

# Ambienti museali ipogei: problematiche conservative e monitoraggi ambientali

CRISTINA CARLETTI, GIORGIO RAFFELLINI, FABIO SCIURPI

*Dipartimento TAeD - Università degli studi di Firenze*

## **RIASSUNTO**

La conservazione negli ambienti museali ipogei costituisce un problema ancora aperto: infatti la loro musealizzazione se da un lato permette la fruizione collettiva dell'opera, dall'altro può portare a problemi seri per la conservazione del manufatto, dovuto all'interazione tra la struttura ipogea e l'ambiente circostante. Negli ambienti ipogei in generale, dovendo privilegiare la "conservazione in situ", risulta particolarmente importante il controllo delle condizioni ambientali interne e la creazione delle condizioni più idonee ad una corretta conservazione dei beni in essi contenuti, evitando, limitando e/o compensando quelle cause di alterazione spesso dovute alla fruizione del bene. In tali casi risulta spesso necessario attuare un compromesso tra le scelte di carattere culturale – fruizionale e conservative, sulla base del rischio di degrado che si considera accettabile per tali ambienti.

Stante questa situazione, nel presente lavoro si riportano i principali risultati di un monitoraggio ambientale effettuato in due siti archeologici ipogei di area fiorentina, il cui interesse è dovuto alla presenza al loro interno di importanti opere che versano in uno stato di conservazione preoccupante, derivante dal notevole afflusso di pubblico. In particolare sono state analizzate le condizioni microclimatiche (temperatura, umidità relativa, temperatura superficiale), di illuminazione (illuminamento) ed alcuni dei principali agenti inquinanti ritenuti particolarmente pericolosi in questo tipo di ambienti (anidride carbonica, radon). Tale monitoraggio è stato finalizzato alla conoscenza e al controllo delle condizioni di conservazione e alla definizione delle cause di alterazione delle stesse, ed infine per formulare alcune proposte minimali.

## **1. INTRODUZIONE**

Il sistema museale è costituito da una complessità di elementi in interazione, attribuibili all'ambiente ed ai materiali costituenti gli oggetti conservati. Queste interazioni, se non opportunamente controllate e limitate, sia nella durata che nell'intensità e frequenza, possono dare luogo a processi di natura irreversibile che sono alla base dei fenomeni di degrado. Gli ambienti museali debbono essere quindi analizzati e monitorati al fine di valutare la loro idoneità alla conservazione degli oggetti in essi contenuti.

In mancanza di informazioni sui parametri fisico - tecnici non è infatti possibile valutare

l'esistenza di situazioni di rischio per la conservazione delle opere esposte, premessa indispensabile alla programmazione di eventuali interventi atti a riportare la situazione entro limiti di accettabilità.

Ogni opera d'arte esposta ha esigenze conservative ottimali in funzione del materiale di cui è costituita, del luogo di provenienza, degli sforzi cui è soggetta, dell'iter di invecchiamento e delle condizioni ambientali cui è stata sottoposta nel tempo (storia climatica). Dunque l'attenzione si deve rivolgere allo studio ed al controllo dei parametri che influenzano la conservazione degli oggetti collocati all'interno di contenitori espositivi, e quindi principalmente a:

- radiazioni elettromagnetiche provenienti da sorgenti di luce naturali ed artificiali;
- condizioni termoigrometriche sia dell'aria in prossimità dell'oggetto, che delle superfici ove sono collocate le opere, e loro variazioni nel tempo;
- qualità dell'aria interna (quantità di polveri e di gas inquinanti presenti nell'aria).

Tutti questi parametri presi singolarmente hanno effetti diversificati sugli oggetti esposti nei musei e ciò principalmente in dipendenza della natura dei materiali costituenti l'opera d'arte. Non vanno però dimenticati i complessi sinergismi tra questi tre fattori, che possono comportare fenomeni di degrado amplificati ed a volte imprevedibili.

Le radiazioni luminose possono per esempio provocare lo scolorimento di molti materiali (pigmenti colorati, cellulosa) a seguito di effetti fotochimici, e nel contempo costituiscono la fonte dell'energia di attivazione per una qualsiasi reazione chimica o biologica.

Le condizioni termoigrometriche possono provocare variazioni dimensionali, crepe, distacchi (in maniera diretta con il variare della quantità di acqua contenuta negli oggetti), effetti biologici (formazione di muffe, funghi ed insetti sui materiali, favorita da temperature superiori a 20°C ed umidità relative maggiori al 65%), e nel contempo costituiscono il substrato necessario per l'attivazione di qualsiasi fenomeno chimico di ossidazione e corrosione, e possono dare luogo alla trasformazione chimica di sostanze aggressive amplificandone gli effetti.

Infine, l'effetto che l'inquinamento indoor provoca sugli oggetti esposti varia in funzione del tipo di inquinante, della sua concentrazione, delle caratteristiche morfologiche e chimiche del materiale esposto e può essere amplificato da condizioni particolari di temperatura, umidità relativa e luce.

Allo stato attuale, pur essendo nota l'esistenza di interrelazioni tra i vari parametri fisico - tecnici, tuttavia correlazioni fra cause ed effetti, con le azioni di acceleranti dei processi, non sono attualmente del tutto note e sono pertanto oggetto di studio.

Ai fini di una corretta conservazione, è quindi opportuno raccogliere i valori di tali grandezze, cui il manufatto è stato sottoposto nel tempo, e metterli a confronto con la sequenza di eventi caratterizzanti il degrado dell'oggetto stesso; andrebbe cioè sempre presa in considerazione, quando esiste, la “storia ambientale dell'oggetto”, per quello che riguarda i parametri termoigrometrici, illuminotecnici e di qualità dell'aria interna.

In questa ottica diventa particolarmente importante la conservazione preventiva degli oggetti esposti negli ambienti museali, indicando con tale termine tutte quelle azioni che hanno lo scopo di ridurre il rischio di degrado cui l'oggetto da esporre sarebbe sottoposto e di individuare sistemi alternativi per mostrare l'opera nel miglior modo possibile, agendo non direttamente sulla stessa bensì sull'ambiente e sulle condizioni di esposizione, creando un ambiente di conservazione ideale attraverso il monitoraggio e controllo ambientale indoor, la corretta gestione dell'ambiente museale, ecc.

## **2. CARATTERISTICHE E PROBLEMATICHE CONSERVATIVE DEGLI AMBIENTI IPOGEI**

La conservazione degli ambienti ipogei costituisce un problema di non facile soluzione, dovuto alla complessa dinamica che caratterizza l'interazione fisico – chimica e biologica tra struttura ipogea e ambiente circostante.

Esperienze condotte su ambienti tipicamente ipogei, come necropoli etrusche e catacombe, hanno indicato nei processi di scambio termoigrometrico le principali cause dei meccanismi di degrado chimico, come i cicli di cristallizzazione dei sali, e di degrado biologico, come la formazione di microrganismi ed alghe.

Gli ambienti ipogei, nei quali la temperatura è relativamente costante e il tasso di umidità generalmente elevato, costituiscono un habitat favorevole per numerosi microrganismi [1], la cui quantità e qualità di specie presenti può variare a seconda dell'area geografica, del substrato, dell'andamento stagionale e degli scambi con l'esterno, mentre gli effetti di degrado sono il risultato delle interazioni fra varie popolazioni microbiche, e fra queste e l'ambiente.

Il fenomeno del biodeterioramento è determinato dall'azione metabolica di microrganismi, il cui sviluppo e la cui azione alterante è in stretta correlazione con i parametri fisici di umidità, temperatura e luce, e dipende dai rapporti nutrizionali che intercorrono tra i vari gruppi microbici e tra questi e l'ambiente esterno.

Un rischio da non sottovalutare, come concausa di fenomeni di biodeterioramento o addirittura quale fenomeno scatenante, è l'apertura al pubblico dell'ambiente ipogeo, soprattutto quando l'affluenza è elevata e sono presenti fonti di luce (e conseguentemente di calore) che agevolano l'azione di fotosintesi, favorendo in molti casi la crescita di alghe.

Non è raro infatti il caso di tombe che, appena scoperte, si presentavano in ottime condizioni ma che, a distanza di non molti anni, hanno perso gran parte delle opere dipinte in esse contenute: è questo per esempio il caso della Tomba del Triclinio e della Tomba dei Rilievi Dipinti a Cerveteri [2], dove poco o nulla è rimasto delle scene di banchetto che decoravano le pareti quando la tomba venne scoperta, nel 1846.

Un altro esempio significativo è quello delle Caves di Lascaux [3], scoperte in Francia nel 1940, le cui pareti erano ricoperte da disegni e pitture con raffigurazioni di animali, databili a 15000 anni fa e ancora in perfette condizioni, e che dopo l'apertura al pubblico (affluenza di circa 500-600 visitatori al giorno), per l'aumento del grado di umidità ambientale e della concentrazione di anidride carbonica, combinato all'effetto derivato dall'illuminazione, portò ad una massiccia invasione di microrganismi (funghi, streptomiceti e batteri) e di alghe tale da ricoprire le raffigurazioni.

Altri esempi sono costituiti dalla Tomba dei Tori e la Tomba della Caccia e della Pesca a Tarquinia [4], e dalla tomba di Nefertari in Egitto [5], dove si osservò che nei tre giorni seguenti all'apertura della tomba, il numero dei batteri e dei funghi era raddoppiato a causa della presenza delle persone impiegate nelle ricerche che si stavano conducendo.

Studi effettuati per circa due anni nella Tomba dei Cotu a Perugia subito dopo la scoperta evidenziarono che la flora microbica normalmente presente in un ambiente ipogeo può nel tempo cambiare in maniera sostanziale a seguito dell'apertura e dei conseguenti scambi col mondo esterno,

ricreando condizioni di equilibrio diverse, a seconda anche delle variazioni stagionali dei parametri fisici (temperatura e umidità), senza peraltro portare a fenomeni di biodeterioramento, che invece si innescano quando si hanno mutamenti continui, bruschi e ripetuti nel tempo, dei parametri microclimatici (variazioni di temperatura e di umidità relativa) e quindi viene alterato continuamente l'equilibrio creatosi nell'ambiente.

Di qui l'importanza di intervenire tempestivamente sulle cause che provocano tali variazioni, anche prima che si creino condizioni favorevoli al biodeterioramento.

La presenza dell'uomo in un ambiente ipogeo può quindi alterare le condizioni di equilibrio ambientale raggiunte nei secoli (temperatura, luce, umidità, presenza di anidride carbonica, ricambio d'aria e conseguente apporto di microrganismi dall'esterno). Per risolvere questo problema sono state fatte interessanti proposte per la fruizione delle necropoli etrusche, poi riproposte in altri ambienti ipogei, quali l'uso di sistemi di porte trasparenti, con opportuni sensori, che consentono la visione dell'ambiente interno, pur mantenendolo isolato e controllato (alcune tombe delle Necropoli etrusche di Tarquinia e Cerveteri, la Tomba del Principe degli Apostoli nella Necropoli Vaticana, ecc.).

Un uso improprio di biocidi infine può, ad esempio eliminando alcuni microrganismi, permettere lo sviluppo, talvolta più pericoloso, di altri (come nella Tomba dei Rilievi Dipinti a Cerveteri)[2]. Inoltre l'efficacia varia a seconda del particolare tipo di associazione microbica che determina l'alterazione. In ogni caso, anche l'intervento con un biocida deve essere visto come una pulitura straordinaria, seguita sempre da un'azione preventiva sulle cause fisico chimiche che hanno determinato l'insorgere di fenomeni biologici di alterazione, predisponendo le condizioni ambientali che ostacolano un ulteriore sviluppo microbico [6].

Infine gli ambienti ipogei, oltre a risentire delle variazioni di temperatura ed umidità relativa interne, subiscono continuamente il rischio di infiltrazioni d'acqua, dovuto alle acque piovane di percolazione, alle eventuali falde sotterranee presenti, o anche a condutture fognarie o dell'acquedotto soggette a perdite o malfunzionamenti.

Questi fattori sono causa non solo del fenomeno di cristallizzazione dei sali sulle superfici, ma anche, come già detto, di attacchi biologici, con la formazione di alghe, funghi e licheni. Si deve poi aggiungere che la fruizione da parte del pubblico richiede l'impiego della luce artificiale, che, alterando le condizioni di illuminamento e temperatura, aumenta i processi di degrado (Domus Aurea, Tomba di Nefertari, tomba di Tutankamen, dove l'umidità relativa è cresciuta in modo significativo, a fronte di un basso contenuto di ossigeno e di un'alta concentrazione di anidride carbonica).

In un ambiente ipogeo risultano quindi particolarmente importanti:

- la misura dei parametri ambientali indoor, volta alla caratterizzazione della dinamica dei processi di degrado [7], alla determinazione degli scambi di aria fra interno ed esterno, alla verifica del rischio di formazione di condensa di vapor acqueo sulle superfici interne, ecc.;
- lo studio del biodeterioramento, accentuato dalle continue e repentine variazioni di temperatura ma soprattutto di umidità relativa, dalle alte concentrazioni di CO<sub>2</sub>, dovute principalmente al forte afflusso di visitatori, dalla presenza di sistemi di illuminazione artificiale non adeguati, dagli scambi di aria incontrollati tra interno ed esterno, ecc.;
- indagini chimiche e chimico-fisiche sui diversi materiali che costituiscono l'ambiente ipogeo

tramite prelievi di piccoli campioni di materiali.

Le principali problematiche che si riscontrano negli ambienti ipogei sono quindi un'altissima umidità relativa, la risalita di sostanze umide sulle pareti per capillarità, la presenza di luce naturale o artificiale non idonea, le variazioni termiche, gli scambi con l'esterno e l'influenza antropica. Il combinarsi di questi elementi determina la formazione di molte nicchie ecologiche, che permettono l'attacco simultaneo e sinergico di molti biodeteriogeni.

### **3. IL MONITORAGGIO DI DUE SITI ARCHEOLOGICI IPOGEI FIORENTINI**

Partendo dalle considerazioni fatte nei paragrafi precedenti, sono state effettuate alcune analisi e monitoraggi ambientali in due siti archeologici situati nel centro storico di Firenze: la chiesa di Santa Reparata, che si trova proprio sotto il duomo della città, e l'ipogeo del Battistero di San Giovanni; due siti che presentano due modalità di fruizione diverse, essendo il primo un museo aperto al pubblico, con tutte le problematiche inerenti, mentre il secondo totalmente escluso dai percorsi museali e, forse per questo, in quasi totale stato di abbandono.

La scelta di questi due siti è stata motivata principalmente dall'importanza degli stessi come testimonianza del passato pre - rinascimentale della città e dal preoccupante stato di conservazione in cui versano i pavimenti mosaicati<sup>1</sup> in essi contenuti. Già da un'analisi visiva, è infatti possibile notare l'elevata umidità dei luoghi, dovuta sia alla risalita capillare dell'acqua data la vicinanza maggiore alla falda freatica<sup>2</sup>, sia ad una scarsissima ventilazione, sia, nel caso di Santa Reparata, ad un'affluenza di visitatori molto elevata<sup>3</sup>, soprattutto nei periodi estivi e nelle festività.

La chiesa di Santa Reparata è aperta al pubblico tutti i giorni dalle 10.00 alle 17.00, tranne la domenica che è chiusa per permettere lo svolgimento delle funzioni religiose. Gli interventi effettuati per rendere l'ambiente musealizzato hanno trascurato alcuni basilari concetti conservativi, infatti si nota: impiego di materiali quali il linoleum per coprire le parti mancanti, il cemento per tamponare le lacune e bordature in piombo lungo i pavimenti mosaicati; passerelle posizionate sopra i mosaici, che rendono di fatto difficile la pulizia nelle zone sottostanti ed hanno degradato le superfici con l'innesto di paletti di ferro, senza tuttavia porre i mosaici al riparo da atti vandalici che si perpetuano anche a causa della scarsa vigilanza. Inoltre gran parte del pavimento in cocciopesto presente nella zona vicina all'abside della chiesa è coperto da un tappeto incollato direttamente sul pavimento. In conseguenza di ciò sono evidenti i segni di sgretolamento dei materiali, in particolare della malta intorno al tassellato ma anche dello strato di allettamento sottostante, nonché il distacco di tessere musive. L'impianto di illuminazione presente consta di lampade ad incandescenza da 60 Watt, posizionate all'interno di apparecchi illuminanti inseriti nel controsoffitto. Il ricambio d'aria è molto

---

<sup>1</sup> Le tessere dei mosaici sono in marmo e pietra di origine calcarea.

<sup>2</sup> La situazione idrogeologica della zona è caratterizzata da un'altezza della falda freatica di 41 m sul livello del mare, dunque a circa 7 metri al di sotto del piano di calpestio della piazza, distanza che si riduce sensibilmente per i due ipogei, che risulteranno perciò più sensibili alle variazioni stagionali della falda, che si attestano intorno a uno o due metri. Inoltre, essendo il sottosuolo di Firenze formato da sabbie più o meno argillose con ciottoli sparsi e da materiale di riporto per uno spessore di circa 5 o 6 metri, con al di sotto ciottoli e ghiaie con matrice sabbiosa, ciò comporta un maggiore fenomeno di risalita capillare dell'acqua.

<sup>3</sup> L'afflusso di persone raggiunge le 800 – 1000 unità al giorno.

limitato, essendo possibile per via naturale solo dalle scale di accesso, posizionate all’ingresso della chiesa, e per via artificiale tramite due ventilatori che aspirano aria da griglie posizionate nel pavimento della soprastante Santa Maria Del Fiore.

L’ipogeo del Battistero è chiuso al pubblico, data la mancanza di altezza necessaria per la musealizzazione, e ciò è stato probabilmente la causa della scarsa manutenzione dei mosaici lasciati in sito, se si escludono gli interventi di sigillatura dei bordi dei pavimenti con malta di calce e con l’inserimento di un bordo di piombo per delimitare le lacune. Per un lungo periodo, sopra i mosaici sono stati posizionati dei sacchi di plastica, probabilmente per proteggerli dai rifiuti gettati dalle griglie del piano di calpestio del soprastante Battistero, che costituiscono nel contempo l’unico mezzo di ricircolo naturale d’aria dell’ipogeo e di visione, anche se parziale, di alcuni tratti di pavimentazione musiva. Tale intervento, attualmente rimosso, in un ambiente così umido, ha provocato la proliferazione di patine biologiche di origine fungina ed efflorescenze biancastre causando un ulteriore degrado dei mosaici romani. Inoltre, in alcune parti del mosaico, si è verificato un distacco del tassellato dallo strato di sottofondo e il fenomeno della curvatura del manto, mentre nella parte a ridosso del muro dove si trova una canalizzazione fognaria che a volte perde acqua, sono presenti evidenti macchie di umidità. Nell’ambiente sono presenti alcune lampade che vengono accese saltuariamente, per illuminare i mosaici visibili dalle griglie del pavimento del Battistero.

#### **4. METODOLOGIA DI MISURA UTILIZZATA**

Per il monitoraggio dei parametri ambientali, i tempi di misura e l’elaborazione dei dati rilevati nei due ambienti ipogei, si è fatto riferimento alle indicazioni della Norma UNI 10829.

L’analisi microclimatica è stata condotta con l’ausilio di datalogger miniaturizzati, della ditta Gemini, che hanno rilevato ogni ora i valori di temperatura ed umidità relativa dell’aria sia all’interno che all’esterno. Inoltre, visto il potenziale rischio di formazione di condensa superficiale all’interno dei due ambienti, sono stati anche utilizzati datalogger miniaturizzati che hanno rilevato ogni ora i valori di temperatura superficiale dei pavimenti mosaicati (figura 1).



Figura 1 – Misure di temperatura e UR e di temperatura superficiale in Santa Reparata

In generale, le postazioni di misura interne sono state scelte tenendo conto delle esigenze funzionali e di fruizione dell’ambiente espositivo (evitando di impedire la corretta visione dell’opera,

di interferire con la normale gestione degli spazi e con i percorsi di visita, ecc.), delle esigenze di funzionamento degli strumenti (evitando postazioni prossime a sorgenti di calore localizzate, fonti di luce diretta, contatto diretto con il pubblico, contatto diretto con sostanze inquinanti o altre cause di perturbazione locale che possono influire sul corretto funzionamento degli strumenti), nonché delle caratteristiche geometriche degli ambienti.

Le misure in continuo di temperatura e umidità relativa in Santa Reparata sono iniziate il 23 luglio 2001 e sono state sospese il 27 dicembre 2001, mentre nell’ipogeo del Battistero sono iniziate il 23 luglio 2001 e sono terminate il 23 gennaio 2002. Dopo preventive misure istantanee dei parametri ambientali interni che hanno interessato numerose aree dei due ambienti ipogei, sono state scelte le postazioni dove procedere al monitoraggio in continuo, che per Santa Reparata ha interessato la zona corrispondente all’entrata originaria (A), una zona pressoché centrale, a ridosso di una tomba trecentesca (B), ed una zona comprendente l’abside (C) e la tomba del Brunelleschi (figura 2). Nel Battistero invece gli strumenti sono stati posizionati in corrispondenza del lato ovest della struttura di fondazione (D).

Per quanto riguarda invece la temperatura superficiale, il monitoraggio è stato condotto per periodi della durata di una settimana ripetuti nell’arco delle diverse stagioni sia in Santa Reparata (posizione A), che nel Battistero (posizione D).



Figura 2 – Postazioni di misura per il monitoraggio in continuo in Santa Reparata

I dati rilevati sono stati infine elaborati determinando i valori massimi, minimi e medi giornalieri, mensili e stagionali, le variazioni giornaliere, mensili e stagionali, mettendo inoltre in relazione i valori interni con quelli corrispondenti esterni e con il numero di visitatori rilevato, ed infine realizzando diagrammi di frequenza cumulata e relativa, e di indice di rischio per la conservazione secondo quanto stabilito dalla Norma UNI 10829.

Inoltre, solamente per il sito di Santa Reparata, dove è presente un impianto di illuminazione artificiale accesa regolarmente durante gli orari di apertura, sono state fatte misure istantanee dei valori di illuminamento interno, tramite un luxmetro, della ditta Gossen. Anche in questo caso la metodologia di misura applicata ha seguito le raccomandazioni date in proposito dalla Norma UNI 10829; si è quindi misurato, 15 minuti dopo l'accensione degli apparecchi illuminanti, l'illuminamento orizzontale, su un piano ideale posto ad un'altezza di 0,8 m dal pavimento, nei nodi di una griglia orizzontale di 1m x 1m di lato, tracciata in relazione alla disposizione nell'ambiente degli apparecchi illuminanti.



Figura 3 – Misura di anidride carbonica e Radon in Santa Reparata

In una seconda fase di monitoraggio, in Santa Reparata è stata inoltre analizzata la qualità dell'aria indoor che, trattandosi di ambiente ipogeo con scarso ricambio d'aria ed alto numero di visitatori, ed essendo presenti soprattutto materiali calcarei, è stata valutata misurando la concentrazione in aria di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), a mezzo di un multiacquisitore dati BABUC/M, della ditta LSI, con relativa sonda a raggi infrarossi (con range di misura 0-3000 ppm). L'ingombro dell'apparecchiatura, la necessità di funzionamento collegato alla corrente di rete e lo scarso controllo di sicurezza operabile hanno obbligato a ridurre il periodo del monitoraggio a tre giorni, dal 24 al 26 luglio. I dati rilevati sono stati confrontati con i valori limite consigliati per i musei e messi in relazione con la presenza di visitatori che è stata rilevata ogni ora. L'apparecchiatura è stata collocata, tramite un cavalletto, a circa 1,5 m da terra, in una posizione tale da essere sufficientemente rappresentativa della condizione interna dell'ambiente ed in modo tale da non essere di intralcio alla normale fruizione del museo da parte dei visitatori. Il tasso di acquisizione della misura è stato programmato in modo

da memorizzare i dati ogni ora. Data la realtà ipogea dei due luoghi, che sono anche luoghi di lavoro (biglietteria e book-shop) in cui il personale permane fino a 8 ore al giorno, si è ritenuto opportuno effettuare un'analisi della eventuale presenza di gas radon e confrontare anch'essa con i valori limite dati dalla normativa vigente. Lo strumento per la misura della concentrazione media del gas (sistema E-Perm) è stato posizionato, in Santa Reparata, in prossimità della biglietteria. La misurazione del gas Radon è stata effettuata nella settimana compresa tra il 4/12/2001 e il 12/12/2001 (figura 3).

Inoltre, con la collaborazione del laboratorio di mineralogia del CNR di Firenze, sono state effettuate analisi di laboratorio su campioni di polveri e su frammenti di mosaico presi in diverse zone dei due ambienti ipogei. Esse sono state effettuate tramite spettroscopia micro-Raman, per avere informazioni sulla natura, sulla composizione e sulla struttura dei sistemi molecolari, organici ed inorganici, che costituiscono il materiale di studio, nonché per determinare i prodotti di alterazione o la corrosione superficiale dei materiali, la presenza di sostanze inquinanti e la formazione di patine biologiche ed efflorescenze causate dalla risalita di sali solubili in superficie, ecc., e con il metodo della diffrazione ai raggi X, per verificare la presenza di sostanze inquinanti e la composizione delle polveri depositate.

## **5. ANALISI DEI RISULTATI**

Nelle due realtà museali considerate non è presente la figura di un conservatore, né dati sulle condizioni ambientali pregresse cui sono stati “conservati” finora gli oggetti esposti; stante questa situazione sono stati presi come riferimento, per la definizione dei valori ottimali per la conservazione dei mosaici in ambienti ipogei, i valori consigliati nella norma UNI 10829 e quelli desunti dalla bibliografia sull'argomento analizzata, che per la temperatura sono compresi tra 15 e 25°C e per l'umidità relativa tra il 20 ed il 60%.

Dal monitoraggio termoisometrico effettuato in Santa Reparata emerge come l'ambiente sia caratterizzato da valori di umidità relativa estremamente elevati (85-90%), soprattutto nel periodo estivo, e quasi sempre al di fuori del range considerato accettabile per la corretta conservazione dei mosaici in ambienti ipogei (con un indice di rischio di oltre il 50%). I valori di temperatura, che risultano abbastanza costanti nell'arco delle diverse stagioni, si sono mantenuti all'interno del range ritenuto accettabile, scostandosi da esso solo in pochi casi. Ai fini conservativi, molto importanti risultano anche i gradienti temporali dei parametri ambientali interni (temperatura ed umidità relativa), che nel periodo di monitoraggio sono stati caratterizzati da sbalzi repentini e di notevole entità per quello che riguarda l'umidità relativa, mentre la temperatura, anche a fronte di gradienti giornalieri esterni di oltre 15°C, si è attestata su variazioni giornaliere di meno di 1°C, anche in presenza di visitatori. Per quanto riguarda l'umidità relativa, i valori più alti sono stati rilevati nei mesi estivi (luglio e agosto – 85%), specialmente nella zona corrispondente all'originale ingresso (posizione A), anche se a questi sono corrisposti gradienti giornalieri dell'ordine del 5%. Nei mesi successivi i valori di umidità, seppure elevati, tendono a diminuire, raggiungendo i valori più bassi nei mesi invernali (dicembre - 35%), anche se accompagnati da gradienti giornalieri anche del 15-20%. Confrontando i dati rilevati nelle diverse postazioni, si vede come la zona dell'originario ingresso della chiesa, dove sono conservati i mosaici più preziosi, sia quella più critica (A), essendo caratterizzata da valori di

umidità relativa superiori a quelli delle altre due postazioni di oltre il 10%, soprattutto nei mesi estivi, differenza che si riduce a meno del 5% nei mesi invernali. Nel periodo estivo, infine, caratterizzato da valori esterni compresi tra il 20 e il 75%, con escursioni giornaliere anche del 30%, l'umidità relativa esterna si è mantenuta al di sotto di quella all'interno degli ambienti ipogei, mentre nel periodo invernale i valori esterni, compresi tra il 35 e il 95%, sono stati in alcuni giorni superiori a quelli interni.

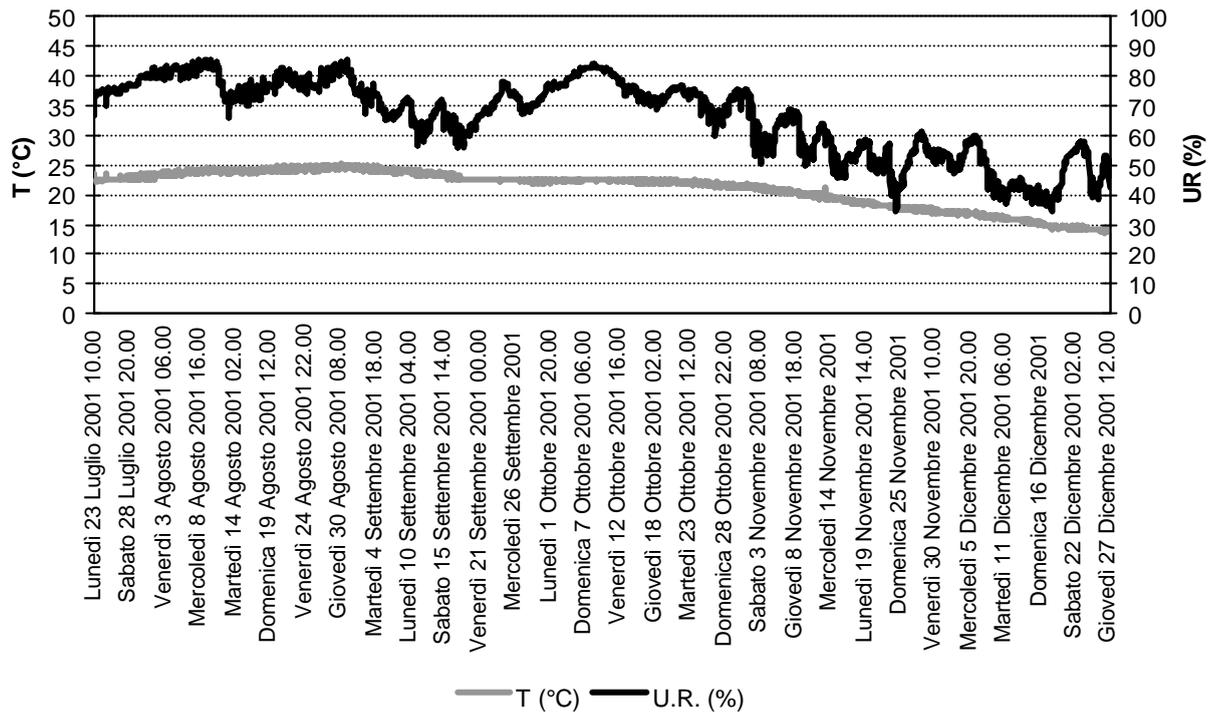


Figura 4 – Andamento di temperatura ed umidità relativa nella posizione A in Santa Reparata

Dall'analisi dei valori rilevati di umidità relativa, emerge come il forte afflusso di visitatori, unito a scarsi ricambi d'aria, possa essere all'origine di un conseguente innalzamento di tali valori, come è stato comprovato da analisi settimanali eseguite su periodi considerati rappresentativi all'interno del periodo mensile, messi in relazione con il numero di visitatori presenti.

Nell'ipogeo del Battistero, a fronte di valori abbastanza costanti di temperatura, si rilevano valori di umidità relativa molto elevati in tutto il periodo di monitoraggio, che nei mesi di ottobre e novembre si attestano su valori massimi estremamente vicini alle condizioni di saturazione, con evidenti problematiche per la conservazione dei mosaici del pavimento, anche a fronte di temperature superficiali vicine a quelle ambiente. Non essendo il sito aperto al pubblico, tali valori potrebbero essere dovuti sia alla falda freatica sottostante, sia, soprattutto, alla presenza di condutture fognarie nelle vicinanze, che versano in uno stato di conservazione molto precario.

Dai rilievi di illuminazione condotti in Santa Reparata, ove è presente un impianto con lampade ad incandescenza da 60W montate su apparecchi inseriti nel controsoffitto e privi di sistemi di

schermatura, emerge come il livello di illuminamento globale sia basso e discontinuo anche per la presenza di pilastri ed emergenze di altezza diversa. Infatti nella maggior parte dell’ambiente ipogeo si sono rilevati valori minori a 60 lux, che possono in alcuni casi arrivare fino ad 80 lux. Solo in corrispondenza di vetrine espositive sono stati misurati valori superiori a 100 lux. La disomogeneità di illuminamento e la tipologia di lampade usate, oltre a non garantire una ottimale fruizione del bene esposto, possono anche essere nocive alla conservazione dello stesso, determinando variazioni termiche disomogenee nei mosaici.

Le misure di anidride carbonica effettuate in Santa Reparata nel mese di luglio 2001 hanno evidenziato un valore medio di oltre 900 ppm con valori massimi intorno ai 1500 ppm corrispondenti agli orari di apertura al pubblico come emerge dal grafico in figura 5. Tali elevate concentrazioni, in ambienti con caratteristiche particolari, quali gli ambienti ipogei, possono, in presenza di acqua oppure di condensa, provocare fenomeni di degrado di materiali lapidei e manufatti contenenti carbonato di calcio (mosaici in pietra calcarea) per solubilizzazione del carbonato stesso.

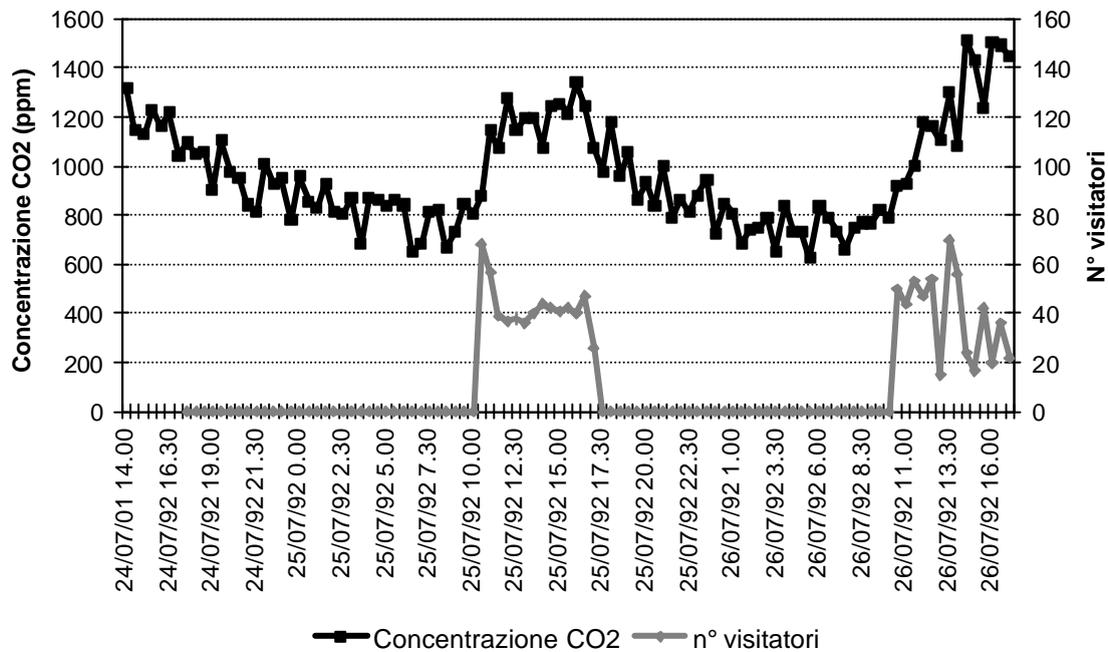


Figura 5 – Andamento della concentrazione di CO<sub>2</sub> e numero di visitatori in Santa Reparata

Per quanto attiene la qualità dell’aria dovuta alla concentrazione di Radon, si rileva che Santa Reparata, con valori medi sul breve periodo pari a circa 420 Bq/m<sup>3</sup>, si collochi al di sopra del valore consigliato per gli edifici esistenti dalla raccomandazione CEE n. 143/90 (pari a 400 Bq/m<sup>3</sup>) ma comunque al di sotto del valore di soglia individuato dal DL 241 del 26/5/2000 (pari a 500 Bq/m<sup>3</sup>).

Infine, dalle indagini condotte sulle polveri e sui mosaici, in collaborazione con il CNR, è emersa una notevole presenza di nitrati e di gesso, quest’ultimo evidenziato anche dall’analisi sui mosaici effettuata con spettroscopia micro-Raman. La presenza di queste sostanze, dovute sia alla

trasformazione dei materiali calcarei a contatto con acqua che alla deposizione di sali trasportati dalla risalita capillare dell’acqua dal terreno sulla superficie del mosaico, ha prodotto, fra gli altri effetti, anche la comparsa di macchie e patine superficiali, oltre che a gravi effetti di corrosione degli stessi.

Tabella I – Quadro riassuntivo dei dati rilevati (temperatura ed umidità relativa)

<b>Santa Reparata</b>						
	t <sub>MIN</sub> (°C)	t <sub>MAX</sub> (°C)	Escursione max. mensile (°C)	UR <sub>MIN</sub> (%)	UR <sub>MAX</sub> (%)	Escursione max. mensile (%)
<b>Posizione A</b>						
(23/7/2001-31/8/2001)	22,1	25,1	3	65,6	85,4	19,8
(1/9/2001-30/9/2001)	21,8	24,7	2,9	55,6	81,5	25,9
(1/10/2001-31/10/2001)	21,1	22,7	1,6	59,5	83,7	24,2
(1/11/2001-31/11/2001)	16,8	21,8	5	34,6	75	40,4
(1/12/2001-27/12/2001)	13,4	17,1	3,7	34,2	60	25,8
<b>Posizione B</b>						
(23/7/2001-31/8/2001)	21,8	25,8	4	49,7	90,6	40,9
(1/9/2001-30/9/2001)	22,4	25,8	3,4	42,3	71,2	28,9
(1/10/2001-31/10/2001)	22,4	23,4	2	52,9	77,5	24,6
(1/11/2001-31/11/2001)	17,1	22,1	5	33	66,6	33,6
(1/12/2001-27/12/2001)	13,4	17,7	4,3	33	56,8	23,8
<b>Posizione C</b>						
(23/7/2001-31/8/2001)	21,8	26,9	5,1	54,2	78,1	23,9
(1/9/2001-30/9/2001)	22,4	25,4	3	48	69,7	21
(1/10/2001-31/10/2001)	21,8	23,7	1,9	58,6	78,1	19,5
(1/11/2001-31/11/2001)	17,7	21,1	4,4	35,3	67,8	32,5
(1/12/2001-27/12/2001)	14	18	4	27,1	60,1	33
<b>Battistero</b>						
<b>Posizione D</b>						
(3/8/2001-31/8/2001)	23,1	25,1	2	84,6	97,2	12,6
(1/9/2001-30/9/2001)	20,5	24,7	4,2	66,9	97,2	30,3
(1/10/2001-31/10/2001)	19,5	21,8	2,3	88	100	12
(1/11/2001-30/11/2001)	14,8	20,2	5,4	43	97,8	54,8
(1/12/2001-31/12/2001)	10,4	15,4	5	41,6	73,7	32,1
(1/1/2002-23/1/2002)	8,5	10,9	2,4	45,3	76,9	31,6

## 6. CONCLUSIONI

Obiettivo dell’indagine è stato quello di elaborare un approccio multidisciplinare al problema della conservazione preventiva in ambienti ipogei.

Difatti, elaborare proposte di intervento per la conservazione di tali ambienti risulta quanto mai difficoltoso: valutare lo stato di degrado ed acquisire informazioni utili ad un piano di risanamento significa tener conto di moltissime variabili che, combinate diversamente tra loro, producono situazioni che sembrano moltiplicarsi all’infinito.

I dati rilevati nel corso di circa sei mesi di monitoraggi, in mancanza di una figura di curatore degli ambienti espositivi, sono stati confrontati con quelli riportati nella normativa tecnica (UNI

10829) e nella legislazione vigente.

Dall'analisi dei risultati è emerso come gli ambienti ipogei analizzati non godano di una accettabile qualità ambientale: i valori di umidità relativa risultano estremamente elevati sia in Santa Reparata che nella struttura fondale del Battistero costituendo un grave fattore di rischio per la conservazione dei preziosi manufatti e dei mosaici conservati.

Proprio dall'analisi condotta sui mosaici è difatti emerso che il pessimo stato di conservazione degli stessi sia dovuto, oltre che al deterioramento provocato dall'umidità di risalita, anche da intollerabili livelli di umidità relativa e di disuniformità di illuminamento che provocano forti tensioni in seno al materiale, nonché da elevati concentrazioni di anidride carbonica, dovuta alla massiccia presenza di visitatori, che in presenza di elevata umidità relativa, possono provocare fenomeni di degrado di materiali lapidei e manufatti contenenti carbonato di calcio per solubilizzazione del carbonato stesso.

Le problematiche suddette, devono anche essere incrociate con il problema relativo al comfort degli utenti e soprattutto del personale che a vario titolo è presente in Santa Reparata (biglietteria, sorveglianza, etc.).

In conclusione, si può affermare che le condizioni di comfort globale dei due ambienti (termoigrometrico, illuminotecnica e di qualità dell'aria indoor) siano risultate molto lontane dai limiti considerati accettabili, pertanto risulta oltremodo urgente, sia per una corretta politica di conservazione che per garantire condizioni di benessere accettabili, porre in atto una strategia di controllo dei parametri ambientali analizzati. Tale strategia dovrebbe essere finalizzata in primo luogo al controllo dell'umidità relativa, dell'anidride carbonica ed in parte anche del radon, grazie alla progettazione di un adeguato sistema di ventilazione degli ambienti che garantisca un adeguato ricambio d'aria, funzione del volume dell'ambiente e del carico di affollamento (UNI 10339/95), ma comunque di entità tale da richiedere la messa in opera di un sistema aeraulico dotato di opportuni sistemi di filtrazione a media ed alta efficienza e che garantisca una velocità dell'aria interna comunque compresa fra 0,05 e 0,20 m/s. La progettazione di un tale sistema, che esula dagli obiettivi del presente lavoro, pone in atto una sfida estremamente interessante ed al tempo stesso oltremodo complessa, data la difficoltà di porre in atto interventi consistenti in edifici di notevole pregio architettonico, quali sono il Duomo o il Battistero.

Parallelamente, in un'ottica di conservazione preventiva degli oggetti contenuti, sarà oltremodo opportuno porre in atto sistemi di controllo dell'afflusso dei visitatori, di cui andrà definito il numero di presenze compatibile con la conservazione dell'ambiente, nonché sperimentare sistemi di illuminazione che non favoriscano il processo della fotosintesi, e rimuovere tutte quelle parti che siano risultate nocive per una corretta conservazione, dovute a precedenti restauri (solette di cemento, cordoli di piombo, linoleum, etc.).

## **Bibliografia**

- [1] Agarossi, G., *“Biodeterioramento in ambienti ipogei: esperienze e considerazioni”*, in *“Studi e ricerche sulla conservazione delle opere d'arte dedicati alla memoria di Marcello Paribeni”*, a cura di F. Guidobaldi, Roma, 1994
- [2] Bettini, C., Agarossi, G., Ferrari, R., Monti, M., *“Fenomeni di biodeterioramento in*

- ambienti ipogei dipinti: esperienze sul controllo di alcune specie microbiche*”, in “Seconda conferenza internazionale sulle prove non distruttive”, ICR-AIPnD, Perugia, 1988
- [3] Lefevre, M., “*La maladie verte de Lascaux*”, in “Studies in conservation”, 19, 1974
- [4] Agarossi, G., Ferrari, R., Monte, M., “*I biocidi nel controllo degli agenti di biodeterioramento*”, in Atti I simposio internazionale sulla conservazione dei monumenti del bacino del Mediterraneo, Bari, 1989
- [5] Arai, H., “*On microorganism in the tomb of Nefertari*”, European Cultural Heritage, vol. 1, n.1, 1988
- [6] Agarossi, G., Ferrari, R., Monte, M., Scavizzi, S., Serra, M., Tomaselli, L., “*Determinazione dell’ecosistema microbico negli ambienti ipogei: Basilica di San Clemente*”, in “Studi e ricerche sulla conservazione delle opere d’arte dedicati alla memoria di Marcello Paribeni”, a cura di F. Guidobaldi, Roma, 1994
- [7] Accardo, G., Cacace, C., Rinaldi, R., “*Ipotesi fisiche per la conservazione di ambienti ipogei*”, in “Manutenzione e conservazione del costruito fra tradizione e innovazione. Atti del convegno di studi”, Bressanone, 1986
- [8] Piazza, A., “*Il monitoraggio ambientale finalizzato alla conservazione dei siti archeologici ipogei*”, Tesi di Laurea, Università degli studi di Firenze, Facoltà di Architettura, Relatore: prof. Luigi Marino, Correlatori interni: arch. Fabio Scurpi, prof. Giorgio Raffellini, AA. 2001-2002
- [9] Isetti C., “*Problematiche termoigrometriche relative alla conservazione di beni di interesse culturale*”, Giornata seminariale su “Microclima, qualità dell’aria ed impianti negli ambienti museali”, AICARR, Firenze, 1997
- [10] Filippi M., “*L’ambiente per la conservazione delle opere d’arte*”, CDA, n°6, giugno 1996
- [11] Norma UNI 10829, “*Beni di interesse storico e artistico. Condizioni ambientali di conservazione. Misurazione ed analisi*”, 1999
- [12] Bonnici A. et al., “*Visitor Impact on an Underground Prehistoric Monument-The Hal Saffieni Hypogeum, Malta*”, Preprint of the 10th Triennial meeting of ICOM, vol. I, Washington DC, USA, August 1993