1. Particolare della decorazione della volta dopo il restauro. 2. Porzione di volta a restauro ultimato. L'apparato decorativo liberato dalle sovrapposizioni incoerenti mostra i corretti rapporti cromatici.
foto Luzzana Restauri srl

biblioteca braidense di milano

LA SALA DEI MANOSCRITTI

Rinforzo strutturale della volta con un sistema composito innovativo

di Libero Corrieri
Soprintendenza per i Beni Architettonici ed il Paesaggio di Milano
Lorenzo Jurina
Politecnico di Milano – Dip.Ingegneria Strutturale, DIS
Thea Squarcina
Ruredil S.p.A. – San Donato Milanese (MI)

L'intervento di restauro della volta della "Sala dei Manoscritti", finanziato con appositi fondi del Ministero per i Beni e le Attività Culturali (Direzione Generale per i Beni Librari e gli Istituti Culturali), fu concepito principalmente a seguito della riapertura di dissesti statici, sicuramente di antica data - come poteva dedursi dai depositi di polveri dentro le fessure delle crepe - tornati ad evidenziarsi a seguito di opere condotte in prossimità delle cantine per la realizzazione di una nuova centrale termica interrrata, che causò, nella Sala in questione, distacco di piccoli brani di intonaco, vecchie sigillature e polvere. L'intervento si divise così in due fasi, strettamente correlate: una di consolidamento statico ed una di restauro dell'apparato decorativo. Entrambe le fasi furono valutate in considerazione delle difficoltà di allestimento di qualsiasi cantiere in un sito così particolare sia sotto il profilo dell'utilizzo corrente, legato alla sua funzione, sia alla presenza di arredi di pregio e di ciò, ancor più di pregio, che in tali arredi era contenuto. Quindi, la convivenza del cantiere con la funzione della biblioteca, evitando di spostare arredi, libri, e documenti antichi, pur salvaguardandoli dalla presenza del cantiere stesso, fu uno dei principali problemi presenti sul piano operativo.

LE FASI PROPEDEUTICHE AL CONSOLIDAMENTO

La prima fase previde il consolidamento statico di un ambiente della sottostante cantina e dell'estradosso della volta della "Sala dei Manoscritti". La seconda fase prevedeva, sempre nella "Sala dei Manoscritti", il restauro degli intonaci e dell'apparato decorativo della volta, progettato e diretto dalla stessa Soprintendenza. Questa sala si presenta con una volta a botte decorata con elementi fito-zoomorfi, fasce e rosoni; la decorazione floreale si sviluppa tra figure di sfingi, grifoni, civette e scheletri, che diventano elementi decorativi all'interno del fregio, dove appaiono anche decorazioni militari. L'intervento di restauro della volta ha riportato in luce tutto il disegno e le cromie dell'apparato decorativo originale eseguito dal Vaccani, giunto a noi ricoperto da velature, parziali ridipinture e coperto da uno spesso deposito di polveri, che ne ottenebravano la percezione visiva. Spesso, le ridipinture erano in coincidenza delle vecchie lesioni, le quali, evidentemente, già in passato erano state oggetto di approssimative sigillature e, quindi, di successive ridipinture di raccordo con l'apparato decorativo con ulteriore sovrapposizione di materiale sull'originale. Inoltre, parte della superficie della volta stessa era interessata dalla presenza di imbiancamenti da sali dovuti a vecchie infiltrazioni dalla copertura ormai da tempo riparata. La pulizia ed il restauro della superficie intonacata furono resi possibili solo dopo aver preliminarmente messo in sicurezza porzioni di intonaco che, soprattutto in prossimità delle lesioni, avevano perso la loro coesione originaria ed erano a rischio di crollo. Pertanto, mediante la velinatura delle medesime con carta giapponese e previa sigillatura puntuale delle parti distaccate mediante una apposita malta a base di grassello di calce, si è ricostituita la coesione tra le differenti parti di intonaco. Quindi, dopo aver proceduto, con pennelli e spugne wishab, ad una preventiva pulitura di tutta la superficie decorata, asportando depositi carboniosi e di polvere, è stata eseguita una sigillatura di fessurazioni non profonde ma diffuse su tutta la superficie usando una malta a base di calce priva di sali. Eseguito il preconsolidamento degli intonaci, si è potuto procedere al restauro dell'apparato decorativo vero e proprio, completandone la pulizia anche mediante sciacqui con carbonato d'ammonio diluito con acqua demineralizzata e dopo avere ese-

SCHEDA CANTIERE

Progetto di consolidamento: prof. ing. Lorenzo Jurina
D.L.: arch. Libero Corrieri e ing. Lorenzo Jurina
Diagnostica: TECNITER (Cassina de' Pecchi - Mi)
Imprese esecutrice: Impresa PAVIA (Pavia), ENGECO (Erba, Co)
Restauro delle superfici: LUZZANA RESTAURI (Civate - Lc)
Importo dei lavori: 141.289 € (opere strutturali)
Durata dei lavori: 4 mesi circa (1998)

1

2

ALCUNI CENNI STORICI

La Biblioteca Braidense fu fondata nel 1770 da Maria Teresa d'Austria, con l'acquisto della biblioteca del conte Carlo Pertusati da parte della Congregazione di Stato per la Lombardia. Nel 1773 trovò collocazione nel palazzo di Brera, già sede del Collegio dell'Ordine dei Gesuiti, disciolto in quell'anno con il decreto di Papa Clemente XIV e già dotato di una cospicua biblioteca, che veniva, quindi, inglobata nella nuova. Il palazzo venne eretto agli inizi del secolo XVII sul sedime del convento degli Umiliati, ordine disciolto per volere di Carlo Borromeo, e progettato prima da Martino Bassi e poi da Francesco Maria Richini. Tra la fine del Settecento e gli inizi dell'Ottocento l'immobile diventerà un vero e proprio polo culturale con trasformazioni architettoniche che vedono la presenza di nomi quali il Piermarini, il Pollack e il Gilardoni.

Il concentrarsi nell'edificio, oltre che della Biblioteca anche di più istituzioni culturali e scientifiche come l'Osservatorio Astronomico, l'Orto Botanico, l'Accademia di Belle Arti, la Pinacoteca, e di altre poi rimosse, comportò la ristrutturazione di diversi ambienti della Biblioteca e di un nuovo apparato decorativo, come la "Sala dei Manoscritti", oggetto del restauro in questione, la cui volta venne decorata con stile neoclassico nel 1835 dal pittore Luigi Vaccani, che già aveva operato nella biblioteca decorando nel 1818 la "Sala dei Cataloghi" e nel 1823 la "Sala di Maria Teresa", risultato delle opere di ristrutturazione del Piermarini.

L'apparato decorativo della "Sala dei Manoscritti" risulta eseguito con la tecnica del "mezzo fresco" con ripresa a calce delle lumeggiature per i giochi d'ombra delle comici e partiture architettoniche che costituivano il disegno compositivo generale. guito preliminari campionature in sito. Nel corso di tale intervento, al fine di riportare in luce le coloriture originali, dimostratesi ben adese al supporto di intonaco, sono anche stati asportati ritocchi di precedenti restauri con impacchi di carbonato d'ammonio applicati con carta giapponese.

Come succede spesso nel corso degli interventi tesi a conservare il patrimonio culturale, aspetti del restauro strutturale devono convivere e collaborare con quelli propri del restauro delle finiture e delle superfici decorate.

Infatti, sempre nel corso dell'intervento di restauro dell'intradosso della volta, fu possibile procedere ad un primo preconsolidamento della volta dall'estradosso, dopo aver sigillato le lesioni negli intonaci, mediante iniezioni nelle lesioni passanti di malte moderatamente espansive. Tale operazione risultava inevitabile ed altamente delicata proprio per la presenza dell'apparato decorativo, che già in passato era stato manomesso da interventi sulle lesioni con esecuzione di sigillature, che avevano realizzato ampie sbavature sporcando ampiamente la superficie decorata.

Così operando, il successivo e sostanziale intervento di consolidamento statico all'estradosso poté essere eseguito evitando il puntellamento di tale volta; operazione che appariva in prima istanza irrinunciabile, perché da un lato necessaria per la fruizione in sicurezza degli operatori sopra la volta stessa, ma dall'altro molto problematica per la presenza sia degli antichi arredi librari, sia per il valore dei libri in essi contenuti che caratterizzano la Biblioteca Braidense, sia per l'accesso degli operatori che avrebbero dovuto procedere al montaggio del ponteggio stesso.

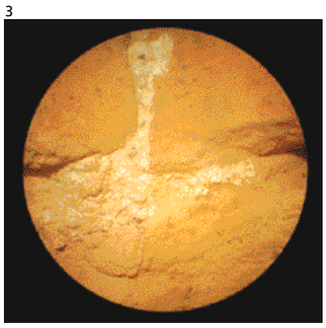
LE PROVE DIAGNOSTICHE

Rilevanti, per la definizione e l'estensione degli interventi strutturali, sono state le indagini diagnostiche: una campagna di prove soniche per la caratterizzazione di omogeneità delle murature, alcuni sondaggi con prelievo di carote nelle pareti, l'esecuzione di endoscopie sulle volte, una prova con martinetto piatto semplice e doppio per la definizione della resistenza e della deformabilità delle murature, la posa di una rete di fessurimetri potenziometrici per la misura dei movimenti delle principali fessure. Queste ultime, protratte per un anno, hanno fornito la prova che la struttura si spostava secondo fisiologici ritmi stagionali, senza apprezzabili residui alla chiusura del ciclo. Le fessure, provocate da cedimenti di fondazione indotti da scavi eseguiti anni prima in aderenza all'edificio, apparivano stabilizzate e la muratura delle pareti perimetrali appariva omogenea e di discrete caratteristiche meccaniche.

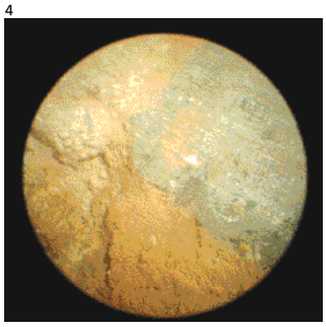
Solo la volta, di soli 6 cm di spessore, ordita con mattoni in foglio, manifestava un quadro fessurativo marcato e sostanzialmente preoccupante, con potenziale rischio di crollo di porzioni della struttura, malgrado la presenza di frenelli murari di irrigidimento. In passato si sono verificati frequenti distacchi di intonaco e caduta di piccole porzioni di muratura. La direzione principale delle fessura era diagonale rispetto al rettangolo di base, con maggiore presenza in corrispondenza dello spigolo ceduto.

3, 4, 5. Endoscopie e carotaggi delle murature.

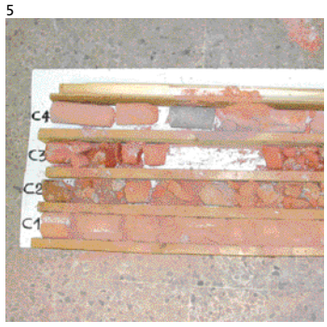
3



4



5



LE VERIFICHE STRUTTURALI

L'andamento delle lesioni, la loro ampiezza e la posizione sulla volta e sulle pareti, rappresentano la sintomatologia leggibile e misurabile delle cause che hanno determinato il dissesto della struttura. Tali informazioni sono risultate determinanti per la taratura e la "validazione" del modello numerico ad elementi finiti, che è stato predisposto per simulare la struttura e identificare le ragioni del dissesto.

Si è riscontrato, infatti, che imponendo al modello condizioni di cedimento e rotazione delle murature in corrispondenza dell'angolo più prossimo allo scavo, si evidenziano zone con tensioni di trazione la cui distribuzione è del tutto simile a quella delle lesioni rilevate allo stato di fatto sulla volta.

La modellazione numerica, unitamente all'osservazione indiziaria, ha confermato l'ipotesi che era stata formulata a livello empirico, ossia che le lesioni presenti sulla volta e sui maschi murari della Sala dei Manoscritti sono da attribuire al *cedimento fondazionale* del muro lato cortile Accademia, a seguito delle operazioni di scavo per la realizzazione di un vicino corpo interrato, ed alla *eccessiva sottigliezza* della volta in muratura della sala manoscritti.

Le indicazioni operative di progetto sono state formulate sulla scorta dei risultati diagnostici e delle verifiche numeriche eseguite, portando alla definizione degli interventi minimi necessari a tenere sotto controllo i fenomeni di dissesto della struttura voltata.

6. Pianta e sezioni con indicazione delle principali fessure. La "Sala dei Manoscritti" occupa il locale all'ultimo piano. Nelle sezioni trasversali si osserva il locale tecnico, causa remota dei dissesti.

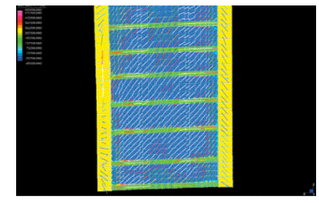
6

IL MODELLO NUMERICO

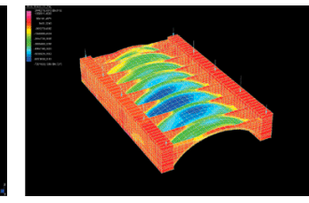
La struttura della "Sala dei Manoscritti", è stata verificata tramite un modello numerico agli elementi finiti, utilizzando il programma STRAUSS, considerando un comportamento dei materiali elastico-lineare. Tutte le parti in elevazione della struttura sono state discretizzate attraverso l'utilizzo di elementi BRICK di forma variabile.
Su tutta la superficie della copertura è stato applicato un carico da neve di 150 Kg/mq ed un peso proprio della copertura stessa di 80 Kg/mq, così da ottenere un carico complessivo di 230 Kg/mq. I pesi propri degli elementi sono applicati automaticamente dal programma, note le aree ed i pesi specifici.

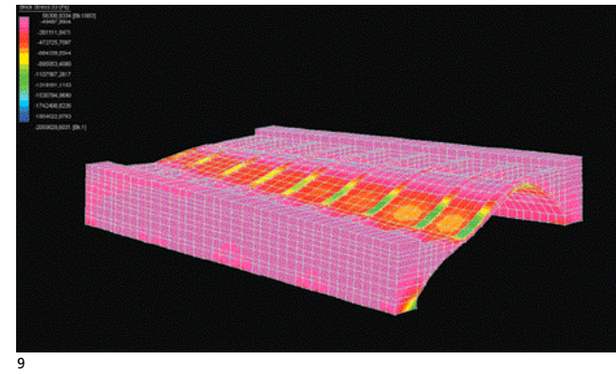
MODELLO 1 - Un primo modello, in cui sono stati discretizzati i muri laterali della volta a botte fino ad arrivare alle cantine e le solette dei piani intermedi, ha permesso di verificare lo stato di sollecitazione della struttura nel momento della sua costruzione, così da poter considerare possibili carenze strutturali fin dall'origine.
La struttura già in fase di costruzione presenta uno stato tensionale abbastanza elevato. In particolare, si può osservare che lo sforzo in direzione verticale raggiunge, alla base delle murature laterale, il valore massimo di 4,64 Kg/cmq. Gli altri sforzi principali (σ_{11} e σ_{22}), che approssimativamente possono essere considerati in direzione orizzontale, raggiungono valori di trazione pari a 3,59 Kg/cmq, in prossimità dell'incrocio tra i frenelli e la volta a botte. E' anche da evidenziare lo stato di sforzo a trazione a cui è soggetta la sottile volta a botte in chiave, sulla parte intradossale, dove abbiamo un valore medio di 2,4 Kg/cmq. Sempre in questa posizione della volta a botte, è possibile notare uno sforzo σ_{22} di trazione con un valore massimo di 1,03 Kg/cmq.

7



8

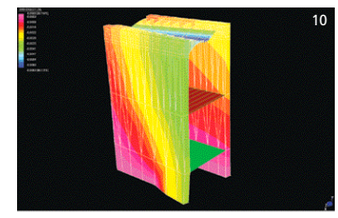




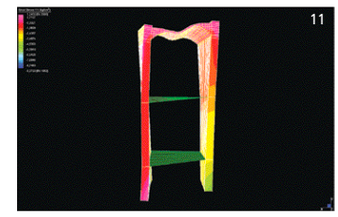
9

MODELLO 2 - E' stato successivamente realizzato un secondo modello, in cui sono state introdotte le fessure presenti sulla volta a botte, così da verificare il comportamento della struttura nella sua nuova conformazione strutturale. La presenza delle fessure è stata simulata semplicemente staccando tra loro i vari elementi Brick interessati dal fenomeno. Com'era lecito aspettarsi, questa operazione ha comportato un incremento puntuale dello stato di sollecitazione della struttura; infatti, con il quadro fessurativo presente viene meno il comportamento membranale della volta, impedendo di fatto la collaborazione fra tutte le parti della struttura. In particolare, si può notare che lo sforzo principale σ_{11} si porta ad un valore di trazione di 4,03 Kg/cmq. Anche lo sforzo in direzione 33 subisce un incremento accentuato e, infatti, passa da un valore a compressione di 4,64 Kg/cmq ad uno di 6,36 Kg/cmq.

Come ultimo obiettivo della modellazione numerica, si è cercato di individuare le cause che hanno potuto determinare il quadro fessurativo presente nella struttura.
Sono stati realizzati diversi modelli che simulassero vari cedimenti fondazionali. Dopo alcuni tentativi si è potuto simulare un cedimento d'angolo, di circa 5 cm, che determina uno stato tensionale di trazione il cui andamento è compatibile con il quadro fessurativo presente. Acquisite tali informazioni, si trattava ora di definire la tipologia di intervento. La presenza di fessure distribuite, passanti e di ampiezza rilevante (fino a 5 mm) ha consigliato l'adozione di un intervento distribuito su tutta la cappa, sia allo scopo di ripristinarne la monoliticità, essendosi esaurito il cedimento fondale, sia allo scopo di prevenire crolli locali di singoli mattoni.

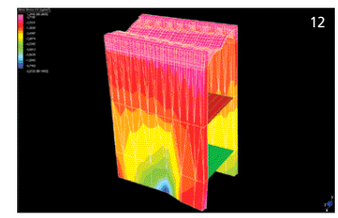


10

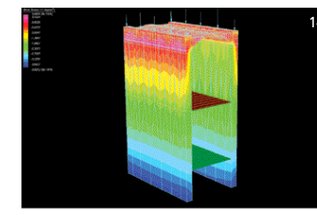


11

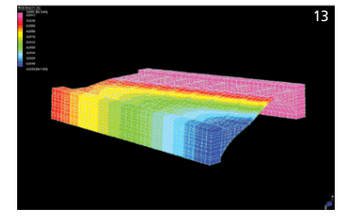
7, 8, 9. Sforzi principali σ_{11} e σ_{22} nelle volte in muratura, prima della formazione delle fessure. 10, 11, 12, 13, 14, 15. Sforzi principali σ_{11} e σ_{22} nelle pareti e nella volta, fessurate a seguito del cedimento differenziale delle fondazioni.



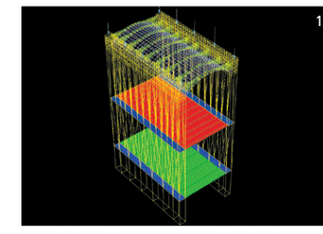
12



14



13



15

IL CONSOLIDAMENTO STRUTTURALE DELLA VOLTA

Il consolidamento della volta è stato eseguito con un sistema composito innovativo, costituito da una rete in fibra di carbonio abbinata ad una matrice inorganica stabilizzata. *Ruredil X Mesh C10* è un sistema brevettato, che si differenzia dai tradizionali FRP, in quanto la matrice organica della resina epossidica è sostituita da una malta idraulica pozzolanica additivata per realizzare l'adesione con la fibra strutturale.

Questa tecnologia offre alcuni vantaggi rispetto ai sistemi di rinforzo FRP tradizionali, in particolare:

> la maggiore compatibilità meccanica del sistema di rinforzo con il supporto murario, garantita da una matrice inorganica che impiega un legante compatibile anche dal punto di vista chimico-fisico;

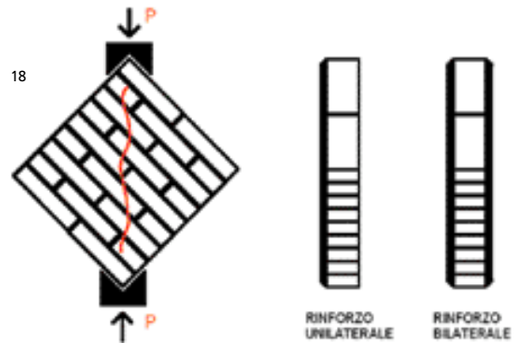
> la permeabilità al vapore, che elimina il rischio di condensazione superficiale;

> la resistenza al fuoco, paragonabile a quella del supporto;

> la facilità di manipolazione e di applicazione, in quanto il materiale non è tossico, si prepara come una malta tradizionale, mantiene una buona lavorabilità in un ampio intervallo di temperatura, non teme la presenza di umidità nell'ambiente e nel supporto.

L'efficacia del sistema di rinforzo è stata studiata in laboratorio, dove alcuni campioni sono stati sottoposti a prove di trazione indiretta mediante compressione diagonale. Sono stati testati diversi schemi di rinforzo per valutare l'incremento della resistenza a taglio; nel caso dell'applicazione di uno strato di rinforzo su entrambi i lati della muratura, si è ottenuto un aumento della resistenza pari a 3,5 volte rispetto al campione non rinforzato (Certificati DISTART – Bologna).

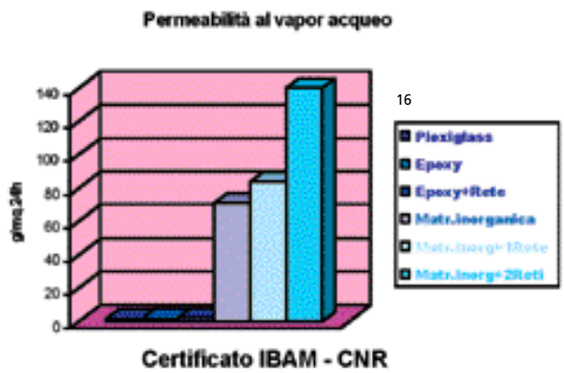
18



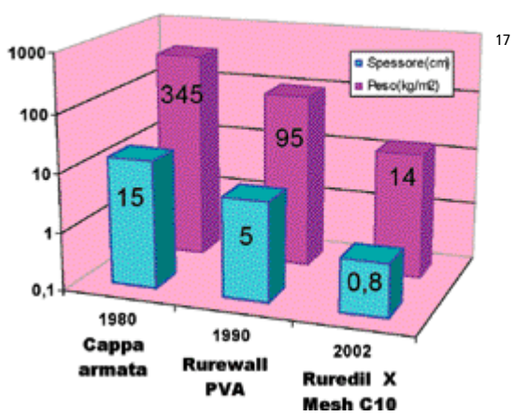
19

Tipologia del rinforzo	P_{max} [N] (val. medio)	f_t [N/mm²] (val. medio)	T_k [N/mm²] (val. medio)	T_{ko}/T_k (val. medio)
Non rinforzato	35 x 10^3	0,37	0,33	1
Unilaterale Singolo strato	54,15x 10^3	0,57	0,51	1,55
Unilaterale Doppio strato	94,2 x 10^3	0,99	0,90	2,69
Bilaterale Doppio strato	122,9 x 10^3	1,29	1,18	3,51

16. Permeabilità al vapor acqueo di vari materiali da costruzione. 17. Peso e spessore strutturale di diverrse soluzioni adottabili per il consolidamento estradossale della volta in muratura. 18, 19 (tabella). Resistenza dei provini variamente rinforzati con *X Mesh C10.* 20. Decorazione della parete di fondo, durante l'intervento di intonazione al fine di colmare le piccole lacune presenti nel film pittorico (*foto Luzzana Restauri srl)* .



16



17

20

L'estradosso della volta nella Sala dei Manoscritti si presentava coperto da un intonaco dello spessore di un paio di centimetri, che per ampi tratti di superficie risultava privo di coesione al sottofondo. La prima fase dell'intervento è, quindi, consistita nella rimozione totale di questo strato di finitura per garantire una perfetta adesione del rinforzo alla struttura portante.

Successivamente si è proceduto alla regolarizzazione del sottofondo per consentire un migliore aggrappo del rinforzo strutturale alla muratura, condizione che si ottiene impiegando come interfaccia un materiale dalle prestazioni intermedie. Dopo un'accurata pulizia del sottofondo mediante aspirazione, è stata applicata una malta da rinzaffo per murature friabili (Rurewall Riz) a base di leganti idraulici pozzolanici a basso contenuto di sali, per garantire una perfetta compatibilità chimica con le murature. L'applicazione della malta viene effettuata a consistenza fluida, realizzando uno spessore di circa due centimetri e avendo cura di smussare gli eventuali spigoli esistenti.

Dopo qualche settimana, necessaria per raggiungere il completo indurimento della malta, si è proceduto all'applicazione del rinforzo strutturale. La superficie, ripulita ancora una volta dai residui delle lavorazioni precedenti, viene bagnata con una pennellessa prima dell'applicazione di una malta ad alto potere adesivo (Ruredil X Mesh C10 M25) per la successiva applicazione della rete in carbonio su strutture in muratura. Sullo strato di malta fresca, dello spessore di circa tre/quattro millimetri, si posa la rete precedentemente tagliata con una forbice; con l'ausilio di un frattazzo metallico si esercita la pressione necessaria per annegare la rete in carbonio e consentire il passaggio della malta attraverso la maglia. In successione, ovvero fresco su fresco, si procede alla copertura con un altro strato di malta di almeno tre millimetri per completare l'esecuzione del sistema di rinforzo.

La successione nella posa dei teli viene definita caso per caso, in funzione della geometria della struttura; sulla volta in oggetto si è proceduto prima al rinforzo dei frenelli e poi a quello della volta, avanzando per settori trasversali successivi.

La continuità del rinforzo sulla superficie si ottiene, in corrispondenza delle giunzioni, sormontando la rete di almeno 7/8 cm. Per realizzare la connessione del rinforzo della volta alle murature perimetrali, è stato eseguito un risvolto della rete strutturale sulle murature verticali adiacenti per una lunghezza di circa 80 centimetri.

21. Fasi del consolidamento: regolarizzazione del supporto e posa della rete in carbonio sui frenelli sulle pareti e sulla volta.

CONCLUSIONI

Rispetto ai metodi di consolidamento tradizionale realizzati con cappa collaborante in betoncino armato, e anche rispetto alla cappa ottenuta con malte integrate da fibre strutturali in poli-vinil-alcool, il metodo di rinforzo strutturale adottato introduce un netto miglioramento tecnologico, che si può facilmente verificare sia in termini di riduzione dello spessore e dei pesi aggiunti alla struttura esistente, sia in termini di incremento delle resistenze.

Lo scopo dell'intervento è stato quello di garantire la sicurezza dell'edificio alla luce del particolare utilizzo al quale è sottoposto e di prolungare la sua durata nel tempo, allontanando la soglia di decadenza, prevenendo le cause effettive e potenziali di degrado ed in modo particolare di dissesto. E' importante tuttavia tenere conto di un aspetto spesso sottovalutato: l'intervento su un edificio non è da intendersi quale soluzione valida per sempre. E' necessario ipotizzare nel tempo una serie di controlli con scadenza programmata che, partendo nuovamente dalla fase di osservazione e conoscenza, consentano di stabilire lo stato di salute dell'edificio in un tempo futuro, al fine di definire nuovamente se e come intervenire.

Si è pertanto ipotizzato un programma di manutenzione delle strutture, con frequenze temporali definite, tenendo in debita considerazione il particolare utilizzo cui l'edificio è adibito e la preziosità dei beni in esso contenuti.

22a. Colature dall'estradosso della volta frutto di precedenti interventi. 22b, c. Crepa in muratura che evidenzia i precedenti interventi di tamponamento; in passato si era ricorsi anche all'uso di grosse garze e collanti. 22d. Consistente fessura lungo la parete di fondo oggetto di passate misurazioni per il monitoraggio del dissesto strutturale. 22e, f, g. Particolari della decorazione della volta a restauro concluso, sono stati recuperati gli interessanti giochi cromatici. 22h. Particolare della parete di fondo durante la rimozione delle pesanti colature. *foto Luzzana Restauri srl*

22a

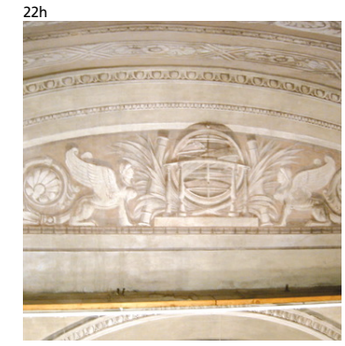
22b

22c

22d

22e

22f

22g

22h