



L'apporto della ricerca industriale al settore dei beni culturali

di Giovanni Perego

Un team di ricercatori e tecnici di EniTecnologie ha lavorato con la Fabbrica di San Pietro ad un progetto di restauro caratterizzato da un approccio di ampio respiro e ad alto contenuto innovativo: dalla diagnosi approfondita sullo stato di conservazione dei materiali, all'impiego mirato delle tecnologie di restauro, all'analisi dell'impatto ambientale, alla creazione di una banca dati interattiva. In questo articolo vengono illustrate sinteticamente le attività svolte, in particolare le indagini a carattere diagnostico, caratterizzate dall'impiego intensivo di tecniche a carattere non invasivo.

Nel settembre 1999 si è concluso il progetto di restauro della facciata della basilica di S. Pietro, avviato nel marzo 1997. I lavori sono stati costantemente seguiti dagli organi di stampa e dalle principali reti televisive, soprattutto nel loro momento conclusivo, culminato con una spettacolare cerimonia svoltasi in piazza S. Pietro alla presenza di S.S. Giovanni Paolo II°.

Il progetto di restauro è stato condotto congiuntamente dalla Fabbrica di S. Pietro e dall'Eni. Si è trattato di una esperienza abbastanza unica nel suo genere, in quanto ha visto la partecipazione di un grande gruppo industriale non, come di solito avviene, nella sola veste di sponsor dell'iniziativa. Eni ha messo a disposizione, infatti, risorse e competenze proprie, delegando, a livello operativo, EniTecnologie, cioè la struttura "Corporate" per la ricerca e l'innovazione tecnologica. EniTecnologie ha messo in campo diverse competenze, identificabili soprattutto nel campo della chimica fisica, della scienza dei materiali, del controllo non distruttivo, del monitoraggio ambientale; competenze consolidate attraverso attività pluriennali di ricerca. È stato sor-

Giovanni Perego, EniTecnologie - via F. Maritano, 26 - 20097 San Donato Milanese (MI).

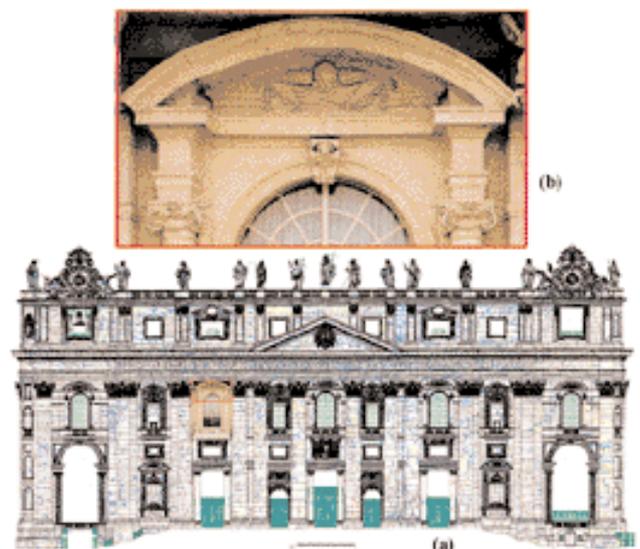


Figura 1 - Mappa tematica della facciata della basilica di S. Pietro, ottenuta dalla restituzione fotogrammetrica (a). Immagine digitale di un particolare [parte superiore del finestrone evidenziato nella mappa in (a)] dopo l'intervento di restauro

prendente scoprire come le potenzialità tecnico scientifiche e tecnologiche di una società proiettata ad innovare i settori degli idrocarburi e dell'energia, abbiano potuto fornire così tante risposte alle problematiche poste da un restauro così complesso.

Il progetto è stato concepito con un orizzonte molto ampio, con l'obiettivo di:

- acquisire la più ampia e dettagliata documentazione sul monumento;
- diagnosticare lo stato di degrado dei materiali e della pietra in particolare;
- selezionare le tecnologie di intervento più efficaci in rapporto ai reali problemi riscontrati;
- analizzare l'impatto dell'ambiente sul monumento;



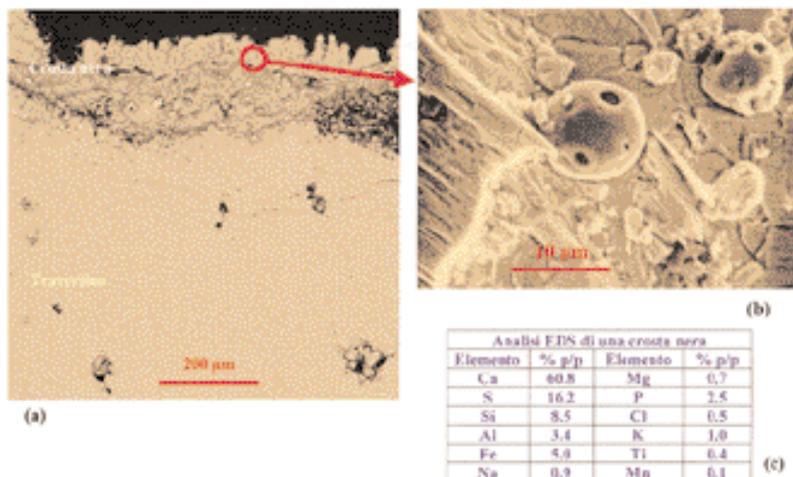


Figura 2 - Immagine ottenuta al microscopio elettronico a scansione (SEM) su una sezione di un frammento di pietra prelevato sulla superficie della facciata prima dell'intervento di restauro, che mostra una tipica crosta nera (a). Particolare ad alto ingrandimento della crosta nera, che evidenzia i cristalli di gesso ed il particolato di origine atmosferica depositatosi sulla superficie della pietra (particelle tondeggianti) (b). Composizione elementare della crosta nera, ottenuta dall'analisi mediante spettroscopia di raggi X in dispersione di energia (EDS) accoppiata all'esperimento SEM (c)

- documentare adeguatamente il lavoro fatto ed i risultati ottenuti.

Dati e tempi molto stretti a disposizione in rapporto agli obiettivi posti, il progetto è stato monitorato lungo tutto il suo percorso con i più moderni strumenti di *project management*.

Di seguito vengono illustrati i vari capitoli di attività ed i risultati ottenuti, con una particolare sottolineatura agli aspetti innovativi conseguiti a livello metodologico.

Il rilievo fotogrammetrico della facciata

Sono stati effettuati due rilievi, uno prima e l'altro immediatamente dopo l'intervento di restauro, finalizzati all'ottenimento di una adeguata documentazione di base sul monumento. Il primo rilievo fotogrammetrico è stato preceduto da un rilievo topografico, realizzato con precisione millimetrica. Il materiale raccolto in questo rilievo ha costituito il necessario supporto al lavoro di cantiere.

Entrambi i rilievi hanno comportato la ripresa di oltre 200 fotogrammi in multi stereoscopia, secondo una griglia di suddivisione della superficie della facciata in unità elementari di circa 6 metri di lato. Per le riprese è stata utilizzata una piattaforma aerea, posizionata sulla piazza a circa 12 metri di distanza dalla facciata della basilica. Il lavoro è stato svolto da un gruppo della Divisione Agip dell'Eni, che normalmente effettua rilievi di questo genere su strutture di grandi dimensioni quali le piattaforme petrolifere.

La fase di restituzione del materiale raccolto ha prodotto un modello tridimensionale della facciata, gestito in ambiente Autocad, mappe in scala 1:100 e 1:20 ed immagini digitali della facciata stessa ad altissima definizione, che documentano con estremo dettaglio la situazione precedente e quella successiva all'intervento di restauro (Figura 1).

Una documentazione di questo livello, sia dal punto di vista

metrico che fotografico, non esisteva prima d'allora per quest'opera monumentale.

La diagnosi sullo stato di conservazione del monumento

Il problema è stato affrontato sia attraverso esami di laboratorio che attraverso indagini *in-situ* mediante tecniche a carattere non invasivo (georadar e termografia).

Il degrado della pietra

Il rivestimento lapideo del monumento è formato quasi interamente da travertino, una pietra calcarea di origine sedimentaria costituita da carbonato di calcio (calcite). Come tutte le pietre di questa natura, il travertino è soggetto all'azione aggressiva di inquinanti atmosferici, in particolare l'anidride solforosa, gli ossidi di azoto ed il particolato organico originato da processi di combustione (scarichi veicolari, riscaldamento domestico, attività industriali) [1].

Per stabilire l'entità del degrado subito dalla pietra, sono state programmate indagini di laboratorio, facendo riferimento alle diverse situazioni osservabili visivamente e riconducibili alle tipologie seguenti:

- croste nere, generalmente localizzate in zone particolarmente protette da possibile dilavamento da parte di acque piovane;
- zone chiare, spesso accompagnate da puntature scure e da pronunciata erosione superficiale;
- zone grigiastre;
- zone a colorazione oca, per lo più localizzate sul timpano e sugli sfondi nella parte sottostante il cornicione;
- zone a colorazione rossa e verde, nell'intorno della Loggia della Benedizioni.

Sono stati quindi prelevati piccoli frammenti di pietra da analizzare in laboratorio (complessivamente oltre un centinaio, in diverse zone della facciata, in modo tale da disporre di un'adeguata casistica delle tipologie sopra menzionate). Sono state quindi messe a punto procedure di analisi sufficientemente rapide, basate sull'utilizzo della diffrazione di raggi X, della microscopia ottica, della microscopia elettronica accoppiata alla spettroscopia di raggi X in dispersione di energia e della termogravimetria. Queste analisi, condotte in parte sui frammenti inglobati in resina ed in parte sulle polveri asportate meccanicamente dalla loro superficie, hanno consentito di ottenere una descrizione particolareggiata della composizione chimica, della struttura cristallografica e della struttura morfologica dello strato più superficiale della pietra, per ciascuna delle tipologie individuate. Indagini di carattere microbiologico hanno permesso di identificare le specie di microrganismi che colonizzavano la pietra della facciata (specie fungine ed algali, tipicamente presenti nei suoli).

I dati raccolti hanno evidenziato chiaramente come la parte più superficiale della pietra fosse costituita da uno strato di spessore variabile, ben distinguibile dal travertino sottostante. Tale strato era formato da sali di calcio, in prevalenza solfato (gesso) ed in misura minore ossalato e da materiale particellare di natura inorganica (tipicamente polveri da





suolo) ed organica (prodotto da processi di combustione), di provenienza atmosferica (Figura 2). Il quadro sperimentale, in linea con quanto atteso sulla base dei dati di letteratura sull'argomento, era indicativo dell'attacco del carbonato di calcio (componente base sia del travertino che di eventuali scialbature applicate sulla superficie della pietra) da parte di specie acide veicolate attraverso l'aria o la pioggia (anidride solforosa) [1] o generate da microorganismi (acido ossalico) [2].

Lo spessore dello strato degradato è risultato molto elevato nelle croste nere (fino ad un millimetro), discontinuo e generalmente inferiore a 100 micron nelle zone chiare e di 100-200 micron nelle zone di aspetto grigiastro.

Maggiori dettagli su queste indagini e sui risultati ottenuti sono riportati in [3].

Il dilavamento da parte dell'acqua piovana, nelle parti esposte al ruscellamento dell'acqua stessa, ha sicuramente provveduto, nel corso degli anni, a rimuovere i prodotti del degrado. Soprattutto nelle zone chiare, a fenomeni di attacco acido si sono verosimilmente alternati fenomeni di rimozione dei prodotti dell'attacco stesso, generando una progressiva erosione superficiale della pietra.

Le coloriture

Nei campioni prelevati in zone caratterizzate da colorazioni, le indagini di laboratorio hanno messo in evidenza la presenza di strati molto sottili (patine) tra il travertino e la crosta superficiale, in corrispondenza di tutte e tre le colorazioni osservate: ocra, rosso e verde. Lo spessore della patina era in generale di qualche decina di micron, mentre l'estrema variabilità dello spessore della crosta era da mettere in relazione al livello di esposizione della zona di prelievo del campione al ruscellamento di acqua piovana. La morfologia della patina si presentava molto più compatta rispetto a quella della crosta soprastante, con confini molto netti tra i due strati; altrettanto netti erano quelli all'interfaccia tra travertino e patina (Figura 3). Laddove la patina si presentava integra e ben aderente alla matrice lapidea, il travertino sottostante non presentava apprezzabili fenomeni di degrado, chiaro indice di una azione protettiva svolta dalla patina stessa nei confronti della pietra. L'ossalato di calcio, nelle due modificazioni cristalline note come *weddellite* ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e *whewellite* ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), è risultato essere presente solo nella patina, costituendone in generale il componente ad abbondanza maggiore. Il solfato di calcio, viceversa, è risultato il componente maggioritario della crosta, anche se presente, in quantità modeste, nella stessa patina. Poiché solfati ed ossalati di calcio sono composti notoriamente incolori, la responsabilità della colorazione era da attribuire verosimilmente ad una componente ricca in silicio, alluminio, ferro, magnesio ed elementi alcalini, presente nella stessa patina in tutti i campioni esaminati.

In questa componente, il rapporto tra i vari elementi citati è risultato significativamente diverso in corrispondenza delle tre colorazioni osservate, ma molto simile in campioni aventi la stessa colorazione. Maggiori dettagli su questo argomento sono riportati in altro articolo [4].

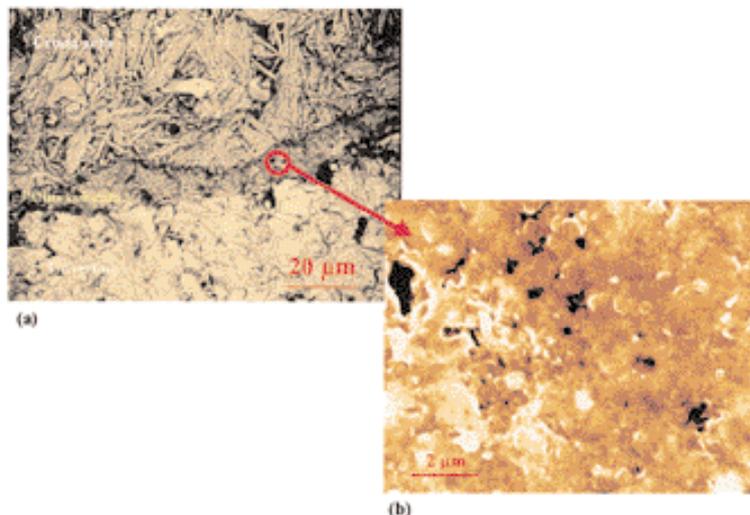


Figura 3 - Immagine ottenuta al microscopio elettronico a scansione su una sezione di un frammento di pietra prelevato in una zona che presentava una colorazione ocra. È visibile una sottile patina tra il travertino e la crosta superficiale (a). Particolare ad alto ingrandimento della patina, che evidenzia una struttura morfologica costituita da particelle di dimensioni dell'ordine del micron (b)

Gli elementi raccolti erano sufficienti per ricondurre quanto osservato alle "patine ad ossalati" trovate su molti monumenti in pietra calcarea e sulla cui origine esiste un ampio dibattito in letteratura [5]. Nel nostro caso, l'ampiezza ed il livello di dettaglio dei dati sperimentali acquisiti hanno consentito, con ragionevole certezza, di attribuire a queste patine un'origine "artificiale", facendole risalire alla trasformazione chimica di strati di "scialbatura". Trattamenti di scialbatura a base di calce venivano frequentemente applicati in passato, soprattutto ai fini della protezione della pietra, impiegando prodotti organici naturali (caseina, colle animali, gomma arabica ecc.) per garantire una sufficiente adesione dello "scialbo" alla matrice lapidea. Proprio la degradazione di questo materiale organico ad opera di microorganismi, tra cui quelli da noi identificati sulla pietra della facciata, dovrebbe aver fornito l'acido ossalico necessario per formare l'ossalato di calcio [2]. Due evidenze sperimentali suggeriscono che l'ossalato si sia formato a spese del carbonato di calcio costituente lo "scialbo" (generato dal processo di carbonatazione della calce iniziale), piuttosto che del carbonato costituente il travertino: l'assenza di carbonato all'interno della patina e la buona conservazione del travertino al di sotto di patine ancora integre.

Secondo l'ipotesi da noi formulata, la componente silicea/ossidica, ritenuta responsabile della colorazione, era stata aggiunta all'impasto utilizzato per il trattamento di scialbatura, proprio con la funzione di pigmento. Data la composizione e la morfologia di questa componente, si può ragionevolmente ipotizzare che siano state utilizzate terre colorate per ottenere il tipo di pigmentazione voluto.

Informazioni raccolte negli archivi della Fabbrica di S. Pietro ed alcuni dipinti che raffigurano la facciata, risalenti ad epoche immediatamente successive a quella della costruzione, supportano la conclusione secondo la quale queste scialbature sarebbero state applicate all'epoca stessa della costruzione (inizio del 1600), almeno per quanto riguarda la colorazione più diffusa, cioè quella ocra. Circa le colorazio-





ni rosso e verde, presenti nell'intorno della Loggia delle Benedizioni, gli elementi raccolti hanno portato a formulare l'ipotesi che fa risalire questi trattamenti di coloritura alla fine del 1700.

Va sottolineato infine che in qualche zona della facciata, particolarmente in corrispondenza del timpano e della trabeazione, sono state individuate coloriture ocra caratterizzate da stratificazioni del tipo travertino/strato a base calcica con elementi pozzolanici/stucco/patina/crosta, verosimilmente riconducibili a trattamenti risalenti ad epoche successive a quella della costruzione e mirati con tutta probabilità al ripristino delle coloriture originali.

I rilievi georadar

La tecnica georadar, spesso indicata come "Ground Penetrating Radar" (GPR), si basa sull'utilizzo di impulsi elettromagnetici, inviati all'interno dell'oggetto in esame (ad esempio, una struttura muraria o un terreno) per mezzo di un'antenna movimentata sulla superficie dell'oggetto stesso. Il segnale riflesso, registrato dalla stessa antenna, contiene una serie di informazioni sulla natura e sullo stato fisico del corpo in esame (ad esempio, presenza di fratture, cavità, componenti di natura chimica o fisica diversa ecc.). Una scansione lineare sulla superficie dell'oggetto fornisce una radargrafia, in pratica una sezione dell'oggetto stesso, dove una delle dimensioni rappresenta la linea di scansione dell'antenna e l'altra definisce un intervallo temporale (tempo di volo dell'onda radar), che, nota la velocità di propagazione dell'onda radar all'interno del materiale, si trasforma in una dimensione spaziale (profondità). Maggiore è la frequenza degli impulsi, maggiore è la risoluzione spaziale e minore è la profondità di penetrazione. Per maggiori informazioni sulle applicazioni della tecnica, vedi [6].

All'interno di questo progetto, la tecnica GPR è stata utilizzata con successo, introducendo anche alcuni elementi in-

novativi a livello applicativo. I rilievi sono stati effettuati mediante la strumentazione multicanale SIR 10B della Geophysical Survey Systems (GSSI), utilizzando alternativamente antenne da 400, 900 e 1500 MHz di frequenza, a seconda che si dovesse privilegiare la risoluzione spaziale o la profondità di penetrazione.

Le radargrafie sono state interpretate in termini tematici (travertino, struttura muraria, cavità, distacchi, fratture, tasselli, grappe metalliche) ed è stata sviluppata una procedura originale che consente una restituzione nel modello geometrico tridimensionale, in ambiente CAD (Figura 4). Sono state ottenute informazioni dettagliate sulla struttura dei blocchi di travertino (spessori variabili tra 40 cm ed 1 metro circa) e del corpo murario, evidenziando per quest'ultimo fratturazioni e distacchi dal rivestimento lapideo.

Complessivamente è stata ispezionata una superficie di circa 4000 m² (il 65% circa di quella dell'intera facciata), comprendente tutte le parti a maggior rischio in termini di stato di conservazione. Oltre ai grandi elementi architettonici (colonne dell'ordine gigante, grandi lesene ed orologi), i rilievi hanno interessato le zone in cui sono presenti quattro grandi lesioni (cretti) che attraversano ortogonalmente la superficie della facciata ed i tre piani principali del corpo architettonico (portico, logge, attico).

Particolarmente innovativo è da considerarsi il rilievo effettuato sulle grandi colonne, trattandosi di una geometria cilindrica di notevoli dimensioni (2,5 metri di diametro e 22 metri di altezza). Le scansioni sono state effettuate lungo tre direttrici verticali posizionate a 0°, 90° e 180° rispetto al piano della facciata.

I rilievi sui mosaici dei due grandi orologi ("Italiano" ed "Oltromontano"), posti sulle due sommità laterali della facciata, integrati da indagini termografiche, hanno consentito di definire in dettaglio la stratificazione dei vari materiali costituenti (tessere del mosaico/malta/peperino/corpo murario) (Figura 4), mettendo in luce criticità strutturali (distacchi, cavità) in

corrispondenza delle interfacce tessere/malta e malta/peperino. L'indagine ha evidenziato il diverso stato di conservazione dei due orologi (l'Oltromontano presentava maggiori criticità, con circa il 50% delle tessere del mosaico staccate dal substrato di malta), consentendo di orientare opportunamente l'intervento di restauro.

Informazioni più dettagliate sul lavoro svolto su questo tema sono riportate in [7].

I rilievi termografici

La termografia è una tecnica che fornisce una mappa termica della superficie di un oggetto, rilevando la radiazione infrarossa emessa dall'oggetto stesso. L'informazione, che interessa una profondità di qualche centimetro, permette di rivelare situazioni critiche che, in un intervento di restauro architettonico, possono riguardare la presenza di elementi strutturali nascosti, lesioni, distacco di intonaco, elementi metallici, ristagno di umidità [8]. Queste situazioni particolari sono identificate all'interno della mappa termica da regioni più fredde o più calde, a seconda dei casi, rispetto al fondo termico della porzione di oggetto investigata.

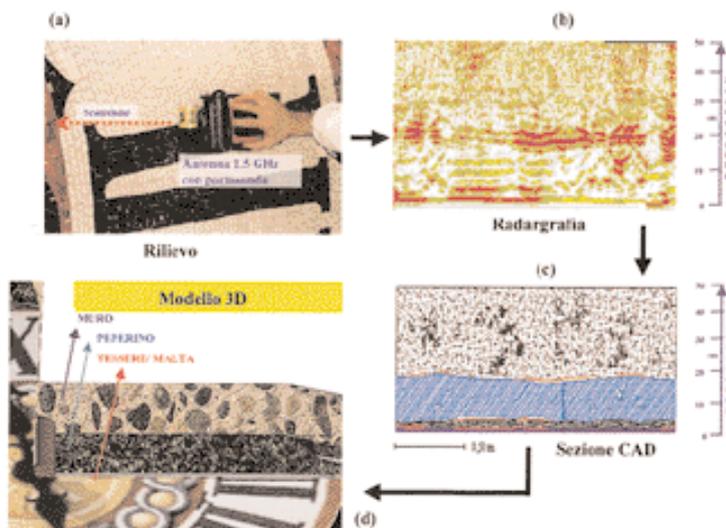


Figura 4 - Schema della procedura seguita per le indagini radar: la scansione lineare sulla superficie dell'oggetto in esame (a) produce una radargrafia (b), la cui interpretazione fornisce una sezione CAD dell'oggetto stesso (c). Più sezioni parallele tra loro consentono di ottenere una rappresentazione 3D (d). L'esempio fa riferimento al mosaico di uno dei due grandi orologi che si trovano sulla sommità della facciata





L'apparecchiatura utilizzata per rilevamenti termografici è tipicamente costituita da una camera che converte la radiazione infrarossa in segnali elettronici amplificati. La mappa termica viene normalmente rappresentata da immagini con diversi livelli di grigio o falsi colori.

Poiché il fattore di emissività termica presenta una variabilità molto limitata all'interno della gamma dei materiali edili di comune utilizzo, per applicazioni riguardanti un edificio monumentale, è necessario disporre di una risoluzione termica abbastanza spinta. Nel caso presente è stata utilizzata una termocamera digitale ThermaCAM SC1000 della Inframetrics, con risoluzione termica di 0,07 °C.

L'applicazione principale ha riguardato il controllo della idoneità delle stuccature applicate, con un criterio basato sull'analisi della risposta termica della superficie dello stucco rispetto a quello della pietra adiacente. Dal momento che emissività termica e calore specifico sono sostanzialmente identici per stucco e travertino, la risposta termica attesa è la stessa per entrambi, ovviamente in condizioni di irraggiamento uniforme.

In realtà, stucchi di qualità chiaramente scadente hanno evidenziato una temperatura superficiale significativamente diversa rispetto alla pietra circostante. Sulla base di un'ampia casistica, acquisita attraverso prove parallele di scalfitura *in situ*, è stata identificata una soglia critica attorno a 0,5 °C per quanto riguarda la differenza di temperatura tra stucco e pietra. Valori al di sotto di tale soglia erano indicativi di stuccature di qualità soddisfacente; valori al di sopra segnalavano situazioni di distacco dalla pietra con eventuali fratturazioni dello stucco (zone più calde rispetto alla matrice lapidea) o ristagno d'acqua (zone più fredde rispetto alla matrice lapidea) (Figura 5).

La stessa tecnica si è dimostrata idonea per verificare l'efficacia del trattamento biocida, resosi necessario a causa dell'inquinamento generalizzato della superficie lapidea della facciata da parte di microorganismi. In presenza di colonie di microorganismi, una superficie lapidea è caratterizzata da una temperatura significativamente più bassa rispetto ad una che ne è priva, ciò a causa della elevata umidità che generalmente accompagna la presenza dei microorganismi stessi. Questo parametro è stato quindi assunto quale indice dell'efficacia del trattamento, nell'ambito di un controllo effettuato a valle del trattamento stesso.

Le tecnologie impiegate nel restauro

La pulitura della pietra

Inizialmente sono state prese in considerazione tutte le diverse tecnologie disponibili sul mercato, da quelle che utilizzano prodotti chimici, a quelle che operano attraverso un'azione meccanica (sabbatura e sue varianti), a quelle basate sull'utilizzo di laser pulsati. La selezione di quella (o quelle) più idonea (idonee) è stata fatta attraverso una serie di prove pilota, corredate da esami di laboratorio su frammenti di pietra prelevati prima e dopo le prove stesse, in cui sono state valutate, per ciascuna delle tecnologie considerate, efficacia, efficienza ed impatto sulla pietra.

La scelta è caduta sulla tecnologia JOS, una variante della idrosabbatura, che opera con un getto composito di aria, acqua e polvere di un inerte di granulometria molto fine (carbonato di calcio, lo stesso componente del travertino),

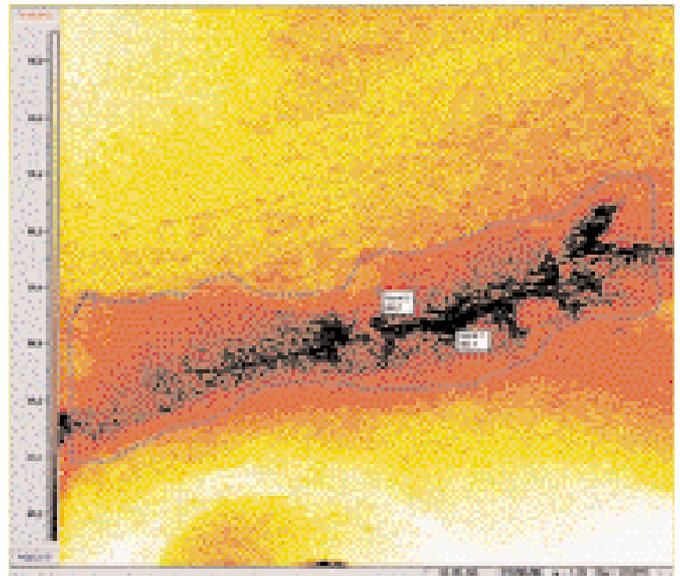


Figura 5- Mappa termografica tipica di una stuccatura caratterizzata da forte ristagno di umidità (zona centrale più scura)

inviato sulla superficie della pietra con un movimento elicoidale impresso da una apposita pistola.

Grazie alla bassa pressione di lavoro ed all'impatto tangenziale sulla superficie della pietra, la rimozione dello strato degradato avviene in maniera molto delicata, evitando quei danneggiamenti della matrice lapidea sottostante, che di solito accompagnano i trattamenti di "sbiancamento" spinto della superficie della pietra (Figura 6). Inoltre, l'elevata flessibilità della tecnica ha permesso di adottare condizioni operative in grado di preservare lo strato di coloritura, sfruttando la maggiore consistenza di questo strato rispetto alla parte più esterna ricca in gesso (Figura 6).

In pratica, la tecnologia JOS è stata impiegata sull'intera superficie della facciata, con risultati eccellenti (Figura 7).

Le stuccature

La presenza di diffusi fenomeni di erosione e di fessurazione della pietra, così come di lacune, soprattutto in corrispondenza di elementi scultorei, ha imposto il ricorso massiccio ad interventi di stuccatura. Inoltre, è stato necessario rimuovere stuccature applicate in passato, in quanto fessurate, distaccate dal substrato lapideo o notevolmente ingrigite, causa la probabile presenza di componenti cementizie nelle malte a suo tempo utilizzate.

La strada seguita in questo intervento di restauro è stata quella di utilizzare malte di tipo tradizionale, a base di calce, polvere di travertino, sabbie e polveri di mattone, queste ultime necessarie per ottenere adeguati accostamenti cromatici con la pietra. Tuttavia, prima di procedere al lavoro di cantiere, formulazioni, procedure di preparazione e di applicazione delle malte sono state ottimizzate attraverso uno studio in laboratorio. In questo modo è stato possibile ottenere stuccature con ottime proprietà meccaniche (resistenza a compressione superiore a 50 kg/cm²), buona adesione alla matrice lapidea e buon accostamento cromatico alla pietra. Quale ulteriore garanzia della qualità del lavoro svolto, l'idoneità delle stuccature applicate è stata verificata attraverso il controllo termografico, come già illustrato nel paragrafo precedente.



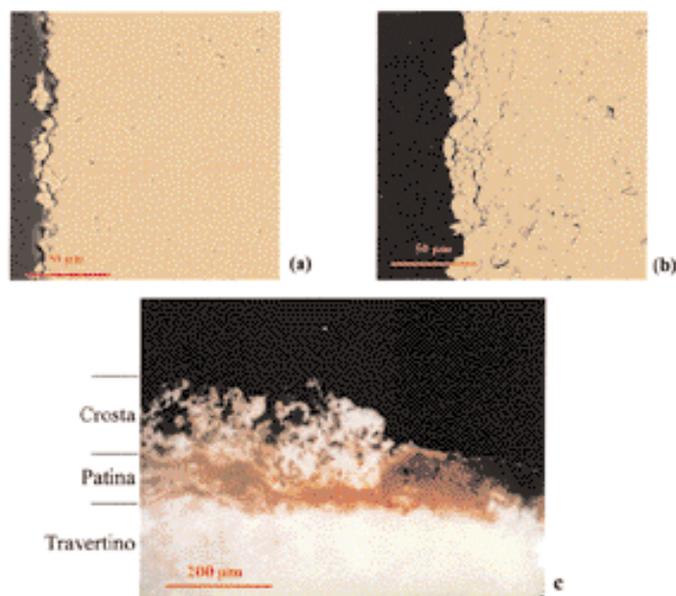


Figura 6 - Micrografie SEM di sezioni di frammenti di pietra prelevati su superfici da cui è stata rimossa completamente la crosta nera con diverse tecniche di pulitura: superficie senza danneggiamento del substrato (a) e con forte alterazione del substrato (b). Micrografia ottica di una sezione di un frammento di pietra prelevato in una zona caratterizzata da colorazione ocracea, dopo una pulitura volutamente parziale effettuata mediante la tecnologia JOS (c). Si può notare che nella zona pulita (parte destra della micrografia) la crosta è stata rimossa preservando la patina responsabile della colorazione

La dimensione complessiva del lavoro svolto è notevole, considerato che le stuccature applicate sono state più di cinquantamila, tutte sottoposte a controllo termografico.

Il trattamento biocida

Avendo accertato, come già accennato più sopra, una situazione di inquinamento biologico sulla pietra della facciata e dati i riflessi che questo ha sul degrado del materiale lapideo, è stato messo a punto in laboratorio un trattamento biocida, selezionando il prodotto commerciale più idoneo allo scopo e definendone la concentrazione minima efficace. Stabilita una procedura di lavoro, il trattamento è stato effettuato sistematicamente su tutta la superficie della facciata, a valle dell'operazione di pulitura e prima di iniziare

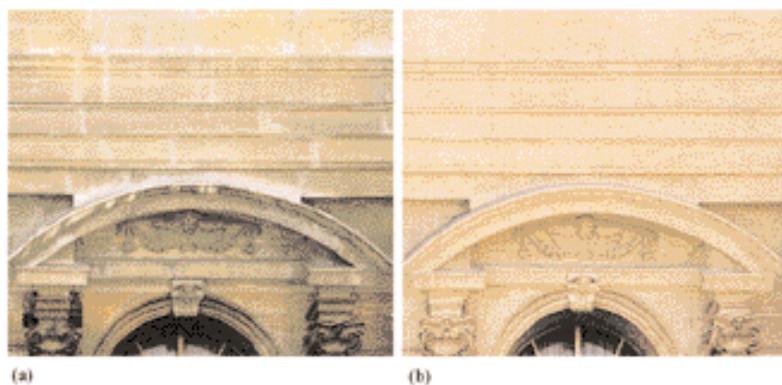


Figura 7 - Immagini digitali di un particolare della facciata prima (a) e dopo l'intervento di pulitura mediante la tecnologia JOS (b)

eventuali operazioni di stuccatura, verificando l'efficacia del trattamento attraverso il controllo termografico (vedi paragrafo precedente).

Il trattamento delle parti metalliche

Sul monumento sono presenti strutture metalliche, quali componenti delle statue, staffe di sostegno, grappe di afferraggio dei blocchi di pietra. Gran parte di queste presentavano evidenti fenomeni di corrosione. Attraverso indagini di laboratorio sono stati identificati i prodotti di corrosione ed individuate le cause più probabili dei fenomeni in atto, in rapporto alle varie tipologie di materiali metallici (acciaio, bronzo, rame) ed alle condizioni ambientali a livello locale.

Questo ha permesso di selezionare i trattamenti protettivi più idonei a garantire la migliore protezione per il futuro. Per la parte in acciaio esposta all'esterno è stato adottato il trattamento di metallizzazione a spruzzo di zinco, applicato in loco, giudicato più efficace e duraturo rispetto al trattamento convenzionale con minio.

Il monitoraggio ambientale

È stato sottolineato nella parte iniziale come il degrado dei materiali lapidei sia collegato in larga misura all'inquinamento atmosferico. Per questa ragione si è ritenuto opportuno inserire nel progetto una linea dedicata all'analisi puntuale della qualità dell'aria a S. Pietro, sfruttando

le competenze consolidate possedute in questo campo da EniTecnologie. Sono state così programmate campagne di monitoraggio in continuo, di circa un mese l'una, in corrispondenza dei quattro periodi stagionali, rilevando uno spettro molto ampio di inquinanti, oltre ai principali parametri meteorologici (temperatura, umidità, velocità e direzione del vento ecc.).

Le misure sono state effettuate mediante un laboratorio mobile ed un sistema ottico *remote sensing* basato sulla spettroscopia infrarossa. In parallelo sono stati acquisiti anche i dati rilevati dalle centraline della rete del Comune di Roma negli stessi periodi di effettuazione delle campagne. I numerosi dati raccolti sono stati elaborati mediante sofisticati strumenti modellistici, con l'obiettivo di identificare le principali sorgenti di inquinamento ed il loro peso relativo.

Limitandoci ai risultati salienti, si può sottolineare il fatto che a S. Pietro i livelli degli inquinanti che rappresentano i traccianti più specifici del traffico veicolare (CO, NO_x) sono sistematicamente più bassi rispetto a quelli di altre zone di Roma ad alta densità di traffico e molto simili a quelli che vengono rilevati a Villa Ada, un parco situato all'interno della zona urbana di Roma. Un dato che si spiega con la pedonalizzazione della piazza e con la conseguente distanza dagli assi stradali, a cui si aggiunge l'effetto di schermatura esercitato dai due bracci laterali (Carlo Magno e Costantino) e dagli edifici papali.

Questa situazione, indubbiamente favorevole,





presenta tuttavia un elemento negativo, legato all'elevata densità di traffico a trazione diesel pesante (la percentuale di bus sul volume complessivo del traffico nella zona di S. Pietro è circa tripla rispetto alla media della città di Roma). In effetti, la concentrazione di SO₂ e di particolato, tipici inquinanti emessi da motori diesel, si avvicina a quella di molte altre zone della città, nonostante l'effetto di diluizione dell'inquinamento evidenziato per CO e NO_x.

SO₂ e particolato sono purtroppo tra gli inquinanti più aggressivi nei confronti dei materiali lapidei.

I risultati di questo studio sono stati tradotti in un modello, sulla base del quale è stato realizzato uno strumento informatico in grado di estrapolare i dati della qualità dell'aria a San Pietro partendo da quelli rilevati dalla rete del Comune di Roma. Attraverso questo strumento, la Fabbrica di S. Pietro potrà tenere sotto controllo la situazione negli anni futuri, disponendo di dati oggettivi per orientare possibili decisioni su eventuali restrizioni del traffico nella zona.

La banca dati

L'enorme quantità di informazioni prodotte nell'ambito del progetto costituisce un patrimonio documentale di grande rilevanza. Per raccogliere tutto questo materiale, è stata realizzata una banca dati *ad hoc*.

Si tratta di un prodotto informatico a carattere interattivo, realizzato su progetto EniTecnologie e strutturato in quattro sezioni principali, dedicate rispettivamente alla diagnostica, alle tecnologie utilizzate, alla documentazione sul restauro ed al monitoraggio ambientale. Una quinta sezione raccoglie una serie di documenti, in particolare quelli di archivio a carattere storico artistico.

La facciata è divisa in oltre 500 zone unitarie e l'utente può accedere alla zona di interesse attraverso "zoom" progressivi, partendo dall'immagine dell'intero monumento. Ciascuna di queste zone è corredata dalla propria immagine digitale (ritagliata dall'immagine complessiva, ottenuta dalla restituzione del rilievo fotogrammetrico), da immagini video dei particolari più interessanti e da tutti i dati delle analisi di laboratorio e di quelle effettuate *in loco* (Figura 8). Sfruttando il materiale raccolto nel rilievo fotogrammetrico effettuato a restauro ultimato, è anche possibile il confronto tra la situazione precedente e quella successiva all'intervento di restauro, sulla stessa identica porzione unitaria.

Considerazioni conclusive

L'apporto di EniTecnologie, a livello di competenze scientifiche e tecnologiche ha influito in maniera determinante sull'intero progetto, che, per la sua impostazione ed i suoi contenuti, non trova facilmente riscontro in altri interventi di restauro, anche nel caso di monumenti di grande rilevanza storico artistica. Tecnologie e competenze tecnico scientifiche si sono integrate in maniera ottimale con le conoscenze di carattere storico artistico e con la tradizione artigianale di alto livello presenti nella Fabbrica di San Pietro. Questo connubio ha costituito indubbiamente una

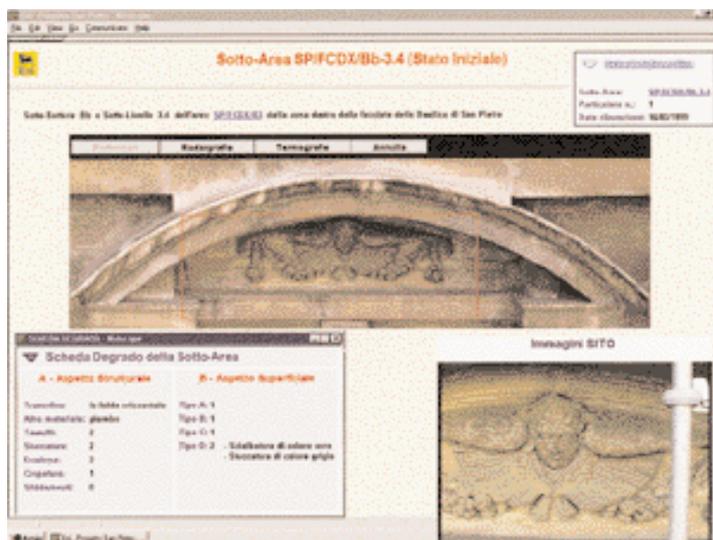


Figura 8 - Contenuto della banca dati: immagine digitale di una porzione della facciata di circa 6x2 metri, corredata da una immagine video di un particolare e da una scheda identificativa dello stato di degrado

delle chiavi di successo del progetto.

Molti sono gli aspetti innovativi generati all'interno di questo progetto, originati dall'attitudine all'innovazione, propria dei ricercatori. Ciò è riscontrabile soprattutto nell'ambito delle attività a carattere diagnostico.

Il *know how* acquisito da EniTecnologie costituisce un patrimonio che potrebbe trovare una sua valorizzazione in altri importanti progetti di restauro.

Bibliografia

- [1] V. Fassina, *Durability of Building Materials*, Elsevier Science Publ., Amsterdam, 1988, **5**, 317.
- [2] C.P. Kubicek, G. Schreferl-Kunar *et al.*, *Applied Environmental Microbiology*, 1988, **54**, 633; R.J. Palmer, J. Siebert, P. Hirsch, *Microbial Ecology*, 1991, **21**, 253.
- [3] E. Previde Massara, R. Millini, M. Buroni, G. Perego, *Proc. of "Quarry-Laboratory-Monument" Int. Congr.*, Pavia, sett. 2000, **1**, 469; G.P. Calvi, U. Zezza (Ed.s), La Goliardica Pavese Srl, 2000.
- [4] E. Previde Massara, G. Perego, *Proc. 9th Int. Congr. on Deterioration and Conservation of Stone*, Venezia, giugno 2000, V. Fassina (Ed.), Elsevier, 2000, **2**, 425.
- [5] G. Torraca, G. Urbani, *Technology Review*, 1989, **7**, 40; lavori vari in *Proc. of II° Int. Symposium "The oxalate films in the conservation of works of art"*, Milano 1996, M. Realini, L. Tonio (Eds.), Editeam, 1996.
- [6] J.H. Bungey, S.G. Millard, *Proc. Instn. Civ. Engrs. Structs. & Bldgs.*, 1993, **99** (5), 173; D.J. Daniels, *J. of Electr. & Commun. Eng.*, 1996, **8**, 165.
- [7] G. Giunta, G. Calloni, *Proc. of "Quarry-Laboratory-Monument" Int. Congr.*, Pavia, sett. 2000, **1**, 469; G.P. Calvi, U. Zezza (Eds.), La Goliardica Pavese Srl, 2000; G. Giunta, G. Calloni, *Proc. of 15th World Conference on Non-Destructive Testing*, Roma, ott. 2000, in corso di stampa.
- [8] C. Romeo, *La termografia ed il suo impiego nell'analisi del manufatto architettonico*, Suppl. n° 13 del Notiziario del Dipartimento Casa-Città del Politecnico di Torino, 1996.

