estratto autore

SAPIENZA • UNIVERSITÀ DI ROMA

DIPARTIMENTO DI STORIA, DISEGNO E RESTAURO DELL'ARCHITETTURA

MATERIALI E STRUTTURE

PROBLEMI DI CONSERVAZIONE

Restauro e impianti



NUOVA SERIE
VI
NUMERO 11
2017

estratto autore

MATERIALI E STRUTTURE. PROBLEMI DI CONSERVAZIONE

© Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura
Piazza Borghese, 9 – 00186 – Roma

Rivista semestrale, fondata nel 1990 da Giovanni Urbani
Autorizzazione del Tribunale di Roma n. 265 del 25/09/2012
Nuova serie, anno VI (2017), 11

ISSN 1121-2373

Direttore editoriale: Donatella Fiorani

Consiglio Scientifico: Giovanni Carbonara, Paolo Fancelli, Antonino Gallo Curcio, Augusto Roca De Amicis, Maria Piera Sette, Fernando Vegas, Dimitris Theodossopoulos

Comitato di Redazione: Maurizio Caperna, Adalgisa Donatelli, Maria Grazia Ercolino, Rossana Mancini

In copertina: Brescia, la IV cella del Santuario Repubblicano nell'area archeologica del Capitolium (© su concessione del Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo – Soprintendenza Archeologica della Lombardia).

La rivista è di proprietà dell'Università degli Studi di Roma «La Sapienza»
© Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura
Piazza Borghese, 9 – 00186 – Roma

Roma 2017 – Edizioni Quasar di Severino Tognon s.r.l.
via Ajaccio 41/43 - 00198 Roma
tel. 0685358444 - fax 0685833591

Per ordini e abbonamenti:
www.edizioniquasar.it
qn@edizioniquasar.it

estratto autore

Sommario

5 EDITORIALE
- DONATELLA FIORANI

9 INTERVENTI SUGLI IMPIANTI STORICI.
UN PATRIMONIO DAL SIGNIFICATO IN EVOLUZIONE
- MARCO PRETELLI, KRISTIAN FABBRI, LEILA SIGNORELLI

25 PROGETTAZIONE IMPIANTISTICA E RESTAURO ARCHITETTONICO
- RICCARDO FIBBI, CAROLINA DE CAMILLIS

41 LED E BENI CULTURALI: I PRIMI 15 ANNI
- FABIO ARAMINI

53 ASPETTI DIVERSI DEL RISPARMIO ENERGETICO
NEI CONTESTI DI PREGI
- MARIA ELENA CORRADO

67 IN EQUILIBRIO TRA 'SOPPESARE' E MISURARE.
ALCUNE RIFLESSIONI SU SOSTENIBILITÀ ED EFFICIENZA
ENERGETICA NELL'EDILIZIA STORICA
- VALERIA PRACCHI

83 LA QUARTA CELLA DEL SANTUARIO REPUBBLICANO
NELL'AREA ARCHEOLOGICA DEL CAPITOLIUM DI BRESCIA.
UN PROCESSO VIRTUOSO PER LA REALIZZAZIONE
DELL'IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE
- GIUSEPPE BONFANTE, CHIARA BONVICINI, CARLO CACACE

99 ABSTRACT

estratto autore

La quarta cella del Santuario Repubblicano nell'area archeologica del *Capitolium* di Brescia
Un processo virtuoso per la realizzazione dell'impianto di climatizzazione

Giuseppe Bonfante, Chiara Bonvicini, Carlo Cacace

Conservare in regime di clima controllato comporta un'attenta analisi del contesto in cui si opera e dei processi tecnici messi in campo. Il progetto di un impianto di condizionamento che tenga conto dei diversi possibili usi di ambienti che siano o contengano beni culturali (specie se archeologici), va opportunamente studiato in funzione della loro valorizzazione e deve coniugarsi con la conservazione e la tutela del manufatto oltre che delle opere contenute. Il progetto deve considerare il valore storico-artistico della struttura architettonica e, di conseguenza, la dinamica temporale nei processi evolutivi delle condizioni ambientali che possono compromettere la sua conservazione. Nel caso del Santuario Repubblicano a Brescia il tema è reso più complesso dalla natura ipogea dell'ambiente[1]. Il lavoro ha seguito un processo di studio virtuoso che ha messo in relazione, ognuno per la propria competenza, l'amministrazione del Comune di Brescia, le strutture territoriali del Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo (MiBACT), i progettisti e i consulenti, dal progetto preliminare sino alla realizzazione dell'intervento, individuando una soluzione impiantistica innovativa, non invasiva, sicura ed energeticamente sostenibile.

La progettazione degli impianti di condizionamento per la conservazione

Molti dei problemi presenti nella conservazione sono bene interpretati se si tiene presente che l'opera d'interesse storico-artistico vive e si evolve in un ambiente col quale inevitabilmente interagisce. Tale interazione avviene attraverso scambi di energia e scambi di materia. È fondamentale tenere sotto controllo e limitare questi scambi, perché è proprio da essi che hanno origine i processi di degrado. Se si assume il rischio di perdita del patrimonio culturale come criterio per individuare le priorità operative, la conoscenza dello stato di conservazione delle opere, della loro collocazione fisica e delle relazioni che intercorrono fra ambiente interno ed esterno in cui esse sono disposte (che siano sale espositive e/o depositi) risulta utile e necessaria per programmare gli interventi di tutela, conservazione e fruibilità.

La possibilità di rappresentare il livello di rischio ambientale diventa allora un sintetico modo di visualizzare questa informazione ed è un valido mezzo per piani-

[1] Cacace *et al.* 2009.

estratto autore

ficare le attività ad esso connesse. Conservare, quindi, in regime di clima controllato comporta un'attenta analisi del contesto in cui si opera e dei processi tecnici messi in campo. Il progetto di un impianto di condizionamento che tenga conto dei diversi usi (uffici, consultazione, visita, conservazione ecc.) degli ambienti che contengono al loro interno beni culturali (in genere pertinenti a complessi architettonici che non nascono con scopi espositivi e/o conservativi) va opportunamente dimensionato in funzione degli obbiettivi da raggiungere, considerando i seguenti aspetti: orientamento e dislocazione della fabbrica, estensione della stessa, conformazione delle strutture. Inoltre, nella realizzazione dell'impianto di condizionamento, il progetto deve considerare le opere di valore storico-artistico nel loro specifico contesto di appartenenza, in relazione alla struttura architettonica e, di conseguenza, alla dinamica temporale dei processi evolutivi delle condizioni ambientali (D.M. 20.05.1992). La presenza delle opere conservate all'interno comporta che il problema del degrado deve essere affrontato nella sua interezza e complessità, tenendo presente:

– le caratteristiche chimico-fisiche di tutti i materiali costitutivi con particolare attenzione alla loro natura igroscopica, ovvero alla capacità di ritenere e trasferire masse d'acqua con meccanismi di capillarità, per evaporazione e/o assorbimento,

– l'interazione della struttura nel suo complesso con l'aria-ambiente in cui si trova dà luogo all'insieme di trasformazioni che coinvolgono l'oggetto e costituiscono i processi di degrado.

Quanto premesso comporta che il sistema di condizionamento deve scaturire dall'attenta analisi dei dati di rilevamento; questi riguardano una serie di parametri microclimatici che, opportunamente correlati, indicano dal punto di vista analitico e quantitativo il tipo d'interazione in atto fra opera d'arte e ambiente circostante. In questo modo sarà possibile effettuare una comparazione fra i parametri imposti come condizione di esercizio e la reale capacità del sistema di rispettare tale condizioni nell'ambiente e, in particolare, nell'intorno del manufatto.

L'opera interagisce continuamente con l'ambiente e risente dei diversi tipi di sollecitazione che si possono instaurare, ad esempio di natura termica o igrometrica (irraggiamento, evaporazione, condensazione, ecc.). Nasce, quindi, la necessità di misurare preliminarmente parametri diversi, così da analizzare e quantificare la loro evoluzione nel tempo. Inoltre, l'azione che questi fattori esercitano sul manufatto è continua, modulata dallo scorrere delle stagioni e dipendente dal comportamento generale del clima ambientale oltre che da cause accidentali. Normalmente i sistemi di condizionamento non prevedono controlli in più punti strategici degli ambienti e molto spesso, quindi, si deve ricorrere a strumentazioni accessorie per ovviare a questa mancanza. Le tecnologie della strumentazione di rilevamento microclimatico[2] e di elaborazione informatica dei dati sono oggi tra le più avanzate, perché rendono possibile

2 Accardo *et al.* 1992; Giavarini *et al.* 2004; Gabrielli *et al.* 2007; Cacace *et al.* 2008.

estratto autore

la visualizzazione e l'analisi dei fenomeni in forma rapida e concisa e, nello specifico, permettono di produrre *data-base* sempre aggiornabili sulle condizioni termo-igrometriche degli ambienti. L'accessibilità delle tecnologie informatiche oggi disponibili non deve far dimenticare però il ruolo fondamentale che comunque spetta all'elaborazione delle informazioni e ai processi di analisi connessi con tali attività.

A questo proposito le conoscenze maturate dall'Istituto Superiore per la Conservazione e il Restauro (già Istituto Centrale per il Restauro, d'ora in poi IsCR) sulle funzioni di danno e sui processi di trasformazione fisico-chimica dei materiali costitutivi, ovvero sui meccanismi di deterioramento dei beni, sono servite da guida e da filtro per individuare e definire i modelli necessari allo sviluppo della metodologia per il rilevamento e il controllo degli ambienti preposti alla conservazione, al fine di selezionare i dati utili e necessari al raggiungimento di tale obiettivo, per normalizzare le modalità di raccolta degli stessi e per sviluppare le procedure di analisi e elaborazione delle informazioni. L'indirizzo metodologico seguito è maturato nel corso degli ultimi trenta anni grazie alle esperienze realizzate nel corso di mirate indagini scientifiche, del controllo microclimatico ambientale e delle prove non distruttive, applicate alla conoscenza e alla conservazione dei beni in ambienti condizionati e non. Infatti, ad integrazione o, per quanto possibile, in alternativa al restauro che interviene a danno avvenuto, questo indirizzo propone di sviluppare, attraverso interventi sistematici di conservazione e manutenzione dei beni, una strategia basata sulla prevenzione del danno. In questo modo è possibile esprimere il rischio in funzione di queste due componenti e misurarne l'intensità attraverso la misura delle grandezze fisiche, che concorrono alla loro determinazione. Il tempo e la localizzazione spaziale delle grandezze fisiche considerate sono le variabili introdotte per poter conoscere la distribuzione spazio/temporale dei parametri e dei fenomeni che si vogliono analizzare: ciò ne consente la rappresentazione spaziale e la sua evoluzione nel tempo.

La conoscenza delle condizioni climatiche e microclimatiche deve essere perseguita attraverso un approccio basato sulla misura degli effetti prodotti direttamente sulle opere e nel loro intorno dall'eventuale interazione con l'ambiente. Ciò è utile e necessario per riscontrare il valore degli indici calcolati (evaporazione, condensazione, gradienti termo-igrometrici, flussi d'aria, profili termici, ecc.) e per una puntuale verifica della metodologia. Solo il confronto diretto fra la previsione del calcolo e la misura del danno subito quantifica la reale attendibilità dell'indicatore, migliorando in concreto le capacità informative del sistema e la conoscenza necessaria all'attività di conservazione e prevenzione. La misura può essere fatta in modo sistematico per una serie limitata ma significativa di zone campione, scelte in modo da rappresentare adeguatamente tutte le classi di pericolosità individuate dalla metodologia.

Il principio fondamentale del sistema di condizionamento è quello di mantenere stabili le condizioni dell'ambiente, ponendo un intervallo piuttosto contenuto delle variazioni ammissibili, ma la difficoltà di raggiungere tale obbiettivo è ovviamente legato ai volumi degli ambienti in cui normalmente si opera, alla tenuta degli infissi,

estratto autore

che non sempre garantiscono un isolamento perfetto, alla presenza di sistemi d'illuminazione, che non sempre rispondono a criteri conservativi, e così via.

Dal punto di vista fisico, generalmente, un ambiente è a rischio quando il tentativo di giungere all'equilibrio delle componenti del sistema avviene attraverso scambi repentini, provocati da gradienti termici o igrometrici. Nel momento in cui allo scambio termico corrisponde un'inaspettata variazione dell'umidità relativa, pilotata dal contenuto di acqua libera nell'aria e nelle opere conservate, si determina una variazione dei parametri nel comportamento generale del sistema, le cui componenti raggiungono l'equilibrio in tempi e modalità diverse. Tale rischio non è legato necessariamente ai valori assoluti dei parametri termoigrometrici, ma alla rapidità di evoluzione nel tempo, per cui condizioni elevate di umidità relativa potrebbero non destare preoccupazione se esse sono raggiunte in tempi legati ai vari passaggi stagionali e non regolati dai cicli periodici giornalieri.

La conoscenza del comportamento microclimatico della struttura architettonica e dell'intorno dei manufatti presenti prima della messa in opera del sistema di condizionamento è importante, perché consente di comprendere in quali periodi l'ambiente nel suo insieme rimane più stabile e quando non lo è; in particolare, quando esso risente delle variazioni giornaliere in modo da diminuire i rischi di esaltare fenomeni evaporativi e/o di assorbimento.

Molto spesso, invece, si definiscono alcuni parametri 'a priori' attraverso i quali i sistemi impongono valori che non sempre sono tarati sulle reali possibilità di 'tenuta' da parte dell'ambiente, dato che manca molto spesso, come detto, uno studio pregresso in grado di definire i limiti e le possibilità d'intervento.

Occorre ricordare che l'aria può essere considerata una miscela di gas perfetti: aria secca e vapor d'acqua (umidità specifica). L"umidità specifica indica quanti grammi di vapor acqueo sono presenti in ogni kg di aria secca e l'umidità relativa è la percentuale di vapore contenuto nell'aria (US) in rapporto alla massima quantità in esso riscontrabile (Usa = assoluta) ad una data temperatura. La condizione normale degli ambienti chiusi e isolati è che l'umidità relativa dell'aria sia strettamente legata alla temperatura ambiente: a parità di grammi di vapore acqueo contenuti in un kg di aria secca, l'umidità relativa aumenta al diminuire della temperatura e diminuisce all'aumentare della temperatura, in quanto minore è la temperatura dell'aria, minore è la miscibilità del vapore acqueo nell'aria stessa. Questo comporta che, a volte, i sistemi per mantenere le condizioni di esercizio di un impianto lavorano con immissioni di vapore immediate e non regolate secondo le esigenze dell'ambiente ma in funzione dell'input del sensore di rilevamento dell'umidità relativa; questo, molto spesso, è unico nella sala e non sempre risulta collocato in posizione ottimale. Ad esempio, in uno studio microclimatico effettuato dall'IsCR a Venezia, in Palazzo Labia[3], utilizzando il diagramma di Carrier è stato possibile rappresentare su di uno stesso strumento di

[3] Cacace *et al.* 2009.

estratto autore

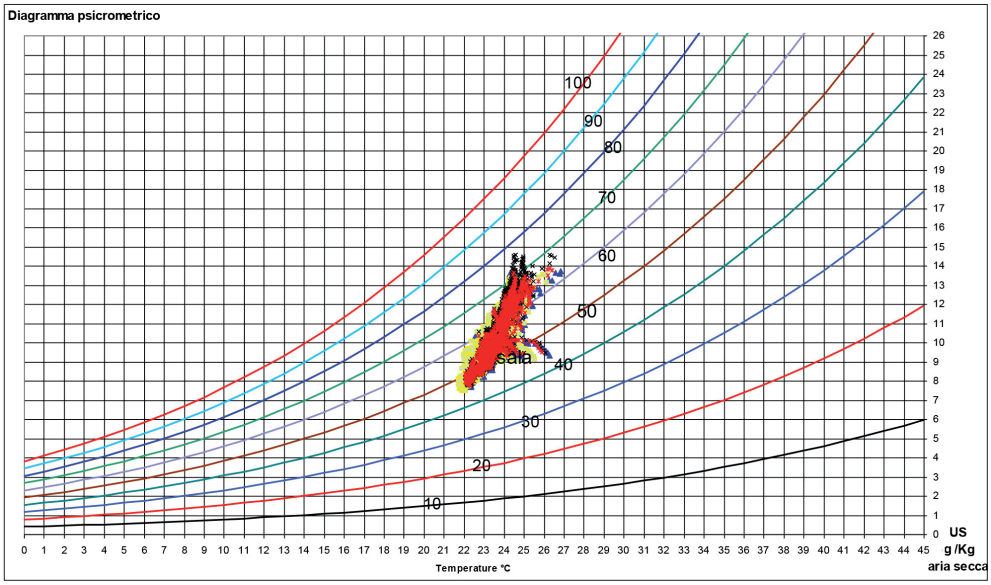


Fig. 1. Venezia, studio microclimatico effettuato a Palazzo Labia, diagramma psicrometrico.

lettura tutte le grandezze fisiche termo-igrometriche rilevate quali la temperatura ambiente (asse delle x) l'umidità relativa (curve nere), l'umidità specifica, cioè il vapore (asse delle y). L'analisi ha dimostrato come il sistema di condizionamento lavorasse con rapide immissioni di vapore che avveniva per tutti i quattro punti di immissione dell'aria leggibili, con colorazioni diverse, sulla scala dell'asse delle y del diagramma, per consentire all'ambiente di mantenere un'umidità relativa tra il 40 e il 60%, raggiungendo talvolta il 65-70% (*Fig. 1*).

Il caso della IV Cella del Santuario Repubblicano di Brescia

Un esempio di approccio innovativo per la progettazione degli impianti di climatizzazione per la conservazione di beni archeologici è rappresentato dal progetto per il Santuario Repubblicano dell'area archeologica di Brescia. A partire dalla linee guida definite dallo studio condotto preliminarmente dall'IsCR, il progetto si è basato sugli esiti delle analisi preliminari condotte in sito e, diversamente da quanto previsto con le metodologie tradizionali di progettazione impiantistica, è stato prioritariamente orientato verso una stabilizzazione delle condizioni termo-igrometriche, così da contenere i processi di degrado e i fattori di rischio individuati per i preziosi reperti del Santuario, piuttosto che verso la climatizzazione vera e propria degli ambienti.

La IV cella del Santuario Repubblicano (I sec. a.C.), monumento situato nel cuore storico di Brescia e facente parte del Parco archeologico di Brescia romana, riconosciuto Patrimonio Mondiale dell'Umanità dall'UNESCO, è stata riaperta al pub-

estratto autore



Fig. 2. Brescia, Santuario Repubblicano, prospetto del podio (© su concessione del Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo – Soprintendenza Archeologica della Lombardia).

blico nel mese di maggio del 2015, in seguito ad un accurato restauro del ricco apparato decorativo e a un progetto di valorizzazione promosso dal Comune di Brescia e dalla Soprintendenza Archeologica della Lombardia assieme alla Fondazione Brescia Musei (*Figg. 2-3*)[4].

L'antico edificio di culto risulta molto ben conservato; all'interno della IV cella sono sopravvissuti i pavimenti a mosaico e una preziosa decorazione pittorica alle pareti.

L'apertura al pubblico dell'area ipogea del Santuario ha richiesto necessariamente la progettazione di adeguati impianti di climatizzazione per garantire la conservazione dei reperti anche nelle nuove condizioni di fruizione del sito.

La fase progettuale ha impegnato enti pubblici e privati nell'individuare strategie di controllo microclimatico adeguate alla conservazione di apparati decorativi in ambienti ipogei aperti al pubblico.

Il lavoro svolto sulla IV cella del Santuario Repubblicano può porsi, quindi, come caso – pilota per altri interventi di natura simile[5].

[4] Si riporta qui il *team* dei professionisti coinvolti nei lavori: Comune di Brescia, Responsabile del settore edilizia monumentale: arch. Marco Ponzoni; Comune di Brescia, Responsabile del servizio edilizia monumentale e del procedimento, ing. Marcella Dalgrosso; Progetto architettonico e restauri e Direzione lavori arch. Marco Ponzoni, arch. Patrizia Scamoni, geom. Gerardo Brentegani, geom. Vittorio Bandera con geom. Rossella Egidi, geom. Anna Papetti, geom. Maura Moreschi (Comune di Brescia); Fondazione Brescia Musei, dott. Luigi Di Corato, arch. Maria Repossi; Progetto museologico dott.ssa Filli Rossi (Soprintendenza Archeologia della Lombardia); dott.ssa Francesca Morandini (Comune di Brescia); Progetto museografico: arch. Maria Repossi (Fondazione Brescia Musei), arch. Renata Demartini (Soprintendenza Archeologia della Lombardia); Progetto strutturale: ing. Gianni Pellegrinelli – ing. Alessandra Cantoni; Progetto e Direzione lavori Impianti Meccanici, Elettrici e speciali: PROECO - ing. Giuseppe Bonfante, per. ind. Franco Pautasso, per. ind. Alberto Tessari; Consulente per la Conservazione, il Progetto Illuminotecnico e l'Acustica Onleco, ing. Giuseppe Bonfante, dott.ssa Chiara Bonvicini, prof.ssa Anna Pellegrino, arch. Alessia Griginis, arch. Sabrina Canale con Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro, dott. Carlo Cacace, dott.ssa Maria Concetta Laurenti.

[5] Il progetto impiantistico è stato sviluppato dallo studio di ingegneria Proeco di Torino, in stretta

estratto autore



Fig. 3. Brescia, la IV cella del Santuario (© su concessione del Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo – Soprintendenza Archeologica della Lombardia).

Le analisi preliminari

Come in precedenza descritto, il punto di partenza fondamentale per la progettazione di un nuovo impianto di climatizzazione destinato alla conservazione di beni culturali è la conoscenza approfondita delle dinamiche termoigrometriche hanno influenzato la conservazione dei reperti fino al momento precedente all'intervento.

Nel caso dell'ipogeo di Brescia, l'IsCR fu coinvolto fin dal 2008 per una valutazione delle condizioni ambientali e di stato di conservazione dei dipinti murali. La sensibilità dei funzionari del Comune e della Soprintendenza ha permesso di affrontare lo studio dell'ambiente secondo la metodologia in uso all'Istituto.

Sono stati eseguiti diversi sopralluoghi dai funzionari dell'IsCR, si è analizzata la situazione conservativa dei dipinti e si è effettuata una campagna di rilevamento microclimatico; si sono in particolare rilevati i parametri fisici ambientali in 13 punti di misura (*Fig. 4)* in modo da comprendere l'evoluzione stagionale, giornaliera e oraria dell'ambiente nel periodo febbraio 2009 - settembre 2012. Dall'indagine preliminare

collaborazione con l'IsCR. La società Onleco S.r.l, in collaborazione con la sezione modelli microclimatici e gestione dati del Laboratorio di Fisica e controlli Ambientali dell'IsCR del MiBACT, si è occupata della progettazione illuminotecnica e del monitoraggio ambientale, del sistema di misura e acquisizione dei dati per la conservazione, della loro elaborazione per la valutazione dei possibili fattori di rischio, del monitoraggio successivo all'intervento.

estratto autore

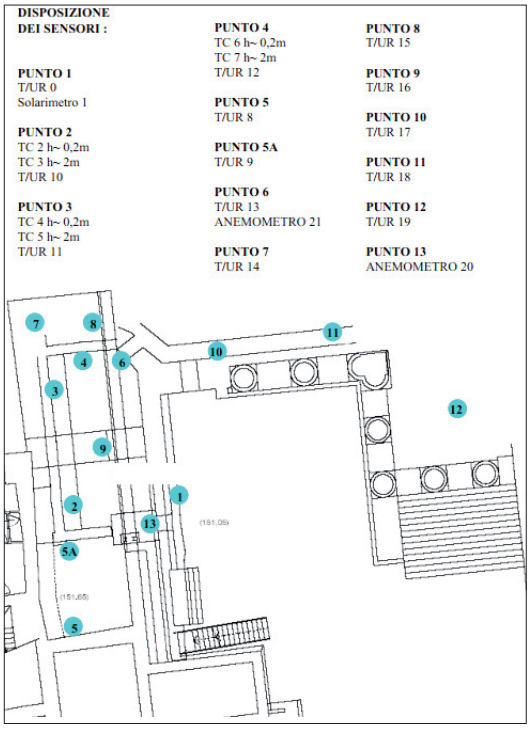


Fig. 4. Disposizione dei sensori di rilevamento dei parametri microclimatici nel periodo dal 2009 al 2012.

è emerso che l'ambiente presentava scambi di vapore e condensazione generalizzati; quest'ultima, in particolare si ripeteva ciclicamente nel periodo primaverile ed estivo. Il grafico (*Fig. 5)* mostra che gli andamenti della temperatura superficiale della muratura dipinta, su tre verticali distinte rilevati a 20 e 200 cm dal pavimento, risultano talvolta uguali o minori alla temperatura di rugiada (rappresentata dalla linea blu); proprio in tali condizioni avviene il fenomeno della condensazione superficiale del vapore libero in aria sulle murature dipinte.

In generale, nel periodo esaminato è stata anche riscontrata la presenza di sottili patine biancastre omogenee. Tale fenomeno poteva essere spiegato con la presenza di efflorescenze saline ma anche di sviluppi batterici; sono stati pertanto prelevati campioni di materiale in più punti a due diverse quote a circa 100 e 140 cm per effettuare le analisi di laboratorio.

Le indagini condotte al microscopio ottico hanno messo in luce, nel campione prelevato dalla zona più alta, la presenza di piccoli cristalli aghiformi e l'assenza di forme biologiche, mentre nel campione proveniente dall'area più bassa si sono individuate alcune cellule filamentose attribuibili allo sviluppo di Attinomiceti.

L'alterazione osservata è quindi da imputare prevalentemente alla formazione di sali, che non impedisce però, in alcune aree, la colonizzazione localizzata di batteri alofili quali gli Attinomiceti.

Il contenuto d'acqua della muratura nella zona esaminata particolarmente alto per la presenza del terrapieno retrostante, favoriva fenomeni di evaporazione e condensazione. Le condizioni dell'area erano apparse critiche, già nei sopralluoghi precedenti al restauro, per la presenza di attacchi microbici ed è probabile che gli interventi di disinfezione consigliati all'epoca, anche con applicazione di prodotti preventivi 'a lento rilascio'[6], potevano aver perso la loro efficacia dopo circa un anno dall'intervento.

6 Tipo Algophase®, biocida per microflora ad efficacia prolungata.

estratto autore

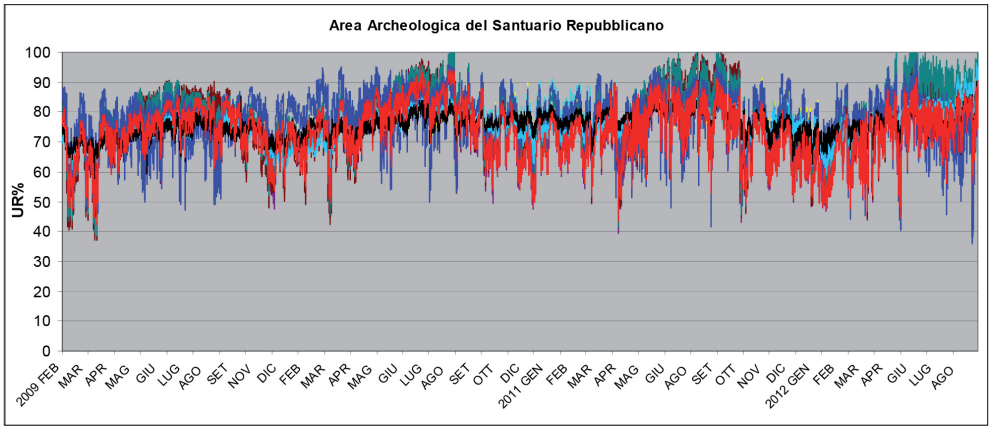


Fig. 5 Confronto delle temperature superficiali della muratura dipinta con la temperatura di rugiada.

Infine, dal punto di vista fisico l'ambiente presentava un alto tasso di umidità relativa. Nelle figure 6 e 7 si può osservare rispettivamente l'andamento dell'umidità relativa e dell'umidità specifica nei vari punti di misura (cfr. pianta *Fig. 4*), dovuta ai movimenti di vapore in aria.

L'esigenza di climatizzare l'ambiente ipogeo si è così misurata con una serie di utili indicazioni relative all'evoluzione ambientale del sito archeologico; ciò ha consentito agli impiantisti di definire un sistema non 'aggressivo' nei confronti dell'ambiente ma piuttosto collaborativo con la sua naturale ricerca di equilibrio. Sono state pertanto valutate diverse azioni non invasive in grado di lavorare sui contenuti di vapore dell'ambiente interno e sul rapporto con l'esterno.

La soluzione progettuale

Sulla base degli esiti delle analisi preliminari condotte, la strategia progettuale è stata quindi orientata allo sviluppo di una soluzione tecnologica che garantisse la stabilizzazione delle condizioni termoigrometriche in funzione dell'ambiente esterno, limitando tuttavia i fattori di rischio legati a fenomeni di condensazione superficiale evidenziati dalle analisi preliminari.

È stato quindi abbandonato il tradizionale iter progettuale per la climatizzazione vera e propria degli ambienti che prevede, in genere, l'identificazione di intervalli ristretti per le variazioni ammissibili dei parametri ambientali, con l'intento di mantenere stabili le condizioni termo-igrometriche, indipendentemente dalle variazioni dell'ambiente esterno.

Nell'ipogeo di Brescia sono state infatti ricercate le condizioni di temperatura e umidità specifica che meglio si adattavano alle condizioni esterne, al fine di evitare la formazione della condensa superficiale e di assicurare continuità al microclima che aveva garantito una buona conservazione dei reperti nei secoli fino ad oggi.

estratto autore

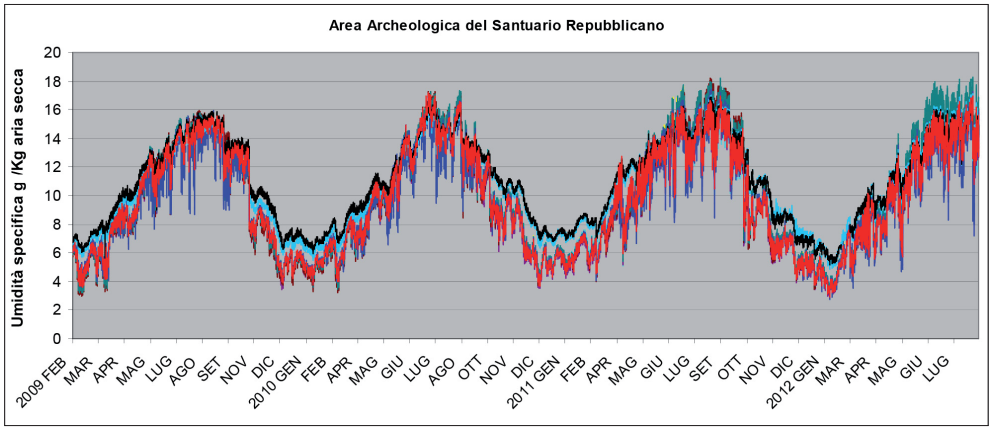


Fig. 6. Andamento della umidità relativa nei vari punti di misura nell'ambiente.

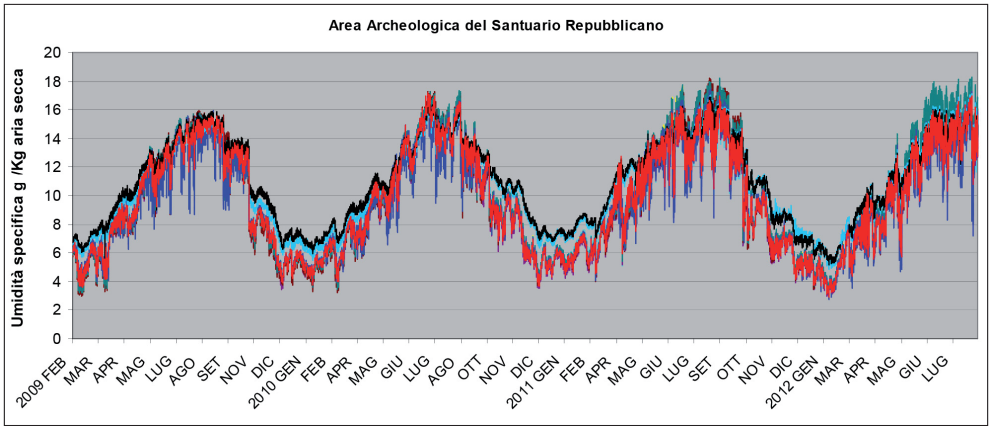


Fig. 7. Andamento della umidità specifica nei vari punti di misura nell'ambiente (2009-2012).

Questo tipo di approccio consente il mantenimento di condizioni interne stabili ma tuttavia simili a quelle rilevate in esterno. In questo modo, limitando il più possibile il gradiente interno-esterno, è stato introdotto un grande vantaggio, ovvero quello di limitare gli stress per i reperti conservati anche in presenza di eventuali disservizi dell'impianto meccanico, minimizzando le escursioni repentine in grado di danneggiare il mantenimento dell'equilibrio raggiunto fra ambiente e manufatto.

Un altro vantaggio non trascurabile della soluzione tecnologica individuata è rappresentato dal contenimento dei consumi energetici, consentito dal non dover assicurare condizioni ambientali troppo differenti rispetto a quelle dell'ambiente esterno.

La soluzione prevista dal progetto consiste in un impianto di ventilazione controllata in grado di agire secondo la logica di regolazione descritta in tabella (*Fig. 8*), che prevede la definizione dei *set-point* per il mantenimento dei valori di temperatura

estratto autore

	valore medio del titolo dell'aria esterna nell'ultima settimana **Xe,m**		valore medio della temperatura dell'aria esterna nell'ultima settimana **Te,m**		valore set-point del titolo ambiente **Xa**	valore set-point della temperatura ambiente **Ta**
if	< 5 g/kg	*and*	< 10°C	*then*	= Xe,m	12,5 °C
if	compreso tra 5 e 10 g/kg	*or*	compresa tra 10 e 15°C	*then*	= Xe,m	17 °C
if	>10 g/kg	*or*	compresa tra 15 e 24°C	*then*	10 g/kg	= Te,m con un valore minimo di 17°C
if	>10 g/kg	*and*	>24°C	*then*	10 g/kg	24°C

Fig. 8. Logica di regolazione dell'impianto di ventilazione controllata.

e assoluta (o titolo) dell'aria interna a partire dai valori rilevati in esterno e mediati nell'arco dell'ultima settimana. Tramite questa tipologia di regolazione si garantisce un'oscillazione graduale nel corso dell'anno, crescente e decrescente, in funzione dell'andamento esterno dei valori di temperatura e di umidità assoluta dell'aria.

L'impianto è dotato anche di un sistema di umidificazione a vapore, al fine di non avere nell'ambiente valori di umidità assoluta troppo bassi durante il periodo invernale.

È noto che, per la conservazione degli apparati decorativi, l'apertura al pubblico di un ambiente ipogeo rappresenta un potenziale fattore di rischio aggiuntivo, legato all'introduzione di inquinanti aerodispersi veicolati dai visitatori. Per contenere tale rischio, l'impianto a servizio del Santuario di Brescia è stato progettato per garantire un lavaggio costante dei locali, pari a circa 2,5 vol/h, con l'immissione dell'aria disposta su un unico fronte, in prossimità dell'ingresso, e l'estrazione concentrata sul fondo, in coerenza con l'esistente flusso d'aria naturale rilevato mediante le analisi preliminari.

È stata inoltre definita una procedura da attuare per controllare l'accesso dei visitatori al sito ipogeo. In particolare, è stato previsto un'area d'ingresso pressurizzata, separata da una porta-filtro dagli ambienti archeologici del Santuario. L'accesso del pubblico avviene attraversando questo ambiente, dove i gruppi di visitatori, sempre accompagnati da personale adeguatamente formato e composti al massimo da quindici persone, stazionano per un periodo non inferiore a quindici minuti, in modo da favorire l'acclimatazione e permettere il lavaggio completo dell'ambiente, prima di accedere al Santuario.

L'uscita del pubblico è consentita tramite un vano d'uscita depressurizzato che separa l'ambiente interno dall'esterno.

Un ulteriore potenziale fattore di rischio connesso con la musealizzazione del sito è la necessità d'illuminare il percorso espositivo per permettere la fruizione dei reperti da parte del pubblico. Il progetto degli impianti d'illuminazione, così come quello degli impianti meccanici, è stato quindi orientato, secondo le indicazioni emerse dalle analisi preliminari condotte dall'IsCR, alla limitazione della potenza termica dell'impianto e dell'emissione di radiazioni critiche, in grado di dare attivare fenomeni di degrado di natura fotobiologica.

estratto autore

Le sorgenti di luce LED scelte per permettere di raggiungere tali obiettivi di conservazione sono caratterizzate dall'assenza di emissione di radiazioni ultravioletta e infrarossa e da elevata efficienza luminosa, tale da garantire la riduzione dei consumi energetici. Tali sistemi consentono inoltre di contenere i livelli d'illuminamento incidente sulla superficie decorata, così come previsto dalla normativa di settore. In particolare, per la categoria di materiali esposti, sono stati considerati i limiti di legge[7], all'interno dei quali sono specificati i valori critici e ottimali riferiti ai parametri ambientali responsabili del potenziale degrado dei manufatti. I valori assunti come riferimento sono: illuminamento massimo pari a 150 lux; esposizione annua massima pari a 500.000 lux ora/anno; componente UV associata al flusso luminoso < 75 μW/lm e densità di energia totale tra 400 e 4000 nm < 10 W/m^2.

Data la complessità del fenomeno di conservazione che coinvolge le interazioni manufatto-ambiente, si specifica però che tali valori sono da intendersi solamente come riferimento e che le scelte progettuali hanno previsto la possibilità d'interfacciare l'impianto d'illuminazione con sensori di rilevamento dell'occupazione per permettere lo spegnimento automatico dell'impianto in assenza di visitatori e quindi per ridurre al minimo l'esposizione luminosa delle superfici da tutelare e prevenire accensioni prolungate e indesiderate delle sorgenti luminose.

Al fine di rendere possibile il controllo nel tempo delle grandezze ambientali in grado d'influenzare la conservazione dei preziosi reperti del sito archeologico, il progetto ha previsto l'installazione di un sistema di rilievo e acquisizione dati per il monitoraggio in tempo reale dei seguenti parametri: temperatura e umidità relativa dell'aria esterna; irraggiamento solare; temperatura e umidità relativa dell'aria interna; temperatura superficiale in prossimità delle decorazioni pittoriche; velocità dell'aria.

All'interno del sito ipogeo era già presente un sistema di acquisizione dati utilizzato per le analisi preliminari descritte in precedenza. Il nuovo progetto ha previsto la ridistribuzione spaziale dei sensori di temperatura e umidità relativa in aria, temperatura superficiale delle murature, velocità dell'aria, rilevamento dell'illuminazione, CO_2 in interno e in esterno in funzione delle nuove esigenze espositive e ha esteso il monitoraggio a due grandezze in precedenza non monitorate: illuminamento e concentrazione di anidride carbonica, in modo da tenere conto dei nuovi potenziali aspetti di rischio per la conservazione costituiti dall'accensione prolungata delle luci e dalla presenza di visitatori (*Fig. 9*).

L'architettura del sistema di gestione dei dati di monitoraggio è basata sullo standard BACnet (*Communication Protocol for Building Automation and Control Networks*) in modo da poter permettere la regolazione degli impianti elettrici e meccanici sulla base dei dati misurati.

[7] D.M. 10/05/2001: *Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei*.

estratto autore

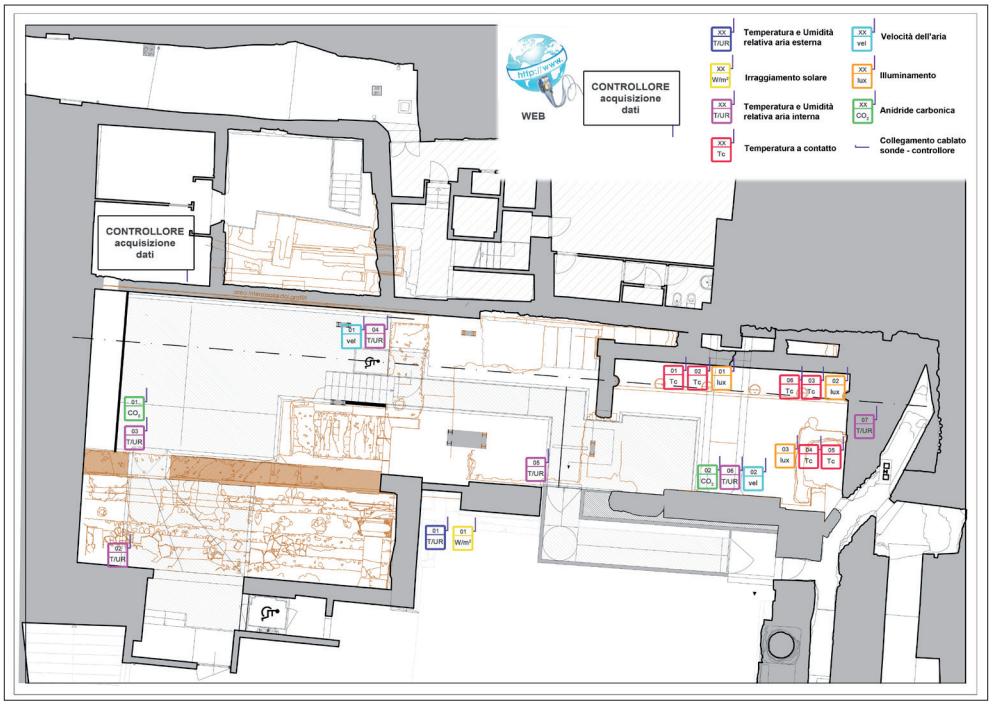


Fig. 9. Progetto del monitoraggio. Distribuzione spaziale dei punti di misura.

Il sistema di monitoraggio è composto da sonde cablate che s'interfacciano con un controllore collegato ad un portale internet che funge da Centro Servizi e consente, tramite l'autenticazione degli utenti, l'accessibilità da remoto reale alle misure acquisite e d'impostare soglie di allarme in grado di avvertire in tempo reale i responsabili della conservazione su eventuali disservizi degli impianti e sul raggiungimento di valori dei parametri ambientali non adeguati alla conservazione delle opere.

Il monitoraggio post-intervento

Ad oggi sono disponibili più di un anno e mezzo di dati relativi alle condizioni microclimatiche del sito ipogeo in seguito all'apertura al pubblico e all'inaugurazione del nuovo spazio espositivo e dei nuovi impianti di climatizzazione.

La significativa mole di dati disponibili consente di poter esprimere un primo giudizio sulle condizioni microclimatiche del sito e di effettuare alcune prime considerazioni sugli interventi eseguiti.

L'analisi dei dati mette in luce la buona capacità dell'impianto di lavorare secondo le logiche di regolazione definite dal progetto e studiate per minimizzare i rischi di condensa superficiale a carico dei dipinti murali e dei materiali conservati nel sito archeologico.

estratto autore

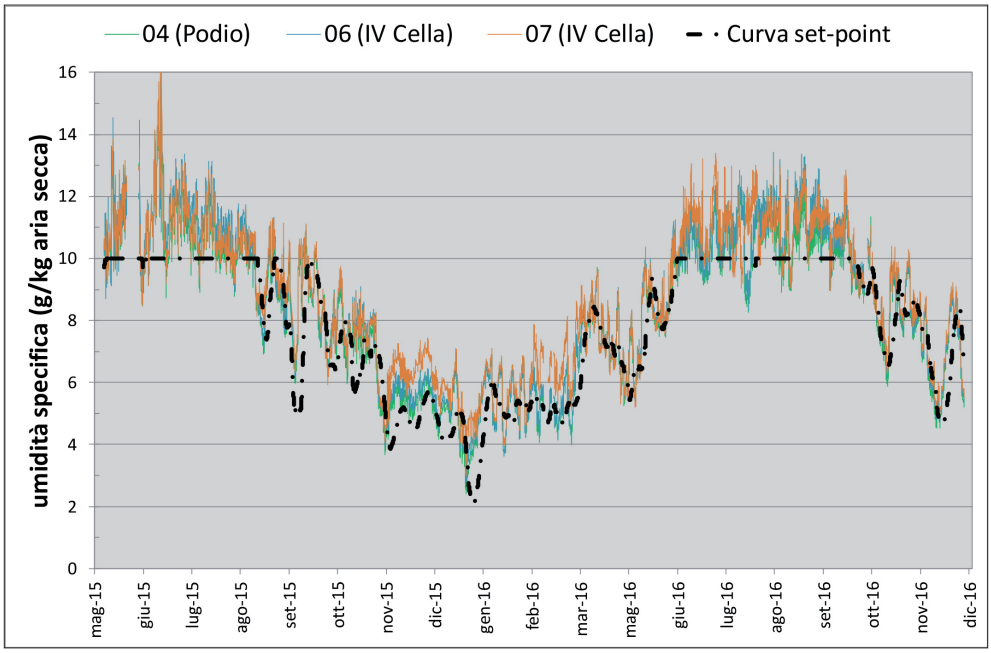


Fig. 10. Profilo temporale dell'umidità specifica post-intervento.

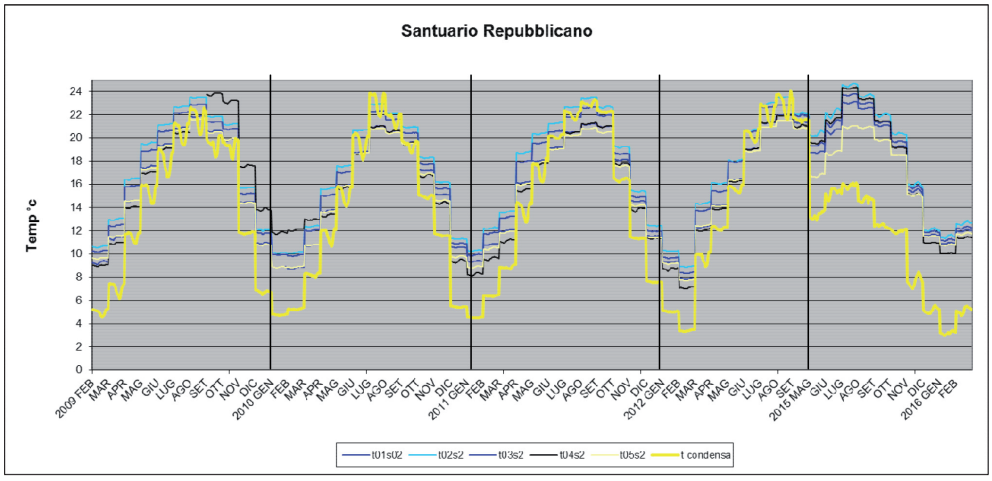


Fig. 11. Confronto delle temperature superficiali della muratura dipinta con la temperatura di rugiada pre e post-intervento.

I valori di temperatura e umidità relativa rilevati si mostrano uniformi all'interno di tutta l'area e non influenzati significativamente dalle condizioni esterne e dall'affluenza di pubblico. Nell'analisi del giorno medio tipico, che è ricavato per ciascun mese, dalla sequenza dei valori medi calcolati dall'insieme di tutti i dati registrati a

estratto autore

una certa ora del giorno, è infatti possibile osservare un andamento stabile con cicli giorno-notte contenuti.

Dall'analisi dei profili temporali di temperatura e umidità specifica dell'aria si conferma la capacità, da parte del nuovo impianto, di contenere le escursioni termiche stagionali e di ridurre il quantitativo di vapore libero in ambiente.

Infatti, come si può notare dal profilo temporale dell'umidità specifica riportato in (*Fig. 10)* nei punti 04, 06 e 07 in pianta (*Fig. 9*), ad eccezione di un primo periodo di assestamento delle condizioni interne e di messa a regime del nuovo impianto, la quantità di vapore libero misurata in ambiente risulta ben allineata con l'andamento richiesto all'impianto secondo le logiche di regolazione definite in fase progettuale. La curva di *set-point* è rappresentata in figura mediante linea tratto-punto nera.

La capacità dell'impianto di contenere i livelli di umidità nell'ambiente emerge dal confronto dei valori medi raggiunti in ambiente nell'estate del 2016 (pari a circa 11 g/kg) con quelli rilevati nel corso delle analisi preliminari (valori medi pari a circa 15 g/kg) *(Fig. 7)*.

Il contenimento delle escursioni annuali di temperatura e umidità ha come risvolto positivo, rispetto al passato, una diminuzione sensibile dei fenomeni di condensazione a carico delle pareti.

I dati di monitoraggio di temperatura superficiale delle pareti dipinte acquisiti fino ad ora, permettono di escludere la possibilità che si siano verificati fenomeni di condensazione, sia per i punti di monitoraggio collocati in basso sulla parete, a 20 centimetri dal pavimento, che per quelli collocati a due metri di altezza. Le temperature superficiali rilevate risultano, infatti, quasi sempre superiori al punto di rugiada, rappresentato in figura dalla curva gialla (*Fig. 11*). È qui possibile notare il confronto fra gli andamenti precedenti e quelli successivi alla messa in funzione del nuovo impianto di climatizzazione nel mese di maggio del 2015.

Conclusioni

L'esperienza condotta sulla IV cella del Santuario Repubblicano di Brescia può consentire di gettare le basi per la definizione di una procedura di progettazione di sistemi di climatizzazione per la stabilizzazione delle condizioni microclimatiche in siti archeologici ipogei.

Il lavoro ha seguito un processo di studio virtuoso che ha messo in relazione, ognuno per la propria competenza, l'amministrazione del Comune di Brescia, le strutture territoriali del MiBACT, i progettisti e i consulenti, dalla fase del progetto preliminare sino alla realizzazione dell'intervento, individuando una soluzione impiantistica innovativa, non invasiva, sicura ed energeticamente sostenibile.

Il sistema di monitoraggio permanente installato in sito permette di fornire ai responsabili della conservazione dati utili per l'interpretazione dei fenomeni che caratterizzano la ricerca del nuovo equilibrio fra apparati decorativi e ambiente. La possibilità

estratto autore

di disporre di tali dati in tempo reale e da remoto consente, inoltre, la comunicazione di eventuali disservizi degli impianti meccanici in tempo utile per intervenire con le azioni correttive maggiormente idonee.

REFERENZE BIBLIOGRAFICHE

Accardo *et al.* 1992: G. Accardo, C. Cacace, G. D'Ercoli, E. Giani, R. Rinaldi, C. Seccaroni *Monitoraggio ambientale: analisi e tecniche di intervento strumentale sul territorio*, atti della III conferenza internazionale sulle prove non distruttive, metodi microanalitici e indagini ambientali per lo studio e la conservazione delle opere d'arte (Viterbo 4-8 ottobre 1992), pp. 863-880

Cacace *et al.* 2008: C. Cacace, E. Giani, A. Giovagnoli, M.P. Nugari, M. Singh, *The mural paintings of cave 17 in Ajanta: the environmental study and the Geographic Information System (GIS) of the collected data*, 15th triennial international conference – ICOM Commitee for Conservation (Delhi 22-26 sept. 2008), Allied Publishers, 2008, pp. 907-915

Cacace *et al.* 2009: C. Cacace, E. Giani, *Il complesso microclima degli ambienti ipogei: difficoltà e precauzioni per la musealizzazione*, in «Bollettino ICR», n.s., 2009, 18-19, pp. 3-9

Cacace *et al.* 2009: C. Cacace, D. Radeglia, P. Scarpitti, A.D. Basso, *Venezia – Due interventi di monitoraggio ambientale: Palazzo Labia, salone affrescato da Gianbattista Tiepolo (1746-7), Chiesa della Visitazione, soffitto ligneo dipinto del XVI secolo*, in *L'innovazione per un restauro sostenibile*, XVI Salone del Restauro dei Beni e delle Attività Culturali (Ferrara 25-28 marzo 2009), Cangemi editore, Roma 2009, pp. 58-59

Gabrielli *et al.* 2007: N. Gabrielli, P. Zander, *La necropoli sotto la Basilica di San Pietro in Vaticano. Interventi conservativi e opere di manutenzione*, in «Kermes», XX, 2007, 65, pp. 53-66

Giavarini *et al.* 2004: C. Giavarini, M.L. Santarelli. G. Torraca, L. Iacofi, *Studi ambientali per la conservazione dei vani ipogei della Domus Aurea*, in «Materiali e Strutture. Problemi di conservazione», n.s., II, 2004, 3-4, pp. 30-47

D.M. 20/05/1992: Decreto Ministero Beni Culturali e Ambientali, 20 maggio 1992, n. 569, in G.U. n. 52 del 4 marzo 1993

D.M. 10/05/2001: Decreto Ministero Beni Culturali e Ambientali, 10 maggio 2001, *Atto d'indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei*, in G.U. n. 238 del 19 ottobre 2001