

CLIMA NEGLI EDIFICI DI CULTO

METODI, MISURA E PROGETTO

A CURA DI CARLO MANFREDI
E FRANCESCO TROVÒ





 **MIMESIS / SUSTAINABLE HERITAGE**

N. 10

Collana diretta da Davide Del Curto

COMITATO SCIENTIFICO

Valter Balducci (*École Nationale Supérieure d'Architecture de Normandie*)

Mattias Legnér (*Uppsala University – Department of Art History, Conservation*)

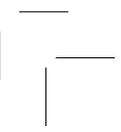
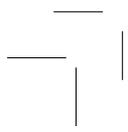
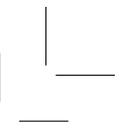
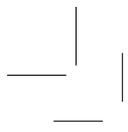
Yasmine Makaroun (*Université Libanaise – Centre de Restauration et de Conservation
– Faculté des Beaux-Arts et d'Architecture*)

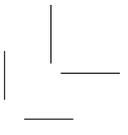
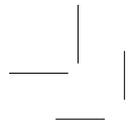
John Sandell (*Florida Atlantic University – School of Architecture*)

Ruggero Tropeano (*Università Svizzera Italiana – Accademia di Architettura*)

Petr Vorlík (*České Vysoké Učení Technické – Fakulta architektury*)







CLIMA NEGLI EDIFICI DI CULTO

Metodi, misura e progetto

a cura di
Carlo Manfredi e Francesco Trovò



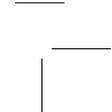
 **MIMESIS**



MIMESIS EDIZIONI (Milano – Udine)
www.mimesisedizioni.it
mimesis@mimesisedizioni.it

Collana: *Sustainable Heritage*, n. 10
Isbn: 9788857587714

© 2022 – MIM EDIZIONI SRL
Via Monfalcone, 17/19 – 20099
Sesto San Giovanni (MI)
Phone: +39 02 24861657 / 24416383



INDICE

PRESENTAZIONI <i>Emanuela Carpani</i>	7
<i>Anna Buzzacchi</i>	
<i>Alberto Grimoldi</i>	
INTRODUZIONE <i>Carlo Manfredi, Francesco Trovò</i>	13
CONOSCENZA	
CLIMA E MICROCLIMA NELLE CHIESE. ASPETTI NORMATIVI <i>Dario Camuffo</i>	23
SOSTENIBILITÀ NELLA RICERCA SUI BENI CULTURALI. OSSERVAZIONI DI LUNGO TERMINE SULLA RICERCA PER GLI EDIFICI STORICI <i>Ralf Kilian, Stefan Bichlmair, Kristina Holl, Susanne Raffler, Robert Krah, Martin Krus, Klaus Sedlbauer</i>	35
MICROCLIMA E LUCE NELLA TRASFORMAZIONE DEGLI EDIFICI STORICI: LA CHIESA DI SAN BIAGIO ORA BIBLIOTECA DI PALAGIO DI PARTE GUELFA A FIRENZE <i>Carla Balocco</i>	47
PRIMA E DOPO IL RESTAURO. IL CLIMA INTERNO DELLA BASILICA DI SANT'ANDREA A MANTOVA <i>Davide Del Curto</i>	61

IL RUOLO DEL MICROCLIMA NELLA CONSERVAZIONE
DEL PATRIMONIO LIBRARIO E ARCHIVISTICO. IL CASO
DELLA BIBLIOTECA DELFINIANA NEL PALAZZO ARCIVESCOVILE DI UDINE
Chiara Bertolin 83

LO STUDIO DEL MICROCLIMA NELLA CHIESA DI SANTA MARIA
DELLA VISITAZIONE A VENEZIA
Amalia Donatella Basso, Carlo Cacace 111

PROGETTO

LE CHIESE DI VENEZIA TRA VALORI CONSOLIDATI E NUOVI SCENARI
Gianmatteo Caputo, Francesco Trovò 127

LA *TEMPERIERUNG* PER SANTA MARIA ODIGITRIA A ROMA.
CLIMA E PROGETTO
Carlo Manfredi 143

RISCALDARE LE CHIESE DI VENEZIA:
APPROCCI E SOLUZIONI PROGETTUALI
Alessandra Turri, Ilaria Cavaggioni 155

CULTO E CULTURA IN SAN FANTINO MARTIRE A VENEZIA.
IL NUOVO SISTEMA DI RISCALDAMENTO; PROGETTO E CANTIERE
Giorgio Della Longa 167

IL PRESBITERIO DI SANTA MARIA DELLA SALUTE.
UN SISTEMA RADIANTE INTEGRATO AL PAVIMENTO BAROCCO
Giuditta Russo, Davide Beltrame 181

IL CONTROLLO AMBIENTALE NELLA FORMAZIONE DI GIOVANI
ARCHITETTI: L'ESPERIENZA DELL'UNIVERSITÀ IUAV
Maria Antonietta De Vivo, Fabio Peron, Angela Squassina 195

BIBLIOGRAFIA 211

AUTORI 221



DAVIDE DEL CURTO

PRIMA E DOPO IL RESTAURO. IL CLIMA INTERNO DELLA BASILICA DI SANT'ANDREA A MANTOVA

Questo testo presenta i risultati della ricerca sul clima interno della Basilica di Sant'Andrea a Mantova e illustra i dati del monitoraggio eseguito dal 2007 al 2013, in occasione del restauro degli interni¹. Il clima del monumento è stato indagato con tre obiettivi. Il primo è fornire supporto diagnostico alla progettazione del restauro, in particolare alle operazioni di pulitura e protezione degli intonaci dipinti. Il secondo è contribuire alla messa a punto di una strategia conservativa di lungo termine. Le condizioni del clima possono infatti mettere a rischio i materiali igroscopici come leganti e pigmenti, e monitorarne l'andamento aiuta a prevenire l'insorgenza di fenomeni patologici. Il terzo e più generale obiettivo è accrescere la conoscenza dell'edificio, migliorando la comprensione del suo comportamento fisico, esito della lunga vicenda costruttiva, e utilizzando la ricerca sul clima interno come strumento d'indagine archeometrica, cioè come uno dei momenti attraverso cui si svolge la ricerca su ogni edificio del passato².

-
- ¹ I risultati presentati in questo scritto sono frutto della ricerca sul clima interno della Basilica Concattedrale di Sant'Andrea in Mantova eseguita dall'autore insieme all'architetto Luca Valisi, come parte dell'incarico di ricerca e assistenza tecnico-scientifica affidato dalla Parrocchia di S. Andrea Apostolo al Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura e Pianificazione, Laboratorio di Analisi e Diagnostica del Costruito (responsabile scientifico: prof. Arch. Alberto Grimoldi), in occasione del restauro degli interni di abside, presbiterio e transetto. Cronologia: 2008-2012 (progetto); 2011-2015 (lavori). Superficie di intervento: 6.500 mq. Importo lavori: 3.000.000 €. Progetto di restauro: Prof. Arch. Alberto Grimoldi, arch. Davide Del Curto (Politecnico di Milano), con Juri Badalini (indagini sugli arredi lignei), Marco Cofani, Verena Frignani, Angelo Landi (rilievo del degrado e ricerca storico-archivistica), arch. Luca Valisi (monitoraggio strutturale, monitoraggio del clima interno). Indagini diagnostiche sui materiali: CGS Palladio (esecuzione prove), dr.ssa Giovanna Alessandrini (consulenza). Direzione lavori: Arch. Monica Nascig. Progetto e direzione lavori impianti elettrici: Ing. Luciano Cattini. Sicurezza: Ing. Marco Spezia (progettazione), ing. Ugo Carra (esecuzione). Impresa appaltatrice: RSW srl.
 - ² D. Del Curto, A. Luciani, *Monitorare il microclima negli edifici storici. Una pratica preventiva come strumento di conoscenza*, Atti del XXVI convegno internazio-





Figura 1. Facciata, campanile, cupola della Basilica di Sant'Andrea. Fonte: W. J. Anderson, *The architecture of the renaissance in Italy. A general view for the use of students and others*, London: B. T. Batsford, 1909, p. 93. Digitalized by Brigham Young University, 93. Fonte: www.flickr.com/photos/internetarchivebookimages/14760961101 (25.1.2021).

nale "Scienza e Beni Culturali" – Pensare la prevenzione, manufatti usi ambienti, Bressanone 13 – 16 luglio 2010, Arcadia Ricerche, Venezia 2010, pp. 203-212.

La Basilica di Sant'Andrea a Mantova

La Basilica Concattedrale di Sant'Andrea è una grande chiesa con impianto a croce latina con navata e cappelle laterali, iniziata a metà del Quattrocento e completata a fine Settecento, con la costruzione della cupola tardobarocca. Si tratta di un edificio molto importante per l'architettura dell'Età Moderna, concepita in una capitale del Rinascimento Italiano da due figure chiave di quella stagione come il marchese Ludovico II, protagonista dell'ascesa dei Gonzaga nello scacchiere politico europeo, e Leon Battista Alberti, intellettuale, matematico e trattatista a cui la storia ha riconosciuto il merito di aver distinto la figura del progettista da quella del capomastro-imprenditore, affermando la natura intellettuale della professione e promuovendo l'architetto moderno a interlocutore diretto del principe, perché capace di interpretarne pensieri e desideri³. Il progetto della nuova chiesa era infatti destinato a completare la *renovatio urbis* intrapresa dal Gonzaga lungo l'asse che collega il Palazzo Ducale con i quartieri meridionali, verso cui s'indirizzava l'espansione della città e l'isola del Tejeto, dove più tardi Federico II e la madre Isabella d'Este costruirono la residenza suburbana. Lungo questo percorso, la chiesa di Sant'Andrea doveva permettere alla città di riunirsi per venerare la reliquia, come in un'antica basilica, cioè un "gram spatium dove molto populo capesse a vedere el sangue de Cristo" e celebrare il potere del principe, suo custode.

L'edificio fu concepito sulla base di rapporti proporzionali tra le figure geometriche del cerchio e del quadrato, che Alberti impiegò anche per la chiesa di San Sebastiano, la facciata di Santa Maria Novella a Firenze, il Tempio Malatestiano a Rimini. Alberti aggiornò gli archetipi dell'architettura antica, come la Basilica di Massenzio e anche dell'architettura medievale, ben presenti nella città mantovana, come l'antica Rotonda di San Lorenzo. La facciata (Figura 1) è dominata da un frontone a timpano e da un arco trionfale attraverso cui lo spazio urbano della strada prosegue all'interno della navata coperta da una grande volta a botte decorata a lacunari dipinti⁴. Priva di navate laterali, l'aula è affiancata da una sequenza di cappelle. Le maggiori si aprono con un ampio arco a tutto sesto. Le cappelle minori formano i pilastri a lesene binate che sostengono la cornice dell'ordine maggiore, a sessanta braccia mantovane dal pavimento, pari

3 Rimando all'arguta esegesi della celebre lettera invita nel 1470 da Leon Battista Alberti a Ludovico Gonzaga proposta in P. Carpeggiani, C. Tellini Perina, *Sant'Andrea a Mantova. Un tempio per la città del principe*, Publi Paolini, Mantova, 1987, pp. 9-35.

4 Sulla ricerca dei riferimenti alla base di questo disegno si veda, fra gli altri, M. Bulgarelli, *Leon Battista Alberti 81404-1472. Architettura e Storia*, Milano: Electa 2008, pp. 178-207.

a circa diciotto metri (Figura 3). L'intradosso della volta si trova a ventotto metri, la base della lanterna a circa ottanta. La navata è lunga circa cento metri e il volume d'aria interno è di sessantamila metri cubi. La Basilica sorge su un'area alluvionale, fu costruita interamente in laterizio e decorata con intonaco dipinto, stucco dorato, e pochissimi elementi di legno e pietra naturale.

La costruzione: 1472-1782

La costruzione si completò nel corso di tre secoli e quattro campagne di lavori. Nella I campagna (1472-1494), Luca Fancelli sovrintese alla costruzione della facciata e della navata maggiore. La chiesa fu officiata nella forma di una grande aula basilicale chiusa sul fondo da una parete lignea provvisoria. Così si presentava il 30 novembre 1526, in occasione dei funerali di Giovanni de' Medici che solo cinque giorni prima era stato ferito a morte nello scontro di Governolo, mentre tentava di ritardare la marcia dei Lanzichenecci verso il sacco di Roma. Nella II campagna (1530-1565) furono costruiti transetto e presbiterio e il grande spazio interno fu coperto con un tetto a capanna. Nel corso della III campagna (1597-1600) fu costruita la cripta, destinata a custodire i sacri vasi della reliquia⁵. La basilica assunse così un aspetto prossimo a quello definitivo, eccezion fatta per l'assenza della cupola e per lo stato ancora incompleto del transetto meridionale, come testimoniato dalla carta di Bertazzolo del 1628. Durante la IV campagna (1697-1702), l'architetto bolognese Giuseppe Torri rinforzò i piloni destinati a sostenere la cupola, coprì i bracci della croce con le volte, e progettò l'ammodernamento dell'interno demolendo il cornicione cinquecentesco, per far posto ad archi più slanciati aperti sulle cappelle laterali e aprendo grandi unghie finestrate nella volta, per illuminare la navata, replicando uno schema già utilizzato nei bracci minori della croce. Alla fine del Seicento, terminò la signoria dei Gonzaga sulla città di Mantova, iniziata nel 1328 con la cacciata dei Bonacolsi. Ferdinando Carlo, decimo duca di Mantova e del Monferrato lasciò la città al controllo austriaco il 21 gennaio 1707. La grande cupola tardo barocca – completata tra il 1731 e il 1782 – si deve quindi all'iniziativa imperiale e al genio di Filippo Juvarra che mutò radicalmente la percezione dello spazio liturgico, introducendo un contrasto inatteso tra l'oscurità della navata e la crociera illuminata dalle alte finestre del tamburo.

5 E. J. Johnson, *Sant'Andrea in Mantua: The Building History*, Pennsylvania State University Press, 1990, p. 40.



Figura 2. Veduta della navata. Foto di Frode Inge Helland (1984).
Fonte Wikicommons (25.1.2021).



Figura 3. I depositi di particolato sono evidenti sulle lesene dell'ordine maggiore osservando le riprese d'intonaco corrispondenti a ciascuna giornata, (foto DDC).

Dopo la costruzione: restauri e manutenzioni

Dopo più di tre secoli (1472-1782) la chiesa poteva dirsi completata, ma bisognò subito por mano a un restauro per eliminare le tracce della tentata riforma barocca, e riportare la basilica al suo aspetto rinascimentale. Occorreva anche rimediare ai danni dovuti alle infiltrazioni dai tetti provvisori che coprirono la fabbrica nel corso della lunga costruzione. La decorazione pittorica dei bracci minori della croce, della controfacciata e il pressoché totale rifacimento della navata è frutto di questo impegnativo restauro tardo settecentesco diretto dall'architetto veronese Paolo Pozzo con l'aiuto di un gruppo di pittori tra cui Felice Campi, Giorgio Anselmi, Gaetano Crevola, Andrea Mones e Paolo Zandalocca⁶. Come i restauri del Te o di Palazzo Ducale, l'interno di Sant'Andrea è quindi un documento del secolo austriaco in Lombardia: un'opera pubblica che aveva l'obiettivo di rendere decorosa e agibile la grande chiesa di giuspatronato ducale, destinata alle cerimonie. È significativo il fatto che Eugene Johnson, che per primo ha studiato sistematicamente i documenti della Fabbrica, distingue nettamente quest'ultima stagione di lavori, dalle quattro campagne in cui suddivide la costruzione vera e propria, evidenziando come al restauro illuminista di Paolo Pozzo ("he would have called the whole campaign simply a restoration") si debba l'integrità degli interni, e la loro aderenza al progetto albertiano⁷.

In seguito, tra il 1864 e il 1886, la basilica fu equipaggiata con un sorprendente impianto di illuminazione a gas, che rischiarava il grande interno con lampade e lampioni a fiamma libera e con un grande anello posto alla base del tamburo e provvisto di sessantaquattro becchi fiammeggianti⁸. L'impianto bruciava il gas ottenuto dalla distillazione del coke e rimase in funzione fino al 1909, diffondendo residui carboniosi su tutte le pareti interne, dove l'osservazione in luce radente evidenzia

6 Su questo tema rimando alla ricerca di Verena Frignani, Amministrazione e uso delle fabbriche camerali a Mantova nel Settecento e Paolo Pozzo, perito camerale. Tesi di dottorato in Conservazione dei beni architettonici, Politecnico di Milano, 2012, pp. 83-91. www.politesi.polimi.it/handle/10589/56733 (25.1.2021).

7 A. Grimoldi, *La Restauration de la Renaissance: sauvegarde et projet dans la Lombardie Autrichienne (1748-1848)*. In: L. Frédérique, P. Yves. *Le XIXe siècle et l'architecture*, Paris, Picard, 2010, p. 163-180.

8 D. Del Curto, A. Landi, *Gas-lighting in Italy during 1800s. Urban plants and monuments devices between construction history and questions of safeguard*, in *Proceedings of the 3rd International Congress on Construction History, Brandenburg University of Technology, Cottbus (Germany) 20th – 24th May 2009*, pp. 465-472.

la densità dei depositi presenti sulle irregolarità della superficie, per esempio sulle riprese di intonaco corrispondenti alle giornate di lavoro (Figura 3). Occorre infine ricordare una serie di altri interventi susseguiti nel corso del Novecento, nel solco dell'attività di manutenzione. Il pavimento lapideo della navata, per esempio, fu oggetto di un importante rinnovamento e in quell'occasione si restaurarono i basamenti delle lesene maggiori. L'edificio ha inoltre continuato a patire infiltrazioni dalla copertura, soprattutto nella zona del transetto, dove il tamburo interseca i bracci della croce. I segni sono evidenti sulla superficie delle volte, dipinta a lacunari, sugli arconi e i pennacchi che sostengono la cupola. Negli anni Novanta le coperture furono finalmente oggetto di un restauro sistematico che mise l'edificio al riparo.

Il restauro degli interni (2008-2015)

L'intervento di restauro ha riguardato le superfici pittoriche del transetto, del presbiterio e dell'abside per una superficie pari a circa seimilacinquecento metri quadri, fortemente degradata con distacchi tra gli strati, percolazioni dalle coperture e una serie di lesioni strutturali, oltre ai depositi superficiali di particolato. Numerosi anche i casi di polverizzazione, esfoliazioni e cadute della tinta, sollevamenti e distacchi delle dorature. Il rilievo ha messo in luce diversi livelli di degrado della pellicola pittorica, a seconda del colore prevalente. Per esempio, i lacunari dipinti all'intradosso delle volte con campi alternati rossi e blu presentavano un degrado più marcato in corrispondenza del colore rosso (Figura 4). La decorazione dell'ordine maggiore richiama la quadricromia pliniana, secondo cui gli autori antichi avrebbero dipinto utilizzando solo rosso, giallo, bianco e nero. Queste aree presentano un degrado concentrato nelle zone dipinte di nero, per esempio nelle ombre che danno rilievo alle figure di putti e festoni (Figura 5). Anche le figure dipinte da Giorgio Anselmi nei riquadri degli arconi mostrano un degrado differenziato a seconda del colore, evidenziando quindi la presenza di pigmenti igroscopici, maggiormente esposti alle conseguenze della condensazione superficiale. Coerentemente con le esigenze di bilancio di un'opera pubblica, la tinta fu infatti ottenuta utilizzando pigmenti poco costosi, come il nero di vite e gli ossidi di ferro contenenti piccole percentuali di argille instabili, come base per il rosso e la gamma dei rosa negli incarnati, e il verde veronese o "terra di Verona".



Figura 4. Degrado differenziale della tinta nei lacunari dipinti sulla volta del braccio meridionale del transetto (Foto DDC).

Le pitture murali furono realizzate con tecnica alla calce, in luogo dell'affresco, che permetteva ai pittori tardo barocchi rapidità di esecuzione e la possibilità di un ritocco a secco. I profili venivano incisi nell'intonachino ancora fresco steso a pennello, e il disegno veniva poi completato sempre a pennello, anche a secco, con il colore applicato in più strati, con l'aggiunta di leganti organici. Le analisi mostrano che in tutti i campioni è presente un tenore rilevante di gesso insieme alla miscela di terre e calce carbonatica. Non si tratta di un prodotto secondario dovuto alla solfatazione del carbonato di calcio, bensì di materiale aggiunto intenzionalmente all'intonachino come carica stabilizzante e regolatrice dei tempi di presa, secondo una pratica non infrequente nel Settecento. La superficie fu infine protetta applicando una velatura a base di acqua di calce, con latte o caseina, come suggerito dalle tracce di fosforo rinvenuto in molti dei campioni analizzati, e di cristalli di ossalato di calcio che hanno reso compatta la superficie proteggendola dall'umidità e dal particolato⁹. La presenza di queste grandi superfici contenenti gesso e pigmenti igroscopici ha quindi richiesto un'attenta progettazione del restauro, controllando le lavorazioni di pulitura con l'uso di acqua per non alterare lo strato protettivo superficiale e sollecitare il gesso presente nell'intonachino.

9 P. Cornale, F. Frezzatto (CSG Palladio srl), Basilica Concattedrale di S. Andrea Apostolo (Mantova) – Area Absidale. Analisi microstratigrafica, mineralogico-petrografica e chimico fisica. Relazione scientifica. Rif. 08CO00805, Vicenza, 27 giugno 2008, p. 156.

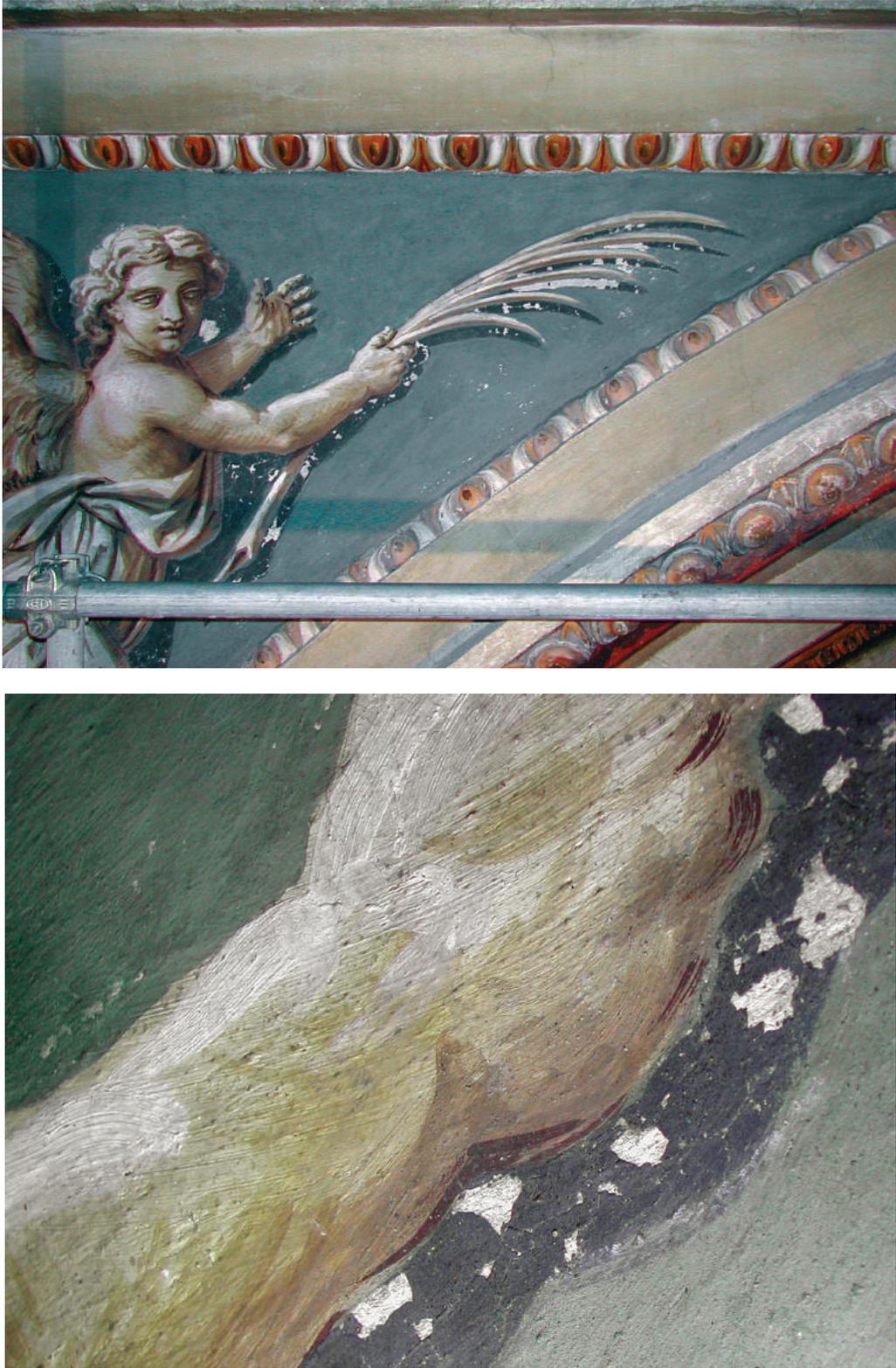


Figura 5. Degrado differenziale nelle tinte scure utilizzate per le ombre delle figure a monocromo della cornice nel presbiterio.

Inoltre, l'intervento di restauro è stato affiancato da un'approfondita analisi del clima interno per valutare il rischio di interazione con l'umidità ambientale e con le sue variazioni. Accanto a questo primo obiettivo diagnostico, finalizzato a chiarire se le condizioni climatiche siano dannose per la buona conservazione delle superfici dipinte, il monitoraggio è stato progettato anche come uno strumento di controllo permanente del monumento, entro una prospettiva di conservazione preventiva.

Il monitoraggio del clima interno

Il clima esterno, quello interno e il regime igro-termico delle strutture murarie di un edificio storico sono strettamente legati tra loro dai processi di cambiamento di stato dell'acqua. Per comprendere le dinamiche di formazione del degrado ad essi connesso e progettare adeguati interventi di restauro e conservazione è quindi fondamentale studiare il clima interno, rilevando temperatura e umidità dell'aria, il contenuto d'acqua della muratura, la temperatura superficiale delle pareti, il moto delle masse d'aria. Le variazioni di questi parametri possono modificare alcune proprietà dei materiali esponendoli al rischio di stress meccanico e conseguente degrado: a contatto con aria secca molti materiali organici (legno, tela, etc.) si contraggono diventando più rigidi e fragili; con aria umida, essi si dilatano e divengono più plastici e flessibili. In presenza di aria umida e calda molti materiali sono inoltre soggetti a rischio chimico e biologico (corrosione, sviluppo di muffe, funghi, insetti).

Certamente l'umidità rappresenta un fattore di rischio per la Basilica di Sant'Andrea e la conservazione delle sue finiture, in particolare per le pitture murali che – come abbiamo detto – furono realizzate con leganti e pigmenti igroscopici, pertanto sensibili alla presenza di umidità e alle sue variazioni nel tempo. L'umidità è una caratteristica stabile del clima mantovano, una città che sorge su una penisola circondata da laghi paludosi, bonificati in secoli di storia. La Basilica di Sant'Andrea si è conservata in questo clima per ben quattrocento anni ed è chiaro che, in generale, i suoi problemi di conservazione sono dovuti soprattutto ai lunghi anni passati senza la protezione di un vero tetto, più che all'umidità del clima mantovano.

Occorre però circostanziare questa considerazione di massima, ricordando che l'umidità può danneggiare una superficie dipinta secondo due dinamiche di scambio aria-parete. Da un lato, la parete può cedere umidità all'aria-ambiente, mediante evaporazione. Questo accade per esempio

quando una parete assorbe umidità dal terreno per risalita capillare e poi la cede all'ambiente mediante evaporazione dalla superficie. Come noto, la presenza di sali solubili può dar luogo a fenomeni di efflorescenza e cripto-efflorescenza, potenzialmente molto dannosi per gli intonaci decorati. Il secondo fenomeno è quello della condensazione superficiale che si verifica quando la temperatura della superficie muraria raggiunge il punto di rugiada, cioè ha una bassa temperatura in presenza di rilevanti tenori di umidità ambientale. È una condizione che si verifica tipicamente tra la fine della primavera e l'inizio dell'estate, quando l'aria si riscalda più rapidamente delle strutture murarie, che a causa della maggiore inerzia termica offrono una superficie fredda su cui l'aria calda e umida proveniente dall'esterno può condensare, mettendo a rischio le pitture murali, soprattutto quando sono costituite da leganti e pigmenti igroscopici, come appunto nel caso di Sant'Andrea. Il monitoraggio del clima interno si è concentrato su localizzare e quantificare questi due fenomeni.

Il progetto del monitoraggio

Come le altre attività di studio e restauro, anche la progettazione del monitoraggio microclimatico si misura con le grandi dimensioni della Basilica di Sant'Andrea e con la sfida di descriverne il comportamento mediante un numero di sensori limitato ma rappresentativo dei diversi ambienti, ciascuno con specifiche caratteristiche geometrico-dimensionali in grado di condizionare localmente i parametri e la loro risposta al variare del clima esterno. La progettazione del monitoraggio richiede quindi competenze a cavallo tra l'architettura e la fisica dell'edificio e consta di due fasi operative.

Nella prima fase si costruisce un modello climatico semplificato dell'ambiente interno, sulla base dei dati di temperatura e umidità relativi rilevati localmente con uno strumento ad alta sensibilità, perciò in grado di apprezzare le piccole differenze di un grande ambiente non riscaldato. L'operatore percorre la pianta dell'edificio lungo una griglia ideale a maglia quadrata di lato 1,5 metri, ed esegue una misura presso ogni nodo. L'operazione si ripete in diversi momenti della giornata (mattina, pomeriggio e sera) in condizioni climatiche esterne diverse. L'interpolazione lineare dei dati viene associata a una scala di falsi colori, ottenendo così una serie di mappe cromatiche isoterme e isocore che "fotografano" la distribuzione dei valori di temperatura e umidità dell'aria, e permettono di localizzare rapidamente anomalie e aree di squilibrio

all'interno della basilica (Figura 6). Si può notare che i valori di temperatura e umidità relativa dell'aria si distribuiscono uniformemente lungo la navata e il transetto. Questa omogeneità è assicurata dalla forte inerzia termica del volume d'aria e dalle grandi masse murarie che agiscono con un *buffer* che attutisce le variazioni esterne di temperatura e umidità. Solo presso le tre controfacciate, il clima appare leggermente più sensibile alle variazioni esterne. Le cappelle laterali sono mediamente più fredde rispetto al grande volume della navata. Tra esse, si nota un moderato gradiente termico solo in parte spiegabile con la morfologia degli ambienti: la temperatura aumenta partendo dalla cappella a contatto con la controfacciata, verso quella prossima alla crociera. La sagrestia è l'ambiente più umido ed è più freddo di oltre due gradi rispetto alla navata. La cripta, infine, presenta una distribuzione dei parametri più uniforme rispetto al resto della Basilica e livelli di umidità sorprendentemente inferiori, grazie al fatto che vi è installato un piccolo deumidificatore portatile. La seconda fase consiste nel monitoraggio in continuo dei medesimi valori, per evidenziare l'entità delle variazioni orarie, giornaliere o stagionali nei punti che la mappatura preliminare ha evidenziato come rappresentativi delle condizioni ricorrenti nell'intero edificio o, al contrario, di anomalie locali. Sono stati installati undici rilevatori per il monitoraggio orario di temperatura e umidità relativa, connessi via radio a una memoria posizionata nel locale sacrestia.

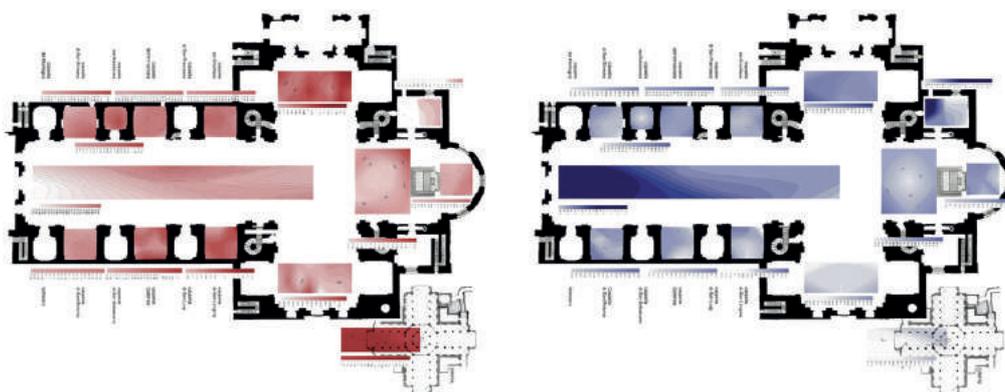
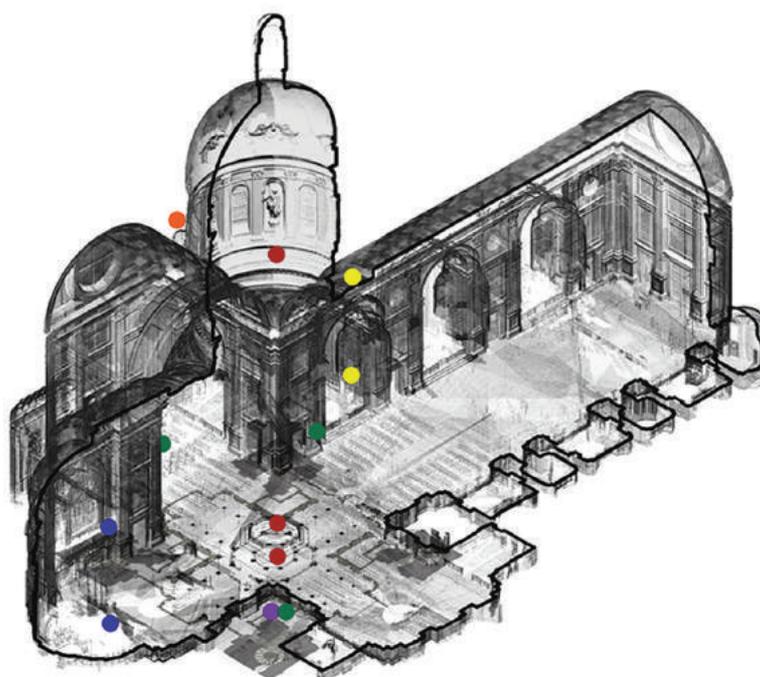


Figura 6. Distribuzione planimetrica della temperatura e dell'UR dell'aria, 8 febbraio 2007, ore 11:00.

La posizione dei rilevatori è stata determinata suddividendo la basilica in sei settori omogenei dal punto di vista climatico, in ragione delle loro caratteristiche storiche, costruttive, d'uso e di esposizione all'irraggiamento solare e al vento: tiburio, coro, transetto, sagrestia, navata, cappelle, sottotetto (Figura 8). Tre rilevatori (1,2,3) monitorano la sezione verticale della Basilica in corrispondenza del tiburio per verificare l'entità del gradiente termico e la conseguente presenza di moti convettivi. Due rilevatori (4,5) monitorano il presbiterio, uno nei pressi dell'altare maggiore e del coro ligneo, l'altro alla quota dell'organo Serassi. Due rilevatori (6,7) monitorano la cappella di San Longino e l'estradosso della sua volta per valutare l'escursione tra ambiente interno e sottotetto. Tre rilevatori (8,9,10) monitorano la navata alla quota di +2.00 metri sul livello del pavimento per evidenziare i punti a maggior rischio in termini di benessere ambientale. L'ultimo rilevatore (11) è collocato fuori dall'edificio, e fornisce un dato esterno di prossimità.



	1,2,3	TIBURIO
	4,5	PRESBITERIO
	6,7	CAPELLA DI SAN LONGINO
	8,9,10	NAVATA, TRANSETTO, SACRESTIA
	11	ESTERNO

Figura 7. Posizione dei sensori all'interno della Basilica.

Risultati

Il monitoraggio si è svolto per sette anni consecutivi, dal 2007 al 2013, minimizzando così l'influenza di una stagione anomala. Per ciascun rilevatore sono stati calcolati i valori massimi, medi e minimi di: temperatura dell'aria, escursione di temperatura su 24 ore, umidità relativa, escursione di umidità relativa su 24 ore, escursione della temperatura annuale, escursione dell'umidità relativa annuale, differenza di temperatura superficie – ambiente (UNI 10829:1999). È stata inoltre calcolata la media mobile a settantadue ore per tutti gli anni di osservazione, utile a stimare il “clima storico” dell'edificio.

Sulla base di questa ampia base di dati, il clima interno della basilica conferma alcune caratteristiche evidenziate con l'analisi preliminare: in primo luogo si conferma un comportamento fortemente inerziale rispetto alle variazioni esterne di breve periodo, il che significa che la temperatura e l'umidità relativa all'interno della chiesa non risentono delle escursioni giorno – notte. D'altra parte, il monitoraggio permette anche di evidenziare situazioni eccezionali relative a singole giornate. Si veda per esempio l'effetto della folla presente il 7 ottobre 2007 per l'insediamento di S.E. Monsignor Roberto Busti, che ha alterato sensibilmente i valori di temperatura e l'umidità misurati da tutti i sensori (Figura 8).

L'inerzia di lungo periodo può essere misurata osservando come l'andamento dei dati interni sia simile a quello relativo al dato esterno, ma presenti un ritardo di circa cinquanta giorni. Questo significa che l'interno di Sant'Andrea risente delle variazioni stagionali con oltre un mese di ritardo: in autunno, l'aria interna si mantiene tiepida fino a metà novembre, sebbene all'esterno scenda già verso lo zero, soprattutto di notte. Al contrario, in primavera, la chiesa si riscalda molto più lentamente rispetto all'aria esterna, che alla fine di maggio è già tiepida e carica di umidità. In questo periodo dell'anno, il monitoraggio evidenzia quindi una minaccia per la conservazione delle pitture murali legata al rischio di condensazione superficiale.

Il rischio di condensazione superficiale

La temperatura di rugiada è la temperatura alla quale, a pressione costante, l'aria diventa satura di vapore acqueo e condensa su una superficie a temperatura inferiore, per esempio una parete. Il rischio che questo fenomeno si verifichi nella Basilica è massimo alla fine della primavera, quando la superficie delle pareti si riscalda più lentamente dell'aria umida proveniente dall'esterno. Il fenomeno è ben visibile sui pochi elementi in pietra naturale lucida come scalini, balaustre, modanature dello zoccolo e soprattutto sul

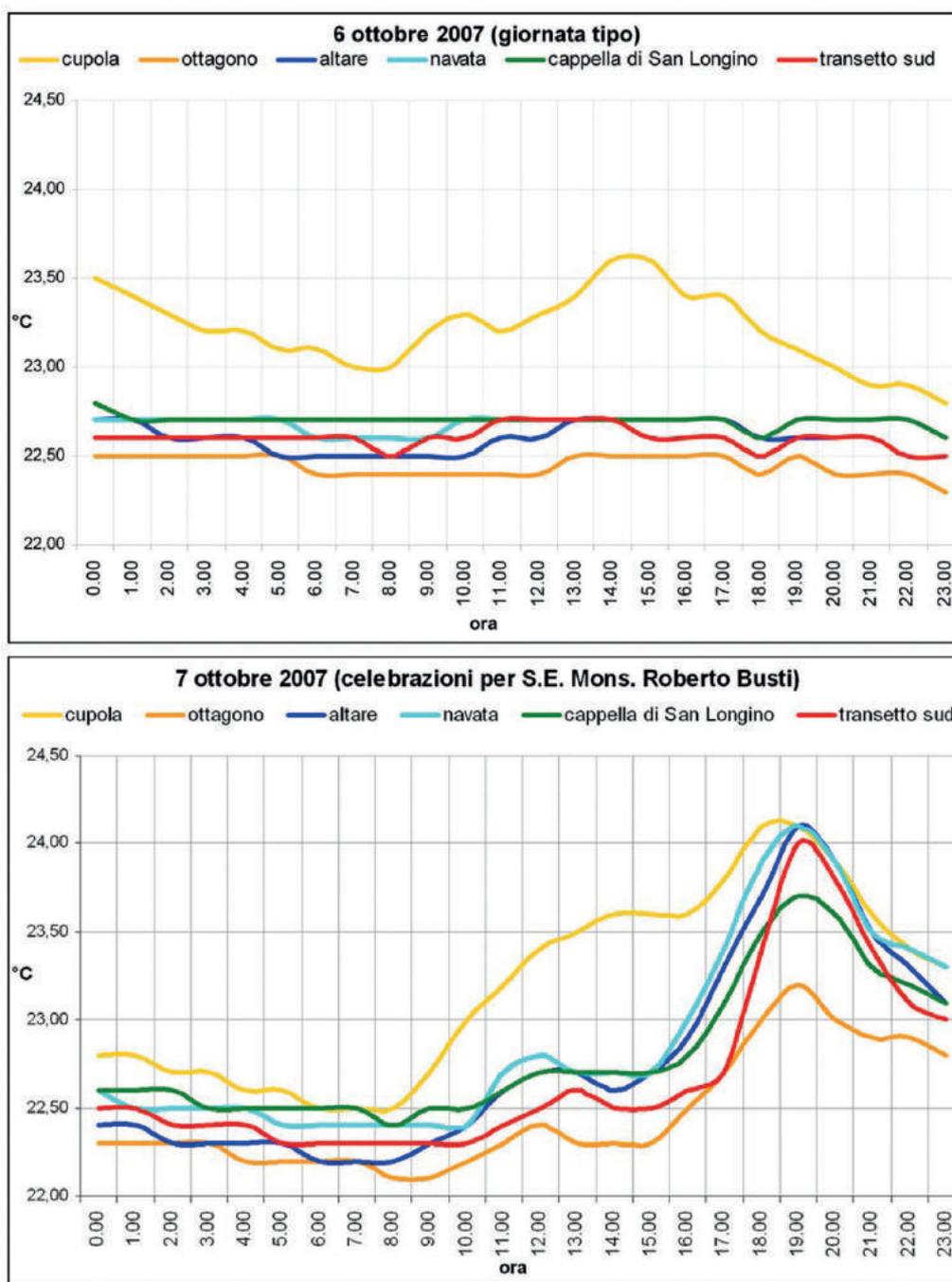


Figura 8. Confronto tra l'andamento di una giornata normale e una con grande affollamento di persone, in occasione delle celebrazioni per l'insediamento di S.E. Monsignor Roberto Busti, 7 ottobre 2007.

pavimento della navata, che alla fine di maggio si presenta umido e scivoloso. Il fenomeno è meno visibile sugli intonaci dove il passaggio di stato dell'acqua da vapore a liquido può danneggiare la decorazione pittorica, soprattutto se combinato con depositi di particolato ricco di ossidi.

La distanza della temperatura dell'aria dal punto di rugiada (DPR) è un indicatore del rischio di condensazione. Data la temperatura di rugiada, la DPR indica la differenza termica che determina condensazione spontanea, cioè di quanti gradi l'aria deve essere raffreddata per raggiungere la condensazione in aria libera. Per la Basilica di Sant'Andrea, si consideri il valore di soglia = 5°C che tiene conto dell'andamento dei valori misurati all'interno della navata, in prossimità del pavimento nel corso dell'anno. La diseguaglianza $DTR < 5^{\circ}\text{C}$ esprime quindi il rischio di condensazione all'interno dell'edificio. I grafici a torta mostrano il numero di giorni/anno in cui questo rischio si presenta nei diversi punti della chiesa, per esempio in corrispondenza della crociera dove ricorre per ben trenta giorni all'anno, in particolare tra maggio e giugno (Figura 9). Il rischio di condensazione si concentra nella fascia d'aria più vicina al pavimento e ai piedistalli delle lesene, fino a circa 3-3,5 metri di altezza. Oltre tale quota, il rischio diminuisce rapidamente, fino a scomparire sopra i cinque metri (Figura 10).

Riscaldare o non riscaldare?

Per ridurre il rischio di condensazione si può agire in due direzioni: si può aumentare, pur moderatamente, la temperatura della superficie a rischio, attivando un localizzato riscaldamento conservativo¹⁰; oppure si può ridurre il tenore di umidità nell'aria utilizzando un sistema di deumidificazione (meccanizzato o passivo) e aumentando la ventilazione dell'ambiente.

Nel primo caso si può installare un impianto di riscaldamento radiante localizzato, avente non tanto la funzione di scaldare l'ambiente, bensì di mantenere la superficie al di sopra del punto di rugiada. Si tratta di una soluzione *temperierung* che ha avuto un certo riscontro in centro Europa grazie a progetti che hanno coinvolto musei ed altri edifici patrimoniali nei primi anni Duemila, e che recentemente è oggetto di rinnovato interesse da parte della ricerca internazionale¹¹.

10 D. Camuffo (a cura di). *Il riscaldamento delle chiese e la conservazione dei beni culturali. Guida all'analisi dei pro e dei contro dei vari sistemi di riscaldamento*. Milano, Mondadori Electa 2006, pp. 60-62.

11 R. Kilian, S. Bichlmair & M. Krus (2018): *Evaluation of different wall heating systems in historic monuments – aspects of energy and conservation*, Journal of Architectural Conservation, DOI: 10.1080/13556207.2018.1456047.

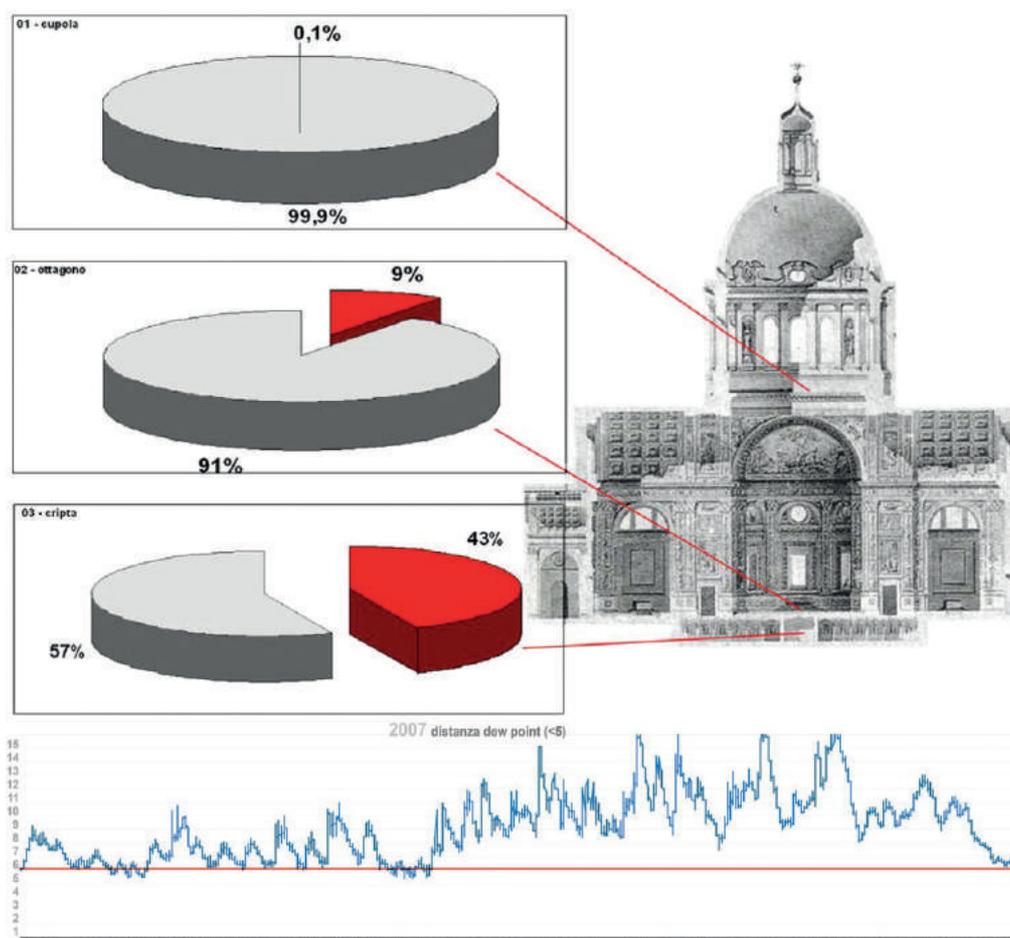


Figura 9. Distribuzione del rischio di condensazione superficiale lungo la sezione trasversale della Basilica (in alto) e nel corso dell'anno (in basso).

Il sistema è stato applicato anche in Italia, come dispositivo di conservazione preventiva a completamento di un restauro, proprio per ridurre il rischio di condensazione al piede di una parete fredda¹². Tuttavia, l'ipotesi di installare un riscaldamento radiante localizzato per ridurre questo rischio nella Basilica di Sant'Andrea, non è stata oggetto di una valutazione tecnica preliminare. In sua vece, nel corso delle successive fasi di restauro che hanno interessato la cupola settecentesca, è stata migliorata la ventilazione interna.

12 D. Del Curto, *Restauro, conservazione preventiva ed efficienza energetica. Il sistema temperierung in Italia*, in (a cura di) E. Lucchi e V. Pracchi, *Efficienza energetica e patrimonio costruito. La sfida del miglioramento delle prestazioni nell'edilizia storica*, Santarcangelo di Romagna, Maggioli Editore 2013, pp. 309-323.

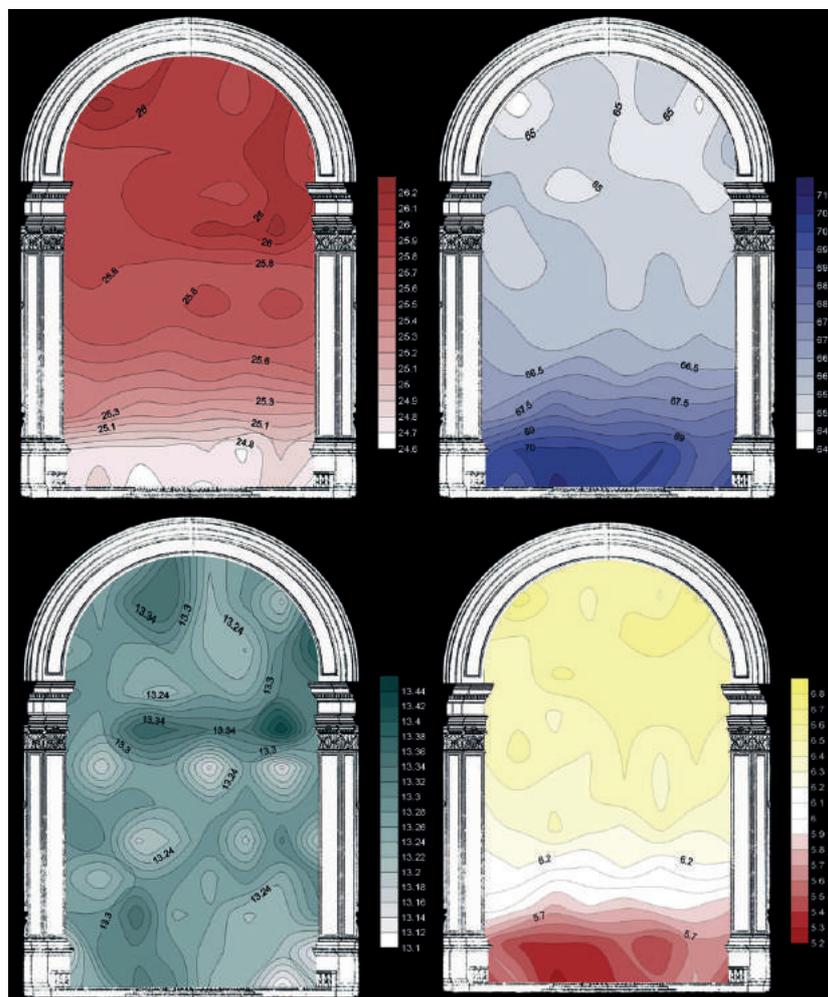


Figura 10. Distribuzione dei parametri ambientali lungo la sezione trasversale del presbiterio (06.08.2008 – ore 12). Temperatura (rosso) Umidità Relativa (blu) Rapporto di Mescolanza (Verde) Distanza dal punto di rugiada (giallo-rosso).

Infatti, i serramenti delle finestra ad oculo presenti alla sommità del tamburo sono stati equipaggiati con un servo motore che potrebbe consentirne l'apertura automatica per migliorare la ventilazione interna lungo la sezione dell'edificio in modo "adattivo", regolando così l'umidità relativa e controllando indirettamente il rischio di condensazione sulle superfici fredde. Si tratta di una possibilità interessante e che richiede un'attenta valutazione strumentale. La condensazione superficiale non è l'unico rischio a cui è esposto l'interno di Sant'Andrea, legato al clima interno. Occorre indagare la presenza di fonti di adduzione d'acqua alle

strutture per risalita dal terreno, e la possibilità che si inneschino ulteriori dinamiche di scambio tra muratura e ambiente interno. Studi successivi hanno confermato l'esistenza dei rischi sopra descritti, l'opportunità di un riscaldamento conservativo alla quota del pavimento e un miglior drenaggio delle acque al suolo, e suggerito l'esecuzione di videoendoscopie o carotaggi esplorativi delle fondazioni¹³.

Il clima storico

Dopo aver fornito supporto diagnostico alla progettazione del restauro ed evidenziato i fattori di rischio da controllare in una strategia conservativa di lungo termine, il monitoraggio ha infine permesso di costruire il clima storico della Basilica di Sant'Andrea, cioè un modello personalizzato del comportamento climatico di questo edificio. Il modello consiste in un trend annuale ottenuto dalla media dei valori misurati ora per ora, nel corso di sette anni.

Il grafico in Figura 11 mostra l'andamento dei valori di temperatura e umidità relativa nella basilica lungo i sette anni di rilevazioni. Il profilo sottostante mostra l'entità dello scostamento tra il dato rilevato in ogni momento e il dato medio normalizzato sull'intero periodo. Il grafico può essere letto come un "sismografo" che mostra quando il clima interno si discosta dal clima medio, evidenziando eventuali e pericolose oscillazioni rispetto alle condizioni di stabilità, a cui l'edificio si è assuefatto nel corso del tempo. Gli interventi di regolazione del clima dovranno attenuare le oscillazioni locali e di breve periodo, confinandole all'interno di questo intervallo personalizzato (Figura 12) e non necessariamente entro un intervallo predeterminato (es. 10-24°C e 55-65%, cfr. UNI 10928:1999, appendice A), aggiornando una consuetudine diffusa in campo museale e a lungo suggerita anche dagli standard nazionali e internazionali¹⁴. Infatti, "se ammettiamo che è a tutt'oggi impossibile fissare per ogni oggetto (o edificio)

13 Elisabetta Rosina, *Il monitoraggio microclimatico per la conservazione dei Beni Culturali. La conservazione preventiva e programmata* – PPC conference 2014 – Monza – Mantova, 5 – 9 Maggio 2014, p. 20. www.diocesidimantova.it/media/docs/Materiale20160511_kuuYAqv.pdf (25.1.2021).

14 Su questo tema rimando alla ricerca di Andrea Luciani, *Historical climates and conservation environments. Historical perspectives on climate control strategies within museums and heritage buildings*. Tesi di Dottorato in conservazione dei beni architettonici, Politecnico di Milano, 2013. www.politesi.polimi.it/handle/10589/74423 (25.1.2021).

precisi valori soglia o intervalli ottimali dei parametri ambientali ai fini della conservazione ... Per la determinazione del microclima idoneo alla conservazione di un oggetto [occorre] individuare la sua storia pregressa e i valori dei parametri microclimatici in cui è stato conservato. Un oggetto che si sia conservato in buone condizioni dopo secoli o millenni in uno stesso ambiente dimostra che queste condizioni non devono essere cambiate¹⁵.

Prima di alterare questo equilibrio, possiamo tenerlo sotto controllo, riconoscendo il monitoraggio come un fattore di sicurezza. Nel campo del restauro strutturale la sua importanza è già stata pienamente recepita, tanto da riconoscere l'attività di controllo come una possibile alternativa all'intervento: "Il controllo periodico della costruzione rappresenta il principale strumento per una consapevole conservazione, in quanto consente di programmare la manutenzione ed attuare in tempo, quando realmente necessari, gli interventi di riparazione, in caso di danno strutturale, e di consolidamento, finalizzato alla prevenzione. [...] In alcuni casi, quando l'eventuale dissesto è ben compreso e possono essere definite soglie di sicurezza, il monitoraggio può rappresentare un'alternativa all'intervento, a vantaggio della conservazione¹⁶."

Monitorare i fattori di rischio significa aumentare la resilienza del nostro patrimonio cioè la sua capacità di reagire e adattarsi agli stress generati dall'ambiente in cui si trovano, come il clima interno e le sue variazioni¹⁷. Si tratta di una consapevolezza molto importante, nella prospettiva del cambiamento climatico globale, che chiama il mondo della tutela a comprendere i fenomeni fisici alla base di quei rischi e disegnare risposte efficaci e tempestive.

-
- 15 UNI EN 15757:2010 "Conservazione dei beni culturali – Specifiche concernenti la temperatura e l'umidità relativa per limitare i danni meccanici causati dal clima ai materiali organici igroscopici".
 - 16 Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri 9/2/2011 – Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni – 14/01/2008, Art. 4.1.9.
 - 17 N. Aste, R.S. Adhikari, M. Buzzetti, S. Della Torre, C. Del Pero, H.E. Huerto C, F. Leonforte, *Microclimatic monitoring of the Duomo (Milan Cathedral): Risk-based analysis for the conservation of its cultural heritage*, Building and Environment, Volume 148/2019, pp. 240-257.

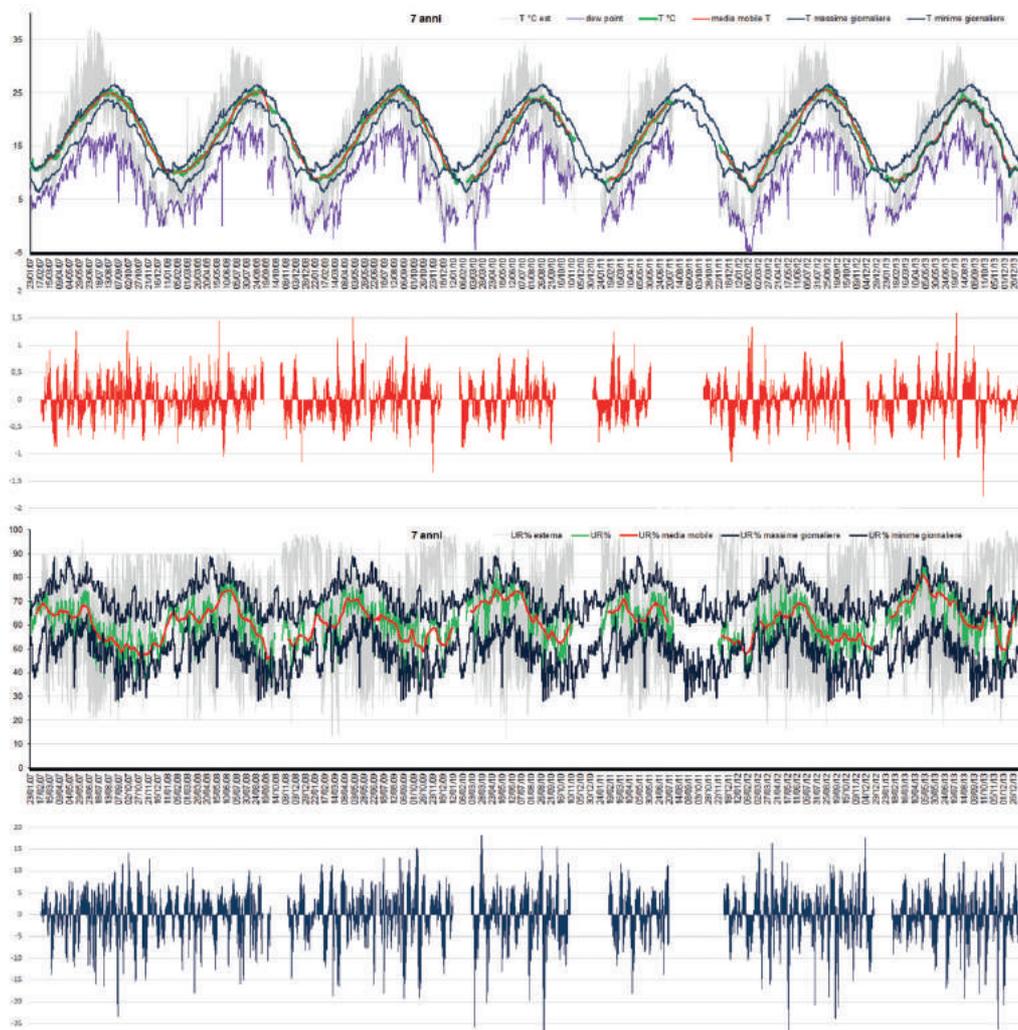


Figura 11. Temperatura e umidità relativa dell'aria rilevate all'interno della Basilica (2007-2013). Andamento dei valori di media mobile a 28 giorni (in alto) e grafico dei valori di scostamento (in basso).

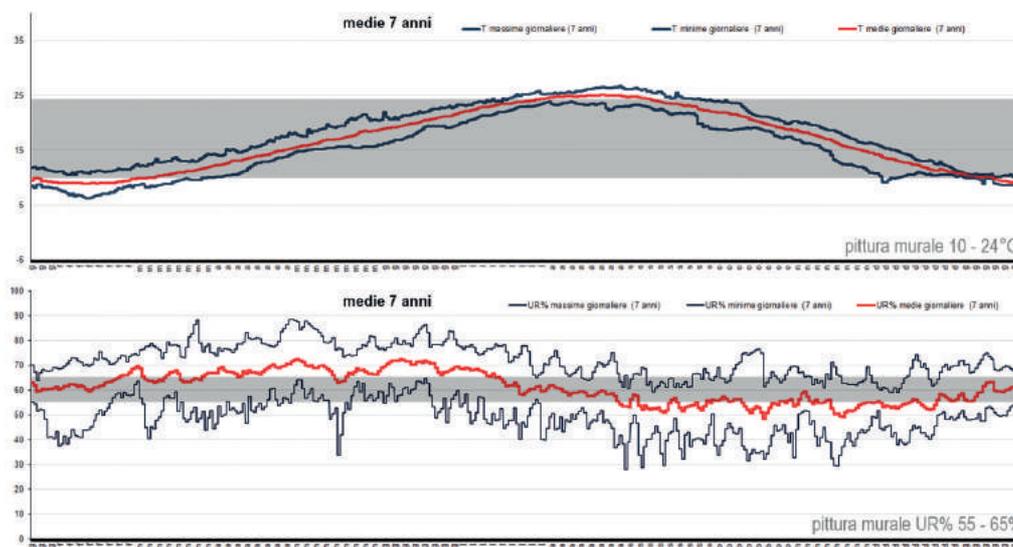


Figura 12. Clima storico della Basilica di Sant'Andrea calcolato su base settennale, a confronto con i range di temperatura e umidità relativa raccomandati per la conservazione delle pitture murali (fascia grigia).

In conclusione, oltre a suggerire un aggiornamento del monito boitano “riparare, piuttosto che restaurare” in “monitorare, piuttosto che restaurare”, il caso di Sant'Andrea ci ricorda che il clima interno fa parte degli esiti della secolare storia di costruzione e restauro di ogni edificio del passato. L'azione di salvaguardia sarà efficace nella misura in cui saprà comprendere questo legame, unendo la competenza delle scienze a quella dell'architettura¹⁸. In questa prospettiva, restauro e conservazione preventiva non sono due approcci antitetici, come si è suggerito per un certo tempo, ma due fasi di un'unica strategia di tutela autenticamente contemporanea.

18 Dario Camuffo, *Verso la ricerca multidisciplinare finalizzata alla conservazione preventiva: il contributo di un fisico*. R. Boschi, C. Minelli, P. Segala (a cura di), *Dopo Giovanni Urbani. Quale cultura per la durabilità del patrimonio dei territori storici?* Kermes Quaderni. Firenze: Nardini Editore, 2014, pp. 108-123.