

Ministero per i beni e le attività culturali



R E S T A U R O

30 2018

Rivista dell'Opificio delle Pietre Dure
e Laboratori di Restauro di Firenze

Centro Di

Soprintendente

Marco Ciatti

Direzione

Giancarlo Lanterna, Patrizia Riitano,
Laura Speranza

Comitato di redazione

Andrea Cagnini, Marco Ciatti,
Cecilia Frosinini, Monica Galeotti,
Riccardo Gennaioli, Giancarlo Lanterna,
Letizia Montalbano, Anna Patera,
Simone Porcinai, Sandra Rossi,
Laura Speranza, Isetta Tosini

Ufficio Promozione Culturale

Sandra Rossi, Riccardo Gennaioli,
Angela Verdiani, Silvia Benassai

Archivio restauri

Anna Patera, Stefania Giordano,
Ornella Savarino

Gabinetto fotografico

Cecilia Frosinini, Marco Brancatelli,
Giuseppe Zicarelli

Direzione e Redazione

Opificio delle Pietre Dure
Via degli Alfani 78, 50121 Firenze
tel. 055 2651347 / fax 055 287123
www.opificiodellepietredure.it
opd.promozioneculturale@beniculturali.it

Si ringrazia per la collaborazione
l'Associazione Amici dell'Opificio

Redazione

Clara Gambaro

Hanno collaborato a questo numero


Opificio delle Pietre Dure

Stefania Agnoletti, Lucia Maria Bresci,
Annalena Brini, Giancarlo Buzzanca,
Andrea Cagnini, Sandra Cassi, Marco
Ciatti, Alberto Felici, Cecilia Frosinini,
Monica Galeotti, Luisa Gusmeroli, Maria
Rosa Lanfranchi, Giancarlo Lanterna,
Paola Franca Lorenzi, Letizia Montalbano,
Cinzia Ortolani, Anna Patera, Simone
Porcinai, Sandra Rossi, Chiara Rossi
Scarzanella, Andrea Santacesaria,
Oriana Sartiani, Ornella Savarino, Laura
Speranza, Peter Stiber, Isetta Tosini;
e Roberto Bellucci, Ciro Castelli, Carlo
Galliano Lalli, Anna Mieli, Paola Rendini,
Luciano Sostegni

Autorizzazione del Tribunale di Firenze

n. 3914 del 16.12.1989

Iscrizione al Registro Operatori
di Comunicazione n. 7257

 Associato all'Unione Stampa
Periodica Italiana

Collaboratori esterni

Accademia di Belle Arti di Firenze
Maria Cristina Improta, già Direttore
del Settore di restauro dei Materiali lapidei
presso l'Opificio delle Pietre Dure

Collaboratori Laboratorio scientifico OPD
Federica Innocenti,
Alessandra Santagostino Barbone

ISCR

Maurizio Coladonato

Soprintendenza archeologia, belle arti e
paesaggio della Città metropolitana di Torino
Linda Lucarelli

International Training Projects OPD
Annalisa Lusuardi

CNR-INO

Marco Barucci, Alice Dal Fovo,
Raffaella Fontana, Enrico Pampaloni,
Marco Raffaelli, Jana Striova

ICVBC-CNR

Emma Cantisani, Rachele Manganelli
Del Fà, Cristiano Riminesi

ISTM-CNR

Laura Cartechini, Costanza Miliani,
Francesca Rosi

IVALSA-CNR

Benedetto Pizzo

ENEA

Pietro Moioli, Claudio Seccaroni

Università degli Studi di Firenze
Lucia Borghese Bruschi, Pietro Capone,
Massimo Coli, Vito Getuli,
Lorenzo Innocenti, Paola Mazzanti,
Lorenzo Riparbelli, Marco Togni,
Luca Uzielli

INFN-Università degli Studi di Firenze
Pier Andrea Mandò, Chiara Ruberto,
Francesco Taccetti

Università di Losanna
Serena Romano

Fondazione Brescia Musei
Francesca Morandini

National Gallery di Londra
Caroline Campbell

Francesca Brogi, restauratore
Alessandro Ervas, metallurgo
Fabio Giannino, geologo
Elena Nazzari, archivista
Marcello Oliveri, scultore
Alessandro Pacini, metallurgo
Paolo Papeschi, geologo
Francesca del Vecchio, ingegnere

Restauratori diplomati SAFS OPD

Martina Calmanti, Alberto Dimuccio,
Camilla Fracassi, Giovanni Gualdani,
Iolanda Larenza, Bruna Mariani,
Mattia Mercante, Chiara Mignani,
Francesca Rossi, Daniella Serrano Serrano,
Letizia Tamperi, Eleonora Vittorini Orgeas

Referenze fotografiche

Fig. 2 p. 45: Foto Corpus/Atlante,
Domenico Ventura); figg. 1 p. 79,
7-9 pp. 85-86: Archivio fotografico OPD;
fig. 2 p. 80: Foto Renato Corsini;
figg. 3-5 pp. 81-83: Archivio Fotografico
Musei d'Arte e Storia, Brescia;
fig. 6 p. 84: Archivio fotografico ISCR;
figg. 1-3 pp. 91-92: Antonio Quattrone;
figg. 4-5 p. 92, 9 p. 95: Bruna Mariani;
figg. 6-8 pp. 93-94, 10ab p. 95: Marco
Brancatelli; figg. 1-3 pp. 102-103, 7
p. 105, 11 p. 109, 13 p. 110: Foto
Roberto Bellucci OPD; fig. 4 p. 103:
Radiografo Ciappi per OPD; fig. 5
p. 104: Grafica Maria Rosa Lanfranchi
e Gabriela Simoni OPD; figg. 6 p. 105,
8-10 pp. 106-107, 12 p. 110: Foto Maria
Rosa Lanfranchi OPD; figg. 1 p. 127,
6 p. 132: Soprintendenza Archeologia,
Belle Arti e Paesaggio di Verona;
fig. 7ab p. 133: Documentazione
fotografica in luce visibile eseguita
da Ottaviano Caruso; fig. 1 p. 261:
Archivio Fratelli Alinari, Firenze
(collezioni Alinari, Anderson, Brogi).

Direttore responsabile

Ginevra Marchi

Copyright 1989 Centro Di
della Edifimi srl, Firenze
Opificio delle Pietre Dure, Firenze

Stampa

Gruppo TCT, Firenze, maggio 2019

Pubblicazione annuale
ISSN 1120-2513

Prezzo di copertina
€ 110,00

Abbonamenti

€ 80,00 (Italia) € 100,00 (estero)

Distribuzione e abbonamenti

Centro Di
Via dei Renai 20r, 50125 Firenze
tel. 055 2342666
edizioni@centrodi.it
www.centrodi.it

Sommario

- Editoriale** 7 L'Opificio nel 2018... con qualche altra riflessione
Marco Ciatti
- Contributi** 21 Il paliotto di Guido da Siena della Pinacoteca Nazionale di Siena: studi e restauro
Marco Ciatti, Roberto Bellucci, Camilla Fracassi, Cecilia Frosinini, Carlo Galliano Lalli, Linda Lucarelli, Luciano Sostegni, Lucia Maria Bresci
- 40 Giotto: il restauro e gli studi sul "Frammento Vaticano", proveniente dall'antica basilica di San Pietro a Roma
Cecilia Frosinini, Serena Romano, Alberto Felici, Francesca Brogi, Alberto Dimuccio, Federica Innocenti, Carlo Galliano Lalli, Giancarlo Lanterna, Laura Cartechini, Costanza Miliani, Francesca Rosi, Pietro Moioli, Claudio Seccaroni, Massimo Coli, Lorenzo Innocenti, Fabio Giannino, Paolo Papeschi, Marco Barucci, Alice Dal Fovo, Raffaella Fontana, Enrico Pampaloni, Marco Raffaelli, Jana Striova
- Note di restauro** 78 La *Vittoria alata* di Brescia. Avvio del progetto di restauro e prospettive di ricerca su un grande bronzo di età romana
Anna Patera, Francesca Morandini, Stefania Agnoletti, Annalena Brini, Andrea Cagnini, Monica Galeotti, Simone Porcinai
- 90 Il Dittico bizantino in micromosaico del Museo dell'Opera di Santa Maria del Fiore: il restauro come momento conoscitivo
Sandra Rossi, Bruna Mariani, Andrea Cagnini, Pier Andrea Mandò, Simone Porcinai, Chiara Ruberto, Alessandra Santagostino Barbone, Francesco Taccetti
- 101 Il restauro di due frammenti di pittura murale di Ambrogio e Pietro Lorenzetti della National Gallery di Londra
Cecilia Frosinini, Caroline Campbell, Maria Rosa Lanfranchi
- 115 Dall'analisi del dipinto e della muratura alla formulazione di una ipotesi di ponteggio storico della Cappella Maggiore di Santa Croce a Firenze
Pietro Capone, Francesca Del Vecchio, Alberto Felici, Vito Getuli
- 127 Il consolidamento del materiale lapideo: sperimentazioni nuove e tradizionali a confronto su Nicodemo del *Compianto sul Cristo morto* del Maestro di Sant'Anastasia a Caprino Veronese
Emma Cantisani, Maurizio Coladonato, Maria Cristina Improta, Paola Franca Lorenzi, Eleonora Vittorini Orgeas
- 141 I *Crocifissi* di Donatello e Brunelleschi. La grande sfida
Laura Speranza
- 151 Il *San Girolamo* della Pinacoteca comunale di Faenza. Revisione di due restauri storici del 1845 e del 1940
Peter Stiberc, Mattia Mercante, Federica Innocenti, Giancarlo Lanterna, Pietro Moioli, Claudio Seccaroni
- 169 Da est a nord verso sud. In controttempo
Stefania Agnoletti
- 186 Il restauro del supporto ligneo della *Natività* attribuita a Cesare da Sesto. Messa a punto di un metodo per il dimensionamento e l'adeguamento elastico della traversatura originale
Ciro Castelli, Giovanni Gualdani, Luisa Gusmeroli, Paola Mazzanti, Lorenzo Riparbelli, Andrea Santacesaria, Marco Togni, Luca Uzielli

- 205 Consolidanti e stucchi nel restauro dei dipinti su rame. Uno studio comparativo
Carlo Galliano Lalli, Cinzia Ortolani, Chiara Rossi Scarzanella, Daniella Serrano Serrano
- 227 Proposte innovative per la conservazione di dipinti murali strappati e applicati su supporto in masonite. Il caso applicativo della *Crocifissione e santi* nel Chiostro Verde di Santa Maria Novella
Martina Calmanti, Alberto Felici, Rachele Manganelli Del Fà, Benedetto Pizzo, Cristiano Riminesi
- 247 Pro Sorb® e Propadyn®: due materiali buffer a confronto
Sandra Cassi, Monica Galeotti, Isetta Tosini
- 253 La conservazione e il restauro della *computer-based art* tra marketing, comunità virtuali e centri sociali
Giancarlo Buzzanca
- Schede di restauro
- 260 Il restauro della fontana marmorea nel salone dello Scalone del Moro a Palazzo Pitti. Intervento conservativo e cantiere didattico della SAFS dell'OPD
Paola Franca Lorenzi
- 274 Il restauro del busto in porcellana del marchese Carlo Ginori. Un ritratto della Manifattura di Doccia attribuito a Gasparo Bruschi
Laura Speranza, Francesca Rossi
- Archivio storico
- 282 Otto Vermehren e il restauro come scienza al servizio dell'arte a Firenze. Innovazione e polemiche fra il 1900 e il 1910
Lucia Borghese Bruschi, Anna Mieli
- 299 Casualità e ricerca d'archivio: identificazione di lacerti musivi da Ravenna conservati nei depositi dell'OPD
Paola Rendini
- Tecniche artistiche
- 305 A proposito di tecniche artistiche del metallo: dialogo fra restauro, fonderia, arte orafa, fabbrile e archeometria
Stefania Agnoletti, Alessandro Ervas, Marcello Oliveri, Alessandro Pacini
- Attività dell'Opificio 2018
- 318 Attività di conservazione dal 1 gennaio al 31 dicembre 2018 a cura di *Ornella Savarino ed Elena Nazzari*
- Notiziario
- 350 L'attività della Task Force Restauratori - Firenze per l'Umbria nel 2018. Conclusione del primo progetto
Oriana Sartiani, Andrea Santacesaria, Iolanda Larenza, Chiara Mignani, Letizia Tamperi
- 362 Scuola di Alta Formazione e di Studio
Letizia Montalbano
- 363 L'ITP *International Training Projects*. Le attività del 2018
Annalisa Lusuardi, Letizia Montalbano

Il restauro del supporto ligneo della *Natività* attribuita a Cesare da Sesto. Messa a punto di un metodo per il dimensionamento e l'adeguamento elastico della traversatura originale

Ciro Castelli, Giovanni Gualdani, Luisa Gusmeroli, Paola Mazzanti, Lorenzo Riparbelli, Andrea Santacesaria, Marco Togni, Luca Uzielli

Introduzione

Uno dei temi centrali della conservazione dei supporti lignei dipinti riguarda il rapporto che si stabilisce tra il tavolato dipinto e il sistema di traversatura applicato. Questo argomento rappresenta da diversi decenni motivo di studio, approfondimento e riflessione. La costante ricerca di chiarezza e di soluzioni è stata resa possibile anche grazie alla collaborazione tra l'Opificio e il Gruppo di Ricerca "Studio e conservazione dei Beni culturali lignei" del Dipartimento DAGRI dell'Università degli Studi di Firenze.¹ La conoscenza del comportamento della materia lignea in presenza di variazioni termoisometriche ambientali è fondamentale per la corretta conservazione degli strati pittorici. In questo percorso di ricerca, è stato molto importante il restauro della *Natività* attribuita a Cesare da Sesto.² L'opera è stata argomento di una tesi di laurea in Restauro della SAFS dell'OPD,³ la cui discussione è avvenuta nel novembre 2017 (fig. 1).

Fra i temi emersi durante il lavoro, in questo articolo si vuole mettere in luce proprio l'importante tema del complesso rapporto di coesistenza tra tavolato e traversatura dell'opera il cui evidente malfunzionamento e squilibrio aveva causato nel tempo ingenti danni alla pellicola pittorica.

Nel caso in questione, il grosso problema era, di fronte a un precario stato della pellicola pittorica, evidentemente indotto dal comportamento del supporto ligneo (questo argomento verrà accuratamente trattato più avanti), che sostanzialmente risultava ancora quello originario; anche se le assi erano state leggermente scorciate sul perimetro, erano ancora sostenute da tre robuste traverse originali ancorate con chiodi. Occorreva pertanto una accurata analisi di tutta la situazione e una approfondita lettura degli elementi del supporto. A tali fini, la lunga e proficua collaborazione tra Opificio e Gruppo Scienze del Legno ha permesso di impostare uno studio scientifico in grado di ottene-

re preziose informazioni sull'opera e realizzare adeguate soluzioni operative. In questo caso particolare, per la prima volta, i due importanti istituti hanno sottoposto un'opera reale a una serie di misurazioni dalle quali sono emerse importanti informazioni necessarie per poter formulare concrete soluzioni operative, immediatamente applicate nel corso del lavoro di restauro. Questo articolo tratta in particolare del supporto ligneo (costituito dal tavolato e dalle traverse), gli studi e le misurazioni effettuati su di esso, e il procedimento che ha consentito di stabilire le opportune modifiche da apportare al sistema di traversatura originale, in modo da adeguarne la rigidità alle reali necessità deformative del tavolato.

Il lavoro di coloro che si occupano del restauro dei supporti lignei dipinti si compone di operatività ed esperienza e spesso le scelte adottate sono il frutto di una sapienza accumulata nel tempo.⁴ In questo caso le soluzioni, oltre che della sapienza e dell'esperienza, sono il frutto di misurazioni, prove, e modellazione quanto più possibile accurata della specifica opera oggetto dello studio, tenendo opportunamente conto della sua struttura materiale; riteniamo dunque che si tratti effettivamente di un grande progresso in questo particolare settore di conoscenza e di operatività. Potersi basare sulla conoscenza accurata della rigidità del tavolato e delle traverse, considerati sia autonomamente che in accoppiamento, apre a nuove visioni dei meccanismi che regolano il 'funzionamento' di un supporto ligneo. Per questo abbiamo, per esempio, introdotto un "indice di contenimento" che permette di esprimere con un numero l'azione del sistema di traversatura sul tavolato. Il confronto fra indice di contenimento ed esperienza operativa ha consentito di verificare che, in presenza di sistemi di traversatura palesemente sovradimensionati, gli indici di contenimento sono assai alti e le probabilità di sofferenza del colore assai elevate; in tal modo è stata confermata l'utilità di impiegare questo indice.



1. Cesare da Sesto (attr.), *Natività (Adorazione del Bambino e donatore)*, 1515-1520, Salerno, Museo Diocesano di San Matteo. Prima del restauro.



2. Il supporto ligneo (tavolato e traverse) prima del restauro.



3. La radiografia.

Progetto di restauro⁵

L'intervento sul supporto ligneo si inserisce in un progetto complessivo di restauro dell'opera; il presente lavoro tratta soltanto le fasi di consolidamento del colore e di restauro del supporto (comprendendo in questo l'intervento di adeguamento della traversatura). Dallo studio delle indagini diagnostiche eseguite, abbinato all'analisi diretta dell'opera, è emerso che la *Natività* aveva subito un intervento di pulitura e di integrazione pittorica su cadute di colore molto estese. Il progetto pertanto si è limitato a prevedere una pulitura superficiale rispettando sia la vernice che i ritocchi. La rimozione di stuccature e integrazioni è stata prevista solo su quelle relative alle fenditure del tavolato in quanto funzionali all'intervento sul supporto. A completamento del lavoro, dopo il consolidamento del colore e il restauro del supporto, este-

samente descritti nelle pagine seguenti, si è previsto un ripristino materico e una conseguente integrazione cromatica differenziata delle mancanze, e una verniciatura finale.

Tecnica esecutiva

Il tavolato della *Natività* è composto dall'unione di tre assi in legno di pioppo bianco o gattice (*Populus alba* L.) assemblate fra loro a spigolo vivo e orientate verticalmente, per formare un'opera rettangolare di discrete dimensioni (137x213x3,5 cm) (figg. 2-3).

Le prime due assi (viste dal retro, da sinistra verso destra) sono di taglio tangenziale, costituite da legno di modesta qualità per la presenza di nodi e conseguenti deviazioni della fibratura, ma con struttura generalmente buona e regolare. La terza asse è di taglio dia-

metrale ed è di peggiore qualità: presenta deviazione della fibratura e cipollatura⁶ e per parte della lunghezza il midollo dell'albero è compreso all'interno della sezione, causa di una fessurazione che si estende nella parte superiore della tavola e ne attraversa l'intero spessore. Su questa fessurazione è stata osservata la presenza di strisce di tela interposte in fase esecutiva tra il legno e la preparazione pittorica. Su tutte le tavole l'esistenza di zone più attaccate da insetti lascia supporre la presenza di alborno.⁷

Si ipotizza l'impiego di adesivi tradizionali, quali colla di bue o caseina, per l'assemblaggio delle assi; dalle radiografie risulta che non è presente alcun elemento atto ad agevolare l'allineamento tra le tavole al momento dell'incollaggio, come per esempio ranghette o cavicchi.

Il sistema di controllo e sostegno del supporto ligneo è realizzato da tre traverse in legno di castagno (*Castanea sativa* Mill.), ricavate da travetti di modeste dimensioni e che comprendono quasi interamente la sezione dei fusti di provenienza. La lunghezza di tutte e tre le traverse uguaglia la larghezza del pannello; una di esse è posta al centro, mentre le altre due sono rispettivamente distanziate dal margine superiore e inferiore.⁸ L'ancoraggio è realizzato con grossi chiodi a sezione quadrangolare in ferro dolce, lunghi 16-17 cm, che vincolano fra loro il tavolato e le traverse. Ogni chiodo è infisso dal retro e oltrepassa lo spessore di traversa e tavolato; infine la punta è rigirata sul fronte del manufatto e ribadita.⁹

La distribuzione originaria dei chiodi sulle traverse prevedeva sei chiodi per traversa, due per ogni asse-posizionati ai margini della stessa; sono presenti attualmente cinque chiodi sulla traversa superiore e sulla centrale, mentre su quella inferiore ne sono presenti sei.

In particolare, i chiodi che tengono le traverse alle assi laterali alloggiano in fori ad asola (fig. 4), mentre quelli che fermano le tre traverse all'asse centrale sono inseriti in un foro semplice. Questa differenza sembra legata al fatto che le parti del pannello che affrontano un maggior movimento sono quelle laterali e per questo motivo furono realizzate le asole soltanto su questi chiodi in modo da consentire al manufatto una più alta capacità di movimento.¹⁰

L'opera in origine aveva una cornice perimetrale, incollata e inchiodata al supporto, che è andata perduta nel tempo.¹¹



4. Particolare di un chiodo di tenuta di una traversa alloggiato in un foro ad asola.

Interventi precedenti

La *Natività* ha subito nel tempo alcune manomissioni e interventi. Possiamo rilevare che l'opera è stata tagliata su tutti i lati e ha perso, come già detto, la cornice perimetrale. Inoltre le tre traverse presentano segni di una riduzione degli spessori, dovuta probabilmente alla necessità di renderle meno rigide. Non si hanno molte notizie sui restauri precedenti;¹² fanno eccezione alcune informazioni d'interventi realizzati nel 1986 e nel 2009 in occasione di esposizioni al pubblico.¹³

Durante l'intervento di restauro del 1986, quando l'opera mostrava già piccoli sollevamenti del colore, sono state eseguite operazioni soprattutto sulla pellicola pittorica; sul tavolato sono state compiute alcune operazioni di risanamento ed è stato applicato un consolidante, forse con l'intenzione di ridurre la fragilità delle zone attaccate degli insetti.¹⁴

L'intervento realizzato nel 2009 ha riguardato il risanamento delle sconnessioni presenti sul tavolato, attraverso l'inserimento sul retro di cunei in pioppo incollati con adesivo vinilico, miscelato a gesso biidrato e segatura, lungo le giunzioni.¹⁵ Questo restauro non ha risolto il rapporto di convivenza fra il tavolato e il proprio sistema di controllo e sostegno, ma ha peggiorato lo stato conservativo del dipinto provocando nuovi sollevamenti del colore, cedimenti dei cunei e formazione di nuove fessurazioni.



5. L'opera ripresa a luce radente.



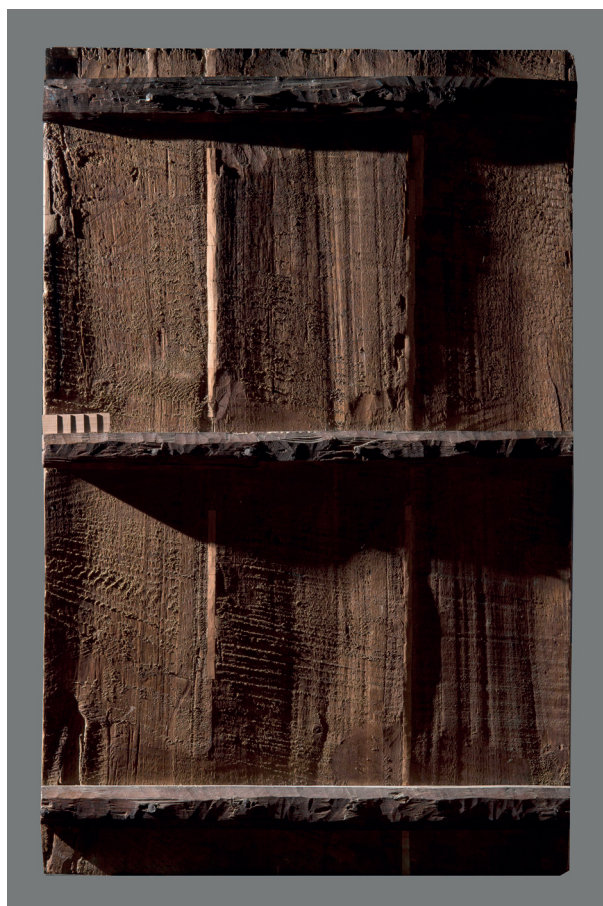
6. Un particolare che evidenzia la sofferenza degli strati pittorici.

Stato di conservazione

Quando l'opera è arrivata nei laboratori dell'Opificio, lo stato della superficie pittorica, osservata a luce radente, evidenziava numerosi sollevamenti e alcune cadute di colore, diffuse increspature, segni di una continua sofferenza della pellicola pittorica causata dalle deformazioni del supporto ligneo (figg. 5-7).

La problematica principale del cattivo stato di conservazione del dipinto è dovuta proprio all'interazione tra il tavolato e le traverse. Le traverse¹⁶ hanno dimostrato un'eccessiva rigidità¹⁷ in confronto alla maggiore libertà di imbarcamento di cui necessitava il tavolato, per consentire almeno in parte le deformazioni prodotte dai rigonfiamenti e ritiri indotti dalle variazioni termoigrometriche dell'ambiente di collocamento;¹⁸ oltretutto il vincolo prodotto dai chiodi originari ha contribuito a questa situazione di degrado. La forte concentrazione di tensioni si è scaricata determinando fessurazioni e sconessioni, a cui si è associato un disallineamento superficiale di parti del tavolato evidente su alcune zone della pellicola pittorica, e diffusi sollevamenti del colore, presenti soprattutto nella zona centrale delle assi.

La mediocre scelta del legno originario e l'attacco di insetti hanno contribuito al degrado dell'opera. In particolare, la terza asse ha avuto un attacco xi-



7. Il supporto a luce radente: sono evidenti le deformazioni delle assi.

lofago consistente, che ha generato un indebolimento meccanico maggiore rispetto alle altre; indebolimento che si è aggiunto a quello causato dai già citati difetti strutturali, quali cipollatura e midollo dell'albero incluso nella sezione. Le tensioni generate nel supporto hanno causato il distacco dei cunei, applicati nel restauro del 2009, che collegavano le assi del supporto fra loro. L'insieme di queste complesse e articolate problematiche ha modificato la forma del tavolato, che prima di questo restauro si presentava con una curvatura generale leggermente concava, uno spiccato imbarcamento convesso sulle singole assi¹⁹ e un effetto ad 'ala di gabbiano'²⁰ lungo le committure.



8. La traversa superiore dopo la rimozione.

Obiettivi ed esecuzione dell'intervento sul supporto ligneo

La modalità d'intervento sulla *Natività* si è basata su indispensabili premesse conservative, tra cui spicca il conflitto instauratosi tra il tavolato ligneo e il sistema di controllo e sostegno originario. Al fine di garantire la futura integrità del manufatto, soprattutto della pellicola pittorica, tale intervento si è proposto i seguenti obiettivi principali.

1. Risolvere il suddetto conflitto effettuando una separazione del tavolato dalla traversatura. Quest'operazione ha permesso di operare indipendentemente su tali componenti e, soprattutto, di rilasciare lo stato tensionale accumulato nel tavolato.
2. Ricostituire l'unità strutturale del tavolato tramite integrazione delle fessurazioni e delle sconessioni con cunei e tasselli lignei; rimuovere e sostituire i risanamenti degli interventi pregressi poiché inefficaci e dannosi.
3. Adattare la traversatura originaria e, al contempo, salvaguardare le sue caratteristiche lavorazioni, in virtù dell'istanza storica che esse rappresentano per

l'opera in esame. Tale adeguamento è finalizzato a garantire una nuova efficienza strutturale, necessaria per il controllo deformativo del tavolato sia nel proprio piano (dilatazione e restringimento) sia fuori piano (imbarcamento).

Questo intervento di restauro ha visto una fase preliminare articolata nelle operazioni descritte qui di seguito. Innanzitutto, è stata fondamentale la riadesione dei sollevamenti del colore, eseguita utilizzando un adesivo naturale, quale colla di coniglio in acqua in proporzioni peso/volume 1:16; la seconda operazione è stata quella di rimuovere le vecchie integrazioni in corrispondenza delle zone interessate dal nostro intervento sul tavolato. La rimozione delle integrazioni, effettuata sotto microscopio attraverso l'utilizzo di un bisturi, ha confermato la presenza delle fenditure del tavolato, favorendo la successiva giunzione degli spacci e l'appianamento dei disallineamenti superficiali. Un'altra operazione preventiva è stata il trattamento anossico del manufatto, necessario per la disinfezione dagli insetti xilofagi.

La prima azione strutturale è stata quella della separazione delle traverse dal tavolato, effettuata sia per scaricare lo stato tensionale ancora presente nel tavo-

lato e così dannoso per la conservazione, sia per poter procedere al completo risanamento del tavolato stesso (fig. 8). Sono state realizzate due traverse provvisorie sagomate e fermate sul fronte dell'opera, ai margini superiore e inferiore, tramite morsetti in modo da evitare che il tavolato potesse rimanere privo di controllo. Per la separazione della traversatura sono stati sezionati i chiodi attraverso un taglio al di sotto delle teste, realizzato con una lama di seghetto a ferro. Quest'azione ha permesso di lasciare intatta la testimonianza costruttiva delle asole e di poter, in seguito, realizzare un ancoraggio reversibile con un sistema elastico e registrabile. Successivamente è stato possibile affrontare il risanamento del tavolato tramite l'integrazione di elementi lignei. Essi sono stati realizzati secondo la tecnica del cuneo e della tassellatura, nella medesima specie legnosa delle parti originarie (in questo caso in pioppo), ricavati da legname antico, tagliati in lunghezza ridotta e posizionati con la fibratura parallela a quella del tavolato. La procedura d'inserimento ha previsto la rettifica del tavolato tramite elettrotensili e/o attrezzi manuali in modo da calettare perfettamente gli inserti nelle sedi. La fase di rettifica è stata realizzata diversificando le operazioni in base ai danneggiamenti presenti, in modo da minimizzare la quantità di legno asportato. Gli elementi lignei di restauro, di diverse dimensioni e forme, sono stati incollati tramite colla vinilica Bindan RS e, in alcuni punti, con una resina epossidica bicomponente. Lungo alcune tracce erano presenti cavità causate dall'attacco di xilofagi che sono state riempite con Balsite® per ricostruire una superficie adeguata all'appoggio dei cunei e dei tasselli. Lungo alcuni spacchi e giunzioni erano presenti anche dei dislivelli superficiali, la cui correzione è stata effettuata con dei tiranti a leva. Operativamente una prima parte di questa fase ha previsto la ricostituzione dell'integrità delle singole assi, una parte successiva è consistita nel risanamento delle commettiture disgiunte. Alla fine dell'intervento l'opera ha assunto un profilo generale convesso, ben differente dall'anomala curvatura concava che mostrava precedentemente; inoltre è possibile osservare come sia stato attenuato l'effetto ad 'ala di gabbiano' sulle commettiture. Questa fase dell'intervento, quindi, non solo ha ricostituito la completa unità strutturale del tavolato, ma ha anche permesso il recupero di una corretta lettura della superficie pittorica.

Protocollo per il dimensionamento del sistema di traversatura

L'ultima fase del restauro del supporto è stata quella dell'adeguamento del sistema di sostegno e controllo originario, in modo che potesse adattarsi al controllo deformativo del tavolato.

Per poter procedere in questa direzione, è stato messo a punto uno specifico protocollo²¹ delineato nello schema (fig. 9), per il dimensionamento del sistema di traversatura in funzione del progetto di restauro: tale protocollo può essere suddiviso nelle seguenti quattro fasi.

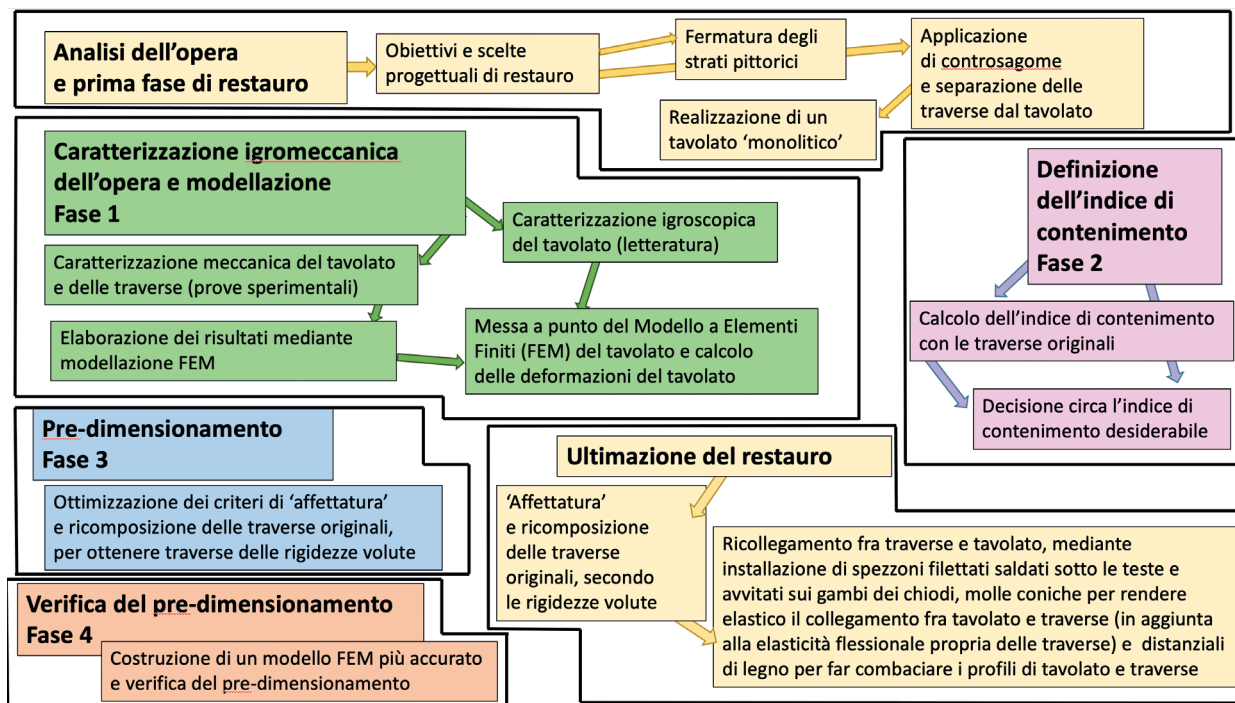
FASE 1. *Identificazione delle caratteristiche igromeccaniche del tavolato ligneo: caratterizzazione igromeccanica del tavolato e caratterizzazione meccanica delle traverse*

Nota preliminare

Come si può ben comprendere, le questioni emerse durante le operazioni di restauro della *Natività* erano assai complesse. Sappiamo che ogni dipinto su tavola rappresenta un *unicum* per l'alta variabilità del materiale, delle tecniche costruttive, della storia conservativa, ivi compresi gli interventi passati di restauro. Il legno presenta infatti per sua natura un alto livello di variabilità, quindi il materiale costituente il tavolato risulta in genere poco omogeneo, in particolare per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche; inoltre in ciascuna asse gli anelli hanno orientamenti diversi da punto a punto, cosicché sono contemporaneamente presenti elementi lignei aventi 'taglio' radiale, tangenziale e intermedio, con rigidità e coefficienti di ritiro/rigonfiamento molto diversi tra loro. Perciò qualunque considerazione concernente le caratteristiche di rigidità, e quindi deformative del tavolato e dell'insieme tavolato-traversatura, deve basarsi su un'approfondita indagine della singola opera, con prove sperimentali progettate ed eseguite da esperti scientifici in accordo con i restauratori, che permettano di raggiungere un livello di conoscenza maggiore di quello ottenibile tramite parametri e indicazioni di letteratura.

Necessità di rendere monolitico il tavolato

Come già accennato, il principale attore del danneggiamento, nel caso della *Natività*, risultava un incompatibile accoppiamento tra la rigidità a flessione trasversale del tavolato e la rigidità a flessione longi-



9. Schema del metodo usato per il dimensionamento e l'adeguamento elastico della traversatura originale per questa opera. Le fasi iniziali e finali di restauro sono in colore giallo e hanno riguardato scelte e operazioni effettuate prevalentemente dai soli restauratori. Le fasi specifiche riguardanti l'applicazione di questo protocollo sono contrassegnate con i numeri da 1 a 4 e hanno comportato una stretta collaborazione tra restauratori e scientifici.

tudinale delle traverse; in particolare quando il loro insieme è soggetto a variazioni di umidità che portano il tavolato a volersi imbarcare, mentre le traverse gli impediscono questa deformazione in una misura tale da danneggiare sia il tavolato stesso, sia gli strati pittorici che esso supporta. In questo contesto il dimensionamento su basi scientifiche del sistema di traversatura risulta tanto più attendibile quanto più è alto il livello di conoscenza meccanica del tavolato e delle traverse, e possibilmente anche del comportamento igroscopico del tavolato libero. Nella filosofia dell'Opificio, il tavolato in fase di restauro deve essere reso il più possibile unito e continuo²² in modo da poter poi considerare un comportamento di imbarcamento globale, seppur costituito da differenti imbarcamenti locali delle singole assi. La scelta di rendere monolitico il tavolato rappresenta un importante vincolo progettuale, che ha come conseguenza il fatto che il sistema di traversatura deve contenere le deformazioni globali dell'insieme

delle assi, e che quindi le prove sperimentali per determinare le caratteristiche del tavolato e la successiva simulazione (modellazione agli elementi finiti, FEM) non possono prescindere da questa scelta.

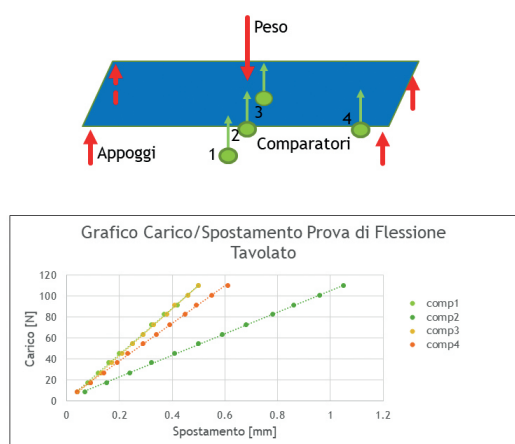
Obiettivi della FASE 1

Gli obiettivi di questa FASE 1 del protocollo sono la determinazione di:

- caratteristiche di rigidezza del tavolato, che implicano prove sperimentali di flessione (potrebbero anche essere utilizzati valori di letteratura, ma si rischierebbe che gli errori conseguenti fossero dello stesso ordine delle grandezze stimate);
- caratteristiche di rigidezza delle traverse, requisiti e limitazioni come sopra;
- caratteristiche fisiche/igroscopiche del tavolato (l'apporto di quelle delle traverse è trascurabile), rappresentate dalla permeabilità degli strati pittorici, dalla diffusione dell'umidità nel tavolato, dal coefficiente di ritiro/rigonfiamento del legno costituente le assi.

Determinazione della rigidezza del tavolato e delle traverse

Per quanto riguarda la determinazione delle caratteristiche di rigidezza del tavolato, nel caso in esame, è stata utilizzata una procedura innovativa per carat-

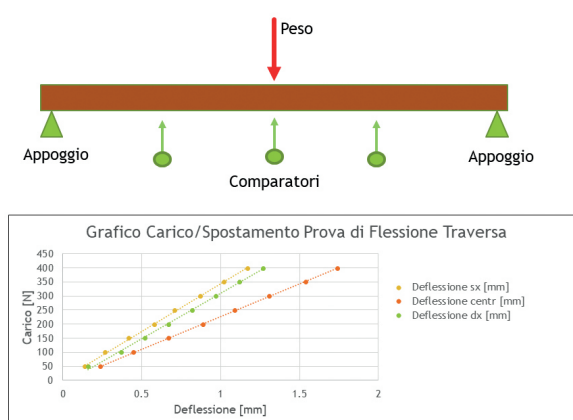


10. Prova di flessione, longitudinale e trasversale, del tavolato: geometria della prova e risultati ottenuti.

terizzare la rigidità nelle direzioni sia longitudinale sia trasversale del tavolato; questa procedura consta di due fasi, la prima sperimentale di acquisizione di dati, la seconda di elaborazione tramite modellazione per derivarne le rigidità.

La fase sperimentale è costituita da una prova di flessione (fig. 10), condotta sul tavolato posto in posizione orizzontale, con la faccia dipinta rivolta verso l'alto, e posizionato su appoggi sferici ai quattro angoli. Tre comparatori centesimali localizzati in un allineamento centrale trasversale sul retro del tavolato ne misurano le deflessioni, ciascuno al centro di una delle tre assi; un quarto comparatore viene poi posizionato per misurare la deflessione di un estremo, indifferentemente superiore o inferiore, dell'asse centrale. In questo modo si misurano contemporaneamente le deformazioni a flessione del tavolato nelle direzioni trasversale e longitudinale rispetto alla fibratura. La prova di flessione (ripetuta una volta per ciascuna delle tre assi) consiste poi in una rampa di carico da 0N a 110N in 12 passi di carico,²³ ottenuta appoggiando uno sull'altro 11 pesi da 1 kg, opportunamente sagomati e protetti; a questo proposito occorre precisare che l'entità di tale forza applicata sul dipinto è stata validata tramite una simulazione preliminare che ha confermato come i livelli tensionali raggiunti sarebbero stati molto bassi e sicuri per il manufatto.

Per la successiva fase di elaborazione di queste prove, al fine di ottenere un valore di rigidità longitudinale e un valore di rigidità trasversale del tavolato, viene



11. Prova di flessione longitudinale della traversa inferiore: geometria della prova e risultati ottenuti.

costruito un modello simulativo delle prove meccaniche svolte, e vengono fatti coincidere, tramite algoritmi di ottimizzazione, i risultati sperimentali con i corrispondenti risultati simulati;²⁴ in tal modo si ottengono i valori realistici delle caratteristiche meccaniche del tavolato, cioè quelli che inseriti nella simulazione generano risultati coincidenti con la realtà sperimentata.

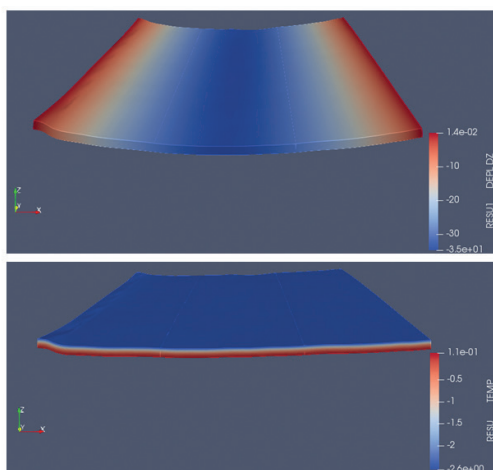
Per le traverse originali viene svolta una prova del tutto simile, sia per esecuzione, sia per elaborazione dei risultati (fig. 11).

Questa elaborazione ha permesso di identificare le seguenti rigidità del tavolato e delle traverse:²⁵

- Rigidità tavolato in direzione longitudinale: $E_L = 9376,7 \text{ MPa}$
- rigidità tavolato in direzione trasversale: $E_T = 428 \text{ MPa}$
- rigidità flessionale traversa superiore: $E_L = 11229 \text{ MPa}$
- rigidità flessionale traversa centrale: $E_L = 5821 \text{ MPa}$
- rigidità flessionale traversa inferiore: $E_L = 9227 \text{ MPa}$

Scelta dei coefficienti di ritiro/rigonfiamento e di diffusione del legno del tavolato

Per quanto riguarda le grandezze igroscopiche necessarie alla caratterizzazione del tavolato, non è stato possibile (mancandone il tempo e una camera climatica adeguata)²⁶ eseguire prove in camera climatica per misurare direttamente tali parametri; si è proce-



12. Modello FEM rappresentante, a seguito di una variazione a scalino dell'umidità ambientale ($\Delta RH = -20\%$):

- sopra, la distribuzione dell'umidità del legno nello spessore del tavolato: gli strati di colore blu scuro sono ancora all'umidità iniziale, quelli di colore bianco sono già equilibrati alle nuove condizioni (cioè con l'aria più secca);

- sotto, la corrispondente deformata del tavolato stesso, in assenza di traversatura: in rosso la zona centrale del tavolato, che presenta la massima freccia di imbarcamento.

Le immagini rappresentano la situazione al picco della deformazione, che si manifesta dopo circa cinque giorni dal momento della variazione. In ambedue le rappresentazioni la faccia dipinta è rivolta verso il basso.

duto quindi con l'utilizzo di parametri di letteratura. Con riferimento a lavori pubblicati²⁷ sono stati scelti i seguenti parametri del legno:

- coefficiente di ritiro/rigonfiamento:²⁸ considerando che questo parametro ha un'importante influenza sulle deformazioni da imbarcamento, è stato deciso di considerare due valori limite $\alpha_1 = 0,3\%/%$ e $\alpha_2 = 0,09\%/%$;

- coefficiente di diffusione: $D = 1 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{s}$.

Questi parametri sono stati utilizzati per simulare tramite modellazione agli elementi finiti la diffusione, in funzione del tempo, dell'umidità all'interno di una sezione trasversale del tavolato, quando questo venga sottoposto a una variazione a gradino (cioè praticamente istantanea) dell'umidità ambientale da $RH = 55\%$ a $RH = 35\%$.²⁹ Tale variazione di umidità relativa ($\Delta RH = 20\%$) corrisponde tipicamente a una variazione di umidità del legno di circa $2,6\%$.³⁰

Il fenomeno della diffusione è stato modellato tramite il modello di Fick, considerando gli strati pittorici e le testate completamente impermeabili al vapor d'ac-

qua, con l'umidità che quindi entra o esce soltanto dal retro. Questo permette di simulare l'evoluzione dell'umidità del legno all'interno della sezione; analizzando, sempre a livello simulativo, gli effetti meccanici che questo fenomeno produce sul tavolato, se ne possono stimare le deformazioni.³¹

Il modello igromeccanico del tavolato

Queste informazioni sono servite per la costruzione del modello igromeccanico del tavolato, cioè di una simulazione matematica che permette di rappresentare tramite elaborazione al computer il comportamento sia igroscopico sia meccanico del tavolato al variare delle condizioni climatiche. Il modello igromeccanico così messo a punto – che si basa su valori di letteratura per la definizione dei parametri igroscopici, e su valori direttamente ricavati dalle prove di flessione eseguite sulla specifica opera per la sua caratterizzazione meccanica – permette di ricavare l'andamento nel tempo della freccia massima del tavolato, che come vedremo in seguito è il nostro più importante parametro di controllo.

Nell'immagine (fig. 12) si può osservare (sopra) la distribuzione dell'umidità del legno nello spessore del tavolato e (sotto) la relativa deformata (in assenza di traversatura) nel momento del massimo imbarcamento (fenomeno del *flying wood*),³² che si verifica dopo circa cinque giorni dalla variazione climatica imposta: per inciso, si osserva che il massimo della deformazione si presenta in concomitanza di una penetrazione dell'umidità sul retro (rivolto verso l'alto) ancora molto superficiale.

Come indicato sopra, considerata l'alta variabilità del legno e l'assenza di prove igroscopiche, è stato deciso di esplorare, per quanto riguarda i coefficienti di ritiro/rigonfiamento, una 'forchetta' (più propriamente: intervallo di variazione) compresa tra due valori estremi di letteratura, α_1 e α_2 , che permettono così di calcolare il valore massimo e quello minimo che la freccia di imbarcamento può raggiungere. Le due curve riportate nel grafico (fig. 13) rappresentano il valore massimo e quello minimo dell'andamento nel tempo della deformazione, calcolati in base ai due valori di letteratura α_1 e α_2 assunti per il coefficiente di ritiro/rigonfiamento. In questo caso il valore di picco della deformazione risulta compreso tra $16,7 \text{ mm}$ e 56 mm .

FASE 2. *Definizione dell'indice di contenimento e identificazione di quello prodotto dal sistema di traversatura precedente al restauro (sistema che ha danneggiato il dipinto)*

Nota preliminare: definizione dell'indice di contenimento RE

Al fine di avere un parametro obiettivo e univoco per quantificare la quota parte di deformazione da imbarcamento impedita dalle traverse, è stato elaborato,³³ in collaborazione tra OPD e Gruppo Scienze del Legno, un parametro denominato indice di contenimento RE (*Restraining Effect*), definito come segue:

$$RE = \frac{\Delta_{lib} - \Delta_{cont}}{\Delta_{lib}} \times 100$$

Dove:

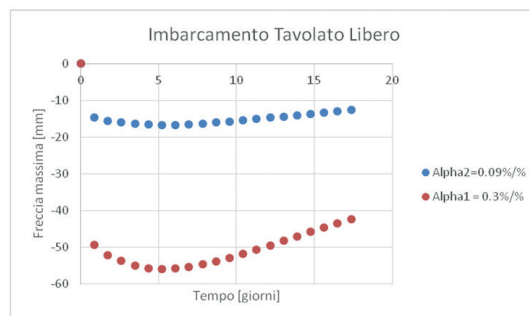
Δ_{lib} indica la freccia massima del tavolato *libero da traverse* generata da una data variazione di umidità ambientale ΔRH ;

Δ_{cont} indica la freccia massima dello stesso tavolato *contenuto dalle traverse*, generata dalla stessa variazione ΔRH .

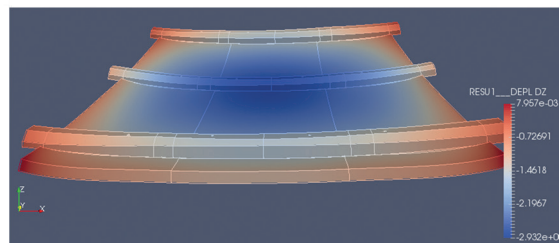
RE rappresenta quindi il rapporto tra
 – la *riduzione della freccia* d'imbarcamento prodotta dal sistema di traversatura rispetto al tavolato libero
 – e la *freccia* dello stesso tavolato libero, tutto riferito alla stessa variazione igroscopica.
 RE è espresso come una percentuale, quindi
 - un tavolato senza traversatura presenta RE=0%,
 - un tavolato del quale la traversatura blocca totalmente i movimenti igroscopici (e può perciò essere considerata infinitamente rigida) presenta RE=100%.

Identificazione dell'indice di contenimento prodotto dalla traversatura precedente al restauro

L'entità dei danni riscontrati sul dipinto può essere spiegata conoscendo l'indice di contenimento prodotto dalla traversatura precedente al restauro sull'opera considerata nel suo 'stato iniziale', cioè tavolato monolitico, non danneggiato, e traverse originali montate; su questo stato iniziale, concepito da chi aveva realizzato l'opera, hanno agito le variazioni di umidità cui essa è stata sottoposta nel corso della sua esistenza, portando allo stato in cui si presentava prima del restauro.



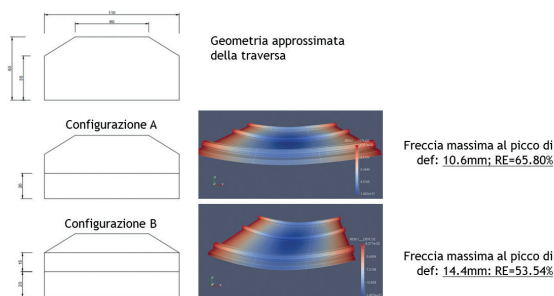
13. Andamento nel tempo della deformazione del tavolato per la variazione di umidità impostata $\Delta RH=-20\%$, rappresentata dalla freccia di imbarcamento. Nel grafico sono presenti due curve di deformazione, una rossa e una blu, calcolate in base al valore massimo (curva in rosso) e a quello minimo (curva in blu) assunti per il coefficiente di ritiro/rigonfiamento. Questo metodo permette di rappresentare un intervallo di variazione o 'forchetta', invece di fornire un unico valore deterministico. La scelta di tale metodo risulta opportuna, dato che non è noto il reale comportamento igroscopico del tavolato. Per entrambe le curve sono visibili sia il fenomeno del *flying wood* (cioè di come la freccia tende ad annullarsi, dopo avere raggiunto un picco massimo), sia del fatto che il valore del picco dipende sensibilmente dai valori di ritiro/rigonfiamento.



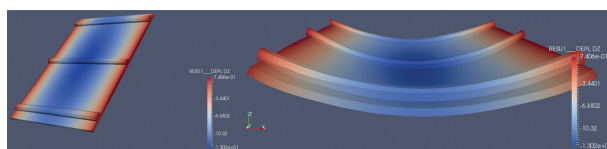
14. Deformazione simulata del tavolato con la traversatura pre-restauro (FASE 2) mostrata al picco deformativo, a seguito di un salto igroscopico $\Delta RH=-20\%$, assumendo un coefficiente di rigonfiamento $\alpha_1=0,3 \%/$. Il conseguente valore dell'indice di contenimento risulta RE=90,6%.

In questa FASE 2, gli obiettivi sono simulare lo stato di sollecitazione presente nel tavolato pre-restauro e determinare, tramite tale simulazione, l'indice di contenimento del sistema di traversatura originario che ha prodotto il danneggiamento riscontrato. A partire dai dati sperimentali o di letteratura raccolti nella FASE 1 si simula sul modello, opportunamente tarato per l'opera in oggetto, un opportuno 'salto' di umidità, e si calcola in base a esso l'indice di contenimento RE.

In questa sede non è necessario approfondire gli spe-



15. Geometria di due possibili modalità di sezionamento virtuale ('affettamenti' longitudinali) delle traverse originali, relativi indici di contenimento RE calcolati per il tavolato restaurato, e corrispondenti rappresentazioni simulate del tavolato deformato.



16. Configurazione deformativa risultante dalla simulazione di verifica col modello avanzato (v. FASE 4 del testo) per la traversatura modificata secondo la configurazione B (fig. 15). L'indice di contenimento risulta RE=58,1% per la traversatura senza molle. L'interposizione delle molle riduce il valore di RE, e ne consente la regolazione.

cifici dettagli matematici attraverso i quali vengono realizzate le elaborazioni seguenti.

Anzitutto si costruisce un modello numerico avanzato, non-lineare, del sistema traversatura-tavolato con le seguenti caratteristiche:

- modello ortotropo³⁴ sia delle caratteristiche meccaniche sia di quelle igroscopiche;
- modellazione dei contatti monolateri³⁵ con attrito tra traversatura e tavolato;
- modellazione dei chiodi in acciaio e delle loro condizioni di contatto con il legno di tavolato e traverse.

Si sottopone quindi questo modello a un opportuno 'salto' igroscopico e si calcolano le deformazioni conseguenti.

Per il caso esaminato si arriva a determinare che il sistema di traversatura originario produceva un RE=90%, cioè bloccava il 90% della richiesta deformativa del tavolato libero (fig. 14).

Conclusioni e prospettive d'impiego del modello numerico

Da questa elaborazione possiamo ricavare almeno due informazioni di estrema utilità; la prima è che la causa principale del cattivo stato di conservazione dell'opera era riferibile a un sistema di traversatura troppo rigido per questo tavolato, la seconda è che tramite questo modello si possono valutare le forze che governano il rapporto tra tavolato e traversatura.

Più in generale, l'entità di forze e tensioni possono essere calcolate con questo modello per qualsiasi opera della quale – come in questo caso – siano stati opportunamente ricavati i parametri geometrici, meccanici e igroscopici; il modello stesso è quindi uno dei risultati fondamentali di questo studio e può essere utilizzato per operare eventuali modifiche calibrate sulle esigenze delle opere.

FASE 3. Progetto di restauro del sistema di contenimento attraverso il predimensionamento del sistema di traversatura

In questa fase vengono anzitutto precisate alcune scelte tecniche e tecnologiche che definiscono il progetto di restauro del sistema di traversatura; nel caso di quest'opera sono stati stabiliti il mantenimento delle traverse originali, la tipologia dei sistemi di ancoraggio, la modalità di riduzione della rigidità delle traverse tramite 'affettatura' (cioè trasformandole in elementi lamellari sovrapposti, liberi di scorrere uno sull'altro), l'introduzione di molle (per rendere elastici i collegamenti rigidi costituiti dai chiodi). All'interno di queste scelte risulta necessario stabilire quale sia la rigidità delle traverse più opportuna per assicurare il benessere dell'opera nei confronti delle future variazioni climatiche; in questo caso è stato anzitutto valutato che l'indice di contenimento più adeguato alle esigenze del tavolato potrebbe valere RE compreso fra 50% e 60%, successivamente è stato definito e attuato un procedimento di pre-dimensionamento degli spessori delle traverse (nel nostro caso il numero di elementi lamellari e i loro spessori), per ottenere il valore di RE voluto.

Per calcolare gli spessori delle traverse sono state usate metodologie semplificate di pre-dimensionamento, basate su modelli lineari, essendo una modellazione avanzata molto dispendiosa in termini di tempo e, quindi, non indicata per simulare e confrontare fra loro svariate configurazioni.

Sono state considerate varie configurazioni secondo le quali le traverse sono state virtualmente sezionate e col modello semplificato per ciascuna modalità sono state simulate le corrispondenti deformazioni del tavolato restaurato, in conseguenza dello stesso salto di umidità $\Delta RH=20\%$; tra queste le configurazioni A e B rappresentate nell'immagine (fig. 15).

Per la configurazione A, vale a dire con l'ipotesi di un solo taglio virtuale a 2 cm dalla base della traversa, viene identificato un $RE=65,80\%$, per la configurazione B, con l'ipotesi di due tagli per ottenere tre elementi lamellari spessi 2, 1,5 e 1,5 cm, un $RE=53,54\%$; tenendo conto che il valore target era di RE compreso tra 50% e 60%, viene scelta la configurazione B come geometria da verificare.

FASE 4. *Verifica con modellazione avanzata della configurazione scelta e successivi apprestamenti per la regolazione*

Questa ipotesi della configurazione B è stata sottoposta a una verifica con modellazione avanzata. La simulazione FEM avanzata ha permesso di verificare con la massima accuratezza possibile l'entità del valore di RE prodotto da quella traversatura, e quindi il funzionamento del sistema di controllo entro i limiti previsti.³⁶ Nel corso di questa verifica sono stati inseriti nel modello avanzato alcuni perfezionamenti, in modo da tenere conto anche di numerosi altri fattori che si sviluppano nel rapporto tra tavolato e traversatura; infatti esso risulta fortemente influenzato dai contatti legno-legno e dagli attriti che si sviluppano, dalle aree di contatto che evolvono nel tempo durante il transitorio igroscopico, dalla natura e posizionamento, anche all'interno del tavolato, dei connettori, dalla geometria e anatomia delle singole assi. Questi fattori hanno avuto, nel presente caso, una influenza di circa il 5% sul valore dell'indice di contenimento. La modellazione quindi in fase di verifica deve tenere conto di questi ulteriori fattori per poter fornire risultati più accurati.

La metodologia di modellazione avanzata qui utilizzata è analoga a quella utilizzata nella FASE 2 per definire l'indice di contenimento prodotto dal sistema di traversatura originario, e ha come risultato $RE=58,1\%$, che in base a quanto detto sopra può essere ritenuto soddisfacente.



17. Un particolare del nuovo ancoraggio delle traverse; tra la testa del chiodo e la traversa viene inserita una molla, registrabile mediante il parziale avvvitamento/svitamento della testa stessa.

La configurazione deformativa risultante dalla simulazione di verifica, che utilizza questo modello avanzato, è rappresentata nell'immagine (fig. 16).

In base a questi importanti e innovativi risultati, le traverse originarie sono state modificate trasformandole da travetti di legno massiccio in travetti composti da elementi lamellari separati e sovrapposti (secondo la configurazione B), a partire da tagli longitudinali che hanno portato a lamelle elementari sottili (spesse 0,4 cm) e flessibili, in modo da poterle adattare alla nuova curvatura d'imbarcamento del tavolato (freccia centrale di circa 2,2 cm). Rispettando il loro ordine originario, le lamelle elementari sono state divise in tre gruppi, e per ciascun gruppo sono state incollate fra loro su una controforma sagomata corrispondente alla curvatura del tavolato e tenute in posizione da morsetti fino alla completa presa dell'adesivo (Bindan). Sono stati così realizzati per ciascuna traversa tre elementi lamellari: quello inferiore, a contatto con il tavolato, spesso 2,0 cm, e i due superiori spessi entrambi 1,5 cm. Sono stati infine realizzati dei piccoli spessori di legno, interposti fra la traversatura e il tavolato, in modo da garantire il contatto fra traversa e



18. Il supporto ligneo dopo il restauro; tutti gli elementi che formavano la struttura originale sono stati mantenuti e resi funzionali per la corretta conservazione dell'opera.

tavolato, nonostante la forma irregolare di quest'ultimo.

Infine, è stata messa a punto una opportuna soluzione tecnica che ha permesso di assemblare nuovamente le parti precedentemente recise (testa e stelo) dei chiodi metallici, inserendovi inoltre delle molle coniche registrabili per ottimizzare il controllo delle deformazioni del tavolato. Il primo passo è consistito nella filettatura dell'estremità dello stelo dei chiodi tramite una filiera manuale; durante tale operazione questi sono stati tenuti con una pinza, per evitare che le punte ripiegate potessero muoversi e produrre danneggiamenti sul colore. Sotto le teste dei chiodi sono stati saldati degli spezzoni di barra filettata, aventi la stessa filettatura di quella eseguita sugli steli dei chiodi stessi. Dopo il rimontaggio delle traverse, testa e stelo di

ciascun chiodo sono stati riuniti tramite dei manicotti in ottone filettati internamente, dopo avere inserito tra la testa del chiodo e la traversa una molla conica a spirale. Tale molla può essere registrata tramite la rotazione della testa del chiodo originale; in tal modo è possibile registrare il precarico agente sulla molla, e così calibrare l'elasticità complessiva della traversatura in modo da ottenere l'indice di contenimento più opportuno, dipendente anche dalle circostanze.

L'intervento di restauro è così stato concluso con il posizionamento delle traverse e la regolazione del precarico applicato dalle molle (figg. 17-19).

Si sottolinea che all'elasticità delle traverse, modificate come sopra descritto, è affidata la parte principale del compito di realizzare l'indice di contenimento desiderato. Il sistema di molle viene aggiunto come ulteriore strumento di regolazione e sicurezza. Infatti l'indice di contenimento calcolato col modello risulta quello del sistema di traversatura connesso direttamente al tavolato senza l'interposizione delle molle, e per quel sistema di traversatura esso costituisce il massimo possibile valore di RE; all'atto pratico questo corrisponde ad avere tutte le molle completamente compresse ('a blocco') quindi il massimo contenimento possibile, con le molle che non lavorano. Lo "svitamento parziale della testa del chiodo" e il conseguente allungamento delle molle fornirà quindi la possibilità di ridurre il contenimento del tavolato, anche relativamente a singole tavole o zone presidiate da molle, rendendo il sistema flessibile e regolabile.

Conclusioni

La collaborazione tra il Gruppo Scienze del Legno del Dipartimento DAGRI (Università degli Studi di Firenze) e il Settore Supporti lignei dell'OPD, avviata da oltre 20 anni e via via sempre più intensa e produttiva, ha portato alla realizzazione del progetto descritto in questo articolo. Al di là dell'indubbio valore del restauro nel quale si inserisce, questo progetto è particolarmente importante in quanto descrive per la prima volta un innovativo metodo, e il relativo protocollo attuativo, che consente di dimensionare su basi tecnico-scientifiche i sistemi di traversatura elastica, adattandoli alle specifiche esigenze dei singoli dipinti su tavola.

Tale metodo, messo a punto grazie alla sopra citata



19. La *Natività* dopo l'intervento di restauro.

strettissima collaborazione, si avvale di Modelli a Elementi Finiti (FEM) implementati su Code_Aster (un potentissimo software libero di simulazione numerica), modelli che peraltro questo articolo richiama soltanto sommariamente, mentre invece si concentra sul processo logico e operativo che consente di applicare la modellazione FEM allo specifico problema del dimensionamento delle traversature elastiche.

Va innanzi tutto evidenziato che questo metodo non esclude l'apporto dato dalla sapienza e dall'esperienza dei restauratori, che per definirlo e per applicarlo rimangono assolutamente essenziali. Esso parte infatti dalla approfondita conoscenza del tavolato, in particolare delle sue caratteristiche geometriche, meccaniche e igroscopiche; tali caratteristiche potranno essere ricavate da misurazioni dirette sull'opera, o dalla conoscenza dei risultati di misurazioni eseguite su opere simili, oppure da informazioni generali reperibili nella letteratura scientifica; va da sé che più accurata e specifica è la conoscenza di tali caratteristiche, più accuratamente il comportamento dell'opera reale potrà essere simulato mediante i modelli FEM che sono stati appositamente sviluppati per questo lavoro, e che potranno essere man mano migliorati o adattati ai singoli casi.

La sapienza e l'esperienza dei restauratori sono comunque indispensabili:

- sia per identificare e valutare i danni presenti sull'opera, attribuibili all'inappropriato contenimento operato dalla traversatura, in occasione di progressi sbalzi dell'umidità ambientale (ΔRH);

- sia per valutare quantitativamente (attraverso un "indice di contenimento" RE definito nell'ambito del protocollo attuativo) il contenimento che quella specifica traversatura elastica deve esercitare su quello specifico tavolato in occasione di ΔRH che siano di entità importante, che abbiano alta probabilità di accadimento, e che si ritiene debbano poter essere sopportati dall'opera senza danni né per gli strati pittorici né per il tavolato;

- sia infine per progettare e realizzare praticamente le traversature delle quali il metodo abbia indicato le caratteristiche desiderabili.

Il protocollo attuativo è costituito da più moduli, ciascuno dei quali permette di avere una approfondita conoscenza di specifiche caratteristiche dell'opera, per arrivare alla fine a un dimensionamento perfettamen-

te adattato all'opera stessa. Questi moduli riguardano essenzialmente a) conoscenza delle caratteristiche meccaniche del tavolato, b) conoscenza delle caratteristiche meccaniche del sistema di traversatura, c) conoscenza delle caratteristiche igroscopiche dell'opera. Tale organizzazione in moduli rende il protocollo anche efficacemente flessibile e adattabile alle esigenze di ciascuna opera e delle circostanze al contorno. Per esempio, nel caso specifico della *Natività* attribuita a Cesare da Sesto sono state effettuate le sole prove di caratterizzazione meccanica del tavolato e delle traverse, mentre le informazioni che caratterizzano il comportamento igroscopico del tavolato sono state ricavate da studi di letteratura. In questo modo le caratteristiche meccaniche sono specifiche per l'opera, mentre quelle igroscopiche sono generiche. Questo implica che il dimensionamento del sistema di traversatura non può essere perfettamente adattato a questa specifica opera e per questo è stato preferito calcolare una forchetta di valori (presumibilmente uno massimo e uno minimo) della deformazione simulata per un ben preciso salto igroscopico, piuttosto che un unico valore apparentemente deterministico, ma in realtà assai incerto.

In teoria questo protocollo sarebbe quindi applicabile a una qualunque opera anche senza alcuna prova sperimentale. Questo, però, implicherebbe l'uso di valori generici sia per il comportamento meccanico sia per quello igroscopico dell'opera e quindi un risultato altrettanto generico (come dire un'ampia forchetta di valori) che in pratica risulterebbe poco utile. Invece, come già richiamato sopra, quante più misure sperimentali verranno eseguite, tanto più il dimensionamento della traversatura sarà affidabile e specifico per l'opera.

Note

1) D'ora in poi: Gruppo Scienze del Legno, afferente all'Unità di Ricerca "Scienze e Tecnologia del Legno e delle Utilizzazioni Forestali" del Dipartimento DAGRI (Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali, costituito il 01/01/2019) dell'Università degli Studi di Firenze. Prima della costituzione del DAGRI il gruppo afferiva a istituti o dipartimenti dell'Università di Firenze attualmente non più esistenti, che via via confluivano in strutture di dimensione sempre maggiore: in ordine di tempo Istituto di Tecnologia e Utilizzazioni Forestali (1956-1977, Istituto monocattedra diretto dal prof. Guglielmo Giordano), ITF (Istituto di Tecnologia Forestale, 1977-1985), IATF (Istituto di Assestamento e Tecnologia

- Forestale, 1985-1999), DISTAF (Dipartimento di Scienze e Tecnologie Ambientali Forestali, 2000-2009), DEISTAF (Dipartimento di Economia, Ingegneria, Scienze e Tecnologie Agrarie e Forestali, 2009-2012), GESAAF (Dipartimento di Gestione dei Sistemi Agrari, Alimentari e Forestali, 2013-2018).
- 2) Sulle proposte attributive vedi: *Leonardo e Cesare da Sesto nel Rinascimento meridionale*, a cura di N. Barbatelli, Poggio a Caiano 2013; F. Bologna, *Opere d'arte nel salernitano dal XII al XVIII secolo*, Soprintendenza alle Gallerie della Campania, Napoli 1955; S. De Luca, *Restauro a Solofra: La Collegiata di San Michele*, Roma 1987.
- 3) G. Gualdani, *Il caso studio del dipinto su tavola Natività di Cesare da Sesto. Un lombardo nel Rinascimento meridionale all'inizio del XVI secolo: particolarità tecniche e costruttive. Analisi sul degrado della pellicola pittorica in relazione al comportamento del supporto ligneo. L'intervento di restauro della tavola*, tesi della SAFS dell'OPD, a.a. 2016-2017.
- 4) C. Castelli, A. Santacesaria, *Il restauro dei supporti lignei*, in *Dipinti su tavola. La tecnica e la conservazione dei supporti*, a cura di M. Ciatti, C. Castelli, A. Santacesaria, Firenze 1999, pp. 169-195.
- 5) La *Natività* è stata affidata al Settore Dipinti mobili dell'OPD dalla Soprintendenza di Salerno. Il restauro è stato diretto da Marco Ciatti e Cecilia Frosinini; restauro della superficie pittorica: Luisa Gusmeroli e Patrizia Riitano; restauro del supporto ligneo: Andrea Santacesaria, Ciro Castelli e Giovanni Gualdani. Documentazione fotografica: Giuseppe Zicarelli. Indagini diagnostiche: radiografia X Ottavio Ciappi, Roberto Bellucci; riflettografia IR con scanner Vis-Nir Roberto Bellucci, INO-CNR di Firenze; fluorescenza X Claudio Seccaroni, Roberto Moiola - ENEA - Roma; analisi morfologiche al microscopio ottico, al SEM-EDS e spettrofotometria Giancarlo Lanterna.
- 6) La cipollatura è un distacco fra anelli annuali adiacenti; può avere cause diverse e manifestarsi in momenti diversi.
- 7) L'alburno costituisce la parte esterna e quindi più giovane del tronco, nella quale avviene il trasporto della linfa ascendente; esso non contiene estrattivi in grado di aumentare la sua resistenza agli attacchi degli organismi xilofagi, che possono quindi attaccarlo con maggior facilità.
- 8) Le traverse superiore e inferiore sono larghe circa 11 cm e spesse circa 5,5 cm; la centrale è invece larga circa 9 cm e spessa circa 5 cm.
- 9) Il sistema di vincolo delle traverse è simile a esempi osservabili in altri dipinti più antichi presenti sul territorio italiano: l'utilizzo di una ferramenta così organizzata si denota sulla gran parte delle tavole due-trecentesche del Centro Italia, in particolare dell'area toscana.
- 10) Questa discrepanza sembra legata al fatto che le parti del pannello che affrontano un maggior movimento sono quelle laterali e per questo motivo il legnaiolo ha realizzato le asole soltanto su questi chiodi, in modo da consentire al manufatto una più alta capacità di movimento.
- 11) La pellicola pittorica risulta distanziata internamente di 4-5 cm rispetto ai margini.
- 12) La mancanza di fonti documentarie si deve verosimilmente al fatto che l'opera è di provenienza privata.
- 13) *Lo Stato dell'arte. L'arte dello Stato. Le acquisizioni del Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo. Colmare le lacune – Ricucire la storia*, catalogo della mostra (Roma, Museo Nazionale di Castel Sant'Angelo, 26 maggio-29 novembre 2015) a cura di M.G. Bernardini, M. Lolli Ghetti, Roma 2015.
- 14) Dall'aspetto sembra potersi trattare di Paraloid® B72, un prodotto tipicamente utilizzato nella conservazione di questa tipologia di manufatti. Peraltro il Paraloid non produce un rinforzo strutturale della parete legnosa.
- 15) R. Naldi, G. Porzi, *Per Cesare da Sesto a Napoli. La tavola con l'Adorazione del Bambino*, Galleria Napolinobilissima, Napoli 2009.
- 16) Come verrà meglio chiarito nel prosieguo di questo articolo, è opportuno che le traverse possano rispondere elasticamente alle tendenze deformative del tavolato, in un rapporto che permetta un equilibrato controllo dei movimenti d'imbarcamento, senza impedirlo né consentirlo eccessivamente.
- 17) La rigidità di un elemento inflesso è dovuta sia alla specie e alla qualità del legno utilizzato, sia alle caratteristiche geometriche delle sezioni, sia alle direzioni anatomiche sollecitate (longitudinale per le traverse e trasversale per il tavolato).
- 18) Come è noto, le pareti cellulari del legno adsorbono o desorbono molecole d'acqua, e di conseguenza rigonfiano e ritirano, per portarsi all'equilibrio igroscopico con le condizioni termoigrometriche dell'ambiente di conservazione.
- 19) Questo è dovuto al *compression set*, che produce nel tempo un imbarcamento permanente, e all'effetto di *flying wood*, che si manifesta come imbarcamento transitorio. Cfr. L. Cocchi, B. Marcon, P. Mazzanti, L. Uzielli, C. Castelli, A. Santacesaria, *Verifica del funzionamento di una traversatura elastica su un dipinto su tavola: la Deposizione dalla Croce di Anonimo abruzzese, XVI secolo*, 'OPD Restauro', 26, Firenze 2014, pp. 83-94.
- 20) Tale tipo di deformazione solitamente mette in compressione il colore delle zone interessate, ma in questo caso non vi ha determinato alcun sollevamento.
- 21) Il metodo e il protocollo qui descritti sono stati messi a punto dal Gruppo Scienze del Legno, in stretta collaborazione con i restauratori dell'OPD.
- 22) Il tavolato viene quindi definito 'monolitico' quando le tavole sconnesse vengono perfettamente ricollegate, le fratture risanate e le lacune reintegrate.
- 23) Seguendo il Sistema Internazionale di unità di misura (SI), le forze si misurano in Newton (N); un N equivale a circa 0,1 chilogrammi-peso.
- 24) D. Szeliga, J. Gawad, M. Pietrzyk, *Parameter Identification of Material Model Based on the Inverse Analysis*, 'International Journal of Applied Mathematics and Computer Science', 14, 2004, pp. 549-556; L. Brancheriau, H. Baillères, D. Guitard, *Comparison between Modulus of Elasticity Values Calculated Using 3 and 4 Point Bending Tests of Wooden Samples*, 'Wood Science and Technology', 36 (5), 2002, pp. 367-383.
- 25) I valori indicano i moduli di Young (E) e si misurano in megapascal (MPa): 1 MPa = 1 N/mm².
- 26) P. Dionisi Vici, P. Mazzanti, L. Uzielli, *Mechanical Response of Wooden Boards Subjected to Humidity Step Variations:*

Climatic Chamber Measurements and Fitted Mathematical Models, 'Journal of Cultural Heritage', 7 (1), 2006, pp. 37-48; C. Manfredi, *Studio sul dipinto su tavola originale "Deposizione dalla Croce"*, di Anonimo Abruzzese del XVI secolo: monitoraggio deformometrico in risposta a variazioni di umidità e valutazione dell'effetto di contenimento di un sistema di traversatura con molle applicato sul retro, tesi magistrale in Scienze e Materiali per la Conservazione e il Restauro, Università degli Studi di Firenze, a.a. 2015-2016.

27) L. Bratasz, R. Kozłowski, B. Rachwa, *Sorption of Moisture and Dimensional Change of Wood Species Used in Historic Objects*, Proceedings of COST Action IE0601, Braga 2008, pp. 15-20; P. Mazzanti, *Studio del comportamento reologico del legno di Pioppo Bianco (Populus alba L.) in direzione trasversale alla fibratura*, tesi di dottorato di ricerca in Economia, Pianificazione Forestale e Scienze del Legno, Università degli Studi di Firenze, XX ciclo, 2007; P. Mazzanti, M. Togni, L. Uzielli, *Drying Shrinkage and Mechanical Properties of Poplar Wood (Populus alba L.) across the Grain*, 'Journal of Cultural Heritage', 13, settembre 2012, pp. 585-589.

28) Questo coefficiente rappresenta un valore intermedio fra il ritiro/rigonfiamento radiale e quello tangenziale, ed esprime la variazione dimensionale percentuale del legno per ogni variazione di 1% della sua umidità; viene pertanto espresso in %/% ("percento di variazione dimensionale ogni percento di umidità"). Si ricorda che l'umidità del legno (talora chiamata "contenuto di umidità") è la quantità di acqua presente nel legno, espressa come percentuale della sua massa anidra, cioè "assolutamente secca".

29) Questo salto di umidità è stato assunto come valore di riferimento, in quanto costituisce una variazione di RH di entità importante, con alta probabilità di accadimento, che si ritiene debba poter essere sopportata senza danni dall'opera qualora la sua traversatura sia stata realizzata in base al presente dimensionamento.

30) Il valore esatto ricavato tramite GAB model (L. Bratasz, R. Kozłowski, B. Rachwa, *Sorption of Moisture* cit.), risulta $\Delta w = 2,5997\%$.

31) In realtà gli strati pittorici non possono essere considerati perfettamente impermeabili al vapor d'acqua; la scelta di considerarli tali porta quindi a simulare deformazioni maggiori di quelle reali, e costituisce un elemento a favore della sicurezza per quanto riguarda la stima delle deflessioni massime.

32) Cfr. L. Cocchi, B. Marcon, P. Mazzanti, L. Uzielli, C. Castelli, A. Santacesaria, *Verifica del funzionamento* cit.

33) *Ibidem*.

34) Che è caratterizzato da proprietà uniche e indipendenti nelle tre direzioni reciprocamente perpendicolari: le direzioni longitudinale, radiale e tangenziale.

35) Che prevede che le superfici (tavolato e traversatura) non siano incollate e che si possano staccare.

36) Si noti comunque che le soluzioni tecniche attuate comprendono accorgimenti (in particolare le molle regolabili) atti a consentire nel tempo una parziale regolazione della rigidità della traversatura.

Bibliografia aggiuntiva

C. Castelli, *Proposta per un nuovo tipo di traversa per dipinti su tavola*, 'OPD Restauro', 2, 1987, pp. 78-80.

C. Castelli, M. Ciatti, *Proposta di intervento su particolari supporti lignei*, 'OPD Restauro', 1, 1989, pp. 108-111.

C. Castelli, M. Ciatti, M. Parri, A. Santacesaria, *Alcune nuove proposte per i sistemi di sostegno e controllo dei dipinti su tavola*, in *Legno e restauro - Ricerche e restauri su architetture e manufatti lignei*, a cura di G. Tampone, Firenze 1989, pp. 290-292.

C. Castelli, C. Danti, R. Boddi, A. Crescioli, *Relazione tra UR e variazioni dimensionali delle tavole lignee dipinte*, in *Legno e restauro - Ricerche e restauri su architetture e manufatti lignei*, a cura di G. Tampone, Messaggerie Toscane, Firenze 1989, pp. 285-289.

C. Castelli, C. Danti, R. Boddi, A. Crescioli, *Esame del comportamento delle tavole lignee dipinte in relazione alle escursioni termoigrometriche*, in *Il restauro del legno*, a cura di G. Tampone, vol. II, Firenze 1989, pp. 135-139.

C. Castelli, M. Ciatti, *I supporti lignei dei Dipinti e i sistemi di traversatura: un'analisi storica e alcune proposte operative*, in *Il restauro del legno*, a cura di G. Tampone, vol. II, Firenze 1989, pp. 141-154.

C. Castelli, M. Parri, A. Santacesaria, *Supporti lignei: problemi di conservazione*, in *Problemi di restauro - Riflessioni e ricerche, I sessanta anni di attività del laboratorio di restauro dei dipinti 1932-1992*, a cura di M. Ciatti, Firenze 1992, pp. 41-63.

C. Castelli, *The Restoration of Panel Painting Supports*, in *The structural conservation of panel paintings*, atti del Symposium a cura di K. Dardes, A. Rothe, Malibu 1995, pp. 316-340.

C. Castelli, *Metodo di riduzione dei movimenti dei supporti lignei dipinti*, 'OPD Restauro', 10, 1998, pp. 87-94.

F. Ciani Passeri, L. Orata, C. Rossi Scarzanella, A. Santacesaria, *Il recupero della tavola dipinta distrutta dal terremoto dell'Aquila. L'intervento sul supporto ligneo della Deposizione di Anonimo abruzzese proveniente dal Museo Nazionale dell'Aquila*, 'OPD Restauro', 24, 2012, pp. 139-148.

L. Cocchi, B. Marcon, P. Mazzanti, L. Uzielli, C. Castelli, A. Santacesaria, *Verifica del funzionamento di una traversatura elastica su un dipinto su tavola: la Deposizione dalla Croce di Anonimo abruzzese, XVI secolo*, 'OPD Restauro', 26, 2014, pp. 83-94.

D. Dureisseix, B. Marcon, *A Partitioning Strategy for the Coupled Hygromechanical Analysis with Application to Wood Structures of Cultural Heritage*, 'International Journal of Numerical Methods in Engineering', 88 (3), 2011, pp. 228-256.

D. Guitard, *Mécanique du matériau bois et composites*, Ed. Cépaduès, Toulouse 1987.

B. Marcon, P. Mazzanti, L. Uzielli, L. Cocchi, D. Dureisseix, J. Gril, *Mechanical Study of a Support System for Cupping Control of Panel Paintings Combining Crossbars and Springs*, 'Journal of Cultural Heritage', 13, settembre 2012, pp. 5109-5117.