



## IL CONTRIBUTO DELLA SCIENZA DEI COLLOIDI AL RESTAURO

*La chimica fisica si occupa dello studio dei processi di trasformazione dei sistemi chimici complessi. Essa è capace di predire gli effetti a lungo termine del degrado ed offrire materiali e soluzioni innovative per ritardare o inibire il degrado stesso dei manufatti artistici.*



La Cappella Brancacci a Firenze

### Le nanoparticelle inorganiche per il consolidamento

La moderna scienza della conservazione si è sviluppata dalle tragiche inondazioni del 1966 di Firenze e Venezia, che hanno imposto la ricerca di nuovi metodi conservativi [1]. Nel 1969 fu proposto, da Enzo Ferroni, professore presso l'Università di Firenze, e dal conservatore Dino Dini, un nuovo metodo per il consolidamento *in situ* di affreschi. Tale procedura, conosciuta come "metodo del bario o Ferroni-Dini", fu il primo esempio di un consolidamento chimico e strutturale per il restauro di affreschi che ponesse rimedio a fenomeni di degrado generati da sali, soprattutto solfati [2, 3].

Il metodo Ferroni-Dini inverte la reazione chimica che produce il degrado delle pitture murali (cor-

rosione del carbonato di calcio con formazione di gesso), stabilizzando la struttura della malta e rigenerando in parte il legante originale dello strato pittorico, che è la calce. Il legante di nuova formazione viene considerato il responsabile del buon processo di consolidamento. Per questa ragione, nel corso degli anni, è stata intrapresa un'intensa attività di ricerca allo scopo di sintetizzare nanoparticelle di idrossido di calcio che possano essere applicate direttamente sulle superfici murali degradate. Tale formulazione è oggi adottata dai principali centri di conservazione per il consolidamento delle pitture murali e delle rocce carbonatiche [4-6].

In seguito, è stato dimostrato che quando una pittura murale presenta elevate quantità di solfati solubili (principalmente di sodio o magnesio), il consolidamento con nanoparticelle di idrossido di calcio può produrre risultati non del tutto soddisfacenti. Infatti, gli ioni solfato possono reagire con una parte dell'idrossido di calcio applicato come nanoparticella, a dare una reazione di doppio scambio con produzione di gesso, la cui solubilità è molto simile a quella della calce. Il risultato di tale processo è una depressione della capacità consolidante del trattamento. I sali solfato di stronzio e bario sono decisamente meno solubili rispetto al calcio, pertanto l'applicazione di idrossidi di stronzio e bario, in forma nanostrutturata, permettono di bloccare gli ioni solfato liberi impedendo la reazione competitiva che potrebbero innescare con l'idrossido di cal-



cio, destinato, nelle intenzioni, alla carbonatazione. Formulazioni miste di idrossido di calcio con l'omologo di stronzio o bario permettono il trattamento di zone altamente solfatate assicurando un effetto di consolidamento sufficiente a predisporre la superficie ai classici trattamenti di desalinizzazione che altrimenti sarebbero impossibili a causa della intrinseca fragilità dei substrati (Fig. 1) [7, 8].

Negli ultimi anni ha conseguito un notevole interesse lo sviluppo di materiali nanostrutturati ibridi e/o compositi per diverse tipologie di manufatto.

Il mattone crudo è uno dei più antichi materiali da costruzione, tutt'oggi impiegato nell'architettura di tutto il mondo. Superfici architettoniche simili sono molto sensibili all'erosione del vento e dell'acqua, con fenomeni di degrado molto evidenti causati da perdita di coesione e sgretolamento. I consolidanti convenzionali maggiormente impiegati (alcossisilani, polimeri sintetici o naturali) mancano spesso di efficacia e di compatibilità chimico-fisica e concorrono a forme più gravi di degrado. Allo scopo di conferire migliori proprietà meccaniche alle superfici sono state sviluppate formulazioni ibride a base di nanocalce e silice nanostrutturata [9]. L'obiettivo è quello di sviluppare CSH (silicato tricalcico idrato) *in situ* a partire da due componenti fondamentali della chimica del cemento. La formazione di CSH è potenziata dall'aggiunta nella formulazio-

ne di idrossipropilcellulosa (HPC). Infatti, gli eteri di cellulosa (CE) costituiscono un'importante classe di polimeri organici utilizzati nelle formulazioni di cemento; sono impiegati in tale industria come additivi anti-dilavamento o impermeabilizzazione, per la produzione di malte adesive, come modificatori di viscosità e per controllare la lavorabilità del cemento (ovvero il tempo di asciugatura).

Un notevole interesse è stato suscitato negli ultimi anni dall'impiego di nanoargille (*nanoclays*) nel campo del restauro [10]. Sono state studiate, ad esempio, formulazioni a base di blend di nanoparticelle di argille (montmorillonite, halloysite, sepiolite e laponite) e di polimeri sintetici al fine di ottenere prodotti altamente specifici e polifunzionali. Tali materiali sono stati esaminati, in particolare, per possibili applicazioni come protettivi e rivestimenti di superfici lapidee, vetrose e metalliche. Nanocompositi a base di nanoparticelle di montmorillonite (MMT) e poliuretano fluorurato (Fluorolink P56) sono stati studiati, inoltre, come rivestimenti anti-graffito, idro- e oleo-repellenti, per materiali lapidei ad alta porosità come la pietra di Lecce, biocalcarenite fossilifera ampiamente utilizzata da architetti e scultori durante il periodo barocco [11].

Tra gli altri, meritano menzione le formulazioni a base di nanotubi di halloysite (HNT) dispersi in acqua insieme a idrossipropilcellulosa, che sono

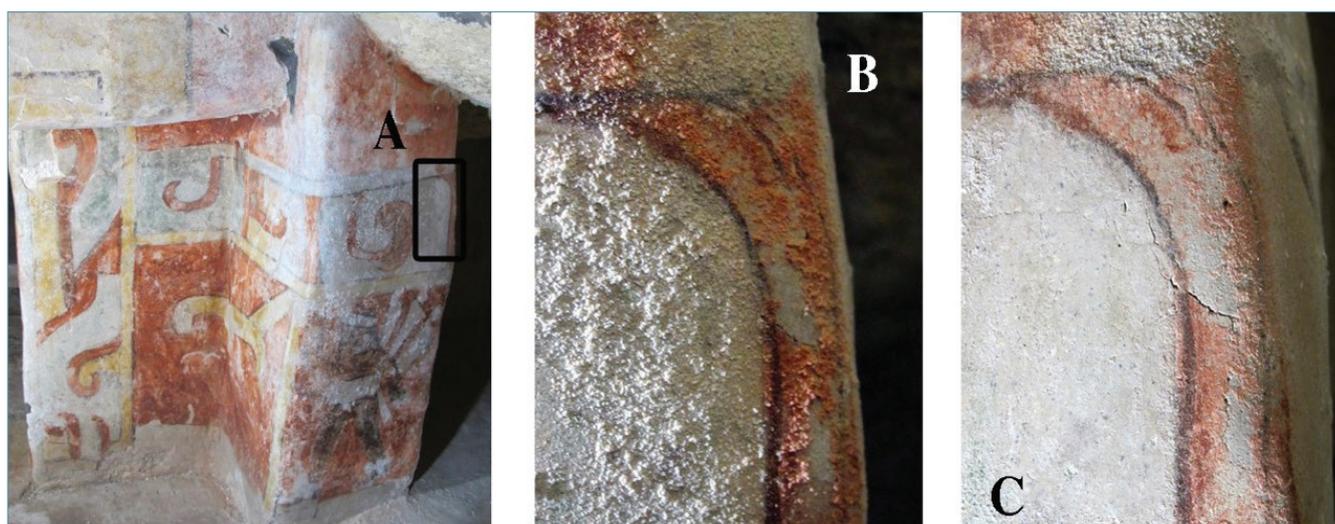


Fig. 1 - a) Pitture murali in un sito archeologico in Messico; b) zona con evidenti efflorescenze saline prima dell'intervento di desolfatazione e consolidamento; c) la stessa area dopo l'applicazione di ammonio carbonato e di dispersioni di nanoparticelle di idrossido di calcio con piccole percentuali di idrossido di bario (immagine riprodotta da P. Baglioni, D. Chelazzi *et al.*, *Langmuir*, 2013, 29, 5110 con l'autorizzazione di American Chemical Society, Copyright 2013 ACS)

state considerate per il consolidamento di materiale cartaceo, con l'obiettivo di conferire elevate proprietà meccaniche al manufatto. L'impiego di calce nanostrutturata insieme ad HNT in presenza di tensioattivi fluorurati, permette inoltre di combinare le proprietà deacidificanti della fase alcalina con le note proprietà di ritardante di fiamma del composto fluorurato [12].

## Gel e fluidi nanostrutturati per la pulitura delle superfici

La pulitura è un'operazione delicata poiché irreversibile e potenzialmente invasiva e la ricerca si è concentrata sullo sviluppo di sistemi che garantissero un maggior controllo e un'efficacia più elevata rispetto ai metodi tradizionali della pratica di restauro, basati sulla chimica classica di soluzioni, polimeri e addensanti. Uno degli esempi più

illuminanti in questo senso riguarda la pulitura di dipinti murali: nel 1986 una microemulsione acqua in olio (o/w) fu formulata per la prima volta da Baglioni e Ferroni per la rimozione di depositi di cera dagli affreschi di Masaccio, Filippino Lippi e Masolino nella Cappella Brancacci della chiesa di Santa Maria del Carmine, a Firenze [13]. Nella formulazione, la presenza di un idrocarburo in forma di nano-gocce porta alla formazione di un'area interfasele centinaia di migliaia di volte più grande della stessa quantità di solvente *bulk*, aumentando notevolmente il potere pulente della formulazione. La fase acquosa agisce come una "barriera idrofilica" impedendo la rideposizione dello sporco idrofobico rimosso, permettendo l'utilizzo di questi sistemi in matrici idrofiliche come polpe di cellulosa o gel ritentivi, che assorbono lo sporco estratto e lo trattengono, favorendone così l'effettiva rimo-

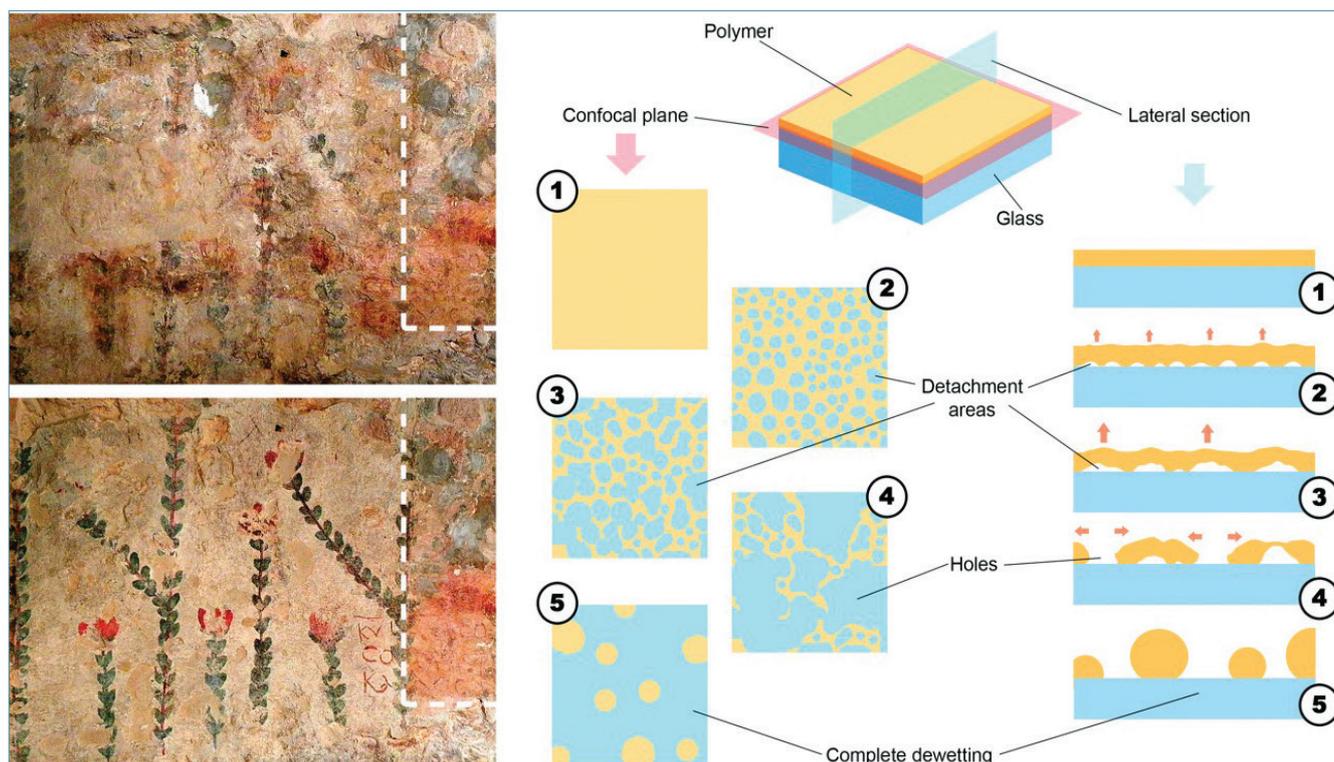
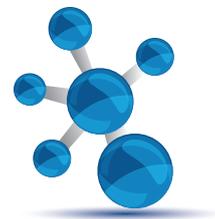


Fig. 2 - (Sinistra) Applicazione di una microemulsione o/w su dipinti murali nella grotta dell'Annunciazione a Nazareth (Israele). In alto, la superficie dei dipinti deturpata da strati di resine e adesivi polimerici applicati in precedenti interventi di restauro. In basso, la superficie pittorica recuperata dopo la pulitura. L'area tratteggiata mostra una porzione della superficie non pulita, lasciata come riferimento visivo (immagine riprodotta da M. Baglioni, D. Berti *et al.*, *Langmuir*, 2012, 28, 15193, con l'autorizzazione di American Chemical Society, Copyright 2012 ACS). (Destra) Sequenza che illustra il processo di *dewetting* osservato applicando fluidi nanostrutturati su film ottenuti da un copolimero acrilato in soluzione. Lo spessore del polimero è stato enfatizzato nel disegno per favorirne la chiarezza: (1) il film polimerico è esposto al fluido; (2) il film inizia a perdere adesione al substrato; (3) l'area delle regioni di distacco cresce; (4) raggiunta una dimensione critica, il film si rompe; (5) infine, il polimero si riorganizza nella forma di gocce globulari. Le gocce hanno un diametro significativamente maggiore dello spessore del film originale (immagine riprodotta da M. Baglioni, C. Montis *et al.*, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2017, 19, 23723, con l'autorizzazione di PCCP Owner Societies)



zione dalle superfici trattate. Le miscele di solventi, al contrario, dissolvono lo sporco trasportandolo più in profondità nelle matrici porose delle opere. Infine, l'utilizzo di una quantità ridotta di solvente permette di abbattere l'impatto eco-tossicologico del sistema pulente rispetto alle tradizionali miscele di solventi utilizzate nella pratica del restauro [14]. L'esempio della Cappella Brancacci ha aperto la strada ai primi lavori condotti presso siti italiani, come ad esempio i dipinti murali della Chiesa di San Salvatore (Venezia), di San Cristoforo (Milano), di Santa Maria della Scala (Siena), della Cattedrale di Conegliano (Treviso), cui hanno fatto seguito collaborazioni internazionali presso importanti siti storici e archeologici quali Mayapan e Cholula (Messico) e la chiesa dell'Annunciazione a Nazareth (Israele) [1] (vedi Fig. 2).

L'utilizzo di fluidi nanostrutturati permette il distacco e la rimozione dei polimeri attraverso meccanismi diversi dalla detergenza classica, che sono stati oggetto di studio nel corso degli ultimi anni. In particolare, è stato mostrato che la presenza del tensioattivo ricopre un ruolo fondamentale nel processo di *dewetting* di film polimerici da substrati idrofili, favorendone la cinetica [15]. Durante l'interazione con il film, parte delle micelle nel fluido nanostrutturato si rompe e il rilascio di tensioattivo rigonfia le catene del polimero, aumentandone la mobilità. Grazie alla sua natura anfifilica, il tensioattivo diminuisce l'energia interfase tra il polimero e il solvente e tra il substrato e la fase acquosa, abbassando in questo modo l'energia di attivazione per il processo di *dewetting*; si formano così spontaneamente delle regioni di distacco del polimero dal substrato, che si fondono attraverso un processo di nucleazione e crescita portando alla completa rimozione del film.

Un'altra classe di materiali per la pulitura, sviluppata nell'ambito della ricerca chimico-fisica, è rappresentata da gel fisici e chimici ad alta ritenzione per il trattamento controllato di superfici sensibili all'acqua o a solventi organici, quali dipinti su tela, carta inchiostata e alcuni tipi di materiali plastici. Nel corso degli ultimi anni sono stati sviluppati dei gel con caratteristiche ritentive e meccaniche ideali per la pulitura di manufatti [16-18], anche combinati con soluzioni enzimatiche altamente specifiche per classi ben definite di composti [19]. Gel altamente

ritentivi sono stati ottenuti interpenetrando un reticolo chimico di poliidrossietilmetacrilato (phema) con catene lineari di polivinipirrolidone (pvp). Poiché non vi sono cross-link chimici tra le due specie polimeriche, i reticoli vengono detti semi-interpenetrati (semi-ipn). Si tratta di materiali molto performanti, che combinano le proprietà meccaniche del phema con l'idrofilicità del pvp. Questi gel hanno pertanto un comportamento viscoelastico tale da permettere la loro facile rimozione da superfici artistiche, dopo il trattamento pulente, e un alto contenuto di acqua, che possono rilasciare in maniera controllata. È anche possibile caricare i semi-ipn di phema/pvp con microemulsioni o/w e misure di scattering di raggi X a basso angolo hanno mostrato che sia il gel che la microemulsione mantengono sostanzialmente inalterata la propria struttura, senza alterazioni della loro funzionalità. Una delle applicazioni più significative riguarda la rimozione di nastri adesivi da opere in carta inchiostata. In questo caso, l'utilizzo dei semi-ipn ha permesso la rimozione selettiva del nastro e dello strato di adesivo, conservando intatte le parti inchiostate dell'opera, operazione impossibile con gli addensanti usati nella pratica tradizionale di restauro (Fig. 3) [20].

Gel fisici e dispersioni polimeriche con ottime proprietà pulenti sono stati poi realizzati utilizzando alcool polivinilico (PVA). Attraverso processi sintetici di gelo-disgelo (freeze-thaw, FT) è possibile preparare gel fisici con proprietà meccaniche e reologiche simili a quelle di reticoli chimici, ma molto flessibili. In particolare, interpenetrando reticoli fisici di PVA con catene di PVP o di PVA a basso peso molecolare, si ottengono gel elastici e resistenti, in grado di adattarsi alla rugosità superficiale tipica di dipinti moderni e contemporanei, dove l'utilizzo di gel rigidi tradizionali (ad es. il gellano) non permetterebbe una pulitura omogenea [21]. Il PVA è stato anche utilizzato per preparare dispersioni viscosi in grado di essere caricate con solventi polari, applicate, e rimosse dalla superficie con una semplice azione di "peeling", grazie alla loro viscoelasticità [22]. Dispersioni del polimero, caricate con agenti chelanti come EDTA (acido etilendiammino tetraacetico) o polietilenammine, sono state applicate su patine di corrosione di manufatti bronzei, permettendone la rimozione controllata in modo selettivo e non invasivo [23].

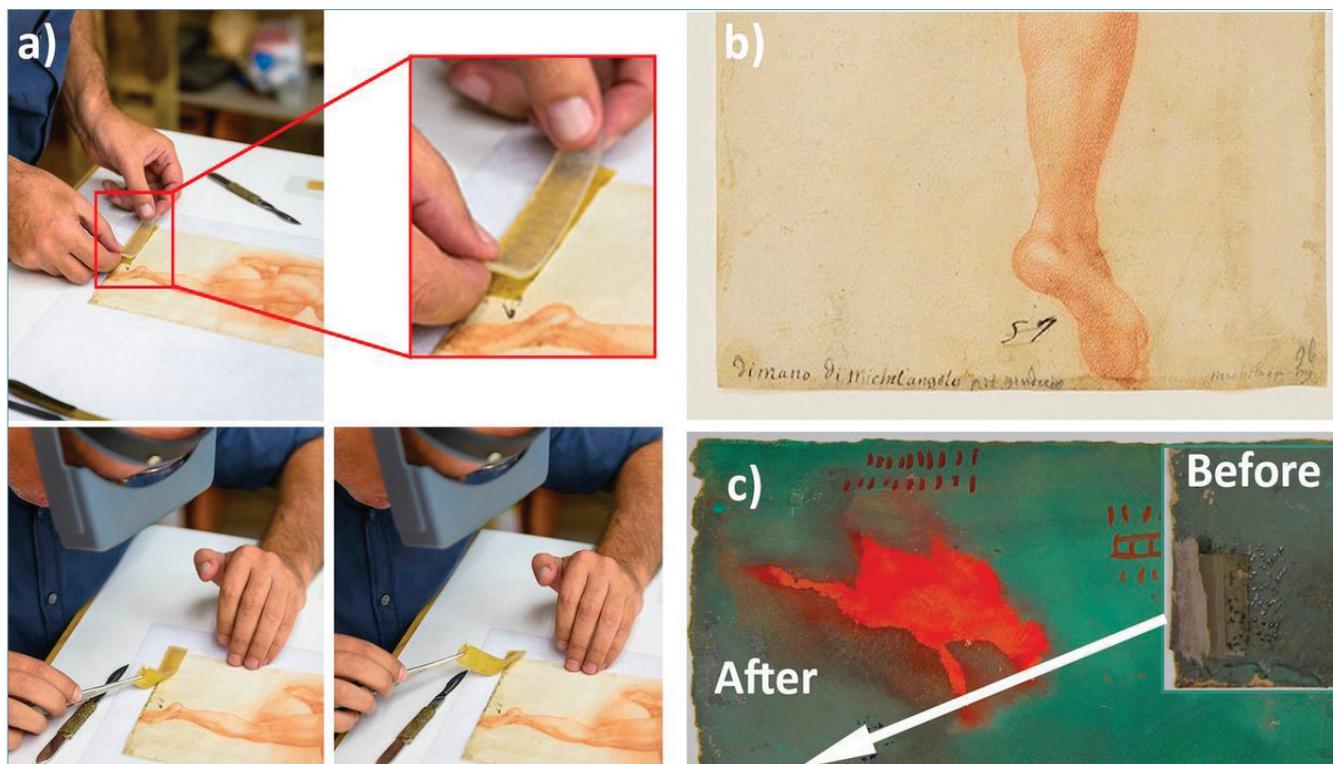
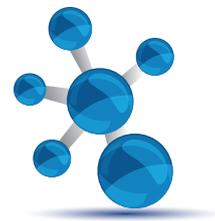


Fig. 3 - (a) Rimozione di un nastro adesivo da un disegno del XVI secolo. Il dettaglio nel riquadro rosso mostra un idrogel (caricato con una microemulsione o/w) ritagliato per ricalcare esattamente la forma del nastro, evitando il contatto con la superficie dell'opera; (b) dettaglio del disegno dopo la rimozione del nastro e dell'adesivo; l'intervento ha riportato alla luce l'iscrizione "di mano di Michelangelo", probabilmente una falsa attribuzione che era stata occultata dal collezionista; (c) un disegno contemporaneo di Helen Philips dopo la rimozione del nastro adesivo. Il riquadro mostra il dettaglio del nastro prima dell'intervento (immagini riprodotte da N. Bonelli, C. Montis *et al.*, *PNAS*, 2018, 115(23) 5932)

## Trattamenti di deacidificazione e protezione

Lo sviluppo di dispersioni alcaline di idrossidi e/o carbonati costituisce un'altra importante area di ricerca che, a partire dagli anni 2000, ha prodotto risultati rilevanti per la conservazione di materiali di interesse storico artistico a base di cellulosa. I primi studi hanno riguardato gli idrossidi di calcio e di magnesio dispersi in mezzo alcolico e la loro validità nella neutralizzazione dell'acidità e nella formazione di una riserva alcalina su materiale cartaceo, archivistico e librario [24-26]. La loro efficacia e la semplicità di applicazione hanno sin da subito aperto strade verso nuovi campi di applicazione. Un'importante ricerca ha riguardato, ad esempio, l'utilizzo di idrossido di calcio per la neutralizzazione dell'acidità di legno archeologico sommerso. Tale studio si è svolto nell'ambito del progetto di recupero della nave da guerra Vasa, conservata presso l'omonimo museo in Stoccolma (Svezia), rimasta per più di trecento anni sul fondale marino. L'insieme dei trattamenti chimici e fisici, eseguiti immediatamente dopo lo straordi-

nario recupero dello scafo, hanno infatti purtroppo prodotto un effetto devastante all'interno del legno di rovere della nave, con la formazione stimata di circa 2 tonnellate di acido solforico [27]. La ricerca ha prodotto risultati assai rilevanti che costituiscono la base per un possibile e più ampio studio di fattibilità di un intervento conservativo risolutivo per la stabilizzazione del processo di degrado [28]. Un altro campo di applicazione ha riguardato l'impiego di tali formulazioni per la deacidificazione dei supporti in tela (principalmente lino, ma anche canapa e cotone) impiegati nelle tecniche pittoriche su cavalletto. Tali supporti vanno infatti incontro a progressivi processi di depolimerizzazione delle catene cellulose con grave rischio di strappi e lacerazioni della tela stessa, che peraltro è normalmente tensionata su un telaio e quindi sottoposta a continuo stress meccanico. Più recentemente, polveri nanostrutturate di composti inorganici alcalini sono stati proposti, nell'ambito del progetto APACHE [29], come assorbitori di VOC acidi per la protezione di opere collocate



in contenitori. Queste includono manufatti all'interno di *display-case* nei musei, e, soprattutto, opere stoccate nei magazzini all'interno di imballaggi in materiale plastico e legno, oppure in scatole di cartone per l'archiviazione di materiale cartaceo, fotografico e per le pellicole in triacetato di cellulosa.

### Materiali nanostrutturati per il *self-healing*

Grazie al suo ruolo di fotocatalizzatore, il biossido di titanio ( $\text{TiO}_2$ ) ha trovato un importante utilizzo nei materiali da costruzione, come agente per superfici auto-pulenti, antinquinanti e antimicrobiche (*self-cleaning, de-polluting, self-sterilizing*). Un esempio architettonico recente è quello della chiesa "Dives in Misericordia", a Roma, progettata dall'architetto Richard Meier e costruita con uno speciale cemento ricoperto del prodotto fotocatalitico TX Active® (Italcementi). In particolare, nel campo della protezione delle opere d'arte il biossido di titanio è stato applicato in forma di nanoparticelle cristalline (NP) su materiali lapidei quali travertino e pietra leccese, combinandolo a polimeri per ottenere superfici auto-pulenti, conferendo superidrofobicità ed attività fotocatalitica. Un esempio recente riguarda il design di un nanocomposito ibrido composto di una resina acrilico-silossanica, modificata con acido oleico, e "nano-bastoncini" (nanorods, NR) di  $\text{TiO}_2$  ricoperti con trimetossisilil propil metacrilato [30]. La formulazione è stata testata su pietra di Lecce, anche esposta in esterni, e un contenuto di 1% (w/w) in *nanorods* si è dimostrato ideale per ottimizzare l'idrofobicità della superficie, garantendo una buona efficacia protettiva (auto-pulente) e preservando il colore della pietra. Il curing del composito è effettuato con un singolo ciclo di esposizione a luce UV-vis, in modo da garantire la praticità del protocollo applicativo. L'acido oleico può anche essere utilizzato per coordinare la superficie dei *nanorods* [31]: l'anisotropia prodotta in questo modo nei NR può aumentare il tempo di vita delle specie cariche foto-generate, favorendo il loro spostamento fino alla superficie e migliorando in principio l'attività fotocatalitica; inoltre, i NR ricoperti possono essere dispersi in solventi organici come l'eptano ed applicati a spray su pietra. Sono stati ottenuti in questo modo *coating* uniformi con buone proprietà di trasparenza ottica, fotoattività e idrofobicità, il che rende questo tipo di applicazione promettente nel campo della protezione di superfici lapidee.

### Conclusioni e prospettive future

Per molti anni la ricerca tecnologica nel campo della conservazione si è principalmente indirizzata allo sviluppo di metodologie e strumentazioni sempre più efficienti per l'indagine diagnostica, al fine di ottenere una conoscenza approfondita dei materiali, delle tecniche e degli effetti del degrado nelle opere. Non molto lavoro era stato fatto, invece, fino a pochi anni fa per migliorare in modo consistente le metodologie ed i materiali applicati nel restauro dei beni culturali. Il grande impatto che le nanoscienze hanno portato anche in questo ambito applicativo ha posto in sempre maggior rilievo il ruolo della chimica-fisica nella conservazione del patrimonio culturale.

Nel complesso, l'apporto della chimica-fisica e della scienza dei colloidali ha prodotto negli anni risultati assai rilevanti in quanto ha consentito di superare molte delle limitazioni dei materiali e dei metodi tradizionalmente impiegati per il restauro delle opere d'arte, fornendo una gamma di prodotti ad alto contenuto tecnologico e particolarmente performanti nel campo della conservazione del patrimonio artistico.

Vale la pena richiamare l'attenzione sul fatto che nell'ambito dei recenti programmi FP7 e H2020 la Commissione Europea ha dedicato nell'area NMP (Nanotechnologies, Advanced Materials and Production) un certo numero di *calls* che hanno visto premiati gruppi di ricerca accademici italiani impegnati proprio nel settore della chimica-fisica dei materiali applicata allo sviluppo di soluzioni efficaci, ecosostenibili e facilmente trasferibili sul mercato [29].

Molto lavoro è stato fatto, ma infiniti nuovi campi applicativi aspettano solo di essere esplorati. L'impatto potenziale dell'attività svolta nell'ambito della chimica-fisica dei materiali è fortemente alimentato dai numerosi e diversi ambiti che possono trarre giovamento dai risultati di tale ricerca. Una tematica come la pulitura delle superfici trova importanti ricadute nel settore della cosmetica o della detergenza industriale, fino al *drug-delivery* ed al confinamento di molecole attive su capsule e matrici gelificate. Considerazioni analoghe riguardano l'importante sviluppo degli ultimi anni per quanto concerne la formulazione di materiali ibridi per il rinforzo di matrici ed il conferimento di molteplici funzionalità alle superfici, che riguarda da vicino l'industria manifatturiera; fino anche al macrosettore della domotica,

che può trarre grandi benefici dalla ricerca orientata alla definizione, monitoraggio e controllo delle condizioni ottimali per la conservazione di oggetti in ambienti museali.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Nanoscience for the conservation of works of art, P. Baglioni, D. Chelazzi (Eds.), RSC Publishing, London, 2013.
- [2] E. Ferroni, P. Baglioni, Scientific methodologies applied to works of art, Proc. of the symposium, Florence (I), 2-5 May 1984, P.L. Parrini (Ed.), Montedison progetto cultura, Milan, 1986, 108.
- [3] P. Baglioni, R. Giorgi, Inorganic Nanomaterials for the Consolidation of Wall Paintings and Stones, in Nanoscience for the conservation of works of art, P. Baglioni, D. Chelazzi (Eds.), RSC Publishing, London, 2013, 344-370.
- [4] M. Ambrosi, L. Dei *et al.*, *Langmuir*, 2001, **17**, 4251.
- [5] D. Chelazzi, G. Poggi *et al.*, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2013, **392**, 42.
- [6] I. Natali, M.L. Saladino *et al.*, *Journal of Cultural Heritage*, 2014, **15**, 151.
- [7] E. Ciliberto, G.G. Condorelli *et al.*, *Appl. Phys. A-Mater.*, 2008, **92**, 137.
- [8] R. Giorgi, M. Ambrosi *et al.*, *Chemistry - A European Journal*, 2010, **16**, 9374.
- [9] R. Camerini, D. Chelazzi *et al.*, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, **539**, 504.
- [10] G. Cavallaro, G. Lazzara *et al.*, Nanoclays for Conservation, in Nanotechnologies and Nanomaterials for Diagnostic, Conservation, and Restoration of Cultural Heritage, G. Lazzara, R. Fakhrullin (Eds.), Elsevier Inc., 2019, 149-170.
- [11] M. Licchelli, M. Malagodi *et al.*, *Applied Physics A*, 2014, **116**, 1525.
- [12] G. Cavallaro, S. Milioto *et al.*, *Applied Materials and Interfaces*, 2018, **10**, 27355.
- [13] D. Chelazzi, R. Giorgi, P. Baglioni, *Angewandte Chemie - International Edition*, 2018, **57**, 7296.
- [14] P. Baglioni, D. Chelazzi, R. Giorgi, Nanotechnologies in the Conservation of Cultural Heritage - A compendium of materials and techniques, Springer, 2015.
- [15] M. Baglioni, C. Montis *et al.*, *Angewandte Chemie - International Edition*, 2018, **57**, 7355.
- [16] P. Baglioni, D. Berti *et al.*, *Advances in colloid and interface science*, 2014, **205**, 361.
- [17] P. Baglioni, E. Carretti D. Chelazzi, *Nature Nanotechnology*, 2015, **10**, 287.
- [18] J.A. Lameiras Domingues, N. Bonelli *et al.*, *Langmuir*, 2013, **29**, 2746.
- [19] C. Mazzuca, G. Poggi *et al.*, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2017, **502**, 153.
- [20] N. Bonelli, C. Montis *et al.*, *PNAS*, 2018, **115**, 5932.
- [21] N. Bonelli, G. Poggi *et al.*, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, **536**, 339.
- [22] E. Carretti, M. Bonini *et al.*, *Acc. Chem. Res.*, 2010, **43**, 751.
- [23] E.I. Parisi, N. Bonelli *et al.*, *Pure Appl. Chem.*, 2018, **90**, 507.
- [24] R. Giorgi, L. Dei *et al.*, *Langmuir*, 2002, **18**, 8198.
- [25] R. Giorgi, C. Bozzi *et al.*, *Langmuir*, 2005, **21**, 8495.
- [26] S. Bastone, D.F. Chillura Martino *et al.*, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2017, **513**, 241.
- [27] M. Sandström, F. Jalilehvand *et al.*, *Nature*, 2002, **415**, 893.
- [28] R. Giorgi, D. Chelazzi, P. Baglioni, *Langmuir*, 2005, **21**, 10743.
- [29] Project NANOFORART, FP7 grant n. 282816; project NANORESTART, H2020 grant n. 646063; Project APACHE, H2020 grant n. 814496; Project INNOVACONCRETE, H2020 grant n. 760858, Project NANOCATHEDRAL, H2020 grant n. 646178.
- [30] C. Esposito Corcione, C. Ingrosso *et al.*, *Progress in Organic Coatings*, 2018, **122**, 290.
- [31] F. Petronella, A. Pagliarulo *et al.*, *Coatings*, 2018, **8**, 356.

### The Contribution of Colloid Science to the Conservation of Cultural Heritage

Physical chemistry deals with the study of the transformation processes of complex chemical systems. It is able to predict the long-term effects of degradation, and to offer innovative materials and solutions to delay or inhibit the degradation of artistic artefacts.