

Fig. 5. I cubi utilizzati per confrontare la perdita di CCD applicato ai campioni di dipinto con e senza la riserva.

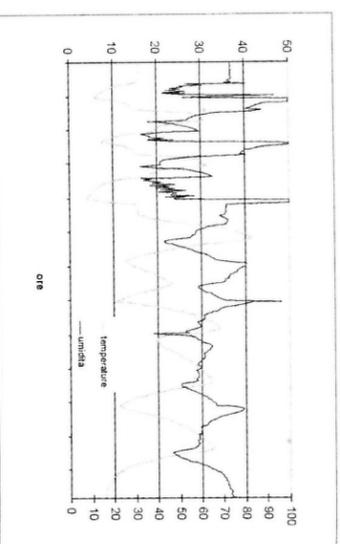


Fig. 6. Cicli di variazione di temperatura.

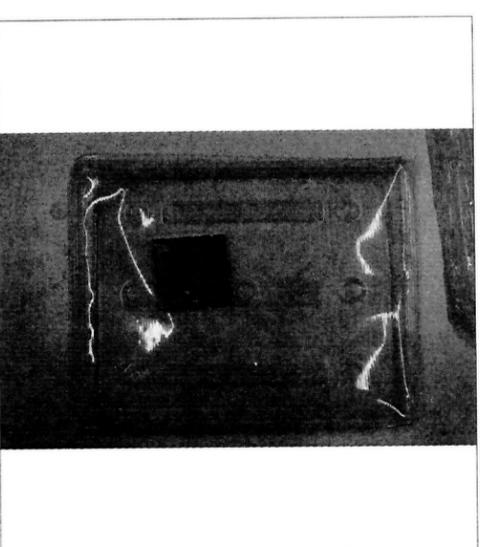


Fig. 7. Campione di dipinto con riserva spray su TNT. Rapporto superficie campione volume: 25 cm<sup>2</sup> / 0,5 dm<sup>3</sup>.

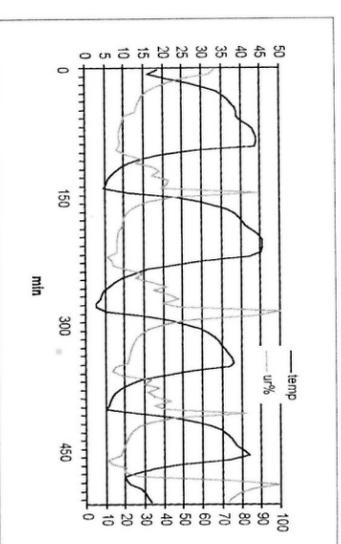


Fig. 8. Cicli di variazione di temperatura.

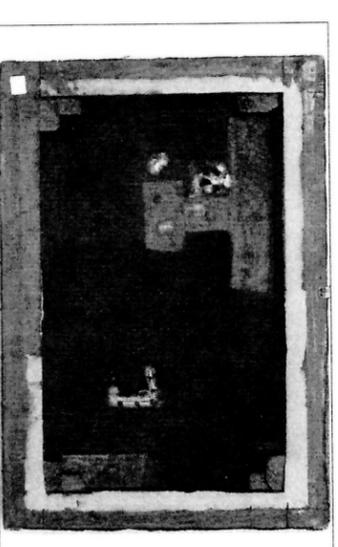


Fig. 9. Retro del dipinto utilizzato per i test. Si evidenziano i trattamenti localizzati di fermatura eseguiti con CCD.

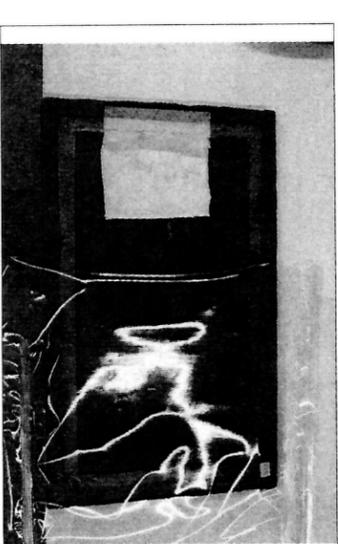


Fig. 10. Il dipinto con la riserva di CCD spray su TNT durante la fase di sigillatura nel sacco ermetico.

## Studio comparato nel comportamento di modelli-finiti sottoposti a diversi trattamenti di impregnazione in condizione di variazioni ambientali

Alberto Finoczi<sup>1</sup>, Roberto Bestetti<sup>2</sup>, Francesco Ricci<sup>3</sup> e Roberta Giorio<sup>3</sup>, Maria Romano e Tullia Marjenti<sup>4</sup>, Cristina Sbrinino<sup>5</sup>, M.F. Mecklenburg<sup>6</sup>, Chiara Lodi<sup>7</sup>, CRP Technology<sup>8</sup>

L'obiettivo della ricerca è quello di fornire indicazioni sulle differenze di comportamento, al variare dell'umidità relativa, di modelli di dipinto volti a riproporre la stratificazione delle opere su tela del XVII sec. a preparazione rossa di area veneta, sottoposti a diversi trattamenti di consolidamento. Questi ultimi sono stati effettuati con i materiali e le diluizioni maggiormente utilizzate nel campo della conservazione.

### La costruzione di modelli per l'indagine sul comportamento del sistema dipinto

L'oggetto della prima parte di questo complesso lavoro è incentrato sulle modalità di costruzione dei modelli di dipinto che, come verrà illustrato in seguito, sono stati utilizzati per lo studio dei fenomeni fisici in relazione a diversi trattamenti di consolidamento. Non si può però limitare l'esposizione alla sola documentazione tecnica relativa alla costruzione di modelli in quanto riteniamo che l'applicazione del *metodo* di lavoro rappresenti la vera parte innovativa, a prescindere dallo scopo e dai risultati della ricerca effettuata.

Questo lavoro di ricerca è partito dalla constatazione, nata all'interno del CESMAR7 in sede di preparazione della precedente edizione del Congresso *Color e Conservazione*, del fatto che fosse necessario sviluppare dei percorsi di ricerca attraverso modelli per lo studio delle problematiche di consolidamento dei dipinti su tela. Questo perché è difficilmente possibile usare dipinti reali fin dalle prime fasi delle sperimentazioni per effettuare test e prove distruttive. Inoltre attraverso dei modelli è possibile o almeno teoricamente più semplice confrontare i risultati di differenti trattamenti condotti su modelli di dipinto costruiti esattamente nello stesso modo, permettendo un agevole confronto tra di essi, cosa non realizzabile nel caso di dipinti reali a causa delle ovvie differenze tra un dipinto e l'altro e tra le diverse campiture cromatiche all'interno di uno stesso dipinto. In merito a questo il dibattito si è orientato su due posizioni, perfettamente corrette dal punto di vista relativo di ognuna di esse e pertanto da considerarsi due aspetti complementari del problema piuttosto che due posizioni contrapposte: la prima è una tendenza volta verso la realizzazione di modelli che riproducano il

- 1 Restauratore, coordinatore del gruppo di studio e presidente del CESMAR7;
- 2 Restauratore e project manager CESMAR7, Gallarate (VA);
- 3 Consulenza e diagnostica per i beni culturali, Vicenza;
- 4 Stazione Sperimentale della Seta, Milano;
- 5 Restauratrice e project manager CESMAR7, Padova;
- 6 Smithsonian Museum Conservation Institute, Washington D.C., USA;
- 7 Restauratrice, Modena;
- 8 Modena

degrado delle superfici pittoriche, condotta con materiali anche differenti da quelli presenti nelle opere autentiche. La seconda invece tende alla realizzazione di modelli che riproducano fedelmente la stratigrafia del dipinto, che ovviamente non avrà problemi immediati, se correttamente realizzati, correlati con la necessità di interventi di consolidamento. Questo lavoro sperimentale è in sintonia con la seconda corrente di pensiero: la nostra attenzione si è infatti rivolta verso la ricostruzione fedele di un dipinto antico. Questo nell'intento di studiare le variazioni ai gradienti ambientali di dipinti *senzibili* all'umidità e il variare di questo aspetto in relazione a differenti trattamenti di impregnazione del supporto; oggetto dello studio quindi non sono state la forza o l'efficacia degli adesivi impiegati nel consolidamento, ma quello che può essere considerato uno degli effetti *collaterali* conseguenti all'intervento di impregnazione del supporto, così come in genere viene eseguito nei laboratori di restauro. Per questa ragione si è cercato di costruire dei modelli di dipinto che riproponevano un caso il più possibile analogo ad un caso reale, con tutte le sue caratteristiche quali le dimensioni, le modalità di costruzione e di vincolo al telaio, la tipologia di tela e la successione stratigrafica, in modo tale da poter arrivare ad avere dei risultati il più possibile attendibili e comparabili a quanto avviene in un dipinto originale.

In fase preliminare allo studio si sono prese in considerazione differenti tipologie di manufatti e si sono cercate informazioni bibliografiche sia per quanto riguarda le tecniche esecutive e le indagini conoscitive, sia sulla reperibilità di manufatti originali sui quali fosse possibile ed agevole effettuare delle indagini. La tipologia di manufatti scelta e proposta è quella tipica dei dipinti del '6-'700 dell'area Veneta a preparazione rossa, che spesso presentano problematiche di consolidamento. Per realizzare i modelli, in primo luogo si sono osservati dei casi reali di dipinti antichi effettuando campionamenti, stratigrafie, misurazioni ed analisi che verranno illustrate in seguito.

Parallelamente si sono cercate informazioni relative alle preparazioni rosse nella letteratura storico-artistica con particolare riscontro nel trattato di T.T. De Mayerne<sup>1</sup> e nel *Modo da tener nel dipinger* di G. B. Volpato<sup>2</sup>. Pur tenendo presente anche altre fonti, la nostra attenzione si è concentrata su quest'ultimo che, per epoca e per area geografica di appartenenza, mostrava avere maggiore attinenza con la tipologia di dipinto di cui ci stavamo preparando a costruire i modelli. Lo studio di tali trattati ha portato ad un'ulteriore sperimentazione, dovuta alla difficoltà di interpretazione degli scritti, per capire come e con quali materiali venivano condotti i diversi passaggi della costruzione dei diversi strati, e per confrontare scientificamente la stratificazione, gli spessori delle stesure e i materiali del campione ottenuto con quelli di veri dipinti presi come esempio. Seguendo questi principi (osservazione di casi reali e studio del trattato) si sono quindi costruiti i modelli necessari.

### La costruzione dei modelli

Nell'esecuzione dei modelli si è calcolato in precedenza il peso dei vari materiali e per ognuno degli strati componenti il dipinto si è utilizzato sempre lo stesso quantitativo di materiale, in modo da rendere i modelli il più possibile simili fra loro. Non si sono volontariamente adottate metodologie di preparazione dissimili da quelle impiegate in passato per evitare di ottenere risultati diversi da quanto avviene sui dipinti reali.

**Telaio:** è stata costruita una serie di telai fissi in legno di abete della dimensione di 75 x 100 cm, misura media riscontrabile nei dipinti in esame.

**Supporto tela:** Il primo problema che si è affrontato nella riproposizione di un dipinto antico è stato relativo alla tela, in quanto il confronto tra il supporto dei manufatti reali e le tele di lino in commercio ha evidenziato un'estrema diversità nell'ammatura.

Questo è dovuto al fatto che le tele in lino oggi prodotte per il restauro, vengono tessute "quadrate" cioè con lo stesso numero di fili in trama ed in ordito per sviluppare la stessa forza dinamometrica nelle due direzioni, mentre le tele per dipingere avevano un diverso numero di fili in trama ed in ordito al fine di renderle più piate. Volpato a proposito delle tele dice: "che le tele siano buone, forti, lisce ben lavorate e che con poca materia restino impresse....." ed ancora: "le telle lisce poca materia le imprime che come vè troppa materia annisce il colori...." Dall'osservazione di tre dipinti del '700 veneto si è notato come la trama del tessuto fosse sempre disposta in senso verticale, e

che il numero di fili di trama fosse diverso da quello di ordito. Entrambi questi fattori sicuramente influenzano il comportamento fisico-meccanico dei supporti.

La tela di lino utilizzata, gentilmente prodotta appositamente per l'occasione dalla Tessitura Enrico Sironi di Gallarate, è caratterizzata da una densità di circa 10 fili di trama x 13 di ordito al cmq, ed è stata tensionata sui telai con la trama in senso verticale. Per tagliare e tensionare le tele allo stesso modo si sono contati il numero di fili corrispondenti alla larghezza della tela (da spigolo a spigolo del telaio) e si è mantenuto lo stesso numero di fili per ogni modello.

A questo punto sono seguite una serie di sperimentazioni atte a ricomporre le ricette delle stesure stratigrafiche ed a renderle praticabili, cosa resa a volte complessa dall'imprecisa lettura delle unità di misura impiegate e dalla differente qualità dei materiali.

Appretto: In merito allo strato di colla di appretto il Volpato scrive: "...quando la tela non ha la cola che la difende dall'olio, non può conservare la sua fermezza, che l'olio di si secca in modo che viene come la correccia d'arbore, che volendosi maneggiare giù dal telaio si taglia e si rompe.....". Più avanti dice: "la cola di farina è pessima perché come è un poco galiarda crepa il colore e si scorza, e se pur è poca, al umido macisce le tele e li topi le mangiano.....è perché la cola di farina ottura i buchi delle tele che si servono di questa".

Ed ancora a proposito di preparazioni: "...con il gesso si gioca di fortuna.... il che dipende dalla qualità della cola o troppo forte o troppo dolce, ma la meglio è la dolce che la forte sciupa assolutamente....quelle che hanno poco gesso si conservano e quelle che ne ha troppo si scorzano".

Venendo al dunque: "...Ma per levar queste difficoltà, io adopro cola semplice come ti ho detto, che data doi volte appomiciando ogni volta dopo asciua acciò la tela venga liscia. Il dò poi la primitura mecinata con olio di lino". Sulla qualità di colla impiegata Volpato cita tre tipi di colla: quella di *retagli di nominate o marchette* che considera più adatta delle altre *solle di bargantina*, che essendo "...forte e crude fa certe ritamente nelle tele che fa cattivo effetto". Vista l'irreperibilità della colla di *Marchette* o *Nominate* (termini dei quali non siamo arrivati ad una corretta interpretazione) descritte, si è appretata la tela con colla lapin ("...cola...che non si troppo dolce ne troppo forte, la troppo dolce non difende la tela dall'olio, e la troppo forte fa crepar il colore, e la buona sarà tenera come gelo quando è ratfredata"); la funzione di questo strato oltre a "chiudere la trama della tela rendendola più adatta a ricevere gli strati successivi aveva anche l'importante funzione di impedire o comunque di limitare che l'olio migrasse eccessivamente nella tela causandone degrado e il conseguente infragilimento, aspetto quest'ultimo perfettamente conosciuto dall'autore. Una volta asciutta la prima mano di appretto, si sono leggermente ritensionate le tele che si erano allentate (sempre facendo ricombaciare il dritto filo con gli spigoli del telaio, in modo che fossero tutte tensionate allo stesso modo).

Strati preparatori: seguendo le indicazioni del testo di Volpato gli strati preparatori sono stati stesi con una lama di legno (Fig. 1) costruita riproducendo alcuni coltelli per imprimere le tele conservati presso l'Accademia di Bella Arti di Verona, simili nella forma e nella funzione ad un coltello per imprimiture riportato nel già citato testo di T.T. De Mayerne.

La preparazione è stata eseguita con due strati di preparazione "*rossa*": il primo costituito da argilla rossa, (per praticità è stato impiegato bolo rosso in polvere, materiale che si può assimilare alla "*terra da boati*") (purtroppo l'argilla rossa per vasi oggi è venduta già addizionata di cariche quindi inutilizzabile al nostro scopo), acqua e olio di lino; il secondo da bolo rosso in polvere, terra d'ombra naturale e olio di lino. Il primo strato con la funzione di chiudere la tessitura e il secondo, più sottile, di migliorare la superficie del primo regolando la porosità della preparazione. Si fa notare come il primo strato contenga acqua ed olio: si suppone che l'acqua evaporando lasci delle porosità nello strato lasciando il supporto assorbente, il che risponde alla regola generale della pittura che vuole *grassa su magra*, in modo che gli strati precedenti assorbano un po' del legante degli strati applicati successivamente creando una maggiore coesione tra di essi.

Strati pittorici: per gli strati cromatici ci si è orientati per una duplice stesura, concepita come l'astrazione di un paesaggio composto da cielo e terra, nel quale il cielo è composto da biacca la parte del terreno da terra d'ombra naturale impastati fino alla fluidità necessaria alla stesura con olio di lino crudo.

Si è notato che la biacca pur essendo notoriamente un pigmento a base di piombo quindi un forte seccativo, ha richiesto quasi 30 giorni per essere secco al tatto mentre lo strato di terra d'ombra lo era in poche ore. Questo aspetto sicuramente merita una maggiore indagine; l'ipotesi, ancora da verificare, che si è fatta in proposito, è che si sia utilizzato un pigmento troppo puro, composto in massima parte da carbonato basico di piombo, con la totale assenza della fase intermedia acetato di piombo, noto seccativo per colori, oppure che possiamo aver ecceduto nella quantità di legante usato con il bianco di piombo, come dimostrerebbe una consistente migrazione di olio verso il bordo non preparato della tela.

**Verniciatura:** Dopo aver lasciato asciugare per diversi mesi gli strati pittorici è stata eseguita la verniciatura finale. Il testo di Volpato descrive solo brevemente quest'operazione rimandando alle fonti scritte di Rafael Borghini e Arminio da Faenza. Le vernici selezionate tra le varie possibilità riportate dagli autori citati è stata una vernice a spirito, ottenuta da sandracca e colofonia in alcool.

#### *Tattamento di consolidamento dal retro*

**Impregnazioni:** I supporti dei modelli sono stati in seguito impregnati con differenti adesivi, scelti tra quelli maggiormente utilizzati in Italia con le diluizioni più utilizzate; il grado di questa operazione è stato dettato da una valutazione della capacità di assorbimento dei materiali, come comunemente avviene nella fase consolidante reale. Uno dei modelli è stato lasciato non trattato per effettuare le comparazioni. Prima di tutto si sono trasformate le ricette di laboratorio, spesso poco scientifiche, in proporzioni corrette che tenessero conto della quantità effettiva di materiale disciolto in percentuale P/V rispetto al solvente. Si è anche misurato il quantitativo impiegato attraverso pesate del consolidante in contenitore prima e dopo averlo applicato sui modelli in modo da avere la quantità dell'adesivo applicato su ogni modello.

Un altro modello ancora era stato preparato per essere foderato a pasta con tecnica romana, in quanto spesso l'intervento di foderatura è utilizzato per migliorare la robustezza del dipinto e magari in seconda istanza rispetto all'intervento su supporto agisce anche con un'azione di consolidamento del colore; al momento però non è stato possibile inserirlo nella sperimentazione.

### **Analisi e studio stratigrafico comparato di preparazioni pittoriche di opere su tela del XVII sec. a preparazione rossa di area veneta**

Al fine di realizzare un modello di dipinto con caratteristiche chimico-fisiche simili alle opere su tela del XVII sec. di area veneta a preparazione rossa, sono state eseguite delle indagini stratigrafiche su opere venete di autori noti ed ignoti riferibili a tale periodo. In particolare è stato fatto riferimento a tre opere datate XVII secolo, rinvenute in area veneta, caratterizzate dalla presenza di strati preparatori di colore rosso.

TRATTAMENTO DI CONSOLIDAMENTO DEI MODELLI DI DIPINTI			
Adesivo	Percentuale solido effettiva	Solido/Solvente	Quantità utilizzata per l'impregnazione di ogni modello
Applicazione a pennello dal retro delle seguenti soluzioni:			
Colla di peili 1:15	6,5%	13gr \ 200 ml di acqua	135 ml
Aquazol	10%	22gr \ 200 ml acetone	175 ml
Paraloid B-72	10%	22 gr \ 200 ml Acetone	195 ml
Beva-371	8%	40 gr \ 160 ml Diluente 372 (a caldo)	175 ml
Plexisol P-550	8,6%	20gr \ White Spirit D-40 + 10% silene (a freddo)	135 ml

Tabella 1.

Si riportano di seguito i titoli delle opere analizzate:

*Ritorno del Figliol Prodigo;*

*Ratto di Elena;*

*Madonna Lettrice;*

Con la premessa che si tratta in tutti i casi di dipinti realizzati con tecnica ad olio siccativo (i leganti sono stati individuati tramite analisi MicroFTIR), si riportano di seguito alcune caratteristiche di tipo stratigrafico e chimico fisico ritenute salienti al fine di realizzare un modello simile e rappresentativo.

#### **Stratigrafia**

In due dei tre quadri presi come riferimento si è rinvenuta una preparazione pittorica in 2 strati di tonalità rossa, più o meno scura, con uno spessore complessivo pari a circa 260-300µm. Nel terzo quadro (Madonna Lettrice) la preparazione rinvenuta è costituita da una sola stesura rossa; essa presenta, quindi, uno spessore pari circa alla metà dei precedenti casi. Si sottolinea, tuttavia, come quest'ultimo campione sia stato prelevato da una zona marginale della tela e come la pellicola pittorica possa aver subito dei rimaneggiamenti.

#### **Analisi chimica delle stesure**

L'analisi chimica dei componenti inorganici degli strati preparatori è stata eseguita tramite analisi al microscopio elettronico correlato da microanalisi chimica (SEM-EDS). Il grafico riportato (Fig. 2) è rappresentativo della composizione degli strati di preparazione analizzati. L'analisi dei dati rivela la presenza di ferro accompagnato da elevati tenori in silicio e alluminio tipici della presenza di minerali argillosi tipo caolino. Tale fatto porta, quindi, ad ipotizzare l'utilizzo di bolo rosso per la realizzazione degli strati. Si noti anche la presenza di manganese che testimonia l'utilizzo nella miscela di terra d'ombra. In alcuni casi sono stati riscontrati anche granuli neri carboniosi, tipo nero di carbone.

Si sono inoltre riconosciuti anche i pigmenti delle pellicole pittoriche; i pigmenti individuati sono la biacca, la terra d'ombra, il nero d'ossa, l'ocra rossa e la lacca rossa.

Su queste basi e da indicazioni bibliografiche, ricordiamo che, al fine di costruire un modello attinente alle opere storiche, è stata realizzata la seguente successione di strati:

1. tela con appetto;
2. due strati di preparazione a base bolo e bolo con terra d'ombra;
3. pellicola pittorica con due campiture non sovrapposte (in un caso biacca, in un altro terra d'ombra);
4. chiusura con vernice terpenica (sandracca e colofonia).

La verifica stratigrafica ha effettivamente dimostrato come, con una doppia stesura di bolo e terra d'ombra, riproducano, sia a livello stratigrafico (spessore complessivo rilevato pari a circa 300µm) sia a livello chimico, le stratigrafie originali e quindi come il modello realizzato possa essere ritenuto valido per i dipinti a preparazione rossa doppio strato (Fig. 3-4).

#### **Considerazioni**

Dato che i modelli dei dipinti sono stati realizzati al fine di registrare risposte in seguito a stress termomeccanici, sembrerebbe opportuno chiedersi quali dei componenti, tra quelli costituenti le pellicole pittoriche ed in particolare le preparazioni, siano i più "sensibili" alle variazioni delle condizioni ambientali di contorno.

Premesso che una parte importante delle deformazioni è certamente da attribuire al legante (è noto che l'olio "nasce" idrofobo ma diventa via via più affine all'acqua con l'invecchiamento), a parità di legante e spessore degli strati sarebbe interessante verificare quali siano le deformazioni attribuibili ai pigmenti e quali siano le possibili differenze di comportamento tra un pigmento e l'altro.

A questo proposito si sottolinea una forte affinità tra i pigmenti utilizzati nelle preparazioni (prevalentemente bolo, terra e ocra gialla e rossa, terra d'ombra) sia dal punto

di vista fisico (peso specifico simile, variabile tra 3 e 3,5, per tutte le terre ed ocre con conseguenti simili gradi di assorbimento d'olio) che chimico – mineralogico. Tali materiali sono infatti costituiti da un insieme di elementi scarsamente sensibili all'umidità (come ossidi di ferro, ossido di manganese, silice), che poi sono quelli che caratterizzano le diverse tonalità, ed altri molto sensibili (caolino ed in genere minerali delle argille), quest'ultimi presenti indifferentemente su tutti i pigmenti citati. Su questi presupposti risulterebbe interessante ed utile poter allargare i risultati ottenuti dalle sperimentazioni effettuate sui modelli con preparazione rossa anche agli altri casi in cui le preparazioni, sia pur di aspetto diverso, siano comunque riconducibili prevalentemente a terre ed ocre. Si potrebbe ad esempio verificare sperimentalmente se vi sono differenze di comportamento tra una preparazione di colore giallo ed una di colore rosso.

### Caratterizzazione dei modelli prima e dopo invecchiamento artificiale

La seguente ricerca, svolta all'interno dei laboratori della Stazione Sperimentale della Seta di Milano, ha effettuato la caratterizzazione morfologica, spettrofotometrica e fisico-mecanica sia dei materiali costituiti che dei modelli finiti.

Questi ultimi sono stati successivamente sottoposti ad un trattamento di invecchiamento artificiale, che ha simulato un invecchiamento reale di 8 e 16 anni, e ugualmente caratterizzati. L'esame morfologico è stato condotto principalmente con il Microscopio Elettronico a Scansione (SEM) e con lo Stereomicroscopio, mentre l'analisi spettrofotometrica è stata eseguita con Spettrofotometro FT-ATR.

L'aggiunta dell'appretto (Fig. 5) sulla tela di lino, non ha comportato significative variazioni delle fibre almeno a livello morfologico. Solo ad alti ingrandimenti si è potuta apprezzare la presenza di una spalmatura superficiale che si è rivelata appunto attribuibile a sostanze apprettanti di natura proteica (colle animali).

Il primo strato di preparazione appare ben visibile in superficie, caratterizzato da una certa porosità, riscontrabile anche in sezione (Fig. 6) dove si notano sia le fibre della tela che lo strato di preparazione. La composizione di questo strato è risultata riconducibile a olio di lino e pigmenti inorganici. Osservando il retro del campione (Fig. 7) è interessante notare la penetrazione dello strato preparativo tra le maglie della tela.

L'aggiunta del secondo strato di preparazione rende la superficie del modello liscia ed omogenea e in sezione (Fig. 8) è ancora possibile apprezzare la separazione dei due strati preparativi rispetto alle fibre della tela mentre, sul retro del tessuto (Fig. 9), la penetrazione degli strati di preparazione, o almeno del primo, appare accentuata.

Il passo successivo con la presenza delle stesure pittoriche, terra d'ombra naturale in un caso e bianco di piombo (biacca) nell'altro, mostra una differenza, già a livello morfologico, particolarmente evidente sul retro della tela. Infatti le fibre, nella zona trattata con biacca, sono molto più incollate fra di loro che nel caso della zona trattata con terra d'ombra. Questo potrebbe indicare una maggior penetrazione dei costituenti o di uno dei costituenti della stesura pittorica bianca.

Dopo l'aggiunta della vernice, le superfici delle due stesure pittoriche appaiono simili e la pennellata è densa, omogenea e apparentemente liscia. Ad una osservazione più attenta, eseguita al Microscopio Elettronico, la stesura pittorica della zona bianca (Fig. 10) mostra però spaccature e distacchi dalla zona sottostante, indice di rigidità e fragilità. Questo non accade alla stesura pittorica della zona marrone (Fig. 11) che evidentemente è caratterizzata da una maggior elasticità.

A questo punto si è voluto simulare una degradazione naturale sul modello finito, optando per una delle tecniche attualmente proposte di invecchiamento artificiale. Questo al fine di valutare sia gli effetti di alcuni agenti degradanti, sia dei metodi di conservazione/restauro adottati per contrastarli, in particolare l'attenzione sarà volta al comportamento della tela, originaria e invecchiata, consolidata o meno, al variare

dell'umidità relativa e valutare se il trattamento effettuato è stato dannoso, utile o indifferente ai fini della conservazione.

Si tenga presente che la degradazione di tutti i materiali e quindi anche delle fibre naturali come nel nostro caso, sono il risultato di numerosi e non prevedibili fattori che hanno inizio con le prime fasi di lavorazione per continuare con i vari stadi del loro ciclo di vita, soprattutto utilizzo e collocazione, in cui le fibre sono sottoposte alle più svariate sollecitazioni: termiche, meccaniche, chimiche, ambientali e biologiche, che provocano significative modificazioni nella struttura delle macromolecole di base costituenti la fibra con conseguente diminuzione delle proprietà fisiche.

Nel caso poi di una tela dipinta, al comportamento, durante l'invecchiamento, delle fibre, di cui è composta la tela, va aggiunto quello di tutte le sostanze che compungono i vari strati preparativi e le stesure pittoriche e la loro interazione. Ecco perché in questo studio ci siamo limitati a considerare come fattori di degrado, il calore e l'umidità, meglio controllabili e modificabili in laboratorio.

Perciò il modello è stato sottoposto ad un trattamento di invecchiamento artificiale ad umido condotto in stufa, a circolazione ventilata, secondo la norma SNV 98890. La temperatura, all'interno della stufa, è di  $70^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e il processo è a base di una soluzione di carbonato di potassio saturata che induce una umidità relativa all'interno dello spazio di prova del  $50\% \pm 4\%$  e un contenuto di umidità del materiale, sottoposto ai test, attorno a valori prossimi a quelli in clima normale a  $20^{\circ}\text{C}$  e U.R. 65%.

Da prove effettuate si può ritenere che, un invecchiamento ad umido così condotto, produce delle variazioni in 5 giorni che simulano un invecchiamento reale di 1 anno. Si deve però considerare che un tale procedimento è stato comunque restato e normalizzato su tessuti in tutte le fasi di lavorazione e non su tele dipinte.

Il fenomeno può essere spiegato considerando che l'invecchiamento fisico di un polimero, conservato ad una temperatura inferiore a quella di transizione vetrosa, si verifica per un riordinamento delle macromolecole delle fase amorfa. A questo processo consegue una riduzione del volume libero, dell'entalpia e della mobilità molecolare, fino al raggiungimento di uno stato di equilibrio. A seguito di ciò il materiale diviene più duro, più denso più rigido e più fragile.

Nel caso delle fibre naturali la temperatura di transizione vetrosa è notevolmente superiore a quella dell'ambiente, per cui il fenomeno avviene, ma molto lentamente a causa di una mobilità segmentale ridotta. Durante l'invecchiamento artificiale da noi condotto, la mobilità molecolare è favorita, accelerando il raggiungimento di uno stato termodinamico più vicino a quello di equilibrio.

L'invecchiamento artificiale, da noi condotto, ha simulato circa 8 e 16 anni di invecchiamento reale e il suo effetto è chiaro già visivamente.

Dalle foto in digitale (Fig. 12) si può notare infatti che la zona con la terra d'ombra perde in parte la sua lucidità e la stesura non è più così omogenea, diventando opaca e rugosa.

La zona con il bianco di piombo (Fig. 13) mostra invece un evidente ingiallimento, causa forse della migrazione dell'olio di lino, e un accentuarsi delle spaccature superficiali, indice di una aumentata rigidità che provoca un ulteriore distacco della stesura pittorica.

Il fenomeno è ben visibile nella sezione (Fig. 14) eseguita con il Microscopio Elettronico a Scansione, sulla quale è stata condotta l'indagine composizionale (EDX) dello strato più esterno che ha accertato appunto la presenza di piombo (Fig. 15), confermando anche dall'indagine spettrofotometrica condotta con Spettrofotometro FT-ATR.

Per quanto riguarda l'ingiallimento, già visibile a occhio nudo, ne è stato misurato l'indice che è risultato quasi triplicato dopo l'invecchiamento, passando da 20,88 a 59,56. Particolare attenzione (Fig. 16) va posta anche a ciò che è successo al retro del campione: in entrambe le zone pittoriche si è potuto notare che dopo l'invecchiamento si è verificata un'ulteriore penetrazione degli strati preparativi, che appaiono come rigonfiati.

La caratterizzazione dei modelli finiti, prima e dopo invecchiamento artificiale, è stata anche condotta eseguendo prove di trazione sulle zone con le due differenti stesure pittoriche.

Prendendo in considerazione le figure 17-18, in cui sono riportati i valori ottenuti sottoponendo i provini ad una forza di carico costante fino a rottura, si può notare che la forza e l'allungamento, diminuiscono sensibilmente dopo l'invecchiamento. Questo è indice di una maggior rigidità e fragilità dei materiali con conseguente minor resistenza alle sollecitazioni fisico meccaniche.

D'altro canto però il distendersi delle catene macromolecolari comporta anche un aumento dei tempi di rilassamento viscoelastici, che potrebbero spiegare il fenomeno per cui sia la trama che l'ordito mostrano un iniziale aumento di elasticità che causa il cedimento degli strati pittorici superiori, la cui maggiore rigidità non è sostenuta dalla tela sottostante.

Il caso più evidente, come si è visto anche dalla caratterizzazione morfologica dei modelli, è quello della zona trattata con la biacca (Fig. 19).

Si ringraziano la Dott.ssa Maria Rosaria Massafa e la Sig.ra Silvia Beretta della Stazione Sperimentale per la Seta per i test fisico-meccanici e l'analisi spettrofotometrica.

## Il Test Forza/Larghezza-Deformazione sui modelli di dipinto

Sono stati effettuati inoltre i test forza/larghezza-deformazione sui modelli di dipinto prima e dopo l'invecchiamento artificiale senza però arrivare alla rottura dei campioni, a differenza di quelli appena descritti. I test sono stati infatti condotti arrivando ad una deformazione del 3% circa: questo non era il punto di rottura dei campioni, ma un valore di deformazione sufficiente per essere ben al di là dei valori di deformazione di rottura della maggior parte degli strati pittorici ben asciutti.

I test sono stati condotti presso il Laboratorio di Meccanica dello Smithsonian Museum Conservation Institute, Washington D. C., con l'assistenza del Prof. Marion F. Mecklenburg.

Si è data particolare attenzione allo studio del comportamento del dipinto nel momento della sua genesi e formazione. I test sono stati infatti effettuati su ogni fase della costruzione del dipinto: dapprima si è studiato il comportamento del solo supporto tela nelle due direzioni di trama e ordito; in seguito i test sono stati condotti sulla tela con l'aggiunta dello strato di appretto, poi sulla tela trattata con colla e il primo strato di preparazione, e così via fino ad arrivare al dipinto completo di tutti gli elementi che lo compongono. In questo modo si è potuto valutare come l'apporto di ogni strato influisse sulle proprietà comportamentali del dipinto.

I modelli su cui si è lavorato erano stati preparati seguendo le stesse linee guida illustrate precedentemente, in modo che risultassero tutti identici in materiali, percentuali, quantità di prodotto per cm<sup>2</sup> etc. Il fatto che si tratti di campioni prodotti artigianalmente comporta ovviamente, nonostante la cura e l'attenzione posti nel lavorare nel modo più preciso e uniforme possibile, la possibilità di differenze piccole o grandi tra i vari modelli e all'interno di uno stesso campione.

La strumentazione utilizzata è illustrata in figura 20: ogni campione (delle strisciole di circa 1 cm di larghezza e 12 di lunghezza) veniva posizionato nel tensiometro bloccandolo alle estremità tramite dei morsetti; ruotando la manopola di un valore costante ogni 30 secondi si assicurava un uniforme tasso di applicazione di trazione. Il carico applicato veniva misurato e registrato. Era possibile anche misurare la deformazione applicata al campione.

Al posto dello "stress" è stata utilizzata la "forza per larghezza" perché non è pratico determinare le reali aree di sezione di campioni di un tessuto. I test sono stati effettuati in condizioni ambientali di equilibrio con una temperatura (T) ed un'umidità relativa (U.R.) rispettivamente intorno ai 23°C ed al 50% e per entrambe le direzioni del tessuto, trama ed ordito.

Osservando il primo grafico (Fig. 21) si vede la forza sviluppata dalla sola tela e dalla tela con strato di colla in direzione trama; si nota come l'aggiunta dello strato di colla alla tela ne aumenti molto la forza e rigidità; questo è stato confermato anche per il modello in direzione ordito.

La figura 22 mostra i risultati dei test relativi a tutte le fasi di costruzione dei modelli (sempre nella direzione della trama); quello che risulta evidente è che l'applicazione degli strati di preparazione e di colore non sembrano modificare molto la rigidità e la forza dell'insieme rispetto alla tela col solo strato di colla. L'influenza scarsa di questi elementi è probabilmente imputabile anche alla loro relativa freschezza al momento dell'asciugatura dei test (avvenuta a 2 mesi circa dall'applicazione dei materiali).

Si può dire quindi che, tra i vari strati costituenti i modelli, quello di colla sia quello che maggiormente ne influenza il comportamento, nonostante nel caso specifico la sua concentrazione non fosse molto elevata.

Le figure 23 e 24 mostrano il confronto tra le direzioni di trama ed ordito per i campioni con tela ed il solo strato di appretto (Fig. 23) e quelli composti da tutti gli strati (Fig. 24), sia con pellicola pittorica a biacca che a terra d'ombra.

Sia che si consideri la fase di costruzione intermedia dei modelli (tela a cui è applicata solo la colla), che i modelli completi di tutti gli strati pittorici, l'elemento da sottolineare è la profonda differenza di comportamento tra le due direzioni: a parità di deformazione il modello in direzione trama sviluppa molta più forza del modello in ordito. Quest'ultimo è notevolmente più elastico rispetto al campione in trama, più rigido. Un significato che si può attribuire a questo è che tra le due direzioni del tessuto sia la trama a sostenere il dipinto.

Le figure 25 e 26 mostrano i risultati dei test condotti sui modelli completi (con pellicola pittorica a terra d'ombra) prima e dopo l'invecchiamento accelerato (della durata di 80 giorni, con le modalità precedentemente descritte) cui sono stati sottoposti.

Anche in seguito all'invecchiamento si nota come la trama continui ad essere più rigida e forte dell'ordito, che invece sembra proprio cedere oltre valori di deformazione intorno al 0,5%. In genere questo trattamento d'invecchiamento accelerato tende a diminuire notevolmente, in entrambe le direzioni, la forza sviluppata dai modelli, a parità di deformazione.

## Risultati preliminari dei test di "deformazione da libero movimento" in relazione ai cambiamenti di U.R. di modelli consolidati con Beva 371

Questa ricerca è stata condotta presso il Laboratorio di Meccanica dello Smithsonian Museum Conservation Institute, Washington D.C. dal Prof. Marion F. Mecklenburg che gentilmente ha continuato il lavoro sui campioni descritti precedentemente (test forza/larghezza-deformazione delle fasi di costruzione e dopo l'invecchiamento accelerato dei modelli), e riguarda lo studio delle variazioni dimensionali in relazione ai cambiamenti di U.R. dei modelli trattati con un adesivo per il consolidamento dei dipinti.

I campioni invecchiati artificialmente con le modalità precedentemente descritte, sono stati impregnati dal retro con una soluzione consolidante di Beva 371 all'8% in Nafta.

Il test è stato condotto dopo 80 giorni dall'applicazione del consolidante; le misurazioni sono state effettuate all'interno di un box con controllo dei parametri ambientali. La temperatura alla quale si è operato era di circa 23°C e l'umidità relativa veniva fatta variare in valori dell'ordine del 5-10% circa per volta. Si è lavorato sempre in condizioni di equilibrio, lasciando che il campione si acclimatasse ai nuovi parametri per 24 ore circa. Il campione, una strisciolina di circa 1 cm di ampiezza e 12 di lunghezza, è stato sottoposto ad un ciclo di variazioni di U.R.: si è partiti da alta U.R. (74% circa), per andare verso valori molto bassi (15-20%) e poi tornare a livelli elevati (70% circa), monitorandone il suo cambiamento dimensionale. È importante inoltre considerare che nel test i campioni subivano le variazioni di umidità relativa in fase libera (erano quindi liberi di contrarsi e dilatarsi) e la loro variazione dimensionale veniva calcolata con il campione in leggera tensione. Questo tipo di test aiuta a comprendere quale sia il comportamento potenziale dei materiali quando non vincolati al telaio in presenza di variazioni di parametri ambientali, e ad ipotizzare dunque le forze in gioco a seconda del trattamento di impregnazione.

Il test è stato eseguito per entrambe le direzioni del tessuto, e sia per il modello con pellicola pittorica costruita da biacca che per quello con terra d'ombra naturale.

Nei grafici relativi, che illustrano la deformazione percentuale dei campioni durante un ciclo di variazioni di U.R., si noterà che i valori della deformazione sono di segno negativo: questo sta ad indicare che la lunghezza del campione considerato è diminuita, e quindi si parla di contrazione, dato che il ciclo di variazioni di U.R. è partito con la fase di essiccamento.

In tutte le figure qui illustrate l'andamento delle curve è quello segnato dalle frecce nella prima figura della serie.

I grafici in figura 27 e 28 illustrano i risultati dei test sui modelli (pellicola pittorica a biacca e terra d'ombra naturale) non trattati, in entrambe le direzioni. Si nota che tutti i campioni si contraggono in modo piuttosto lineare in relazione alla diminuzione dell'umidità relativa e che, per tutti, il punto di contrazione massima corrisponde al valore più basso di U.R. (in un caso il 14% e nell'altro il 18%). Per tutti i modelli si ha, in seguito alla fase di contrazione, una fase di rigonfiamento (o, più precisamente, un aumento di lunghezza) all'aumentare dell'U.R. ambientale.

Se si segue il tracciato della linea si vede che nella fase di "ritorno" non ripercorre lo stesso percorso dell' "andata", ma se ne discosta in modo più o meno importante. C'è quindi un cambiamento nella risposta dimensionale dei modelli: questo significa che le condizioni indotte ne hanno mutato un po' il comportamento.

Osservando questi grafici si nota come il campione con terra d'ombra sia più reattivo alle variazioni di U.R. rispetto al campione con biacca, specialmente in ordito (nel punto di massimo essiccamento la terra d'ombra in ordito si contrae dello 0,2% in più).

In trama invece questa differenza è più contenuta (0,1% circa). È interessante anche osservare il comportamento di trama ed ordito rispetto alle variazioni di U.R.: per il solo campione con pellicola pittorica a terra d'ombra vediamo che nei range di U.R. tra il 74 e il 39 % e tra il 46 e il 64% le due direzioni hanno lo stesso comportamento. In un dipinto vincolato al telaio avremo quindi che in questi intervalli di U.R. non ci saranno differenze di tensioni tra le due direzioni.

Un altro elemento subito visibile dall'osservazione dei tracciati è che le trame, in fase di essiccamento, si ritirano maggiormente rispetto agli orditi; questo dato, che lascerebbe inizialmente sorpresi, è in realtà spiegabile proprio con le caratteristiche di maggior tenacia e rigidità che solitamente si attribuiscono a questa direzione del tessuto: se vincolato, all'abbassarsi dell'U.R. un tessuto esprimerà più forza in trama rispetto all'ordito, proprio perché più rigida e meno elastica, e questa tenderà a restringersi maggiormente. Dunque, considerando che i campioni nel test erano non trattati e "liberi di muoversi" risulta logico che in fase di essiccamento sia stata la trama a subire le contrazioni maggiori.

Se si guardano le curve di comparazione (figg. 29-32) della reazione dimensionale alle variazioni di umidità relativa dei campioni senza trattamenti e quelli con impregnazione dal retto a Beva 371, si nota come per quasi tutti i campioni si abbia una riduzione della reattività dei materiali quando consolidati con questo adesivo.

L'andamento della curva del campione con pellicola pittorica a biacca trattato (figg. 31 e 32), si discosta già dall'inizio da quello del modello non impregnato: al 58,6% di U.R. il campione si contrae infatti dello 0,2% in meno in trama e dello 0,06% in ordito.

In genere si può dire, osservando queste curve, che il campione risulta meno reattivo alle variazioni di U.R.

Nei campioni con pellicola pittorica a terra d'ombra (figg. 29 e 30) la riduzione della reazione dimensionale ai cambiamenti ambientali, quindi la sua stabilizzazione, è molto inferiore rispetto a quanto si è visto per il modello con biacca: in ordito l'impregnazione a Beva 371 non fa diminuire in alcun modo la reattività del campione, anzi.

Nella direzione della trama inizialmente (nella parte del tracciato che va dal 74 al 54% di umidità) gli andamenti delle curve si sovrappongono: il trattamento con l'adesivo non modifica la risposta dimensionale del campione in questo range di U.R.. Nel resto del tracciato invece, quindi dal 54 al 14% e dal 14 al 64% di U.R., si ha una forte riduzione della reattività del campione: le due curve tornano ad incontrarsi solo al 64% di U.R., mentre nel punto di minima U.R. il modello impregnato si riduce dello 0,16% in meno rispetto a quello non trattato.

Se si osservano le figure 33 e 34, in cui sono messi a confronto i modelli trattati a Beva 371, si nota inoltre che sia per il campione con terra d'ombra che per quello con biacca c'è un range di U.R. all'interno del quale il comportamento tra trama ed ordito è omogeneo: per la terra d'ombra questo va dal 74 al 51% e per la biacca dal 74 al 39% ed in entrambi i campioni sembrerebbe tornare a ripetersi nella fase di ritorno ad alti valori di U.R. (64%/0). Ciò è indice di un comportamento isotropico del tessuto alle variazioni di umidità relativa.

### Conclusioni

Per questioni di tempo non è stato possibile realizzare queste stesse prove anche per gli altri adesivi presi in considerazione nel progetto; è importante inoltre considerare che deve essere ancora verificata la riproducibilità dei risultati.

Quello che si è ritenuto importante nel lavoro, quasi più dei risultati ottenuti, è stato l'approccio metodologico che ha portato a lavorare, anche per queste prove meccaniche, non sui singoli strati costituenti un dipinto, ma sul loro insieme. Tale insieme non era ottenuto dalla somma e sovrapposizione delle curve ottenute per i singoli materiali, ma da un modello completo di dipinto, costruito seguendo un criterio ben preciso precedentemente descritto. Questo ha portato a delle difficoltà nel procedimento e nell'interpretazione dei risultati proprio perché ha messo in gioco molte variabili e parametri che altrimenti non sarebbero stati presi in considerazione.

Resta evidente che nel riportare nella realtà di laboratorio questi risultati ci sono delle difficoltà e delle "barriere" da superare: ad esempio il fatto che il test sia stato eseguito valutando separatamente le due direzioni del tessuto mentre in un dipinto su tela i loro comportamenti si sommano, e che in un dipinto reale è difficile pensare per ovvie ragioni di poter considerare dal punto di vista del comportamento meccanico separatamente e differenzialmente le diverse campiture.

## Il rilievo delle deformazioni dei modelli con la tecnica del Reverse Engineering

L'ultima fase del percorso di ricerca finora descritto riguarda il lavoro di rilevamento delle deformazioni dei dipinti modello sottoposti a variazioni ambientali: a tal fine è stato scelto di avvalersi della tecnologia del Reverse Engineering per l'elevato grado di precisione nella restituzione dei dati che questa può raggiungere. Il lavoro è stato svolto da CRP Technology nella sua sede di Modena.

Con il termine Reverse Engineering (RE) si individua una metodologia che consente di risalire alla descrizione matematica di un modello fisico in un ambiente virtuale tridimensionale. Dalla nuvola di punti, ottenuta da un processo di digitalizzazione a contatto o senza contatto, è possibile matematizzare l'elemento, realizzare una vista 3D (shading, wireframe, punti) o generare un file STL idoneo per una eventuale replica dell'oggetto o per eseguire controlli dimensionali in ambiente CAD 3D.

Per ricostruire la geometria tridimensionale di un oggetto possiamo descrivere un ciclo composto da tre fasi:

1. l'acquisizione mediante scansione ottica di nuvole di punti, cioè di gruppi di punti che descrivono nello spazio tridimensionale le superfici appartenenti all'oggetto da rilevare;
  2. l'ottimizzazione, attraverso un software dedicato, del file contenente le informazioni ottenute: le diverse nuvole di punti, corrispondenti a diverse sessioni di misura, vengono allineate nel medesimo sistema di riferimento, al fine di eliminare i punti "doppi" rilevati più volte durante la scansione
  3. la fase successiva consiste nel generare un modello STL: una descrizione delle superfici dell'oggetto attraverso una mesh tridimensionale triangolarizzata.
- A partire da questo tipo di file è possibile:
- ricavare una analisi virtuale dell'oggetto rilevato in termini di volume, dimensioni così come generare viste e sezioni;

- effettuare confronti tra diversi file dello stesso oggetto ottenuti da rilievi distanti tra loro nel tempo, per verificare lo stato di conservazione di un bene culturale e per monitorare le deformazioni ed il danneggiamento dovuto ad agenti esterni;
- produrre mediante tecnologie di rapid prototyping copie del modello, anche in scala ridotta;
- creare gallerie virtuali in cui sculture o detragli architettonici vengono visualizzati tridimensionalmente (consentendo rotazioni, zoom e viste panoramiche).

#### Lo strumento utilizzato

Una macchina di misura a coordinate (CMM) a 7 assi Faro Platinum Arm, equipaggiata con testina ottica Laser Faro Laser Line Probe.

Volume di misura sferico: 3 m

Frequenza di misura testina laser: 19.200 punti/secondo

Temperatura di funzionamento: 10°C - 40°C (50°F - 104°F)

Ciclo di temperatura tollerato: 3°C/5min. (5.4°F/5min.)

Umidità massima di funzionamento: 95%, senza condensa

Il sistema è completamente portatile e permette di eseguire scansioni 3D e misure on-site. L'utilizzo combinato del braccio a sette assi e dell'ottica laser consente di eseguire misure a contatto o scansioni ottiche in simultanea, all'interno dello stesso sistema di riferimento. La leggerezza dello strumento ed il numero elevato di gradi di libertà rendono veloci ed affidabili anche i rilievi di parti complesse e difficilmente accessibili.

#### Obiettivi da raggiungere

L'obiettivo dell'attività svolta da CRP Technology di Modena è stata la scansione ottica tridimensionale di 6 dipinti campione, analoghi per dimensioni e materiali ma sottoposti a diversi trattamenti di impregnazione.

I dati ottenuti mirano a fornire un quadro dettagliato delle deformazioni indotte sulle tele dalle variazioni delle condizioni ambientali, e consentono una valutazione comparata dei differenti trattamenti di impregnazione.

I vantaggi della tecnologia impiegata sono:

- 1) l'alta risoluzione del rilievo e quindi del modello 3D generato;
- 2) la perfetta corrispondenza tra modello fisico e file tridimensionale;
- 3) l'utilizzo di un sistema di scansione non invasivo che permette di rilevare con grande precisione le superfici di oggetti morbidi o flessibili, senza indurre nel campione alcuna deformazione. L'unica necessità è che il campione sia opaco (non lucido e non trasparente); a tal fine i modelli sono stati trattati con una polvere apposta, facilmente removibile con un pennello.

#### Metodologia operativa

Per prima è stata costruita la camera climatica: un box sufficientemente grande da poter ospitare tutte e sei le tele, opportunamente sigillato per non permettere scambi di calore ed umidità con l'esterno e condizionato tramite un dispositivo di umidificazione e uno di deumidificazione (Fig. 35). Le condizioni ambientali all'interno del box sono state monitorate costantemente per tutta la durata dell'esperimento. A tal fine sono stati sistemati tre data logger: uno libero all'interno della camera, uno a contatto della parete sulla quale sono stati fissati i dipinti, l'ultimo applicato sul telaio di uno dei dipinti, in modo che rilevasse i valori ambientali nell'intercapedine venuta a crearsi tra il retro della tela e la parete (questi dati sono meglio esposti nel prossimo capitolo).

Dopo l'assemblaggio e la calibrazione, lo strumento di scansione è stato fissato attraverso un tripode portatile in prossimità delle tele all'interno della camera climatica.

Lo strumento è stato mantenuto all'interno della camera durante le fasi di transitorio: una volta eseguita la calibrazione in condizioni fisse, lo scanner è infatti in grado di monitorare temperatura e umidità circostanti e di compensare via software le dilatazioni del braccio (il quale funge da riferimento tridimensionale durante la scansione ottica).

Il rilievo delle superfici frontali e laterali delle 6 tele ha richiesto circa 6 h, per ogni sessione di misura eseguita ad una precisa condizione ambientale. La risoluzione, vale a dire la distanza tra i punti letti dallo scanner, scelta per questo rilievo è stata pari a 1 mm per non ottenere un file definitivo troppo "pesante", e perché la superficie delle tele ha una curvatura molto bassa che può essere descritta senza perdere di dettaglio anche a questa risoluzione.

Durante la scansione l'operatore "pennella" la superficie della tela con la lama del laser che viene proiettata, rifratta e riletta dall'ottica digitale 30 volte al secondo (Fig. 36).

Il software collegato al sistema di scansione permette di vedere in tempo reale la nuvola di punti che prende forma, in modo da rilevare man mano solo le zone man-canti e da poter eventualmente eliminare e sostituire eventuali singole misure che risultino "rumorose" o errate (Fig. 37).

Una singola scansione di una tela, fatta ad una risoluzione pari a 1 mm, è formata da oltre un milione di punti e comporta una occupazione di memoria pari a 450 MB. Il file STL, ottenuto semplificando la nuvola di punti con tolleranza 0,03 mm, è formato da circa 150.000 triangoli ed occupa circa 10 MB di memoria; i dati devono essere quindi gestiti da una stazione pc ad alte prestazioni.

La **prima sessione** di misura è stata eseguita, dopo aver deumidificato la camera, ad una temperatura (T) di 26 °C e grado di Umidità Relativa (UR) pari al 37%.

La **seconda sessione** di misura è stata eseguita dopo aver aumentato l'umidità relativa all'interno della camera (T:27°C; UR:80%), in modo da innescare un detensione-mento e un allungamento apprezzabile delle fibre delle tele.

La **terza sessione** di misura è stata eseguita dopo aver riportato la camera circa alle condizioni di partenza (T:26°C; UR:40%), al fine di misurare e documentare eventuali tensioni residue sulle fibre precedentemente allungatesi.

Infine, visto che i rilievi delle condizioni ambientali hanno indicato che sul retro delle tele si crea una sorta di "camera isolata" che risente in maniera blanda delle variazioni di temperatura e umidità apportate all'ambiente, si è deciso di realizzare una **quarta sessione** di misura per una sola delle tele. A tal fine è stata realizzata una camera climatica ad hoc (Fig. 38) mirata a condizionare solo il retro della tela, in modo da simulare un ambiente reso umido da eventuale risalita capillare nelle pareti. Per questo esperimento è stata scelta la tela trattata con BEVA371 che aveva riportato le deformazioni minori nelle sessioni precedenti.

#### Analisi preliminare dei dati

Una volta completati i rilievi sono stati creati i file STL.

Una prima analisi qualitativa mostra che nei file sono ben visibili non solo le ondulazioni presenti sulle tele e i chiodi che le fissano lateralmente al telaio, ma addirittura lo scallino presente nel passaggio tra la zona trattata a biacca e quella trattata con terra d'ombra. Il sistema di scansione, in grado di rilevare scostamenti dell'ordine del decimo di mm, ha messo subito in evidenza i difetti di assestamento dei telai in legno, che presentano difetti di planarità di qualche mm.

Per creare un sistema di riferimento comune alle tele si è scelto il piano della tela come piano principale XY, e le direzioni degli spigoli del telaio come assi X e Y, come origine l'angolo in alto a sinistra. Per creare i piani del sistema di riferimento è stato utilizzato un algoritmo di tipo "best fit": selezionando un insieme di punti del file STL, il software calcola il miglior piano che approssima tale selezione. In sintesi il miglior piano che approssima il piano della tela, si scosta dalla tela stessa all'interno di un range che va da +1 a -4 mm.

Tutti i rilievi effettuati hanno mostrato che i telai si mantengono dimensionalmente stabili al variare delle condizioni ambientali, se queste avvengono in un lasso di tempo breve come quello che ha caratterizzato il test eseguito. Dunque, ai fini dello studio comparativo dei diversi trattamenti di impregnazione, i telai verranno considerati indeformabili e verranno utilizzati come riferimento fisso, per allineare le diverse scansioni della medesima tela.

Il software di confronto 3D utilizzato permette di comparare tra loro due file STL, e di realizzare inoltre sezioni di confronto, in determinate zone di interesse. Per meglio

comprendere i dati che seguiranno si ritiene opportuno ricordare come un piccolo allungamento delle fibre possa geometricamente generare ondulazioni macroscopiche sulla tela. Se, ad esempio, si considera una fibra orizzontale di lunghezza pari a 800 mm, un allungamento della fibra orizzontale della tela (in direzione x) di circa un decimo di millimetro, è sufficiente per consentire 2 ondulazioni della tela in direzione Z, rispettivamente di 2 mm e di 3 mm. Il calcolo approssimato tramite linee spezzate permette di verificare tramite il semplice teorema di Pitagora il fatto che questo sia geometricamente possibile (Fig. 39).

#### *Analisi dettagliata dei risultati*

##### MODELLO TRATTATO CON ACQUAZOI 200 (Fig. 40)

Il rilevamento delle deformazioni effettuato ad UR:80%, mostra un' ondulazione marcata solo nella parte alta della tela, in particolare in tutta la zona trattata con biacca; questa è la zona che presenta di conseguenza un maggior allungamento delle fibre. Sezionando alla stessa quota i files ottenuti dalle scansioni è stato possibile stimare la variazione di lunghezza delle fibre dovuta all'innalzamento di UR: la sezione in cui è maggiore l'allungamento delle fibre è disposta lungo l'asse X, a quota Y = 160 mm e indica una variazione in ordito da 798,7 mm (UR:37%) a 799,4 mm (UR:80%). Confrontando i risultati della prima e della terza scansione, si nota che la tela è tornata essenzialmente alle dimensioni originali, anche se si percepisce una zona centrale leggermente convessa.

##### MODELLO TRATTATO CON BEVA 371 (Fig. 41)

La scansione eseguita ad UR:80% non evidenzia grandi ondulazioni della superficie; la mappatura degli scostamenti in scala di colori mostra soltanto una deformazione convessa localizzata in alto a sinistra. In generale la tela risente poco della variazione di umidità (Fig. 42). Dal confronto dei dati ottenuti dalla prima e dalla terza scansione, si nota che la tela è tornata essenzialmente alle deformazioni iniziali: la presenza di tutti i punti su di un piano che presenta una freccia massima di circa 0,5mm, indica che la tela non ha subito deformazioni permanenti.

La tela trattata a BEVA371 è stata oggetto della quarta sessione di misura, condotta scansionando il fronte del dipinto esposto a variazione igrometrica solo sul retro, tramite una camera climatica dedicata che fissa i valori ambientali a T:22°C; UR:70%; queste condizioni favoriscono la formazione di notevoli ondulazioni sulla tela (Fig. 43).

Il confronto in scala di colori evidenzia scostamenti che superano i 5 mm: risulta evidente come un elevato valore di UR sul retro della tela possa arrecare gravi danni.

In condizioni di UR:70%, la sezione che presenta il maggior allungamento delle fibre è disposta lungo l'asse X, a quota Y = -800 mm e indica una variazione in ordito da 796,48mm (UR:37%) a 797,05mm (UR:70%).

##### MODELLO TRATTATO CON COLLA DI PELLII (Fig. 44)

Le prime due sessioni di rilevamento sono state eseguite in una piccola camera climatica di prova: si intendeva valutare se le deformazioni fossero apprezzabili su di una tela trattata con un impregnante notoriamente igroscopico, prima di allestire una camera climatica in grado di contenere tutte le tele. I valori ambientali riferiti alle prime due sessioni di rilevamento di questa tela (1 sessione: T:27°C; UR:46%; Il sessione: T:29°C; UR:80%) sono dunque leggermente diversi rispetto a quelli riferiti alle prime due sessioni di tutti gli altri dipinti. Per quanto riguarda la terza sessione, invece, i valori ambientali sono i medesimi per tutte le tele.

Dalla scansione eseguita a UR:80% risultano chiare deformazioni; la mappatura degli scostamenti in scala di colori, evidenzia una ondulazione marcata in tutta la tela, conseguente ad un allungamento delle fibre disposte lungo l'asse x.

Dalla terza scansione si nota che la tela è tornata a distendersi. La particolare scala di colori, con le deformazioni da 0 a -1 disposte su una diagonale e quelle da 0 a +1 disposte sull'altra, lascia invece presupporre uno svergolamento del telaio.

Lo studio degli allungamenti delle fibre è stato effettuato per questa tela con l'ausilio di marker sferici di posizione (si veda l'ultimo capitolo).

##### MODELLO NON TRATTATO (Fig. 45)

La tela priva di trattamento, presentava nella condizione iniziale alcune leggere ondulazioni sulle due fasce laterali, come se le fibre non fossero completamente tese in direzione y (trama). In condizioni di UR:80% queste ondulazioni permangono, ma sembrano attenuarsi leggermente. La mappatura degli scostamenti in scala di colori, evidenzia una ondulazione marcata conseguente ad un allungamento delle fibre disposte lungo l'asse x (con valori degli scostamenti contenuti entro + 2 mm), e una leggera ondulazione conseguente ad un allungamento delle fibre disposte questa volta lungo l'asse y (con valori contenuti entro + - 0,9 mm).

Analizzando i dati della terza scansione si nota che la tela è rientrata in un range di deformazioni tra + - 0,5 mm, anche se permane l'ondulazione in direzione y.

##### MODELLO TRATTATO CON PARALOID B72 (Fig. 46)

Dalla scansione condotta a UR:80% si nota la presenza di leggere deformazioni. La mappatura degli scostamenti in scala di colori, evidenzia una ondulazione marcata in tutta la tela, conseguente ad un allungamento delle fibre disposte lungo l'asse x. I valori degli scostamenti sono tutti però contenuti entro + - 2 mm. Comparando le scansioni della prima e della terza sessione si nota che la tela è tornata essenzialmente alle deformazioni iniziali, anche se graficamente si percepisce una zona centrale leggermente convessa. Si segnala inoltre la presenza di un leggero difetto localizzato, una sorta di manco, rientro in tensione delle fibre. La sezione in cui si registrano le massime deformazioni, in condizioni di T:27°C; UR:80%, è disposta lungo l'asse X, a quota Y = -820 mm. La lunghezza delle fibre in questa sezione varia da un minimo di 796,05mm (UR:37%) ad un massimo di 796,8mm (UR:80%).

##### MODELLO TRATTATO CON PLEXISOL P550 (Fig. 47)

La scansione eseguita a UR:80% indica la presenza di leggere deformazioni, concentrate verso gli angoli e disposte a 45° rispetto alle direzioni x e y. La mappatura degli scostamenti in scala di colori, evidenzia ondulazioni poco estese localizzate in prossimità dei bordi i cui valori sono tutti però contenuti entro +2mm e -1mm. Dalla terza scansione si nota che la tela è tornata a distendersi. La particolare scala di colori, che evidenzia leggere deformazioni (da 0 a -0,4mm disposte su una diagonale e da 0 a +0,4 mm disposte sull'altra), lascia supporre uno svergolamento del telaio. La sezione passante per i massimi scostamenti, in condizioni di T:27°C; UR:80%, è disposta lungo l'asse X, a quota Y = -150 mm. La lunghezza delle fibre in questa sezione varia da un minimo di 794,35mm (UR:37%) ad un massimo di 794,5mm (UR:80%).

#### *Analisi dell'allungamento delle fibre mediante l'utilizzo di marker*

La tela trattata con colla di pellicci è stata preparata inserendo nella tela 90 piccole capocchie di spillo di forma sferica disposte lungo le fibre a formare una griglia. Rilevate insieme alla tela, queste sfere hanno assolto la funzione di marker di posizione 3D fornendo la posizione dei loro centri nelle due condizioni limite (T:27,5°C; UR:46% e T:29°C; UR:80%) e permettendo di mappare le dinamiche di deformazione in maniera tridimensionale (Fig. 48). I punti rilevati sono stati importati in un sistema CAD in grado di gestire contemporaneamente in modo veloce e preciso le informazioni sulla superficie della tela (in formato STL) e le coordinate dei punti sferici (in formato IGS). Per ogni riga e per ogni colonna sono state tracciate delle curve di tipo "spline 3D" passanti per i marker, con il vincolo che queste curve giacessero sulla superficie scansionata della tela. In sostanza queste curve rappresentavano con una buona approssimazione le fibre di trama e ordito nelle due condizioni di umidità e permettono di misurarne le lunghezze.

## Controllo delle condizioni ambientali e microclimatiche di permanenza dei dipinti

Si descrivono qui di seguito i parametri che hanno orientato le misurazioni dei valori ambientali all'interno dei climabox e le modalità con le quali sono state eseguite.

Le condizioni termoisigrometriche al contorno di un manufatto quale un dipinto su tela rivestono un'importanza notevole ai fini della conservazione dello stesso. Un dipinto su tela posto in prossimità di una parete, come normalmente avviene, si comporta come una barriera tra due ambienti distinti: l'ambiente di fronte al dipinto e il micro-ambiente delimitato dal retro del dipinto e dal supporto murario.

Appare quindi interessante valutare se tra questi due ambienti si possano creare delle condizioni differenziali che possono comportare stress termici piuttosto che igrometrici a livello dell'insieme tela-preparazione-pittura.

Obiettivo di questo progetto è stato quello di valutare le condizioni al contorno che interessano il fronte e il retro di un dipinto su tela, misurate dapprima in un ambiente reale, (misure *in situ*).

Successivamente, sulla base dei risultati ottenuti, si è proceduto ad effettuare una serie di misure sui modelli sottoposti a diversi trattamenti di impregnazione in diverse condizioni termoisigrometriche (misure di simulazione).

### Misure *in situ*

La prima serie di misure è stata effettuata nella Chiesa di San Vincenzo, a Vicenza, sul dipinto su tela "Madonna della Mercede" (Fig. 49) conservata presso l'omonima cappella laterale della Chiesa.

Le misure sono state effettuate tramite due data logger per la misura dei parametri ambientali (Temperatura, Umidità Relativa e Temperatura Superficiale) con un intervallo di campionamento di 5 minuti. Un data logger è stato posto sul retro del dipinto, appoggiato al telaio mentre il secondo è stato posto sul fronte del dipinto.

L'ambiente "contenitore" era già stato oggetto di una campagna di monitoraggio microclimatico della durata di un anno, con sensori dello stesso modello collocati in vari punti della Chiesa e all'esterno.

Le caratteristiche dell'ambiente contenitore possono essere così riassunte:

Struttura dotata di una buona inerzia termica rispetto alle forzanti climatiche esterne, ma influenzata in modo molto più diretto e immediato dalle variazioni igrometriche prodotte dall'ambiente esterno.

All'interno dell'ambiente è collocato un sistema di riscaldamento ad aria calda che viene acceso solamente in occasione delle funzioni religiose (in genere una volta alla settimana) o in occasione di eventi culturali.

La campagna di misurazioni ha verificato che in corrispondenza dell'azionamento del sistema di riscaldamento si osservano variazioni dei valori di umidità relativa e umidità specifica in tutta la struttura. Tali variazioni sono indici di una situazione evaporativa dei muri in atto lungo tutto il perimetro.

Il dipinto su tela indagato, quindi, si trova in un ambiente sottoposto a forzanti climatiche non naturali che danno luogo a fenomeni evaporativi.

L'osservazione dei primi dati ha quindi, sulla base di queste indicazioni iniziali, portato i risultati che si possono osservare nel grafico di riferimento (Fig. 50). In occasione delle funzioni religiose, durante il periodo invernale, il sistema di riscaldamento ad aria calda viene attivato. Nella domenica presa a campione, la temperatura dell'aria in prossimità del quadro aumenta di circa 1°C in un'ora. La tela smorza il gradiente termico, e sul retro del dipinto la variazione di temperatura osservata risulta pari a 0,7°C. Nello stesso periodo di tempo la superficie muraria inizia il processo evaporativo, e il vapore che fuoriesce dalla muratura raggiunge prima il retro della tela e poi la parte anteriore. Di conseguenza per l'umidità relativa si osserva prima un aumento maggiore in corrispondenza del sensore posto sul retro (variazione di +9%) e con un leggero ritardo (entro 5 minuti) un aumento sul davanti del dipinto di entità inferiore (variazione di +7%).

Di conseguenza le differenze osservate tra il retro e il fronte della tela sono quantificabili in questo caso, e negli altri eventi simili osservati nel corso del mese di monitoraggio, in circa 0,2-0,3°C e 2-3% U.R.

Oltre all'umidità relativa, che esprime il grado di saturazione del vapore nell'aria, e dipende sia dalla temperatura che dalla quantità di vapore presente in atmosfera, si è proceduto a valutare anche la pressione di vapore sia sul fronte che sul retro della tela (Fig. 51). Si è riscontrata in questo caso una differenza retro-fronte che raggiunge un picco massimo pari a circa 0,4 hPa e uno spostamento di fase tra i due lati quantificato in circa 5 minuti. Ciò significa che il vapore esercita una pressione dal retro verso il fronte, "spingendo" la tela verso l'esterno con una forza di circa 0,4 g/cm<sup>2</sup>.

### Misure di simulazione

A seguito delle prime misurazioni effettuate "in-situ", che hanno permesso di verificare l'insorgere di condizioni termoisigrometriche differenziate tra il fronte e il retro di un dipinto su tela, si è proceduto a riprodurre in modo simulato differenti condizioni microclimatiche alle quali sono stati sottoposti i modelli descritti. Le misure di simulazione sono state effettuate in un ambiente confinato con le seguenti modalità:

fase 1: il quadro era appeso in un ambiente all'interno del quale era presente un umidificatore. Il quadro era appoggiato a una parete, i sensori erano posti: uno in ambiente, uno in prossimità del quadro e l'altro sul retro del dipinto  
fase 2: il quadro era appeso in un ambiente all'interno del quale era presente un deumidificatore. Il quadro era appoggiato a una parete, i sensori erano posti: uno in ambiente, uno in prossimità del quadro e l'altro sul retro del dipinto  
fase 3: il quadro è stato posto in un ambiente in cui nel retro della tela era stata creata un'umidità pari a circa il 75%. I sensori erano posti uno in ambiente, uno sul retro del dipinto e uno sul fronte.

Le misure sono state effettuate tramite tre data logger per la misura dei parametri ambientali (Temperatura, Umidità Relativa e Temperatura Superficiale). In tutte le varie fasi un data logger è stato posto sul retro del dipinto, appoggiato al telaio, uno è stato posto sul fronte e il terzo, come verifica, all'interno dell'ambiente.

**Fase 1:** all'interno del climabox contenente il dipinto è stato inserito un umidificatore che è stato azionato in modo discontinuo per due giorni consecutivi, con una durata di ciascun periodo di funzionamento di circa 3,5 ore per ciclo. Durante uno di questi cicli si è proceduto alla scansione tramite laser scanner.

Si osserva come in prossimità del dipinto il flusso di vapore arrivi con un leggero ritardo rispetto all'ambiente. Sul retro del dipinto il valore di umidità relativa percentuale risulta molto più basso, con una differenza tra l'8% e il 10%.

Osservando anche i valori di umidità specifica, vale a dire la quantità effettiva di vapore in grammi presente in una determinata massa d'aria, la differenza tra fronte e retro risulta compresa tra sia 1,7 g/kg e 2,0 g/kg (Fig. 52).

La differenza di vapore tra i due lati della tela dà luogo a una differenza di pressione di vapore che raggiunge i 17 hPa (17 g/cm<sup>2</sup>).

**Fase 2:** all'interno del climabox contenente il dipinto è stato inserito un deumidificatore che è stato azionato per un periodo di circa 9,5 ore consecutive. Verso la fine del ciclo di funzionamento ha avuto luogo la terza sessione di scansione delle superfici.

Anche in questo caso si osserva come il retro del dipinto sia molto poco influenzato dalla dinamica microclimatica che ha luogo sul fronte. Questo significa che il fronte del dipinto agisce come barriera rispetto allo scambio di vapore con il retro.

Osservando i dati in termini di umidità relativa e specifica rileviamo come, mentre l'UR inizialmente aumenta sul retro del dipinto, anche se in misura piuttosto modesta, la concentrazione di vapore effettiva segue in modo ridotto le variazioni esterne. Il ritardo rispetto al fronte del dipinto sulla trasmissione del vapore è stato valutato in circa 10 minuti. Anche la pressione di vapore segue lo stesso andamento osservato per l'umidità relativa e l'umidità specifica (Fig. 53). La differenza di concentrazione di molecole di vapore d'acqua tra i due lati della tela dà luogo a una differenza di pressione di vapore che in questo caso raggiunge i 2 hPa, vale a dire 2 g/cm<sup>2</sup> (asse secondario del grafico).

**Fase 3:** sul retro della tela è stato costruito un box sul fondo del quale è stata collocata una soluzione soprassatura di cloruro di sodio (NaCl) in grado di stabilizzare l'umidità relativa su valori prossimi al 75% (per temperature prossime a 20°C).

Il dipinto era quindi, sul retro, in contatto con un microambiente con elevati valori di umidità, e sul fronte in contatto con un ambiente modestamente umido. In questo modo si è simulata la condizione di un dipinto posto a contatto di una superficie evaporante quale può essere il caso di murature affette da fenomeni di risalita capillare che si possono riscontrare ad esempio in molte chiese a Venezia. La tela utilizzata era stata trattata con BEVA 371.

In questo caso si osserva una situazione opposta rispetto a quanto osservato nel caso precedente: sul fronte del dipinto il valore di umidità risulta nettamente più basso, sia come valore percentuale che come valore assoluto di umidità specifica rispetto alla parte in comunicazione con il box (fig. 54).

La differenza di vapore tra i due lati della tela dà luogo a una differenza di pressione di vapore che raggiunge i 6 hPa o 6 g/cm<sup>2</sup> (Fig. 55).

### Conclusioni

La ricerca svolta ha avuto come scopo la valutazione delle condizioni microclimatiche che si instaurano tra il fronte e il retro di un dipinto su tela posto in diverse tipologie di ambienti. In particolare si è scelto di iniziare lo studio dalla valutazione di un caso reale: un manufatto posto in un ambiente espositivo tipico come quello di una chiesa. Nel caso in questione era noto che la superficie muraria che ospitava l'opera d'arte si veniva a trovare, in determinati momenti, in condizioni di evaporazione: si ipotizzava quindi che la tela fosse sottoposta ad un flusso di vapore dal retro verso il fronte. Si è poi osservato come tale flusso veniva bloccato in modo rilevante dalla tela, generando quindi una pressione diretta dal retro verso il fronte quantificata in circa 0,4g/cm<sup>2</sup>.

Successivamente si è proceduto simulando, all'interno di una camera climatizzata, differenti condizioni microclimatiche su campioni di tele appositamente predisposti. Dapprima si sono modificate le condizioni microclimatiche dal fronte della tela, utilizzando un umidificatore e, successivamente, un deumidificatore, infine si è posto sul retro di una delle tele una soluzione soprassatura di cloruro di sodio (NaCl), che bloccasse l'umidità relativa su valori prossimi al 75%.

Il caso con l'umidificatore sul fronte ha comportato la maggiore sollecitazione all'interfaccia della tela, con una pressione dal fronte verso il retro di 17,0 g/cm<sup>2</sup>. Nel caso del deumidificatore e della soluzione soprassatura sul retro, la pressione è ovviamente risultata di verso opposto e di entità rispettivamente 2,0 g/cm<sup>2</sup> e 6,0 g/cm<sup>2</sup>.

Si è quindi verificato come stress igrometrici si trasformino in stress meccanici di entità apprezzabile. Il lavoro esposto, comunque, rappresenta solo lo stadio iniziale di una ricerca che potrebbe essere approfondita valutando la pressione di vapore che si può creare in ambienti reali, quali ambienti museali o contenitori espositivi come chiese e palazzi, e soprattutto valutando come la presenza di differenti trattamenti superficiali possa modificare lo stress complessivo che interessa un dipinto su tela.

### Conclusioni generali

Il percorso illustrato, dalla genesi dei modelli attraverso i percorsi di indagine ed invocamento per arrivare alla scansione ad alta lettura della superficie in tridimensionale, in ognuno dei suoi aspetti può essere in qualche modo migliorato, essendo un percorso sperimentale mai tentato prima e condotto cercando di risolvere le problematiche presentatesi volta per volta. Al di là di questo si ritiene che molte delle informazioni che ne sono uscite siano utili al bagaglio del restauratore, come per esempio aver cercato di stabilire un legame visuale e percepibile del comportamento delle tele con la restituzione ottica tridimensionale. Relativamente alla comparazione dei dati emersi, ci sono state delle difficoltà riferibili al fatto che le prove meccaniche sono condotte con

striscioleline di tela mentre le scansioni sono state effettuate su dipinti vincolati al telaio, fattore non poco influente sul loro comportamento. Inoltre come si è visto anche la provenienza dell'umidità crea differenze di comportamento nei modelli che, rispondendo alla loro premessa di essere il più possibile vicini, come composizione e comportamento, a dei dipinti reali, assumono l'intrinseca complessità dei manufatti artistici che rende difficile e non univoca l'interpretazione dei fenomeni.

Appare però abbastanza evidente l'ottima risposta dei modelli alle premesse poste. In relazione al comportamento delle tele, riprendendo i dati emersi dall'indagine con il laser scanner, si può stabilire una classifica degli adesivi in relazione alle loro risposte nella camera climatizzata.

**Dal peggior al miglior comportamento in camera:** 1) Colla di coniglio, 2) Acquazol 200, 3) Plexisol P-550, 4) Paraloid B-72, 5) Non trattato, 6) Beva 371.

La spiegazione completa dei fenomeni osservati è lontana da essere raggiunta, ma si può notare come il carattere idrofilo ed igroscopico di alcuni materiali (colle animali e Acquazol) porti alla formazione di alcune delle deformazioni maggiormente pronunciate.

I risultati delle scansioni con il laser scanner hanno parecchio sorpreso, anche se, com'era prevedibile, il modello trattato a colla ha prodotto molte deformazioni. In misura minore si sono prodotte delle deformazioni anche sui modelli trattati a Plexisol P-550 e Paraloid B72, mentre il dipinto che sembra comportarsi meglio in questo tipo di situazione è quello trattato a Beva 371.

Un caso a parte è quello dell'Acquazol 200 che ha prodotto deformazioni in misura maggiore nella campitura a biacca, fenomeno per il quale si sono trovate spiegazioni plausibili. Il Beva 371 si dimostra efficace nell'isolare il dipinto dall'umidità ambientale, ma non nell'isolarlo dall'umidità dal retro, anche se in linea teorica sembrava il materiale più adatto a farlo.

Il dato sorprendente è quello del buon comportamento della tela non trattata: ancora una volta un dato emerge in favore del minimo intervento. Si conclude che la generale convinzione che l'applicazione di resine di sintesi al retro dei dipinti possa in qualche modo isolarli dall'umidità proveniente dal retro debba considerarsi erronea per quanto riguarda le modalità previste da questa sperimentazione.

### Note

- 1 T.T. De Mayerne, *Pittura scultura e delle arti minori*, Ms Sloane 2052 del British Museum di Londra, a cura di Simona Rinaldi, De Rubéis, 1995
- 2 Il testo è noto nella sua unica edizione a stampa a cura di M.P. Merrifield *Medieval and Renaissance Treatises on the Arts of Painting*, Dover Press, 1999.

### Bibliografia:

- M.F. Mecklenburg, *Meccanismi di cedimento nei dipinti su tela: approcci per lo sviluppo di protocolli di consolidamento*, Il Prato ed., Padova 2007.
- CESHAR7 (a cura di), *L'attenzione alle superfici pittoriche. Materiali e metodi per il consolidamento e metodi scientifici per valutare l'efficiacia*. Atti del Terzo Congresso Internazionale del CESHAR7 Colore e Conservazione, Il Prato ed., Padova, 2008.
- T.T. De Mayerne, *Pittura scultura e delle arti minori*, Ms Sloane 2052 del British Museum di Londra, a cura di Simona Rinaldi, De Rubéis, 1995.
- M.P. Merrifield, *Medieval and Renaissance treatises on the arts of paintings*, Dover Press, 1999.

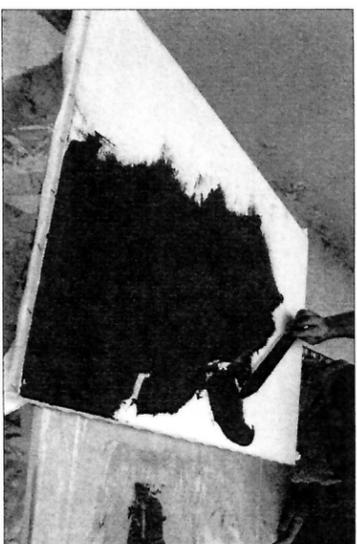


Fig. 1. La stesura della preparazione rossa con il coltello.

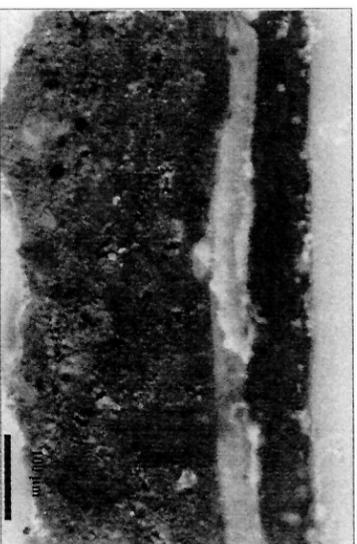


Fig. 3. Il ratto di Elena, stratigrafia.

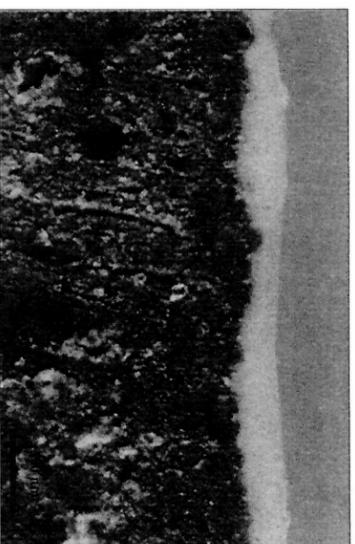


Fig. 4. Modello di dipinto stratigrafico.



Fig. 7. Retro campione con primo strato preparativo (prima dell'invecchiamento).

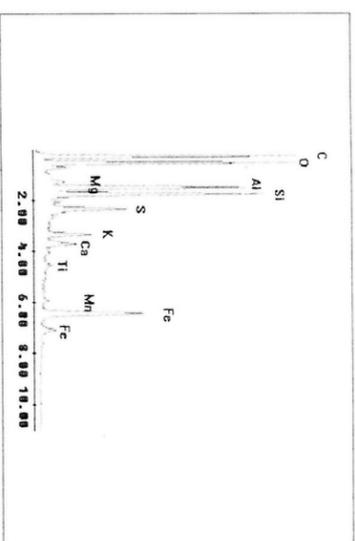


Fig. 2.



Fig. 5. Tela di lino con appetto (prima dell'invecchiamento).

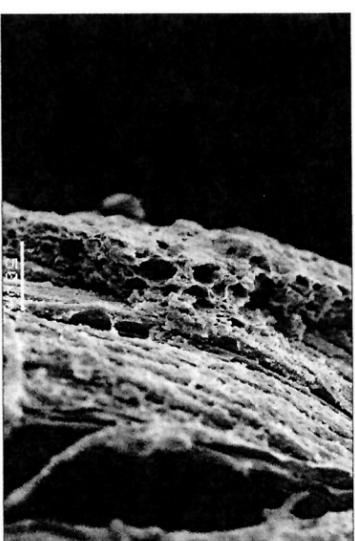


Fig. 6. Sezione campione con primo strato preparativo (prima dell'invecchiamento).



Fig. 8. Sezione campione con secondo strato preparativo (prima dell'invecchiamento).



Fig. 9. Retro campione con secondo strato preparativo (prima dell'invecchiamento).

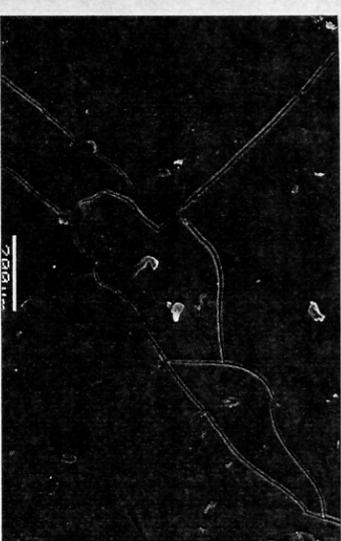


Fig. 11. Superficie stesura pittorica zona marrone (prima dell'invecchiamento).

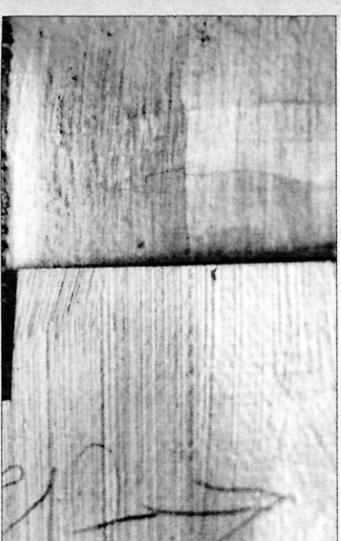


Fig. 13. Superficie stesura pittorica zona bianca prima e dopo l'invecchiamento.

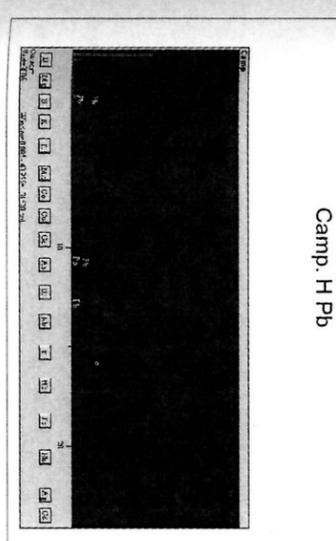


Fig. 15. Spettro EDX dello strato più esterno della stesura pittorica zona bianca (dopo invecchiamento).

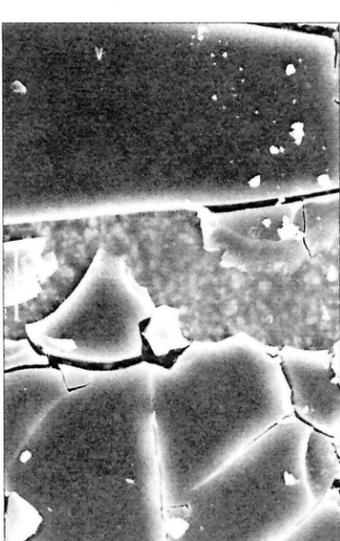


Fig. 10. Superficie stesura pittorica zona bianca (prima dell'invecchiamento).

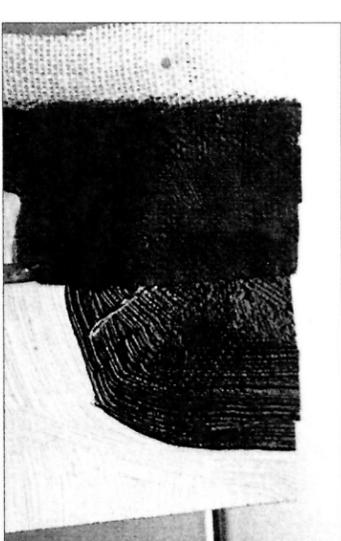


Fig. 12. Superficie stesura pittorica zona marrone prima e dopo l'invecchiamento.

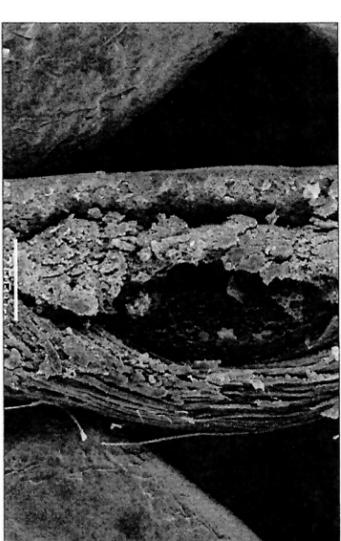


Fig. 14. Sezione stesura pittorica zona bianca (dopo invecchiamento).

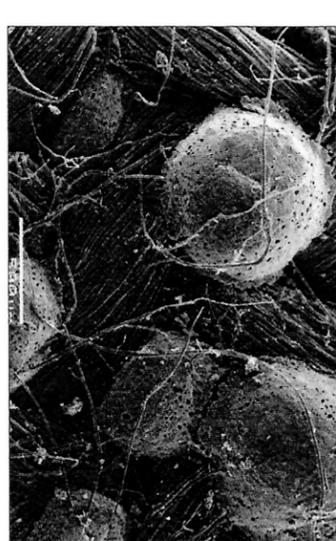


Fig. 16. Retro modello finto dopo invecchiamento.

Biacca	NON	INV	DOPO INV 16 anni	
	Ordito	Trama	Ordito	Trama
Forza Max N	340	339	229,6	229,3
Allung Max °	23,9	11,4	14,9	7,9
Modulo MPa	655	816	345,2	451,1
Energia rottura J	0,698	0,417	0,617	0,42
Energia allo snervamento J	0,6	0,347	0,213	0,244

Fig. 17. Caratteristiche fisico-meccaniche zona bianca prima e dopo l'invecchiamento.

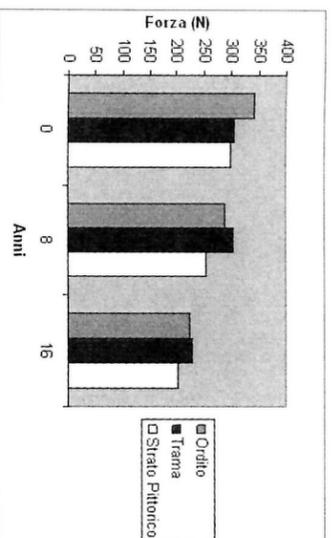


Fig. 19.

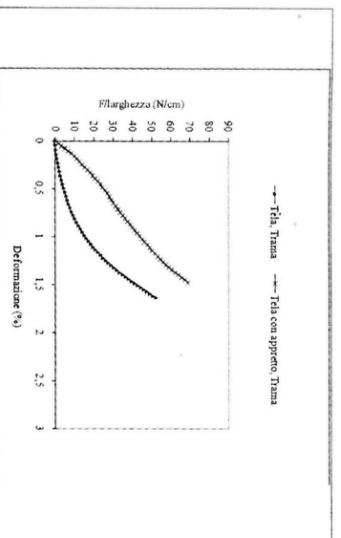


Fig. 21. Le curve dei test forza/larghezza-deformazione della sola tela e della tela con la colla di appretto in direzione trama. Lo strato di colla provoca un aumento di rigidità e forza del modello.

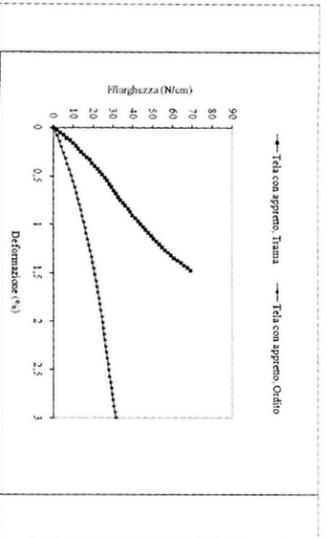


Fig. 23. Le curve dei test forza/larghezza-deformazione del campione di tela con strato di colla nelle direzioni di trama ed ordito. Le differenze sono dovute all'ondulazione dei fili di ordito, e gran parte della deformazione osservata nella direzione ordito è semplicemente il raddrizzamento dei fili di ordito.

Terra d'ombra	NON	INV	DOPO INV 16 anni	
	Ordito	Trama	Ordito	Trama
Forza Max N	343	305	203,1	227,8
Allung Max °	17,9	7,7	14,8	6,6
Modulo MPa	562	876	279,9	605,1
Energia rottura J	0,976	0,491	0,548	0,583
Energia allo snervamento J	0,694	0,189	0,219	0,23

Fig. 18. Caratteristiche fisico-meccaniche zona marrone prima e dopo l'invecchiamento.

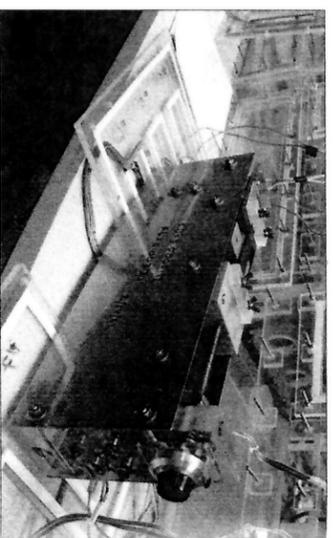


Fig. 20. Il tensiometro con installato un campione di modello di dipinto.

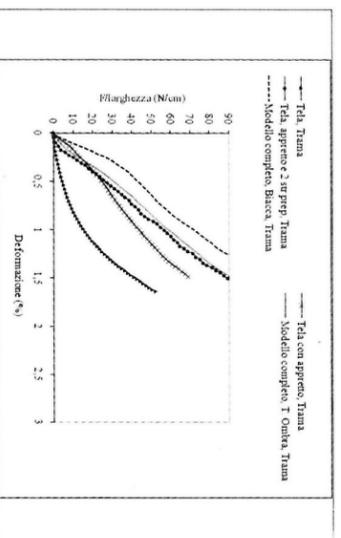


Fig. 22. I risultati dei test forza/larghezza-deformazione per i campioni con: la sola tela, la tela con lo strato di colla, la tela con la colla e due strati di preparazione ed infine la tela con la colla, gli strati di preparazione e gli strati pittorici, in direzione trama. L'aumento più significativo di rigidità e forza è dovuto allo strato di colla.

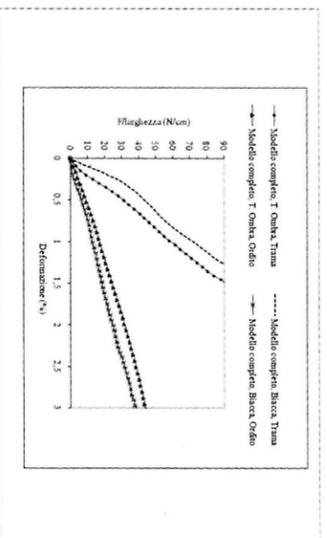


Fig. 24. Le curve dei test forza/larghezza-deformazione dei modelli completi sia con pellicola pittorica a terra d'ombra che a biacca, in entrambe le direzioni del tessuto. Come si può vedere la differenza tra i modelli con pellicola pittorica a terra d'ombra e a biacca è piccola.

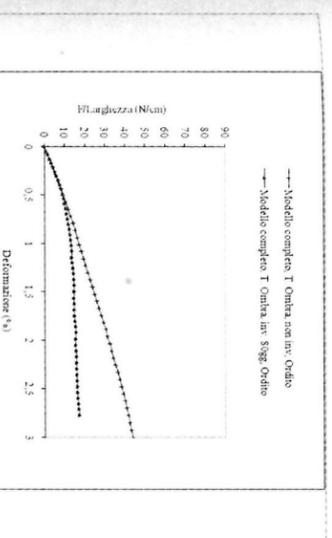


Fig. 25. Le curve dei test forza/larghezza-deformazione del modello completo con pellicola pittorica a terra d'ombra, in direzione ordito prima e dopo l'invecchiamento accelerato. L'invecchiamento del modello ne provoca la perdita di forza.

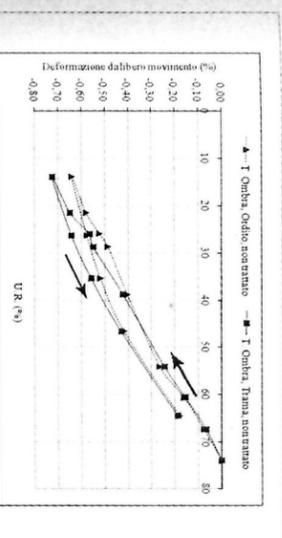


Fig. 27. Le curve dei test relativo al modello con pellicola pittorica a terra d'ombra naturale non consolidato, in entrambe le direzioni della tela.

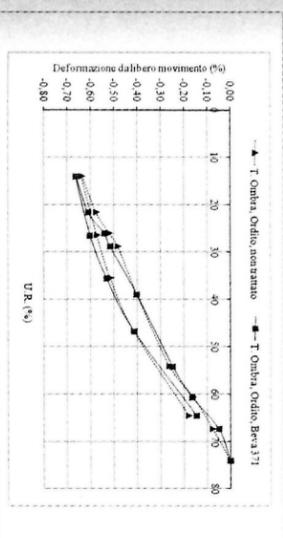


Fig. 29. Le curve di comparazione della reazione dimensionale alle variazioni di U.R. del campione con pellicola pittorica a terra d'ombra naturale, direzione ordito, non consolidato e con impregnazione dal retro a Beva 371.

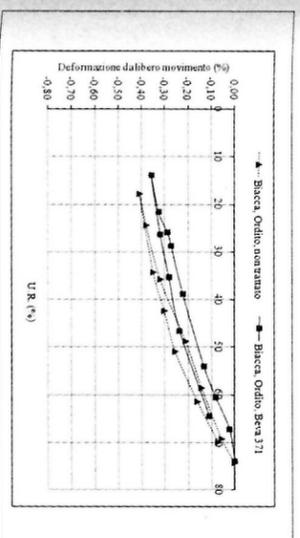


Fig. 31. Le curve di comparazione della reazione dimensionale alle variazioni di U.R. del campione con pellicola pittorica a biacca, direzione ordito, non consolidato e con impregnazione dal retro a Beva 371.

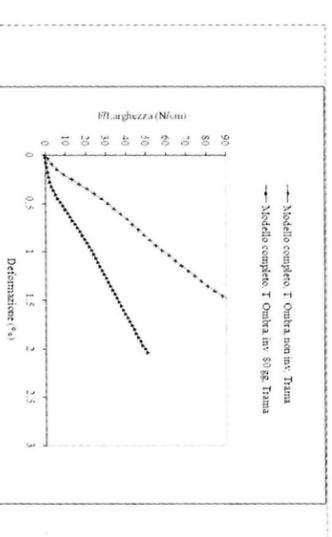


Fig. 26. Le curve dei test forza/larghezza-deformazione del modello completo con pellicola pittorica a terra d'ombra, in direzione trama, prima e dopo l'invecchiamento accelerato. L'invecchiamento del modello provoca una perdita di forza.

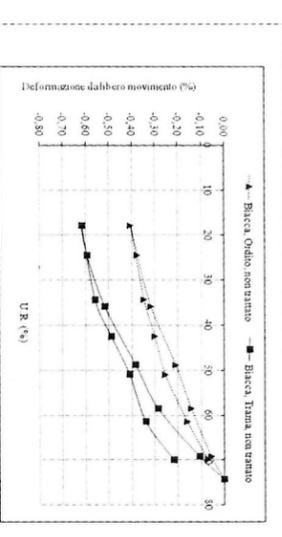


Fig. 28. Le curve dei test relativo al modello con pellicola pittorica a biacca non consolidato, in entrambe le direzioni della tela.

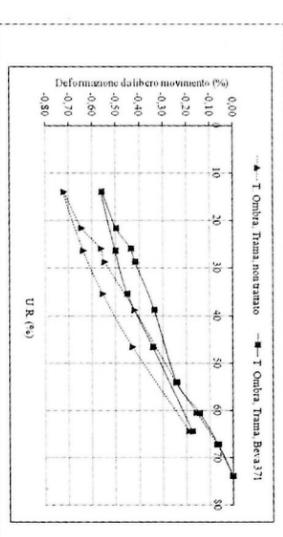


Fig. 30. Le curve di comparazione della reazione dimensionale alle variazioni di U.R. del campione con pellicola pittorica a terra d'ombra naturale, direzione trama, non consolidato e con impregnazione dal retro a Beva 371.

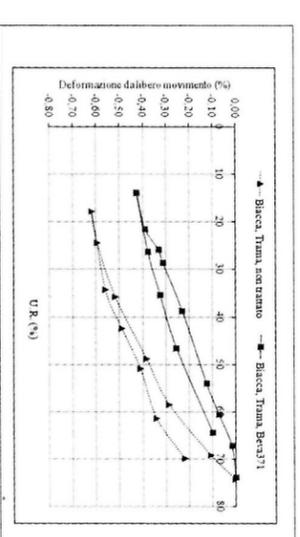


Fig. 32. Le curve di comparazione della reazione dimensionale alle variazioni di U.R. del campione con pellicola pittorica a biacca, direzione trama, non consolidato e con impregnazione dal retro a Beva 371.

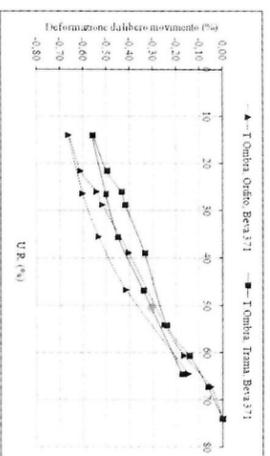


Fig. 33. Confronto delle curve dei modelli con pellicola pittorica a terra d'ombra naturale in trama e ordfo, trattati a Beva 371.

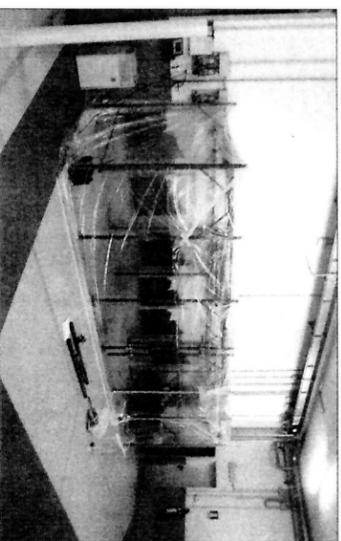


Fig. 35. La camera climatica costruita per ospitare le teela.

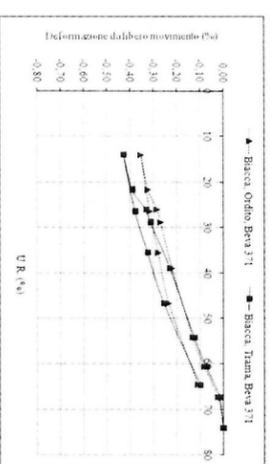


Fig. 34. Confronto delle curve dei modelli con pellicola pittorica a biacca in trama e ordfo, trattati a Beva 371.



Fig. 36.

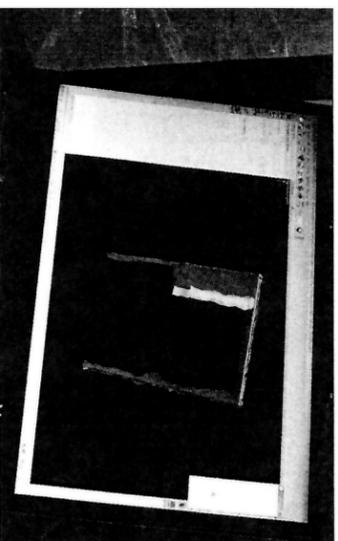


Fig. 37.

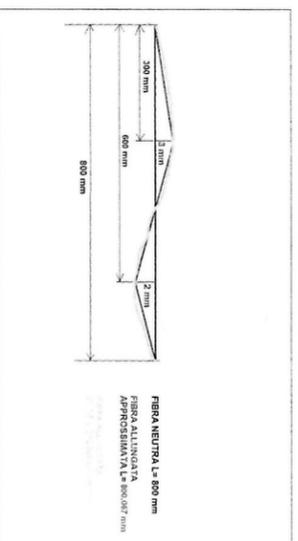


Fig. 39. Un allungamento delle fibre nell'ordine di un decimo di millimetro può generare macroscopiche deformazioni nella teela.

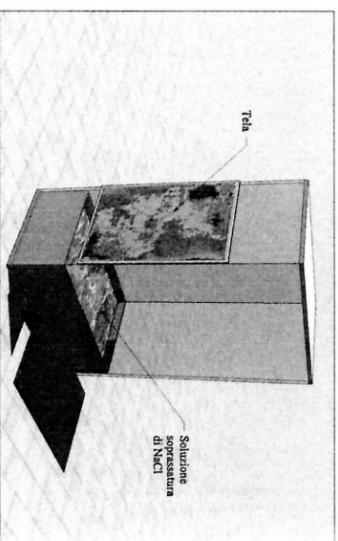


Fig. 38.

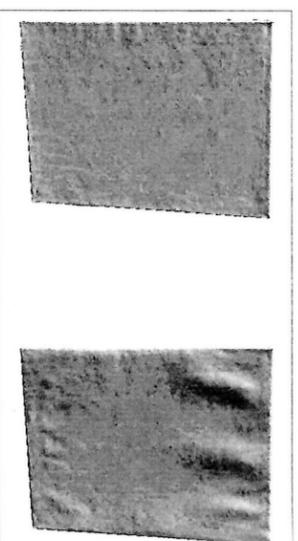


Fig. 40. Modello trattato con Acquazoli: render 3D delle deformazioni della teela rilevate con il laser scanner: a sinistra la teela rilevata a UR: 37%; a destra rilevamento effettuato a UR: 80% che mette in evidenza le deformazioni formatesi.

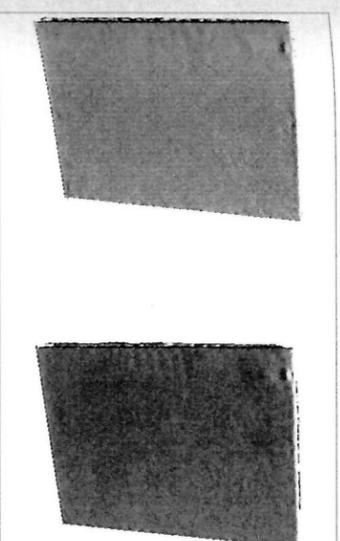


Fig. 41. Modello trattato con Beva 371: render 3D delle deformazioni della teela rilevate con il laser scanner: a sinistra la teela rilevata a UR: 37%; a destra rilevamento effettuato a UR: 80%.

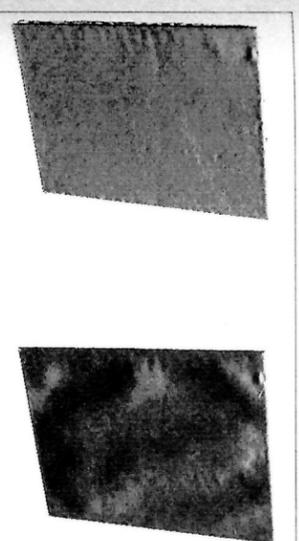


Fig. 43. Modello trattato con Beva 371, variazione di UR sul retro: render 3D delle deformazioni della teela rilevate con il laser scanner: a sinistra la teela rilevata a UR: 37%; a destra rilevamento effettuato a UR: 70%.

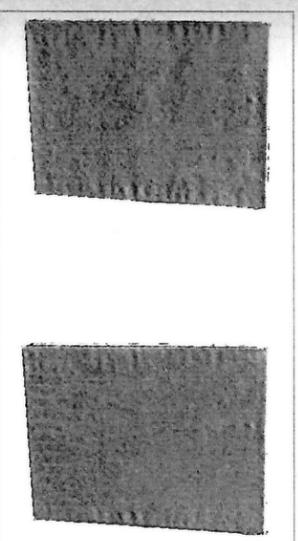


Fig. 45. Modello non trattato con colla di pelle: render 3D delle deformazioni della teela rilevate con il laser scanner: a sinistra la teela rilevata a UR: 37%; a destra rilevamento effettuato a UR: 80%.

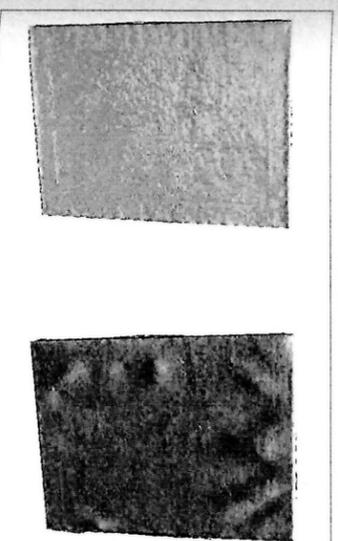


Fig. 47. Modello trattato con Plexisol P550: render 3D delle deformazioni della teela rilevate con il laser scanner: a sinistra la teela rilevata a UR: 37%; a destra rilevamento effettuato a UR: 80%.

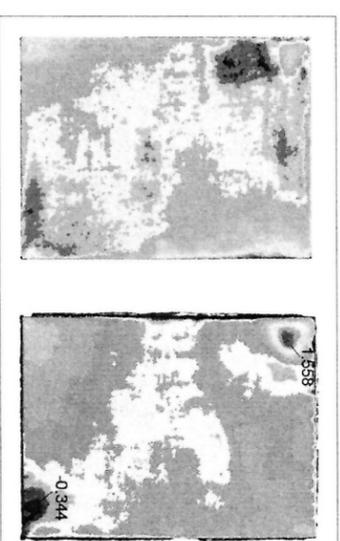


Fig. 42. Mappatura degli scostamenti in scala di colori (in scala di grigi per ragioni di stampa): sovrapposizione dei risultati delle scansioni effettuate a UR: 37% e 80%. Permette di capire quali sono stati i movimenti della teela.

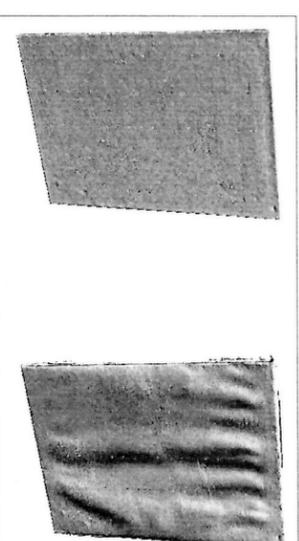


Fig. 44. Modello trattato con colla di pelle: render 3D delle deformazioni della teela rilevate con il laser scanner: a sinistra la teela rilevata a UR: 37%; a destra rilevamento effettuato a UR: 80%.

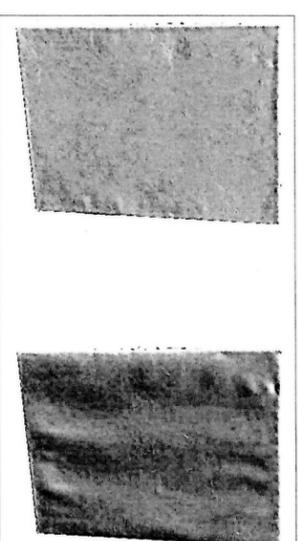


Fig. 46. Modello trattato con Paralooid B72: render 3D delle deformazioni della teela rilevate con il laser scanner: a sinistra la teela rilevata a UR: 37%; a destra rilevamento effettuato a UR: 80%.

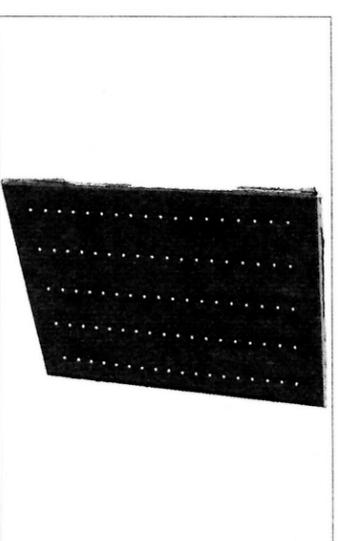


Fig. 48.



Fig. 49. Restituzione del rilevamento della tela e dei marker sferici.

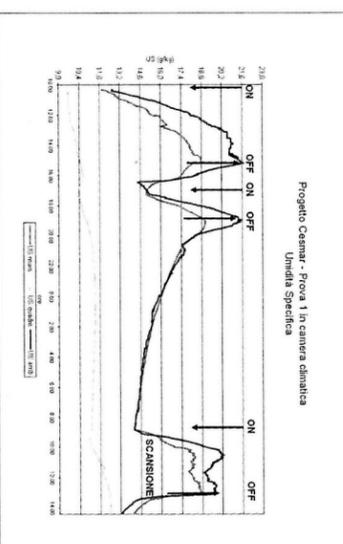
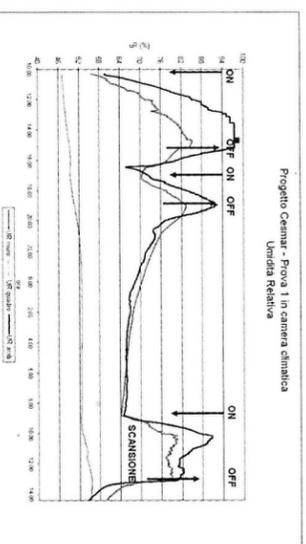


Fig. 52.

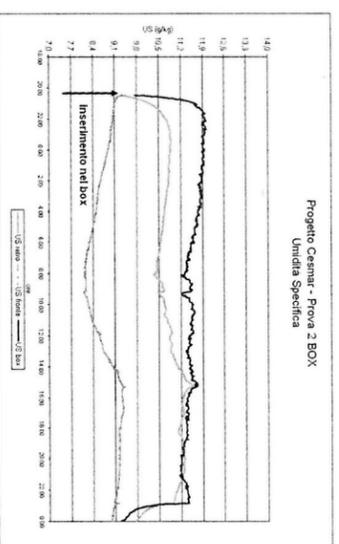


Fig. 54. Restituzione del rilevamento della tela e dei marker sferici.

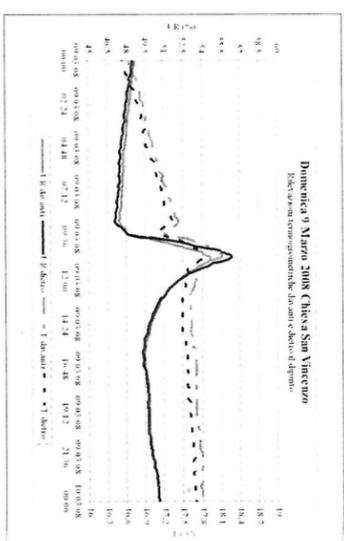


Fig. 50.

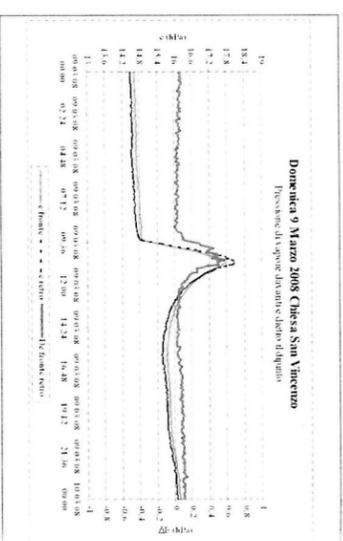


Fig. 51.

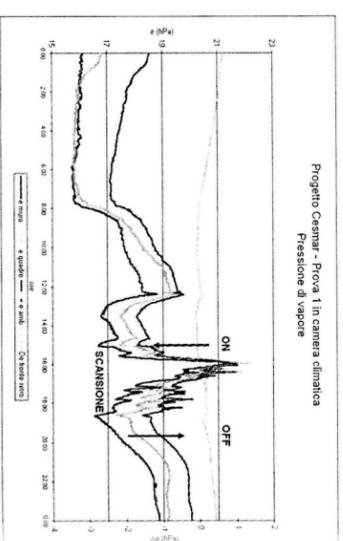


Fig. 53.

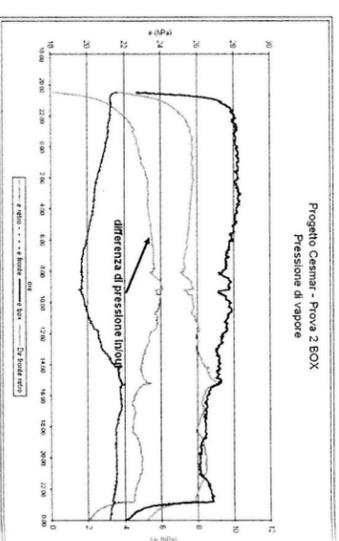


Fig. 55.

## Studi preparatori finalizzati al restauro di due dipinti su tela dell'Ottocento

Gioia Bajocchi<sup>1</sup>, Diego Causati<sup>2</sup>, Alberto Finozzi<sup>3</sup>, Erminio Signorini<sup>3</sup>, Matteo Montanari<sup>4</sup>, Monica Recchi<sup>5</sup>, Antonella Tummarello<sup>6</sup>,  
Con la collaborazione di Maria Rosa Massagra, Silvia Beretta<sup>7</sup>, Mirco Iotti, Gianfranco Filippini<sup>8</sup>.

### Introduzione storica

Il gruppo di studio coordinato da Erminio Signorini e Alberto Finozzi ha preso in esame le modalità di consolidamento di due quadri appartenenti al XIX secolo che presentano un degrado diversificato. L'ambizione è stata quella di mettere a punto un metodo e costruire un protocollo di misurazione dell'intensità del degrado.

Per questo sono state fatte prove meccanico-fisiche, analisi e osservazioni chimico-biologiche. Lo scopo era naturalmente quello di definire un valore che indicasse la scelta verso il consolidante più idoneo insieme alla sua giusta concentrazione e procedura di applicazione.

Siamo partiti dalle analisi visive dei due quadri che presentano diverse caratteristiche tecnico artistiche di esecuzione (Fig. 1, 2), e ci siamo chiesti se queste differenze avessero influito sulla resistenza al degrado.

Le due opere presentano le seguenti principali tipologie di degrado:

la prima (Enrico Romolo, *Un'eroina di Sicilia*, cm 90x78) mostra situazioni di distacco degli strati pittorici dal supporto tela, sia in corrispondenza dell'asta inferiore del telaio a causa dell'accumulo di polveri e granelli di intonaco, sia lungo tutto il perimetro in corrispondenza della linea di piegatura. Anche alcuni allentamenti della tela hanno accentuato questo tipo di degrado (Fig. 3).

La seconda (Giovanni Calari *"Crocefissione"* cm 155,5x90) presenta un indebolimento del supporto tessile, dovuto in passato a pessime condizioni di conservazione, a perforazioni di acqua che hanno formato numerose gore e favorito attacchi da biodegradabili (Fig. 4, 5).

Nonostante questo il dipinto presenta in generale una buona adesione tra gli strati pittorici e supporto. Al contrario, per il dipinto di Romolo, conservato nei depositi della Pinacoteca di Bologna la conservazione risultava generalmente buona.

L'opera di Enrico Romolo, pittore milanese, diplomato all'accademia di Brera, è un olio su tela datato "1860" raffigurante un "ritratto di costume" di  $\frac{3}{4}$ , a sfondo monocromo. C'è un sentimento partecipe all'evento storico e il soggetto oltre a essere una patrona è anche arricchito di una valenza estetizzante: si tratta di una figura femminile, bella per forme, volumi e con vezzi decorativi accessori (collana di perline, nastri, etc.). Le stesure pittoriche sono materiche e coprenti.

Diverso è come si presenta il quadro di Giovanni Battista Calari, pittore veronese della prima metà dell'Ottocento. Ha un'iconografia religiosa classica e neocinquecentesca. Vi si coglie

- 1 Restauratrice privata di Bologna
- 2 Chimico Soprintendenza SBAE di Bologna
- 3 Restauratori Cesmar<sup>7</sup>
- 4 Biologo Università di Bologna
- 5 Studentessa Accademia Brera
- 6 Laureanda dell'Università di Palermo al Corso di Laurea in Conservazione e Restauro dei B.C.C.
- 7 Stazione Sperimentale della Seta di Milano
- 8 Università di Bologna, Facoltà di Agraria

**L'ATTENZIONE ALLE SUPERFICI PITTORICHE**  
**Materiali e Metodi per il Consolidamento**  
**e Metodi Scientifici per Valutarne l'efficacia - 2**

atti del congresso  
Milano, 21-22 novembre 2008

a cura di  
CESMAR7  
Diane Kunzelmann

Quarto congresso internazionale  
COLORE E CONSERVAZIONE  
materiali e metodi nel restauro delle opere policrome mobili



**L'ATTENZIONE ALLE SUPERFICI  
PITTORICHE**  
Materiali e Metodi per il Consolidamento  
e Metodi Scientifici per Valutarne l'efficacia - 2

atti del congresso  
Milano, 21-22 novembre 2008

a cura di:  
**CESMAR7**  
Diane Kunzelman

Quarto congresso internazionale  
**COLORE E CONSERVAZIONE**  
materiali e metodi nel restauro  
delle opere policrome mobili