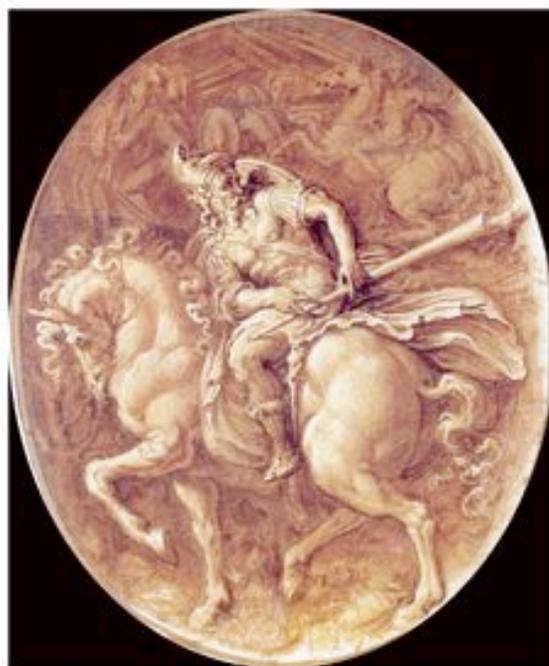


ARTICOLO INTERNO

N° 2

**Indagini Termografiche e Radiografiche nel Consolidamento
in Sottovuoto degli Strati Pittorici dei Dipinti su Tavola.
Nuove Ricerche e Risultati**

Mario Verdelli, Nadia Presenti e Alfredo Aldrovandi



Toscana Restauro Arte

Indagini Termografiche e Radiografiche nel Consolidamento in Sottovuoto degli Strati Pittorici dei Dipinti su Tavola. Nuove Ricerche e Risultati

© Toscana Restauro Arte 01-08-2008

Mario Verdelli, Nadia Presenti e Alfredo Aldrovandi

MARIO VERDELLI. Specializzato nelle nuove tecnologie della conservazione dei dipinti, in particolare nelle tecniche del “sottovuoto”, svolge attività di ricerca e di consulenza per importanti musei statali e comunali italiani. Autore di numerose pubblicazioni scientifiche sulla conservazione, ha brevettato apparecchiature di ausilio al restauro. Ha tenuto nel 1997 e nel 2007 presso il Salone Internazionale del Restauro di Ferrara conferenze sulle nuove tecnologie.

NADIA PRESENTI. Diplomata all’Istituto d’Arte di Siena Duccio di Buoninsegna, ha perfezionato l’antica arte della costruzione dei dipinti a tempera su fondo oro presso la bottega in Siena del maestro Pettini (seguace di Icilio Federico Joni). Nel 1991 si diploma come Restauratore per i Beni Culturali presso il corso quadriennale di Formazione Professionale della Regione Toscana, dove si specializza nella conservazione e nel restauro dei dipinti su tela e su tavola sotto la direzione di Marco Ciatti e degli insegnanti dell’Opificio delle Pietre Dure. Dal 1991 lavora come professionista per importanti musei comunali e statali, enti pubblici ed ecclesiastici. Come esperta di opere d’arte è Perito e Ctu del Tribunale di Arezzo. Esegue importanti lavori di restauro su incarico diretto delle Soprintendenze per i Beni Artistici di Arezzo e Siena. È autrice di numerose pubblicazioni sulla conservazione dei dipinti.

ALFREDO ALDROVANDI. Laureato in Fisica presso la Facoltà di Scienze dell’Università degli Studi di Modena, dal 1983 presta servizio presso l’Opificio delle Pietre Dure di Firenze, Istituto per la Conservazione e il Restauro del Ministero per i Beni e le Attività Culturali.

Direttore coordinatore del Laboratorio di Fisica dell’Opificio è impegnato nella ricerca e nella messa a punto di metodologie e tecniche di indagini diagnostiche applicate alla conservazione e al restauro di opere d’arte.

Autore di diverse pubblicazioni sull’argomento, collabora in particolare con vari enti di ricerca per l’acquisizione di immagini radiografiche e tomografiche di opere d’arte con tecnologia digitale.

Svolge attività didattica presso la Scuola di Alta Formazione dell’Opificio delle Pietre Dure dove è incaricato per l’insegnamento di “Fisica dei materiali costitutivi dei manufatti” e di “Tecniche di indagine non invasive”.

Collabora con l’Università di Bologna dove attualmente è docente di “Tecniche Fisiche di Diagnostica” presso la Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali del corso di Laurea in Scienze e Tecnologie per la Conservazione e Restauro dei Beni Culturali.

ESTRATTO

Per distribuire uniformemente e in profondità i consolidanti, premessa alla risoluzione dei problemi di distacchi e sollevamenti della pellicola pittorica cui spesso sono soggetti i dipinti su tavola, si sono progettate attrezzature che hanno consentito il consolidamento in sottovuoto localizzato direttamente nel luogo di conservazione e senza smontare l’opera d’arte. Per la ricerca di nuove e perfezionate tecniche di restauro, si è studiata, a pressione atmosferica e in sottovuoto, la rintracciabilità dei consolidanti all’interno degli strati pittorici, utilizzando tecniche radiografiche che hanno impiegato consolidanti radiopachi, integrate con tecniche termografiche che hanno sfruttato le differenze di temperatura del consolidante e della superficie del dipinto. Utilizzando le indagini termografiche, si sono potuti letteralmente vedere, e in tempo reale, l’espansione del consolidante e i processi di consolidamento sotto gli strati pittorici dei dipinti su tavola.

INTRODUZIONE

Accade che in certi dipinti già restaurati, e quindi esposti al pubblico, si possano ripresentare, dopo pochi anni, ma in alcuni casi anche dopo pochi mesi, distacchi e sollevamenti della pellicola pittorica e della preparazione, con il rischio di perdere al minimo trauma parti importanti dell'immagine (figure 1, 2).

Tali dipinti su tavola possono essere soggetti a questa patologia per la loro costruzione, scelta dei materiali e per le particolari vicissitudini conservative: un'eccessiva esposizione protrattasi per anni ad alta umidità relativa (UR) può generare, per altrettanto tempo, ripetuti sollevamenti del colore, quando si modificano le condizioni ambientali, per esempio, a causa di una nuova diversa collocazione e quindi diversi valori di UR.



Figura 1. Pinacoteca Nazionale di Siena, in fondo, deposizione del Sodoma.



Figura 2. Particolare della deposizione del Sodoma che evidenzia distacchi e sollevamenti della superficie pittorica.

Ancora oggi arrestare il degrado delle preparazioni è molto difficile per la naturale difficoltà di far penetrare il consolidante attraverso gli strati del colore, che generalmente non sono igroscopici.

I mezzi tradizionali di consolidamento, come le iniezioni locali eseguite a pressione atmosferica, non sono sempre risolutivi e, a volte, generano nuove tensioni, perché si creano nuovi punti di forza circoscritti. Inoltre, con le iniezioni manuali a pressione atmosferica, può succedere che il liquido consolidante, spinto a pressione sotto il colore, possa rompere la pellicola pittorica sollevandola e frantumandola, e dove la *craquelure* è troppo stretta, sia necessario forare il colore, l'ago nell'introdursi può scheggiare un colore particolarmente rigido e spesso; oltre a ciò, accade frequentemente che il liquido trovi difficoltà a scorrere e impregnare la preparazione, quindi tracimi abbondantemente all'esterno, costringendo ad interventi ripetuti per ogni zona decoesa.

Mentre, una tecnica moderna come l'impregnazione generale con colletta a caldo in sottovuoto non può essere applicata alle tavole restaurate e verniciate, in quanto l'esposizione prolungata all'umidità ed al calore del consolidante naturale riscaldato rovinerebbe la vernice di protezione della pellicola pittorica e verrebbero cancellati gli eventuali ritocchi, soprattutto se eseguiti con acquarelli; senza contare l'inattuabilità del trattamento per le tavole molto indebolite dall'attacco degli insetti xilofagi e per le preparazioni molto sensibili all'azione congiunta dell'umidità e del calore.

Una soluzione alternativa alle tecniche sopra citate per il consolidamento degli strati pittorici di quei dipinti su tavola che sono stati restaurati, ma che presentano nuovi sollevamenti del colore, consiste nell'attraversare fisicamente gli strati pittorici con sottili aghi di siringhe e d'iniettare il consolidante sotto il colore direttamente nella preparazione a gesso e colla, ma con l'opera in sottovuoto¹ (Figura 3).

Con le iniezioni in sottovuoto la tavola è inserita dentro un contenitore (sacco o busta) costituito da una membrana trasparente, sottile e plastica (generalmente melinex o nylon), che mantiene i sollevamenti e le creste del colore, sempre ben visibili, sotto una debole pressione e senza pericolo di schiacciarli, in quanto la pressione è distribuita in misura uguale tanto sulla cima che alla base di queste irregolarità. Tali condizioni fanno sì che quando l'ago è introdotto il colore non si scheggia o si frammenti. Il consolidante si distribuisce per l'azione del sottovuoto sulla membrana di contenimento parallelamente agli strati pittorici, senza creare accumuli e sollevamenti pronunciati del colore. Il liquido, trovando una minore resistenza per effetto del sottovuoto, si espande più facilmente e quindi in misura maggiore delle corrispettive iniezioni a pressione atmosferica; così l'operazione è ridotta ai minimi interventi con tutto il vantaggio per l'integrità della pellicola pittorica.

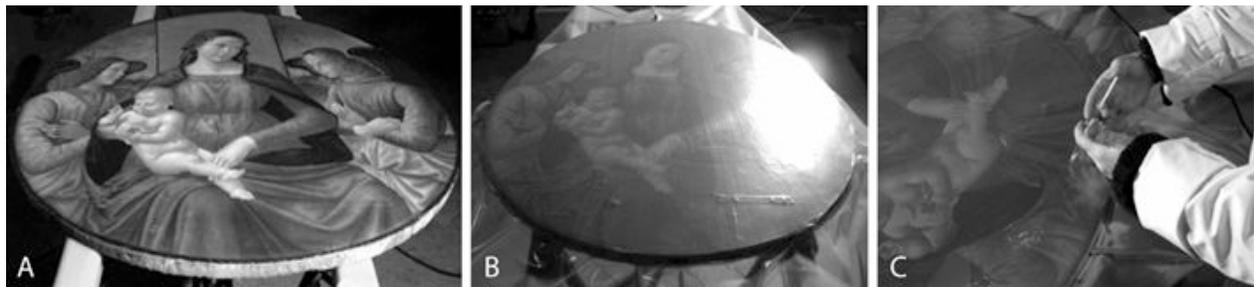


Figura 3. a) Tondo di S. Mainardi. Sec XV, Pinacoteca Musei Civici di San Gimignano (Si).
b) Sottovuoto del dipinto su tavola.
c) Iniezioni di colletta sotto la pellicola pittorica in sottovuoto.

Queste interessanti prestazioni sono state raggiunte grazie anche ad una strumentazione di sottovuoto che è stata ideata e realizzata dagli autori. Più complessa di quella usata abitualmente nel campo del restauro, la strumentazione accoppia alla capacità di distribuire omogeneamente la pressione sulla superficie del dipinto, la possibilità di effettuare verifiche e misure del grado di vuoto in differenti parti dell'opera, senza dover introdurre altra strumentazione, senza interrompere le operazioni di restauro in corso e senza alterare in alcun modo la disposizione del dipinto e dell'apparecchiatura (Figura 4).

Tuttavia la tecnica appena descritta non è applicabile ai dipinti di grandi dimensioni, e lo smontaggio dell'opera per essere introdotta nella busta per il sottovuoto la rende inadatta nelle operazioni di manutenzione in loco.

Per risolvere questo problema, abbiamo recentemente perfezionato un sistema di sottovuoto localizzato e una metodologia che permette il consolidamento dei dipinti su tavola, senza doverli smontare, operando direttamente nel luogo di conservazione, evitando così tutti i rischi che comporta il trasferimento.

Con l'opera disposta in verticale, possiamo intervenire in tempi brevi, con efficacia e praticità, senza rimuovere le vernici di protezione e le eventuali integrazioni.

Questa tecnica nel campo del restauro è stata utilizzata da alcuni anni per il consolidamento delle pitture murali (affreschi) e si avvale di un telaio collegato alla pompa aspirante, cui è stata applicata una membrana trasparente²; creato il vuoto parziale, si procede poi al consolidamento.

In realtà nel caso dei dipinti su tavola bisogna considerare le differenze di questi manufatti rispetto agli affreschi, sia per quanto riguarda i materiali, sia per il grado di porosità degli strati pittorici e preparatori; inoltre, l'anisotropia delle superfici del supporto ligneo e il delicatissimo stato del colore con rotture e sollevamenti pronunciati e pronti a frantumarsi irreversibilmente al minimo trauma, da una parte rendono difficile l'innesco del sottovuoto (c'è sempre qualche piccola perdita), dall'altra, in pratica, rendono facilissimo causare più danni di quanti s'intenda ripararne.

Per questi motivi è stato necessario progettare un nuovo telaio, flessibile, sufficientemente morbido e leggero, da poter essere appoggiato sopra i sollevamenti del colore senza frantumarli. Si è dovuto poi ideare e realizzare un sistema di aspirazione efficace ma poco ingombrante, per poter adoperare membrane plastiche trasparenti con una faccia siliconata, facili da montare e smontare sul telaio.

Dopo aver esaminato molti materiali plastici, si sono individuati quelli adatti allo scopo, e dopo molte prove su modelli di dipinti, siamo riusciti per la prima volta a realizzare in modo stabile, graduando la depressione in maniera molto fine tra la pellicola trasparente e la superficie dei modelli, un basso grado di vuoto (circa -5kPa, -10kPa). Durante queste esperienze e a mano a mano che progredivamo nella tecnica, abbiamo costruito una gamma di telai di varie forme e dimensioni, alcuni circolari, altri rettangolari o quadrati.

Successivamente a queste applicazioni su modelli, indispensabili per perfezionare la strumentazione e per stabilire l'esatta sequenza delle procedure, siamo passati finalmente alle applicazioni su autentici dipinti (Figura 5), ma non prima di aver individuato il prodotto consolidante adatto. Quello che è risultato più idoneo nell'atto di manutenzione, compatibile con i materiali originali, e che non ha alterato la vernice e i ritocchi, è stata la colletta a caldo³, ma solo se applicata ad una temperatura moderata (da 50 °C a 55 °C) e rimossa dalla superficie pittorica entro breve tempo (qualche minuto). Viceversa, per ovvi motivi di compatibilità con le vernici, e sempre riguardo all'atto della manutenzione, tutti i consolidanti in soluzione di solventi organici sono inapplicabili.

Contestualmente alla messa a punto delle apparecchiature e delle metodologie, abbiamo voluto condurre degli studi per ottenere una maggiore conoscenza scientifica di tutti gli aspetti che riguardano il comportamento e l'efficacia delle tecniche più innovative di consolidamento del colore in sottovuoto, ma anche di quelle tradizionali. A tale scopo abbiamo individuato specifiche metodologie d'indagine diagnostica e, proprio durante queste ricerche, finalizzate al perfezionamento e all'innovazione delle tecniche di introduzione dei consolidanti, sono emersi alcuni nuovi elementi che riteniamo interessante divulgare.

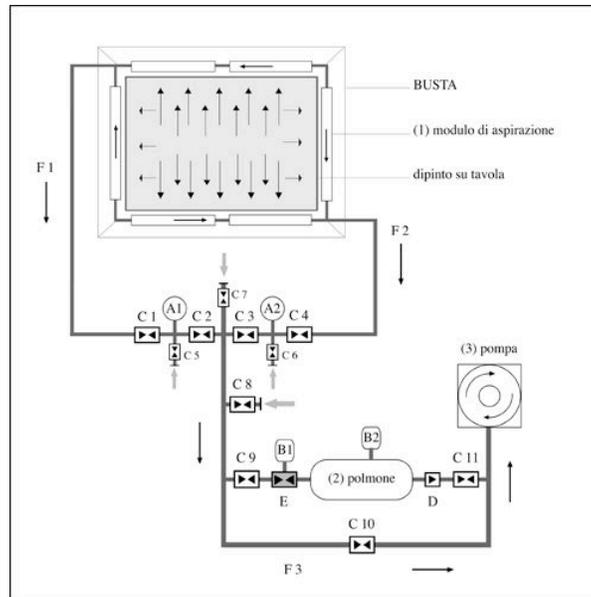


Figura 4. Schema delle attrezzature.

A1 e A2 – vacuometri. B1 e B2 - vuotostati elettronici programmabili. C1, C2, C3, C4, C9, C10 e C11 - valvole con passaggio dell'aria in entrambe le direzioni. C5, C6, C7 e C8 - valvole di aspirazione dell'aria. D - valvola di non ritorno, l'aria passa solo nella direzione della freccia. E - elettrovalvola, comandata dal vuotostato B1.

F1 e F2 - tubi di aspirazione, lunghi circa 4 m del diametro interno di 0,85 cm. F3 - tubo di aspirazione della pompa, lungo circa 6 m e del diametro interno di 1,3 cm. (1) modulo di aspirazione - struttura modulare per l'estrazione dell'aria di 35 cm di lunghezza e del diametro di 2 cm. (2) polmone - serbatoio della capacità di 50 litri. (3) pompa a vuoto della portata di 9 m³/h (massimo grado di vuoto -95 kPa). Le frecce indicano la direzione dello spostamento dell'aria.



Figura 5. Consolidamento in verticale del colore con il sottovuoto localizzato di un dipinto su tavola di Benozzo Gozzoli (1466), eseguito all'interno della Pinacoteca dei Musei Civici di San Gimignano (Siena).

INDAGINI SCIENTIFICHE DEI COMPORTAMENTI DEL CONSOLIDANTE, IN SOTTOVUOTO E A PRESSIONE ATMOSFERICA

Aspetti generali

Per circa tre anni dal 1997 al 2000 abbiamo condotto studi di misurazione dell'espansione nella preparazione della coltella a caldo, sia in presenza che in assenza di pressione atmosferica, utilizzando dei modelli di dipinti su tavola⁴. In questi modelli gli strati pittorici erano stati simulati da una pellicola plastica trasparente che ha permesso la visione dell'espansione dei consolidanti. Questi, opportunamente colorati con Blu di Metilene, sono stati iniettati, con siringhe, sotto la pellicola trasparente, in sottovuoto e a pressione atmosferica; si sono potute così rilevare nella preparazione dei modelli le tracce lasciate dal consolidante, consentendo precise misurazioni e comparazioni.

In sintesi, la ricerca, che ha impegnato numerosi test e campioni, ha dimostrato chiaramente: a) che nei modelli l'estensione della zona impregnata dal consolidante iniettato in sottovuoto è mediamente sei volte maggiore della rispettiva estensione del consolidante iniettato a pressione atmosferica, b) che sono ininfluenti ai fini dell'espansione le differenti pressioni di sottovuoto (Figura 6). Quello che varia alle differenti pressioni è la velocità di espansione del consolidante. Tale velocità non è utile ai fini del consolidamento, perciò se ne deduce che possiamo scegliere nella pratica di restauro il grado di vuoto minore, diminuendo così i rischi di stress per l'opera d'arte.

Esauriti questi studi, abbiamo voluto ricercare tali verifiche e misurazioni in vere opere d'arte, impresa che è tuttora in fase di realizzazione, che ha presentato notevoli difficoltà tecniche e che, a quanto ci risulta, non è stata mai praticata nel campo del restauro per le preparazioni dei dipinti su tavola.

Allo scopo di valutare dettagliatamente il comportamento dei consolidanti durante le fasi di introduzione, sia in presenza che in assenza del sottovuoto, sono state utilizzate due tecniche differenti: la prima ha previsto l'utilizzo di un consolidante radiopaco identificabile nelle radiografie; la seconda ha considerato l'utilizzo di consolidanti con temperature diverse da quelle della superficie pittorica, individuabili con un'apposita telecamera termografica che è in grado di leggere le più piccole variazioni di temperatura.

Queste tecniche d'indagine, come già accennato, erano state pensate in principio per misurare nei dipinti l'espansione dei consolidanti che si era osservata e misurata nei modelli, ma la sola possibilità di eseguire tali verifiche in vere opere d'arte è stata di per sé così interessante, complessa e insita di risultati, anche inattesi, che le comparazioni delle misure sono passate per il momento in secondo piano e non sono state presentate in questo lavoro perché i dati sono ancora in fase di acquisizione; mentre, tuttora, in questo periodo di studi innovativi, siamo maggiormente impegnati ad esplorare tutte le possibilità e le implicazioni operative comprese nelle tecniche di indagine diagnostica.

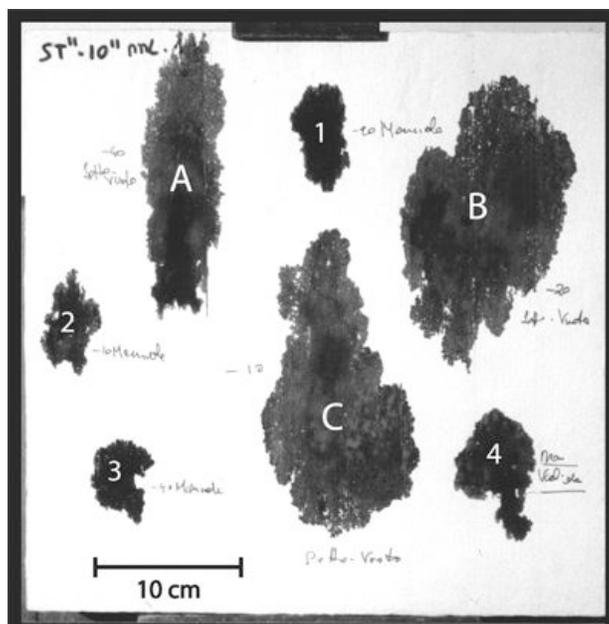


Figura 6. Modello di tavola dipinta di 40 cm x 40 cm. Risultati dell'espansione delle iniezioni di 2 ml di colletta colorata di blu. In sottovuoto alle seguenti pressioni: (a) -40 kPa, (b) -20 kPa, (c) -10 kPa. A pressione atmosferica (1, 2, 3, 4).

Mappatura radiografica di consolidanti radiopachi

Come primo passo, abbiamo radiografato un dipinto del sec. XVII ad olio su tavoletta di rovere (Figura 7a), con preparazione a gesso e colla di spessore medio 0,4 mm, utilizzando il bario solfato (40% del peso totale) in sospensione con la colletta a caldo (60%) come mezzo di contrasto ai raggi X. Il bario solfato, oltre ad essere radiopaco, non ha particolari precauzioni per il modo di utilizzo, se non quello di tutte le sostanze chimiche (in particolare delle polveri: inalazione sempre sconsigliata pur essendo una sostanza inerte). Il bario solfato è difficilmente assorbibile dall'organismo per la sua scarsa solubilità, non ha effetti dannosi ed è classificato come sostanza chimica non nociva⁵.

Prima dell'applicazione abbiamo condotto numerosi test al fine di operare conoscendo la capacità consolidante, il comportamento ed eventuali effetti collaterali del nuovo composto; ed è qui che abbiamo registrato un fatto interessante. Dopo aver costruito dei modelli di preparazione a gesso e colla e averli degradati artificialmente sottoponendoli a ripetuti lavaggi con acqua, fino a renderli molto decoesi e polverulenti, abbiamo iniettato in sottovuoto il composto bario-colletta attraverso una membrana trasparente di melinex siliconato; successivamente abbiamo riscaldato con il termocauterico a 50 °C per qualche minuto, con lo scopo di velocizzare il processo di gelificazione e quindi di consolidamento. Lo stesso procedimento è stato eseguito parallelamente e su un altro campione, utilizzando solo la colletta per il test di confronto.



Figura 7. Particolare di un dipinto su tavola. (a) In luce radente, la zona tratteggiata evidenzia un sollevamento di preparazione e colore. (b) Immagine radiografica dello stesso particolare prima dell'intervento di consolidamento. (c) Dopo le iniezioni con bario solfato e colletta, la radiografia nella zona tratteggiata rende visibile e misurabile l'espansione del consolidante all'interno degli strati preparatori.

Esaminando il test trattato con il bario-colletta abbiamo osservato la ricostruzione pressoché perfetta della preparazione che, sottoposta alla demolizione con il bisturi, è apparsa nuovamente coesa e in misura maggiore del test con sola colletta. Abbiamo poi voluto calcolare la forza adesiva del bario-colletta, misurando con il dinamometro il grado di rottura alla trazione dei giunti di numerosi campioni di preparazione saldati con questo prodotto.

Anche in questo caso i risultati sono stati identici se non superiori a quei test di paragone eseguiti con la sola colletta (nel test con bario-colletta, la frattura dei campioni non è avvenuta nel punto di giunzione, ma ha ceduto internamente la preparazione dei campioni). Sulla base di questi risultati, abbiamo approntato dei nuovi e differenti test con concentrazioni minori di bario solfato per rendere il composto più fluido; mentre, in un primo momento, la concentrazione del 40% (il composto è meno fluido e presenta delle difficoltà nel passare attraverso i piccoli aghi delle siringhe da insulina adoperate abitualmente nel nostro laboratorio) è stata utilizzata solo per rendere il consolidante più facilmente individuabile nella prima indagine radiografica (Figura 7c). Successivamente, la concentrazione del bario nella colletta è stata ridotta al 10% in molte delle indagini scientifiche susseguenti.

I test sono stati realizzati costruendo diverse pasticche in polvere pressata, dello spessore di 2 mm, di una preparazione risalente al sec. XV⁶. Alcune pasticche sono state imbibite con bario-colletta (bario 10%) e le rimanenti con colletta a caldo. Evaporato l'elemento acquoso, i campioni sono stati esaminati al microscopio bioculare.

È risultato che tutti i campioni trattati con bario-colletta (Figura 8b) hanno sempre mostrato un'eccezionale riduzione delle microfessurazioni che si creano in fase di desorbimento dell'umidità, rispetto ai corrispettivi trattati con colletta (Figura 8a).

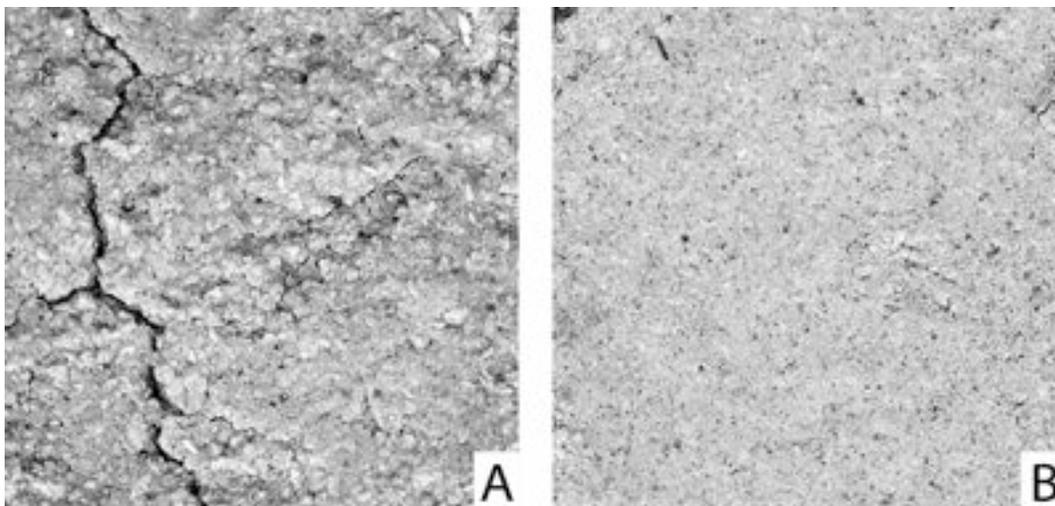


Figura 8. (a) Macrofotografia del campione delle dimensioni di 1 cm² trattato con colletta.
 (b) Macrofotografia del campione delle stesse dimensioni trattato con bario solfato e colletta.

Questo dato dimostra chiaramente che le preparazioni consolidate con bario-colletta, avendo una diminuita microporosità, offrono una minore esposizione alla penetrazione dell'umidità e nel contempo sono più resistenti alle sollecitazioni meccaniche.

Certamente, con queste prime ricerche non si è esaurita la conoscenza di tutte le caratteristiche chimico-fisiche del composto bario-colletta, di cui il componente bario solfato è un additivo inerte e stabile e un *filler* (riempitivo) che nel nostro caso si è dimostrato di altissima qualità (vedi nota 5), con risultati molto positivi nel migliorare le prestazioni degli attuali consolidanti. In ogni modo ci pare importante evidenziare che l'uso dei *fillers* nei prodotti consolidanti, indipendentemente dal prodotto specifico utilizzato, è un aspetto particolarmente interessante e tale da meritare attenzione.

Tornando al dipinto in oggetto (Figura 7a), l'abbiamo prima radiografato e poi l'abbiamo inserito in una busta costruita con melinex e, realizzato il sottovuoto, abbiamo praticato un'iniezione del composto bario-colletta (4/6 in peso) all'interno di un sollevamento di colore situato in un'area che la radiografia aveva mostrato essere abbastanza trasparente alla radiazione (Figura 7b).

Terminate le operazioni di consolidamento, la tavoletta è stata di nuovo radiografata, e le immagini, le prime nel loro genere, hanno mostrato chiaramente i contorni dell'espansione del bario-colletta, dimostrando la possibilità di misurare e documentare a scopo scientifico la diffusione dei consolidanti sotto il colore (Figura 7c).

Dopo questo risultato iniziale, siamo passati a studi di fattibilità di riprese radiografiche con concentrazioni minori del marcatore. Naturalmente non è stato necessario iniettare nei dipinti il consolidante radiopaco, ma è bastato costruire dei marcatori di varie forme (Figura 9a) realizzati con carta assorbente sufficientemente imbibita di bario-colletta⁷, con differenti concentrazioni: 5%, 10% e 20%.

I marcatori, così preparati, sono stati appoggiati sulle superfici pittoriche dei dipinti e poi radiografati (Figura 9b). Ne è risultato, che in dipinti su tavola come quello di Sebastiano Mainardi del 1490 conservato nella Pinacoteca dei Musei Civici di San Gimignano (Siena), la cui imprimitura si è rivelata alla radiazione piuttosto opaca, solo i marcatori al 20% sono stati rilevati nell'immagine radiografica e queste tracce sono così trasparenti da far passare le informazioni sottostanti (Figura 9d), mentre i marcatori al 10% e 5% sono completamente invisibili (Figura 9b). Questo vuol dire che non sussistono pericoli d'inquinamento radiografico nel caso che volessimo eseguire davvero un consolidamento con bario-colletta e con concentrazione del bario al 10%; perciò in questo dipinto per poter radiografare l'espansione del consolidante, si dovrà aumentare la percentuale di bario nella colletta almeno del 25% e di conseguenza accettare un ridotto grado di fluidità del composto.

In quei casi, invece, in cui la preparazione del dipinto è abbastanza trasparente alla radiazione, nulla c'impedisce di ricercare e studiare *fillers* con le stesse caratteristiche del bario solfato, ma non necessariamente radiopachi, così da poter utilizzare le migliori proprietà consolidanti, quando non c'è la necessità del marcamento radiografico.

È comunque evidente che i risultati correnti fanno di questa particolare metodologia uno strumento diagnostico di grande efficacia, permettendo di operare nella pratica di restauro su basi di precise verifiche scientifiche. Gli autori, comunque, intendono ancora limitare l'eventuale utilizzo del bario alla sola ricerca scientifica.

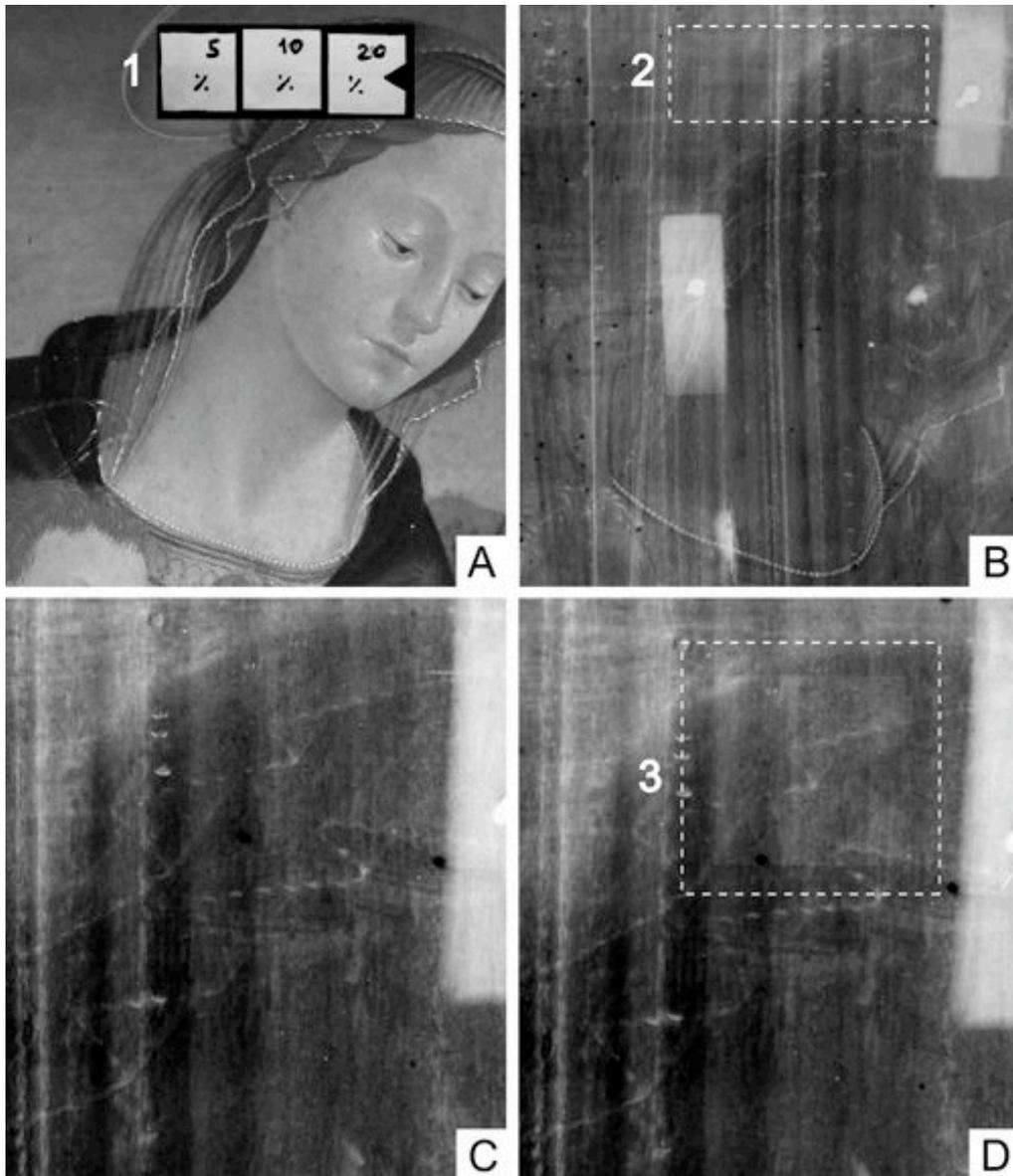


Figura 9. Particolare del dipinto su tavola di S. Mainardi della Pinacoteca dei Musei Civici di S. Gimignano. (a) Sopra la superficie pittorica sono stati collocati dei marcatori radiopachi di forma quadrata, imbibiti (da sinistra) di bario 5%, 10% e 20% (del peso totale) e colletta. (b) Radiografia del particolare precedente, solo il marcatore di destra al 20% di bario è rilevato. (c) Ingrandimento della radiografia (b) ma senza il marcatore. (d) Stesso ingrandimento radiografico di (c) con il marcatore al 20% di bario, sono perfettamente leggibili le informazioni sottostanti il marcatore.

Tecnica termografica per la verifica del consolidamento

L'altra strada, quella della termografia, si è dimostrata altrettanto interessante e produttiva.

La tecnica termografica è un metodo d'indagine in grado di rilevare immagini di superfici in base alle diverse temperature delle stesse. Il principio si basa sul fatto che ogni corpo a temperatura superiore allo zero assoluto emette o assorbe radiazioni elettromagnetiche nella banda dell'infrarosso in ragione della sua temperatura, fino al raggiungimento dell'equilibrio termico. La restituzione dell'immagine è in genere in bianco e nero dove a temperature più elevate corrispondono zone più luminose e viceversa. Per una lettura e una interpretazione più agevole dell'immagine, questa può essere restituita in una sorta di falsi colori relativi a range di temperatura prestabiliti.

L'idea è molto semplice, ed era maturata da tempo⁸; infatti, conoscendo la sensibilità delle moderne telecamere termografiche che registrano anche piccolissime variazioni di temperatura (inferiori al decimo di °C) e che possiedono elevate risoluzioni spaziali, è stato possibile letteralmente 'vedere' la distribuzione della coltella iniettata sotto gli strati pittorici mediante la sua mappa termica.

Acquisire questa tecnica d'indagine era indispensabile per sottoporre a test alcuni metodi di consolidamento che in passato avevamo sperimentato su modelli di dipinti. Allo stesso modo volevamo sfruttare al meglio gli aspetti operativi più interessanti della termografia, che sono quelli di poter vedere in tempo reale, attraverso le immagini a monitor, ciò che la telecamera registra, ottenendo un filmato completo.

Abbiamo cominciato a studiare le possibilità operative con questa tecnica utilizzando una ricostruzione fedele – tavola, tela, preparazione a gesso e colla, tempera, vernici - di un dipinto su tavola del sec. XIV, che presentava nel bordo in basso una decoesione della preparazione dal supporto ligneo di ampiezza 9,0 cm x 2,5 cm (Figura 10a).

Per questo scopo è stata impiegata una telecamera CCD a PtSi con sensibilità spettrale da 3 µm a 5 µm (modello Nikon Laird S270) ancorata ad uno stativo e collocata perpendicolarmente al piano di lavoro in cui era posizionato il dipinto, scelto di dimensioni contenute per essere facilmente maneggevole in questi primi test.

La sensibilità della telecamera era stata tarata in un intervallo di temperatura con valore medio leggermente al di sopra di quella ambientale (nello specifico da 22,7 °C a 29,8 °C), così da poter evidenziare scostamenti dalla temperatura ambiente, visualizzata in grigio, con zone più scure per temperature inferiori e zone più luminose corrispondenti a temperature più elevate.

Il primo test consisteva nel rintracciare le decoesioni degli strati pittorici, prima evidenziandole, poi misurandone l'estensione.

La superficie pittorica è stata stimolata termicamente, in pratica è stata leggermente riscaldata alla temperatura di circa 34 °C per mezzo di un flusso d'aria calda proveniente da fon (Figura 10b); in fase di raffreddamento la telecamera ha registrato una temperatura maggiore nella decoesione, perché l'aria presente nel distacco si è comportata da isolante, ritardando il riequilibrio termico⁹. Quindi, nell'immagine termografica, i sollevamenti e le decoesioni sono apparsi quasi bianchi, ovvero più 'caldi' rispetto alla zona circostante che si trovava ad un diverso livello termico (Figura 10c). Questo risultato è già notevole se pensiamo a tutte le implicazioni che può comportare nel campo della conservazione dei dipinti, specialmente se consideriamo che non tutti i distacchi sono facilmente rintracciabili con le indagini diagnostiche attualmente utilizzate.

Verificata la posizione e l'ampiezza della decoesione, abbiamo praticato sul dipinto, adoperando una siringa da insulina, tre iniezioni a pressione atmosferica di coltella a caldo.

Per consolidare tutta la decoesione, abbiamo diviso l'iniezione in tre parti: in alto (la prima), al centro e in basso (l'ultima); va detto che utilizzando il sottovuoto sarebbe bastata una sola iniezione per distribuire il consolidante, ma non volevamo complicare l'esperimento con l'ingombro delle ulteriori attrezzature, volevamo, per il momento, stabilire un principio metodologico, che, una volta provato, può essere applicato in tutti gli aspetti operativi del consolidamento.

Quando abbiamo cominciato ad introdurre il consolidante riscaldato, questo si differenziava molto bene nella scala di grigio dell'immagine termografica, apparendo bianco sul fondo grigio (Figura 10d).

Abbiamo poi rilevato che dopo ogni iniezione la zona trattata da chiara diventava scura (Figure 10e, 10f). Ora, terminato il consolidamento, tutta l'area della decoesione era ben evidenziata da una zona quasi nera nella scala di grigio, dai contorni molto ben distinguibili dalla superficie pittorica del dipinto (figura 10g). Questo fenomeno era causato dalla componente acquosa del consolidante che raffreddandosi registrava una temperatura sensibilmente più bassa della tavola; in sostanza abbiamo osservato sul monitor il raffreddamento dovuto al calore latente di evaporazione dell'acqua.

Successivamente, con il passare dei minuti - quasi venti dal termine del consolidamento - la zona scura, nella immagine in scala di grigio, si è attenuata fino a raggiungere la tonalità della zona circostante, indicando un riequilibrio termico, tanto che per vedere evidenziata l'umidità residua, presente ancora all'interno degli strati pittorici, occorre innalzare la temperatura superficiale del dipinto di pochi gradi (Figura 10h). Naturalmente con la completa evaporazione dell'umidità tale fenomeno non è più registrabile.

Le implicazioni dei risultati di questa tecnica comportano due momenti diversi d'indagine: la fase 'calda', con l'innalzamento della temperatura superficiale, ci fa vedere la velocità di espansione e l'ampiezza della zona trattata con la colletta a caldo. La fase 'fredda', con l'abbassamento della temperatura superficiale per i fenomeni di desorbimento dell'acqua, ci permette di misurare più comodamente e forse anche in modo più preciso l'espansione del consolidante: la nostra attenzione ora non è più rivolta alle operazioni di consolidamento e la mano, la siringa, l'ago non entrano (disturbando) nel campo di azione della telecamera e di conseguenza nella registrazione delle immagini. Inoltre, la fase 'fredda' ci permette di misurare i tempi di consolidamento, in questo caso della colletta.

Controllare questi tempi è un fatto, se ci pensiamo bene, molto importante ai fini di un corretto operare e può rinnovare le tecniche di restauro. In sostanza possiamo letteralmente 'vedere', per la prima volta, in precisi termini scientifici e non più empiricamente, lo stato di consolidamento e il suo evolvere nel tempo fino al termine del processo. Nel caso, invece, che il consolidamento non riuscisse omogeneo, l'immagine termografica mostrerebbe i punti di decoesione più chiari (caldi) nella scala di grigio di riferimento (Figura 10i).

Dopo questo test, siamo tornati a nuove verifiche sul dipinto citato di Sebastiano Mainardi che avevamo radiografato con i marcatori e che presentava numerose decoesioni degli strati preparatori e pittorici a causa delle contrazioni del supporto ligneo. L'opera, come già detto, è esposta al pubblico presso i Musei Civici di San Gimignano, perciò la nostra scelta è stata quella di limitarci al consolidamento del colore con metodologie che non compromettessero la vernice finale e i ritocchi dei precedenti interventi di restauro.

Il dipinto, di forma circolare, è stato consolidato presso i locali del museo con iniezioni di colletta a caldo impiegando due tecniche differenti: in un procedimento l'opera è stata inserita dentro la busta ed è stato realizzato il sottovuoto, poi sono state praticate delle iniezioni attraverso la membrana di contenimento e attraverso una rottura del colore direttamente sotto la pellicola pittorica (Figura 11); l'altro procedimento ha utilizzato la tecnica del sottovuoto localizzato tramite un telaio mobile applicato a porzioni circoscritte di superficie pittorica (Figura 12), anche in questo caso si è iniettato il consolidante sotto il colore attraversando una membrana trasparente.

Questi due sistemi di consolidamento sono stati monitorati e guidati dalla visione termografica per poter fare delle verifiche e dei confronti (Figure 11, 12). Come nel lavoro descritto in precedenza anche in questo caso si sono registrate per ogni iniezione la fase 'calda' (Figura 13) e la fase 'fredda' (figura 14d). In quest'ultima abbiamo 'visto' e registrato il desorbimento dell'elemento acquoso del consolidante sotto l'azione di un particolare termocauterico che usiamo per tenere premuti per l'adesione al supporto gli strati pittorici trattati.

Il termocauterico non era riscaldato, in quanto è bastata esercitare la pressione per letteralmente 'vedere' assorbita in pochi minuti gran parte dell'umidità. Ci ha fatto anche piacere constatare che i tempi del trattamento di adesione, che abbiamo appena descritto, e che erano stati calcolati sempre in modo intuitivo, sono stati poi confermati dalle indagini termografiche.

Tra le tecniche d'indagine descritte la termografia presenta aspetti interessanti e ci pare versatile e promettente di risultati se applicata alla ricerca scientifica nel campo del consolidamento dei dipinti, con

la possibilità di realizzare indagini diagnostiche prima, durante e dopo il consolidamento delle superfici pittoriche, di verificare il comportamento dei consolidanti e delle tecniche di restauro, e la possibilità di realizzare ricerche nel campo dei materiali costituenti i dipinti, studiandone le differenze di temperatura in relazione alle variazioni dell'umidità.

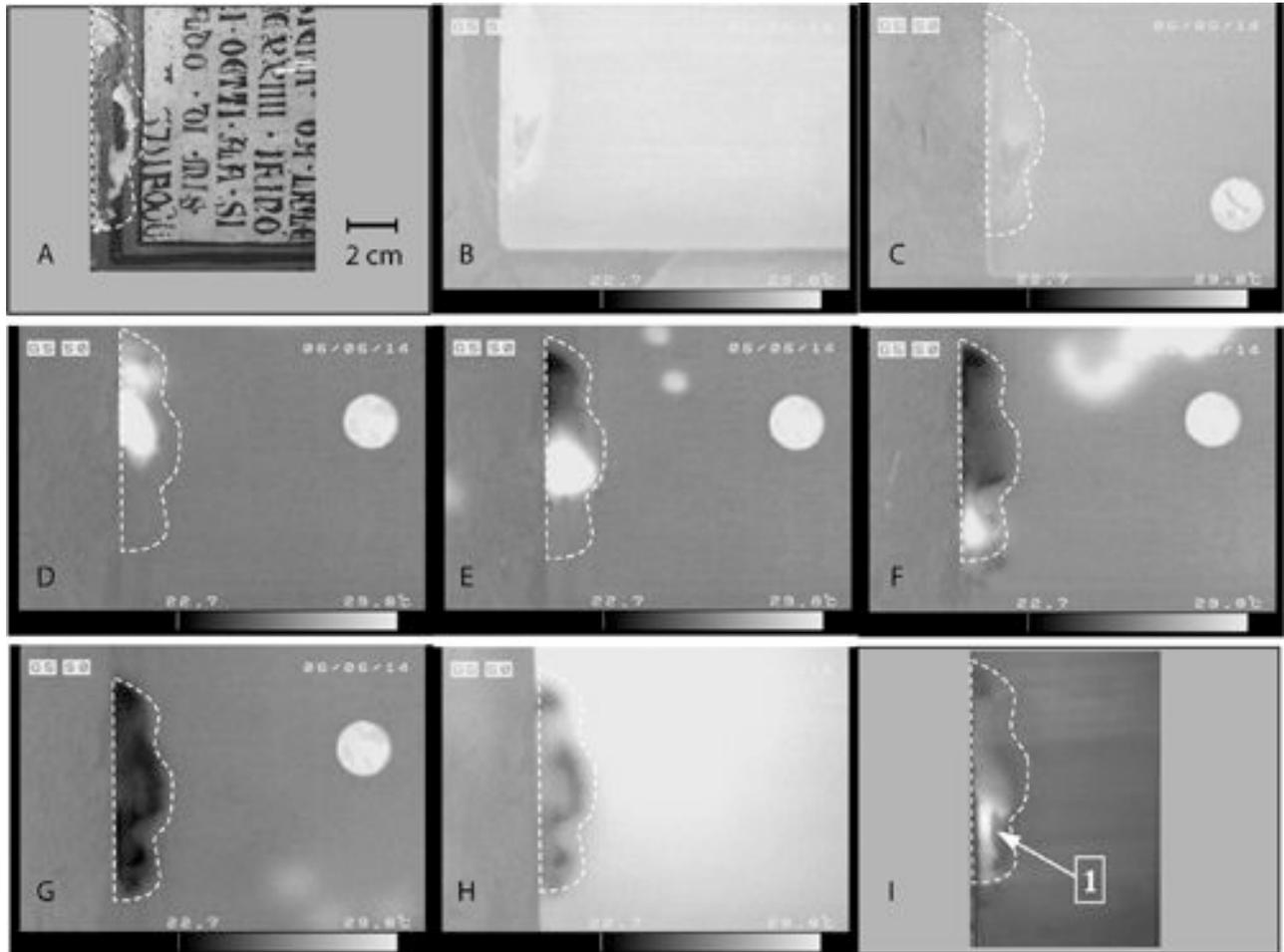


Figura 10. Indagine termografica durante il consolidamento di un dipinto su tavola.

- (a) Particolare in luce visibile della tavola dipinta; la parte tratteggiata delimita una decoesione degli strati pittorici.
- (b) Fase di riscaldamento della pellicola pittorica per evidenziare con la termografia la decoesione.
- (c) Fase di raffreddamento. La parte più chiara tratteggiata evidenzia la decoesione.
- (d) Prima iniezione dove si evidenzia la distribuzione della colletta per la temperatura più elevata.
- (e) Seconda iniezione. Si evidenzia anche la prima iniezione già in fase di raffreddamento.
- (f) Terza iniezione, idem.
- (g) Si evidenzia il raffreddamento della colletta a 10 minuti dalla fine delle iniezioni.
- (h) Fase di evaporazione della componente acquosa del consolidante (trascorsi 8 minuti dalla g e 18 dalla f); la superficie è stata riscaldata per evidenziare ancora l'umidità del consolidante.
- (i) Fase di riscaldamento-raffreddamento, dopo una settimana dalla fase h; la freccia 1 evidenzia una decoesione non risolta nella precedente fase f.



Figura 11. Iniezione di consolidante, in sottovuoto, sotto la pellicola pittorica nel dipinto circolare di S. Mainardi.



Figura 12. Consolidamento del colore con il sottovuoto localizzato sotto il controllo della telecamera termografica.

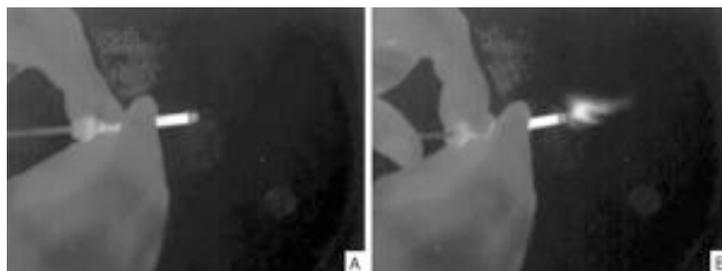


Figura 13. (a) Immagine termografica nel momento dell'iniezione della colletta a caldo in sottovuoto localizzato. (b) La termografia evidenzia la fase di espansione sotto gli strati pittorici del consolidante riscaldato.

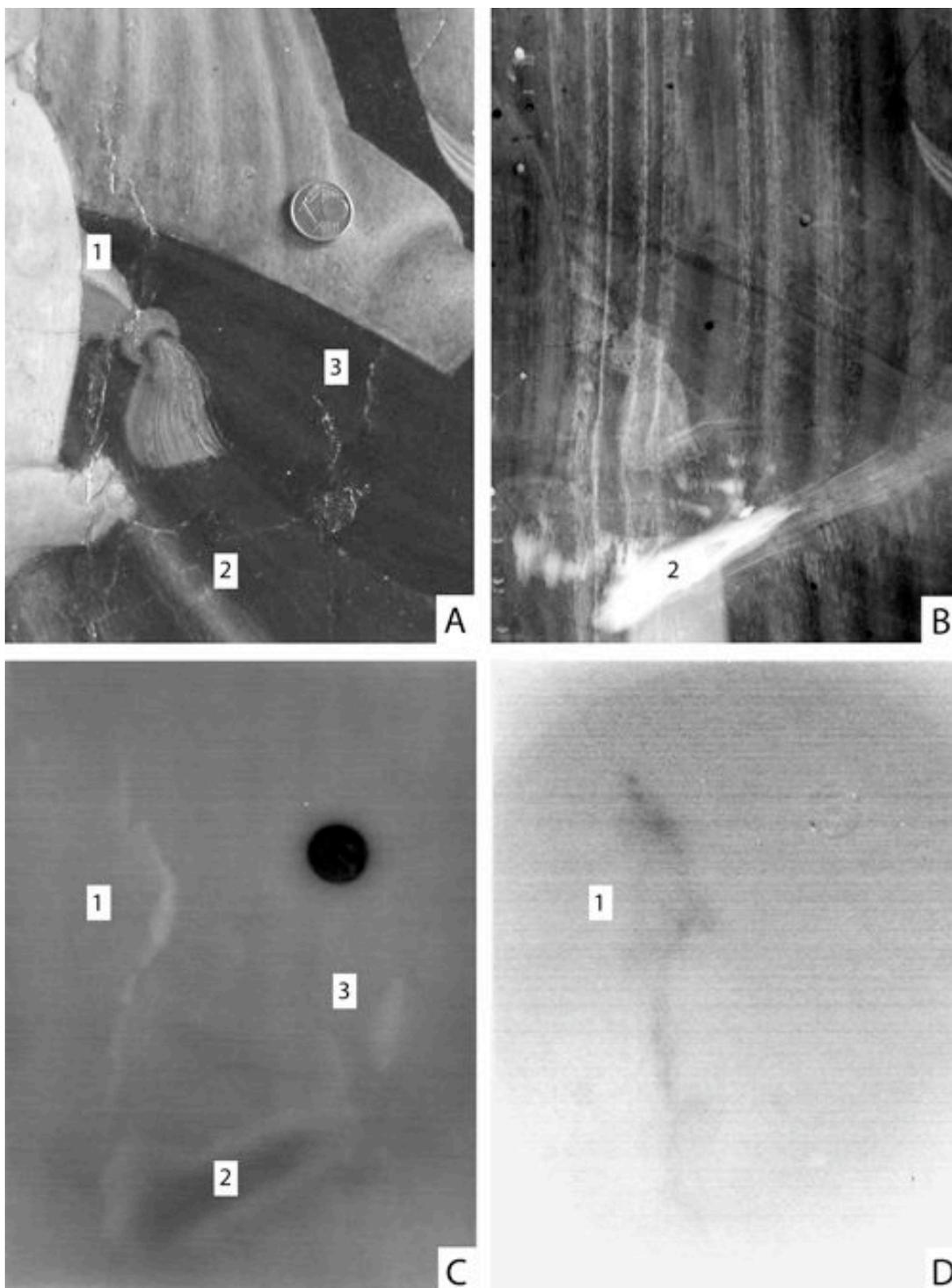


Figura 14. Integrazione delle indagini scientifiche nel visibile (a), nella radiografia (b) e nella termografia (c, d) di una zona particolare della superficie pittorica del dipinto su tavola di S. Mainardi.
 (a) Rotture e decoesioni degli strati pittorici (1, 2, 3). (b) La radiografia mostra una stuccatura del supporto (2).
 (c) L'indagine termografica indica più chiare (più calde) le decoesioni sotto le rotture (1, 2, 3), mentre la zona più scura (più fredda) è la stuccatura del supporto (2) evidenziata nella radiografia (b).
 (d) L'immagine termografica evidenzia la presenza del consolidante (più freddo in fase di evaporazione) introdotto all'interno della decoesione nella rottura verticale (1) della pellicola pittorica.

CONCLUSIONE

Riportiamo a titolo d'informazione che in questo periodo sono in corso studi e test per l'utilizzo combinato e integrato delle due tecniche di termografia e radiografia (fig. 14).

In sostanza, registrando con la telecamera termografica iniezioni di bario-colletta, si vuole studiare la precisione di questa tecnica d'indagine, comparando con successive indagini radiografiche l'esatta mappa dell'estensione e consistenza del consolidante introdotto negli strati pittorici dei dipinti. Tuttavia la tecnica radiografica non può misurare l'effettivo grado di adesione e consolidamento (fig. 14b), che invece può essere rilevato da perfezionate indagini termografiche, individuando l'eventuale presenza di aria all'interno delle zone trattate con comparazioni e analisi delle minime differenze di temperatura (fig. 14c). Si sono così impiegati per la prima volta nel settore dei dipinti su tavola metodi d'indagine diagnostica che possono controllare in maniera molto efficace, direttamente, e in tempo reale, i processi di restauro.

Com'è facile dedurre, i risultati prodotti dalle tecniche integrate, la loro comparazione, gli effetti che ne possono scaturire, possono dare un forte impulso allo sviluppo e rinnovamento delle tecniche di restauro dei dipinti.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori sono grati alla Soprintendenza per il Patrimonio S. A. e E. per le province di Siena e Grosseto, ai Musei Civici di San Gimignano (Siena), in particolare: Alessandro Bagnoli e Antonello Mennucci. Per i preziosi suggerimenti a Marco Ciatti, Marco Goretti, Nicoletta Marcelli, Franco Miceli, Laura Speranza e Lucia Verdelli. Per il contributo nella ricerca a Laura Marraghini. All'Istituto Nazionale di Ottica Applicata per l'utilizzo della attrezzatura termografica, in particolare a Luca Pezzati e Pasquale Poggi. Ad Annette Keller e Alessandro Migliori per la collaborazione alle riprese radiografiche.

NOTE

- 1 La tecnica di iniezioni locali in sottovuoto è stata descritta da M. Verdelli, M. Goretti e N. Presenti, *Tecniche avanzate di sottovuoto nel restauro dei dipinti*, Firenze, Edifir, seconda edizione (2007), pp. 103-104.
- 2 Notizie sulla tecnica sono pubblicate da M. Matteini e A. Moles, *La chimica nel restauro*, Firenze, Nardini Editore (1999), p. 224.
- 3 100 g di colla di coniglio in 1,8 litri d'acqua con aggiunta di plastificante (miele di acacia purissimo 50 g x litro).
- 4 I risultati della sperimentazione su modelli è stata pubblicata da M. Verdelli, N. Presenti, M. Goretti, *Tecniche avanzate di sottovuoto...* cit. pp. 37-64.
- 5 Il bario solfato come composto chimico si trova in natura sottoforma di minerale chiamato "baritina". Viene utilizzato nell'industria del vetro, della carta e della gomma come pigmento bianco e come legante; essendo radio-opaco si usa in medicina in sospensione acquosa come mezzo di contrasto ai raggi X per le radiografie dell'apparato digerente - *Handbook of Chemistry and Physics*, 56th edition, 1975-1976, CRC Press, page B-8. Da qui si deduce che la sospensione acquosa di BaSO₄ (solfato di bario) è assolutamente atossica. Il bario solfato è riportato in letteratura come componente principale (dal 90 al 100%) di sospensioni, paste o compresse ad uso orale utilizzate in medicina per gli scopi già descritti - *USP Pharmacopoeia*, 26th edition (2003), pp. 211-212.

Il solfato di bario precipitato o 'bianco fisso' è insolubile in acqua, alcali e solventi organici, è stabile agli acidi diluiti e nelle soluzioni di idrossidi alcalini. Presenta un'elevata resistenza alla luce e all'invecchiamento. La sua purezza ed inerzia chimica, la bassa presa d'olio, consentono il suo impiego in prodotti di alto pregio dove vengono richiesti alti solidi, elevata brillantezza e proprietà reologiche necessarie per assicurare rapidità di produzione, alta coprenza e resistenza alla flocculazione. La sua superficie strutturalmente liscia, priva di angolosità o rientranze, con uno sviluppo quindi di area specifica molto basso, oltre ad assicurare una bassa abrasività permette un'elevata, uniforme riflettenza (non assorbenza) della luce in tutto lo spettro del visibile estendendosi agli UV e agli IR. Il solfato di bario è stato

- commercializzato a partire dal 1830 e impiegato sia nell'affresco sia nella pittura a tempera e ad olio, dalla metà del XIX secolo è stato diffusamente utilizzato come carica additiva per altri pigmenti o come supporto per la preparazione di lacche.
- 6 La preparazione decoesa per le analisi scientifiche è stata prelevata da alcune lacune degli strati pittorici dei bordi di un dipinto del sec. XV.
 - 7 I marcatori sono stati preparati con gran cura e sono sufficientemente attendibili. Hanno simulato un'imbibizione nella preparazione di spessore medio di circa 100 µm. Inoltre, sono state eseguite verifiche e comparazioni radiografiche dei marcatori con iniezioni nella preparazione in campioni di dipinti. I risultati radiografici hanno dato risposte simili.
 - 8 L'idea di usare sia la termografia sia la radiografia per la rintracciabilità dei consolidanti è stata espressa nel 2000 dagli autori M. Verdelli e N. Presenti nella prima edizione del volume: *Tecniche avanzate di sottovuoto nel restauro dei dipinti*, Firenze, Edifir, prima edizione (2000), capitolo III, alla nota n. 20, p. 64.
 - 9 Uno studio pionieristico di rintracciabilità dei vuoti negli strati pittorici e nei supporti lignei è stato realizzato con la tecnica termografica su modelli di dipinti su tavola da Bruce F. Miller, *The feasibility of using thermography to detect subsurface voids in painted wooden panels*, JAIC (1977), Volume 16, Numero 2, Articolo 4, pp. 27-35. Uno studio più recente di rintracciabilità con indagini termografiche dei vuoti nelle opere d'arte è di Gioi Francesco Guidi, Maria Massimi, Adalberto Melchiorri, in *Alcuni esempi di applicazione della termografia ad alta risoluzione*. Kermes, 28, gennaio-aprile 1997, pp 17-26.