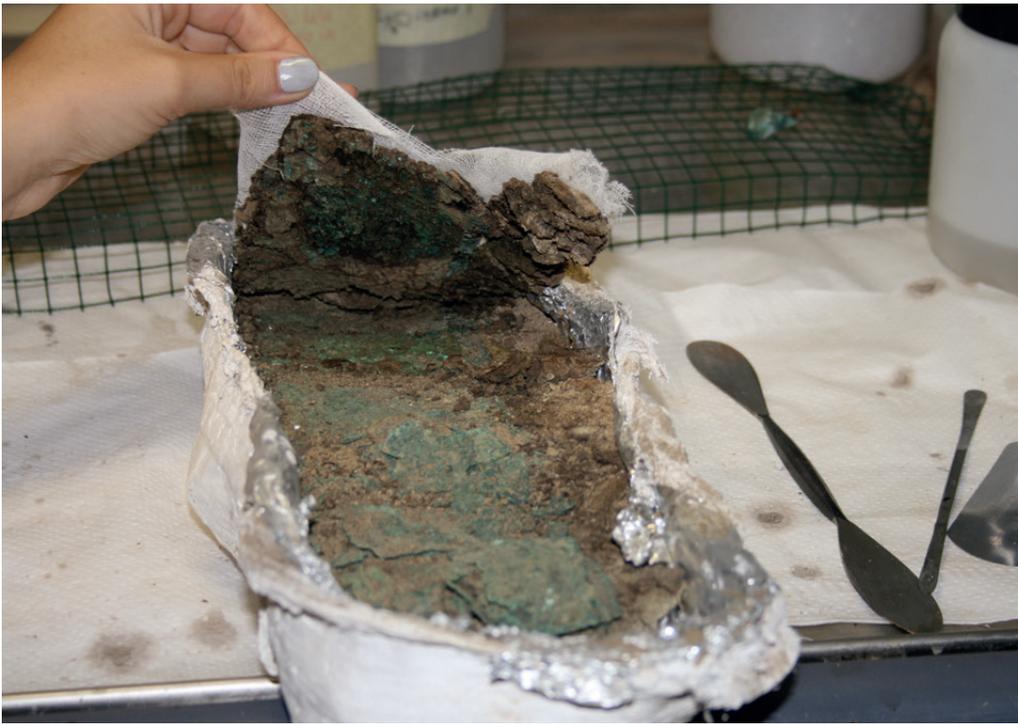


Fig. 5 Prelievo dello strato organico tramite velatura (cinturone inv. 208159).

Fig. 5 Sampling of the organic layer (belt inv. 208159).

mento materico ma permette solamente una differenziazione dal metallo e dal terreno di giacitura circostante.

Lo scavo stratigrafico ha permesso di prelevare selettivamente i differenti strati che sono stati documentati tramite disegni e fotografie; il recupero degli strati organici è avvenuto mediante velatura e consolidamento con resina acrilica (Paraloid B72 al 10% in acetone) che ha permesso di mantenere integro il delicato materiale (FIG. 5). Il microscavo ha permesso non solo di ricollocare ogni singolo micro-frammento della lamina nella posizione originaria ma anche il recupero dello strato di cuoio al di sotto di essa: tale circostanza è particolarmente rara in quanto questo materiale è talmente fragile che generalmente nelle fasi di scavo viene perduto.

for determining the condition of the artefact and its repairs before the actual recovery, thereby facilitating the restoration.

In general, the restoration allowed a better conservation conditions by arresting or retarding the existing degradations process and also improving the aesthetics of the artefacts (FIGG. 6-8). Furthermore, the recovery and conservation of a large number of historical pieces will help archaeological studies, enrich museum collections and contribute to the dissemination of acquired cultural information. Testing indicates that the CT method is preferable for metal objects with a high X-ray opacity; unfortunately, this method creates strong metal artifact which reduce the reliability of readings on adjacent elements with lower X-ray opacity. Nevertheless, careful observation of the structural discontinuities within the soil clod allows to recognize porous organic elements.

Per quanto riguarda lo stato di conservazione del metallo, lo specifico ambiente di conservazione ha dato luogo a forme di corrosione a pustole diffuse su gran parte delle superfici. Talora si osservava anche la presenza di cloruri (sotto forma di nantokite di aspetto traslucido e ceroso, ma anche probabile presenza di atacamite o paratacamite di aspetto verde chiaro pulverulento) che notoriamente danno luogo a processi di corrosione ciclica particolarmente dannosa nei confronti del bronzo¹. Purtroppo la TAC non si è rilevata utile nel definire preventivamente lo stato di mineralizzazione del metallo.

Fig. 6 Prima dell'intervento di restauro.

Fig. 6 Before restoration.





nonostante, attraverso l'attenta osservazione delle discontinuità strutturali all'interno del "pane di terra" è possibile discernere la presenza di elementi più porosi di natura organica. In generale l'intervento non solo ha permesso di ripristinare migliori condizioni conservative, arrestando o rallentando i processi di degrado in corso, ma ha anche permesso di migliorare la lettura estetica dei manufatti (FIGG. 6-8). Inoltre la raccolta e la conservazione di una gran quantità di evidenze storiche faciliterà approfondimenti da parte degli archeologi, arricchirà il percorso museale e consentirà la diffusione delle informazioni desunte.



FIGG. 7-8 Dopo l'intervento di restauro.

FIGS. 7-8 After restoration.

L'intervento di restauro si è basato su un lavoro multidisciplinare attraverso il coinvolgimento di numerose professionalità: un nutrito *team* di restauratori ha collaborato strettamente con fotografi ed esperti in computer grafica, fisici e chimici. L'uso della TAC nell'ambito dei "pani di terra" è stato particolarmente interessante per conoscere preventivamente lo stato di frammentarietà del manufatto e i pregressi interventi di manutenzione, facilitando così le operazioni di restauro. In base alle prove effettuate si è potuto evidenziare che tale metodologia è preferibilmente impiegabile per l'indagine degli elementi metallici che sono fortemente radio-opachi; purtroppo proprio questa caratteristica genera forti segnali di disturbo che vanno ad ostacolare la corretta lettura di limitrofi elementi meno radio-opachi. Cio-

¹ Per l'eliminazione dei prodotti di corrosione si è proceduto prevalentemente in modo meccanico mediante l'uso di bisturi, microsabbiatrice a bassa pressione con polvere di vetro a 200 mesh o microtrapano con frese diamantate; infine più cicli di lavaggio in acqua demineralizzata (riscaldata a 50°C. e mantenuta in agitazione), ha permesso di eliminare anche i sali solubili presenti nelle porosità. I frammenti sono stati riassemblati e integrati mediante l'uso di resina epossidica (Uhu plus) pigmentata in pasta (e infine il manufatto è stato protetto con una applicazione di resina acrilica con benzotiazolo (Incral 44, al 5% in acetone) e uno strato di cera microcristallina con BTA (Soter O/C).

For removal of corrosive material, mechanical methods are primarily used, such as bistouries, low-pressure micro-sanders with glass powder at 200 mesh or micro-drills with diamond cutters; then, several rinsing cycles in demineralized water (heated to 50°C and continuously stirred) allowed for the removal of soluble salts in pores. The fragments have been assembled and integrated with a pigmented epoxy resin (Uhu plus) in paste. Finally the artefacts were protected with a layer of acrylic resin with benzothiazole (Incral 44, at 5% in acetone) and a layer of microcrystal wax with BTA (Soter O/C).

Le radiografie con neutroni come supporto per l'autenticazione di manufatti archeologici

Neutron radiography as a support for authentication of archaeological artefacts

Marco Demmelbauer, Valentina Demontis, Giorgia Mila, Alessandro Re, Lorenzo Visca

Tra i vari oggetti artistici radiografati con neutroni in occasione delle misure effettuate a NECTAR e ISIS, vengono qui presentati due oggetti in lega di rame rappresentanti una statua (H 600 mm x L 230 mm x W 150 mm) e uno specchio (H 570 mm x L 270 mm x W 190 mm) di aspetto archeologico e provenienti da una collezione privata. Sin da una prima analisi stilistica da parte degli archeologi erano scaturiti consistenti dubbi circa l'originalità di tali manufatti, perplessità che hanno trovato piena conferma dagli studi tecnologici dei restauratori¹ e dalle indagini scientifiche effettuate. In particolare per quanto concerne lo specchio (FIG. 1) apparivano evidenti numerose incongruenze stilistiche, costituite da elementi provenienti da contesti geografici eterogenei e datazioni inconciliabili².

Il manufatto è uno *stand mirror* decorato con una approssimativa figura femminile bidimensionale, posta su una base a forma di tartaruga e che sorregge un disco decorato con una scena figurata e rilievi perimetrali. Nel cerchio esterno sono presenti scarabei a rilievo, mentre in quello interno si intravede

un girale inciso con elementi vegetali intrecciati; mediante l'indagine radiografica (FIG. 2), questi risultano ben visibili al di sotto delle incrostazioni.

Per quanto riguarda le tecniche esecutive, in tutte le aree di produzione e nelle varie epoche, gli specchi erano realizzati in lega di bronzo ad alto tenore di stagno. Le analisi XRF condotte in diversi punti del manufatto hanno evidenziato invece l'impiego di una lega di ottone: per quanto riguarda il sostegno e il disco la lega è assolutamente pura, mentre la tartaruga ha una composizione più eterogenea con la presenza di ulteriori elementi (nichel, piombo, ferro e stagno). L'ottone, seppur conosciuto in epoca antica, non risulta compatibile con la specifica tipologia

FIG. 1 Specchio. Foto generale (fronte e retro).

FIG. 1 Mirror. General view (front and back).



Among the various artistic objects subjected to neutron radiography during the measurements carried out in NECTAR and ISIS, two objects in copper alloy are presented: a statue (H 600 mm x L 230 mm x W 150 mm) and a mirror (H 570 mm x L 270 mm x W 190 mm) of archaeological aspect and coming from a private collection. Since an initial stylistic analysis by archaeologists substantial doubts about the originality of these artefacts were arising, perplexities that have been fully confirmed by the technological studies¹ of restorers and the scientific analyses. In particular with regard to the mirror (FIG. 1) a number of stylistic inconsistencies appeared, consisting of elements from disparate geographical contexts and incompatible dating². The object is a stand mirror decorated with an approximate two-dimensional female figure, placed on a base shaped like a turtle and supporting a disk decorated with

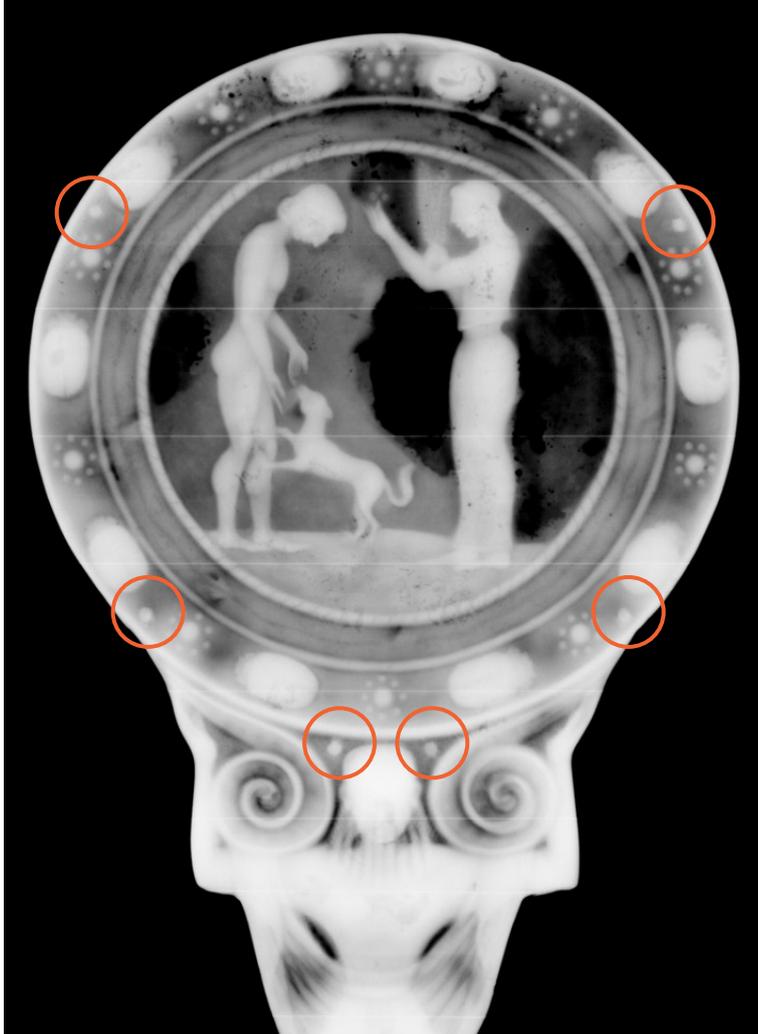


Fig. 2 Specchio. Particolare della radiografia a raggi X in cui si osservano i difetti di fusione, le incisioni decorative e i finti rivetti.

FIG. 2 Mirror. Detail of the X-ray in which the casting defects, the decorative engravings and fake rivets are visible.

a figurative scene and perimetral reliefs. Scarabs in relief are present in the outer circle, while in the inner one a gyal engraved with vegetable twisted elements is visible; through the radiographic examination (FIG. 2), these ones are well visible below the encrustations.

Regarding the techniques, in all production areas and in various periods, the mirrors were made of bronze alloy with high tin content. The XRF analysis carried out in several point of the artefact showed instead the use of a brass alloy: the alloy of the support and the disk is absolutely pure, while the turtle has a more heterogeneous composition, showing the presence of additional elements (nickel, lead, iron and tin). The brass is not compatible with the specific artefact, although this alloy was known in ancient times and in antiquity refining processes and enrichment of metals were not so advanced to allow to obtain copper alloys absolutely pure, as for the analysed object. Six cylindrical growths in the outer of the disk, arranged symmetrically on both the front and the back, are observed (FIG. 2); they are not decorative elements, it is possible to assume that they wish to represent rivets and they might indicate the point of constraint between two structural elements, in particular for the pair near the female figure supporting the disk. The observations and radiographic investigations (FIG. 3) did not show structural discontinuities in this area (the artefact was melted into a single casting, probably with the technique of "lost wax"), so these supposed rivets are not fully functional for the static and were represented with the deliberate purpose to imitate similar components often found in stand mirrors assembled into more elements. A weld line is visible only in the lower part, near the pedestal shaped like a turtle, which in fact appears to be of different composition. The analysis of the state of preservation of

di manufatto e soprattutto si evidenzia il fatto che in antichità i processi di raffinazione e arricchimento dei metalli non erano così evoluti da consentire l'ottenimento di leghe di rame assolutamente pure, come quella dell'oggetto analizzato.

Sul manufatto si osservano sei escrescenze cilindriche perimetrali al disco, disposte simmetricamente sia sul fronte che sul retro (FIG. 2); non costituendo elementi decorativi, si può supporre che questi vogliono rappresentare dei rivetti e, in particolare la coppia presso la figura femminile di sostegno al disco, potrebbero indicare il punto di vincolo tra i due elementi strutturali. Ciononostante le osservazioni ad occhio nudo e le indagini radiografiche (FIG. 3) non evidenziano discontinuità strutturali in quest'area (il manufatto è stato fuso in un'unica gittata, probabilmente con la tecnica a "cera persa"), pertanto tali presunti rivetti non sono assolutamente funzionali alla statica e sarebbero stati rappresentati con l'intenzionale scopo di imitare analoghi componenti spesso presenti negli *stand mirrors* assemblati in più elementi. Una linea di saldatura è visibile solamente nella parte inferiore, in prossimità del piedestallo a forma di tartaruga, che infatti risulta essere

the structure and surfaces suggests that the artefact is a fake: the mirror has in fact thinning and evident gaps in the central area of the disk; such damages do not appear to be produced by the degradation processes, but because of defects in casting (X-rays reveal inhomogeneity in the alloy and a significant presence of micro bubbles, FIG. 2). Generally, however, these defects were repaired during construction phase, especially in the case in which the reflective part is interested by defects, determining the real possibility to use the artefact. All technical, stylistic and scientific considerations help to establish in a unambiguous way that the mirror is a modern replacement; some doubt on the support base exist because it is different in composition and appearance and an assemblage of heterogeneous elements, some of these original, could be hypothesized.

Second artefact is a statue of a naked man in a standing position with legs close together (FIG. 4); a bent arm at right-angles with an open hand represents perhaps a gesture of offering. The appearance of the figure is slim and slender with a very brief physiognomy: the presence of a probable corset is visible and the hair, almost non-existent, is made by a few wisps arranged on the shoulders. From a stylistic point of view the statue recalls the approach of archaic *Kouroi* but it differs regarding the iconographic aspects; in fact, the step of the legs is missing, the arms are not placed on the hips and the figure is partially clothed rather than naked. In terms of technology, the artefact is hollow and the thickness of metal is variable between 2 mm and 4 mm, compatible with the casting technique "lost wax", assembling the parts by welding (base, legs, torso, arm). The use of this technique is also confirmed by the presence of unidirectional fine lines found inside the statue and attributable to brush marks during the coat of the wax before melting,

di composizione differente. Anche l'analisi dello stato di conservazione strutturale e delle superfici porta a pensare che il manufatto sia un falso: lo specchio presenta infatti assottigliamenti e vistose lacune nella zona centrale del disco; tali danni non sembrerebbero prodotti da processi di degrado, bensì imputabili a difetti di colata (le radiografie rivelano disomogeneità della lega utilizzata e una consistente presenza di micro bolle, FIG. 2). Generalmente però tali difetti venivano riparati in fase di realizzazione, tanto più nel caso specifico in cui è interessata la parte riflettente che determina l'effettiva possibilità di utilizzo del manufatto.

Tutte le considerazioni tecniche, stilistiche e scientifiche concorrono a stabilire in modo pressoché univoco che lo specchio in esame sia un rifacimento moderno; qualche dubbio sussiste sulla base di appoggio che risulta differente per composizione ed aspetto, per cui si potrebbe ipotizzare un assemblaggio di elementi eterogenei in parte originali.

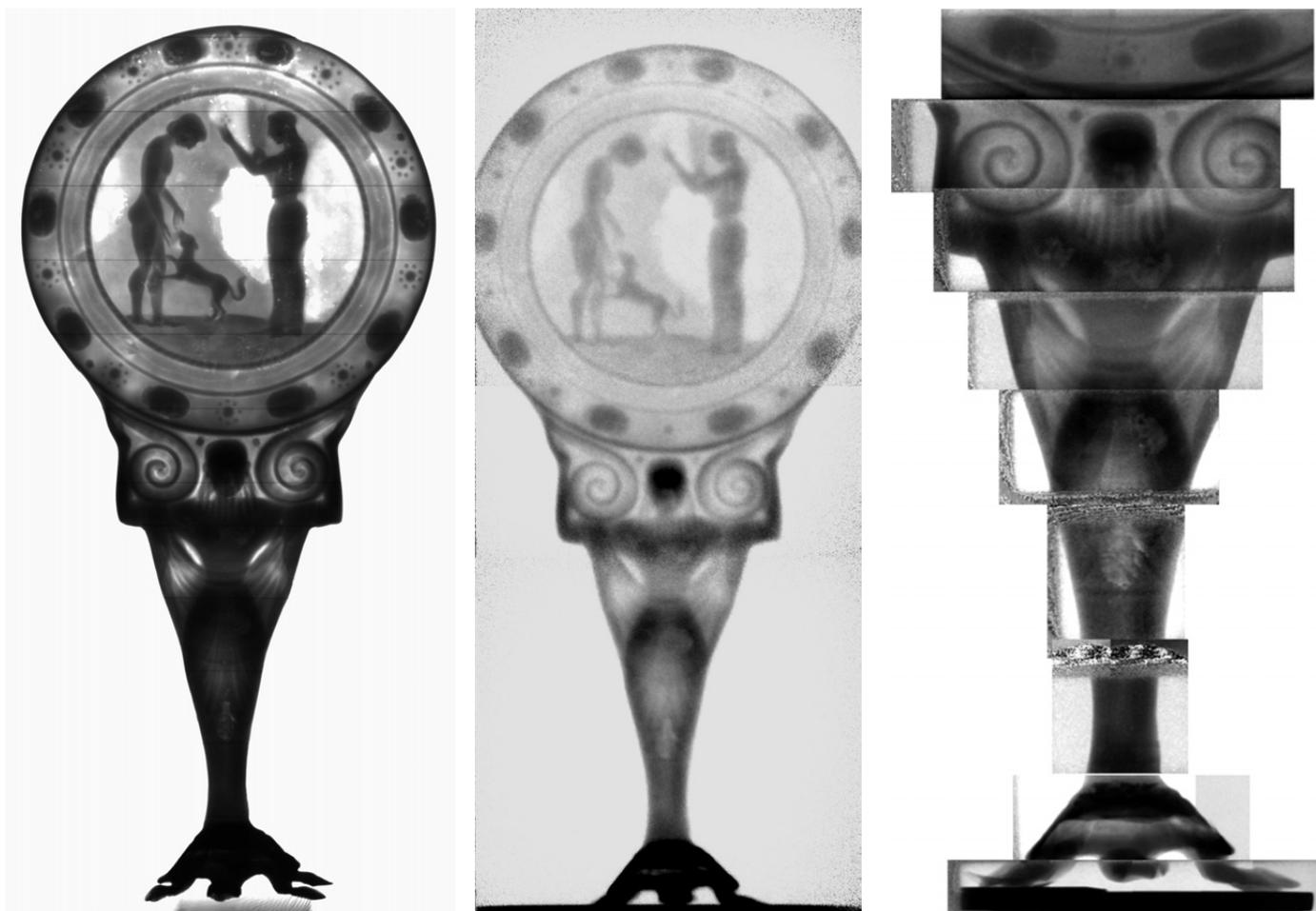
Il secondo manufatto preso in esame è una statua raffigurante un uomo nudo in posizione stante con gambe unite (FIG. 4); un braccio piegato ad angolo retto e mano aperta rappresenta forse un gesto di offerta. L'aspet-

to della figura è esile e longilineo con una descrizione fisiognomica estremamente sommaria: si riesce ad intuire la presenza di un probabile corsetto e la capigliatura, pressoché inesistente, si riassume con poche ciocche che si adagiano sulle spalle. Sotto il profilo stilistico la statua ricorda l'impostazione dei kouroi arcaici ma se ne differenzia per gli aspetti iconografici; infatti manca il passo accennato delle gambe, le braccia non sono disposte sui fianchi e la figura è parzialmente vestita anziché nuda. Sotto il profilo tecnologico, il manufatto è cavo e presenta spessori del metallo variabili tra 2 mm e 4 mm, compatibili con la tecnica di fusione "a cera persa", con assemblaggio per parti mediante saldatura (base, gambe, torso, braccio). L'uso di tale tecnica sarebbe per altro confermato dalla presenza di sottili linee unidirezionali riscontrabili all'interno della statua e attribuibili ai segni del pennello durante le fasi di stesura della cera prima della fusione; ciò attesterebbe una esecuzione a "cera persa" secondo procedimento indiretto.

Così come per lo specchio precedentemente illustrato, anche per la statua sono state effettuate radiografie a raggi X (operando con l'apparato descritto nel capitolo "L'apparato

Fig. 3 Specchio.
A. Radiografia con raggi X.
B. Radiografia mediante neutroni veloci a NECTAR.
C. Particolare del manico, radiografia mediante neutroni termici ad INES.

FIG. 3 Mirror.
A. Radiograph with X-ray.
B. Radiograph with fast neutrons at NECTAR.
C. Detail of handle, radiograph with thermal neutrons at INES.



radio tomografico”, alla massima tensione di 200 kV) e radiografie con fascio di neutroni di tipo veloce a NECTAR e di tipo termico ad ISIS (FIG. 5). Questi ultimi producono immagini di risoluzione migliore rispetto a quelle ottenute a NECTAR al prezzo di un campo immagine di dimensioni molto ridotte che ha richiesto la sovrapposizione di 50 radiografie con neutroni per coprire tutta l'impugnatura dello specchio. Il confronto dei due tipi di radiografia, con raggi X e con neutroni, evidenzia chiaramente la complementarità delle due tecniche d'indagine. I raggi X possiedono la capacità di risolvere meglio i piccoli dettagli delle figure rappresentate sullo specchio ma, non essendo in grado di attraversare più di pochi millimetri di metallo, sono inadatti a rivelare la struttura interna della statua e la presenza di elementi leggeri al suo interno. La radiografia con neutroni di NECTAR permette invece di definire gli spessori della figura e le zone di cavità: nel caso specifico, è possibile evidenziare in modo netto che il braccio della statua presenta un assorbimento uniforme fino al punto di saldatura sull'avambraccio, indice che è realizzato per

fusione piena. Le gambe appaiono completamente cave, ad eccezione del polpaccio sinistro dove si osserva una macchia scura, dovuta alla presenza di un riempitivo leggero interno (forse terra di fusione), evidenziato anche tramite endoscopia. La linea chiara che corre al centro di entrambe le gambe (FIG. 5B-C), dovuta ad uno spessore inferiore rispetto al resto della gamba, indica che gli arti inferiori sono stati ottenuti unendo le cere preparatorie, realizzate in due gusci separati. Il corpo della statua e la sua base sono composti da una lega di ottone con inclusi di ferro e piombo, mentre le gambe presentano lievi variazioni con la presenza anche di piccole percentuali di stagno; la zona della saldatura invece evidenzia l'uso di una lega più basso fondente con maggiore quantità di zinco. Tali dati confermano la realizzazione del manufatto in più parti, probabilmente eseguite in fasi differenti dalla stessa officina. Anche in questo caso l'uso dell'ottone invece che il consueto bronzo lascia interdetti e spinge a credere che il manufatto sia di produzione moderna. Tale ipotesi è tanto più accreditata osservando il degrado del manufatto, in particolare la presenza delle lacune e mancanze. Infatti, gli estesi fori presso la testa, il collo e il braccio sinistro sembrano imputabili più a difetti di esecuzione e intenzionali assottigliamenti di spessore, piuttosto che ai processi di corrosione. Anche in questo caso così come per lo specchio, se il manufatto fosse un originale di epoca antica, gli eventuali difetti di fusione sarebbero stati sicuramente riparati in fase di realizzazione. È dunque verosimile che l'autore abbia intenzionalmente lasciato tali mancanze al fine di attestare una travagliata quanto improbabile vicenda conservativa. Le similitudini riscontrate su entrambi i manufatti a partire dalla composizione, le

Fig. 4 Statua, foto generale (fronte e lato destro).

FIG. 4 Statue, general view (front and right side).



stating a “lost wax” indirect process. As well as for the mirror described above, even for the statue radiographs with X-ray (operating with the apparatus described in the chapter “The radio-tomographic apparatus”, at the maximum voltage of 200 kV) and radiographs with fast neutron beam at NECTAR and slow neutron beam at ISIS were carried out (FIG. 5). Latter produce images with better resolution with respect to NECTAR one but with an image field of very small dimensions and the overlap of 50 neutrographs to cover all the handle of the mirror is required. The comparison of the two types of radiography, with X-rays and with neutrons, clearly highlights the complementarity of the two techniques. The X-rays allow a better view of the small details of the figures on the mirror, but they cannot pass through more than a few millimetres of metal and are unsuitable to reveal the internal structure of the statue and the presence of light elements inside it. The neutron radiography

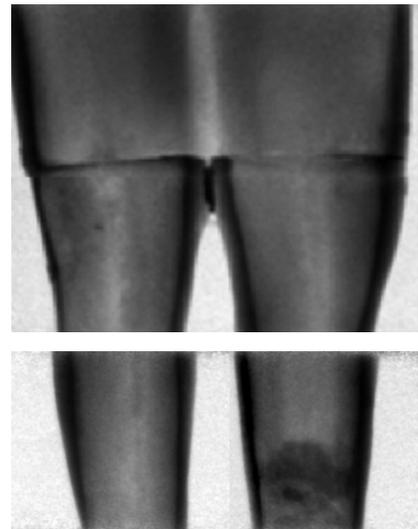
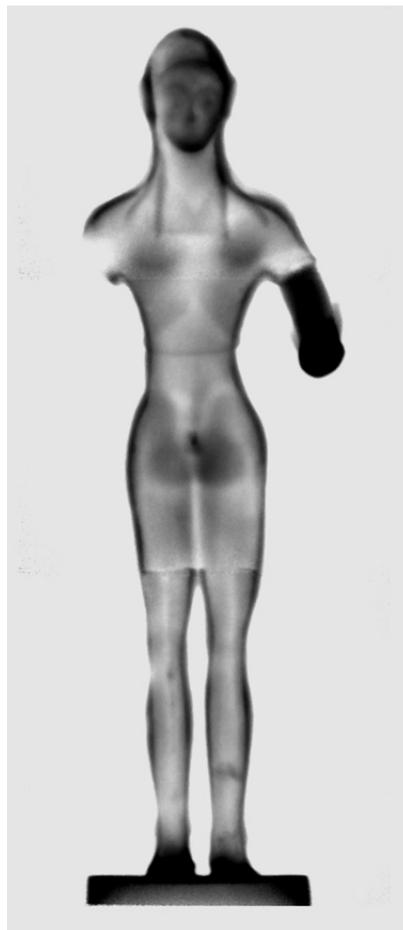
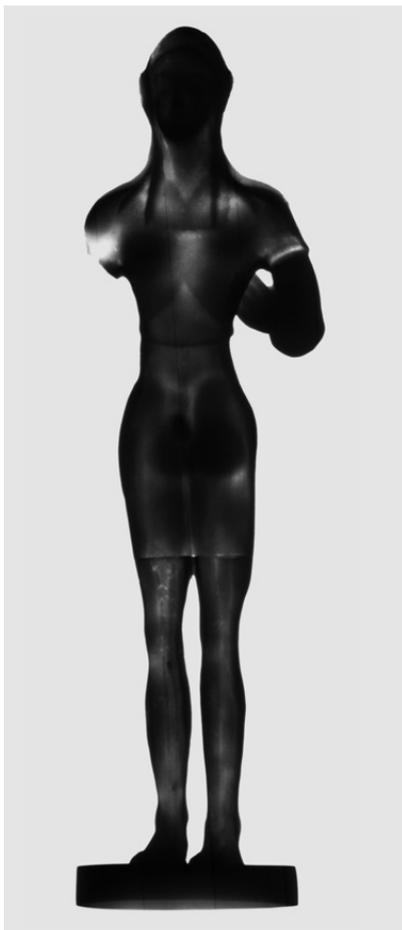


FIG. 5 Statua.
A. Radiografia con raggi X.
B. Radiografia mediante neutroni veloci a NECTAR.
C. Particolare della gamba, radiografia mediante neutroni termici ad INES.

FIG. 5 Statue.
A. Radiograph with X-ray.
B. Radiograph with fast neutrons at NECTAR.
C. Detail of leg, radiograph with thermal neutrons at INES.

tecniche di realizzazione e il *modus operandi* per l'invecchiamento dei materiali, non solo permettono di asserire che si tratta di manufatti moderni realizzati ad imitazione di reperti archeologici antichi, ma si può persino ipotizzare che siano stati realizzati dalla medesima officina.

¹ V. DEMONTIS, *I falsi artistici: iconografia, tecniche di realizzazione, materiali costitutivi e tecniche di riconoscimento*. Studio condotto a partire dai reperti bronzei di una collezione privata,

Tesi di laurea triennale, Università degli Studi di Torino, 2010, relatore M. Demmelbauer.

² A. CASTELLANI, *Dell'oreficeria antica*, Firenze 1862, p. 62; I. CARUSO, *Bronzetti di produzione magnogreca dal VI al IV secolo a.C.; la classe degli specchi*, in «MDAI(R)», LXXXVIII, 1981, pp. 72, 73; L.O.K. CONGDON, *Caryatid mirrors of ancient Greece. Technical, Stylistic and Historical Considerations of an Archaic and Early Classical Bronze Series*, Mainz am Rhein 1981, p. 5; A.A. CARPINO, *Discs of splendor. The relief mirrors of the Etruscans*. London 2003, p. 83; D. ELIA, *Locri Epizefiri VI. Nelle case di Ade. La necropoli in contrada Lucifero: nuovi documenti*, Alessandria 2010, pp. 262-264.

at NECTAR instead allows to define the thickness of the figure and the hollow areas: in the specific case, it is possible to clearly highlight that the arm of the statue shows a uniform absorption up to the welding point on the forearm, indicating that it is built with a complete casting. The legs appear completely hollow except the left calf where a dark spot is observed, due to the presence of a lightweight filler inside, as underlined also by endoscopy. The light line running at the centre of both legs (FIG. 5B-C), due to a thickness less than the rest of the leg, indicates that the lower limbs were obtained by combining the preparatory waxes, made in two separate shells. The body of the statue and its base consist of a brass alloy with iron and lead, while the legs show the presence of a small percentages of tin; the area of the weld highlights the use of a lower melting alloy with higher amounts of zinc. These data confirm that the artefact has been made in several parts, probably performed in different phases

by the same workshop. Even in this case, the use of brass, instead of the usual bronze, indicates that the artefact is modern. This hypothesis is also supported by observing the degradation of the object, in particular the presence of gaps and lacks. In fact, the holes on the head, neck and left arm appear to be attributable to workmanship defect and to intentional thinning, rather than related to processes of corrosion. Even in this case as well as for the mirror, if the artefact was original, any casting defects would be surely repaired under construction. It is therefore probable that the author intentionally left these lacks in order to certify a troubled but unlikely conservative event. The similarities found on both the artefacts with respect to composition, construction techniques and *modus operandi* for the aging of materials, allow to confirm that they are modern artefacts made to imitate ancient archaeological finds, and it can be even hypothesized that they have been made by the same workshop.

Referenze fotografiche

Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici del Piemonte

Fondazione Centro per la Conservazione e il Restauro dei Beni Culturali “La Venaria Reale”

Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo

Segretariato Generale della Presidenza della Repubblica, Palazzo del Quirinale

Soprintendenza per i Beni Archeologici dell’Abruzzo

Soprintendenza per i Beni Architettonici e Paesaggistici per le province di Torino, Asti, Cuneo, Biella e Vercelli (Castello di Racconigi)

Soprintendenza per i Beni Storici, Artistici ed Etnoantropologici del Piemonte

Torino, Collezione privata

La casa editrice è a disposizione degli aventi diritto per le fonti iconografiche non identificate e si scusa per eventuali involontarie inesattezze e omissioni.