



ARTE E RESTAURO

@anteprima

Premio Giovanni Urbani

Istituto  
Mnemosyne  
ISTITUTO PER LA SALVAGUARDIA  
DEL PATRIMONIO STORICO

# DEGRADO DEI MATERIALI LAPIDEI

## INIBITORI ORGANICI ECO-COMPATIBILI DELLA CRISTALLIZZAZIONE SALINA

### Nanotecnologie per il restauro



NARDINI EDITORE

Francesca Cardinali



# TESI DEL PREMIO GIOVANNI URBANI

## CULTURA E SCIENZA

### DELLA DURABILITÀ DEI MATERIALI DI STORIA E D'ARTE

Fin dal 1973, Giovanni Urbani ha esplicitato l'urgente *necessità di provvedere in maniera concreta alla conservazione d'un patrimonio d'arte che, almeno in Italia, è coesteso all'ambiente come sua peculiare componente qualitativa*<sup>1</sup>.

Il suo richiamo alla concretezza era invito a prendere atto che *la tecnica del restauro e le sussidiarie indagini di laboratorio hanno avuto assegnato un raggio d'azione che oggi risulta troppo ristretto rispetto ai problemi posti dal progressivo deterioramento dell'ambiente*.

L'Istituto Mnemosyne è parte di quella varia realtà che per la *concreta conservazione* del nostro *patrimonio d'arte* reputa sempre più necessario guardare, prima che al *ristretto raggio d'azione* della *tecnica del restauro*, alla complessità delle situazioni ambientali-antropiche-strutturali *d'un patrimonio d'arte che* (annotazione mai sufficientemente ribadita, anche perché insufficientemente accolta), *almeno in Italia, è coesteso all'ambiente come sua peculiare componente qualitativa*. La “qualità” dell'arte italiana, quindi, sta anche nella sua diffusione in tutti i territori della penisola. Territori che, proprio per essere qualificati dalle più svariate testimonianze di storia e d'arte, sono, ovunque, “**territori storici**”, comprensivi di numerosissimi **centri storici**.

È in coerenza con queste considerazioni che l'Istituto Mnemosyne (grazie soprattutto alla liberalità della Fondazione ASM di Brescia) ha promosso il Bando intitolato a Giovanni Urbani; ritenendo opportuno premiare, nel suo nome, le Tesi di Laurea che esplicitino ricerche programmate e condotte con processi (scientifici e storici) funzionali a incrementare le condizioni e i fattori più congrui a favorire la durabilità dei materiali di storia e d'arte nei contesti ambientali e antropici delle rispettive collocazioni. Processi di ricerca proprio come proposto da Giovanni Urbani funzionali a promuovere le condizioni ambientali e antropiche che rendano sempre meno necessari gli interventi diretti sulle opere umane ivi presenti.

Avendo registrato il successo di partecipazione ai Bandi del Premio “Giovanni Urbani”, l'Istituto Mnemosyne ha trovato la condivisione dell'Editore Nardini per divulgare, nel modo più economico possibile, i contenuti delle Tesi premiate e segnalate dal Comitato Scientifico di Mnemosyne, che opera anche da “Comitato di valutazione” delle Tesi che pervengono al Premio “Giovanni Urbani”.

Le Tesi, riproposte nelle ordinarie forme di ogni Tesi, sono divulgate per tre prevalenti obiettivi:

1. far conoscere le qualità di giovani ricercatori aperti alle urgenze della concreta salvaguardia del patrimonio storico dall'instabilità microclimatica che aggrava i danni indotti dalle inadeguate condizioni ambientali e antropiche;
2. evidenziare l'innovante lavoro delle Facoltà Universitarie (e degli Istituti specialistici) per maturare fondate indicazioni per la duratura conservazione del patrimonio d'arte riducendo al minimo le urgenze dei sempre più frequenti “ri-restauri” (la cui ripetizione attesta la loro insufficiente efficacia conservativa);
3. favorire la maturazione di una cultura che, per la fattiva salvaguardia del patrimonio storico, renda sempre più ordinario scegliere processi e materiali adeguati a conseguire la concreta conservazione del patrimonio di storia e d'arte con strategie che consentano di sviluppare *un raggio d'azione che non continui ad essere troppo ristretto rispetto ai problemi posti dal progressivo deterioramento dell'ambiente*.

L'Istituto Mnemosyne, anche per vedere validate sul campo le proposte di Giovanni Urbani, sarà onorato di ricevere qualificate esperienze di “conservazione programmata” che documentino processi di prevenzione delle cause di degrado e di promozione dei fattori della durabilità.

GIOVANNI URBANI (a cura di), *Problemi di conservazione*, Bologna, Compositori, 1973. Questo testo, ormai esaurito, raccoglieva gli Atti della “Commissione per lo Sviluppo e la Tecnologia della Conservazione dei beni culturali” istituita nel 1971 dal Ministero per il Coordinamento della Ricerca Scientifica. Commissione nella quale Giovanni Urbani ha svolto il ruolo di Segretario. L'*Introduzione*, dalla quale è tratta la citazione (la sottolineatura in neretto è redazionale), ora è leggibile anche alle pagg. 25-29 di: GIOVANNI URBANI, *Intorno al restauro*, Milano, Skira, 2000, a cura di Bruno Zanardi e con Postfazione di Pietro Petrarola.

ISBN 9788840404097

Stampa digitale  
2013 - Nardini Editore

© 2013 Nardini Editore  
[www.nardinieditore.it](http://www.nardinieditore.it)

Questa pubblicazione è protetta dalle leggi sul copyright e pertanto ne è vietato qualsiasi uso improprio.

#### Referenze fotografiche

Tutte le immagini contenute nel testo sono di proprietà dell'autore eccetto quelle enumerate di seguito:

Pagina 24, fig. 5, immagine tratta da Nicholas Tsui, Robert J. Flatt, George W. Scherer. Crystallization damage by sodium sulfate. *Journal of Cultural Heritage*, April 2003; Volume 4 (Issue 2): 109-115. Copyright©2003 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Pagina 67, fig. 1, immagine cortesemente concessa dalla prof.ssa Barbara F. McManus (the VRoma Project, [www.vroma.org](http://www.vroma.org)), adattata da un disegno di A. Gnauth pubblicato in Hermann Bender, *Rom und Römisches Leben im Altertum*, 2nd ed. 1893, p. 50.

Pagina 71, fig. 2, immagine cortesemente concessa da The-saurus srl - [www.thesaurus.sm](http://www.thesaurus.sm) (Auction "Gemini" November 10, 2012).

Pagine 73-74, figg. 3-4, immagini tratte da Antonio Maria Colini, 1942. *Aedes Veiovis Inter Arcem et Capitolium*. «*Bullettino della Commissione Archeologica del Governatorato di Roma*», Roma, 70, pp. 5-56, opera appartenente alla Biblioteca di Archeologia e Storia dell'Arte, Roma.

Pagina 75, fig. 5, immagine tratta da [http://www.museicapitolini.org/sede/campidoglio\\_antico](http://www.museicapitolini.org/sede/campidoglio_antico), Roma Archivio Storico, Sovrintendenza Capitolina.

Pagina 76, fig. 9b, immagine tratta da Gruppo De Sanctis Costruzioni S.p.A., Impresa Edile Donati S.p.A. *Tabularium e Tempio di Veiove. Intervento di restauro conservativo dei paramenti murari. Giugno 1997 - Aprile 2000. Relazione Tecnica.*

*In copertina:* Cristalli di solfato di sodio individuati all'interno di un provino di tufo non trattato (132X), foto dell'autore.

*@nteprima è una collana di dialogo, interscambio delle competenze, risultati, ricerche, esperienze disciplinari e professionali, dei saperi.*

*La consistenza materica digitale/pdf permette alle sue pubblicazioni di muoversi rapidamente lungo la rete e lungo il circuito delle idee, della cultura in divenire. E, grazie alle funzionalità del digitale, rapidamente anche nell'interfaccia con il lettore.*

*Direttamente e rapidamente dall'autore al lettore interessato all'argomento: editoria nella sua funzione fondamentale di portare contenuti dal privato al pubblico; diffondere la cultura contribuendo con ciò al suo sviluppo. Le caratteristiche di edizione di ciascuna pubblicazione di @anteprima sono curate dall'estensore stesso – l'autore – del testo. L'opera non viene strutturata e definita nella sua forma comunicativa dalla redazione editoriale. Anteprema, ci auguriamo, della cultura che domani sarà in atto – non più solo @nteprima –, grazie a voi insieme autori e lettori.*

**Francesca Cardinali**

# **DEGRADO DEI MATERIALI LAPIDEI**

**INIBITORI ORGANICI ECO-COMPATIBILI  
DELLA CRISTALLIZZAZIONE SALINA**

**Nanotecnologie per il restauro**

**NARDINI EDITORE**

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PERUGIA**

**FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE  
FISICHE E NATURALI**

**Corso di Laurea Specialistica in  
“Scienze e Tecnologie per la Conservazione  
e il Restauro del Patrimonio Storico-Artistico”**

*Anno Accademico 2009-2010*



**UNA STRATEGIA INNOVATIVA ED ECO-COMPATIBILE PER IL  
CONTROLLO DEL DEGRADO DEI MATERIALI LAPIDEI  
DOVUTO ALL'UMIDITA' DI RISALITA CAPILLARE:  
GLI INIBITORI DI CRISTALLIZZAZIONE SALINA.**

Laureanda

**Francesca Cardinali**

Relatori

**Prof.ssa Assunta Marrocchi**

**Prof.ssa Maria Laura Santarelli**

## **RINGRAZIAMENTI**

*Desidero innanzitutto ringraziare le mie relatrici, la prof.ssa Assunta Marrocchi e la prof.ssa Maria Laura Santarelli, per il sostegno, l'aiuto, la disponibilità e la cura che mi hanno fornito durante tutto il periodo di preparazione della tesi e per le numerose opportunità con cui mi hanno permesso di entrare in contatto. Entrambe, oltre ad avere un'alta professionalità e ottime competenze, sono state anche un importante supporto morale e psicologico, cosa più unica che rara.*

*Inoltre, ringrazio sentitamente il prof. Sergio Clementi e il prof. Maurizio Gualtieri per avermi supportato nella redazione e nella revisione di due importanti sezioni del lavoro, rispettivamente lo studio chemiometrico e l'analisi storica del Campidoglio e della religione romana. Intendo, poi, ringraziare il prof. Giorgio Torraca e la Direzione dei Musei Capitolini di Roma, sottolineando la particolare disponibilità della dott.ssa Margherita Albertoni, per avermi fornito la bibliografia necessaria per la realizzazione delle ricerche storiche sul Tempio di Veiove a Roma e soprattutto per avermi dato la possibilità di accedere a questo sito archeologico di notevole importanza, dichiarato Patrimonio dell'Unesco. Desidero citare anche due imprese edili, la De Sanctis Group e la Donati S.p.A., per avermi gentilmente spedito tutto il materiale inerente ai restauri del Tempio effettuati fra il 1997 e il 2000.*

*Vorrei esprimere la mia sincera gratitudine anche alla dott.ssa Eleonora Ballerini, per i numerosi consigli e suggerimenti che mi ha fornito durante tutto l'anno in cui ho svolto l'attività di ricerca.*

*Ringraziamento speciale va infine ad Alessandro, omaggio doveroso perché lui è e sarà per sempre tutta la mia vita.*

*Perugia, 2010*

## INDICE interattivo

---

Premessa.....	9
---------------	---

### Capitolo 1 - Il degrado del materiale lapideo

<i>1.1 Generalità.....</i>	12
<i>1.2 Le proprietà del materiale lapideo.....</i>	13
<i>1.3 Il degrado.....</i>	15
<i>1.3.1 L'acqua.....</i>	16
<i>1.3.2 La risalita capillare.....</i>	19
<i>1.4 La cristallizzazione salina.....</i>	21
<i>1.5 Metodologie di intervento.....</i>	25
<i>Bibliografia.....</i>	28

### Capitolo 2 - Gli inibitori organici della cristallizzazione salina

<i>2.1 Introduzione.....</i>	29
<i>2.2 Principio di azione.....</i>	30
<i>2.3 Stato dell'arte.....</i>	32
<i>2.4 Materiali e metodi.....</i>	34
<i>2.5 Risultati e discussione.....</i>	35
<i>2.6 Conclusioni.....</i>	44
<i>Bibliografia.....</i>	46

### Capitolo 3 - Analisi chemiometrica

<i>3.1 Introduzione.....</i>	48
<i>3.2 La PCA (Principal Component Analysis).....</i>	49
<i>3.3 La chemiometria e i Beni Culturali.....</i>	53

<i>3.4 Trattamento dei dati sperimentali.....</i>	54
<i>3.5 Risultati e discussione.....</i>	56
<i>3.6 Conclusioni.....</i>	61

## Capitolo 4 - Caso-studio: il Tempio di Veiove a Roma

<i>4.1 Il Campidoglio.....</i>	63
<i>4.2 Cenni sulla religione romana.....</i>	69
<i>4.3 Il culto del dio Veiove.....</i>	70
<i>4.3.1 Il Tempio sul Campidoglio.....</i>	72
<i>4.3.2 La riscoperta e lo stato attuale.....</i>	74
<i>4.4 Applicazione in situ del sistema inibitore selezionato.....</i>	79
<i>Bibliografia.....</i>	85

## **PREMESSA**

*L'idea di dedicarmi a questo argomento nasce dal desiderio personale, maturato in questi anni di studio, di voler concludere il mio percorso universitario sottolineando l'importanza della prevenzione nel campo della conservazione dei Beni Culturali.*

*Nel precedente lavoro di tesi di laurea triennale, ho cercato di mettere in evidenza quali debbano essere le principali ed essenziali operazioni da realizzare per poter compiere un adeguato e corretto intervento di restauro, ossia la ricerca storica, quella scientifica e, infine, l'attività tecnico-pratica. Tuttavia, il restauro, seppur a volte atto indispensabile, prevede l'intervento diretto sull'opera e quindi può essere compromessa la sua autenticità, sia a livello materiale che estetico. Inoltre, non assicura una protezione prolungata nel tempo e, aspetto non secondario, i costi risultano spesso insostenibili.*

*Notevoli sono state le innovazioni in questo campo ma, riprendendo le parole del restauratore e critico prof. Bruno Zanardi: «Spesso, quando si parla di restauro, si identifica questa pratica alla semplice pulizia dell'oggetto. In realtà, quello del restauro, è un problema tecnico scientifico, estremamente complesso che in Italia non è stato mai affrontato adeguatamente, nonostante qui da noi vi siano i migliori restauratori di tutto il mondo. Restaurare un'opera d'arte, significa non intervenire, con ritocchi o integrazioni, sul suo aspetto creativo, quanto adottare tecniche e procedimenti tali da garantire che, in seguito, le operazioni di restauro possano essere rimosse senza danneggiare l'opera stessa. Si tratta di un'operazione rivolta alla conservazione dell'oggetto. (...)»<sup>1</sup>. C'è sempre di più la necessità, quindi, di studiare ed elaborare metodologie scientifiche semplici ma efficaci, al fine di prevenire i danni e di rallentare il naturale processo di degrado della materia.*

*Il lavoro di tesi qui presentato si inserisce in questo contesto e affronta lo studio di inibitori organici della cristallizzazione salina, uno dei fenomeni di degrado più diffusi e deterioranti a cui è soggetto il materiale lapideo.*

*Si tratta di un progetto portato avanti già da tempo dal gruppo di ricerca della prof.ssa Assunta Marrocchi (Dipartimento di Chimica dell'Università degli Studi di Perugia) e della prof.ssa Maria Laura Santarelli (Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali e Ambiente della Facoltà di Ingegneria dell'Università "Sapienza" di Roma e membro del CISTeC, Centro di Ricerca in Scienza e Tecnica per la Conservazione del Patrimonio*

---

<sup>1</sup> Tratto da <<http://www.emsf.rai.it/grillo/trasmissioni.asp?d=917>>.

*Storico-Architettonico) e proprio presso il laboratorio di Perugia, ho svolto un'attività di ricerca che mi ha permesso di partecipare agli sviluppi più recenti di questo studio, tuttora in corso.*

*Il lavoro che presento si articola in quattro parti. Viene fatta innanzitutto una descrizione generale dei materiali lapidei e delle varie tipologie di degrado a cui essi sono soggetti, con particolare enfasi sulle problematiche relative alla presenza di sali solubili. Nella seconda parte si riportano i principi dell'inibizione di cristallizzazione salina, lo stato dell'arte e si affronta lo studio dell'efficacia di due nuovi potenziali inibitori organici della cristallizzazione su un materiale lapideo opportunamente selezionato, il tufo. In particolare è stato preso in considerazione uno dei sali più dannosi per i materiali lapidei, il solfato di sodio. Nella terza parte si propone un approccio chemiometrico dei dati sperimentali ottenuti non solo nel corso di tesi, ma nel corso dell'intero progetto di ricerca, per cercare di razionalizzare l'applicazione di questo metodo ai diversi casi di degrado indotto dai sali. Nella quarta parte si espongono, invece, i dati sperimentali ottenuti relativi a un'applicazione in situ al Tempio di Veiove, un tempio recentemente scoperto, situato a Roma all'interno dei Musei Capitolini. La discussione sarà preceduta dall'inquadramento storico dell'area del Tempio e dalla descrizione dei vari interventi conservativi effettuati.*

*“Take proper care of your monuments, and you will not need to restore them”*

John Ruskin, *The seven lamps of architecture*.  
1865, New York. Wiley & Sons.

# CAPITOLO 1

## IL DEGRADO DEL MATERIALE LAPIDEO

### *1.1 Generalità*

Fin dall'antichità, dapprima in modo passivo utilizzando le grotte e le cavità naturali, poi in modo sempre più attivo, l'uomo ha sfruttato le risorse naturali, in particolare gli affioramenti rocciosi, per soddisfare le proprie esigenze abitative e di difesa.

La pietra è stata considerata da subito, quindi, il materiale da costruzione per eccellenza, poiché presenta una maggiore durabilità e resistenza rispetto, ad esempio, al legno o a qualsiasi altro tipo di materiale vegetale. Ha trovato, poi, sempre più ampio spazio nel campo architettonico e artistico, grazie alle caratteristiche estetiche di alcuni litotipi e all'abilità dei maestri scultori, ma anche allo sviluppo di certe tecniche pittoriche, come quella dell'affresco.

Per definizione essa è un aggregato naturale di minerali in proporzioni variabili, non caratterizzabile attraverso una formula chimica definita, ma solamente attraverso l'analisi del suo processo di formazione, che ne influenza le proprietà mineralogiche, petrografiche e meccaniche. Si possono individuare, pertanto, tre macro categorie: le magmatiche, le sedimentarie e le metamorfiche [1]. Le magmatiche intrusive, che derivano dal raffreddamento dei magmi all'interno della crosta terrestre, presentano generalmente una grana fine e una tessitura molto compatta e cristallina; le effusive, che hanno origine dal raffreddamento della lava in superficie, invece sono caratterizzate da matrici prevalentemente vetrose e amorfe, a volte con un elevato grado di porosità se la percentuale di composti volatili nel sistema era elevato; le sedimentarie sembrano simili alle prime, ma tendono a essere meno compatte per la presenza dei minerali argillosi e possono presentare stratificazioni e piccoli fossili; infine, le metamorfiche si presentano massicce o con una tessitura scistosa. All'interno di ciascuna classe, però, i caratteri composizionali e strutturali possono variare notevolmente, perciò anche se la maggior parte delle pietre può essere utilizzata in campo edilizio, artistico e architettonico, non tutte possono essere impiegate allo stesso modo: ad esempio, le sedimentarie a causa della

loro componente argillosa e della loro elevata sfaldabilità, sono poco coerenti e hanno una maggiore applicabilità come inerti e leganti; quelle vetrose, come l'ossidiana e la pomice, non possono essere impiegate nelle strutture portanti; e, infine, quelle scistose, come le filladi, mancano della compattezza necessaria per essere scolpite e modellate [1].

Vi sono poi i cosiddetti materiali lapidei artificiali, i quali derivano dalla lavorazione di quelli naturali. Ne sono un esempio le terrecotte, le ceramiche, le porcellane, i laterizi, i cementi e le malte. Anch'essi sono stati largamente impiegati fin dall'antichità, sia come materiali da costruzione che per la fabbricazione di manufatti, in base ai relativi caratteri principali [1].

Sottovalutare queste considerazioni può portare a una scorretta utilizzazione del materiale e a un'erronea valutazione delle relative proprietà, andando così a favorire il processo di degrado, soprattutto in seguito alla lavorazione e alla messa in opera.

## *1.2 Le proprietà del materiale lapideo*

I materiali lapidei si differenziano in base a numerose proprietà fisico-meccaniche, chimico-mineralogiche, termiche ed elettriche. Queste devono essere valutate sia in condizioni di riposo, così da caratterizzare la pietra in sé, che in condizioni di stress temporaneo e prolungato, così da verificare quali caratteri persistono nel tempo e come essa risponde alle sollecitazioni esterne. La loro determinazione permette, quindi, di specificare il comportamento di un materiale e i suoi possibili settori di applicazione.

Nel campo del restauro e della conservazione dei Beni Culturali, tuttavia, hanno una rilevanza maggiore quelle proprietà tecniche definibili analizzando il comportamento che un materiale lapideo può assumere nel momento in cui è soggetto a particolari operazioni, come l'estrazione, la lavorazione, la messa in opera, ecc. [2].

Le principali sono [2]:

- La lavorabilità: indica l'attitudine di una roccia a essere cavata e intagliata. È uno dei parametri principali perché individua la risposta di ciascun materiale ai trattamenti tecnici a cui viene sottoposto, dal momento dell'estrazione fino a quello della lavorazione e conseguente messa in opera. Essa dipende dalla durezza, o resistenza alla scalfinatura, che a sua volta dipende dalla composizione mineralogica e dalla tessitura; e dal grado di compattezza,  $c$ , il quale è dato dalla seguente relazione [3]:

$$c = \frac{P_S A}{P_S R}$$

in cui:

$P_S A$ : è il peso specifico apparente, calcolato considerando il volume totale ( $\text{kg/m}^3$ );

$P_S R$ : è il peso specifico reale, calcolato escludendo il volume dei pori ( $\text{kg/m}^3$ ).

Ne deriva che più il rapporto tende a 1, più la roccia sarà densa e compatta. Le pietre tenere (come le sedimentarie e quelle porose prive di quarzo e silicati), quindi, si lavorano più facilmente rispetto a quelle dure (come le magmatiche intrusive, le metamorfiche e quelle ricche di quarzo e silicati), poiché oppongono una minore resistenza [1].

Sono direttamente collegate a essa anche altre proprietà, quali: la possibilità di trattamento della superficie, che indica la tendenza di una roccia a ricevere una finitura, sia ai fini estetici che in funzione di una particolare destinazione d'uso, la quale è realizzabile solo su rocce compatte e tessituralmente omogenee [1]; la scolpibilità, che indica la tendenza a lasciarsi lavorare tramite tecniche e strumenti diversi e risulta strettamente legata alla grana, all'omogeneità mineralogica e tessiturale, alla compattezza e alla presenza di venature e di minerali facilmente alterabili (nei marmi a grana fine queste condizioni sono soddisfatte pienamente) [1]; e, infine, la spaccabilità o sfaldabilità, che indica la tendenza di una roccia a rompersi lungo specifici piani durante la lavorazione, soprattutto in seguito all'uso di strumenti a percussione, come i martelli e gli scalpelli;

- L'assorbimento: indica la tendenza di una roccia ad assorbire liquidi per risalita capillare e/o per contatto diretto. Il liquido più studiato è l'acqua poiché essa è presente in tutti i terreni e in tutte le murature. La porosità del materiale e le condizioni di evaporazione, cioè i valori di temperatura e umidità dell'ambiente in cui si trova, influenzano l'entità del fenomeno;
- L'igroscopicità: indica la tendenza di una roccia ad assimilare, invece, l'umidità atmosferica. Dipende soprattutto dal tipo di minerali presenti e dalla rifinitura che ha subito (la lucidatura, ad esempio, è un trattamento che limita il fenomeno);
- La permeabilità o penetrabilità all'acqua: indica la tendenza di una roccia a lasciarsi attraversare dall'acqua in condizioni di alta pressione.

Non esistono rocce perfettamente impermeabili, ma in quelle molto compatte (come i marmi e i graniti), con bassa porosità o con pori non intercomunicanti

(come le pomici) assume valori molto bassi. È un parametro da tenere in considerazione, ad esempio, per le basi delle fontane, poiché vi è una continua presenza di acqua;

- La permeabilità all'aria e ai gas: indica la tendenza di una roccia a lasciarsi attraversare dall'aria e dai gas. È un parametro utile soprattutto ai fini del benessere degli ambienti interni, poiché regola il fenomeno della ventilazione naturale. Anche in questo caso, le rocce molto compatte presentano bassi valori di permeabilità;
- La durezza: indica la tendenza di una pietra a resistere agli attacchi fisici, chimici e biologici indotti dai microrganismi, dagli agenti atmosferici, dagli inquinanti e dall'usura. È, quindi, anch'essa una delle proprietà più importanti, sia ai fini della progettazione che della conservazione.

### *1.3 Il degrado*

La pietra, come ogni altro tipo di materiale, è soggetta a un'alterazione naturale, la cui entità dipende soprattutto dalle condizioni ambientali in cui si trova e dalle loro relative variazioni, dai suoi caratteri intrinseci, dalla sua storia geologica<sup>2</sup> e dal tipo di lavorazione e di messa in opera che ha avuto.

Trattandosi del normale ciclo della materia, è inarrestabile e in alcuni casi imprevedibile, se si considerano fattori di degrado anche i disastri naturali. Non può essere eliminato, ma se si acquisisce una buona conoscenza del materiale e del contesto può essere ridotto e controllato.

Generalmente si individuano tre tipi di degrado [3]:

- Fisico: è indotto da processi fisico-meccanici, come la sollecitazione da carico, la dilatazione termica, la gelività, la cristallizzazione salina, l'erosione, ecc. Questi vanno a generare stress e sollecitazioni strutturali, la cui entità è strettamente dipendente dalla composizione mineralogica, dalla grana e dalla tessitura della pietra;
- Chimico: è indotto da processi chimici, come la carbonatazione, la solfatazione, l'ossidazione, l'idratazione, la dissoluzione, ecc., i quali danno luogo a modifiche

---

<sup>2</sup> Rocce che si presentano simili dal punto di vista della genesi e/o della composizione, possono avere caratteri strutturali e tessiturali diversi [3].

composizionali che portano alla formazione di materiali argillosi, soluzioni saline e minerali insolubili;

- **Biologico:** è indotto dalla presenza di microrganismi, insetti, animali e anche dell'uomo stesso.

I parametri ambientali che bisogna tenere maggiormente sotto controllo, pertanto, sono la temperatura, la presenza di acqua, l'illuminazione e la qualità dell'aria. La loro azione, sia singola che sinergica, può portare a conseguenze gravi e spesso irreversibili. Generalmente sono determinanti soprattutto le prime due grandezze, cioè i fattori termogrometrici, poiché se i loro valori e le loro variazioni non rientrano nelle condizioni definite "ottimali"<sup>3</sup>, tendono ad accelerare i suddetti processi di degrado e la proliferazione batterica.

Gli ultimi due parametri possono accrescere il potere deteriorante dei primi: le radiazioni energetiche (raggi UV) e le fonti di calore (raggi IR) possono indurre, rispettivamente, reazioni di fotossidazione sui materiali sensibili, come gli strati pittorici, e aumenti localizzati della temperatura, provocando così deformazioni e fratture; e, infine, la presenza di inquinanti<sup>4</sup> nell'aria può portare alla deposizione di sostanze corrosive e dannose. Tuttavia, essi sono più controllabili, soprattutto nel caso di ambienti confinati.

Nei paragrafi successivi si andrà a descrivere più in dettaglio uno dei principali fattori di degrado dei materiali lapidei indotto dalla presenza di acqua, la quale è responsabile di una delle forme di degrado chimico-fisico più diffuse, comuni e dannose del materiale lapideo, cioè la cristallizzazione salina.

### *1.3.1 L'acqua*

Nei materiali lapidei è già presente una certa quantità di acqua, definita di costituzione, che deriva dalla natura stessa della pietra e dall'eventuale trattamento che ha subito. Quella responsabile dei fenomeni di degrado soprattutto in seguito alla messa in opera, tuttavia, è un'altra, la cosiddetta acqua di imbibizione, la quale giunge soprattutto per assorbimento, adsorbimento e condensazione [4], in vari modi, come evidenziato in Figura 1.

---

<sup>3</sup> Sono stabilite per ciascun tipo di materiale dalla norma UNI CTI 10829, ma occorre anche tenere conto della storia climatica del singolo bene.

<sup>4</sup> Possono provenire dall'esterno (ossidi di zolfo, azoto, CO<sub>2</sub>, ecc.) e dall'interno (VOC, Volatile Organic Compounds, e particolato).

Essa può essere presente in tutti e tre i suoi stati di aggregazione ed è in grado di provocare danni sia agendo direttamente che indirettamente: causa la dissoluzione e l'idrolisi di alcuni minerali, può apportare acidi e sali, favorisce lo sviluppo di specie microbiche e vegetali, processi come l'idratazione, i cicli di gelo/disgelo o la cristallizzazione salina, possono indurre rigonfiamenti e fessurazioni [3]. Infine, penetrando in profondità può mettere a rischio la stabilità strutturale della muratura.

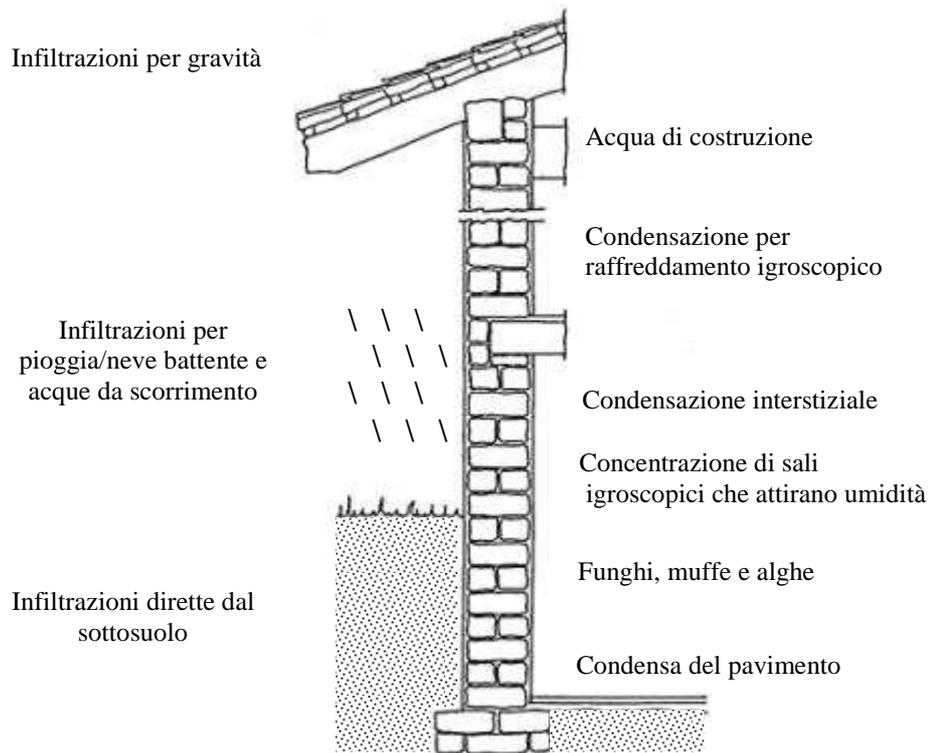


Figura 1- Principali fonti di acqua nelle murature

Quest'affinità con l'acqua è legata soprattutto alla composizione mineralogica: ad esempio, materiali come i mattoni, le pietre calcaree e le malte, sono composti generalmente da carbonati, silicati, alluminati e ossidi, per cui si assume per convenzione che la superficie sia carica negativamente. La superficie, perciò, interagisce con le molecole polari dell'acqua, formando legami idrogeno [5] (Figura 2).

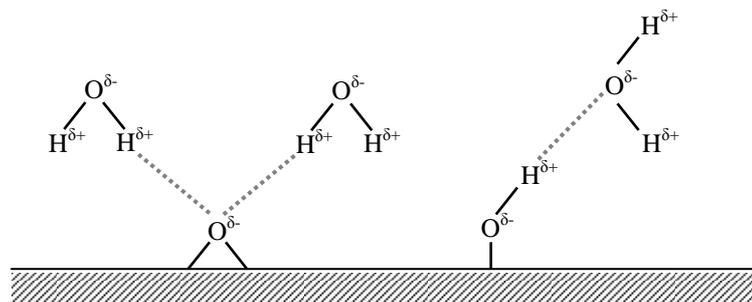


Figura 2 - Interazione superficie lapidea - acqua

La presenza di minerali argillosi e di sali solubili va ad aumentare l'igroscopicità della pietra e quindi la sua sensibilità all'umidità, poiché tendono a trattenere elevate quantità di acqua [2].

Svolge un ruolo importante anche la temperatura: quando quella superficiale o interna del materiale lapideo è al di sotto del punto di rugiada<sup>5</sup> dell'aria circostante, l'umidità tende a condensare [4]; viceversa, se ha valori alti è favorita l'evaporazione, la quale può verificarsi anche se l'umidità relativa dell'aria è bassa ed è presente una ventilazione elevata. La sua pericolosità è legata al fatto che favorisce la deposizione delle sostanze disciolte in acqua, come acidi e sali, sia in superficie che in profondità.

La mobilità dei fluidi assorbiti<sup>6</sup> è legata soprattutto alla tessitura interna della roccia, che generalmente è costituita da un certo numero e tipo di piccole cavità, pori, fessure e spazi intergranulari. La porosità, perciò, è un importante parametro di densità che influenza molte proprietà meccaniche e tecniche, come l'assorbimento, l'igroscopicità e la permeabilità [2].

Raramente le rocce conservano la loro porosità primaria, cioè quella derivante dal loro processo di genesi, poiché inevitabilmente sono sottoposte nel tempo a stress di natura chimica e meccanica che ne alterano la struttura e la tessitura. Nella maggior parte dei casi è più opportuno, quindi, parlare di porosità secondaria, in quanto sviluppatasi in un secondo tempo [3]. Essa, inoltre, deve essere valutata dopo la stagionatura della pietra, cioè dopo la perdita dell'acqua di cava [3].

La porosità totale,  $\eta$ , è espressa come il rapporto percentuale fra il volume dei pori (sia aperti che chiusi),  $V_p$ , e il volume totale del materiale considerato,  $V_{tot}$  [2]:

$$\eta(\%) = \frac{V_p}{V_{tot}} \times 100$$

Deve essere valutata anche la porosità accessibile o effettiva, la quale tiene conto solo dei pori aperti, cioè quelli comunicanti con l'esterno<sup>7</sup> [2].

Dalla determinazione della porosità totale si può ricavare il coefficiente di imbibizione, cioè il rapporto percentuale fra la massa a secco e la massa dopo l'immersione in acqua, il quale indica quanto un materiale assorbe prima di giungere a saturazione e quindi la sua compattezza [2].

---

<sup>5</sup> È la temperatura alla quale l'aria è satura di vapore acqueo.

<sup>6</sup> Può dipendere anche da altri fenomeni, come la diffusione, la convezione, la gravità, l'elettrocinesi e le differenze di temperatura [4].

<sup>7</sup> Esistono anche pori aperti non comunicanti e pori chiusi [4].

La valutazione di questo parametro, quindi, è fondamentale per controllare la resistenza meccanica effettiva del materiale, poiché le cavità possono diventare siti di concentrazione degli sforzi e per valutare le principali proprietà tecniche [2].

### 1.3.2 La risalita capillare

Oltre che la quantità e il volume totale dei pori presenti, si deve analizzare anche la loro distribuzione dimensionale. Se prevalgono quelli aventi dimensioni capillari o comunque molto piccole, sarà favorito il fenomeno della risalita capillare. L'acqua, così, nel momento in cui entra in contatto con il mezzo poroso, penetrerà al suo interno per capillarità. Questo fenomeno è regolato dalla legge di Jurin, secondo la quale l'innalzamento o l'abbassamento del livello di un fluido in un capillare rispetto al livello della fonte,  $h$  (cm), è dato da [7]:

$$h = \frac{2\gamma \cos\alpha}{r\rho g}$$

in cui:

$\gamma$ : è la tensione superficiale del fluido (per l'acqua è 72,75 dyne/cm a 20°C);

$\alpha$ : è l'angolo di contatto fra il fluido e la parete del capillare e indica la bagnabilità della superficie;

$r$ : è il raggio del capillare (cm);

$\rho$ : è la densità del fluido ( $\text{g/cm}^3$ );

$g$ : è l'accelerazione di gravità ( $981 \text{ cm/s}^2$ ).

Ne deriva che l'altezza di aspirazione capillare (Figura 3) sarà tanto maggiore quanto più piccolo sarà il raggio del capillare [4]. Ciò si verifica perché solo in questi casi la forza di suzione generata dalle cariche superficiali delle pareti del poro è tale da far risalire l'acqua [5]. Tuttavia, la velocità di penetrazione diminuisce con il diminuire del raggio, quindi si può dire che i canali capillari più larghi aspirano acqua più rapidamente, ma l'altezza raggiunta è minore (Figura 3) [4].

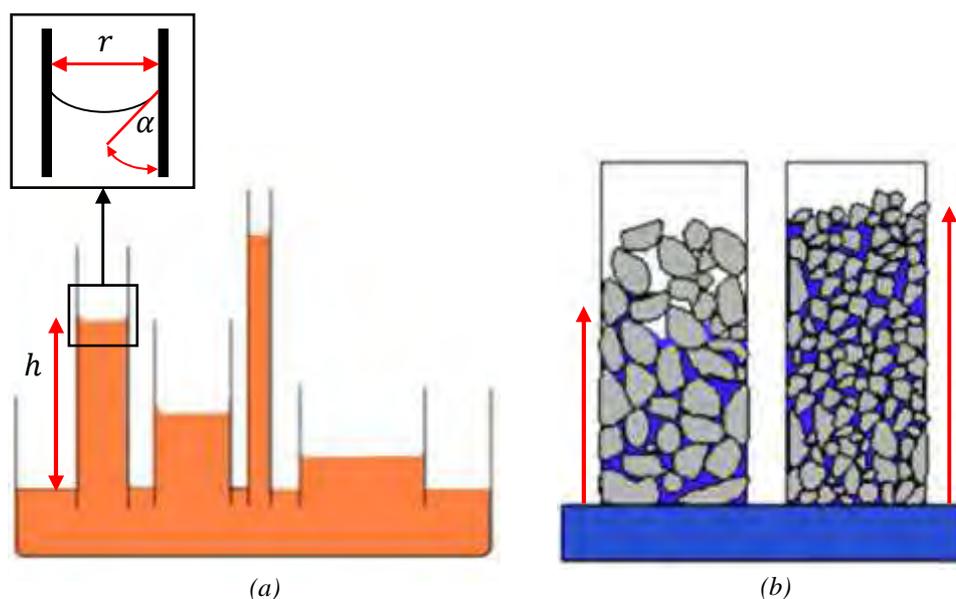


Figura 3 – Risalita capillare.  
 (a) In laboratorio; (b) In situ

Inoltre, svolge un ruolo importante anche la tensione superficiale del liquido, che a sua volta dipende dalle forze intermolecolari: nel caso dell'acqua, all'interno del capillare si formerà un menisco concavo (U), poiché le forze di coesione delle molecole del liquido sono superate da quelle di adesione fra le molecole di acqua, gli atomi di *O* e i gruppi -*OH* delle pareti del capillare [4]. Si avrà, quindi, un angolo di contatto  $\alpha$  fra fluido e parete minore di  $90^\circ$  (Figura 3a), condizione questa che favorisce la bagnabilità della superficie e la formazione dei legami di adesione che producono l'innalzamento [7].

La risalita capillare, perciò, è legata essenzialmente ai caratteri tessiturali del materiale lapideo, cioè alla sua porosità, e alla sua permeabilità. Dipende, inoltre, dalle modalità di messa in opera, poiché si manifesta quando non vengono rispettati o sono assenti adeguati parametri di isolamento idrico e di traspirabilità [4], pertanto può essere controllata solo indirettamente. Per questi motivi costituisce la principale fonte di apporto di umidità e sali, provenienti soprattutto dal terreno e dall'esterno. Essa agisce sia in senso verticale che orizzontale e la sua presenza è evidenziata dall'insorgenza di macchie di umidità, dal distacco degli intonaci, dalla distruzione delle malte di connessione e dal fenomeno della cristallizzazione salina, che a sua volta porta allo sgretolamento e alla polverizzazione della pietra [4].

Infine, è legato alla porosità della pietra anche l'apporto di umidità per condensazione capillare con formazione di un menisco, quando sono presenti pori estremamente sottili ( $r \approx 1 \text{ nm}$ ) e valori di umidità relativa superiori al 30%. Ciò accade

perché la pressione di vapore presente al di sopra di un menisco curvo,  $p''$ , differisce dalla pressione di vapore di una superficie di acqua piatta,  $p'$ : se la curvatura del menisco è negativa, come nel caso dell'acqua, si verifica che  $p'' > p'$ , quindi si ha condensazione capillare (è il caso dei materiali idrofili) [4].

#### 1.4 La cristallizzazione salina

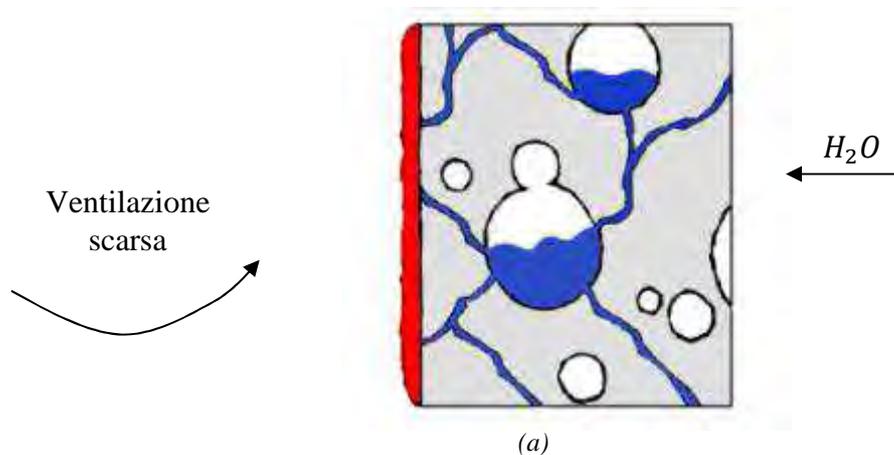
La cristallizzazione salina, come già accennato, è una delle forme di degrado chimico-fisico più comuni che vanno a interessare il materiale lapideo. Nell'acqua che esso tende ad assorbire, infatti, si trovano disciolti generalmente sali di sodio, potassio, calcio e magnesio, sottoforma di [4]:

- Carbonati: le attività industriali, ma anche la presenza di persone, possono aumentare la concentrazione nell'aria di  $CO_2$ , la quale a contatto con l'umidità delle superfici può portare alla formazione di acido carbonico. Quest'ultimo è instabile e trasforma i carbonati, sali insolubili, in bicarbonati, sali solubili. A loro volta questi, in seguito alla perdita di acqua e al contatto con la  $CO_2$  atmosferica, si trasformano di nuovo in carbonati, formando dure incrostazioni. Si trovano anche nelle acque naturali e negli inerti delle malte;
- Solfati: provengono principalmente dal terreno e dall'aerosol marino, ma si formano anche per reazione dei substrati con l'anidride solforica presente in atmosfera a causa dei processi industriali di combustione. Inoltre, sono contenuti nei leganti aerei e idraulici e nelle rocce. In piccola parte possono essere prodotti anche dai solfobatteri, i quali attaccano generalmente i materiali calcarei. Sono dannosi perché potendo esistere in vari stati di idratazione, possono dar luogo a notevoli aumenti di volume e sono molto mobili;
- Cloruri: possono giungere nelle murature in seguito ad aerosol marino e al contatto con la sabbia. Sono sali solubili molto igroscopici che cristallizzano difficilmente, ma rendono le superfici più sensibili all'umidità;
- Nitrati: derivano dai concimi, dalla decomposizione dei materiali organici, dal guano degli animali, dall'attività biologica dei nitrobatteri e anche dalla combustione di idrocarburi. Sono sali solubili, il cui comportamento è simile ai cloruri.

La loro presenza può essere anche la conseguenza della natura stessa della roccia, dell'uso di certi materiali artificiali (come il cemento, ricco di solfati, nitrati e sali alcalini) e di leganti, della destinazione d'uso dell'ambiente e di errati interventi di restauro.

In base alle condizioni ambientali presenti si possono instaurare dei cicli di assorbimento/evaporazione e di cristallizzazione/solubilizzazione, che incrementano la quantità di sale all'interno del materiale, con la possibile creazione di zone di accumulo preferenziale [6]. I fattori che regolano tale fenomeno sono soprattutto tre [6]: la ventilazione dell'ambiente, la porosità del materiale e la natura del sale. Nelle zone poco ventilate, l'acqua, o meglio, la soluzione salina, muovendosi attraverso i pori, riesce a raggiungere la superficie esterna perché la velocità di evaporazione è bassa. Qui, poi, il soluto cristallizzerà, dando luogo a efflorescenze (Figura 4a), cioè ad antiestetiche, ma non dannose per la tessitura del materiale, patine superficiali generalmente biancastre, la cui consistenza dipenderà dalla natura del sale oppure, come nel caso delle malte, si assiste a uno sfarinamento del materiale. Nei casi in cui, invece, la ventilazione è alta, la linea di evaporazione si sposta verso l'interno, provocando la formazione di subefflorescenze e criptoefflorescenze (figura 4b), cioè depositi salini, rispettivamente, al di sotto della superficie o all'interno della matrice porosa, che alterano la coesione del materiale [4]. Questo fenomeno può essere anche la conseguenza dell'applicazione di inadeguati consolidanti e protettivi che vanno ad alterare la porosità e la permeabilità della pietra [4].

Oltre che per evaporazione del solvente, la cristallizzazione può avvenire anche in seguito al raggiungimento delle condizioni di saturazione della soluzione e a variazioni di temperatura, le quali influenzano i valori di solubilità dei sali, e di umidità relativa [4].



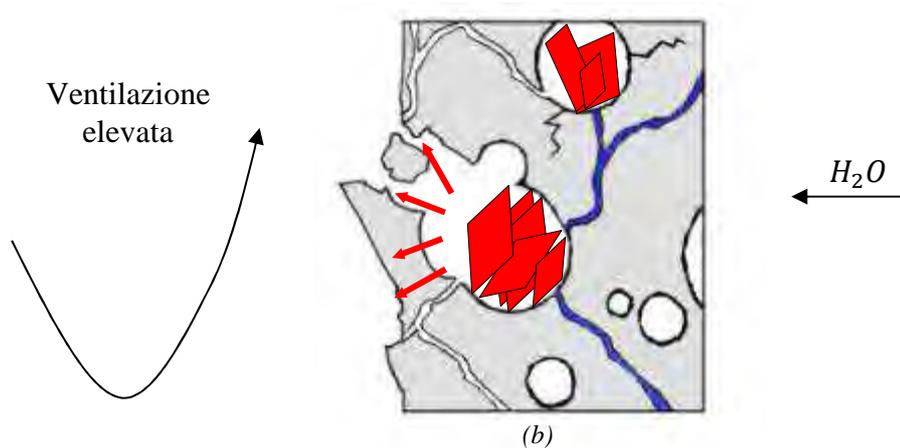


Figura 4 – Cristallizzazione salina nei materiali lapidei porosi.  
 (a) Formazione delle efflorescenze; (b) Formazione delle subefflorescenze

Nel momento in cui si forma il deposito interno, il sale inizia a esercitare sulle pareti del poro una certa pressione, definita pressione di cristallizzazione,  $P$  (atm), la quale è data da [3]:

$$P = \left( \frac{R_g T}{V_m} \right) \ln \left( \frac{C}{C_s} \right)$$

in cui:

$R_g$ : è la costante dei gas ( $0,082 \text{ L atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ );

$T$ : è la temperatura assoluta (K);

$V_m$ : è il volume molare del cristallo (L/mol);

$C$ : è la concentrazione reale;

$C_s$ : è la concentrazione di saturazione.

Ne deriva che la pressione sarà maggiore quanto più sarà alto il rapporto fra la concentrazione reale e quella di saturazione.

Inoltre, secondo l'approccio termodinamico di Everett<sup>8</sup> [6], la pressione  $P_r$  che si sviluppa in seguito alla cristallizzazione di un sale di tensione interfacciale  $g$  in un sistema poroso idealizzato con due classi di pori comunicanti di raggio  $r$  ed  $R$  (con  $R > r$ ) è data dalla relazione:

$$P_r = 2g \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right)$$

<sup>8</sup> Generalmente è utilizzato per calcolare le pressioni che si sviluppano all'interno dei pori in seguito alla transizione liquido-solido dell'acqua.

e ipotizzando  $R \gg r$ , la relazione precedente diventa:

$$P_r \sim 2g \frac{1}{r}$$

La pressione, quindi, sarà tanto maggiore quanto più piccolo sarà il raggio medio dei pori e quanto maggiore sarà la tensione interfacciale  $g$ .

Le sollecitazioni indotte all'interno dei materiali, perciò, dipendono sia dalla natura del sale (attraverso  $g$ ) sia dalle proprietà chimiche e strutturali del materiale, che potrà o meno resistere in dipendenza delle sue caratteristiche meccaniche [6].

Vi è, poi, un altro fattore da considerare. Alcuni sali possono esistere in diversi stati di idratazione, in funzione della temperatura e dell'umidità relativa. È il caso del solfato di sodio: esso può esistere in due forme stabili, una anidra,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (Thenardite), avente un habitus romboedrico (volume molare pari a  $53 \text{ cm}^3/\text{mol}$ ) e una decaidrata,  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (Mirabilite), avente un habitus monoclinico (volume molare pari a  $220 \text{ cm}^3/\text{mol}$ ). Esiste, poi, una terza forma metastabile eptaidrata,  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  [4].

A pressione atmosferica, la temperatura di transizione dalla forma anidra a quella eptaidrata è di circa  $23^\circ\text{C}$ , mentre a quella decaidrata è di circa  $32^\circ\text{C}$  (Figura 5): valori, questi, che nei climi temperati si raggiungono facilmente e anche più volte nell'arco della stessa giornata. Nella transizione Thenardite-Mirabilite si verifica un incremento di volume superiore al 300% e ciò porta all'instaurarsi di considerevoli stress all'interno dei pori, con conseguenze molto gravi per la resistenza e l'integrità del materiale [6].

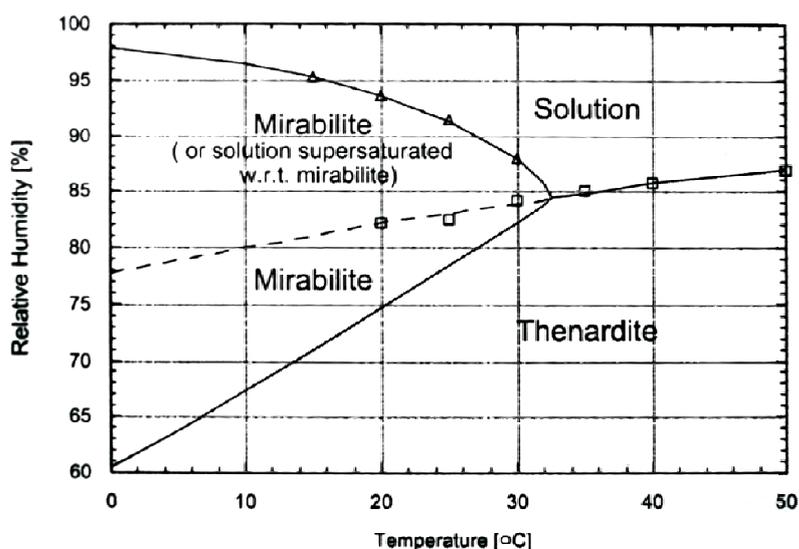


Figura 5 – Diagramma di fase del solfato di sodio  
 (This figure was published in Nicholas Tsui, Robert J. Flatt, George W. Scherer. Crystallization damage by sodium sulfate. Journal of Cultural Heritage, April 2003; Volume 4 (Issue 2): 109-115.  
 Copyright©2003 Elsevier Masson SAS. All rights reserved)

Come in parte già accennato, i danni che la cristallizzazione salina può provocare sono vari:

- Estetici: si verificano sbiancamenti, opacizzazioni e sgretolamenti della superficie, perdite e distacchi di materiale;
- Fisici: la principale conseguenza è l'alveolizzazione, cioè la formazione di profondi alveoli, spesso interconnessi, sulla superficie esterna. È causata dalle subefflorescenze, poiché generano un accumulo di sforzi e tensioni all'interno dei pori che nel tempo portano al distacco di pezzi e alla disgregazione del materiale;
- Chimici: se sono presenti metalli, alte concentrazioni di cloruro di sodio e di solfato di sodio possono indurre la corrosione.

Le rocce, sia naturali che artificiali, più sensibili a questo tipo di degrado sono, pertanto, quelle aventi un'alta affinità con l'acqua, sia in termini di assorbimento che di igroscopicità, e quelle costituite da un'elevata quantità di micropori aperti, come i tufi, i calcari, i laterizi, le malte e le arenarie [5]. Determinanti sono poi le condizioni ambientali, quindi, la collocazione, poiché influisce sull'entità dell'apporto e sulla tipologia del sale, i parametri termoigrometrici e la presenza di moti d'aria.

### *1.5 Metodologie di intervento*

Nella maggior parte dei casi il problema della cristallizzazione salina colpisce le murature, i rivestimenti e gli elementi architettonici, poiché i manufatti lapidei mobili, come le statue, sono molto più facilmente gestibili e isolabili. I trattamenti applicabili esistenti sono diversi e devono essere scelti in base all'entità del danno, alla rifinitura e all'importanza storico-artistica della struttura.

Nel generico settore dell'edilizia, le murature possono essere protette dall'acqua grazie all'impiego di intonaci macroporosi o additivati; se poi il problema assume una maggiore gravità, possono essere applicate tecniche di risanamento e di deumidificazione anche abbastanza invasive, quali l'intercettazione e il drenaggio dell'acqua, il taglio meccanico, l'uso di barriere chimiche e l'elettrosmosi [7].

Nel campo dei Beni Culturali, invece, deve essere garantita e assicurata l'integrità e l'originalità della materia. Quindi, un corretto intervento di controllo del degrado di cristallizzazione salina deve prevedere l'adozione di opportune e specifiche metodologie,

che vadano a rispettare prima di tutto la natura dei materiali e che poi vadano a eliminare le conseguenze e, se possibile, anche le cause del degrado.

Le efflorescenze costituiscono il danno più facilmente riparabile, in quanto il sale si trova completamente sulla superficie del materiale. Possono essere eliminate con una spazzolatura superficiale, ma nei casi più difficili, come nel caso di vere e proprie incrostazioni, si deve prima cercare di ammorbidire il deposito con impacchi di bicarbonato d'ammonio ed EDTA, sali ampiamente utilizzati nelle operazioni di pulitura, o di assottigliarlo con degli utensili a percussione, come i microscalpelli.

Per la rimozione dei sali presenti all'interno della struttura porosa, invece, possono essere impiegati vari sistemi e la scelta di uno rispetto a un altro dipende da vari fattori, come l'estensione del fenomeno, la presenza di strati pittorici o di particolari rifiniture, la tipologia e lo stato di conservazione della muratura, ecc.

Uno dei metodi più utilizzati prevede la realizzazione di impacchi con materiali molto assorbenti, come la polpa di carta o argille speciali (sepiolite e attapulгите), imbevuti con acqua deionizzata. Questa prima si diffonderà all'interno della pietra sciogliendo i sali presenti, poi ritornerà indietro come soluzione salina, attratta dal materiale assorbente che nel frattempo si è essiccato [3]. Per capire quale debba essere la durata e il numero dei trattamenti necessari, è preferibile fare misure della conducibilità specifica delle soluzioni acquose ricavate da una serie di impacchi: all'aumentare delle applicazioni, i valori di conducibilità tenderanno a diminuire sensibilmente fino a stabilizzarsi, mostrando così il punto d'arrivo del trattamento [3].

Possono essere utilizzate anche resine a scambio ionico ad azione selettiva in forma anionica,  $OH^-$ , o in forma cationica,  $H^+$ . Queste sono costituite da polimeri sintetici contenenti gruppi funzionali acidi o basici che, attraverso il mezzo acquoso, danno luogo a uno scambio ionico fra gli ioni labili della resina e i cationi e anioni dell'incrostazione [3]. Dovrà seguire, poi, un'operazione di consolidamento, la quale permetterà di tenere sotto controllo l'ingresso di acqua nel substrato lapideo, assicurando comunque la sua naturale traspirazione [3].

Sono state sviluppate anche tecniche di intervento che prevedono il taglio meccanico alla base delle murature, con l'obiettivo di aumentare la superficie di evaporazione e ridurre l'apporto di acqua per risalita capillare. Esse, però, si sono dimostrate altamente invasive soprattutto se applicate in ambito archeologico, poiché i materiali lapidei qui presenti, per la loro natura porosa e la loro antichità, sono estremamente delicati e sensibili a operazioni così drastiche e radicali. Un esempio significativo di ciò si è avuto nel noto

sito archeologico di Mohenjo-Daro in Pakistan, dove, in seguito a questo tipo di intervento, si è registrato un considerevole peggioramento dello stato di conservazione delle strutture.

La maggior parte dei vari trattamenti attuabili, tuttavia, non ha un carattere preventivo, poiché possono essere applicati solamente dopo che il fenomeno della cristallizzazione salina si è manifestato. A questo punto, però, i danni potrebbero essere ormai notevoli e permanenti e comunque, anche se ci fosse stato un buon recupero, non potrebbe essere assicurata pienamente una totale copertura da ulteriori attacchi futuri. Si deve iniziare, perciò, a operare seguendo una nuova logica, quella della prevenzione, la quale è l'unica attività che garantisce una tutela del patrimonio nel lungo periodo. Per poter fare questo occorrono adeguate competenze a livello scientifico che permettano di conoscere in modo approfondito la natura dei materiali presenti e di capire come questi interagiscono con l'ambiente circostante, al fine di rallentare e controllare il naturale processo di degrado. A volte, però, questo può comunque non essere sufficiente, quindi, è necessario anche elaborare e sviluppare sistemi che sappiano intervenire in modo selettivo sui fenomeni di degrado.

Nei prossimi capitoli verrà presentato e discusso un metodo innovativo e promettente per il controllo della cristallizzazione salina, basato sull'utilizzo di sostanze organiche altamente funzionalizzate.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [1] Roberto Bugini, Luisa Folli, 2008. *Lezioni di petrografia applicata*.  
<[http://www.icvbc.cnr.it/didattica/petrografia/lezioni\\_petrografia.htm](http://www.icvbc.cnr.it/didattica/petrografia/lezioni_petrografia.htm)>
- [2] Stefano Poli, Università di Milano, Dipartimento di Scienze della Terra.  
<[users.unimi.it/~spoli/petapp/proptec.doc](http://users.unimi.it/~spoli/petapp/proptec.doc)>
- [3] Lorenzo Lazzarini, Marisa Laurenzi Tabasso, 1986. *Il restauro della pietra*.  
Padova, CEDAM.
- [4] Giovanni Amoroso, Mara Camaiti, 2002. *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti. Etica della conservazione, degrado dei monumenti, interventi conservativi, consolidanti e protettivi*. Firenze, Alinea.
- [5] Giorgio Torraca, 2005. *Porous building materials. Materials science for architectural conservation*. Roma, ICCROM.
- [6] Luigi Massidda, Ulrico Sanna. *La cristallizzazione salina nei materiali da costruzione. L'esempio del sito archeologico di Nora in Sardegna*.  
<<http://www.enco-journal.com/journal/ej14/sanna.html>>
- [7] Isabella Mundula, Norberto Tubi, 2003. *Umidità e risanamento negli edifici in muratura. Diagnosi, tecniche di intervento, strumentazioni di rilevamento e prevenzione*. Rimini, Maggioli Editore.

## CAPITOLO 2

# GLI INIBITORI ORGANICI DELLA CRISTALLIZZAZIONE SALINA

### *2.1 Introduzione*

Il fenomeno della cristallizzazione salina, come è stato sottolineato nel precedente capitolo, è una delle cause di degrado più dannose del materiale lapideo. Proprio per questo occorre studiare metodologie semplici e flessibili al fine di controllare e/o ridurre l'incidenza di tale fenomeno. Una di queste prevede l'utilizzo di inibitori, organici o inorganici, che siano in grado di prevenire e controllare la formazione dei depositi salini. Dalla letteratura emerge che nell'ambito della conservazione dei materiali lapidei costituenti i Beni Culturali, l'attenzione è stata focalizzata sullo studio di inibitori di natura organica per la loro minore aggressività chimica e per la loro maggiore compatibilità con l'ambiente.

Come già accennato nella Premessa, nei paragrafi successivi verranno evidenziati gli sviluppi più recenti dell'attività di ricerca condotta dalla prof.ssa Assunta Marrocchi, del Dipartimento di Chimica dell'Università degli Studi di Perugia, e dalla prof.ssa Maria Laura Santarelli, del Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali e Ambiente della Facoltà di Ingegneria dell'Università "Sapienza" di Roma e membro del CISTeC (Centro di Ricerca in Scienza e Tecnica per la Conservazione del Patrimonio Storico-Architettonico), avente come finalità lo studio di molecole organiche altamente funzionalizzate, in grado di agire come inibitori della cristallizzazione salina nei materiali lapidei porosi.

La discussione dei dati ottenuti sarà preceduta dalla descrizione delle modalità di azione di queste sostanze e da una breve esposizione delle principali ricerche che sono state condotte in questo ambito a livello internazionale.

## 2.2 Principio di azione

Il meccanismo di formazione dei cristalli in soluzione acquosa è evidenziato in Figura 1.

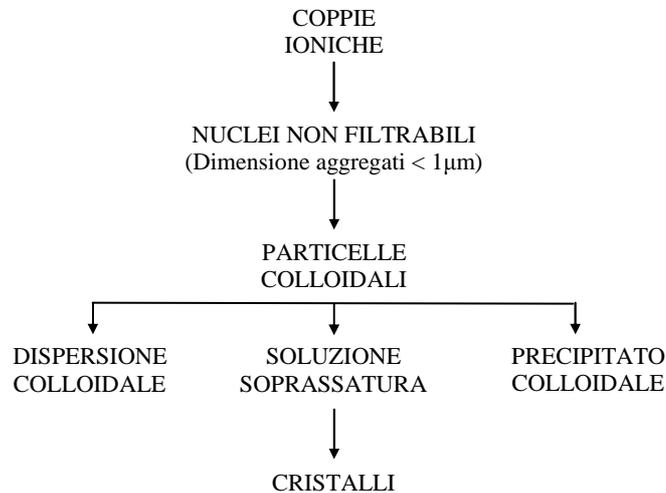


Figura 1 – Meccanismo di formazione dei cristalli in soluzione acquosa

Per verificare se ci sono le condizioni favorevoli alla formazione dei cristalli, si deve stimare il grado di soprassaturazione  $\alpha$  della soluzione, perché al suo aumentare, aumenta la probabilità di aggregazione delle molecole del soluto.

Il suo valore, per un certo valore di temperatura, è dato dal seguente rapporto:

$$\alpha = \frac{C}{C_0}$$

in cui:

$C$ : è la concentrazione reale delle coppie ioniche;

$C_0$ : è la concentrazione delle coppie ioniche in condizioni di saturazione.

Dal grafico in Figura 2 si può osservare l'andamento della velocità di formazione dei nuclei di aggregazione e della velocità di crescita dei cristalli in funzione di  $\alpha$ . Si può notare che per valori di  $\alpha < 1$ , la soluzione è insatura, quindi non si può verificare alcun tipo di fenomeno. La soluzione diventa satura solo nel momento in cui  $\alpha$  raggiunge il valore di 1, cioè quando le due concentrazioni,  $C$  e  $C_0$ , si equivalgono. Tuttavia, ancora non si ha né aggregazione né cristallizzazione perché entrambe le velocità sono nulle.

Le condizioni di soprassaturazione vengono raggiunte per valori di  $\alpha > 1$ : da questo momento le probabilità di aggregazione delle molecole del soluto e di sviluppo di cristalli aumentano rapidamente.

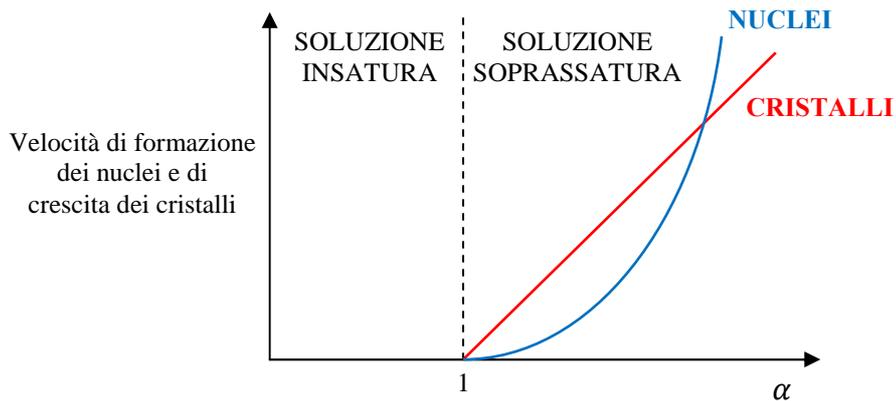


Figura 2 – Andamento del processo di nucleazione e di formazione dei cristalli in funzione di  $\alpha$

Gli inibitori, quindi, sono progettati in modo da poter formare un numero sufficiente di legami di tipo coordinativo con i cationi della superficie dei cristalli di sale che si vanno accrescendo, in maniera tale da essere già attivi anche se presenti solo in tracce. In questo modo essi tendono a prevenire e/o a ritardare la formazione dei nuclei stabili mediante processi di complessazione; e dall'altra, legandosi su facce specifiche del deposito, ne vanno a modificare l'abito cristallino e provocano un rallentamento della sua velocità di crescita (Figura 3).

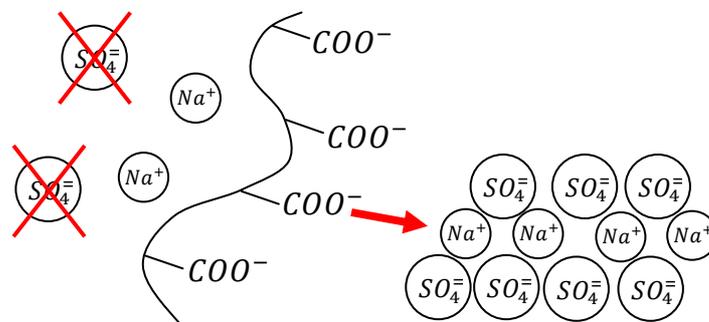


Figura 3 – Meccanismo di azione degli inibitori

La capacità inibitoria di una molecola, perciò, è strettamente legata alla presenza di specifici gruppi funzionali, ad esempio  $-COO^-$ ,  $-PO_4^-$ , ecc., alla disposizione spaziale degli atomi e/o dei gruppi atomici e alla struttura della molecola nel suo complesso.

### 2.3 Stato dell'arte

Da tempo sono iniziate ricerche in questo ambito. Studi condotti dal prof. C. Rodriguez-Navarro e coll. (1999) presso l'Università di Granada in Spagna, hanno esaminato la capacità inibitoria di due tipi di surfactanti ionici, il dodecilsolfato di sodio (SDS) e il cetildimetilbenzilammonio (CDBAC), applicandoli su una roccia calcarea degradata da solfato di sodio. Il primo ha dimostrato una certa efficacia nel favorire la formazione di cristalli di mirabilite in superficie piuttosto che in profondità [1(a)]. Negli anni successivi (2002) la stessa équipe di studiosi ha preso in considerazione gli effetti di inibizione degli ioni ferrocianuro,  $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ , applicandoli su una pietra calcarea degradata da cloruro di sodio. Hanno dimostrato come essi siano in grado di aumentare il grado di soprassaturazione della soluzione, favorendo così le efflorescenze, e di modificare l'habitus del sale, il quale assume conformazioni dendritiche bidimensionali, piuttosto che cubiche [1(b)].

Sempre su questa linea di ricerca hanno operato nel 2007 la prof.ssa B. Lubelli e il prof. Rob P.J. van Hees della TU Delft: essi hanno cercato di studiare la capacità inibitoria di due sostanze, il sodio ferrocianuro ( $\text{Na}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ ) e un composto complessante con proprietà chelanti ( $\text{C}_9\text{H}_{28}\text{N}_3\text{O}_{15}\text{P}_5$ ), applicandoli su tre diversi tipi di materiale (pietra calcarea, arenaria e mattone) messi a contatto con due tipi di sali, il solfato e il cloruro di sodio. Questo studio ha evidenziato come l'effetto di inibizione sia strettamente collegato al tipo di substrato, in quanto il sodio ferrocianuro si è presentato efficace solo nel mattone e nel calcare degradato da NaCl; mentre il secondo composto solo nell'arenaria degradata dal solfato [1(c)]. Altro lavoro interessante è stato quello condotto dal prof. J. Houck e dal prof. G.W. Scherer (2006) dell'Università di Princeton, i quali hanno invece cercato di individuare una sostanza organica che fosse in grado di ridurre la forza di repulsione che si viene a instaurare fra la superficie della pietra e il sale, quando questo cristallizza. I migliori risultati si sono ottenuti applicando sulla pietra calcarea "Indiana" contaminata da solfato di sodio, un acido poliacrilico a basso peso molecolare [1(d)].

Da alcuni anni, come già accennato, anche l'équipe della prof.ssa Assunta Marrocchi (Dipartimento di Chimica dell'Università degli Studi di Perugia) e della prof.ssa Maria Laura Santarelli (Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali e Ambiente della Facoltà di Ingegneria dell'Università "Sapienza" di Roma e membro del CISTeC, Centro di Ricerca in Scienza e Tecnica per la Conservazione del Patrimonio Storico-Architettonico) sta conducendo una ricerca sull'effetto di inibizione di molecole

organiche altamente funzionalizzate, solubili in acqua/alcool e non tossiche [2]. Si tratta di derivati degli idrossiacidi, sostanze molto diffuse in natura e di importanza biologica.

Gli idrossiacidi sono composti organici polifunzionali, contenenti almeno un gruppo acido carbossilico,  $-COOH$ , e un gruppo ossidrilico,  $-OH$ . In soluzione acquosa/alcolica questi si ionizzano, quindi si creano siti attivi carichi negativamente che vanno a interagire con il sale presente in ioni. Si tratta di acidi deboli naturali presenti in numerosi frutti, come le uve.

È stato evidenziato [3] come la sostituzione di un gruppo idrossilico con un gruppo fosfato aumenti notevolmente la capacità inibitoria della sostanza, poiché esso porta su di sé una maggiore densità di carica negativa e i gruppi chelanti della molecola così modificata possono assumere una disposizione spaziale tale da interagire meglio con i cationi del sale. Queste molecole possono essere attive già se presenti in tracce e, quindi, la formulazione può consistere in una soluzione solo debolmente acida, non aggressiva per il materiale lapideo.

Gli studi finora condotti hanno esaminato le capacità inibitorie del citrato e del fosfocitrato, in seguito all'applicazione sui substrati lapidei più sensibili al degrado da cristallizzazione salina, cioè il tufo, il laterizio e due tipi di pietre calcaree di diversa provenienza (biocalcarenite di Noto e Palazzolo e Globigerina di Malta), ciascuno dei quali, poi, è stato messo a contatto con varie specie saline, in particolare il solfato e il cloruro di sodio, anche in miscela.

I risultati ottenuti [2] indicano che il fosfocitrato presenta una capacità inibitoria più marcata, soprattutto sul laterizio, sul tufo e sulle pietre calcaree, sia siciliane che maltesi. Hanno confermato, poi, che tale capacità tende a essere migliore quando l'inibitore è presente in tracce e che l'effetto di inibizione dipende molto anche dalle modalità di applicazione.

Nel presente lavoro, si è studiata l'attività inibitoria del maleato e del tartrato. Quest'ultimo già da qualche tempo viene utilizzato nel campo del restauro per le sue proprietà chelanti, quindi soprattutto nelle operazioni di pulitura tradizionali dei materiali lapidei, in particolare quelli ceramici, e con metodi elettrochimici, utili nel caso dei metalli. Inoltre, si è andati ad approfondire ulteriormente lo studio delle capacità inibitorie del fosfocitrato.

Nei paragrafi successivi verranno evidenziati gli sviluppi di queste nuove ricerche, tuttora in corso.

## 2.4 Materiali e metodi

Il materiale lapideo preso in considerazione per questo studio è il tufo. Si tratta di una roccia piroclastica, ricca di minerali silicatici, formatasi dall'accumulo di blocchi, bombe, ceneri e lapilli in quantità e dimensioni variabili, derivanti da un'attività vulcanica generalmente di tipo esplosivo [4]. È un materiale molto diffuso nell'edilizia antica e moderna, anche nelle costruzioni di tipo monumentale, soprattutto in quelle dell'Italia centro-meridionale poiché questa zona è ricca di suoi giacimenti [4]; inoltre, è uno dei materiali costitutivi del Tempio romano di Veiove dove da alcuni anni sono in corso applicazioni dei sistemi di inibitori. Il tufo, però, a causa della sua elevata porosità e della bassa resistenza a trazione<sup>9</sup>, è molto esposto ai fenomeni di degrado provocati dalla cristallizzazione salina.

Quello qui utilizzato presenta le seguenti caratteristiche<sup>10</sup>:

- Un'elevata porosità: 36,5%;
- Una distribuzione dei pori concentrata prevalentemente nel campo della mesoporosità (Figura 4 e Tabella 1), l'intervallo dimensionale in cui il fenomeno della cristallizzazione salina è più probabile e ha gli effetti più dannosi;

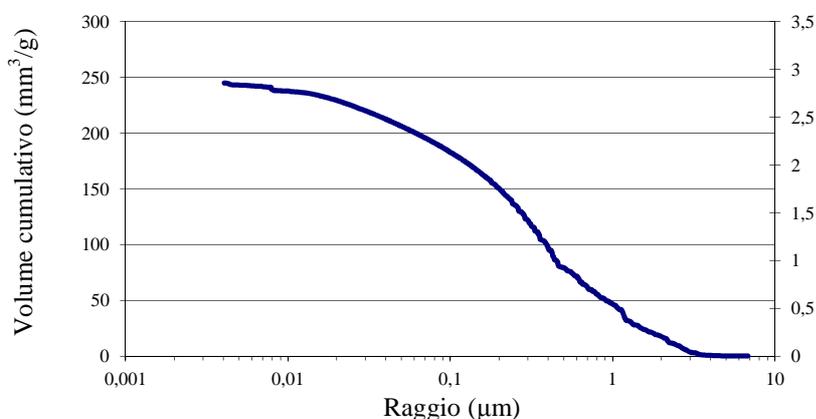


Figura 4 – Distribuzione della mesoporosità

Tabella 1 - Distribuzione dei pori

Intervallo dei raggi dei pori (µm)	0,001 – 0,01	0,01 – 0,1	0,1 - 1	1 - 10
Distribuzione (%)	3	22.3	55.3	18.7

<sup>9</sup> È legata al grado di cementazione dei minerali presenti.

<sup>10</sup> Le misure di porosità sono state condotte utilizzando un porosimetro a mercurio Carlo Erba 2000. Le misure di capillarità e di imbibizione sono state condotte, rispettivamente, secondo i protocolli UNI NORMAL 10859 e NORMAL 7/81.

- Un alto indice di assorbimento capillare: 0,92;
- Elevati coefficienti di assorbimento capillare ( $23,0 \text{ mg/cm}^2\text{s}^{-1/2}$ ) e di imbibizione (0,35).

Il sale utilizzato per indurre il fenomeno di degrado è il solfato di sodio,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (per le sue caratteristiche si rimanda al Capitolo 1, par. 1.4). Come già evidenziato nel paragrafo precedente, le sostanze organiche utilizzate come inibitori sono state il fosfocitrato, il maleato e il tartrato e per ciascuno di essi sono state realizzate soluzioni acquose a tre diverse concentrazioni, qui denominate bassa (B), media (M) e alta (A).

Gli esperimenti sono stati eseguiti in condizioni di temperatura e umidità relativa controllate (rispettivamente,  $21 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $40 \pm 5\%$ ), utilizzando un termoigrometro elettronico *Remote Thermo-Hygro Sensor Oregon Scientific* mod. THGR228N. Al termine di ciascun esperimento anche l'interno dei provini è stato esaminato, utilizzando il microscopio ottico *Olympus MIC-D* e il microscopio elettronico a scansione *Philips XL 30*, per evidenziare la morfologia dei cristalli di solfato e la loro distribuzione.

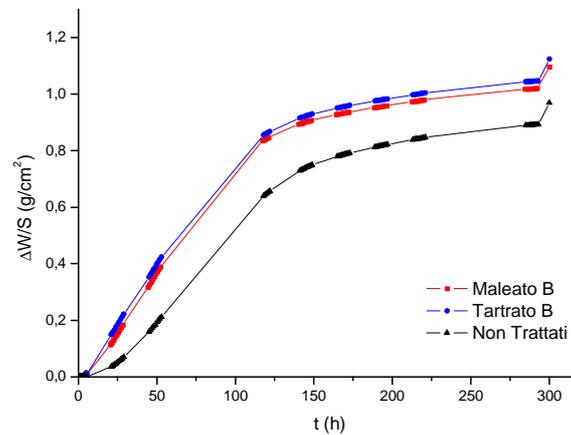
## 2.5 Risultati e discussione

Sono stati effettuati numerosi esperimenti in assenza e in presenza di inibitori a diverse concentrazioni. I risultati ottenuti sono illustrati in Figura 5 e in Figura 13 dai diagrammi che rappresentano il flusso della soluzione salina attraverso la superficie esposta del provino. In particolare, i diagrammi riportano l'andamento medio di  $\frac{\Delta W}{S}$  per ogni gruppo di provini in funzione di  $t$ , in cui:

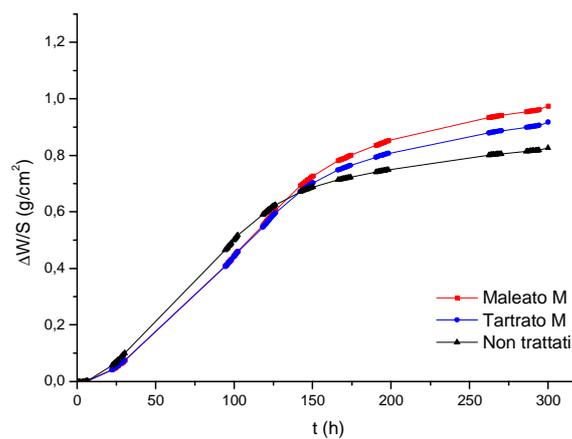
- $\Delta W$ : indica la perdita di peso avvenuta per evaporazione dell'acqua assorbita per capillarità (g);
- $S$ : indica la superficie esposta del provino ( $\text{cm}^2$ );
- $t$ : indica il tempo (h).

Per quanto riguarda lo studio delle capacità inibitorie del maleato e del tartrato, l'analisi dei grafici ottenuti (Figura 5) mette in evidenza l'efficacia degli inibitori nel favorire il flusso dell'acqua attraverso la rete capillare del materiale, promuovendo così l'evaporazione sulla superficie (efflorescenze) piuttosto che all'interno (subefflorescenze).

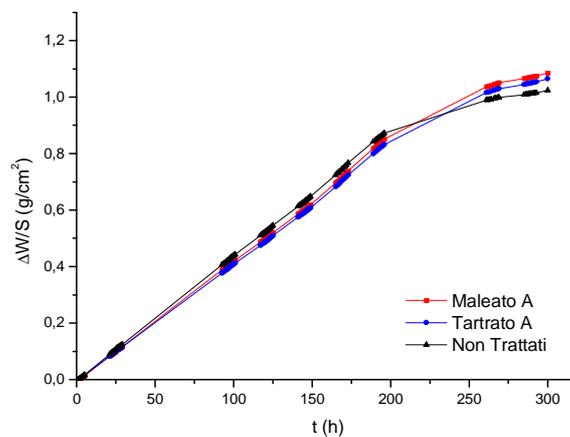
Qualitativamente, la capacità inibitoria del tartrato in soluzione acquosa bassa, B (Figura 5a) risulta essere leggermente superiore a quella del maleato. L'aumento di concentrazione dell'inibitore nelle soluzioni M e A comporta un aumento della concentrazione di ioni  $H^+$ , ma anche dell'interazione substrato-inibitore [5], con conseguente probabile perdita di efficacia dell'inibitore stesso.



(a)



(b)



(c)

Figura 5 – Andamento della perdita di acqua per evaporazione,  $\Delta W/S$ , in funzione del tempo,  $t$ .  
 (a) Trattamento con inibitori alla concentrazione B; (b) Trattamento con inibitori alla concentrazione M; (c) Trattamento con inibitori alla concentrazione A

Ulteriori informazioni si hanno dalla documentazione fotografica. A una prima analisi visiva tutti i provini presentano sulle superfici esposte delle patine bianche di elevata consistenza (Figura 6).



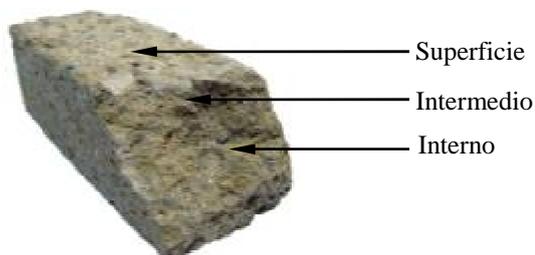
(a)



(b)

*Figura 6 – Analisi macroscopica delle superfici dei provini.  
(a) Patina superficiale di solfato di sodio; (b) Dettaglio della patina*

Successivamente, si è andati a esaminare l'interno di ciascuno di essi, individuando tre punti di analisi; in particolare è stato prelevato un frammento superficiale, uno a profondità intermedia e uno più interno (Figura 7), per osservare la distribuzione, la morfologia e le dimensioni dei cristalli.



*Figura 7 – Schema che indica i punti in cui è stato effettuato il prelievo dei frammenti da un provino di tufo*

Il solfato di sodio nei provini non trattati è risultato largamente presente in tutti e tre i punti analizzati (Figura 8).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

*Figura 8 – Campioni prelevati da provini non trattati.  
(a) e (b) Patine di solfato di sodio in superficie (98×); (c) e (d) Cristalli di solfato di sodio a profondità intermedia (98× e 132×); (e) e (f) Cristalli di solfato di sodio in profondità (132×)*

Nei provini trattati con gli inibitori alle concentrazioni M e A, invece, si osserva generalmente una quantità di cristalli di solfato di sodio inferiore, soprattutto in profondità. Inoltre, gli eventuali nuclei individuati mostrano una morfologia prevalentemente dendritica (Figura 9).



(a)



(b)



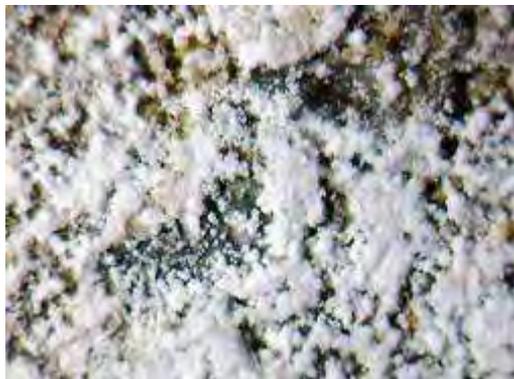
(c)



(d)

*Figura 9 – Campioni prelevati da provini trattati.*  
(a) e (b) Cristalli di solfato di sodio all'interno dei provini con trattamento M (132×);  
(c) e (d) Cristalli di solfato di sodio all'interno dei provini con trattamento A (132×)

Le immagini della Figura 10 evidenziano chiaramente l'efficacia dei due trattamenti con gli inibitori in concentrazione bassa, B, i quali hanno favorito il fenomeno delle efflorescenze superficiali, in cui il sale si presenta in accumuli fioccosi (Figura 10a e b), ma non quello delle subefflorescenze (Figura 10c e d), portando nei campioni interni solo a rare formazioni di cristalli caratterizzati anche in questo caso da una morfologia dendritica, questa volta bidimensionale (Figura 10e).



(a)



(b)



(c)



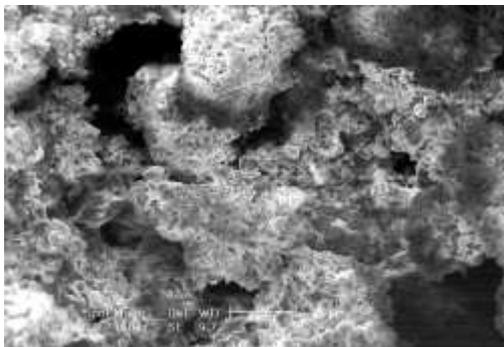
(d)



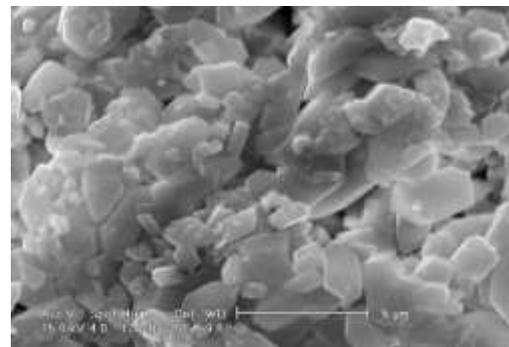
(e)

Figura 10 - Campioni prelevati da provini trattati con inibitori alla concentrazione B. (a) e (b) Accumuli di solfato di sodio in superficie (98x); (c) e (d) Aree interne in cui non emergono tracce visibili di depositi (98x); (e) Dendriti bidimensionali (132x)

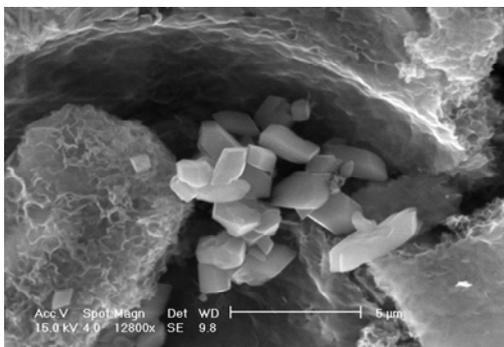
L'indagine al SEM (Figura 11 e Figura 12) non solo ha confermato le differenze morfologiche, ma ha anche messo meglio in evidenza le dimensioni inferiori dei cristalli di solfato di sodio nei provini trattati (Figura 11a, b, c e d) rispetto a quelli non trattati (Figura 12a, b, c e d), sia in superficie che in profondità. Si può ipotizzare, perciò, che il miglioramento del flusso capillare della soluzione salina attraverso il materiale poroso che si osserva in seguito al trattamento con l'inibitore, sia favorito anche da questi fattori.



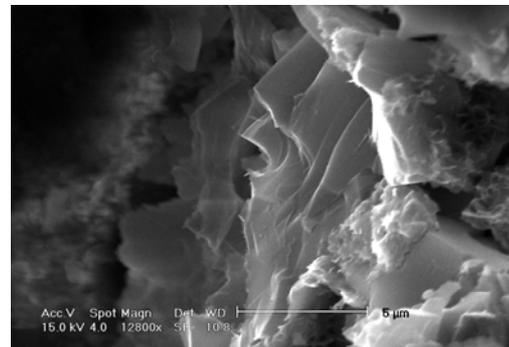
(a)



(b)

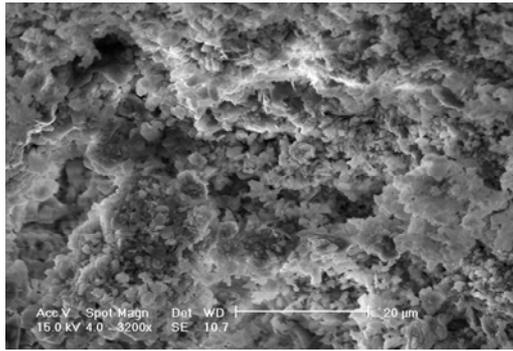


(c)

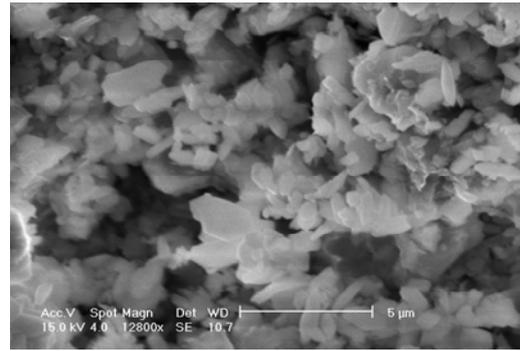


(d)

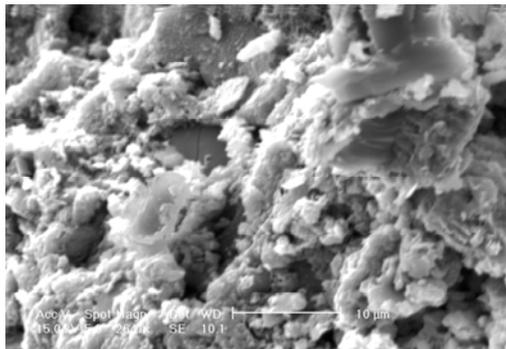
Figura 11 – Campioni prelevati da provini trattati con tartrato in concentrazione B. (a) Cristalli di solfato di sodio in superficie (scala 20µm); (b) Cristalli di solfato di sodio in superficie (scala 5 µm); (c) e (d) Cristalli di solfato di sodio all'interno (scala 5µm)



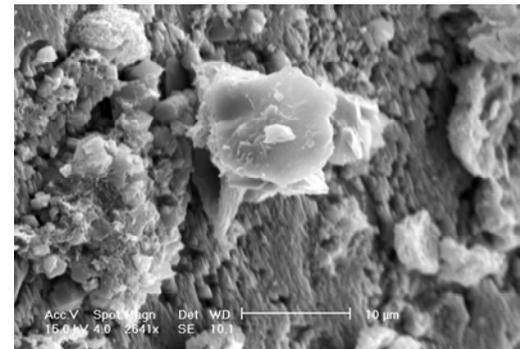
(a)



(b)



(c)



(d)

*Figura 12 – Campioni prelevati da provini non trattati.  
(a) Cristalli di solfato di sodio in superficie (scala 20 μm); (b) Cristalli di solfato di sodio in superficie (scala 5 μm); (c) e (d) Cristalli di solfato di sodio all'interno (scala 10 μm)*

Per quanto riguarda lo studio relativo alla capacità inibitoria del fosfocitrato, anche in questo caso il grafico ottenuto (Figura 13) mette in evidenza che la presenza di un inibitore tende a favorire il flusso dell'acqua attraverso la rete capillare del materiale, promuovendo così l'evaporazione sulla superficie (efflorescenze) piuttosto che all'interno (subefflorescenze). Qualitativamente, il fosfocitrato ha mostrato una capacità inibitoria più marcata se applicato in soluzione acquosa bassa e media, B e M (Figura 13). Ciò va a sostenere l'ipotesi secondo la quale all'aumentare della concentrazione dell'inibitore, aumenta l'interazione fra esso e il substrato lapideo, con conseguente probabile perdita di efficacia dell'inibitore stesso.

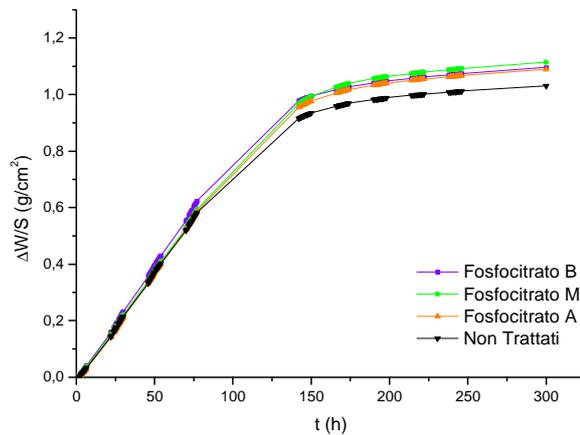


Figura 13 – Andamento della perdita di acqua per evaporazione,  $\Delta W/S$ , in funzione del tempo,  $t$ .

Ulteriori informazioni si hanno dalla documentazione fotografica. Anche in questo caso, a una prima analisi visiva (Figura 14) tutti i provini presentano sulle superfici esposte delle patine bianche di elevata consistenza.



(a)



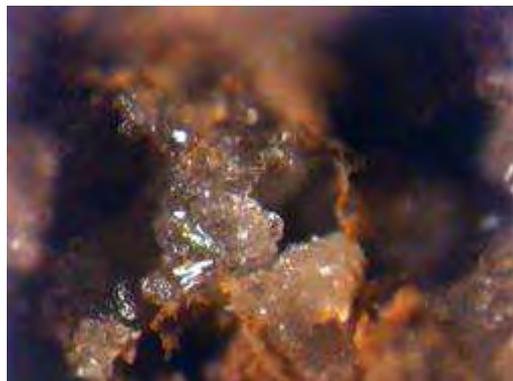
(b)

Figura 14 – Analisi macroscopica delle superfici dei provini.  
(a) Patina superficiale di solfato di sodio; (b) Dettaglio della patina

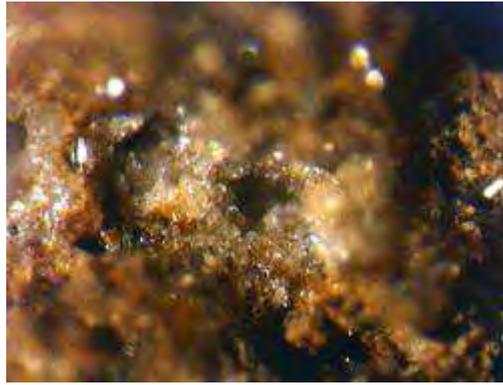
L'analisi al microscopio ottico conferma di nuovo che nei provini non trattati, il solfato di sodio è risultato largamente diffuso in tutte e tre le zone analizzate (Figura 15).



(a)



(b)



(c)

*Figura 15 - Campioni prelevati da provini non trattati.  
(a) Patina di solfato di sodio in superficie (98×); (b) Cristalli di solfato di sodio a profondità intermedia (132×); (c) Cristalli di solfato di sodio in profondità (132×)*

Le immagini attestano, poi, l'efficacia del trattamento con fosfocitrato, in particolare se applicato in soluzione acquosa bassa e media, B e M, poiché sono favorite le efflorescenze, caratterizzate da una minore compattezza poiché il sale si presenta in fiocchi (Figura 16a e b), al contrario delle subefflorescenze (Figura 16c e f), portando solo a rare e ridotte formazioni cristalline di forma dendritica (Figura 16d ed e).



(a)



(b)



(c)



(d)



*Figura 16 - Campioni prelevati da provini trattati con fosfocitrato alla concentrazione B (a sinistra) e M (a destra).  
(a) e (b) Accumuli di solfato di sodio in superficie (98×); (c) e (d) Aree a livello intermedio (132×);  
(e) e (f) Aree a livello interno (132×)*

## 2.6 Conclusioni

In questo lavoro sono stati presi in considerazione due nuovi idrossiacidi, il maleato e il tartrato, che per le loro caratteristiche strutturali si proponevano anch'essi come potenziali inibitori della cristallizzazione salina nei materiali lapidei.

Infatti, i risultati ottenuti permettono di sostenere che entrambi si sono dimostrati efficaci nell'inibire la cristallizzazione del solfato di sodio nel tufo, andando a regolare sia la velocità di crescita che la morfologia dei cristalli. Al variare della concentrazione, la loro capacità inibitoria varia, più precisamente tende a diminuire all'aumentare della loro concentrazione, a causa dell'insorgenza di interazioni substrato-inibitore come conseguenza di un aumento dell'acidità del sistema. Inoltre, in ogni test realizzato (Par. 2.5, Figura 5) i loro andamenti tendono a essere abbastanza simili, mostrando così una modalità di azione comparabile.

Entrambe le sostanze si sono dimostrate maggiormente efficaci nell'inibire la cristallizzazione salina alla concentrazione più bassa, B. In questo modo le relative soluzioni acquose presentano un'acidità ridotta, cioè tale da non costituire un ulteriore fattore di degrado per il substrato lapideo. Confrontando, poi, i corrispondenti risultati si può osservare che in queste condizioni la capacità inibitoria del tartrato è risultata essere leggermente superiore a quella del maleato.

Le analisi dei vari campioni al microscopio ottico (Par. 2.5, Figura 10) ed elettronico (Par. 2.5, Figura 11), inoltre, hanno confermato l'effettivo controllo sulla morfologia, sulle

dimensioni e sulla disposizione dei cristalli, soprattutto in profondità del materiale lapideo, mettendo in evidenza i miglioramenti che induce l'applicazione di questo tipo di inibitori su un substrato lapideo soggetto a un attacco salino.

Come già evidenziato in precedenza nel paragrafo 2.3, il fosfocitrato è stato l'inibitore che finora ha permesso di ottenere i risultati migliori, soprattutto se applicato sul laterizio, sul tufo e sulle pietre calcaree, sia siciliane che maltesi, contaminate da varie tipologie saline [2]. In questo lavoro, lo studio delle sue capacità inibitorie è stato ulteriormente approfondito, anche in previsione di una sua possibile applicazione su dei blocchi di tufo appartenuti a un importante sito archeologico romano, il Tempio di Veiove, dove da alcuni anni sono in corso applicazioni dei sistemi di inibitori. I dati ottenuti (Par. 2.5, Figura 13) e l'analisi dei vari campioni al microscopio ottico (Par. 2.5, Figura 16) hanno di nuovo confermato la sua efficacia nell'inibire la cristallizzazione del solfato di sodio nel tufo e nel controllare la morfologia, le dimensioni e la disposizione dei cristalli, soprattutto all'interno dei provini selezionati. Inoltre, anch'esso si è dimostrato maggiormente efficace nel contrastare la cristallizzazione se applicato in soluzioni acquose molto diluite (B e M), così da rendere trascurabili le possibili interazioni substrato-inibitore e l'aumento di acidità.

I risultati raggiunti e presentati in questo lavoro contribuiscono così alla comprensione e allo studio degli effetti di inibizione dei fenomeni di subefflorescenza in materiali lapidei opportunamente selezionati, di specifiche molecole organiche solubili in acqua/alcool, non tossiche e perfettamente eco-compatibili. Gli ulteriori approfondimenti necessari sono tuttora in corso.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [1] (a) Rodriguez-Navarro *et alii* 1999, C. Rodriguez - Navarro, E. Doehne, E. Sebastian. *Influencing crystallization damage in porous materials through the use of surfactants: experimental results using sodium dodecyl sulfate and cetylmethylbenzylammonium chloride*. «Langmuir», 16, pp. 947-954.
- (b) Rodriguez-Navarro *et alii* 2002, C. Rodriguez - Navarro, L. Linares-Fernandez, E. Doehne, E. Sebastian. *Effects of ferrocyanide ions on NaCl crystallization in porous stone*. «Journal of Crystal Growth», 243, pp. 503-516.
- (c) Lubelli *et alii* 2007, Lubelli B., Rob P.j. van Hees. *Effectiveness of crystallization inhibitors in preventing salt damage in building materials*. «Journal of Cultural Heritage», 8 (3), pp. 223-234.
- (d) Hough *et alii* 2006, Houck J., Scherer G. W.. *Controlling stress from salt crystallization*. Proceedings of 16th European Conf. Fracture, Aezandropoulis, Greece.
- [2] (a) Marrocchi *et alii* 2006b, Marrocchi A., Santarelli M. L., Taticchi A., Minuti L., Broggi A.. *Inibitori della crescita di cristalli di solfato di sodio in materiali lapidei. 1*. «Science and Technology for Cultural Heritage», 15 (1-2), Istituti Editoriali e Poligrafici Internazionali, Pisa-Roma, pp. 101-108.
- (b) Marrocchi *et alii* 2006c, Marrocchi A., Taticchi A., Santarelli M. L., Minuti L., Broggi A., Garibaldi V.. *Acidi organici quali inibitori della cristallizzazione di sali nei materiali lapidei. 2*. «Science and Technology for Cultural Heritage», 15 (1-2), Istituti Editoriali e Poligrafici Internazionali, Pisa-Roma, pp. 109-114.
- (c) Marrocchi *et alii* 2006e, Marrocchi A., Taticchi A., Santarelli M. L., Broggi A., Minuti L., Librando V.. *Acidi organici quali inibitori della cristallizzazione del cloruro di sodio e di miscele cloruro di sodio-solfato di sodio nei materiali lapidei porosi. 3*. «Science and Technology for Cultural Heritage», 15 (1-2), Istituti Editoriali e Poligrafici Internazionali, Pisa-Roma, pp. 115-124.
- (d) Marrocchi *et alii* 2007, Marrocchi A., Taticchi A., Orrù M., Minuti L., Santarelli M. L., Librando V.. *Inibitori organici della cristallizzazione salina nei materiali lapidei porosi. 4*. «Science and Technology for Cultural Heritage», 16 (1-2), pp. 143-151.

- (e) Cassar *et alii*, 2008, Cassar J., Marrocchi A., Santarelli M. L., Muscat M.. *Controlling crystallization damage by the use of salt inhibitors on Malta's limestone*. «Materiales de Construcción, 58, pp. 281-293.
- [3] Sallis 1998, Sallis J.D., *Structure/performance relationships of phosphorous and carboxyl containing additives as calcium phosphate crystal growth inhibitors*, in Z. Amjad (a cura di), *Calcium phosphates in Biological and Industrial Systems*, Dordrecht, Netherlands, Kluwer Acad. Publ., pp. 173-191.
- [4] Giovanni Amoroso, Mara Camaiti, 2002. *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti. Etica della conservazione, degrado dei monumenti, interventi conservativi, consolidanti e protettivi*. Firenze, Alinea.
- [5] Lorenzo Lazzarini, Marisa Laurenzi Tabasso, 1986. *Il restauro della pietra*. Padova, CEDAM.

## CAPITOLO 3

### ANALISI CHEMIOMETRICA

#### 3.1 Introduzione

La chemiometria, per definizione, è la scienza che si occupa dello sviluppo e dell'applicazione di strategie di raccolta e di elaborazione di dati analitici, utilizzando metodi di analisi statistica multivariata, al fine di ottimizzare i relativi processi chimici e di estrarre da essi la massima informazione chimica possibile.

Quando si devono affrontare problemi complessi, in cui sono presenti numerose variabili legate fra loro ma non si conosce la rilevanza di ciascuna, non è possibile utilizzare il classico approccio statistico univariato. Si deve ricorrere, quindi, alle tecniche multivariate, che riescono a prendere in considerazione contemporaneamente tutte le informazioni contenute in una certa serie di dati. Più precisamente, quando si parla di spazio multivariato occorre pensare in termini di geometria spaziale: un oggetto su cui siano stati acquisiti tre dati analitici, ciascuno relativo a una diversa variabile o proprietà considerata, sarà rappresentato da un punto nello spazio tridimensionale avente coordinate pari ai valori numerici dei dati stessi. I metodi di analisi multivariata hanno, quindi, l'obiettivo di trovare la posizione relativa dei punti in questo spazio.

Per affrontare problematiche di tipo chimico appaiono particolarmente appropriati tutti quei metodi statistici che vanno sotto il nome di "pattern recognition", i quali consentono tramite modelli statistici, sia la classificazione dei campioni sia la descrizione dei dati sperimentali, così da semplificare la loro interpretazione e/o da agevolare la previsione di proprietà in funzione di descrittori o predittori. Lo sviluppo di tale metodo favorisce un approccio di tipo induttivo al problema, poiché una razionalizzazione dei dati è possibile solamente dopo averli raccolti e non prima.

Si può operare facendo riferimento a due tipi di tecniche:

1. **Multimetodo:** è stata elaborata negli Stati Uniti e si basa sull'uso di un elevato numero di metodi statistici, poiché si ritiene che ogni problema debba essere affrontato e risolto usando un metodo preciso;

2. Monometodo: è stata elaborata in Svezia e si basa, invece, sull'uso di un solo metodo statistico, in quanto si ritiene che il risultato dipenda maggiormente dall'esperienza accumulata su di esso.

Il modello che di solito viene utilizzato è la PCA, cioè l'analisi delle componenti principali, il quale permette di risolvere problemi di classificazione e di chiarire la natura dei dati oggetto di indagine.

### 3.2 La PCA (*Principal Component Analysis*)

L'analisi delle componenti principali è il metodo base per risolvere problemi di classificazione e può risultare utile anche per ridurre il livello di "rumore" presente nei dati raccolti durante una serie di sperimentazioni, cioè l'informazione non necessaria o gli errori sperimentali.

Come ogni metodo di analisi statistica multivariata, esso si basa su un criterio di similitudine, cioè va a elaborare un modello statistico in grado di descrivere in modo più che soddisfacente l'insieme dei dati che si ha a disposizione, attraverso la tecnica dei minimi quadrati.

I più diffusi metodi di regressione lineare multipla non possono essere utilizzati in questo caso, perché non sono finalizzati a valutare l'esistenza di associazioni fra le variabili o le proprietà che sono state prese in considerazione per caratterizzare un certo processo chimico, poiché vanno a ricercare la presenza di relazioni causa-effetto.

Innanzitutto, per comprendere meglio il suo funzionamento occorre descrivere lo spazio dimensionale in cui si andrà a lavorare. Si supponga di avere a disposizione un certo numero  $N$  di campioni o oggetti,  $i$ , ciascuno dei quali è associato a un numero  $P$  di variabili indipendenti,  $k$ , le quali sono state ricavate dopo aver effettuato una serie di esperimenti. Ogni campione, quindi, può essere rappresentato da un punto o da un vettore in uno spazio  $P$ -dimensionale, in cui cioè, ciascuna variabile individuata costituisce un asse ortogonale. Se si indica con  $N$  il numero dei campioni, ci saranno  $N$  punti in uno spazio a  $P$  dimensioni.

I dati raccolti presi in considerazione verranno a questo punto organizzati in matrici  $N \times P$ , in cui le righe costituiscono gli oggetti o campioni, mentre le colonne sono le variabili,

cioè i parametri analizzati durante gli esperimenti e opportunamente selezionati (Figura 1).

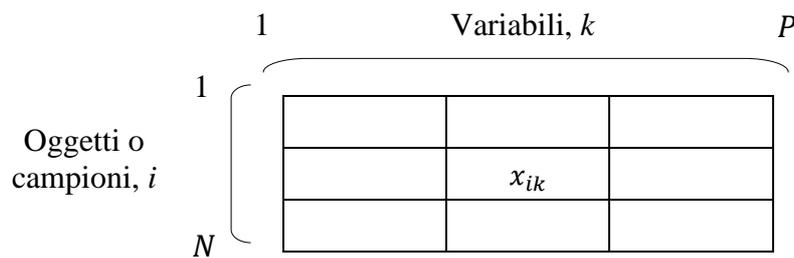


Figura 1 – Matrice dei dati

In questo spazio  $P$ -dimensionale, l'analisi delle componenti principali può essere vista come quel metodo che ricerca il miglior iperpiano di  $A$ -dimensioni adatto a descrivere i punti presenti e ciò viene fatto utilizzando la tecnica numerica dei minimi quadrati. Ciò che si andrà ad analizzare, grazie a questa nuova rappresentazione, sarà la varianza totale dei dati. Più precisamente, si andrà a esaminare lo scostamento dei dati rispetto al loro valore medio centrale,  $\bar{x}_k$ , e la relativa disposizione lungo le varie direzioni nello spazio.

Per poter iniziare lo studio chemiometrico è necessario realizzare un pretrattamento dei dati contenuti nella matrice  $N \times P$ , chiamato autoscaling, con il quale ciascuna variabile viene scalata, cioè moltiplicata per il proprio peso,  $\frac{1}{SD_k}$ , ovvero l'inverso della sua deviazione standard. Questa fase è necessaria per dare a ciascuna variabile la stessa possibilità di mostrarsi efficace.

A questo punto, si inizia la costruzione del modello predittivo per espansioni successive, individuando prima il baricentro di tutti i punti, ovvero la media (dimensionalità del modello,  $A=0$ ):

$$x_{ik} = \bar{x}_k + e_{ik}^0 \quad \text{eq. 1}$$

in cui  $e_{ik}^0$  è il residuo del modello, cioè la distanza del punto reale dal baricentro.

Si prosegue andando a individuare la direzione massima di informazione, cioè la retta lungo la quale si dispongono la maggior parte dei punti e che interseca il baricentro ( $A=1$ ):

$$x_{ik} = \bar{x}_k + t_{i1}p_{k1} + e_{ik}^1 \quad \text{eq. 2}$$

Infine, se la disposizione dei punti ancora è tale da non essere ben descritta con una semplice retta, si può continuare andando a individuare la direzione preferenziale di informazione fra quelle ortogonali alla prima. Si individua a questo punto un modello planare ( $A=2$ ), i cui assi cartesiani rappresentano le due componenti principali, cioè le

combinazioni lineari delle variabili originarie, quindi le nuove direzioni nello spazio multivariato:

$$x_{ik} = \bar{x}_k + t_{i1}p_{k1} + t_{i2}p_{k2} + e_{ik}^2 \quad \text{eq. 3}$$

L'espansione può procedere fino a ottenere anche iperpiani ( $A > 2$ ), per poi arrestarsi quando il modello non è più in grado di aumentare la sua capacità predittiva.

Più in generale, l'espressione statistica del modello che rappresenta ciascun elemento della matrice,  $x_{ik}$ , è la seguente:

$$x_{ik} = \bar{x}_k + \sum_{a=1}^A (t_{ia}p_{ak}) + e_{ik}^A \quad \text{eq. 4}$$

dove la sommatoria è estesa al numero di componenti  $A$  che l'operatore ritiene di dover individuare, sempre tenendo conto che generalmente la prima componente, cioè la prima direzione di massima informazione individuata, spiega la maggior parte della variabilità totale. La PCA, quindi, ha permesso di suddividere la variazione totale della matrice iniziale dei dati in una parte legata alle sole variabili,  $p_{ak}$ , una ai soli oggetti,  $t_{ia}$ , e una parte casuale,  $e_{ik}^A$ , costituita dai residui, che rappresenta la variazione non sistematica. I parametri legati alle variabili sono i loadings, mentre quelli che variano con gli oggetti sono chiamati scores.

Facendo riferimento allo spazio  $P$ -dimensionale precedentemente evidenziato, i coefficienti  $p_{ak}$  determinano la direzione, rispetto agli assi ortogonali, della retta (o del piano, ecc.) che passa per il punto  $\bar{x}_k$ , definito dai valori medi di ciascuna variabile. Il segno  $+ o -$  a cui possono essere associati indica la direzione lungo la quale tendono ad aumentare i valori. I coefficienti  $t_{ia}$  indicano, invece, la posizione sul modello della proiezione dell'oggetto  $i$ . La deviazione standard del vettore dei residui  $e_{ik}$  misura, infine, la distanza ortogonale fra il punto  $i$  e il piano modello.

Una volta determinato il numero delle componenti significative  $A$ , la stima dei coefficienti che risolvono la matrice è un problema puramente numerico.

Al fine di facilitare l'interpretazione dei risultati, l'uso di rappresentazioni grafiche è di estrema utilità. I valori di  $t_i$  e di  $p_k$ , infatti, possono essere usati in diagrammi che mostrano la struttura dei dati nello spazio  $P$ -dimensionale (Figura 2).

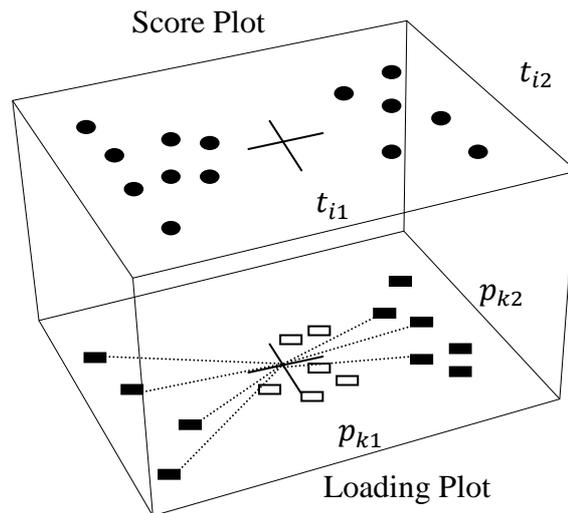


Figura 2 – Score Plot e Loading Plot

In particolare, nel caso di una dimensionalità pari a 2, se si diagrammano i valori di  $t_{i1}$  contro quelli di  $t_{i2}$ , si ottiene lo score plot o diagramma delle componenti principali. Questo è il grafico relativo agli oggetti e, in base a come questi si dispongono, si possono individuare quali sono le caratteristiche più significative per semplificare il processo di classificazione. Ciò che deve essere valutato sono le distanze relative fra i punti e quindi la presenza o meno di eventuali raggruppamenti, poiché all'aumentare della distanza fra due punti, aumenta la diversità fra gli stessi. La loro posizione relativa è, quindi, lo scopo dell'analisi.

Diagrammando, invece, i valori di  $p_{k1}$  contro quelli di  $p_{k2}$ , si ottiene un diagramma chiamato loading plot. Questo grafico indica le informazioni presenti in ciascuna variabile. Permette di analizzare il loro ruolo nella definizione delle diverse componenti principali e le loro interazioni: le variabili altamente correlate fra di loro si trovano infatti molto vicine (coefficiente di correlazione,  $r$ , è  $\approx 1$ ) o in punti diametralmente opposti rispetto al centro del diagramma stesso ( $r \approx -1$ ); infine, le variabili che contengono informazioni diverse e quindi complementari alla struttura dei dati sono dunque quelle disperse nel diagramma, con angoli al centro vicini a  $90^\circ$ .

Questi diagrammi devono essere analizzati insieme per poter definire le componenti principali, per evidenziare e caratterizzare eventuali raggruppamenti, per analizzare la rilevanza di ciascuna variabile, per vedere se ci sono misure errate o che disturbano, ecc.

Con il metodo dell'analisi delle componenti principali, quindi, si possono ricavare informazioni estremamente utili, partendo da una semplice matrice di dati ottenuta in seguito alla realizzazione di un certo numero di test:

- Il numero delle componenti significative del modello: questo permette di identificare il numero delle variabili latenti realmente efficaci nel definire la struttura dei dati;
- I valori dei loadings,  $p_{ak}$ : questi permettono di stabilire il grado di associazione fra le variabili che sono state usate per costruire la matrice. Il confronto permette di stabilire la rilevanza relativa di ciascuna variabile nella combinazione lineare che definisce ciascuna componente e permette inoltre di verificare, attraverso la loro indipendenza, se alcune delle variabili misurino sostanzialmente gli stessi effetti;
- I valori degli scores,  $t_{ia}$ : questi si riferiscono agli oggetti e indicano la loro posizione sul piano del modello predittivo costruito. È possibile evidenziare eventuali raggruppamenti dei punti in sottogruppi omogenei e può, quindi, essere usato come un metodo di pattern recognition per problemi di classificazione;
- Informazione contenuta nei residui,  $e_{ik}$ : questi valori descrivono la parte non sistematica della serie dei dati, cioè la parte non spiegata dal modello.

### 3.3 La chemiometria e i Beni Culturali

In questi ultimi anni, anche nel campo della conservazione dei Beni Culturali questo particolare approccio statistico sta iniziando a essere progressivamente utilizzato. In questo settore necessariamente interdisciplinare, la componente scientifica sta diventando fondamentale, se non essenziale poiché permette di descrivere qualitativamente e quantitativamente i materiali, l'ambiente e le loro interazioni. La quantità di dati da raccogliere e analizzare, pertanto, è estremamente aumentata e la chemiometria può aiutare in questo senso, perché metodi di classificazione come la PCA permettono di trasformare una matrice di numeri in due diagrammi altamente significativi, analizzando i quali è possibile estrarre informazioni sugli esperimenti considerati, al fine di ottimizzarli e razionalizzarli.

Come già detto in precedenza, presso il Dipartimento di Chimica dell'Università degli Studi di Perugia, nel gruppo di ricerca della prof.ssa Assunta Marrocchi e della prof.ssa Maria Laura Santarelli, sono stati condotti numerosi esperimenti per studiare la capacità inibitoria di sostanze organiche altamente funzionalizzate, quali il citrato, il

fosfocitrato, il maleato e il tartrato. Questi inibitori sono stati applicati sui substrati lapidei fra i più sensibili al fenomeno della cristallizzazione salina, quali il tufo, il laterizio e alcune pietre calcaree, poi trattati con vari sali, quali il cloruro e il solfato di sodio (anche in miscela), il solfato di calcio e il bicarbonato di sodio. Si è deciso, quindi, di utilizzare lo studio chemiometrico per meglio individuare le correlazioni fra tutti i dati ottenuti, sia in precedenza che durante questo lavoro di tesi, e tentare di andare così verso una razionalizzazione dell'applicazione di questo metodo ai diversi casi di degrado indotto dai sali.

### 3.4 Trattamento dei dati sperimentali

Sono stati presi in considerazione 41 esperimenti, ognuno rapportato a un singolo provino, da cui sono emersi 140 oggetti. Ciascun oggetto è stato poi identificato con un codice composto da quattro lettere, una per ogni particolarità che si voleva mettere in evidenza (Tabella 1).

Tabella 1 – Identificazione dei campioni

<b>Materiale</b>	T: tufo R: mattone N: pietra di Noto P: pietra di Palazzolo A: pietra di Malta Soll B: pietra di Malta Franka (tipo bajda) C: pietra di Malta Franka (tipo safra)
<b>Sale</b>	C: NaCl S: Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> K: miscela NaCl (3): Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1) Z: miscela NaCl (1): Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (3) X: miscela NaCl (1): Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1) O: CaSO <sub>4</sub> H: miscela NaCl (1): NaHCO <sub>3</sub> (1)
<b>Inibitore</b>	F: fosfocitrato C: citrato L: maleato T: tartrato N: non trattati
<b>Concentrazione</b>	6: B 5: M 4: A 0: non trattati

Ciascun oggetto, poi, è stato caratterizzato da 9 variabili indipendenti, cioè dai valori di perdita di acqua per evaporazione per unità di superficie esposta ( $\Delta W/S$  espressi in  $g/cm^2$ ) presi in nove tempi, scelti in modo tale da evidenziare i tre momenti principali di ogni esperimento, ovvero l'inizio, la parte centrale e la fine. Nei casi in cui i valori non erano presenti, ne è stata segnalata la mancanza, utilizzando un particolare codice del programma.

Si è ottenuta, così, la matrice dei dati necessaria per la realizzazione dello studio chemiometrico, la quale è stata elaborata utilizzando il software SIMCA.

In Tabella 2 è evidenziato un esempio del data set ottenuto.

Tabella 2 – Esempio del data set ottenuto

		<b>Variabili, k</b>								
		$\frac{\Delta W}{S}$ 76	$\frac{\Delta W}{S}$ 95	$\frac{\Delta W}{S}$ 120	$\frac{\Delta W}{S}$ 144	$\frac{\Delta W}{S}$ 168	$\frac{\Delta W}{S}$ 242	$\frac{\Delta W}{S}$ 311,5	$\frac{\Delta W}{S}$ 407,5	$\frac{\Delta W}{S}$ 504,5
<b>Oggetti, i</b>	<b>1</b>	<b>TKF4</b>								
	<b>2</b>	<b>RSL6</b>								
	<b>3</b>	<b>NCN0</b>				$x_{ik}$				
	<b>4</b>	<b>PCF5</b>								
	<b>5</b>	<b>AHF6</b>								
	$\infty$	...	...	...	...	...	...	...	...	...

A questo punto si è andati a costruire il modello predittivo arrivando a una dimensionalità,  $A$ , pari a 2. Si è ottenuto, quindi, un modello planare i cui assi cartesiani rappresentano le combinazioni lineari delle nove variabili originarie, cioè le nuove direzioni nello spazio multivariato.

La variazione totale della matrice dei dati, a questo punto, è stata divisa nella parte legata alle sole variabili, i loadings  $p$ , nella parte legata ai soli oggetti, gli scores  $t$ , e nella parte casuale, costituita dai residui, che rappresenta la variazione non sistematica. Si sono andati a calcolare, quindi, questi coefficienti e poi sono state individuate le relative rappresentazioni grafiche, rispettivamente, il loading plot e lo score plot. I grafici e la loro interpretazione verrà evidenziata nel paragrafo successivo.

### 3.5 Risultati e discussione

È stato ottenuto lo score plot o diagramma delle componenti principali (Figura 3), cioè il grafico in cui compaiono gli oggetti o campioni che sono stati presi in considerazione. Ciascuno di questi assume una posizione ben precisa, le cui coordinate sono date dai valori degli scores,  $t$ , ricavabili dall'equazione 3 del par. 3.2, poiché la dimensionalità  $A$  è pari a 2. Ciò che deve essere valutato è la distanza fra i punti: al suo aumentare, aumenta la diversità fra gli stessi. La loro posizione è relativa, quindi, non è un elemento da tenere in considerazione.

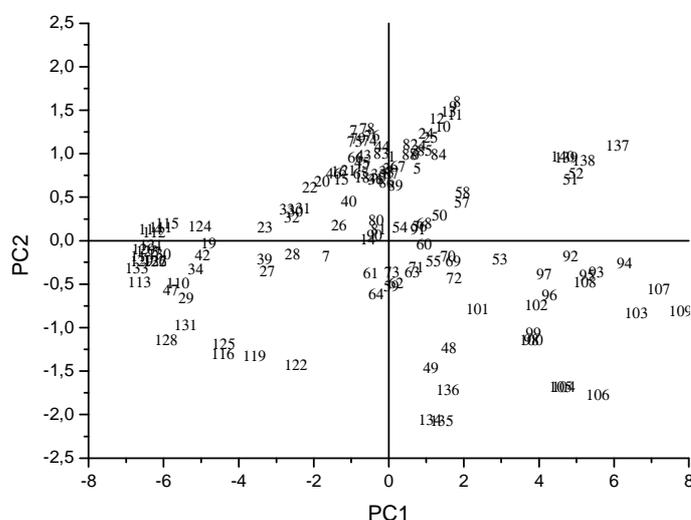


Figura 3 – Score Plot

A una prima analisi del grafico ottenuto emerge che i dati tendono a raggrupparsi in funzione della tipologia di materiale (Figura 4). Abbiamo, quindi, al centro il tufo e il mattone, a sinistra le tre pietre di Malta e a destra le pietre siciliane. Negli ultimi due casi, inoltre, è possibile anche individuare le relative sottocategorie. Le pietre Globigerina di Malta, pur essendo esteriormente identiche, si suddividono in due gruppi, Soll (tipo A) e Franka, il quale a sua volta si divide in Bajda (tipo B) e Safra (tipo C). Tale distinzione è emersa anche nel grafico. Stesso discorso vale per le pietre di Noto e Palazzolo.

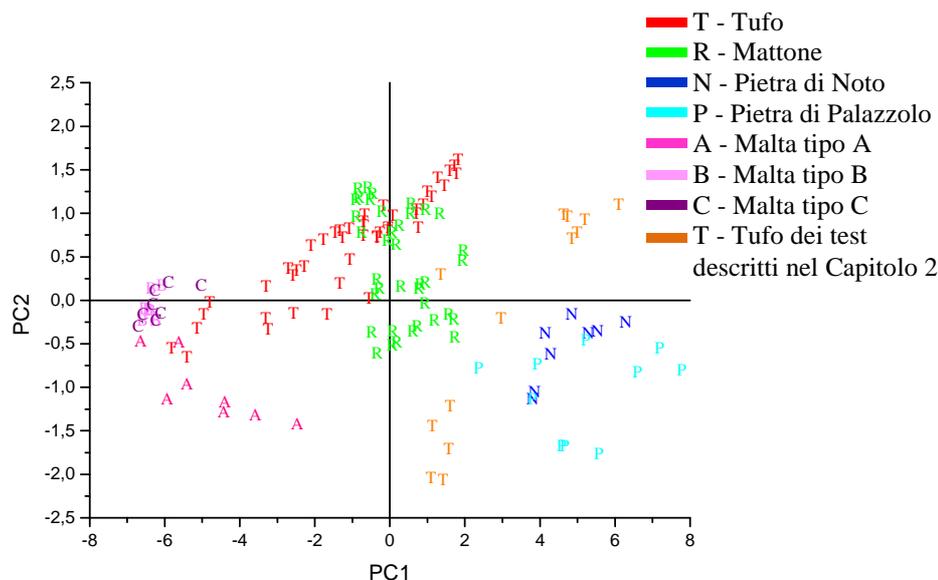


Figura 4 – Score Plot: in evidenza le diverse tipologie lapidee

Si può notare, inoltre, che compaiono numerose sottocategorie in funzione degli esperimenti: più precisamente gli oggetti che si riferiscono a uno stesso esperimento tendono a riunirsi in gruppi, anche se non ben definiti, identificabili dalla presenza di insiemi di numeri consecutivi (Figura 3).

Non emergono, poi, ulteriori raggruppamenti in funzione delle tipologie saline (Figura 5), degli inibitori (Figura 6) e delle relative concentrazioni (Figura 7).

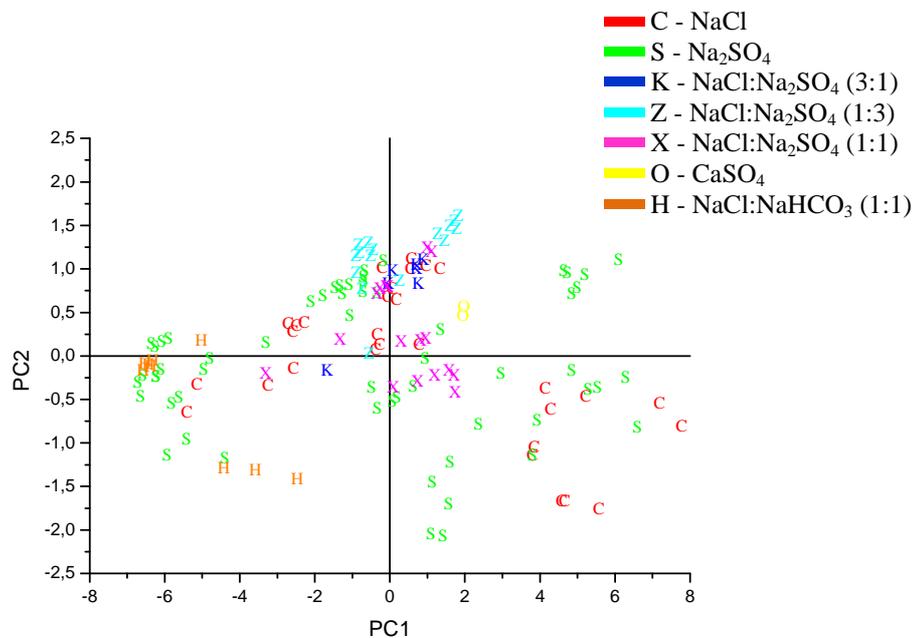


Figura 5 – Score Plot: in evidenza le diverse tipologie saline

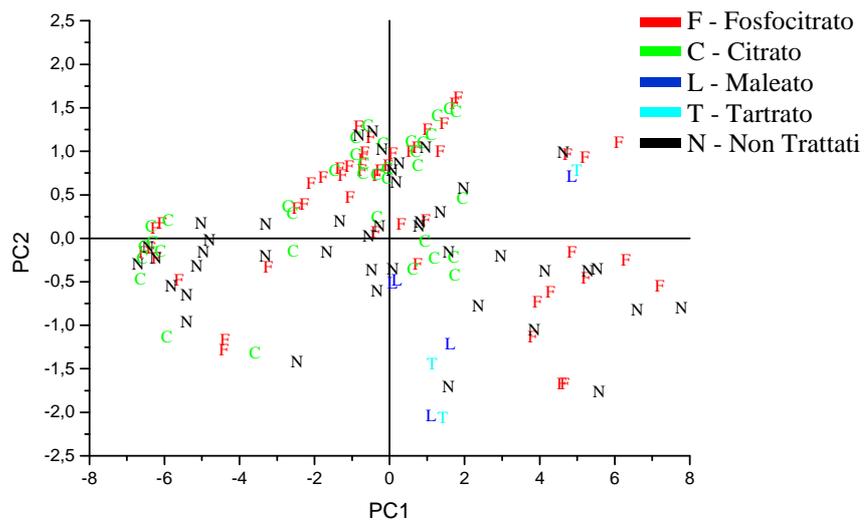


Figura 6 – Score Plot: in evidenza i diversi inibitori applicati

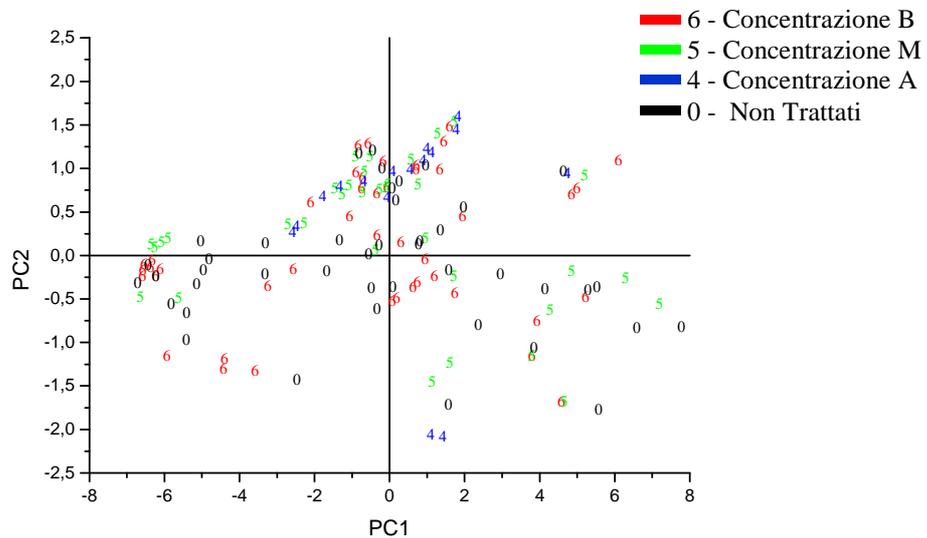


Figura 7 – Score Plot: in evidenza le diverse concentrazioni degli inibitori

Analizzando, poi, le distanze reciproche fra i vari punti, si può vedere che, soprattutto nel caso del tufo (Figura 8), le distanze fra i provini trattati e non sono notevoli.

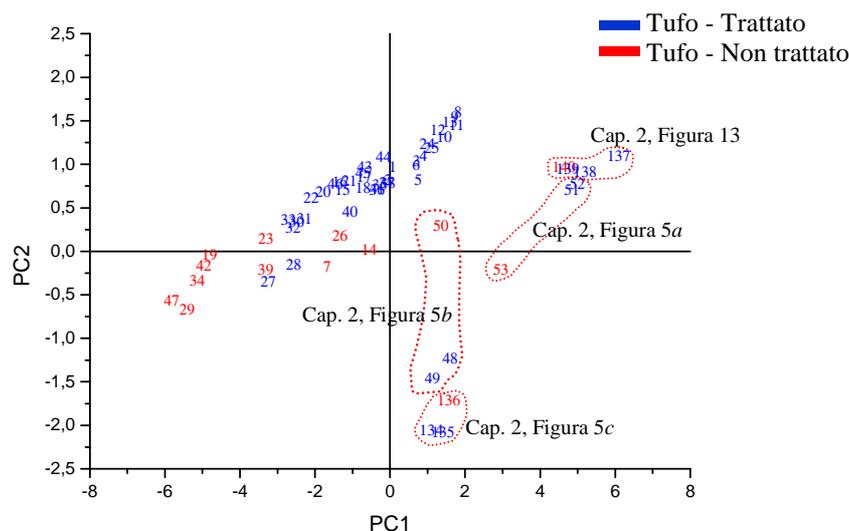


Figura 8 – Score Plot dei soli campioni riguardanti il tufo.  
In evidenza gli oggetti che si riferiscono agli esperimenti presentati nel Capitolo 2

Ciò può far sostenere che, soprattutto su questo tipo di materiale, il trattamento porta senz'altro a una modifica dell'andamento del flusso capillare della soluzione salina attraverso il materiale poroso. Prendendo in considerazione i grafici relativi alle esperienze presentate in questo lavoro, si può sostenere questa ipotesi in quanto da essi si può osservare come la presenza di un inibitore favorisca effettivamente un risultato diverso, che può essere espresso in termini di una maggiore e più veloce perdita di acqua per evaporazione, condizione questa che favorisce lo sviluppo delle efflorescenze.

Sempre valutando la distanza fra due punti si è cercato, poi, di valutare se inibitori diversi producano in realtà risultati simili. Anche in questo caso, le esperienze presentate nel capitolo precedente hanno permesso di poter sostenere questa ipotesi. In ogni test realizzato, gli andamenti delle curve di ciascun inibitore tendono a essere abbastanza simili, mostrando così una modalità di azione comparabile. Infatti, nello score plot ottenuto (Figura 8), gli oggetti che si riferiscono a tali esperienze si trovano vicini.

Si è ottenuto poi il loading plot (Figura 9), cioè il grafico che indica i contributi delle variabili nella definizione delle diverse componenti principali e le loro interazioni. Anche in questo caso le variabili assumono posizioni ben precise, le cui coordinate sono date dai valori dei loadings,  $p$ , ricavabili dall'equazione 3 del par. 3.2.

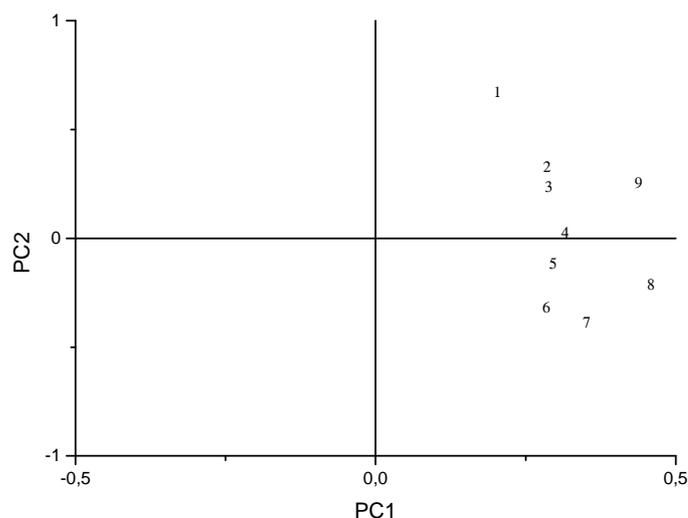


Figura 9 – Loading Plot

Si può notare che le variabili sono tutte disposte sulla destra rispetto al centro del grafico, perciò tutte contribuiscono in modo simile e positivo alla definizione della prima componente principale. Per quanto riguarda invece la seconda, occorre analizzare la posizione: si può notare che le variabili più influenti sono soprattutto la prima e le ultime poiché sono quelle che hanno gli angoli rispetto al centro maggiori. Trovandosi all'incirca in posizioni diametralmente opposte, inoltre, contengono informazioni complementari. Andando a fare un confronto con lo score plot, infatti, è possibile ipotizzare che gli oggetti che si trovano nella parte alta abbiano valori di perdita di acqua per evaporazione,  $\frac{\Delta W}{S}$ , maggiori nella parte iniziale dell'esperimento; e che, invece, quelli che si trovano in basso abbiano avuto la tendenza inversa, cioè che per loro la perdita di acqua sia stata maggiore nel lungo periodo. Ne sono una possibile conferma gli esperimenti presentati in questo lavoro: i provini trattati con maleato e tartrato alla concentrazione B (oggetti n. 51-52) si trovano nella parte alta del grafico, mentre quelli alle concentrazioni M e A (rispettivamente, oggetti n. 48-49 e n. 134-135) nella parte bassa del grafico (Figura 8). Osservando i loro andamenti nei grafici esposti nel capitolo precedente (Cfr. Capitolo 2, par. 2.5, Figura 5), infatti, si ha la dimostrazione di quanto ipotizzato dallo studio del loading plot.

### 3.6 Conclusioni

In primo luogo, il raggruppamento dei dati che emerge in modo più evidente nello score plot è quello in funzione della tipologia lapidea. È interessante vedere che le pietre di Malta e siciliane, pur essendo entrambe di natura calcarea, si siano disposte ai due lati del grafico. Tuttavia, come già accennato nel paragrafo 3.2, la posizione che assumono i dati è relativa, quindi non è da escludere che in seguito all'aggiunta di ulteriori oggetti, questi due gruppi tendano ad avvicinarsi. Potrebbero essere fatte riflessioni più approfondite se si aggiungessero dei parametri che vadano meglio a discriminare il supporto, come la porosità.

Sono comparse, poi, numerose sottocategorie in funzione degli esperimenti: più precisamente, gli oggetti che si riferiscono a uno stesso esperimento tendono a riunirsi in gruppi, anche se non ben definiti, identificabili dalla presenza di raggruppamenti di numeri consecutivi.

Non emergono raggruppamenti in funzione degli inibitori, anche perché gli oggetti che si riferiscono ai due nuovi idrossiacidi qui studiati, il maleato e il tartrato, sono pochi; inoltre, non compaiono raggruppamenti in funzione delle tipologie saline e delle concentrazioni degli inibitori. Questi elementi, perciò, non sembrano costituire dei criteri classificatori delle varie esperienze, in quanto non sembrano condizionare la disposizione dei dati.

Successivamente è stato interessante osservare la distanza fra i vari campioni. Come già evidenziato, a una maggiore distanza corrisponde una maggiore differenza fra due punti considerati. Questo può essere un importante elemento di valutazione, in quanto può aiutare a definire analogie e disuguaglianze fra i vari trattamenti e le diverse concentrazioni.

Dal loading plot è stato possibile presupporre, poi, che i momenti più determinanti durante la realizzazione di un trattamento siano l'inizio e la fine, in quanto aiutano a capire come la presenza di un inibitore vada a influenzare l'entità del fenomeno della risalita capillare nel tempo. Infatti, le varie esperienze realizzate (Cfr. Capitolo 2, par. 2.5, Figura 5 e Figura 13) hanno dato prova del fatto che l'applicazione di questo tipo di sostanze facilita e favorisce il passaggio del flusso di soluzione salina attraverso la rete capillare, promuovendo così l'evaporazione sulla superficie (efflorescenze) piuttosto che all'interno, con conseguente diminuzione dei fenomeni di degrado indotti da cristallizzazione salina.

L'applicazione dello studio chemiometrico ha permesso, quindi, di esaminare da un nuovo punto di vista i dati sperimentali raccolti durante questi anni di ricerca.

## CAPITOLO 4

### CASO-STUDIO: IL TEMPIO DI VEIOVE A ROMA

#### 4.1 Il Campidoglio

Il Campidoglio, insieme all'Esquilino, al Viminale, al Celio, al Palatino, al Quirinale e all'Aventino, è uno dei sette colli su cui venne fondata Roma il 21 aprile del 753 a.C., data stabilita dallo storico Varrone e tradizionalmente accettata.

Il mito vuole, tuttavia, che questo luogo fosse abitato già da tempi più antichi. In particolare, si ritiene che qui vi fosse Saturnia, il più antico centro abitato edificato dal dio Saturno<sup>11</sup>; invece, secondo la versione presentata da Virgilio nell'Eneide, Eracle sbarcò nei pressi del Foro Boario<sup>12</sup> per far visita a Evandro, re di Pallanteo<sup>13</sup>, e fondò qui un villaggio greco [1]. Conferme più concrete si sono avute dai numerosi rinvenimenti archeologici. Sono stati scoperti frammenti ceramici risalenti alla tarda età del Bronzo presso l'area sacra di Sant'Omobono, ai piedi del colle [1]; più recentemente, nell'area del Giardino Romano del Palazzo dei Conservatori sono emerse tracce di un insediamento protostorico con tombe a inumazione, possibili resti di capanne e impianti per la lavorazione del ferro che, in base ai frammenti di ceramica rinvenuti, si può datare dalla media età del Bronzo (XVII-XIV secolo a.C.) all'età del Ferro (IX-VIII secolo a.C.) [2]; all'interno del Tabularium sono stati individuati frammenti ceramici dell'età del Bronzo e possibili resti di un fondo di capanna risalenti all'VIII secolo a.C. [2]; e, infine, negli anni 1926-27 nell'isolato tra le vie del Campidoglio, di Monte Tarpeo e la scalinata del Vignola, è stato rinvenuto un deposito votivo arcaico con ceramica miniaturistica e altre forme di offerte votive [2].

I fattori che favorirono lo sviluppo di questi primi insediamenti protourbani, qui e comunque nell'intera zona, furono essenzialmente tre: la presenza del fiume Tevere, la

---

<sup>11</sup> Ciò trova in parte riscontro nell'antichissimo culto del dio, localizzato alle pendici meridionali del colle verso il Foro Romano, dove, in età regia, venne eretta l'*ara Saturni*.

<sup>12</sup> Era l'area pianeggiante compresa fra il Campidoglio e l'Aventino in cui si svolgeva il mercato del bestiame.

<sup>13</sup> La colonia greca eretta sul Palatino prima che Romolo fondasse Roma.

vicinanza del mare e la morfologia del territorio. I rilievi presenti, pur essendo di modesta altezza, erano caratterizzati da cime pianeggianti e pendii scoscesi, quindi offrivano un'ottima difesa naturale. Inoltre, si trovavano al crocevia di due importanti vie di comunicazione e commerciali: una utilizzata per lo scambio di materie prime e lavorati soprattutto fra etruschi e greci; e una seconda che favoriva i collegamenti con la costa e, quindi, il commercio del sale tramite la via Salaria e la via Campana.

Il monte Capitolino, in particolare, aveva una posizione dominante sul Tevere, che qui presentava comodi punti di scalo. Era caratterizzato da banchi di tufo coperti da depositi argillosi e si ergeva sulla pianura acquitrinosa del Velabro<sup>14</sup> [1]. Inizialmente era unito al Quirinale da una striscia di terreno, ma questa venne poi rimossa dall'imperatore Traiano (107-113 d.C.) per la costruzione del suo Foro [1]. Anticamente era noto col nome di *Mons Tarpeius*, termine che ora è rimasto a indicare solamente l'estremità rocciosa dalla quale nell'antichità venivano gettati i traditori e i condannati a morte, la *rupes Tarpeia*<sup>15</sup> [1].

Presentava due sommità, una settentrionale chiamata *Arx*<sup>16</sup>, data la sua difficile accessibilità, e una sud-occidentale detta *Capitolium*<sup>17</sup>, poiché una leggenda narra che in questo luogo venne ritrovato<sup>18</sup> il teschio (*caput*) di un guerriero etrusco chiamato *Olus* o *Tolus*: da qui *Caput Toli*, quindi *Capitolium* [3]. Con questo termine, poi, si iniziò a indicare l'intero colle, anche perché qui venne edificato il tempio romano più importante, cioè quello dedicato alla Triade Capitolina [1].

Le cime erano ricoperte da boschi ed erano separate da una sella<sup>19</sup> denominata, appunto, *inter duos lucos* ("tra i due boschi") o, nelle fonti letterarie, veniva indicata anche col nome di *Asylum*, poiché si sostiene che in questa parte del colle, Romolo creò una zona

---

<sup>14</sup> In latino *Velabrum*, era un'area pianeggiante dell'antica città di Roma, tra i colli del Campidoglio e del Palatino. L'area doveva essere stata in origine paludosa e soggetta alle inondazioni del Tevere: secondo la leggenda qui, alle pendici del Palatino, si sarebbe fermata la cesta con i gemelli Romolo e Remo.

<sup>15</sup> Secondo Livio, durante la guerra romano-sabina, la romana vergine vestale Tarpeia e suo padre Spurio Tarpei, comandante dell'Arx capitolina ai tempi di Romolo, tradirono l'esercito romano accordandosi con il re dei Sabini, Tito Tazio, per poter avere in cambio il loro oro. I patti però non vennero rispettati e i due traditori vennero uccisi. La donna, in particolare, venne schiacciata dagli scudi dei soldati Sabini che poi la gettarono da una rupe, che prese così il suo nome. Lo storico Dionigi di Alicarnasso, invece, sostiene che i romani onorassero la tomba della vestale, poiché essa, con la scusa dell'oro, voleva cercare solo di privare i Sabini dei loro scudi. I romani poi sarebbero stati avvertiti da un messaggero. Fu proprio costui a tradire e i soldati Sabini per vendicarsi uccisero la giovane.

<sup>16</sup> Oggi vi sorge la Chiesa di S. Maria in Aracoeli.

<sup>17</sup> Oggi vi sorge il Museo dei Conservatori.

<sup>18</sup> Questo evento venne interpretato dagli indovini etruschi e romani come un presagio della futura grandezza di Roma [1].

<sup>19</sup> Corrisponde all'attuale Piazza del Campidoglio. Oggi è poco apprezzabile a causa delle stratificazioni avvenute nei secoli [1].

franca in cui dette asilo ai profughi provenienti dalle città circostanti, i quali formarono il primo nucleo di Roma [1].

All'*Asylum* si accedeva tramite vari accessi e scale<sup>20</sup>, tuttavia la strada principale, in quanto carrozzabile e generalmente utilizzata per i cortei trionfanti, era il Clivo Capitolino. Questa strada, che forse era già presente all'epoca dei re Tarquini, iniziava dal Foro Romano per poi proseguire verso il Campidoglio, anche se in realtà non si conosce l'intero suo percorso<sup>21</sup>. Venne poi lastricata in pietra dai censori Q. Fulvio Flacco e A. Postumio Albino nel 174 a.C., così da unirsi alla Via Sacra e favorire l'accesso al Tempio di Giove Capitolino [1]. Il colle, probabilmente, era circondato anche da una cinta muraria<sup>22</sup> [2].

Pur essendo il più basso (circa 50 m s.l.m.) e il meno esteso, il Campidoglio divenne subito sede dell'acropoli cittadina. Sorsero presto templi ed edifici religiosi, come quello di Giove Feretrio, costruito dallo stesso Romolo, di Terminus, di Iuventa e di Veiove [3]. Il più imponente, però, fu quello di Giove Capitolino<sup>23</sup> (Figura 1), consacrato alla Triade Capitolina, costituita da Minerva, dea della guerra e protettrice degli artigiani; da Giunone, dea del matrimonio e protettrice del focolare domestico e delle partorienti; e da Giove Ottimo Massimo, divinità suprema del pantheon romano [4]. Esso venne iniziato dal re Tarquinio Prisco; i lavori poi continuarono con Tarquinio il Superbo, fino all'inaugurazione avvenuta nel 509 a.C. per opera del console repubblicano Marco Orazio Pulvillo [1]. Davanti al tempio si estendeva l'Area Capitolina<sup>24</sup> (Figura 1), forse chiusa da portici, occupata da sacelli, statue e tempietti [1].

Altro tempio molto importante presente sull'Arx era quello di Giunone Moneta (Figura 1), aggettivo quest'ultimo indicante le sue qualità di ammonitrice e consigliera. Secondo la tradizione fu votato da M. Furio Camillo, un militare romano, a seguito di una vittoria contro gli Aurunci nel 345 a.C. [1] e venne poi dedicato nel 344 a.C. [2]. Nei pressi del

---

<sup>20</sup> Le *Centum gradus* permettevano l'accesso al Foro Boario; le *Gemoniae*, presso il carcere *Tullianum*, erano famose perché vi si esibivano i corpi dei condannati e le *Gradus Monetae*, forse la prosecuzione delle precedenti, conducevano all'*Arx* [1].

<sup>21</sup> Nel secolo scorso ci fu il ritrovamento di un tratto di basolato di fronte al Tempio di Saturno e ciò fa ipotizzare che la strada da qui andasse poi a costeggiare il Tabularium, per poi arrivare al Tempio di Giove [1].

<sup>22</sup> Sono stati ritrovati resti di mura in tufo cappellaccio risalenti al VI secolo a.C. e altri blocchi di tufo di Grotta Oscura probabilmente apposti durante le fasi costruttive successive (databili intorno al IV secolo a.C.) [2].

<sup>23</sup> Qui giungevano le cerimonie trionfali e vi erano conservati i Libri Sibyllini, una serie di testi oracolari di origine greca, introdotti da Tarquinio il Superbo [3].

<sup>24</sup> Corrisponde in parte agli attuali giardini del Belvedere Tarpeo.

tempio, sotto la protezione della dea, dal 269 a.C. fu sistemata la Zecca della città e il termine “moneta” iniziò a indicare il denaro qui coniato [1].

Tuttavia, nell’83 a.C. un incendio distrusse la maggior parte degli edifici presenti sul colle. I romani, quindi, dovettero affrontare importanti lavori di ristrutturazione e, nello stesso tempo, vennero realizzate anche nuove strutture, tra le quali emerge il *Tabularium* (Figura 1) [4]. Letteralmente il termine significa “tabulario, archivio”, infatti la struttura avrebbe ospitato l’archivio di stato romano, in cui venivano conservate tutte le leggi e gli atti ufficiali di Roma, ovvero le *tabulae publicae* bronzee [3]. Esso venne realizzato sull’Asylum fra il 78 a.C. e il 65 a.C. dall’architetto ostiense Lucio Cornelio, il quale ricevette l’incarico dal console Quinto Lutazio Catulo [3]. L’edificio era lungo circa 74 m [6] e fu costruito in opera quadrata e cementizia<sup>25</sup> [5]. Era caratterizzato da una parte inferiore che fungeva da sostruzione, sulla quale erano presenti<sup>26</sup> sei piccole finestre relative a una serie di ambienti interni e da una parte superiore che ospitava l’archivio vero e proprio. Questa si articolava su due livelli [6]:

1. Il primo si affacciava sul Foro Romano mediante dieci arcate<sup>27</sup>, inquadrate da semicolonne doriche con capitelli, architravi, fregi a triglifi e metope in travertino. Da qui si aveva accesso a una galleria coperta con una volta a padiglione e divisa in settori, ciascuno dei quali corrispondeva a un’arcata;
2. Il secondo presentava un portico costituito da colonne corinzie in travertino.

I vari piani erano collegati tramite delle scale: una, molto ripida, si trovava all’interno del basamento e collegava il piano del Foro Romano con quello del primo porticato; e una seconda portava al piano superiore [2].

La struttura aveva una pianta piuttosto regolare, tranne nell’angolo sud-occidentale, dove vi era una rientranza dovuta alla presenza del più antico Tempio di Veiove [2]. In età forse flavio-traiana venne costruito un condotto idrico nella galleria inferiore e venne chiusa la scala verso il Foro<sup>28</sup> [5].

Purtroppo, però, altri due incendi<sup>29</sup> devastarono nuovamente il colle [4].

---

<sup>25</sup> Sono entrambe delle tecniche di costruzione romane. La prima consiste nella messa in opera di blocchi di forma parallelepipedica; mentre la seconda prevedeva l’uso del cementizio, una miscela di malta e *caementa*, costituita da pietrame e ghiaia di varie dimensioni.

<sup>26</sup> Sono ancora apprezzabili.

<sup>27</sup> Oggi ne sono visibili soltanto tre.

<sup>28</sup> A causa della costruzione del Tempio di Vespasiano e Tito [2].

<sup>29</sup> Il primo, forse il più famoso, si verificò intorno al 65 d.C. sotto l’imperatore Nerone; il secondo nell’80 d.C. sotto Tito.



Figura 1 – Rappresentazione grafica degli edifici presenti sul Campidoglio in età romana.  
 (Image courtesy of Barbara F. McManus, the VRoma Project - [www.vroma.org](http://www.vroma.org), adapted from a drawing by A. Gnauth published in Hermann Bender, *Rom und Römisches Leben im Altertum*, 2nd ed. 1893, p. 50)

La grandezza che il Campidoglio ebbe durante l'età classica non si mantenne negli anni. Vari furono gli eventi che indussero tale declino, fra i principali si possono indicare l'avvento del Cristianesimo, il trasferimento della capitale a Costantinopoli e i saccheggi da parte dei popoli barbarici.

Il colle, infatti, venne progressivamente abbandonato e divenne essenzialmente un luogo utilizzato per il pascolo<sup>30</sup> e per gli scambi commerciali<sup>31</sup> [4]. Gli edifici vennero saccheggiati e privati sia dei loro interni sia dei loro rivestimenti, quasi come se fossero delle cave di materiale edilizio. Il Tabularium, invece, probabilmente per la sua imponenza, venne utilizzato come abitazione e fortezza [5].

Si dovrà aspettare il Basso Medioevo per assistere alla rinascita della zona, questa volta come centro della vita sociale e politica di Roma. Nel VI secolo d.C. sull'Arx venne edificata la Chiesa di S. Maria in Aracoeli, all'interno della quale, a volte si svolgevano anche assemblee popolari durante il periodo del libero comune [3]; nel X secolo i Corsi, una famiglia nobile romana, inglobando i ruderi del Tabularium e del Tempio di Veiove, costruirono una piccola fortezza che poi fu usata dal popolo dopo la rivolta contro

<sup>30</sup> Il colle è noto anche col nome di Monte Caprino, forse perché qui venivano portate a pascolare le capre.

<sup>31</sup> È ricordato anche col nome di Colle Fabatosta, per il fatto che nel mercato che qui aveva luogo venivano vendute soprattutto fave.

Innocenzo II per la guerra di Tivoli nel 1143 come sede del Comune, prendendo il nome di Palazzo Senatorio<sup>32</sup>, poiché era la sede del senato romano [3].

Esso subì varie modifiche e ampliamenti nel corso dei secoli, ma si trattò essenzialmente di adeguamenti a varie esigenze che si andarono presentando nel tempo. Per questo motivo, le antiche gallerie del Tabularium divennero dal quattrocento fino al XVII secolo la “salaria del Campidoglio”<sup>33</sup>, ma anche cucine, stalle e servizi del Senatore e dall’Ottocento divennero anche prigioni [5].

Accanto a questo palazzo sorsero anche altri due importanti edifici: il Palazzo dei Conservatori, che era la sede della magistratura cittadina; e il Palazzo Nuovo<sup>34</sup> [5].

La conformazione attuale della piazza risale al XVI secolo ed è opera soprattutto della maestria di Michelangelo Buonarroti, il quale si occupò anche della costruzione di case sulle pendici del colle, abbattute, però, durante lavori ottocenteschi e novecenteschi [3].

Nell’Ottocento si assistette a una riscoperta della storia greca e romana per la diffusione della nuova corrente artistica del neoclassicismo. A causa e a conseguenza di ciò, furono intraprese numerose campagne di scavo per la rimessa in luce dei tesori antichi. A Roma si assistette, così, alla riscoperta di numerosi edifici e templi, come quello di Vespasiano e Tito e della Concordia, ai piedi del Tabularium [5].

Infine, si arriva al ventennio fascista del XX secolo, durante il quale, in nome di una nuova Roma imperiale da riportare in auge, vennero avviati imponenti e eccessivi interventi pubblici. Fra i vari progetti avanzati, c’era la realizzazione della via dell’Impero fra il Campidoglio e il Colosseo e la creazione di una galleria sotterranea per collegare i tre palazzi capitolini. Ci si rese ben presto conto, tuttavia, che il sottosuolo ancora conservava una notevole quantità di testimonianze [10].

Negli anni ’90 del secolo scorso, il colle è stato oggetto di numerosi interventi di riassetto poiché iniziavano a manifestarsi problemi di stabilità geologica e le condizioni di degrado delle murature antiche richiesero consistenti lavori di consolidamento. Numerose, quindi, sono state le indagini e gli studi realizzati al fine di attuare un ampio piano di ristrutturazione di tutto il complesso monumentale del Campidoglio, anche in occasione del Giubileo del 2000 [5].

---

<sup>32</sup> Attualmente è la sede di rappresentanza del Comune di Roma.

<sup>33</sup> Il comune aveva il monopolio del sale. Si poteva accedere ai depositi anche utilizzando un ingresso laterale realizzato da papa Sisto IV nel 1447.

<sup>34</sup> Oggi i due palazzi sono le sedi espositive dei Musei Capitolini.

#### 4.2 Cenni sulla religione romana

Gli studiosi nel descrivere la religione romana arcaica [7] tendono a dividersi in due correnti di pensiero. Da una parte, ci sono i cosiddetti “primitivisti”, i quali sostengono che agli inizi il culto religioso romano fosse principalmente basato su antiche superstizioni e magie.

A sostegno di ciò si possono indicare due elementi:

- La parola latina *numen* indicava la potenza divina. Questa può essere collegata alla parola *mana* con cui i popoli primitivi tendevano a indicare ogni cosa ignota e incontrollabile;
- Insieme alle divinità romane maggiori, ce ne sono altre che rappresentano gli elementi naturali, come le acque, i boschi, i fulmini, ecc., cioè tutto ciò che non era possibile gestire.

Dall'altra parte, invece, si hanno i “comparativisti”, i quali sostengono che è possibile comprendere la religione romana solamente confrontandola con i culti delle altre popolazioni indoeuropee, soprattutto quelli provenienti dall'India, dalla Persia e dall'Europa del Nord<sup>35</sup>.

Si possono fare alcuni esempi:

- Nelle antiche religioni persiane e indiane, le divinità principali erano tre e rappresentavano generalmente la funzione sacrale e giuridica, quella guerriera e quella produttiva. Ciò si riscontra anche a Roma con la Triade Precapitolina, composta da Giove (il re degli dei), Marte (il dio della guerra) e Quirino (il dio che rappresenta il popolo romano);
- Nei culti indiani era molto diffuso il simbolo del fuoco, il quale si ritrova anche nel culto romano della dea Vesta, la dea del focolare domestico;
- Una leggenda dell'Europa del Nord narra che gli dei Odino e Try abbiano salvato il loro popolo sacrificandosi, rispettivamente, un occhio e una mano. Stessa cosa si ritrova nella leggenda romana che narra dei sacrifici che fecero Orazio Coclite e Muzio Scevola per salvare il proprio popolo.

Tuttavia, si può anche ipotizzare che le due differenziazioni qui riportate non siano altro che le due fasi iniziali della nascita della *religio* dei romani.

---

<sup>35</sup> Per lo sviluppo di queste teorie è stata fondamentale l'opera di Georges Dumézil “La religione romana arcaica” (Milano, Rizzoli, 1977).

I primi popoli che si stabilirono sui colli in epoca protostorica erano per lo più tribù ancora primitive, sia dal punto di vista politico che culturale, in cui predominavano credenze magico-pagane, basate su una deificazione della natura e dei suoi fenomeni. Il successivo contatto con popolazioni più sviluppate e organizzate, come quella degli Etruschi e dei Greci, per l'intensificarsi dei rapporti commerciali, ma anche per il loro stesso insediamento in questi luoghi, favorirà e stimolerà un'organizzazione, anche a livello culturale, più strutturata e complessa.

Le divinità romane, quindi, da una parte derivano dalla venerazione delle forze oscure e incontrollabili che potevano agire sia a loro favore che contro; e dall'altra, sono state ereditate e/o assimilate dalle tradizioni dei popoli che si sono uniti a formare Roma. Il pantheon romano continuò poi ad arricchirsi, poiché alcune figure divine vennero moltiplicate in base alle funzioni che gli venivano riconosciute (ne sono un esempio i vari appellativi attribuiti alla dea Giunone) e anche grazie alla politica della *seductio*<sup>36</sup>. Infine, nell'età imperiale si aggiunse la venerazione della figura dell'imperatore.

È importante sottolineare che, almeno all'inizio, la religione romana non era idolatrica, cioè non venivano affidati caratteri antropomorfi agli dei. Inoltre, non c'era alcun interesse verso questioni di carattere teologico e non si perseguiva un controllo della natura o una predizione del futuro. Si trattava di una religione utilitaristica, in cui il rapporto dei-uomo era essenzialmente di natura funzionale. Obiettivo dei romani, quindi, era quello di capire il volere delle divinità, ciò che li contrariasse, quali fossero i segni con cui manifestavano le loro volontà, per poter fare così offerte e sacrifici al fine di procurarsi il loro aiuto. Questo valeva sia in ambito privato che pubblico, poiché solamente la *pietas*, ovvero il rispetto del sacro e l'adempimento dei riti, poteva assicurare un'esistenza serena [8].

#### 4.3 Il culto del dio Veiove

Lo studio e la caratterizzazione delle divinità romane è stata da sempre un'attività molto difficile e complessa, poiché oltre a essere numerose, presentano una grande varietà

---

<sup>36</sup> I romani si ritenevano i vincitori di una guerra non solo se riuscivano a sconfiggere l'esercito nemico, ma anche e soprattutto se riuscivano a "convertire" le loro divinità, le quali venivano poi "invitate" a entrare a Roma, dove avrebbero mantenuto tutti i loro poteri.

di aspetti e attribuzioni. Infatti, ce ne sono alcune che ancora oggi appaiono quasi sconosciute.

Ne è un esempio il dio Veiove<sup>37</sup>, una divinità ctonia<sup>38</sup> romana che, secondo la tesi più diffusa, deriva dalla divinità italica Vetis – Vetisl [10].

Egli era un dio malefico, collegato alle ombre e all'oscurità e considerato, per questo, l'antitesi del dio della luce, Giove. Da qui probabilmente deriva il nome, costituito dal prefisso diminutivo e privativo *ve-* associato, appunto, a *Iovis* [10].

I romani lo veneravano compiendo riti e sacrifici di animali, per tenere così sotto controllo la sua collera affinché non li danneggiasse.

Si conoscono anche alcune famiglie che avevano tale divinità fra i propri culti domestici. Infatti, essa compare nelle monete coniate dalle gens di origine plebea Caesia e Fonteia (Figura 2) e da una delle gens patrizie più illustri della repubblica, la Julia<sup>39</sup> [10].



Figura 2- Denaro di Manio Fonteio (85 a.C.).  
(Immagine cortesemente concessa da Thesaurus srl -  
[www.thesaurus.sm](http://www.thesaurus.sm).  
Auction "Gemini" November 10, 2012)

Tuttavia, la sua raffigurazione dell'età più recente non presenta nulla di negativo: ispirandosi probabilmente all'iconografia religiosa ellenistica, la divinità veniva rappresentata come un giovane Apollo o Mercurio, con in mano un mazzo di fulmini o più probabilmente frecce, la clamide appoggiata sulla spalla e con accanto una capra, l'animale a lui sacro<sup>40</sup> [10]. Col tempo, quindi, la sua rappresentazione cambiò, tanto che dall'età imperiale iniziò a essere raffigurato addirittura privo di barba e attributi, quasi come se fosse un Giove fanciullo o un vero Apollo. Probabilmente ciò è la conseguenza della progressiva perdita di importanza del culto, testimoniata anche dal graduale abbandono dei suoi templi. A causa delle notizie molto scarse e incerte, non è possibile stabilire se il culto sia stato ripreso quando è andata al potere la famiglia degli Julii o se, a questo punto, sia stato completamente convertito in Apollo [10].

<sup>37</sup> In forma più antica Vediovis o Veiovis.

<sup>38</sup> Il termine ha origine dal Mito di Ctonie, il quale narra del matrimonio fra *Zeus*, il padre degli dei, e *Ctonie*, cioè la Sottoterra. Questa, in seguito alle nozze, divenne *Gea*, la Terra, poiché ricevette in dono un mantello formato dalla vegetazione e dalle terre emerse che andò a coprire le sue sembianze infernali originarie. La parola, quindi, è utilizzata per indicare i culti degli dei legati al mondo sotterraneo o che simboleggiano le forze sismiche e vulcaniche.

<sup>39</sup> Era la famiglia di Gaio Giulio Cesare, la quale annoverava fra i suoi antenati anche Romolo.

<sup>40</sup> Sia i fulmini che la capra collegano Veiove di nuovo alla figura di Giove, il dio romano dei fulmini che venne allattato dalla Capra Amaltea.

Come indica Ovidio nella sua opera “Fasti”, era in suo onore la terza Agonalia, che cadeva il 21 maggio di ogni anno. A lui erano dedicati due templi, uno sul Campidoglio e uno sull’Isola Tiberina [10].

#### 4.3.1 Il Tempio sul Campidoglio

Il primo sacello romano dedicato al culto di Veiove fu realizzato da Romolo sul Campidoglio, presso l’Asylum. Ciò trova riscontro nelle indicazioni presenti nelle opere di vari autori latini, come Aulo Gellio<sup>41</sup>, il quale narra di un “(...) *aedes Veiovis Romae inter Arcem et Capitolium*”, Livio, Vitruvio e Ovidio [9]. Molto probabilmente era presente solamente un’ara adibita al culto, poiché dagli scavi archeologici non sono emerse tracce di una struttura risalente a tale periodo [10].

Il Tempio vero e proprio venne votato nel 196 a.C. dal console Lucio Furio Purpurione nella battaglia di Cremona, durante la lotta contro i Galli Boi e dedicato nel 192 a.C. da Quinto Marcio Ralla [2]. Non è ancora ben chiaro quale fosse la pianta dell’edificio in questa prima fase. In base ai resti rinvenuti<sup>42</sup>, probabilmente si trattava di un’edicola orientata da S-SW a N-NE (Figura 3b), costituita da un pronao tetrastilo che introduceva a una cella divisa da colonne in tre navate, di cui quella centrale rialzata. Il pavimento era formato da sottili lastre di tufo e dalla differenza fra esso e la pavimentazione esterna, anch’essa in tufo, si è stimato che l’altezza del podio fosse di circa 0,60 m, pari a due gradini. Il tutto poggiava su fondazioni in blocchi di tufo di Grotta Oscura [10].

Alcuni anni dopo, intorno al 150 a.C., vennero realizzati qui vicino edifici di tipo ellenistico-romano con pavimenti di *opus signinum*<sup>43</sup> e di mosaico: probabilmente si trattava di edifici pubblici destinati a essere usati come uffici e archivi. In questo stesso momento, il Tempio subì un rinnovamento, quindi si può individuare una sua seconda fase costruttiva (Figura 3c). L’orientamento e la forma della pianta rimasero inalterate ma la struttura venne quasi del tutto smembrata. Le fondamenta vennero ricostruite con la nuova tecnica del calcestruzzo, l’alzato e la struttura perimetrale del pronao in *opus quadratum* con blocchi di tufo di Grotta Oscura, mentre non si conosce il materiale usato per le parti intagliate, quali colonne e cornici. Le pareti interne della cella vennero

---

<sup>41</sup> (125 d.C. ca – 166 d.C. ca) fu uno scrittore e giurista romano.

<sup>42</sup> Riferibili a tale fase per la presenza di frammenti di ceramica etrusco-campana nello strato su cui poggiavano i blocchi interni e il pavimento connesso, poiché questa è stata in uso fra il III e il II secolo a.C.

<sup>43</sup> Cocciopesto.

rivestite con intonaci colorati a fondo unito e venne realizzato un pavimento di mosaico bianco, il quale poggiava su uno strato di *opus signinum*. Anche l'altezza del podio aumentò, arrivando a circa 1,80 m [10].

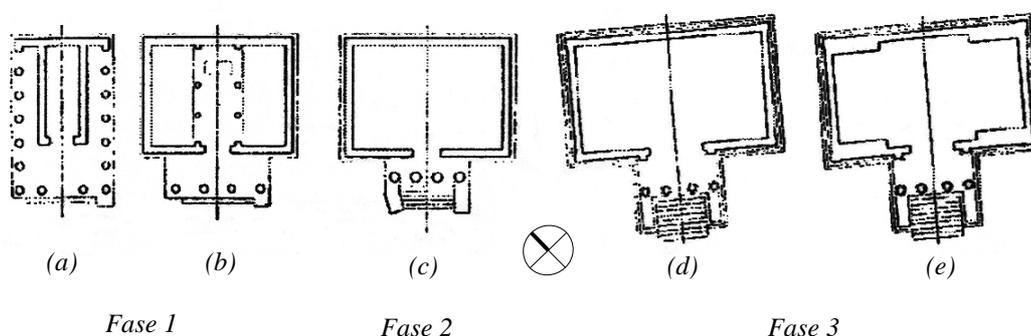


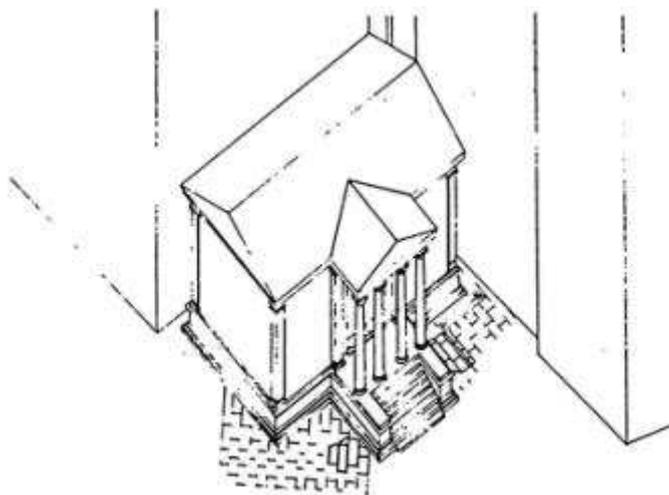
Figura 3 – Fasi costruttive del Tempio.

(Immagine tratta da Antonio Maria Colini, 1942. *Aedes Veiovis Inter Arcem et Capitolium*. «*Bullettino della Commissione Archeologica del Governatorato di Roma*», Roma, 70, pp. 5-56, opera appartenente alla Biblioteca di Archeologia e Storia dell'Arte, Roma)

In seguito alla costruzione del Tabularium nel 78 a.C., la maggior parte degli edifici pubblici suddetti vennero distrutti o inglobati da esso. Il piccolo Tempio non solo venne rispettato, ma addirittura si decise per una sua ristrutturazione. Si individua, pertanto, una sua terza e ultima fase (Figura 3d). La forma della pianta venne conservata, ma si decise di ampliare la struttura, così da sfruttare il nuovo spazio disponibile. Venne aumentata sia la larghezza della cella che la profondità del pronao e si scelse un orientamento diverso così da renderlo più armonioso con la nuova struttura che lo aveva avvolto su due lati. Per le fondazioni e l'alzato si usarono sempre le stesse tecniche e gli stessi materiali, solo le lesene agli angoli esterni e ai lati della porta vennero realizzati in tufo litoide; la facciata, la trabeazione e il podio vennero rivestiti con lastre e cornici di travertino; e infine, il pavimento venne realizzato sempre in mosaico bianco [10].

Il Tempio, quindi, ora assume la sua forma definitiva, consistente in una cella a pianta allungata trasversalmente di dimensioni esterne pari a circa 15 × 8,90 m, posta su un podio alto circa 1,77 m, a cui deve aggiungersi lo stereobate emergente dal pavimento di 0,20-0,40 m circa. La facciata era allineata con la strada che saliva dal Clivo Capitolino [2] ed era costituita nella parte centrale da un pronao tetratilo<sup>44</sup>, preceduto da una scalinata di dieci gradini racchiusa fra due ante (Figura 4) [10].

<sup>44</sup> Non sono stati ritrovati frammenti di capitelli che possano indicare se il Tempio fosse ionico o corinzio.



*Figura 4 – Ricostruzione del Tempio nella sua terza e ultima fase.  
 (Immagine tratta da Antonio Maria Colini, 1942. *Aedes Veiovis Inter Arcem et Capitolium*. «*Bullettino della Commissione Archeologica del Governatorato di Roma*», Roma, 70, pp. 5-56, opera appartenente alla Biblioteca di Archeologia e Storia dell'Arte, Roma)*

Si tratta di uno schema molto particolare, probabilmente ripreso dall'architettura ellenistica laziale e/o da quella italica, la cui scelta è stata quasi obbligata a causa della mancanza di spazio per la presenza di altri edifici [10].

Il Tempio venne poi restaurato da Domiziano, dopo che Roma venne devastata dal grave incendio del 65 d.C. Vennero costruiti negli angoli della cella quattro piloni laterizi a sostegno di una volta a crociera<sup>45</sup> che lo rese inattaccabile dal fuoco (Figura 3e), venne realizzato un nuovo pavimento in marmo, un rivestimento parietale con marmi policromi e una decorazione di stucchi colorati nella volta. A questo periodo risalgono molto probabilmente anche l'ara, forse collocata nel pronao, e la statua votiva. In seguito la struttura non subì altre modifiche rilevanti [10].

Infine, è stato ipotizzato per la presenza di due tegole, che Teodorico, re degli Ostrogoti, cercò di rimettere mano su di esso per ristrutturarlo nel VI secolo [10].

#### *4.3.2 La riscoperta e lo stato attuale*

Una parte dell'edificio, più precisamente l'angolo rientrante sinistro del podio, è stata visibile al di sotto della scala michelangiotesca del Palazzo Senatorio fin dal Rinascimento [10]. Tuttavia, fu interpretato come un elemento della facciata settentrionale del Tabularium, anche quando nel 1901 vennero realizzate delle indagini [10]. Ci si rese conto della presenza di un vero e proprio Tempio solamente molti anni

<sup>45</sup> Prima era presente una copertura lignea.

dopo, quando negli anni '30 del secolo scorso fu disposto un programma per una nuova sistemazione dei palazzi capitolini. Fra i vari progetti predisposti, vi era la realizzazione di un collegamento sotterraneo che li collegasse (la Galleria di Congiunzione) e di conseguenza si rese necessaria una vasta esplorazione archeologica del colle [10].

La scoperta del Tempio di Veiove, avvenuta nel 1939, fu senz'altro quella più importante, anche perché il suo ritrovamento chiarì quell'irregolarità presente nell'angolo sud-occidentale della pianta del Tabularium (Figura 5) [10].

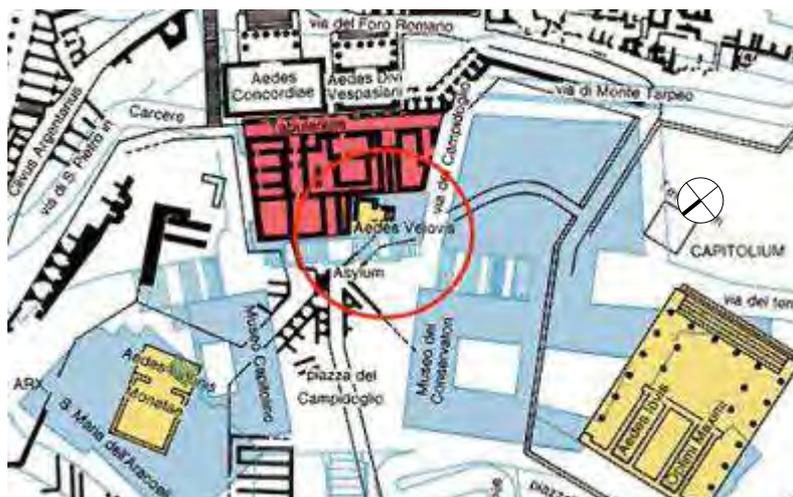


Figura 5 – Pianta del Campidoglio con l'indicazione schematica della topografia antica.

In evidenza, nel cerchio rosso, il Tempio di Veiove.

(Immagine tratta da [http://www.museicapitolini.org/sede/campidoglio\\_antico](http://www.museicapitolini.org/sede/campidoglio_antico), Roma Archivio Storico, Sovrintendenza Capitolina)

Le strutture rinvenute e ora apprezzabili all'interno dei Musei Capitolini, nei pressi della Galleria Lapidaria, appartengono alla terza e ultima fase del Tempio e si ritrovano inserite nella complessa sovrapposizione delle varie fasi costruttive che hanno interessato il Palazzo Senatorio.

Da una parte, infatti, gravano su di esse i pilastri di sostegno della Galleria di Sisto IV (Figura 6) e dall'altra vi è la struttura della scala michelangiolesca [11].

Ciò nonostante sono ancora ben evidenti la scala di accesso, tre basi delle quattro colonne del pronao e il podio (Figura 7). Sono state recuperate anche la grande statua votiva in marmo Lunense, purtroppo acefala (Figura 8), e l'ara sacra [10].



Figura 6 – Strutture che attualmente sovrastano il Tempio



*Figura 7 – Parte posteriore del podio*



*Figura 8 – Statua del dio Veiove*

Solo negli anni '90, però, si analizzò lo stato di conservazione dei resti e si realizzò un intervento di restauro. Dalle relazioni tecniche dei lavori [11], emerge che era presente un tipo di degrado da mettersi in relazione al fatto che la struttura rimase per lungo tempo interrata. Infatti, il travertino di rivestimento presentava in numerose zone depositi incoerenti e carboniosi, spesse incrostazioni calcaree, estesi attacchi biologici, una diffusa alveolizzazione (Figura 9), erosione superficiale e alterazione cromatica; tutte le superfici di tufo presentavano una consistente polverizzazione; infine, in alcuni punti sono stati riscontrati anche distacchi e perdite di materiale.



*(a)*



*(b)*

*Figura 9 – Particolare del travertino di rivestimento del podio.*

*(a) Alveolizzazione attuale; (b) Dettaglio prima del restauro*

*(Immagine tratta da Gruppo De Sanctis Costruzioni S.p.A., Impresa Edile Donati S.p.A. Tabularium e Tempio di Veiove. Intervento di restauro conservativo dei paramenti murari. Giugno 1997 - Aprile 2000. Relazione Tecnica)*

Le superfici, quindi, sono state trattate con le necessarie operazioni di pulitura e consolidamento [11].

Tuttavia, il problema principale di questo sito, ma anche di tutte le altre sale adiacenti<sup>46</sup>, è la notevole presenza di sali, soprattutto solfati e cloruri di calcio e sodio (Figura 10).

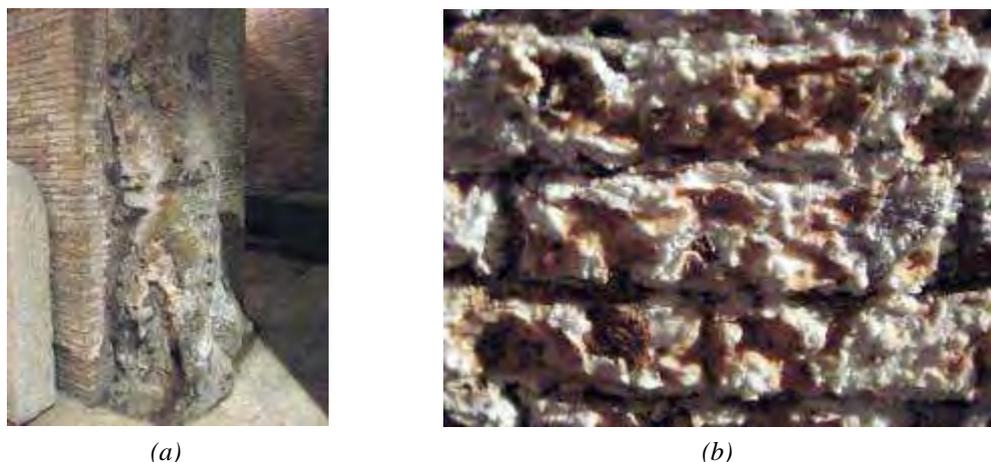


Figura 10 – Esempi di degrado da cristallizzazione salina delle pareti delle sale adiacenti al Tempio di Veiove.  
(a) Ammasso di tufo; (b) Dettaglio di una parete in laterizio

Questo tipo di degrado è stato indotto da vari fattori che hanno insistito sulle murature per molto tempo, quali il contatto con terreni umidi, la presenza nel periodo medievale di un deposito salino e le infiltrazioni di acqua provenienti dall'impianto idraulico della fontana soprastante e dalla fogna [11]. Inoltre, dal rinvenimento sul lato di NO, sul tufo dei blocchi che sporgono al di sopra del podio, di uno strato di malta di cocchiopesto forse utilizzato come isolante per l'umidità, si può ipotizzare che queste problematiche fossero presenti fin dagli inizi in quest'area [11]. Infine, altri elementi, come la natura stessa dei materiali (prevalentemente tufi, calcari, laterizi e malte, noti per la loro elevata porosità), le condizioni ambientali molto variabili e la presenza di intense correnti d'aria, non hanno aiutato a contenere il fenomeno di erosione e degrado.

Teoricamente, il metodo di intervento più corretto da adottare, nel caso della cristallizzazione salina, sarebbe la realizzazione di impacchi con materiali fortemente assorbenti e acqua deionizzata, per andare a estrarre i sali dalla pietra<sup>47</sup>. In questo caso, però, il fenomeno è talmente esteso da non poter essere così affrontato.

È stato scelto di operare, quindi, in altri due modi. È noto che per evitare che un sale cristallizzi si dovrebbe mantenere l'umidità relativa dell'aria al di sopra di un certo valore limite, il quale è individuato dal valore della tensione di vapore della soluzione satura di quel sale. I valori variano in base alla tipologia salina, ma generalmente sono compresi fra

<sup>46</sup> Si pensi che per un periodo la Galleria Lapidaria, inaugurata nel 1957 nella Galleria di Congiunzione in occasione del III Congresso Internazionale di Epigrafia Greca e Latina, venne chiusa al pubblico a causa della presenza di gravi problemi di infiltrazioni d'acqua e di umidità [2].

<sup>47</sup> Cfr. Capitolo 1, par. 1.5.

il 50% e il 90% di umidità relativa e dunque per evitare la cristallizzazione, gli ambienti dovrebbero essere tenuti almeno al 90% di umidità. Tale condizione ambientale sarebbe soffocante per le persone e distruttiva per molti metalli, ma nel caso dei materiali lapidei è conservativa poiché andrebbe a bloccare il degrado<sup>48</sup>, in quanto nessun sale potrebbe cristallizzare. È stata realizzata, quindi, una compartimentazione dell'ambiente in cui si trova il Tempio (Figura 11), per isolarlo dall'esterno e inserirlo in un quadro climatico controllato, che cerchi di assicurare sia un andamento costante della temperatura che un'umidità relativa vicina ai valori di saturazione [11].



*Figura 11 – Compartimentazione del Tempio di Veiove*

A causa delle varie difficoltà che si sono presentate nel mantenere un locale completamente isolato (ad esempio, non è stato possibile realizzare una chiusura completa delle porte e delle finestre e vi è il passaggio di personale verso lo studio del Sindaco), si è deciso anche di intervenire direttamente sulle murature qui presenti. Sono state realizzate, pertanto, ripetute applicazioni da parte del già citato gruppo del Dipartimento di Chimica dell'Università degli Studi di Perugia in collaborazione con il CISTeC<sup>49</sup>, su due pareti in laterizio appartenenti ai rinforzi strutturali realizzati durante i lavori di risistemazione negli anni '30.

Nel paragrafo successivo verranno evidenziati gli ultimi sviluppi di queste applicazioni.

<sup>48</sup> Occorre, però, controllare l'eventuale sviluppo di microrganismi, quali le alghe.

<sup>49</sup> Centro di Ricerca in Scienza e Tecnica per la Conservazione del Patrimonio Storico-Architettonico dell'Università "Sapienza" di Roma.

#### 4.4 Applicazione in situ del sistema inibitore selezionato

Sono state scelte per l'applicazione all'interno dell'ambiente climatizzato, come premesso, due pareti in muratura appartenenti ai rinforzi strutturali realizzati durante i lavori di risistemazione negli anni '30, la A e la B indicate in Figura 12, ciascuna di dimensioni di circa  $1,5 \times 2$  m.

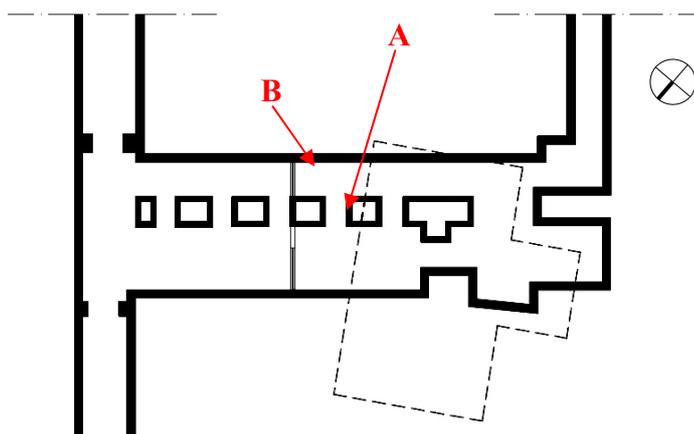


Figura 12 – Pianta di una parte dell'attuale Galleria Trasversale dei Musei Capitolini.  
In linea tratteggiata, pianta del Tempio di Veiove

Le pareti presentano una superficie irregolare, ricca di depositi salini biancastri di varia consistenza e di lacune (Figura 13), evidenziando quindi come qui il problema della cristallizzazione salina sia presente da molto tempo.



(a)



(b)

Figura 13 – Pareti scelte per l'applicazione.  
(a) Parete A; (b) Parete B

Sono numerose le efflorescenze (Figura 14a e b) e vi era anche materiale a terra per azione delle subefflorescenze (Figura 14c).



(a)



(b)



(c)

*Figura 14 – Stato di conservazione delle murature prima dell'ultima applicazione.  
(a) e (b) Dettaglio delle efflorescenze saline; (c) Materiale incoerente e polvere presente a terra*

Dai vari studi condotti<sup>50</sup> è stato selezionato il sistema inibitore che ha permesso di ottenere i risultati migliori per il laterizio, in soluzione acquosa B (bassa concentrazione). Il prodotto, quindi, è stato applicato a pennello fino a rifiuto, così da garantire una sufficiente penetrazione del liquido (Figura 15).

---

<sup>50</sup> Cfr. Capitolo 2, par. 2.3.



(a)



(b)

*Figura 15 – Applicazione.  
(a) Parete A; (b) Parete B*

Quest'applicazione, realizzata nel dicembre 2009, è stata l'ultima di una serie di trattamenti di carattere annuale che hanno interessato le pareti a partire dal 2005. Pur presentando ancora vari problemi, come evidenziato sopra, il loro stato di conservazione, rispetto a quello delle murature adiacenti non trattate (Figura 16), mostra come la presenza dell'inibitore porti nel tempo a un progressivo rallentamento e diminuzione dei fenomeni di degrado.



(a)



(b)



(c)



(d)

*Figura 16 – Stato di conservazione delle pareti adiacenti a quelle scelte per le applicazioni.  
(a) Materiale vario distaccatosi a terra; (b) Piccolo frammento di muratura pericolante;  
(c) e (d) Efflorescenze*

Dopo circa cinque mesi è stato effettuato un controllo che ha evidenziato proprio questo: le murature, infatti, si presentano in gran parte libere da qualsiasi tipo di deposito (Figura 17a, b ed e) e anche nei casi in cui questo si è formato, è poco esteso e compatto (Figura 17c e d).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

*Figura 17 – Stato di conservazione delle pareti dopo l'applicazione.  
(a) Parete A; (b) Parete B; (c), (d) ed (e) Dettaglio della superficie*

Attualmente si sta considerando la possibilità di realizzare queste applicazioni anche sui blocchi di tufo di Grotta Oscura appartenuti alla struttura del Tempio, che sono stati rinvenuti in questo sito, poiché anch'essi sono colpiti dal fenomeno della cristallizzazione salina (Figura 18).



*Figura 18 – Blocco di tufo di Grotta Oscura appartenuto alla struttura muraria del Tempio*

Per questo e più in generale, per la notevole influenza che questo tipo di ricerca potrebbe avere nel campo della conservazione dei materiali lapidei costituenti i Beni Culturali, ulteriori studi e sperimentazioni sono tuttora in corso.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [1] Paola Chini, *Il Campidoglio*.  
< <http://www.romaoltrelemura.it/Libro%20-%20Campidoglio.htm>>
- [2] < <http://www.museicapitolini.org/>>
- [3] Fabrizio Vallelonga, *Campidoglio*.  
<<http://www.campidoglio.com/Storia/index.htm>>
- [4] *Roma, Monte Capitolino*.  
< [http://guida.archart.it/00604\\_roma-monte-capitolino.html](http://guida.archart.it/00604_roma-monte-capitolino.html)>
- [5] *Storia e Monumenti*.  
<[http://www.comune.roma.it/was/wps/portal/!ut/p/\\_s.7\\_0\\_A/7\\_0\\_21L?menuPage=/Area\\_di\\_navigazione/Il\\_Campidoglio/Storia\\_e\\_Monumenti/&flagSub=>](http://www.comune.roma.it/was/wps/portal/!ut/p/_s.7_0_A/7_0_21L?menuPage=/Area_di_navigazione/Il_Campidoglio/Storia_e_Monumenti/&flagSub=>)>
- [6] *Tabularium*.  
< <http://www.archeoroma.com/Foro%20Romano/tabularium.htm>>
- [7] *La Religione e la Donna a Roma*.  
<<http://www.itiscannizzaro.net/Lavori/roma%201st/roma21st1.htm>>
- [8] Massimo Drago, 2002. *Storia della civiltà romana. Gli spilli*. Alpha Test.
- [9] Luigi Canina, 1855. *Esposizione topografica di Roma Antica: distinta nelle tre prime epoche anteromana, reale e consolare*. Roma, Bertinelli, pp. 172-173.
- [10] Antonio Maria Colini, 1942. *Aedes Veiovis Inter Arcem et Capitolium*. «Bulettno della Commissione Archeologica del Governatorato di Roma», Roma, 70, pp. 5-56.

[11] Gruppo De Sanctis Costruzioni S.p.A., Impresa Edile Donati S.p.A. *Tabularium e Tempio di Veiove. Intervento di restauro conservativo dei paramenti murari. Giugno 1997 - Aprile 2000. Relazione Tecnica.*

# CONSERVAZIONE E RESTAURO

**NARDINI EDITORE®** Alcuni titoli nelle librerie e presso la casa editrice. Ordini e informazioni: info@nardinieditore.it; www.nardinieditore.it

## PERIODICI

**KERMES. LA RIVISTA DEL RESTAURO - trimestrale**

**BOLLETTINO DELL'ISTITUTO CENTRALE PER IL RESTAURO-ICSR- semestrale**

**KERMESQUADERNI - Tecniche e sistemi laser per il restauro dei beni culturali, a cura di Roberto Pini, Renzo Salimbeni**

**I restauri di Assisi. La realtà dell'utopia (con CD-rom), a cura di Giuseppe Basile**

**Conservazione preventiva delle raccolte museali, a cura di Cristina Menegazzi, Iolanda Silvestri**

**The Painting Technique of Pietro Vannucci, Called il Perugino, a cura di Brunetto G. Brunetti, Claudio Seccaroni, Antonio Sgamellotti**

**Villa Rey. Un cantiere di restauro, contributi per la conoscenza, a cura di Antonio Rava**

**Le patine. Genesi, significato, conservazione, a cura di Piero Tiano, Carla Pardini**

**Monitoraggio del patrimonio monumentale e conservazione programmata, a cura di Paola Croveri, Oscar Chiantore**

**Impatto ambientale. Monitoraggio sulle Porte bronzee del Battistero di Firenze, a cura di Piero Tiano, Carla Pardini**

**Raphael's Painting Technique: Working Pratique before Rome, edit by Ashok Roy, Marika Spring**

**Pulitura laser di bronzi dorati e argenti, a cura di Salvatore Siano**

**Il Laser. Pulitura su materiali di interesse artistico, a cura di Annamaria Giovagnoli**

**Sebastiano del Piombo e la Cappella Borgherini nel contesto della pittura rinascimentale, a cura di Santiago Arroyo Esteban, Bruno Marocchini, Claudio Seccaroni**

**Basic Environmental Mechanisms Affecting Cultural Heritage. Understanding Deterioration Mechanisms for Conservation Purposes, edited by Dario Camuffo, Vasco Fassina, John Havermans**

**Giambattista Tiepolo. Il restauro della pala di Rovetta. Storia conservativa, diagnostica e studi sulla tecnica pittorica, a cura di Amalia Pacia**

**Indoor Environment and Preservation. Climate Control in Museums and Historic Buildings, edit by Davide Del Curto (testi in inglese ed italiano)**

**Roberta Roani, Per la storia della basilica di Santa Croce a Firenze. La "Restaurazione generale del tempio" 1815-1824**

**Adele Cecchini, Le tombe dipinte di Tarquinia. Vicenda conservativa, restauri, tecnica di esecuzione**

**Science and Conservation for Museum Collections, edited by Bruno Fabbrì (e-book)**

**Caravaggio's Painting Technique, edited by Marco Ciatti, Brunetto G. Brunetti**

**Santa Maria Nuova a Viterbo. Nuove chiavi di lettura della chiesa alla luce del restauro della copertura, a cura di Manuela Romagnoli e Marco Togni**

**QUADERNI DEL BOLLETTINO ICR - Restauri a Berlino. Le decorazioni rinascimentali lapidee nell'Ambasciata d'Italia, a cura di Giuseppe Basile (testi in italiano, tedesco, inglese)**

**ARCHITETTURA E RESTAURO - Dalla Reversibilità alla Compatibilità // Il recupero del centro storico di Genova // Il Minimo Intervento nel Restauro // La fruizione sostenibile del bene culturale // Il Quartiere del ghetto di Genova**

**QUADERNI DI ARCHITETTURA - diretti da Nicola Santopoli e Alessandro Curuni**

**Federica Maietti, Dalla grammatica del paesaggio alla grammatica del costruito. Territorio e tessuto storico dell'insediamento urbano di Stellata**

**Il rilievo per la conservazione. Dall'indagine alla valorizzazione dell'altare della Beata Vergine del Rosario nella chiesa di San Domenico a Ravenna, a cura di Nicola Santopoli**

**CON L'ASSOCIAZIONE GIOVANNI SECCO SUARDO-QUADERNI DELL'ARCHIVIO STORICO NAZIONALE E BANCA DATI DEI RESTAUROTORI ITALIANI - diretti da Giuseppe Basile e Lanfranco Secco Suardo**

**Restauratori e restauri in archivio - Vol. I: secc. XVII-XX / Vol. II: secc. XIX-XX, a cura di Giuseppe Basile**

**ARTE E RESTAURO - diretta da Andrea Galeazzi**

**Umberto Baldini, Teoria del restauro e unità di metodologia Voll. I-II**

**Ornella Casazza, Il restauro pittorico nell'unità di metodologia**

**Mauro Matteini, Arcangelo Moles, La chimica nel restauro. I materiali dell'arte pittorica**

**Giovanna C. Scicolone, Il restauro dei dipinti contemporanei. Dalle tecniche di intervento tradizionali alle metodologie innovative**

**Bruno Fabbrì, Carmen Ravanelli Guidotti, Il restauro della ceramica**

**Vishwa Raj Mehra, Foderatura a freddo**

**Francesco Pertegato, Il restauro degli arazzi**

**Cristina Ordóñez, Leticia Ordóñez, María del Mar Rotaeché, Il mobile. Conservazione e restauro**

**Cristina Giannini, Roberta Roani, Giancarlo Lanterna, Marcello Picollo, Deodato Tapete, Dizionario del restauro. Tecniche Diagnostica Conservazione**

**Claudio Seccaroni, Pietro Moiola, Fluorescenza X. Prontuario per l'analisi XRF portatile applicata a superfici policrome**

**Tensionamento dei dipinti su tela. La ricerca del valore di tensionamento, a cura di Giorgio Capriotti e Antonio Iaccarino Idelson, con contributo di Giorgio Accardo e Mauro Torre, ICR e intervista a Roberto Carità**

**Monumenti in bronzo all'aperto. Esperienze di conservazione a confronto (con CD-rom allegato), a cura di Paola Letardi, Ilva Trentin, Giuseppe Cutugno**

**Manufatti archeologici - CD-rom, a cura di Salvatore Siano**

**Cesare Brandi, Theory of Restoration, a cura di Giuseppe Basile con testi di G. Basile, P. Philippot, G.C. Argan, C. Brandi (ed. inglese // ed. russa)**

**La biologia vegetale per i Beni Culturali. Vol. I Biodeterioramento e Conservazione, a cura di Giulia Caneva, Maria Pia Nugari, Ornella Salvadori // Vol. II Conoscenza e Valorizzazione, a cura di Giulia Caneva**

**Lo Stato dell'Arte 3 // 4 // 5 // 6 // 7 // 8 // 9 // 10 // 11, Congressi Nazionali IGIC**

**Codici per la conservazione del Patrimonio storico. Cento anni di riflessioni, "grida" e carte, a cura di Ruggero Boschi e Pietro Segala**

**La protezione e la valorizzazione dei beni culturali, a cura di Giancarlo Magnaghi**

**L'eredità di John Ruskin nella cultura italiana del Novecento, a cura di Daniela Lamberini**

**La diagnostica e la conservazione dei manufatti lignei (CD-rom)**

**Strumenti musicali antichi. La spinetta ovale di Bartolomeo Cristofori, a cura di Gabriele Rossi Rognoni (in italiano e in inglese)**

**Meteo e Metalli. Conservazione e Restauro delle sculture all'aperto. Dal Perseo all'arte contemporanea, a cura di Antonella Salvi**

**Marco Ermentini, Restauro Timido. Architettura Affetto Gioco**

**Leonardo. L'Ultima Cena. Indagini, ricerche, restauro (con CD-rom), a cura di Giuseppe Basile e Maurizio Marabelli**

**Dendrocronologia per i Beni Culturali e l'Ambiente. a cura di Manuela Romagnoli**

**Valentina Russo, Giulio Carlo Argan. Restauro, critica, scienza**

**Marco Ermentini, Architettura timida. Piccola enciclopedia del dubbio**

**Consigli. Ovvero l'arte di arrangiarsi in cantiere e in bottega, // Tips. Finding your Way Around Sites and Workshops a cura di Alberto Felici e Daniela Murphy Corella (in italiano e in inglese)**

**I ruderi e la guerra. Memoria, ricostruzioni, restauri, a cura di Stella Casiello**

**Archeometria e restauro. L'innovazione tecnologica, a cura di Salvatore Siano**

**ARTE E RESTAURO/PITTURE MURA - Direzione scientifica: Cristina Danti Cecilia Frosinini**

**Alberto Felici, Le Impalcature nell'arte per l'arte. Palchi, ponteggi, trabiccoli e armature per la realizzazione e il restauro delle pitture murali**

**Il colore negato e il colore ritrovato. Storie**

e procedimenti di occultamento e descalbo

delle pitture murali, a cura di Cristina Danti e Alberto Felici

**ARTE E RESTAURO/FONTI - Ulisse Forni, Il manuale del pittore restauratore - e-book, Introduzione e note a cura di Vanni Tiozzo**

**Ricette vetrarie muranesi. Gasparo Brunoro e il manoscritto di Danzica, a cura di Cesare Moretti, Carlo S. Salerno, Sabina Tommasi Ferroni**

**Il mosaico parietale. Trattatistica e ricette dall'Alto Medioevo al Settecento, a cura di Paola Pogliani, Claudio Seccaroni**

**Susanne A. Meyer e Chiara Piva, L'arte di ben restaurare. La raccolta d'antiche statue (1768-1772) di B. Cavaceppi**

**ARTE E RESTAURO/STRUMENTI - Vincenzo Massa, Giovanna C. Scicolone, Le vernici per il restauro**

**Maurizio Copedè, La carta e il suo degrado**

**Francesco Pertegato, I tessili. Degrado e restauro**

**Gustav A. Berger, La foderatura**

**Dipinti su tela. Metodologie d'indagine per i supporti cellulostici, a cura di Giovanna C. Scicolone**

**Chiara Lumia, Kalkbrennen. Produzione tradizionale della calce al Ballenberg/ Traditionelle Kalkherstellung auf dem Ballenberg (con DVD)**

**Anna Gambetta, Funghi e insetti nel legno. Diagnosi, prevenzione, controllo**

**Dario F. Marletto, Foderatura a colla di pasta fredda - Manuale**

**ARTE E RESTAURO/E-BOOK - Federica Dal Forno, La ceroplastica anatomica**

**e il suo restauro. Un nuovo uso della TAC, una possibile attribuzione a G.G. Zumbo**

**Luigi Orata, Tagli e strappi nei dipinti su tela. Metodologie di intervento**

**Mirna Esposito, Museo Stibbert. Il recupero di una casa-museo con il parco, gli edifici e le opere delle collezioni**

**Maria Bianco, Colore. Colorimetria: il sistema di colore Carlieri-Bianco**

**Non solo "ri-restauri" per la durabilità dell'arte, a cura di D. Benedetti, R. Boschi, S. Bossi, C. Coccoli, R. Gianguialano, C. Minelli, S. Salvadori, P. Segala**

**Cecilia Sodano Cavinato, Un percorso per la valorizzazione e la conservazione del patrimonio culturale. Il museo Civico di Bracciano**

**Encausto. Storia, tecniche e ricerche, a cura di Sergio Omarini (in italiano e in inglese)**

**Il restauro della fotografia. Materiali fotografici e cinematografici, analogici e digitali, a cura di Barbara Cattaneo (anche stampato on-demand)**

**Fotografie, finitura e montaggio, a cura di Donatella Matè, Maria Carla Sclocchi (anche stampato on-demand)**

**Valeria Di Tullio, Risonanza magnetica (NMR) portatile. Mappatura e monitoraggio dell'umidità nei dipinti murali**

**Nadia Francaviglia, Intervento in situ e manutenzione programmata. Il gonfalone processionale di Palazzo Abatellis**

**Giuliana Labud, Il restauro delle opere multimediali**

**Pietro Librici, Il restauro delle diapositive di Amundsen. Le esplorazioni polari tra storia e conferenze pubbliche**

**CON IL CCR "LA VENARIA REALE" - collane dirette da Carla Enrica Spantigati**

**ARCHIVIO - Restauri per gli altari della Chiesa di Sant'Uberto alla Venaria Reale, a cura di Carla E. Spantigati // Delle cacce ti dono il sommo impero. Restauri per la Sala di Diana alla Venaria Reale (con DVD interattivo), a cura di Carla E. Spantigati**

**CRONACHE - Restaurare l'Oriente. Sculture lignee giapponesi per il MAO di Torino, a cura di Pinin Brambilla Barcilon ed Emilio Mello**

**Kongo Rikishi. Studio, restauro e musealizzazione della statuaristica giapponese - Atti della giornata internazionale di studi**

**Il restauro degli arredi lignei - L'ebanisteria piemontese, a cura di Carla E. Spantigati, Stefania De Blasi**