F. Canali, S. Della Torre, E. Rosina, A. Ammendola, M. Zala

Il monitoraggio di un macrovolume (una cattedrale): il Duomo di Milano e la Sagrestia Nord

1. Premessa

Dall'inizio del 2015 la Veneranda Fabbrica del Duomo (l'istituzione che dal 1387 sovrintende alla costruzione ed alla manutenzione della Cattedrale milanese) ed il Politecnico di Milano hanno riorganizzato la loro consolidata collaborazione, impostando sistematicamente una corposa serie di attività scientifiche di studio e di ricerca sui temi significativi per la manutenzione del Duomo. Un rilievo particolare ha avuto, in questa prospettiva, lo studio delle interazioni delle architetture della Cattedrale con le caratteristiche termiche ed igrometriche dell'ambiente nel quale l'edificio si trova: temperatura ed umidità sono infatti, al momento, le principali sollecitazioni alle quali il monumento è esposto.

Si è dunque attivata la registrazione sistematica delle condizioni ambientali esterne, che risulta un approfondimento piuttosto semplice; accompagnata da una più complessa campagna di monitoraggio delle condizioni ambientali interne, valutando diverse posizioni planimetriche, diverse altezze, diversi ambienti (navate, sordine, sagrestie, sotterranei). Le prospettive di tale studio di ampio respiro, tuttora in corso sotto la regia del professor Niccolò Aste del Politecnico e dell'ingegner Francesco Canali della Veneranda Fabbrica del Duomo, sono interessantissime. Una prima fase di studio (indispensabile, data la vastità dell'ambiente e del volume d'aria in esso racchiuso), condotta con l'ausilio di sonde mobili collegate a piccoli palloni aerostatici, ha portato alla definizione dei migliori punti di installazione di un sistema di sonde fisse. Questa sono ora al lavoro e, tramite i primi risultati forniti dal monitoraggio, si stanno valutando alcuni interessanti spunti legati alla possibilità di free-cooling per il mantenimento delle migliori caratteristiche di utilizzo della Cattedrale da parte dei fedeli e di conservazione delle opere d'arte [1].

A questi studi di più ampio respiro si è collegato, all'inizio del 2019, un più specifico e dettagliato approfondimento mirato ad investigare la complessa situazione della Sagrestia Nord (Sagrestia Aquilonare) della quale si intendeva avviare un completo restauro anche in ragione delle precarie condizioni di conservazione degli affreschi delle volte e delle pareti, principalmente compromesse da inspiegabili (all'atto dell'avio del progetto di restauro) fenomeni legati alla presenza di elevati tenori d'umidità. La Veneranda Fabbrica del Duomo ed il Politecnico di Milano, nelle persone della professoressa Elisabetta Rosina, del professor Stefano Della Torre e dell'ingegner Francesco Canali si sono trovati d'accordo nel ritenere che, a fronte della impossibilità a comprendere intuitivamente i fenomeni dei quali si potevano vedere evidenti conseguenze (estese efflorescenze saline sulle superfici pittoriche; distacco di quattro vele affrescate in qualche modo restaurate negli anni '60 del XX secolo; compromissione della parte sommitale degli intonaci delle colonne centrali, subito al di sopra dei capitelli in corrispondenza dell'imposta delle volte) fosse indispensabile partire da un attento monitoraggio delle condizioni ambientali interne, nella configurazione precedente all'avvio del restauro. Di seguito il resoconto di tali studi, delle attività ad essi connesse e delle conclusioni alle quali si è giunti: sia in termini di comprensione dei fenomeni, che di messa a punto di ulteriori attività di monitoraggio, indispensabili per ottimizzare la efficacia e la durata dei lavori di manutenzione eseguiti **(Figura 1)**.

2. Le indagini e monitoraggi preliminari all'intervento di restauro

2.1 Necessità di un riscontro strumentale

Il primo monitoraggio e le prove non distruttive preliminari condotte hanno avuto la finalità di individuare eventuali anomalie termiche o igrometriche ambientali che potessero spiegare il visibile marcato ammaloramento dello stato di conservazione delle superfici decorate.

A fronte della necessità di chiarire comunque le cause che hanno portato a tale marcato deterioramento, si è comunque dovuti partire da alcune supposizioni iniziali circa le cause del degrado: che potessero orientare le prime considerazioni e quindi le prime indagini strumentali. Determinante è stato, in questa fase, l'attento esame visivo delle superfici degradate, che ha spinto ad assumere due ipotesi di base:

a) estese e copiose infiltrazioni di acque meteoriche verificatesi prima dell'inizio dei lavori (2019), per essere tali fenomeni chiaramente visibili nel momento dell'inizio del Restauro, ma non più attivi;
b) presenza di fenomeni di condensazione superficiale a causa dell'elevata UR ambientale e di deliquescenza dei sali solubili, che sono stati rilevati sulle superfici in evidenti e diffuse efflorescenze saline. Di tali efflorescenze è stata valutata la composizione chimica mediante analisi petrografiche e chimico/fisiche[i], e confrontata la formazione delle efflorescenze su materiali differenti, localizzati in punti anche diversi dalle zone interessate dalle infiltrazioni.

Le due ipotesi immaginate alla base dello scenario critico sotto esame sono state verificate strumentalmente con una serie d'indagini volte a determinare se le infiltrazioni, la cristallizzazione dei sali e loro deliquescenza fossero fenomeni ancora attivi al momento dell'inizio delle indagini.

2.2 Strategia della campagna d'indagini

La strategia con la quale è stata impostata la campagna d'indagine si è basata sulle seguenti prove:

- tre battute di termografia all'infrarosso termico, a cadenza stagionale, prima e dopo abbondanti precipitazioni e dopo un periodo prolungato (almeno un mese) di assenza di piogge;
- il monitoraggio microclimatico effettuato con l'installazione di data logger ad acquisizione oraria di temperatura e umidità dell'aria. Una prima installazione è stata effettuata sulla base alla morfologia della sagrestia e sulla ricognizione dei degradi, nel frattempo venivano effettuate le battute ANSYS metriche stagionali che hanno permesso di rendere più efficace la localizzazione delle sonde per misurare gli sbilanci termoigrometrici che si verificano [UNI 10829].
- esecuzione di prove psicrometriche, per valutare i punti in cui si potessero verificare maggiori sbilanci di temperatura e umidità dell'aria. I risultati delle prove psicrometriche sono stati elaborati mediante stesura di mappe tematiche, basate su rilievo quasi contemporaneo di diversi punti di acquisizione, a diverse altezze (sfruttando il ponteggio) e lungo alcuni allineamenti verticali. Per inciso, si osserva che piccole differenze delle temperature superficiali, rilevate con IRT, sono risultate presenti nella parte occidentale, dovute all'irraggiamento solare, che perdurano nel pomeriggio, serata e fino alla prima mattina nei mesi estivi.

2.3 Riscontri della campagna d'indagini

I risultati ottenuti hanno permesso di evincere che:

a) all'atto dell'avvio dei lavori di restauro non erano presenti fenomeni d'infiltrazione di acque meteoriche provenienti dalle coperture della Sagrestia Aquilonare. Tale riscontro si è avuto dal rilievo termografico, che è stato ripetuto, dopo le prime misurazioni iniziali, nei mesi successivi sia dopo

precipitazioni abbondanti e prolungate, sia dopo almeno 7-8 settimane di cielo sereno (o deboli precipitazioni).

Ad esempio, a seguito di prolungate piogge nel mese di maggio 2019, le temperature ambientali esterne si erano mantenute al di sotto della media stagionale sino a pochi giorni prima dell'indagine preliminare. Pertanto la scelta della giornata di inizio del monitoraggio microclimatico si è accompagnata alla registrazione dei cambiamenti all'interno indotti dalla variazione delle temperature esterne, avvenuti nei giorni appena prima e dopo le misure.

Le medesime indagini sono state ripetute a giugno-luglio e a ottobre- novembre 2019. Il confronto dei dati permette di riscontrare la sostanziale omogeneità e stabilità delle misurazioni, soprattutto a novembre 2021. I grafici riportati in **figura 2** mostrano, per confronto, l'andamento dei valori in autunno, in cui si rilevano valori simili sia pur con variazioni meno frequenti. Risulta comunque evidente la dipendenza dall'esterno.

Si è escluso pertanto che fossero in atto infiltrazioni di acqua dalla copertura. Tuttavia, i valori di UR% sono sempre piuttosto elevati, incluso in estate

La tabella 1 mette in evidenza i valori di T°C e UR% orari all'interno della Sagrestia in giornate campione, mentre all'esterno si verificano sia condizioni ambientali medie ~~e~~ che condizioni di picco. La verifica è stata effettuata sia nella stessa giornata, sia nelle giornate successive. Le variazioni all'interno sono praticamente inesistenti.

Le misure psicrometriche mostrano la sostanziale omogeneità delle misure di temperatura durante le giornate, con un trend regolare di variazione stagionale, a tutti i livelli del ponteggio **(Figura 3).**

L'analisi dei dati raccolti con data logger ha permesso di rilevare che, sul medio periodo:

- Gli incrementi dei valori di UR sono dipendenti dalle variazioni esterne, in modo quasi sincrono e con valori molto simili quando si verificano all'esterno dei picchi rapidi e di valore assoluto notevole che perdurano per diversi giorni.
- Tuttavia, anche se all'esterno l'UR diminuisce molto rapidamente, all'interno si registrano valori elevati fino a 6 giorni dopo il picco in esterno.
- Pertanto, si osserva che esiste una permeabilità alle masse d'aria esterne, forse dovuta agli scambi attraverso le aperture, forse dovuta alla poca tenuta dei serramenti.

b) Le variazioni dei parametri termoigrometrici dell'aria sono risultati minime prima e durante il cantiere di restauro degli intonaci e degli affreschi, con variazioni strettamente legate alle operazioni che venivano svolte durante le fasi delle lavorazioni (ad esempio, l'accensione di stufette ha comportato un modesto incremento localizzato di temperatura, che non perdurava più di un'ora dopo lo spegnimento degli apparecchi; l'illuminazione delle zone oggetto di intervento ha provocato un modesto, ma non duraturo, riscaldamento delle superfici in lavorazione; la presenza di 1-2 restauratori per 8 ore al giorno non ha causato incrementi di umidità dell'aria neppure nelle zone di permanenza del personale). Senz'altro le lavorazioni a secco, preferite per la presenza di sali, hanno permesso di contenere l'apporto di umidità nell'ambiente.

c) I risultati delle analisi stratigrafiche e chimico fisiche dei Sali hanno permesso di rilevare la diffusa presenza di Sali, che sono dovuti principalmente ai materiali-usati in precedenza (cemento Portland) e che sono venuti a contatto con acqua per infiltrazioni. Le indagini hanno pertanto comportato

anche la possibilità di elaborare indicazioni utili all'intervento di restauro, orientandolo verso il ricorso più frequente possibile a-lavorazioni a secco **(Figura 4).**

3. Il prolungamento del monitoraggio microclimatico

Un secondo monitoraggio, attualmente in corso, accompagnato da una accurata modellazione numerica è stato avviato dopo la chiusura del cantiere. L'obiettivo di tale seconda campagna di registrazioni e della connessa modellazione, condotte a lavori di restauro ultimati, è l'implementazione di un modello numerico effettivamente in grado di rappresentare il dei flussi di aria che si possono verificare nella sagrestia a seguito dell'uso quotidiano della stessa (l'aula è infatti anche un frequentato luogo di lavoro e di servizio) e di ottimizzarne l'attivazione, sfruttando sia le possibilità di ventilazione naturale che quelle di climatizzazione dell'ambiente in virtù dell'impianto appena realizzato, in funzione del mantenimento di condizioni termo igrometriche ideali per l'attività dei frequentatori e per prevenire l'insorgere di fenomeni di degrado delle superfici pittoriche ed architettoniche restaurate.

Il modello CFD (simulazione fluodinamica), attentamente calibrato grazie all'attività di verifica strumentale che accompagna la creazione del modello stesso, servirà a valutare l'efficacia dei possibili interventi di mitigazione degli sbilanci termoigrometrici che si manifestassero per il concorso delle condizioni climatiche esterne con quelle microambientali interne.

Le sonde sono state installate nei punti in cui la mappatura psicrometrica permetteva di individuare possibili turbolenze (ad esempio vicino alla finestra) ed in particolare dove ci si aspettava di misurare picchi o minimi di T°C e umidità ambientale della sagrestia, da terra fino all'intonaco della volta.

Il criterio della seconda installazione delle sonde è stato principalmente, oltre a quello di servizio per la taratura del modello digitale, il poter verificare l'andamento delle osservabili T°C e UR per un periodo prolungato, continuando ad acquisire dati per una serie significativa di almeno 2/4 anni. Si fa qui solo osservare che tale criterio è stato filtrato anche attraverso la necessità di installare le sonde in modo da consentirne l'operabilità dal basso dopo lo smontaggio del ponteggio (si ricorda che l'altezza da terra della volta raggiunge i 15 m, pertanto si è esclusa la possibilità di proseguire con acquisizione dei dati mediante bluetooth o simili, e di utilizzare sensori e trasmettitori ad alimentazione elettrica). Si ricorda infine che lo spessore e tipologia delle murature schermano parzialmente il segnale trasmesso o la sua ricezione in caso di comando da remoto. Infine,-si è provveduto ad installare una sonda in chiave della volta, per paragonare i dati acquisiti a quella quota con quelli acquisiti ad una quota inferiore.

La prima verifica dei dati ha permesso di aver conferma della congruità tra i dati raccolti nella zona di minori turbolenze, lungo la parete alla quota di imposta della volta, e quelli raccolti alla quota della chiave di volta. A fronte di tale coincidenza si è pertanto optato per disinstallare la sonda in chiave poco prima della rimozione del ponteggio.

4. La simulazione con modellazione fluodinamica per la valutazione dei sistemi di mitigazione degli sbilanci termoigrometrici

4.1 Obiettivi

L'obiettivo della simulazione è quello di valutare gli sbilanci termoigrometrici stagionali della sagrestia aquilonare, individuare le conseguenti condizioni di umidità e temperatura interne che portano alla cristallizzazione dei sali su particolari punti delle volte e determinare i set point delle regolazioni del nuovo impianto di climatizzazione in modo da prevenire tali fenomeni nocivi.

Un obiettivo di eguale importanza è quello di sperimentare ed acquisire confidenza con la costruzione di un modello di una porzione del Duomo secondo una prassi poi adattabile a tutte le zone del Duomo che possano richiedere un controllo degli sbilanci termoigrometrici e dei flussi convettivi naturali che si vengono a creare, incluse delle condizioni particolari che possono verificarsi in funzione di utilizzi inconsueti o in alcune zone della cattedrale che usualmente non sono interessate dalla presenza di visitatori o turisti. Inoltre il modello potrebbe certo costituire uno "scheletro" per la possibile archiviazione inter operativa e facilmente aggiornabile dei dati, cioè un aiuto alla gestione della manutenzione ordinaria e degli interventi particolari, soprattutto in fase di trasmissione delle informazioni. Su tale ultimo aspetto, tuttavia, qui citato solo per completezza di esposizione, vi sono forti perplessità in merito alla reale fungibilità di una tale rappresentazione digitale a scopi manutentivi e di information repository: non ci si dilungherà dunque a valutare le potenzialità concrete di tale applicazione.

4.2 Scelta degli strumenti

La scelta del software è ricaduta su ANSYS, Inc. (modulo di fluidodinamica di Fluent). Ciò è dovuto al fatto che rispetto ad altri software è user friendly, il dominio è di più facile costruzione, grazie al modulo "SpaceClaim" (facente parte di ANSYS, Inc.) ed al fatto che sono importabili numerose estensioni di programmi più largamente utilizzati per la modellazione geometrica quali AutoCAD o GID. Inoltre, dalla letteratura scientifica, si rileva che le applicazioni di ANSYS per i Beni Culturali sono utilizzate in campi molto differenziati, a dimostrazione della versatilità dello strumento, e i risultati raggiunti sono tanto più soddisfacenti quanto meglio vengono definiti gli obiettivi, limiti e risultati attesi. Nel caso della Veneranda fabbrica del Duomo, le indicazioni di lavoro sono state chiarite sin dall'inizio del lavoro e questo ha facilitato il percorso di individuazione degli strumenti e delle procedure di elaborazione in corso.

4.3 Modalità della costruzione del modello

Il modello è stato costruito con GID e successivamente importato su Fluent. Dopo un preprocessing del dominio tramite SpaceClaim, in cui sono state individuate le parti significative della struttura per l'orientazione e la possibilità di scambi con l'esterno (finestre, pareti, volte e pavimento), si è proceduto alla costruzione della griglia di elaborazione attraverso il tool "Fluent Meshing" **(Figura 5).**

La griglia (mesh) è costituita da poliedri (3D) perché l'utilizzo del 3D consente una più raffinata modellazione, soprattutto in prossimità delle irregolarità e non omogeneità morfologiche dell'edificio. Si è scelto di utilizzare una risoluzione maggiore nelle zone in cui vi sono discontinuità strutturali (vedi le volte) e sulle pareti del modello, dato che in corrispondenza di queste zone il flusso presenta maggiori criticità. Si possono infatti verificare vortici e disturbi del flusso che potrebbero rendere difficile la computazione dei risultati.

4.4 Limiti dell'applicazione

Nonostante ANSYS, Inc. sia un software user friendly, sia nella costruzione del dominio che nelle impostazioni delle condizioni iniziali del flusso, occorre l'utilizzo di personale adeguatamente formato, che sappia individuare criticità e difetti del modello durante la realizzazione. Infatti, l'individuazione preliminare della mesh richiede la verifica della sua congruità durante la computazione e occorre provvedere al suo perfezionamento per raggiungere gli esiti attesi.

Infine, l'elaborazione richiede tempi computazionali elevati (anche 3 giorni, in funzione del livello di definizione della mesh e del livello di dettaglio richiesto), oltre, ovviamente, agli strumenti hardware più adeguati.

4.5 Test di validazione del modello

La procedura di simulazione ha richiesto di verificare il modello in diverse fasi, confrontando i risultati ottenuto dalla modellazione con quelli sperimentali.
La modellazione ha seguito diverse fasi:

- Elaborazione di un modello preliminare in regime stazionario, sul quale effettuare una serie di test imponendo delle condizioni al contorno che possano generare flusso (gradiente di temperatura tra una parete e quella opposta, imposizione di una velocità del flusso impostato diverso su una delle pareti ecc.). Utilizzo delle condizioni al contorno ricavate dal monitoraggio preliminare per validare i risultati della simulazione.
- Elaborazione di un modello predittivo, i quali risultati verranno confrontati con quelli del monitoraggio in corso.
- Simulazione di eventuali sbilanci ed effetto della mitigazione, confrontandoli con i risultati del nuovo monitoraggio.

5. Conclusione

Lo studio è in corso, i primi risultati sono attesi nei prossimi mesi: si vuole qui solo rimarcare ancora una volta la fondamentale rilevanza, nel caso di interventi entro ambienti di grande rilevanza come la Sagrestia Aquilonare del Duomo di Milano, dell'avvio delle operazioni di monitoraggio termo-igrometrico prima dell'avvio dei lavori di recupero degli ambienti o di restauro delle opere d'arte e dei manufatti in essi contenuti. La conoscenza delle condizioni ambientali precedenti all'intervento, infatti, costituisce l'imprescindibile parametro sul quale modulare sia i possibili interventi di recupero, avendo puntuali informazioni sui fenomeni in atto; che la taratura degli impianti, eventualmente introdotti (o rifatti) in occasione dei restauri.

6. Indicazioni bibliografiche

[1] Nicolò Aste, Rajendra S. Adhikari, Michela Buzzetti, Stefano Della Torre. Claudio Del Pero, H. E. Huerto, Fabrizio Leonforte, Microclimatic monitoring of the Duomo (Milan Cathedral): risk based analysis of the conservation of its cultural heritage, Building Environment, Vol. 148, 15 January 2019, Elsevier, pag. 240-257.

[2] Delia D'Agostino, Paolo Maria Congedo, Department of Engineering for Innovation, University of Salento, 73047 Monteroni di Lecce, Lecce, Italy CFD modeling and moisture dynamics implications of ventilation scenarios in historical buildings.

[3] “ANSYS Fluent User's Guide”, 2013.

[4] Kundu, P. K., Cohen, I. M., “Fluid mechanics” Accademic press 2002.

---

[i] *Le indagini di caratterizzazione di materiali e degrado sono state effettuate dall’Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale, sede di Milano, diretto dal dott. Marco Realini, di cui il dott. Antonio Sansonetti e la sua equipe ha eseguito la caratterizzazione chimico fisica dei materiali di rivestimento della volta della Sagrestia Aquilonare e dei prodotti di degrado.*