

aplar **6**

i laser in combinazione con...

Atti del Convegno

APPLICAZIONI LASER NEL RESTAURO

Firenze, Auditorium di Sant'Apollonia, 14-16 settembre 2017



NARDINI EDITORE



i laser in combinazione con...

APPLICAZIONI LASER NEL RESTAURO

Firenze, Auditorium di Sant'Apollonia, 14-16 settembre 2017

Atti del 6° Convegno

a cura di

A. Brunetto, G. Lanterna, B. Mazzei



NARDINI EDITORE

Atti del convegno dedicati ad Andrea Galeazzi
persona squisita sempre presente e attiva
nella divulgazione degli studi sui beni culturali

Comitato Scientifico

Lorenzo Appolonia, *Soprintendenza Beni Culturali Aosta, Pres. IGIC*
Giorgio Bonsanti, *già Univerità degli Studi di Firenze*
Anna Brunetto, *Restauri Brunetto, Vicenza*
Giancarlo Lanterna, *Opificio delle Pietre Dure, Firenze*
Barbara Mazzei, *Pontificia Commissione di Archeologia Sacra, Città del Vaticano*
Antonio Paolucci, *già Musei Vaticani, Città del Vaticano*
Renzo Salimbeni, *IFAC - CNR, Firenze*
Paolo Salonia, *ITABC - CNR, Comitato Esecutivo ICOMOS Italia, Roma*
Antonio Sansonetli, *ICVBC - CNR, Milano*
Ulderico Santamaria, *Musei Vaticani, Università degli Studi della Tuscia*
Fabrizio Vona, *Polo Museale della Puglia, Bari*

Comitato Organizzativo

Stefania Agnoletti, *Opificio delle Pietre Dure, Firenze*
Alessia Andreotti, *Università di Pisa*
Anna Brunetto, *Restauri Brunetto, Vicenza*
Daniele Ciofini, *IFAC - CNR, Firenze*
Stefano Landi, *Stefano Landi, Firenze*
Giancarlo Lanterna, *Opificio delle Pietre Dure, Firenze*
Daniela Murphy Corella, *National Heritage Conservation, Ass. Bastioni, Firenze*
Alessandro Zanini, *El.En. S.p.A., Firenze*

Organizzazione

segreteria@aplar.eu
www.aplar.eu

Atti del 6° Convegno APLAR

a cura di Anna Brunetto, Giancarlo Lanterna, Barbara Mazzei

ISBN: 978-88-404-0090-7

Stampa: luglio 2019

Elaborazione Grafica

Maria Rosa Saporito, Milano

Riproduzione vietata ai sensi di legge
(art. 171 della legge 22 aprile 1941, n. 633)
Senza regolare autorizzazione,
è vietato riprodurre questo volume
anche parzialmente e con qualsiasi mezzo,
compresa la fotocopia, anche per uso interno
o didattico.

In copertina

Anonimo, XVI secolo, Annunciazione, particolare,
dipinto su tavola, proprietà privata.

Con il patrocinio di



assorestauo



Con il contributo di



Indice

Presentazione di Roberto Pini	9
Presentazione di Giorgio Bonsanti.....	11
Introduzione di Anna Brunetto, Giancarlo Lanterna, Barbara Mazzei	13
 Restauro della facciata brunelleschiana e dei cortili degli uomini e delle donne dell'Istituto degli Innocenti di Firenze	
V. Tesi, S. Landi, F. Fratini, E. Cantisani	17
 Il restauro dei portali di San Petronio a Bologna: una metodologia combinata tra gel rigidi e laser	
M.C. Improta, S. Landi, P.F. Lorenzi, A.K. Potthoff, F. Sorella	33
 Il recupero della leggibilità di un'opera di Matheus Rocha in cemento armato e carta di giornale	
S. Stoisa, S. Vazquez, O. Chiantore, F. Comisso, A. Piccirillo, A. Mirabile, T. Poli, F. Zenuccini.	47
 L'intervento di pulitura laser su tre calchi in gesso della Collezione dell'Accademia di Brera	
S. Cerea, F. Mancini, V. Ruppen, E. Isella, D. Bonelli, A. Sansonetti	61
 Patinature artificiali su modelli di gesso, individuazione delle soglie di danneggiamento in seguito a pulitura laser	
V. Ruppen, F. Mancini, S. Cerea, E. Isella, D. Bonelli, A. Sansonetti	75
 Il recupero tramite sinergie laser di antiche iscrizioni e disegni sulle superfici a stucco della Galleria dei Carracci	
L. Barucci, A. Brunetto, E. Cajano, G. Capriotti, M. Cardinali, T. Cavaleri, M. Demmelbauer, D. Luzi, C. Giovannone, D. Milani, E.O. Caligaris, P. Pastorello, E. Settini	91
 Confronto di metodi di descialbo con diverse sorgenti laser	
F. Mancini, V. Ruppen, S. Cerea, E. Isella, D. Bonelli, A. Botteon, A. Sansonetti	111

Rimozione dei depositi di ossalati da una tempera a guazzo su gesso con metodologia laser	
M. Cossino, F. Zenucchini, T. Sandri , P. Croveri, D. Elia, D. Castelli	125
L'impiego della strumentazione laser Long Q-Switching nella pulitura degli affreschi di Antonio da Viterbo detto il Pastura nel Duomo di Tarquinia	
D. Rigaglia, V. Romè, L. Caporossi, A. Zanini, A. Brunetto, V. Di Tullio, L. Luvidi, E. Catelli, R. Mazzeo, G. Insolera	133
Dipinto murale ad olio di Tomaso Pasquotti danneggiato dall'incendio del 2009 dell'Asilo Rossi di Schio (VI), caratterizzazione dello stato di conservazione e valutazione delle potenzialità del trattamento laser	
I. Osticioli, A. Rampon, A. Brunetto, D. Ciofini, S. Siano	149
Monitoraggio mediante imaging nell'infrarosso termico del riscaldamento indotto da laser durante la pulitura di superfici di intonaci dipinti	
A. Felici, C. Riminesi, J. Striova, L. Bartoli, A. Zanini	161
Determinazione della soglia di fluenza di danno nella pulitura delle superfici policrome	
F. Di Stasio, U. Santamaria.	173
Il recupero delle pitture murali della cupola di San Costanzo a Ronciglione (VT); Una gloria di angeli ritrovata grazie al laser	
M.F. Falcon Martinez, C. Giuffrida, F. Scirpa, L. Caporossi, F. Di Napoli Rampolla.	195
Laser cleaning on the Mut Temple wall paintings Gebel Barkal (Sudan)	
A. Brunetto, A. Giovagnoli, M.C. Laurenti, M.J. Mano, A. Zanini	203
Recupero di un dipinto murale del XV secolo nella chiesa di San Giovanni a Saluzzo, Cuneo	
V. Moratti, R. Bianchi, F. Brigadeci, F. Zenucchini	231
Sinergie laser e emulsioni per il recupero di policromie di tre dipinti di H. Bosch delle Gallerie dell'Accademia di Venezia	
A. Brunetto, G. Bono, E. Fiorin, M.C. Maida	247
Trattamento di patina ad ossalato di calcio in un dipinto su tavola con metodi chimici e laser: tecniche di analisi per il controllo e la valutazione dei risultati ottenuti	
G. Tranquilli, F. Fumelli, F. Aramini, G.F. Priori, F. Talarico, P. Moretti, L. Cartechini, C. Miliani	267

Er:YAG laser: testing and evaluation of laser cleaning on a varnished 20th century oil painting	
C. Chillè, V. Papadakis, C. Theodorakopoulos	283
Pulitura laser del blu egizio su superfici archeologiche	
B. Ferrarato, F. Zenucchini, G. Ferraris di Celle, A. Piccirillo, M. Gulmini	299
La pulitura laser della cassetta porta-ushabti (Cat.2441) del Museo Egizio di Torino	
S. Mansi, F. Zenucchini, P. Croveri, F. Spagnoli	313
L'impiego del laser nel Laboratorio di restauro Bronzi e Armi antiche dell'Opificio delle Pietre Dure: il proseguo dell'esperienza operativa sulla pulitura delle Porte realizzate per il Battistero fiorentino	
S. Agnoletti, A. Brini, M.D. Mazzoni	325
Laser cleaning of Japanese bronze mirrors from the <i>Luigi Pigorini</i> National Museum of Prehistory and Ethnography	
Y. Shen, V. Basilissi, L. Paderni	339
La testa in bronzo dorato dell'imperatore Antonino Pio: problematiche conservative e pulitura laser	
E. Pucci, S. Sarri, J. Agresti, S. Siano	355
Application of laser technology in cleaning metal threads of ancient liturgical vestment, after the experience gained over a period of twenty years (1997-2017)	
A. Milia, L. Nucci, M. Bruno	365
Laser cleaning of metallic threads of a 15th century Italian velvet liturgical vestment	
L. Luvidi, S. Ovide, A. Brunetto, F. Prestileo, D. Ferro	379
Monitoraggio delle applicazioni laser nel restauro di <i>sectilia</i> in pasta vitrea dagli scavi della villa tardoantica di Aiano-Torraccia di Chiusi (SI)	
M. Cavalieri, S. Landi, D. Manna, M. Giamello, C. Fornacelli	395
Pulitura laser integrata a metodologie tradizionali per la rimozione degli strati di alterazione su reperti archeologici rinvenuti nella Necropoli della Via Triumphalis in Vaticano	
R. Giardina, G. Spinola, U. Santamaria, F. Callori, F. Morresi	409

Il biscuit di Urania del Museo Napoleonico la pulitura combinata agar-agar e laser	
M.G. Patrizi, S. Ridolfi, S. Crescenzi	421
Laser treatment of contaminations on paper: a preliminary study	
V. Atanassova, I. Kostadinov, G. Yankov, P. Zahariev, M. Grozeva	433
L'uso di laser QS Nd:YAG nella conservazione di manufatti etnografici realizzati con fibre di palma dum	
D. Ciofini, A. Bedeir, I. Osticioli, A. Elnaggar, S. Siano	447
Trattamenti di 'luce' su un <i>Achrome</i> di Piero Manzoni	
V. Milo, A. Brunetto, F. Frezzato	459
Prospettive di uso del laser su opere in legno e tessuto dipinto: il crocifisso ligneo della Santissima Annunziata a Firenze	
F. Spagnoli, G. Bonsanti, A. Brunetto, P. Hatchfield, F. Innocenti, C. G. Lalli, G. Lanterna.	473
Combinazioni di laser e solvent-gel sulle formelle policrome ad olio su lamina metallica dei Misteri del Rosario di Chiusanico	
R. Moggia, A. Brunetto, E. Franceschi, E. Manfredi, P. Manfrinetti, G. Petrillo, A. Sista	487
Metodologia laser applicata ad un'opera di ebanisteria di Pietro Piffetti	
F. Zenucchini, M. Cardinali, P. Croveri, P. Luciani, S. De Blasi, G. Dell'Aquila, V. Palleschi	505
Impiego della strumentazione laser nell'ambito dei corsi di restauro triennali di Materiali lapidei e mosaici dell'Istituto per l'Arte e il Restauro di Palazzo Spinelli	
L. Raspanti, D. Manna, S. Landi, A. Guevara Jaramillo, C. Puccetti.	517
Impiego della strumentazione laser nell'ambito dei corsi quinquennali di restauro a ciclo unico dell'Accademia di Belle Arti dell'Aquila	
S. Landi, E. Sonnino, S. Pietrosante, M. Serraiocco	531
Applicazione di laser cleaning nell'ambito del progetto Cobra	
V. Spizzichino, F. Bonfigli, L. Caneve, R. D'Amato, A. Puiu	543
Laser Cleaning applied to metal, wood and plaster objects	
M.M. Morita, G.M. Bilmes	553

Presentazione

Il convegno APLAR, tenutosi a Firenze nel settembre 2017, è stato anche l'occasione di celebrare degnamente gli ultimi 20 anni, che in questa città hanno visto nascere e svilupparsi una collaborazione intensa, fruttuosa ed appassionante fra i centri di ricerca, i centri di restauro, le aziende di restauro e quelle di tecnologia laser del territorio, finalizzata alla sperimentazione delle nuove tecnologie laser per lo studio e la conservazione di opere d'arte. Firenze non è certamente il primo o l'unico luogo dove questi studi sono stati condotti fino all'applicazione su capolavori di inestimabile valore, ma desidero sottolineare, sulla base della mia esperienza personale, che la multidisciplinarietà dei gruppi di lavoro ha rappresentato uno dei fattori principali che hanno portato alla messa a punto di procedure risolutive in problemi di conservazione anche estremamente complessi.

Venendo al presente, il convegno APLAR testimonia assai bene il livello di maturità attualmente raggiunto nelle applicazioni delle tecniche laser alla conservazione. Sono molti gli aspetti che sottolineano gli avanzamenti dei metodi e delle conoscenze, e che tendono alla standardizzazione degli approcci, su cui la maggior parte degli operatori della conservazione hanno sviluppato una visione comune. A partire dagli studi modellistici su campioni rappresentativi, necessari per investigare il tipo di interazione laser su materiali non ancora testati o in condizioni di impiego particolarmente complesse, fino agli studi preliminari su porzioni limitate dell'opera d'arte, indispensabili per la discriminazione delle soglie di danneggiamento e quindi per la definizione di parametri operativi dell'intervento laser. Anche dal punto di vista della scelta delle apparecchiature laser da impiegare si sta procedendo verso criteri di standardizzazione: si registra sempre meno la tendenza tipica dei primi studi pionieristici, in cui si impiegava il primo (e spesso l'unico) laser a disposizione, insieme alla voglia di promuoverlo su tutti i tipi di materiali. Anzi, dalle comunicazioni risulta una visione ricorrente, e quindi condivisa, che per certi materiali si utilizzino certi tipi di laser e con determinate modalità di emissione. Da moltissimi studi emerge chiaramente che, insieme alla scelta della lunghezza d'onda della luce laser che determina il maggiore o minore assorbimento ottico in funzione del materiale trattato, anche la durata dell'impulso viene considerata un parametro cruciale per controllare il tipo di interazione laser-materiale e gli effetti conseguenti. È diventato patrimonio di esperienza comune che gli impulsi laser "lunghi", cioè nel regime del millisecondi, sviluppino un'azione primariamente di tipo termico, mentre impulsi più brevi, dai microsecondi ai nanosecondi, siano in grado di ridurre il danno termico e produrre un'azione meccanica, che va comunque controllata per indurre effetti positivi, come ablazione puntuale o spallazione di incrostazioni superficiali, o per evitare effetti negativi, come danni di tipo fotomeccanico che possono causare la microframmentazione delle superfici. E' inoltre molto significativo (particolarmente per chi come me è da molti anni docente di interazione laser-materiali) che la maggior parte degli studi riportino il "range" operativo di emissione laser in termini di energia per unità di superficie (J/cm^2), che è uno dei principali parametri per il confronto fra le diverse condizioni applicative e per trasmettere l'informazione ad altri operatori che vorranno applicare quelle tecniche in condizioni simili. Identità di visione si riscontra anche sul fatto che la pulitura sia quasi sempre la combinazione di più tecniche. In molti casi infatti è opportuno far precedere trattamenti preliminari con tecniche di tipo meccanico e/o chimico, in modo da rimuovere efficientemente

e con minor consumo di tempo le incrostazioni più spesse, e quindi operare in modo fine e controllato sulle superfici originali dell'opera con tecnica laser. Oltre alle applicazioni laser combinate con le altre tecniche di pulitura, nelle comunicazioni del convegno si riportano interessanti studi in cui il laser si associa all'impiego di sostanze e materiali (agar, alcol, vetrini, ecc.) frapposti fra la sorgente e la superficie da trattare, con lo scopo di mediare l'assorbimento della luce o proteggere da effetti collaterali indesiderati, come la ricaduta di particolato vaporizzato o l'eccessivo surriscaldamento locale. In alcuni casi il laser è impiegato da solo come scelta elettiva per risolvere condizioni di conservazione particolarmente critiche del manufatto artistico: materiali fragili, superfici complesse o microfratturate, distacchi di pellicole pittoriche, materiali che non tollerano umidità (nel qual caso si utilizza il cosiddetto "dry clean"). Per quanto riguarda i materiali oggetto di pulitura laser, senza voler entrare nel dettaglio dal momento che il programma del convegno segue già questa classificazione, è possibile osservare che vi siano procedure oramai consolidate, in termini di scelta del laser e delle condizioni di trattamento, nei casi di materiali lapidei, stucchi, dipinti murali, vernici pittoriche, filati metallici e dorature, mentre per altri materiali il quadro applicativo è ancora oggetto di approfondimento e sperimentazione. A questo riguardo, di particolare interesse è l'approccio al restauro di opere moderne, caratterizzate da grande varietà nella composizione materica, per le quali la domanda di tecniche di pulitura laser potrebbe registrare una crescita notevole nei prossimi anni.

Il laser comunque non rappresenta solo uno strumento utile per la pulitura: la luce coerente può essere infatti impiegata come sonda per l'analisi dei materiali (tramite ad esempio spettroscopia LIBS o Raman) o per la scansione delle superfici di oggetti, allo scopo di fornirne la ricostruzione digitale 3D per applicazioni documentali, come testimoniato da alcuni lavori presentati al convegno.

Infine, vorrei concludere guardando al futuro con un libero esercizio di fantasia per immaginare cosa aspettarci dalle nuove tecnologie che potrebbero essere sviluppate, proprio partendo dagli impieghi della luce laser come strumento intelligente e portatore di una grande quantità di informazioni. Potremmo immaginare scenari futuri nel restauro laser, in analogia agli sviluppi che si vanno delineando in altri campi applicativi di impiego del laser, come quello medico e quello delle produzioni industriali, in cui la gran quantità di dati informativi (Big Data) che la luce genera durante le interazioni con i materiali viene raccolta con sensori o tecniche di diagnostica per immagini ed elaborata con metodi di intelligenza artificiale per aumentare il controllo, l'efficienza e la sicurezza dei trattamenti. Ad esempio, in campo chirurgico si sviluppano già metodi di "teranostica", cioè di diagnostica eseguita in contemporanea alla terapia, che permettono di indirizzare l'azione del chirurgo nelle situazioni più complesse. Non si tratterà quindi di sfruttare la gran mole di dati analitici prodotti in tempo reale allo scopo di andare verso l'automazione dei processi, ricadendo nell'errore prospettico che fecero alcuni tecnologie ai primordi dell'impiego del laser nel restauro, quanto piuttosto per fornire al restauratore nuovi strumenti che accrescano il suo livello di conoscenza, di controllo e di adattabilità delle procedure alla grande variabilità delle morfologie, della composizione materica e dello stato di degrado dei manufatti da sottoporre al trattamento conservativo.

Roberto Pini

Direttore Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara"
Consiglio Nazionale delle Ricerche

Presentazione

Mi è avvenuto recentemente di ritornare sulle vicende del restauro della leggenda della Vera Croce dipinta da Piero della Francesca sulle pareti absidali di san Francesco in Arezzo, eseguito dall'Opificio insieme con la Soprintendenza locale negli anni Novanta dello scorso secolo; e di domandarmi, e di domandare a due persone della statura professionale del chimico Mauro Matteini e del restauratore Sabino Giovannoni, quali differenze tecniche o metodologiche avremmo potuto introdurre nei nostri lavori se quel restauro venisse effettuato al giorno d'oggi. Fra le altre, ci siamo chiesti, naturalmente, se un impiego delle tecnologie laser avrebbe potuto dimostrarsi utile in un caso così difficile per mille ragioni (che non elenco qui) come il ciclo pierfrancescano; e indipendentemente dalla risposta che ciascuno avrà ritenuto di proporre, quel che conta è che avremmo oggi più e meglio saputo che il laser era lì, per così dire accanto a noi, pronto a offrire il suo utilizzo; avremmo dato per scontate la sua presenza e la sua assistenza. Ciò che intendo dire è che esiste ormai una consapevolezza assolutamente diffusa dell'esistenza del laser come strumento presente e attivo nella conservazione dei beni culturali; naturalmente confermato tale a seguito delle tante, sempre più numerose esperienze già maturate, delle quali *Aplar*, nelle sue successive edizioni, si è fatta così efficacemente testimone e divulgatrice. Diamo oggi per conosciuto che non esista un solo laser nel restauro, cioè un'unica macchina tuttotfare, ma che la ricerca fisica tradotta nel mercato offra oggi un range esteso di strumentazioni che funzionano secondo le declinazioni diverse di uno stesso principio, ognuna delle quali può risultare risolutiva in quella particolare situazione. Una delle applicazioni più decisive ai fini di un risultato ottimale, è la scopertura di decorazioni murali sotto una scialbatura, e qui davvero i risultati ottenuti da Anna Brunetto ad Aosta, a Venezia, a Siena, e di lì in poi dagli altri autori come illustrato anche in questi *Atti*, inducono a rimpiangere amaramente quanto si è perso ad esempio, nel recupero dallo scialbo dei dipinti murali di Giotto in Santa Croce a Firenze, effettuato a metà Ottocento, quando le pareti delle Cappelle Peruzzi e Bardi sono state maltrattate a tale scopo con arnesi metallici (raschietti di varia conformazione) o al meglio con sostanze adesive adatte a una successiva azione di strappo; come del resto si è operato fino a tempi recentissimi. Ancora: un altro aspetto che riguarda le funzioni applicative del laser consiste nel raggiunto discernimento che esso non risulta una cura miracolosa per situazioni disperate, quanto uno strumento di grande utilità per collaborare con altre modalità d'intervento, risultando effettivamente insostituibile in determinate circostanze, ma in linea di principio difficilmente pensabile come unico e isolato in assenza di sinergie attuate. Un esempio fra i tanti illustrati in questi *Atti*, avendolo io seguito con assiduità particolare, concerne il bellissimo Crocifisso ligneo riferibile a Antonio da Sangallo (databile dunque ad un tempo indeterminato ma entro i primi due decenni del Cinquecento) restaurato da Francesca Spagnoli in quanto progetto vincitore della seconda edizione del premio dei Friends of Florence al Salone di restauro di Firenze. Mi riferisco in particolare alle alternanze nella liberazione da sostanze non volute sia delle epidermidi dipinte sotto la bronzatura ottocentesca, sia del pannello originale con decorazioni dipinte che ne copriva i fianchi. Il laser dunque è stato smitizzato, pur rimanendo un "intelligent tool", come lo si definiva ai primi momenti nella ripresa delle sue applicazioni nel restauro, nei primi anni Novanta del secolo passato. Ecco allora l'importante contributo sulla "Determinazione della soglia di fluenza di danno nella pulitura delle superfici policrome",

utile per offrire indicazioni di riferimento a tutta una serie di ricerche, perché l'intervento sulle policromie adesso non è più un tabù, anche se continuo ad esser convinto che sia stato altamente opportuno arrivarci lentamente e per gradi. Vedremo dunque i contributi sulla pulitura dei delicatissimi manufatti di arte contemporanea fra cui l'Achrome di Piero Manzoni, oppure dei fili metallici (e ricordo anche lo straordinario risultato ottenuto sul rarissimo Manto brasiliano di piume della Pinacoteca Ambrosiana di Milano, esposto alla mostra *Restituzioni* 2018 tenuta a Venaria Reale dopo il restauro realizzato da Guia Rossignoli). Leggeremo di altri risultati, dopo quelli già pubblicati in diverse occasioni, raggiunti nella rimozione di concrezioni calcaree come anche di patine ossalatiche; ma soprattutto, almeno per me, anche perché ho voluto eseguire un controllo personale prima possibile data l'eccezionalità dell'evento, nella pulitura dei tre polittici veneziani di Hyeronimus Bosch, a dimostrazione dell'impiego del laser ormai anche nel caso di policromie di estrema delicatezza (e naturalmente, anche qui, in combinazione virtuosa con altri mezzi). È così che leggeremo con interesse i contributi che qui raccontano degli insegnamenti attivati nelle strutture di laurea magistrale accreditate, allo scopo di familiarizzare gli allievi con il laser fin dai primi tempi della loro formazione professionale. Potremmo dunque parlare in conclusione, se soltanto si coglie il lato paradossale dell'affermazione, dell'essere divenuto oggi il laser non più strumento d'avanguardia e di eccezione, ma di vera normalità nella redazione dei progetti d'intervento e nelle applicazioni di restauro. Ciò non significa che ormai conosciamo tutto, e che non ci sia ancora davanti a noi una prosecuzione della ricerca scientifica e delle sperimentazioni; ma soltanto che ci appare oggi quasi impensabile raffigurarsi un passato nel quale ancora per noi il laser nel restauro non esisteva proprio, oppure era soltanto un'ipotesi molto lontana, o al più una difficile sperimentazione. È così che fortunatamente da parecchi anni *Aplar* chiama a raccolta e riunisce la comunità nazionale (e non soltanto) degli operatori di restauro a mezzo laser; che ci informa, ci indirizza. Come è bello sapere che questo strumento esiste e è pronto a soccorrerci, così ci affidiamo alla nostra Associazione convinti, come si dice comunemente di qualcosa di molto utile, che "Se non ci fosse, bisognerebbe inventarla". Nel nostro caso, fortunatamente ci ha pensato e ha provveduto Anna Brunetto.

Giorgio Bonsanti

Presidente della Commissione InterMinisteriale
MIBAC-MIUR per l'Insegnamento del Restauro

Introduzione

La sesta edizione del convegno APLAR si è svolta a Firenze presso l'Auditorium di Sant'Apollonia, in via S. Gallo, con il patrocinio della Regione Toscana. Il convegno, sulla scia delle precedenti edizioni (Vicenza 2007, Siena 2008, Bari 2010, Roma 2012 e Città del Vaticano 2014) ha confermato di essere un'importante occasione di incontro, sia a livello nazionale che internazionale, per la condivisione e la discussione di esperienze sulle applicazioni della tecnica laser nel restauro. Come ci è sempre piaciuto constatare, gli appuntamenti APLAR coinvolgono una nutrita platea di restauratori, segno evidente, da una parte, dell'interesse che la tecnologia laser suscita negli operatori della conservazione, mentre, da un altro punto di osservazione, si può confermare quanto sia viva e vivace l'attività concreta e "di cantiere" vista attraverso i casi oggetto di relazione.

In questa edizione il tema del convegno, così come esplicitato nel sottotitolo, era *"i laser in combinazione con..."*, un corollario sottile, volto proprio a stimolare la presentazione di interventi coinvolgenti la tecnologia laser non tanto come una "novità", ma attraverso l'individuazione di una più matura progettualità integrata. In parole semplici APLAR 6 ha avuto l'ambizione di fare il punto sulle potenzialità di uso combinato della tecnologia laser con altre tecniche conservative, tradizionali o innovative, con il fine di raggiungere un risultato più vicino alle esigenze ed all'etica della conservazione. Possiamo dire con soddisfazione che l'intento del convegno è riuscito, in quanto sono state davvero numerose le relazioni che hanno illustrato l'integrazione dei laser in un processo più ampio di tecniche considerate "tradizionali", finanche all'utilizzo delle apparecchiature da parte dei restauratori come un vero e proprio "arnese", sia che fosse per "sgrossare" certe patine, sia per "rfinire" altri trattamenti, presentando in taluni casi interessanti protocolli.

Giova ricordare che nelle prime edizioni si assaporava l'uso del laser come la risoluzione definitiva delle problematiche conservative, sicuramente alimentata dall'entusiasmo per i casi risolti in cui appariva evidente come molti aspettassero una "rivoluzione" sulle metodologie di restauro, specialmente rivolta alla pulitura, magari proprio di quei casi particolarmente ostinati o dove fossero in gioco grandi superfici. Poi, in un naturale processo di maturazione, ci siamo imbattuti in casi particolari, in difficoltà organizzative (movimentazione in cantiere, sicurezza, costi degli investimenti o dei noli), che sono stati via via metabolizzati e integrati nei protocolli e nei capitoli. Infine l'inarrestabile propulsione dei centri di ricerca e di produzione dei laser che ha ampliato le possibilità applicative, la specificità dei macchinari, la loro produzione e diffusione.

È proprio questo uno degli aspetti più interessanti e innovativi che è scaturito dalla sesta edizione di APLAR. Confrontando il tenore delle decine di contributi che negli anni sono stati raccolti negli Atti del Convegno, si può osservare una progressiva presa di coscienza delle potenzialità espresse della strumentazione laser. Dopo un attento e cauto iniziale inserimento del laser in progetti eccezionali, sempre accompagnato da parallele sperimentazioni per valutarne efficacia e soglia di danno, il laser sembra finalmente entrato nella pratica di cantiere, affinando gli ambiti di intervento e aprendosi ad interazioni virtuose. Questi nuovi confini di impiego della strumentazione laser permetteranno di poterne prevedere l'uso, integrato con altre metodologie di intervento, sin dalla fase progettuale dell'intervento di restauro, ottenendo

numerosi vantaggi sia nella razionalizzazione dei protocolli operativi, sia nella logistica di cantiere e nella organizzazione delle tempistiche e, non ultimo, anche nella gestione dei fondi economici. Da quanto premesso, risulta evidente quanto sia ancora più necessario questo appuntamento biennale che ci permette di coagulare esperienze e di fare il punto dello status del laser nel restauro.

In APLAR 6 gli interventi sono stati particolarmente articolati comprendendo applicazioni nel campo dell'architettura (2), dei dipinti murali (5) e dei dipinti mobili (5), dei manufatti cartacei (1) e tessili (3), degli stucchi (2) e dei gessi (1), della scultura lignea (2) e bronzi e oreficeria (3) per finire (e non sembri un'antitesi) nel campo dei reperti archeologici (4) e dell'arte contemporanea (4); sono state presentate anche un repertorio di esperienze di usi dei laser in Istituti dove vengono formati restauratori e tecnici (2); infine sono stati presentati anche 2 lavori con preziose informazioni riguardo al monitoraggio degli effetti dei laser.

Si è confermata efficace ed attraente la scelta di presentare i Poster in 3 minuti con poche ma significative immagini: in tal modo si è lasciato lo stesso spazio a tutti i presentatori fomentando l'interesse della platea, che ha potuto poi approfondire personalmente con i relatori durante le pause.

I temi affrontati durante la Tavola Rotonda hanno dibattuto intorno all'attuale diffusione della pulitura laser nei Paesi Europei ed Extraeuropei, specificando le applicazioni sui diversi materiali, sul livello di conoscenza della pulitura laser negli Organismi Nazionali incaricati della Tutela del Patrimonio Culturale e sulla organizzazione del mercato nelle diverse realtà Nazionali; si è discusso inoltre della diffusione dei corsi di specializzazione ed, in generale, sull'organizzazione dell'apprendistato; infine, si è tentato di fare il punto sulla presenza di aziende nazionali di produzione di apparecchiature laser e di applicazioni di pulitura laser condizionate dai problemi locali nel reperimento di strumentazioni idonee.

È stato molto apprezzato il servizio di traduzione simultanea, preciso e competente in materia, che è intervenuto biunivocamente, traducendo gli interventi esteri in lingua italiana e dall'italiano in inglese.

Importanti anche, data la locazione cittadina e l'ampia scelta, le visite organizzate dal Convegno, che hanno visto una numerosa partecipazione: sono stati visitati i Laboratori di Restauro dell'Opificio delle Pietre Dure, Settore Lapidei e Metalli nella sede di via degli Alfani e quelli di Restauro dei Settori Dipinti Mobili, Dipinti Murali, Scultura Lignea ed i Laboratori Scientifici alla Fortezza da Basso; una visita guidata è stata organizzata al nuovo Museo dell'Opera del Duomo, dove si trovano molte opere restaurate anche coi Laser; è stato guidato un tour nelle vie del centro di Firenze andando ad incontrare, in un percorso ideale a cielo aperto, numerose opere di varie tipologie, dai marmi, ai bronzi, agli stucchi, alle ceramiche, restaurate negli anni con il concorso della tecnologia laser; una visita è stata effettuata presso il centro di produzione di El.En. Spa a Calenzano.

Infine, non può non essere rivolto un ringraziamento per il patrocinio di numerosi Enti di tutela, Istituti di ricerca e conservazione, e al contributo di Imprese di restauro e di produzione di dispositivi laser, patrocinio che permette di sostenere e traghettare APLAR a nuovi, interessanti, futuri appuntamenti.

Anna Brunetto, Giancarlo Lanterna, Barbara Mazzei
Curatori Atti APLAR 6



APPLICAZIONI LASER NEL RESTAURO

Monitoraggio delle applicazioni laser nel restauro dei frammenti di *sectilia* in pasta vitrea dagli scavi della villa tardoantica di Aiano-Torraccia di Chiusi

MARCO CAVALIERI¹, STEFANO LANDI², DANIELA MANNA³,
MARCO GIAMELLO⁴, CRISTINA FORNACELLI⁴

Abstract

The discovery of more than 1600 glass sectilia during the archaeological excavations on the Roman villa in Aiano (IV-V century BC) has required the definition of punctual strategies to gather, catalogue and restore the fragments. After dusting the surfaces, the conservation and the morphology of fragments have been examined; chemical and physical analysis also helped to detect matters and procedures. Careful tests have been then made in order to identify the best methods to remove any residues due to burial; laser ablation has been identified as the most efficient and respectful of the brittle glass surface. The cleaning has been made via a double emission - Q-Switch (pulse duration 15 ns, energy from 10 mJ to 140 mJ) and Short Free Running (pulse duration from 30 to 100 μ s, energy from 100 mJ to 1 J) laser - continuously verifying the results through Dino Lite Digital and Digital 3D Microscopy. Scanning Electron Microscopy (SEM) has been also used to investigate glass composition and structure, as well as to check the effects of the laser ablation on the original surfaces.

1. Introduzione

I risultati delle ricerche sulle pavimentazioni e sugli apparati decorativi parietali della villa tardoantica di Aiano-Torraccia di Chiusi (San Gimignano, SI) sono stati oggetto di diversi contributi nell'ambito dei colloqui organizzati dall'AISCOM negli ultimi anni, e questo nell'intento di offrire al dibattito scientifico sempre nuovi dati in merito a quel poco, ancorché stupefacente, che è sopravvissuto della decorazione della villa tardoantica [1-3]. In quest'occasione, stante l'intensa attività di studio, in vista della pubblicazione della monografia sul sito, su alcuni *sectilia* vitrei provenienti dal complesso monumentale, è parso

¹ Centre d'étude des Mondes antiques, Université catholique de Louvain, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgium, marco.cavalieri@uclouvain.be

² Ditta Stefano Landi, Fiesole (FI), Italia

³ Ditta Daniela Manna, Firenze, Italia

⁴ DSFTA, Sezione di Scienze della Terra, Università degli Studi di Siena, Siena, Italia

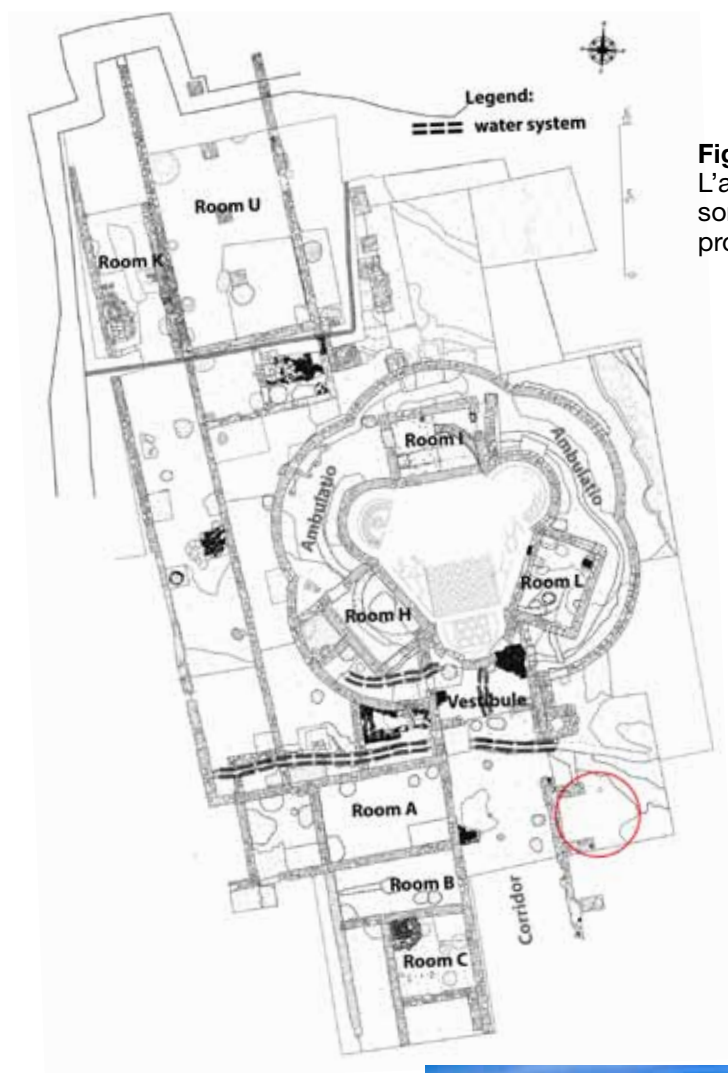


Fig. 1. Planimetria della villa di Aiano (estate 2015). L'area cerchiata a Sud-Est individua la zona ove sono stati rinvenuti gli accumuli di *sectilia vitrei* pronti per essere riciclati.



Fig. 2. Foto dell'area di scavo di Aiano presa da Nord durante la campagna di scavo dell'estate 2016.

interessante, al di là di un loro inquadramento storico-archeologico [4], dare conto della metodica impiegata per una loro prima analisi ricostitutiva, produttiva e conservativa, utile per altro anche nella riflessione di una futura valorizzazione di materiali così fragili e rari.

2. Cronologia e contesto archeologico

Sarebbe inutile riprendere in questa sede le complesse fasi di vita della villa d'Aiano. In ogni caso occorre ricordare come la villa, tra il IV e la metà del V sec. d.C., evidenzia monumentali e sofisticate formule architettonico-planimetriche, le sole evidenze archeologiche di una fase residenziale di prestigio, completamente metabolizzata nell'alto-medioevo dalla trasformazione funzionale del sito in cava di materiali e complesso di officine artigianali [5]. Al di là dell'impianto della villa, la ricomposizione lenta e complessa di quanto sopravvissuto al naufragio degli apparati decorativi sta mostrando la ricchezza e la ricercatezza nella scelta dei materiali: commessi marmorei per i pavimenti; pitture parietali imitanti l'*opus sectile*, mosaici in tessere lapidee ed in pasta vitrea opaca e ialina a foglia d'oro; a ciò si aggiungano tracce di applicazioni architettoniche in stucco e ancora *sectilia* in pasta vitrea a soggetto ittico riconducibili, per stile e tecnica d'esecuzione, a maestranze verosimilmente alessandrine. La ricomposizione dell'insieme di questi dati, provenienti da frammentati ma indicativi *disiecta membra*, conferisce alla villa di Aiano un ruolo di sito di altissimo prestigio non solo regionale ma per l'Italia tirrenica in generale, forse portato locale di diretti contatti con la capitale. In effetti, l'ampio impiego di *sectilia* in pasta vitrea (oltre 1.600 i frammenti riesumati, repertoriati e restaurati ad oggi, ma certamente destinati ad aumentare!) prodotti provinciali di lusso, importati preconfezionati e allestiti *in situ*, mostra la vitalità e gli standard culturali ed economici di cui questo settore della Toscana interna poteva e sapeva ancora godere tra IV e V sec. d.C.

Purtroppo tutto l'apparato decorativo è stato ritrovato sempre defunzionalizzato e quindi in giacitura archeologica secondaria, ovvero accumulato appositamente da mano umana, tra la fine del V ed il VI sec. d.C. o riciclato prima dell'abbandono dell'insediamento. Di qui discende l'impossibilità di ricostruirne, stanti i dati attuali, gli spazi, le modalità ed i fini, salvo forse metterlo in rapporto di adeguatezza, per ricercatezza e lusso, al contesto architettonico gravitante attorno alla cosiddetta "sala triabsidata", certamente un ambiente di soggiorno, per certi versi assimilabile ad un *trichorium*, di cui, però, sfugge ancora una chiara funzionalità. La sala, inoltre, è iscritta in una struttura muraria curvilinea, una sorta di *ambulatio polylobata* (Figg. 1-2).

3. I *sectilia* in pasta vitrea

I *sectilia* da Aiano trovano i confronti iconografici puntuali con il pannello vitreo della cosiddetta Casa del Chirurgo di Rimini [6], datato entro la prima metà del III secolo d.C. e con altri da Corinto [7], riferibili invece alla fine di quello stesso secolo. Di soggetto ed identica tecnica di esecuzione sono anche i frammenti di *sectilia* (sei occhi e pinne natatorie) provenienti da Treviri, datati, su base stratigrafica al IV sec. d.C., e ricondotti a



Fig. 3. Ricostruzione parziale di un pannello a fondo verde recante al centro un pesce (un'orata?) quest'ultimo assemblato partendo da 14 unità frammentarie.

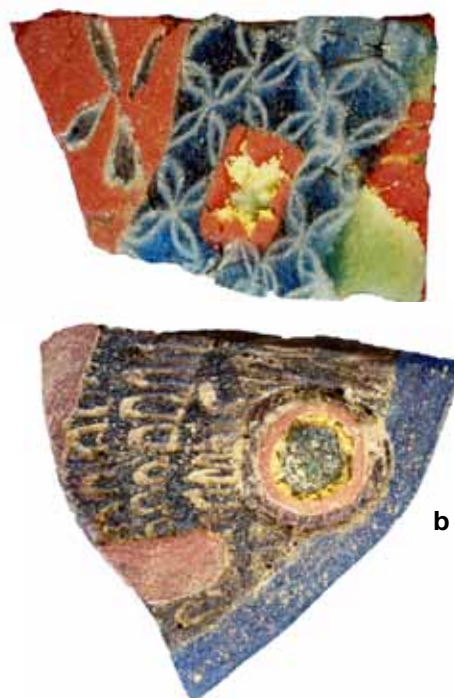


Fig. 4. Alcuni sectilia di colore verde e giallo provenienti dalla villa romana di Aiano (a). Due frammenti caratterizzati da un'elevata ricercatezza dei particolari (b).

maestranze egiziane [8]. A Treviri, come ad Aiano, lo schema compositivo doveva prevedere rappresentazioni di pesci marini particolarmente frequenti sulle tavole dei Romani, come dentici, orate e murene, inserite all'interno di cornici geometriche in gruppi di tre o quattro, secondo uno schema ben noto anche all'arte musiva di età medio e tardo imperiale (Fig. 3).

4. Restauro e studio dei *sectilia* vitrei

Fra il 2009 e il 2011, durante le campagne di scavo presso la villa di Aiano, la missione archeologica dell'UCLouvain ha individuato una serie di frammenti assolutamente illeggibili dal punto di vista materico. Questi sono stati trasferiti in laboratorio, dove è stata effettuata una valutazione delle loro condizioni conservative.

È stata quindi avviata un'accurata spolveratura mediante pennelli a setole morbide di piccole dimensioni, procedendo poi alla rimozione localizzata dei depositi di natura incoerente presenti all'interno delle piccole cavità mediante micro-aspiratore. Questa prima fase ha consentito di verificare lo stato di conservazione dei diversi *sectilia* e di definire conseguentemente modalità di pulitura differenziate. In occasione di questa prima fase di pulitura, è stata messa in luce la presenza di ulteriori depositi di natura diversa e maggiormente adesi alla superficie.

Le caratteristiche peculiari del repertorio hanno reso molto complessa la definizione di idonee linee guida per un progetto di indagini archeometriche che meglio potesse rispondere alle domande degli archeologi e al contempo soddisfare le esigenze di conservazione e restauro dei frammenti.

Fattori come l'elevato numero di frammenti (circa 7000 di cui 1600 sono stati oggetto di studio in questa fase sperimentale), la composizione altamente eterogenea (che si riscontra anche dalla presenza di fenomenologie di degrado diverse sia per tipologia che per entità) e la presenza di depositi superficiali di diversa natura, consistenza e origine, hanno fortemente condizionato le strategie adottabili al fine di massimizzare la caratterizzazione dei campioni, ottemperando contemporaneamente al requisito di minima invasività sui reperti (Fig. 4a).

Il repertorio di *sectilia* provenienti dalla villa romana di Aiano è caratterizzato da vetri di diversa natura, sia per quanto riguarda l'impiego di materie prime (fondenti e stabilizzanti) sia per l'uso di coloranti e opacizzanti di diversa natura, introdotti per conferire effetti cromatici peculiari per ciascun frammento. Il desiderio di emulare colorazioni presenti in natura (le venature di un marmo, le squame di un pesce o la brillantezza del mare) ha inoltre portato a una giustapposizione di vetri con composizione e colorazione nettamente diversa (Fig. 4b), spesso a definire dettagli di dimensioni estremamente ridotte.

Dati l'elevato numero di campioni e la necessità di operare nelle condizioni di minore invasività possibile per preservare l'integrità dei frammenti in vista della ricostruzione dei motivi originali, il progetto di indagine archeometrica si è quindi focalizzato sull'impiego di tecniche analitiche non invasive; in particolare, la Fluorescenza a raggi X (XRF, nella

versione portatile) e la Spettroscopia in Riflettanza con Fibre Ottiche (FORS) sono state individuate come le più idonee grazie ai ridotti costi e tempi di applicazione e alla possibilità di ottenere informazioni sulla composizione chimica e sulle caratteristiche colorimetriche dei campioni [9-10]. Entrambe le tecniche consentono un'analisi assolutamente non distruttiva del reperto, in quanto non richiedono campionamento, o preparazione del campione, e possono operare in aria senza alterare in nessun modo il materiale analizzato.

Poiché l'informazione che si ottiene dall'applicazione di queste tecniche di indagine proviene dagli strati più superficiali del campione, la rimozione di depositi di varia natura dalla superficie dei frammenti è stata attentamente valutata.

Dopo una prima spolveratura e una pulitura dei frammenti che si presentavano stabili mediante tamponi di cotone idrofilo imbevuti di alcool etilico decolorato (**Fig. 6**), i *sectilia* vitrei sono stati suddivisi in base alle loro caratteristiche intrinseche, ovvero in funzione delle cromie e degli eventuali riferimenti iconografici, verificando la grande varietà dei frammenti e definendo un primo riordino degli stessi.

Sui frammenti più fragili e decoesi si è valutato di evitare interventi meccanici o chimici per non rischiare possibili distacchi o piccole perdite di materiale. La debolezza del vetro richiedeva uno strumento in grado di rimuovere i depositi senza esercitare pressione sulla struttura né rischiare di sollecitare la superficie.

È stata quindi avviata una fase di sperimentazione mediante tecnologia laser, che garantisce il massimo controllo delle operazioni di ablazione e un'elevata selettività dell'intervento, ponendosi come una metodologia estremamente accurata e sicura, ideale in situazioni delicate come questa.

Uno dei primi elementi valutati nella definizione di un protocollo di pulitura idoneo è stato quello della marcata eterogeneità dei materiali del repertorio. La presenza di decorazioni complesse e caratterizzate da particolari di dimensioni ridotte si è tradotta infatti nelle difficoltà derivanti dalla necessità di isolare aree con caratteristiche diverse per composizione, colore e grado di alterazione e procedere con idonei parametri di fluensa e durata. L'individuazione quindi di una procedura standardizzata secondo la quale operare su materiali con caratteristiche diverse è quindi apparsa necessaria per poter lavorare in condizioni di massima sicurezza su un elevato numero di campioni e in tempi relativamente brevi [11-14].

Pertanto, considerando l'alto valore dei singoli frammenti, sono state avviate alcune prove di pulitura laser (**Fig. 5a**) su frammenti vitrei marginali - uniformi per tipologia e per singola cromia - e su aree campione molto piccole, pari a 5 mm. In questa fase preliminare, lo studio si è rivolto su un numero ristretto di cromie (giallo e blu), mentre un'analisi più approfondita ed estesa all'intero repertorio è attualmente in corso.

Le prove sono state eseguite in modo molto graduale, effettuando in forma preliminare una serie di sondaggi spot a energia bassa, verificando così l'interazione fra laser, superficie e concrezione.

Una fase importante di lavoro ha interessato alcuni frammenti in pasta vitrea gialli opachi, pesantemente alterati e con spesse concrezioni, verificando se fosse possibile recupe-

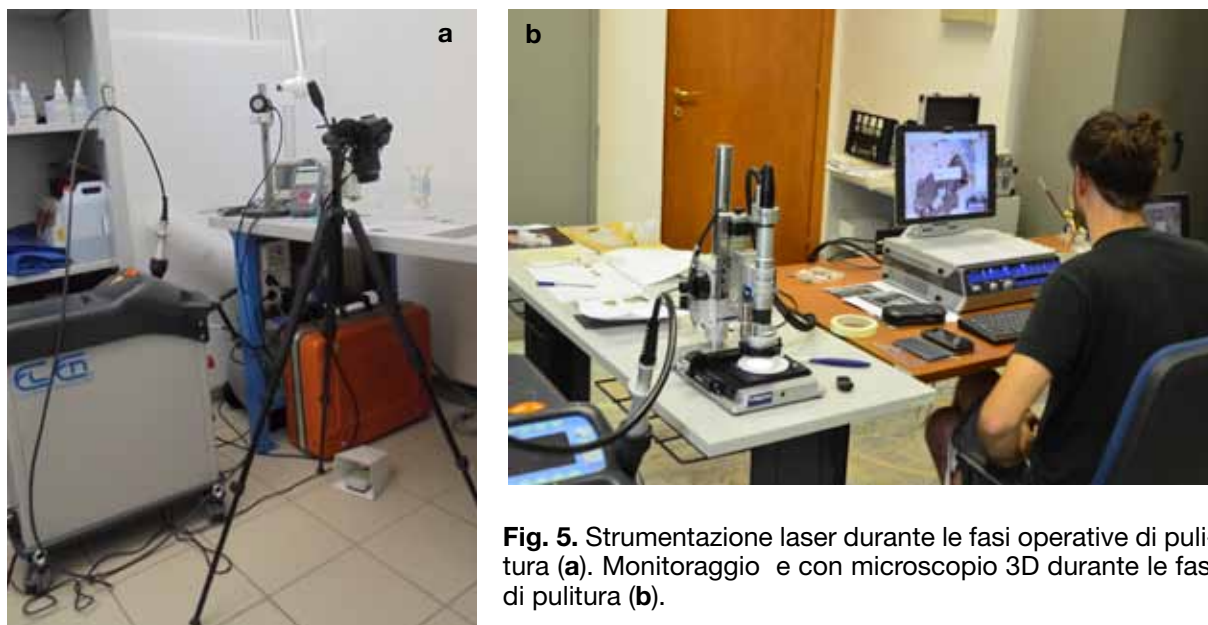


Fig. 5. Strumentazione laser durante le fasi operative di pulitura (a). Monitoraggio e con microscopio 3D durante le fasi di pulitura (b).

rare le superfici rimuovendo i depositi concrezionati.

Le prove hanno considerato una doppia modalità di emissione laser, Q-Switch (pulse duration 15 ns, energy from 10 mJ to 140 mJ) e Short Free Running (pulse duration from 30 to 100 μ s, energy from 100 mJ to 1 J), resa maneggevole e precisa grazie al trasporto del fascio con fibra ottica.

Ciascuna prova è stata eseguita in forma graduale verificandone l'efficacia in fase di transizione attraverso indagini visive a luce naturale, luce trasmessa, luce radente, Dino Lite Digital Microscope e Microscopio digitale 3D.

L'impiego di un microscopio digitale 3D¹ [15] ha permesso di controllare l'avanzamento delle operazioni di pulitura laser (Fig. 5b) al fine di poterne valutare l'andamento e gli effetti di eventuali interazioni con la superficie vetrosa originale. Nel presente studio è stato utilizzato un microscopio digitale 3D KH 7700 Hirox (Fig. 5b), che consente di ottenere un dettagliato rilievo micro-morfologico tridimensionale a colori delle superfici esaminate, con la possibilità di effettuare misurazioni lineari ed angolari secondo gli assi x, y e z. Gli obiettivi intercambiabili di cui è dotato permettono di disporre di una gamma di ingrandimenti da 20x a 7000x.

L'avanzamento e il risultato finale delle operazioni di pulitura è infine stato valutato anche tramite l'applicazione microscopia ottica in luce polarizzata (OM) e microscopia elettronica a scansione con microanalisi (SEM-EDS), tramite microscopio elettronico a scansione Philips XL30 dotato di sistema di microanalisi X a dispersione di energia EDS EDAX-DX4.

Indagini mineralogiche tramite Diffrazione a Raggi X (XRD) sono state inoltre im-

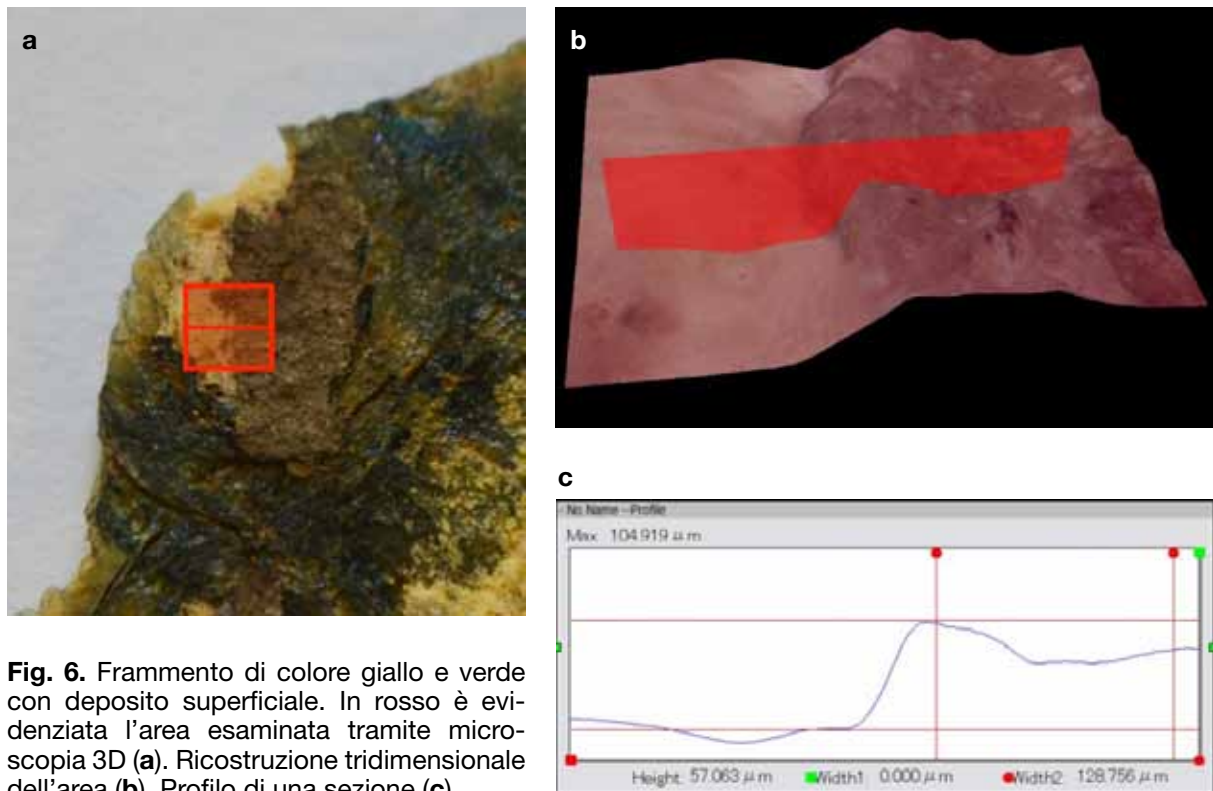


Fig. 6. Frammento di colore giallo e verde con deposito superficiale. In rosso è evidenziata l'area esaminata tramite microscopia 3D (a). Ricostruzione tridimensionale dell'area (b). Profilo di una sezione (c).

piegate per la caratterizzazione del terreno di scavo e dei depositi secondari presenti sulla superficie dei campioni. Durante questa fase è stato utilizzato un diffrattometro per polveri a geometria Bragg-Brentano (Philips X'Pert PRO PW 3040/60 con rivelatore X'Celerator PW 3015) equipaggiato con portacampioni multiuso (MPSS) per campioni massivi, mono-capillare, portacampione rotante e microscopio ottico per allineamento del campione che permette di investigare anche campioni di dimensioni ridotte.

5. Risultati

L'impiego di tecniche di imaging (microscopia 3D e ottica) ha permesso di monitorare l'andamento delle operazioni di pulitura e di definire una stratigrafia complessa dei depositi presenti sui campioni. Tre tipologie di diversa natura (a volte presenti contemporaneamente), colore e consistenza sono state individuate e indagini più accurate ne hanno successivamente consentito la caratterizzazione.

L'affiancamento del microscopio digitale 3D ha permesso di seguire passo passo le operazioni di pulitura laser; un dettagliato rilievo micro-morfologico tridimensionale a colori delle superfici esaminate (**Figg. 6a e b**) e la possibilità di effettuare misurazioni lineari ed angolari secondo gli assi x, y e z (**Fig. 6c**) hanno infatti consentito di verificare puntualmen-

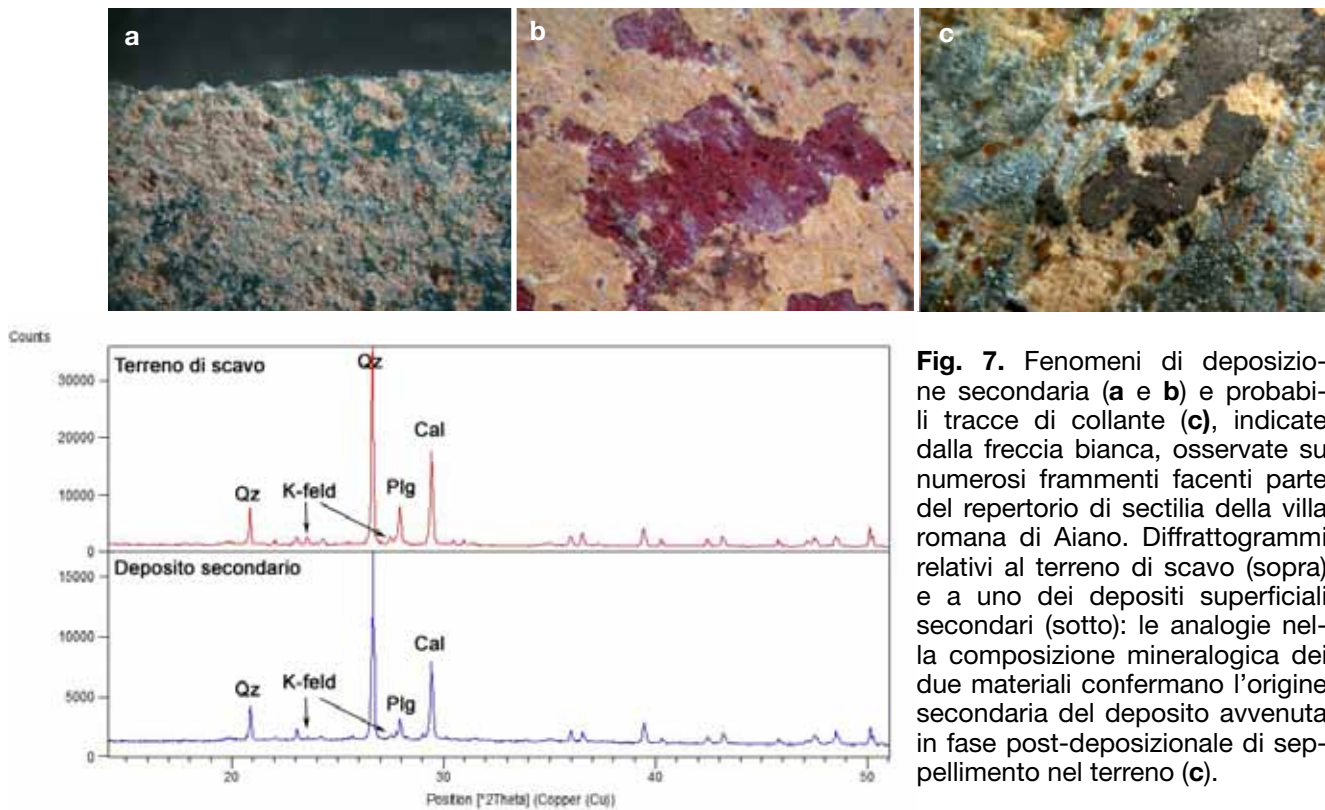


Fig. 7. Fenomeni di deposizione secondaria (a e b) e probabili tracce di collante (c), indicate dalla freccia bianca, osservate su numerosi frammenti facenti parte del repertorio di sectilia della villa romana di Aiano. Diffratogrammi relativi al terreno di scavo (sopra) e a uno dei depositi superficiali secondari (sotto): le analogie nella composizione mineralogica dei due materiali confermano l'origine secondaria del deposito avvenuta in fase post-depositiva di seppellimento nel terreno (c).

te l'entità dell'ablazione laser e di osservare i suoi effetti sulla superficie trattata.

A seguito di ogni ablazione è stato quindi possibile monitorare il grado di assottigliamento dello strato di deposizione secondaria al variare della fluensa e del tempo di ablazione. È proprio durante questa fase che è stato possibile individuare, fra la superficie del campione e lo strato di deposizione secondaria, la presenza di un ulteriore strato che ha subito suggerito una probabile connessione con il collante originariamente impiegato per l'assemblaggio dei pannelli. La progressiva rimozione degli strati superficiali incoerenti ha quindi permesso di procedere con una campionatura del livello associato alla presenza di materiale resinoso per procedere con analisi chimiche (tuttora in corso) per la caratterizzazione dei materiali che compongono il collante (sia per quanto riguarda la componente organica che inorganica).

Le indagini mineralogiche hanno confermato l'origine secondaria di due dei depositi osservati (Figg. 7a e b) che per composizione e colore sono risultati compatibili con il terreno di scavo (Fig. 7d). Procedendo gradualmente con le operazioni di pulitura è tuttavia emersa la presenza di un ulteriore strato (Fig. 7c), direttamente a contatto con il retro di alcuni campioni o accumulato in prossimità degli spigoli, la cui consistenza ha immediatamente suggerito un'origine diversa e probabilmente associabile con le operazioni di incollaggio dei frammenti al supporto.

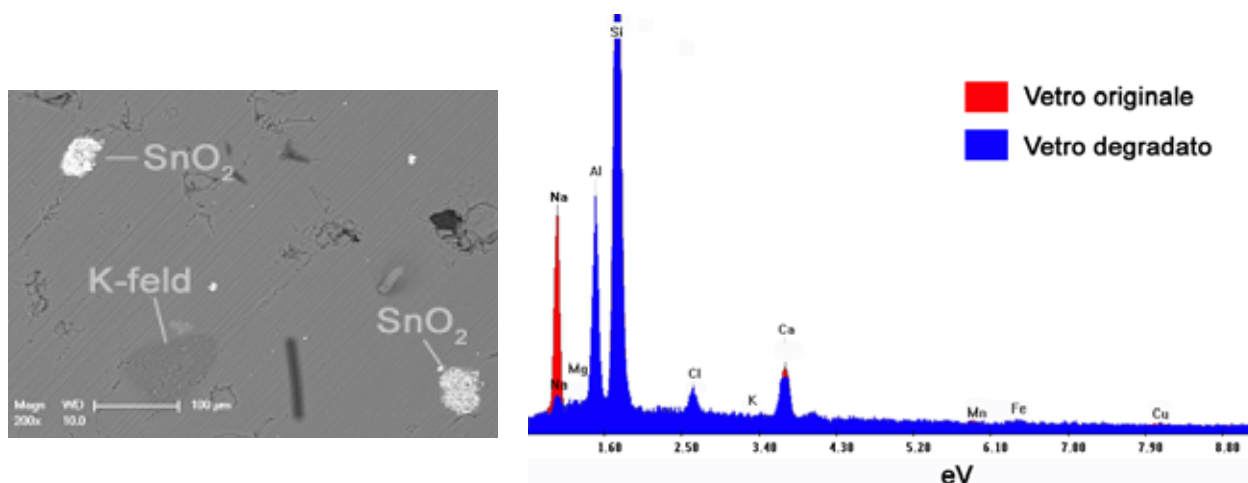


Fig. 8. Immagine BS di un'area ben conservata di un frammento di sectilia di colore azzurro (a). Relitti di K-feldspati e agglomerati di cassiterite (SnO_2) sono ben visibili. (b) Composizione chimica del vetro originale (curva rossa) e dello strato di alterazione presente in prossimità della superficie (curva blu).

L'impiego di una miscela di componenti organiche (resina di pino, cera d'api o olio di semi) e inorganiche (calcite o ceramica macinata) per il fissaggio delle tessere vitree al supporto in terracotta è stata documentata in alcuni studi precedenti [16] e una campagna di indagini è attualmente in atto per poter verificare la presenza di sostanze organiche e caratterizzare la natura del collante impiegato.

Gli effetti seguiti a diversi gradi di ablazione sono stati inoltre investigati tramite microscopia ottica in luce polarizzata e SEM-EDS. Di seguito è riportato lo studio degli effetti dell'interazione del fascio laser con un vetro azzurro mediamente ben conservato. Da un'analisi tramite SEM-EDS (**Fig. 8a e b**), il campione risulta costituito da vetro sodico-calcico in cui il colore azzurro-verdastro è dato dalla presenza di rame e ferro in rapporto ottimale. Nel vetro si riscontrano anche residui delle materie prime impiegate (come relitti di feldspati potassici) e la presenza di agglomerati di ossido di stagno (cassiterite) probabilmente impiegati per l'opacizzazione del campione a dare un aspetto cangiante tipico dell'acqua di mare.

Sulla superficie, oltre alla presenza del deposito secondario, è possibile notare uno strato superficiale di alterazione (grigio scuro delimitato da linea tratteggiata) caratterizzato da un decremento di Na e Ca rispetto ai livelli registrati nell'area ben conservata del campione (**Fig. 8b**). L'impoverimento in ioni alcalini e alcalino-terrosi è compatibile con il comune fenomeno di leaching che avviene a seguito dell'interazione della superficie vetrosa con acqua durante il periodo di giacitura.

Osservando gli effetti di tre diversi stadi di pulitura sulla superficie del campione (**Fig. 9**) è possibile verificare una quasi totale rimozione degli strati di deposizione secondaria. Tuttavia, non è stato ritenuto opportuno spingersi fino alla rimozione dell'accumulo di

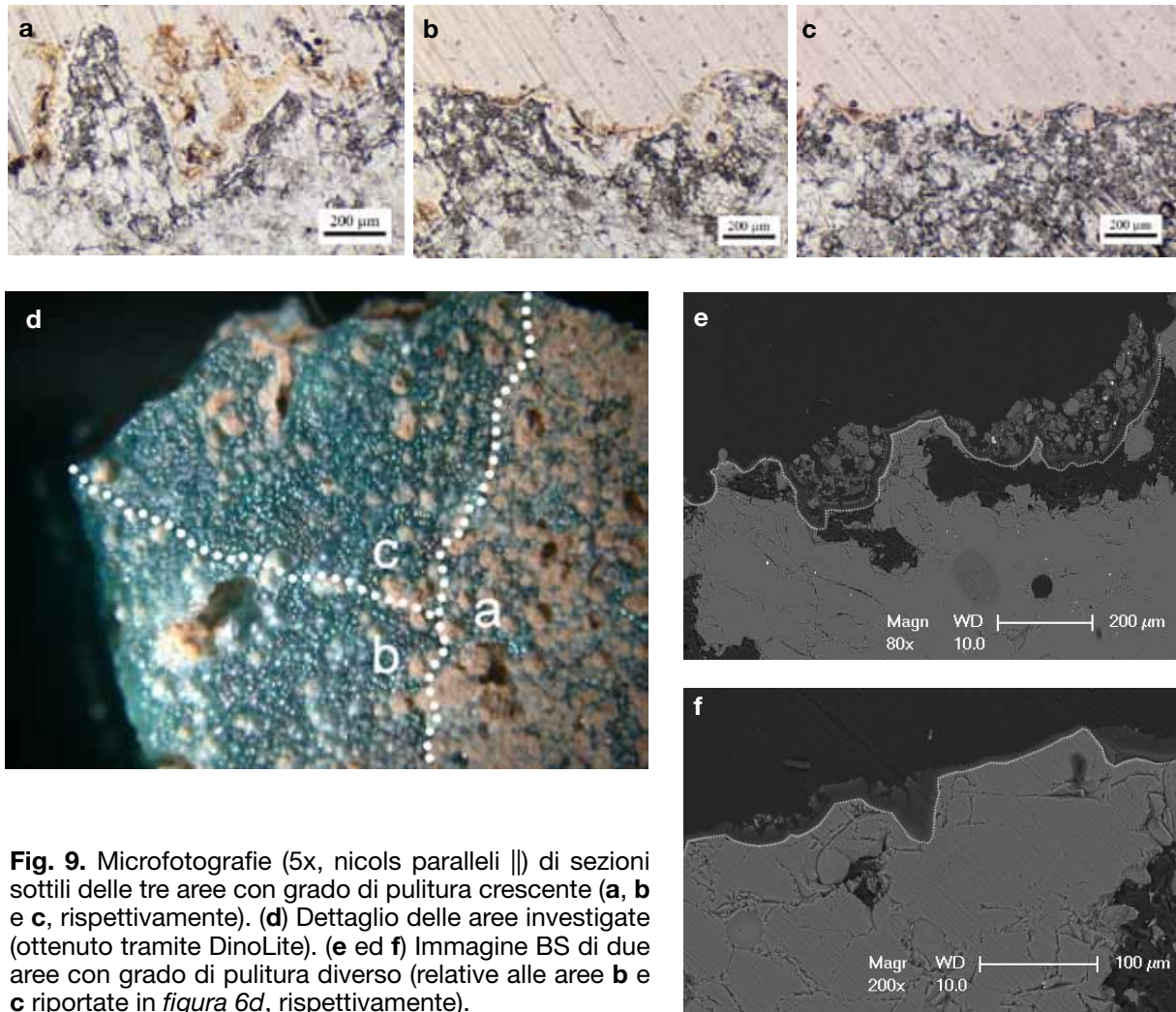


Fig. 9. Microfotografie (5x, nicols paralleli ||) di sezioni sottili delle tre aree con grado di pulitura crescente (**a**, **b** e **c**, rispettivamente). (**d**) Dettaglio delle aree investigate (ottenuto tramite DinoLite). (**e** ed **f**) Immagine BS di due aree con grado di pulitura diverso (relative alle aree **b** e **c** riportate in figura 6d, rispettivamente).

materiale incoerente all'interno dei pori onde evitare la perdita degli strati superficiali e più degradati di vetro. In **figura 9d** è possibile osservare tre sezioni con grado di pulitura crescente (definite **a**, **b** e **c** in figura); tramite microscopia ottica e elettronica è stato quindi possibile verificare come anche nella zone dove l'ablazione laser è stata più spinta, la superficie originale del vetro non abbia subito danni (**Figg. 9a**, **b** e **c**).

Nel caso del campione in esame, la pulitura laser ha permesso la rimozione quasi totale dei depositi secondari (in questo caso non erano visibili tracce di collante che, altrimenti, sarebbe stato conservato) senza intaccare gli strati vetrosi e mantenendo anche il sottile strato di alterazione presente sulla superficie in modo da preservare tutte le informazioni provenienti dal campione (**Figg. 9e** ed **f**, corrispondenti rispettivamente alle fasi **b** e **c** di pulitura).

Le indagini chimiche hanno evidenziato che tutti i vetri analizzati presentano una composizione sodico-calcica con contenuti variabili di potassio, calcio, magnesio e fosforo, probabilmente dovuti all'impiego di fondenti di diversa origine (minerale o vegetale).

Le tecniche di colorazione e gli agenti coloranti sono quelli comuni all'industria vetraria di epoca romana: manganese per i colori bruni, ferro, rame e/o cobalto per gli azzurri e i blu, antimoniati di piombo per i gialli, rame metallico o cuprite per i rossi [17-19].

Tuttavia, a seguito delle indagini tessiturali, chimiche e mineralogiche, è emersa una particolare eterogeneità nelle tecniche di produzione (anche all'interno della medesima classe cromatica) che potrebbe suggerire la provenienza dei frammenti da botteghe o manifatture diverse [20-21]. Considerando tuttavia anche l'eventualità di un riciclo o di una rilavorazione secondaria del vetro, ulteriori indagini saranno in futuro rivolte a determinare se l'eterogeneità compositiva e tecnologica del repertorio sia dovuta al lavoro di un unico workshop altamente specializzato, al contributo di diverse botteghe, o all'assemblaggio a partire da opere diverse. Come riportato in studi precedenti, infatti, la produzione di colorazioni specifiche che richiedevano un'elevata specializzazione delle maestranze era riservata a pochi centri produttivi ed è inoltre stata documentata l'attività di workshop specializzati esclusivamente nella produzione di specifiche colorazioni [22]. Una più accurata indagine chimica, mirata in particolare alla determinazione degli elementi minori, in traccia e delle terre rare, è attualmente in corso per poter definire un quadro più dettagliato della provenienza dei frammenti e fornire indicazioni più accurate riguardo la storia dei *sectilia* vitrei rinvenuti presso la villa di Aiano.

6. Conclusioni

Il presente studio ha voluto mettere in luce le potenzialità della validazione delle operazioni di pulitura tramite tecniche di ablazione laser tramite l'impiego congiunto di diverse tecniche di diagnostica. Sebbene i vantaggi (nonché i difetti) delle tecniche di ablazione laser siano ben note e la loro applicazione su materiali di natura diversa documentata in numerosi studi, la necessità di valutare attentamente le procedure di pulitura si presenta imprescindibile ogni qual volta si presenti una casistica complessa come quella relativa al repertorio di *sectilia* vitrei in esame.

L'impegno congiunto di tecniche di diagnostica diverse ha, infatti, permesso di esaminare gli effetti dell'interazione della radiazione con superfici con caratteristiche di composizione, colore e conservazione estremamente eterogenee. Alla luce dello studio eseguito, le procedure che hanno permesso la maggiore accuratezza con i frammenti di colore giallo e blu sono state quelle con strumentazione Q-Switch operando a secco con una fluenza di $1,6 \text{ J/cm}^2$ come da analisi eseguita spot dopo spot, per ogni singola emissione.

La definizione dei parametri idonei è stata possibile attraverso un monitoraggio continuo di ogni fase di ablazione grazie alle osservazioni con microscopia digitale 3D, che ha permesso di quantificare l'entità della rimozione del materiale superficiale e di verificarne così l'avanzamento fino al raggiungimento dello strato vetroso. Inoltre, l'impiego della mi-

croscopia ottica (OM) e del SEM-EDS ha consentito di ottenere informazioni più accurate, soprattutto riguardo le fasi cruciali della pulitura, ovvero quelle in prossimità della superficie vetrosa.

L'identificazione dei parametri idonei ad una pulitura del repertorio dei *sectilia* (anche se per il momento limitata a poche cromie) ha quindi permesso di procedere sul vasto repertorio in piena sicurezza, procedendo tuttavia con un attento monitoraggio sui frammenti che presentavano un'elevata complessità decorativa.

Note

- ¹ Per l'impiego della strumentazione si ringraziano Jacopo Crezzini e Francesco Boschin, Università degli Studi di Siena.

Bibliografia

- [1] Cavalieri M., *Il pavimento in cementizio della villa tardoantica di Aiano-Torraccia di Chiusi (Siena). Primi dati su decorazione musiva, tecnica esecutiva e orizzonte cronologico*, in *Atti del XV Colloquio dell'AISSCOM*, Aquileia 2009; pp. 365-376.
- [2] Cavalieri M., Lenzi S., Cantisani E., *Disiecta membra: i sectilia della villa tardoantica di Aiano-Torraccia di Chiusi (San Gimignano, Siena). Primi dati su litotipi, sistemi decorativi e reimpiego*, in *Atti del XVII Colloquio dell'AISSCOM*, Teramo 2011; pp. 119-131.
- [3] Cavalieri M., Lenzi S., Cantisani E., *La fine della villa tardoantica di Aiano-Torraccia di Chiusi (San Gimignano, Siena): la sistematica distruzione dei suoi arredi. Nuovi dati archeologici su litotipi e sistemi decorativi*, in *Atti del XVIII Colloquio dell'AISSCOM*, Cremona 2012; pp. 537-544.
- [4] Cavalieri M., Camin L., Paolucci F., *I sectilia vitrei dagli scavi della villa romana di Aiano-Torraccia di Chiusi (Siena, Toscana)*, in "Journal of Glass", 58 (2016), pp. 286-291.
- [5] Cavalieri M., Giumlia-Mair A., *Lombardic glassworking in Tuscany*. in "Mater Manuf Process", 24 (2009), pp. 1023-32.
- [6] J. Ortalli, *Pannello decorativo con pesci*, in M. Marini Calvani, *Aemilia La cultura romana in Emilia Romagna dal III sec a.C. all'età costantiniana*, Venezia, 2000, pp. 519-20.
- [7] A. Oliver, *A glass opus sectile panel from Corinth*, *Hesperia*, in "JSTOR" (2001), pp. 349-63.
- [8] H. Merten, *Zur Glasausrüstung der spätantiken Bischofskirche in Trier*, in "Trierer Zeitschrift", 75/76 (2012-2013), pp. 73-83.
- [9] I. Liritzis, N. Zacharias, *Portable XRF of archaeological artifacts: current research, potentials and limitations*. In: *X-ray fluorescence spectrometry (XRF)*, Geoarch, Springer New York, 2011, pp. 109-142.
- [10] M. Bacci, *UV-VIS-NIR, FT-IR, and FORS spectroscopies*, *Chemical Analysis*, New York. Interscience then Wiley, 2000, pp. 321-362.
- [11] K.G. Watkins, *A review of materials interaction during laser cleaning in art restoration*, in *Laconia I: lasers in the conservation of artworks*, 4-6 October 1995, Heraklion, Crete, Greece, 1997, pp. 7-15.

- [12] M. Cooper, *Laser cleaning in conservation: an introduction*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1998.
- [13] S. Klein, S. Klein, T. Stratoudaki, V. Zafropoulos, J. Hildenhausen, K. Dickmann, T. Lehmkuhl, *Laser-induced breakdown spectroscopy for on-line control of laser cleaning of sandstone and stained glass* in "Appl. Phys.A, Materials Science & Processing", 69,4 (1999), pp. 441-444.
- [14] S. Siano, J. Agresti, I. Cacciari, D. Ciofini, M. Mascalchi, J. Osticioli, A. Mencaglia, *Laser cleaning in conservation of stone, metal, and painted artifacts: state of the art and new insights on the use of the Nd:YAG lasers*, in "Appl. Phys.A, 106,2 (2012), pp. 419-446.
- [15] F. Boschini, J. Crezzini, *Morphometrical analysis on cut marks using a 3D digital microscope*, in "Int. J. Osteoarchaeol.", 22,5 (2012), pp. 549-562.
- [16] E. Ribechini, S. Orsini, F. Silvano, M. P. Colombini, *Py-GC/MS, GC/MS and FTIR investigations on LATE Roman-Egyptian adhesives from opus sectile: New insights into ancient recipes and technologies*, in "Anal. Chim. Acta", 638,1 (2009), pp.79-87.
- [17] J. Henderson J., *Chemical characterization of Roman glass vessels, enamels and tesserae*, in *MRS Proceedings*, 1990, p. 601.
- [18] R.Arletti, M.C.Dalconi, S. Quartieri, M. Triscari, G.Vezzalini, *Roman coloured and opaque glass: a chemical and spectroscopic study*, in "Appl. Phys.A." 83,2 (2006), pp. 239-45.
- [19] M.Verità, M.S.Arena, A.M. Carruba, P.Santopadre, *Roman glass: art and technology in a 4th century AD opus sectile in Ostia (Rome)*, in "J Cult Herit, Elsevier", 9 (2008), pp. e16-e20.
- [20] R. Scranton, L. Ibrahim, R.H. Brill, Kenchreai, *Eastern Port of Corinth: Results of Investigations by the University of Chicago and Indiana University for the American School of Classical Studies at Athens*, in "Brill Archive", 1 (1978).
- [21] M. Smirniou, T. Rehren, *Direct evidence of primary glass production in Late Bronze Age Amarna, Egypt*, in "Archaeometry.Wiley Online Library", 53,1 (2011), pp. 58-80.
- [22] A. Santagostino Barbone, E. Gliozzo, F.D'Acapito, I. Memmi Turbanti, M. Turchiano, G. Volpe, *The sectilia panels of faragola (Ascoli satriano, southern Italy): a multi-analytical study of the red, orange and yellow glass slabs*, in "Archaeometry.Wiley Online Library", 50,3 (2008), pp. 451-73.