

ALTERAZIONE DELLE PIETRE NATURALI ED ARTIFICIALI

diagnosi e sistemi di risanamento



1977 - 2007
30°
anniversario

TECNOCHEM®
ITALIANA SPA

TECNO ECO®
LOGIC CHEM

SPART® ECO



PRODOTTI TECNOLOGIE
E SERVIZI PER IL
RESTAURO MONUMENTALE
ECOSISTEMI

In copertina:

CAPPELLA COLLEONI - Bergamo

Monumento rinascimentale, opera dell'Architetto e scultore Antonio Amadeo (1470-1475).

DIPARTIMENTO DEL TERRITORIO
ISTITUTO GEOLOGICO ED IDROLOGICO
CADENAZZO

DIPARTIMENTO ISTRUZIONE E CULTURA
ISTITUTO TECNICO SPERIMENTALE
CANobbIO

Giornata di studio

**ALTERAZIONE DELLE PIETRE
NATURALI ED ARTIFICIALI**
diagnosi e sistemi di risanamento

In collaborazione con:

**SOCIETÀ INGEGNERI E ARCHITETTI
ORDINE TICINESE INGEGNERI E ARCHITETTI
SOCIETÀ SVIZZERA IMPRESARI COSTRUTTORI**

S. ANTONINO - VENERDÌ 28 OTTOBRE 1994 - SALA MULTIUSO

DIAGNOSI DEL DEGRADO SU LITOTIPI ARENITICI

Roberto Rosignoli

TECNOCHEM ITALIANA

1. INTRODUZIONE

Tutte le rocce, in misura più o meno marcata, vengono degradate da una serie di processi alterativi naturali.

Gli stessi fenomeni visibili su grande scala negli affioramenti rocciosi naturali, che determinano il progressivo disfacimento dei lapidei esposti agli agenti atmosferici, si possono notare sulle superfici in pietra di un edificio storico.

In questa nota vengono analizzate alcune cause di degrado dei lapidei arenitici; la scelta di analizzare il decadimento di questi specifici litotipi è stata compiuta per due motivi principali:

- a causa di alcune loro caratteristiche petrografiche, nonché per la loro diffusa presenza sul territorio italiano, hanno pesantemente subito l'accelerazione dei fenomeni alterativi dovuta all'aumento dell'inquinamento atmosferico.
- la tessitura delle pietre artificiali tende ad imitare i «migliori esempi» visibili nella organizzazione tessiturale arenitica.

Vengono così presi in considerazione gli aspetti composizionali, tessiturali e strutturali che possono condizionare negativamente la resistenza nel tempo dei litotipi arenitici.

In stretta connessione con le problematiche legate alla conservazione dei lapidei negli edifici e nei monumenti storici, si sono andate sempre più sviluppando ed affinando le conoscenze sulle cause del degrado e sui processi di alterazione.

A tale scopo sono state concepite in Italia una serie di «raccomandazioni» (NORMAL) viste come proposta di metodi sperimentali di studio e controllo dell'alterazione dei materiali lapidei. Si analizza tale sforzo normativo considerando diverse raccomandazioni NORMAL che regolano queste fasi conoscitive.

2. PARAMETRI AMBIENTALI

I manufatti lapidei sono continuamente sottoposti ad azioni fisiche e chimiche di alterazione e degrado. Tali attacchi non si manifestano solo in superficie, sulla parte del lapideo direttamente esposta agli agenti atmosferici, ma riescono, approfittando dell'acqua come veicolo principale di propagazione, a spingersi in profondità viaggiando lungo le discontinuità tessiturali e strutturali della roccia, quali ad esempio:

- porosità primaria (originaria) o secondaria (acquisita),
- laminazioni e giunti di stratificazione sedimentaria,

- piani di scistosità od orientamento preferenziale di minerali,
- fratturazioni e fessurazioni.

Nell'analisi del deterioramento si deve quasi sempre pensare ad un effetto sinergico di diversi fattori, con un aumento significativo, in questi ultimi anni nelle aree urbane ed industrializzate, delle azioni chimiche provocate da interazioni con una atmosfera sempre più inquinata e contenente un mix di sostanze potenzialmente dannose.

Monitoraggi dell'aria, effettuati nel territorio italiano in un arco di rilevamento quinquennale, hanno permesso di evidenziare come l'impatto dei principali inquinanti risulti pressochè stabile, con un'unica tendenza in cospicuo rialzo per le emissioni di ossidi di azoto e di particelle sospese totali (fonte MINISTERO dell'AMBIENTE- ENEA - progetto CORINAIR). Da notare che, ad esclusione delle emissioni di ossidi di zolfo, imputabili per la massima parte a combustioni di centrali termoelettriche ed industriali, i maggiori inquinanti dell'aria derivano in gran parte dall'alta densità di traffico veicolare su gomma (inserita nei diagrammi delle figure n° 1-2-3-4 sotto la voce «TRASPORTI» - fonte Ministero dell'Ambiente ENEA 1991).

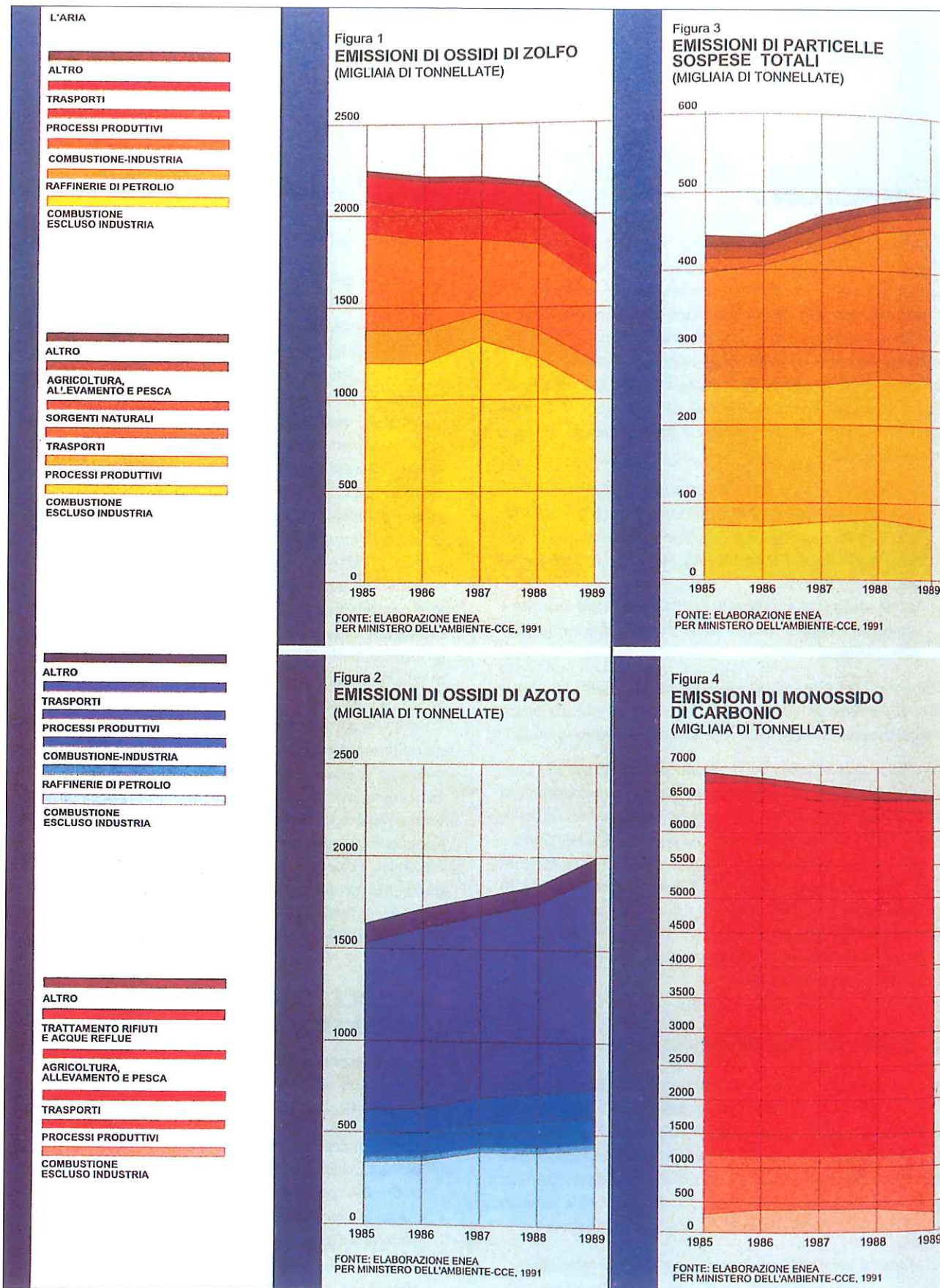
Il territorio italiano presenta aree di crisi in corrispondenza delle maggiori aree urbane ed industriali; naturalmente possono sussistere località o microambienti ad elevata concentrazione di inquinanti, inseriti in contesti territorialmente più ampi con bassi livelli medi di emissioni.

Da questo quadro e dalle diversificate possibilità di attacchi fisico-chimici possibili, deriva l'estrema importanza della misura dei parametri ambientali; i fascicoli NORMAL 5, redatti dall'anno 1981 in poi, distinguono le modalità di rilevamento di numerosi parametri ambientali.

3. PROCESSI ALTERATIVI SU ROCCE ARENITICHE

Diversi possono essere i fattori di debolezza, intrinseci ed estrinseci al lapideo, nei confronti delle aggressioni fisico-chimiche; fra i più importanti si riconoscono:

- specie mineralogiche particolarmente deboli,
- porosità, capillari, fratturazioni o lacune comunicanti di origine naturale nei quali l'acqua può migrare,
- microlesioni di origine artificiale provocate dalla lavorazione superficiale dei manufatti,
- presenza di ferri ossidati (perni, barre, chiavi, staffe, grappe ecc.).



I litotipi arenitici, costituiti da una componente granulare e da una componente matrice e/o cemento che collega i granuli non a contatto, hanno spesso la contemporanea presenza dei fattori sopraelencati.

3.1. Aspetti tessuturali e strutturali

Alcune fra le proprietà tessuturali e strutturali dei lapidei arenitici possono essere interpretate come punti di debolezza principale della roccia e, quindi, come punti che favoriscono l'inesco e la propagazione dei processi di decadimento.

La più importante è senza dubbio l'abbondanza di interstizi comunicanti su cui l'acqua può migrare e svolgere i suoi processi di soluzione, idratazione ed idrolisi.

A questo scopo è utile il rilevamento dei parametri di porosità, porosità effettiva e coefficiente di imbibizione con i quali valutare la capacità di impregnazione del litotipo (NORMAL 7/81); così come, tramite stime visive macroscopiche od analisi modali microscopiche (NORMAL 14/83), è utile valutare l'addensamento dei granuli (ovvero il rapporto percentuale della componente granulare rispetto a matrice + cemento + vuoti) e l'indice di contiguità o prossimità (ovvero il numero di contatti dei granuli fra loro) per l'identificazione di tessiture «aperte» o, viceversa, «compatte».

Da nostre esperienze abbiamo notato che, più dei valori assoluti quantificabili con metodi analitici, è estremamente importante la valutazione delle «disomogeneità» presenti, in quanto sono queste, il più delle volte, ad indicare i punti di debolezza del lapideo.

Da ciò deriva che, per esempio, una arenite con bassi valori di addensamento ed indice di contiguità, ma con distribuzione tessutturale estremamente omogenea, si dimostra meno facilmente aggredibile di una roccia con valori assoluti di addensamento e contiguità più alti ma con forti disomogeneità tessuturali.

Altre utili **considerazioni tessuturali** da effettuare sono l'orientamento preferenziale (primario o secondario) dei granuli (come lamelle di mica, bioclasti, ecc. - fig n°5), la concentrazione di particolari specie minerali (come i livelli di minerali pesanti gravitativamente differenziatisi durante il processo deposizionale - fig n°6) e la presenza di **laminazioni sedimentarie**. Le tessiture orientate e le

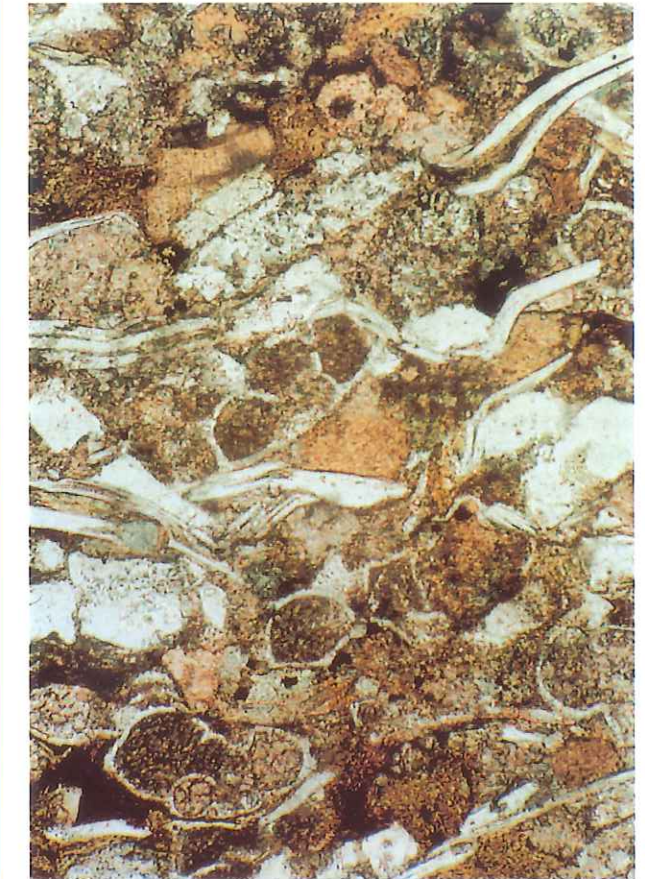
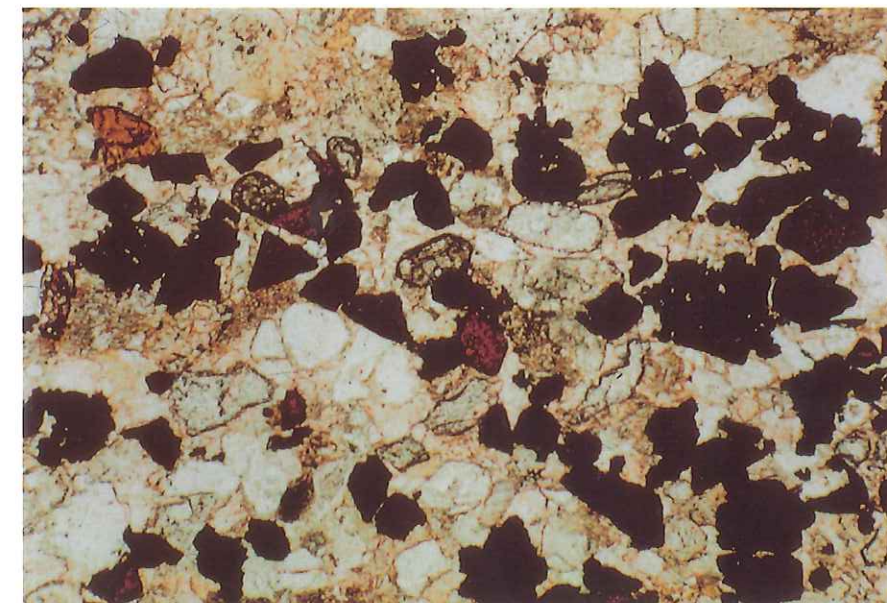


Fig. 5 ▲ Lamina di 1 cm con arricchimenti in miche e Foraminiferi pelagici (Globotruncanae, individui di ca 1 mm) Arenaria di M. Caio, Appennino sett.



◀ **Fig. 6** Arricchimento in minerali pesanti (zircon, epidoti, brookite granati; individui di circa 0,1 mm) Arenarie di Ostia, Appennino sett.

strutture sedimentarie rappresentano una anisotropia direzionale a volte non distinguibile ad occhio nudo, ma evidenziabile solo mediante analisi microscopica.

Anisotropie che possono considerevolmente influenzare i valori fisico-meccanici della roccia poichè rappresentano, molto spesso, vie di migrazione preferenziale dell'acqua. Soprattutto le laminazioni sedimentarie, che si generano all'atto del processo deposizionale, sono soluzioni di continuità dell'arenite che, come in affioramento di parete rocciosa, spesso si seguono per l'intera lunghezza dei manufatti lapidei; sono quindi strutture da valutare con estrema attenzione che possono alterarsi e degradarsi molto velocemente.

Un discorso a parte meritano gli **effetti della lavorazione superficiale** e, soprattutto, l'impiego di utensili a percussione come scalpelli, bocciarde, subbie che concentrano lo sforzo meccanico su aree molto limitate della pietra. Ciò causa un fitto reticolo di microfrazture che si spingono anche a diversi millimetri di profondità con conseguente aumento localizzato della porosità, provocando forte disomogeneità nello spessore coinvolto, rispetto al resto della pietra. Studi sperimentali sulla Pietra Serena (arenite Miocenica cavata nell'Appennino Tosco Emiliano molto frequente nelle costruzioni dell'Italia centro-settentrionale) hanno determinato che gli strumenti più dannosi risultano la bocciarda (martello a più punte acuminata) e la subbia, entrambi assai utilizzati come lavorazione finale superficiale.

Da nostre esperienze sul decadimento di manufatti in pie-

tra di Sarnico abbiamo notato una stretta correlazione fra fenomeni di croste superficiali coerenti, spesse da tre a dieci millimetri, e lavorazioni superficiali a bocciarda fine. Il reticolo di microfrazture causato dalla lavorazione ha in questi casi creato una discontinuità netta fra spessore lesionato ed il resto del manufatto; le microfrazture hanno accolto, in seguito, le deposizioni di sali migranti verso la superficie, venendo così a creare una netta soluzione di continuità fra crosta rigida superficiale e la zona immediatamente sottostante fortemente decoesa.

3.2. Maturità composizionale e specie mineralogiche deboli

L'eterogeneità mineralogica della componente granulare, la scarsa maturità composizionale ed i cementi deboli o poco sviluppati, sono indici a cui si associa un'alta probabilità di decadimento del litotipo arenitico sottoposto ad atmosfere altamente inquinanti.

3.2.1. Componente granulare

Il concetto di maturità mineralogica è paragonabile ad un «grado di stabilità ideale» il quale si raggiunge con l'eliminazione dei minerali instabili. In un diagramma ternario Q-F-L+C (quarzo-feldspati-litici più carbonati) ciò è identificabile con l'arricchimento della componente granulare quarzosa a discapito delle altre (vedi fig. n°7).

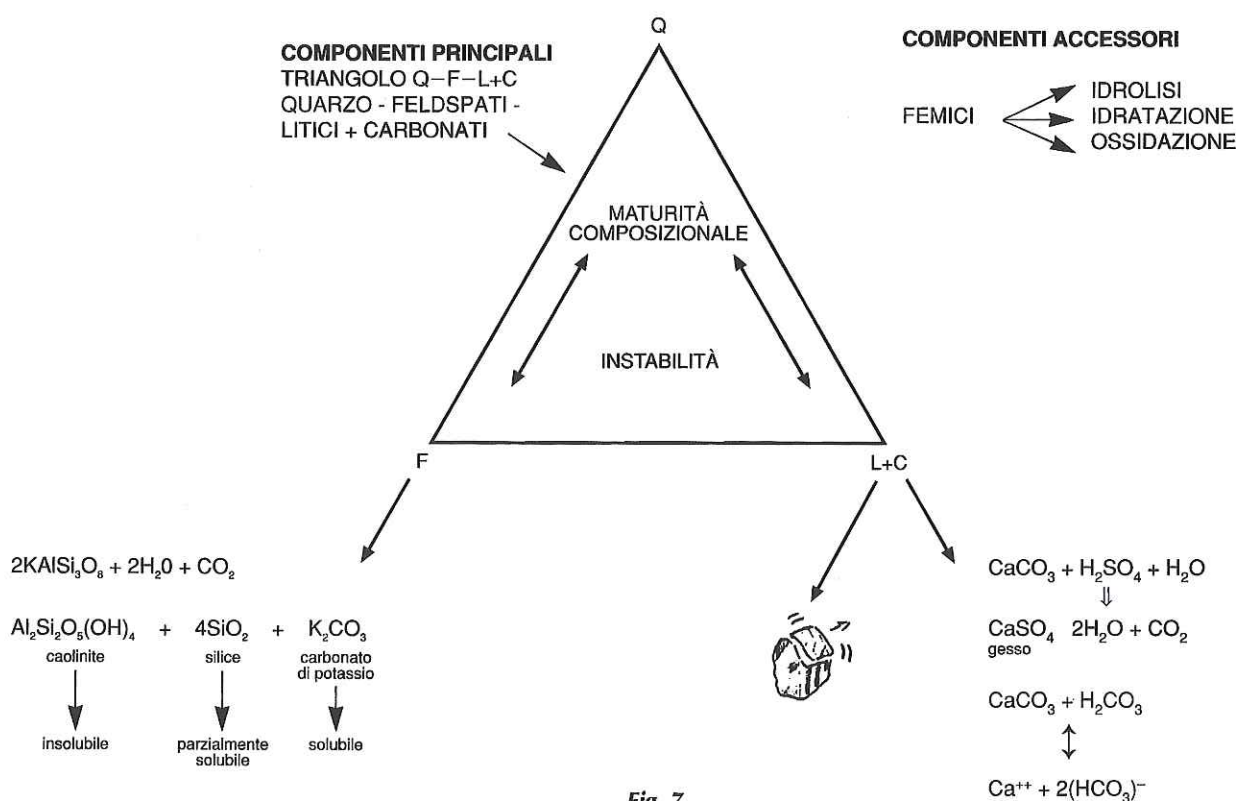


Fig. 7

Maturità composizionale delle arenite e principali fenomeni di alterazione su componenti «instabili»

Infatti, oltre ai processi di soluzione, idratazione ed idrolisi, l'aumentata aggressività ed acidità delle soluzioni acquose accelera i processi di alterazione sui feldspati, con passaggio in soluzione di elementi alcalini ed alcalino-terrosi e conseguente formazione di residui argillosi insolubili e carbonati-bicarbonati alcalini solubili come nella seguente reazione:

su ortoclasio
 $2KAlSi_3O_8 + 2H_2O + CO_2 \rightleftharpoons Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 4SiO_2 + K_2CO_3$
 Anche i femici, considerati nelle arenite come minerali accessori causa la loro facile alterabilità, subiscono simili reazioni:

su olivina
 $Mg_2SiO_4 + 2H_2O + 4CO_2 \rightleftharpoons 2Mg(HCO_3)_2 + SiO_2$
 I frammenti di roccia (L nel diagramma ternario) tendono invece a suddividersi nei loro singoli componenti trovando perciò i principali punti di debolezza nelle zone di contatto fra gli elementi costituenti.

3.2.2. Componente cemento-matrice

Fondamentale importanza ha anche la componente cemento-matrice che «lega» i granuli non a contatto. Il cemento più frequente, nei litotipi utilizzati in Italia, è senza dubbio quello carbonatico con presenza più o meno abbondante di matrice e/o micrite. Il cemento a volte può essere estremamente abbondante tanto da circondare completamente i granuli e dare così origine a tessiture con granuli galleggianti.

Cemento spatitico, microspatitico e micrite, in generale vengono aggrediti con reazioni di carbonatazione (simili a quelle precedentemente descritte) e solfatazione con formazione di gesso e/o anidrite pulverulenti o microcristallini (a loro volta facilmente solubili). L'alternanza di solubilizzazioni e cristallizzazioni può creare una sorta di croste dure superficiali («case hardening») poggianti su materiale fortemente decoeso (vedi anche paragrafo 3.1. e punto d) del capitolo 4).

4. LE MORFOLOGIE DI DEGRADO

Prescindendo dalle forme di degrado più evidenti (come croste nere, biodeteriogeni ecc.) riscontrabili in genere su una vasta gamma di lapidei esposti, ci soffermiamo sugli aspetti che più caratterizzano le arenite.

Il degrado su pietre arenarie una volta innescato può subire forti accelerazioni in funzione di:

- qualità e organizzazione tessiturale degli elementi granulari e del cemento-matrice;
- abbondanza di interstizi comunicanti;
- parametri ambientali specifici che determinano:

- 1) chimismo e tempo di contatto dell'acqua con gli elementi del lapideo,
- 2) possibilità e frequenza di cicli di gelo e disgelo,

- 3) contrazioni ed espansioni dei diversi minerali sottoposti a sbalzi termici.

Ciò dà luogo ad alcune tipiche forme di degrado quali ad esempio:

a) esfoliazione:

degrado che si esplica con distacco di uno o più strati sottili subparalleli fra loro.

È solitamente dovuto a ripetuti fenomeni di precipitazione di sali per evaporazione e/o cicli di gelo-disgelo, che si esplicano di volta in volta a diversa distanza dalla superficie; la profondità alla quale avviene l'evaporazione con cristallizzazione è regolata dai parametri di velocità di migrazione dell'acqua e dalla traspirabilità al vapore della roccia; il degrado è favorito dalla concomitanza di tessiture mineralogiche orientate (ad es. lamelle muscovitiche) o deboli strutture sedimentarie (ad es. laminazioni) soprattutto se orientate parallelamente alla superficie esposta (vedi fig. 9, 10 esfoliazione in arenaria di Sarnico);

b) disgregazione:

distacco di granuli sotto minime sollecitazioni meccaniche; è solitamente dovuto ad attacco chimico su are-



Fig. 9

Esfoliazione su conci in arenaria di Sarnico



Fig. 10
Esfoliazione su arenaria di Sarnico. È visibile, frai due elementi lapidei, la antica malta di allettamento rosata a base di calce e cocchiopesto



Fig. 11
Erosione alla base di una colonna d'arenaria quarzoso-feldspatica con cemento calcitico

niti debolmente cementate o processi di solfatazione su calcareniti.

Anche questo degrado è aiutato dall'azione meccanica del gelo e disgelo; una distribuzione di capillari dal diametro medio di circa 9 micron sembra essere, in questo senso, la più pericolosa; essa permetterebbe all'acqua

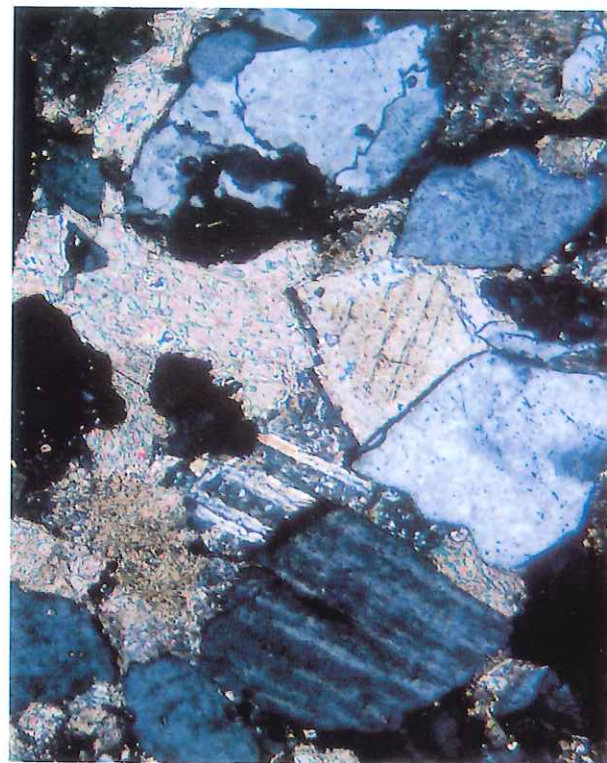


Fig. 12
Sezione sottile su scaglia superficiale dell'arenaria di fig. 11 (30x nicoli incrociati); ben visibili gli spati di cemento calcitico che circondano completamente alcuni granuli.

di entrare in profondità per suzione capillare, ma non consentirebbe una rapida fuoriuscita sotto la spinta (anche superiore ai 15 MPa) provocata dall'aumento di volume (9,2%) per formazione di ghiaccio.

Così come l'espansione dirompente delle cristallizzazioni saline, le azioni fisiche possono ridurre gli ele-

menti fino alle dimensioni dei limi ma non arrivano a formare particelle di dimensioni inferiori aventi proprietà colloidali (argille).

- c) **erosione:**
asportazione di materiale concentrata su zone particolarmente esposte ad azioni meccaniche (dilavamento da acqua battente, ruscellamento ecc.) chimico-biologiche (corrosioni, azioni chimiche degli apparati radicali di biodeteriogeni ecc.) o antropiche (usura, calpestio ecc.). Vedi come esempio di erosione accentuata la fig. 11 raffigurante la base di una colonna in arenaria quarzoso-feldspatica e cemento calcitico. In questo caso l'erosione ha potuto svilupparsi e propagarsi velocemente per azione chimica di corrosione e solfatazione sul cemento carbonatico, ampiamente diffuso nel volume della roccia (fig.12).
- d) **"case hardening":**
spesso associata a particolari lavorazioni superficiali: sono irrigidimenti di croste superficiali millimetriche dovute a deposizioni di sali (carbonati e/o solfati e/o ossidi di ferro) negli interstizi; è un processo ben evidenziabile soprattutto mediante analisi chimica per incremento in questi strati dei valori di CaO, SO₃ ed Fe₂O₃ (vedi anche paragrafo 3.1).

BIBLIOGRAFIA

AA.VV.: *Relazione sullo stato dell'ambiente*, Ministero dell'Ambiente : 1992 Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato.

COLLEPARDI M.: *Scienza e tecnologia del calcestruzzo*, II^a edizione: Ulrico Hoepli 1987

CONTI G.: *La pietra nelle esperienze costruttive dell'Appennino*, Atti del Convegno: Le Pietre nell'Architettura, Struttura e Superfici; Bressanone 25-28/6/1991.

EFES Y.: *Investigation between the porosity and the corrosion of natural stones*, Atti del Convegno: 3rd International Congress on the Deterioration and Preservation of Stones; Venezia 24-27/10/1979.

LAZZARINI L., LAURENZI TABASSO M.: *Il restauro della pietra*: Cedam Padova 1988.

ORDAZ J., ESBERT R.M.: *Porosity and capillarity in some sandstone and dolomite monumental stones*, Atti del Convegno Vth International Congress on Deterioration and Conservation of Stones; Lausanne 25-27/9/1985.

5. LA RESTITUZIONE DELLE INFORMAZIONI

Una annotazione finale riguarda la restituzione delle informazioni incamerate durante lo studio di diagnosi del degrado. Lavorando nel campo del restauro monumentale ci si rende conto di quanto sia importante uno sforzo normativo volto ad unificare i principali metodi di studio riguardanti le alterazioni e la conseguente restituzione delle informazioni. L'interdisciplinarietà necessaria per una corretta conduzione del cantiere di restauro ha bisogno di prove in cantiere, in laboratorio, linguaggi e restituzioni grafiche che siano da un lato nette ed incisive e dall'altro scientificamente corrette.

A tale scopo il fascicolo NORMAL 1/88 indica il lessico per la descrizione delle alterazioni- degradazioni macroscopiche dei materiali lapidei e le modalità di rappresentazione grafica. Ogni voce di alterazione o degrado viene descritta prescindendo dalle cause e viene definito uno specifico simbolo grafico da utilizzare nella rappresentazione su tavola del manufatto. Nel concepimento di questa nota ci si è basati su tale lessico integrandolo con informazioni sulle probabili cause e sulle caratteristiche petrografiche delle areniti che aiutano l'innescò e la propagazione dei fenomeni alterativi.

RICCI LUCCHI F.: *Sedimentologia parte I*: Clueb Bologna 1980.

WINKLER E.M.: *Effect of case hardening in stone*, Atti del Convegno: 3rd International Congress on the Deterioration and Preservation of Stones; Venezia 24-27/10/1979.

ZUFFA G.G.: *Optical analyses of arenites: influence methodology on compositional results*: D.Reidel Publishing Company 1985.

RACCOMAZIONI NORMAL: CNR Centri di Studio di Milano e Roma sulle cause di deperimento e sui metodi di conservazione delle Opere d'Arte - ICR Istituto Centrale per il Restauro.

1/88: *Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessici* 5/81 - 5/82 - 5/83 - 5/86 - 5/87: *Misura dei Parametri Ambientali*

7/81: *Assorbimento d'acqua per immersione totale-Capacità di imbibizione*

14/83: *Sezioni sottili e lucide di materiali lapidei: tecnica di allestimento*

PIETRE NATURALI: DUE ESEMPI DI RESTAURO

Dario Rosignoli
TECNOCHEM ITALIANA



S. PAOLO D'ARGON - Particolare della facciata principale a restauro ultimato (1987)

1. CHIESA PARROCCHIALE DI S. PAOLO D'ARGON (BERGAMO) «Conversione di S. Paolo Apostolo»

L'origine della chiesa risale al Monastero fondato nel 1079 dal Conte di Bergamo Gisaberto, Monastero tenuto dai Benedettini Cassinesi dal 1487 al 1797 e poi soppresso da Napoleone.

Nel 1686 l'architetto Domenico Messi di Lugano, concorse e vinse il progetto della nuova chiesa che costituisce oggi uno degli esempi più fulgidi di chiesa Barocca.

L'attuale facciata principale in marmo di Zandobbio fu costruita nel 1688 su disegno dello stesso Arch. Domenico Messi.

Noi descriviamo le operazioni tecnologicamente più significative del restauro di tale facciata che risale al 1987.

1.1. Stato del degrado

In collaborazione con il progettista Arch. Bellocchio ed il funzionario della Soprintendenza Arch. Bresciani sono state da noi eseguite le necessarie valutazioni diagnostiche ed analitiche del degrado.

Risultarono evidenti fessurazioni in molti punti con sconnesioni tra le varie lastre. Il fianco Nord risultava il più deteriorato con maggiori tracce di percolamento d'acqua. Diffusi inoltre i fenomeni di solfatazione da piogge acide più o meno profondi, i quali, ove accompagnati dall'inglobamento di particolato atmosferico, evidenziavano vaste aree di «croste nere».

Alle microfessurazioni caratteristiche del lapideo si accompagnavano grosse fratturazioni ed evidenti distacchi (vedi fig. 1 e 2); diffusa inoltre la decoesione e l'erosione in particolare



Fig. 1



Fig. 2

Approfondimento delle fessurazioni (caratteristiche del Marmo di Zandobbio) con distacco di pezzi ed evidenti lacune.

nelle parti più scolpite. Precedenti operazioni di restauro evidenziavano l'uso di mastici e di malte non idonee ampiamente sollevate e fessurate.

Diffusa la presenza di muschi, licheni e di vegetazione con ampie ramificazioni e radici all'interno della struttura.

Numerose preesistenti impernature in ferro si presentavano in stato di avanzata ossidazione per lo più dirompende.

1.2. Operazioni preliminari e di pulitura

Le principali fasi del restauro sono state le seguenti :

- *Eliminazione dei vegetali e dei biodeteriogeni*
Rimozione manuale, applicazione circoscritta di principio attivo inibitore della fotosintesi e di Florometuron per l'eliminazione dei licheni.
- *Pulitura croste nere*
Per lo più attraverso acqua nebulizzata e con qualche impacco di Attapulgit e formulato AB 57 (I.C.R.).
- *Eliminazione e riduzione dei ferri ruggini*
Estrazione di molte impernature ferrose ruggini e loro sostituzione con spinotti in acciaio inox.

Riduzione delle macchie di ruggine con agenti sequestranti e complessanti il catione ferro 3+ e 2+.
Alcuni ferri sono stati conservati previo trattamento con inibitore di corrosione e protettivo.

1.3. Concepimento dei formulati per sigillature, ripristini e ricostruzioni

Il lapideo è stato attentamente campionato e classificato nei nostri laboratori sia dal punto di vista mineralogico che fisico-meccanico e chimico.

Attraverso tali studi sono stati concepiti formulati utili per sigillature, ripristini e ricostruzioni e sono state individuate le tecniche operative ottimali.

Il marmo di Zandobbio, estratto nell'omonima zona all'imbocco della Valle Cavallina (Bergamo), è stato ed è tuttora un lapideo largamente utilizzato in area bergamasca.

Mineralogicamente costituito da cristalli equidimensionali di calcite (100-300 micron), questo marmo si caratterizza per la presenza di un fitto reticolo di fratturazioni, parzialmente o totalmente cementate da microspatite.

Complessivamente di colore biancastro, sfuma a volte verso tonalità bianco-rosate o, più raramente, verso toni ocra molto tenui per presenza di impurità ferrose.

Oltre ai depositi di polvere e particolato inquinante, più o meno solidamente congiunti con il supporto lapideo, il degrado del marmo di Zandobbio consisteva principalmente nell'approfondimento di fessurazioni e corrosioni in alcune zone interessate da dilavamento e ruscellamento.

Tali fenomeni si accentuavano fortemente nelle zone particolarmente esposte dando luogo a fratturazioni nette e distacco di pezzi, talvolta consistenti.

L'esame del litotipo specifico ha permesso l'individuazione di un intervallo di valori chimici e fisico meccanici da rispettare nelle elaborazioni formulative.

I formulati derivati da tale studio sono stati siglati come «Preparazione MAR GRIP ZB» per le applicazioni a spatola (piccole ricostruzioni, sigillature, creazioni di pendenze, gusce dei cornicioni etc) e «Preparazioni CAP-COL» per le riproduzioni e ricostruzioni a colare di maggiori dimensioni in stampi di gomma siliconica.

In tali formulazioni tutta la parte inerte, fino ad una granulometria massima di 0,3 mm., (corrispondente alle dimensioni dei cristalli di calcite del litotipo), è costituita da marmo di Zandobbio opportunamente frantumato, lavato e selezionato in modo da rientrare in una distribuzione granulometrica razionale tale da consentire la massima compattezza del prodotto applicato.

La parte attiva e legante, di composizione minerale ed inorganica, è basata fundamentalmente sulla formazione di calcio carbonato (derivato dalla carbonatazione dell'idrossido di calcio) e da monosilicati idrati derivanti dalla combinazione con silici attive.

I formulati, concepiti con stabilità dimensionale derivata da compensazione del ritiro, esplicano sul litotipo valori di adesione (anche in funzione della scabrosità della superficie) oscillanti tra 1 e 4 N/mm².

I prodotti sono stati concepiti per esplicare in opera valori di resistenza meccanica e modulo elastico inferiori a quelle del supporto particolare, pur rimanendo con ordini di grandez-

za non eccessivamente lontani da quelli del litotipo: a stagionatura ultimata si possono considerare, in opera, i seguenti intervalli di valori:

- intervallo di valori del **Modulo Elastico** 10-25.000 MPa
- intervallo di valori delle **Resistenze Meccaniche**: Compressione 30-60 MPa - Flessione 7,5-9,5 MPa
- intervallo di valori dell'**adesione al supporto** (trazione diretta): 1-4 MPa
- intervallo di valori di **Permeabilità al Vapore** espressi come coefficiente di resistenza al passaggio del vapore (DIN 52615) : μ 50-150
- intervallo di valori del coefficiente di **resistenza al passaggio di CO₂** : μ 1000-3000
- **ascensione capillare** dell'acqua (secondo raccomand. WTA) : $>2 <7$ mm

N.B. Per le applicazioni a spatola sono stati concepiti i valori più bassi di M.E. e resistenza meccanica.



Fig. 3

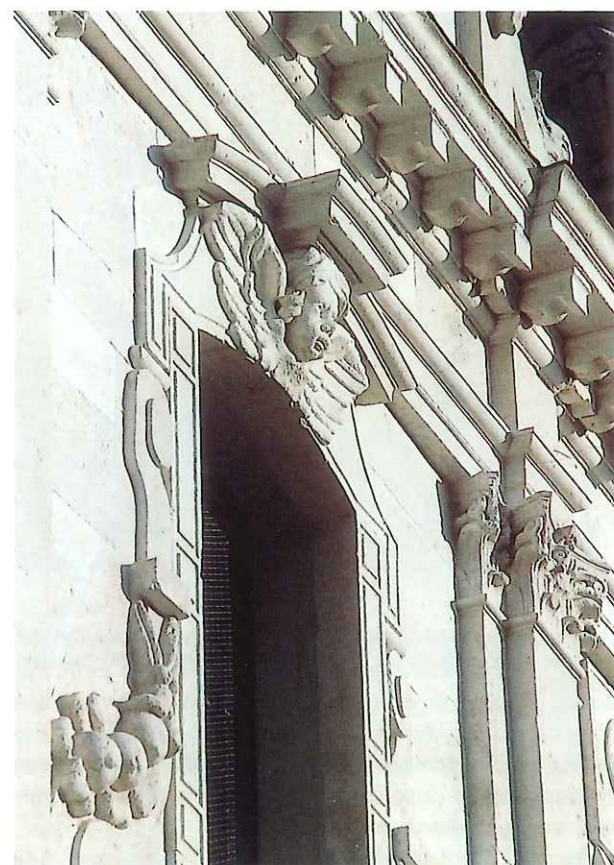


Fig. 4

Nelle connessioni e nelle microfessurazioni è stato inoltre utilizzato il formulato MR-10 costituito da polvere di marmo di Zandobbio (per la sua parte inerte) e con formazione in opera di monosilicati idrati (per la sua parte legante).

Il prodotto è stato concepito con ridotta viscosità per permettere una buona penetrazione anche nelle microfessure, ottimi valori di adesione, protezione delle superfici a contatto e, contemporaneamente, il mantenimento di idonei valori di traspirazione.

Nella fase finale, dopo aver eseguito le varie sigillature, si è proceduto ad una più attenta ed opportuna pigmentazione degli impasti con terre naturali selezionate, stabili ed opportunamente trattate; ciò per rendere possi-

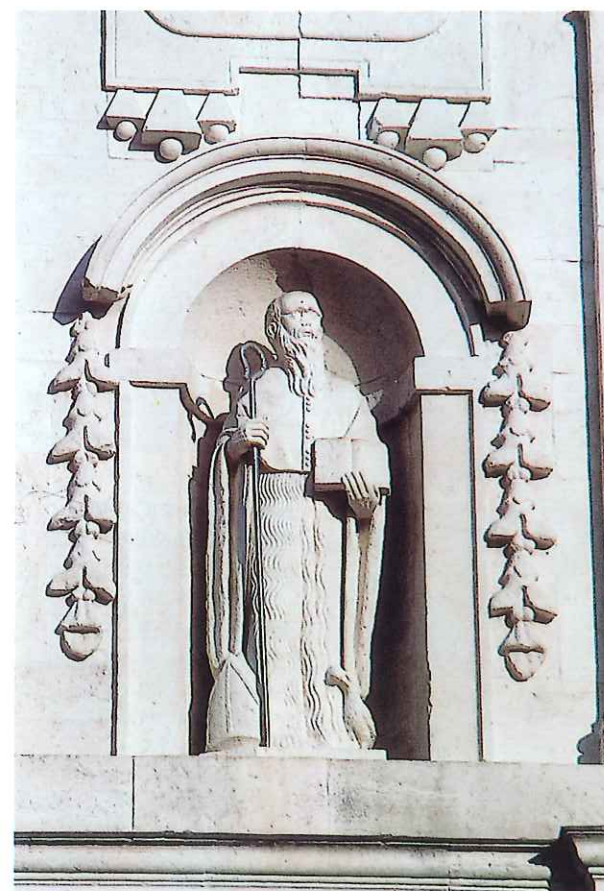


Fig. 5
(Fig. 3, 4, 5) - Particolari della facciata principale a 7 anni dal completamento dei restauri

bile una adeguata lettura cromatica diversificata nelle varie zone a seconda delle gradazioni delle lastre preesistenti.

I toni usati (ocra, ombra, rosso siena) hanno ottenuto lo scopo prefissato di ben avvicinarsi alle tonalità cromatiche del marmo di Zandobbio.

1.4 Trattamenti protettivi idrorepellenti

Il trattamento è stato eseguito su tutte le parti esposte tramite impregnazione con adatto silano oligomero (formulato WP 55) atto a condensare nella pietra sottoforma di polisilossano.



Fig. 6
La facciata barocca di S. PAOLO D'ARGON restaurata



CAPPELLA COLLEONI,
Bergamo Città Alta

Sigillature e piccole integrazioni su tutti i lapidei (marmi, arenarie, ceppi etc...),

rivestimenti con INTONACHINO STORICO, trattamenti protettivi.

Preparazioni MAR-GRIP (15 formulazioni ad hoc).

Preparazioni AR-RAP (6 formulazioni ad hoc).

Preparazioni AR-COL (3 formulazioni ad hoc).

Intonachino storico (6 formulazioni ad hoc).

IMPERMEABILIZZANTE

2. LA CAPPELLA COLLEONI IN BERGAMO

Insigne monumento rinascimentale, opera dell'Architetto e scultore Antonio Amadeo, fu realizzata negli anni 1470/1475. Il centro «Gino Bozza» di Milano (Consiglio Nazionale delle Ricerche) ha eseguito, nell'anno 1987, la classificazione dei lapidei e la diagnosi del degrado seguendo le relative RACCOMANDAZIONI NORMAL (Normativa Materiali Lapidari):

- Qualifica della natura dei materiali lapidei
- Individuazione del grado di finitura delle superfici
- Identificazione dello stato di conservazione

- Definizione delle cause del degrado

Sono stati individuati, sulla policroma facciata principale, i seguenti litotipi :

- CALCARE BIANCO DI VERONA («Biomicrite»)
- ROSSO DI VERONA («Biomicrite»)
- PIETRA DI ARCO (Calcare - «Intrabiosparite»)
- ROSSO DI ENTRATICO (Calcare - «Micrite»)
- PIETRA DI SALTRIO (Calcare - «Intrasparite»)
- MARMO DI ZANDOBBIO («Calcare ricristallizzato»)
- BARDIGLIO APUANO («Calcare cristallino» - Marmo)
- BIANCO APUANO («Calcare cristallino» - Marmo)
- CALCARE NERO («Micrite»)

- PIETRA DI NEMBRO (Calcare - «Micrite»)
- CALCARE MAIOLICA (Calcare - «Micrite»)
- MARMO DI CANDOGIA («Calcare cristallino»)
- PIETRA SIMONA («Arenaria quarzosa»)
- BOTTICINO (Calcare - «Micrite»)

- ARENARIA DI SARNICO («Arenaria litica»)
- MARMO DI MUSSO («Calcare cristallino»)
- PORFIROIDE («Gneiss»)

Vedi le figure n. 7, 8, 9, 10



Fig. 7



Fig. 9



Fig. 8



Fig. 10

(Fig. 7, 8, 9, 10) - Preparazioni formulate "ad hoc" sui lapidei presenti in Cappella Colleoni

Oltre a ciò, sulle superfici del tamburo e del coretto, risultavano presenti intonaci d'epoca a base di grassello di calce. (Vedi fig. 11 e 12)

Nei laboratori della nostra Società furono eseguite determinazioni petrografiche, analitiche, fisico-meccaniche e cromatiche su tutti i litotipi elencati.

Su ognuno di essi sono state elaborate formulazioni coerenti e compatibili sia sotto il profilo chimico che fisico-meccanico e cromatico.

Tali formulazioni sono state applicate nelle operazioni di restauro durate tre anni.

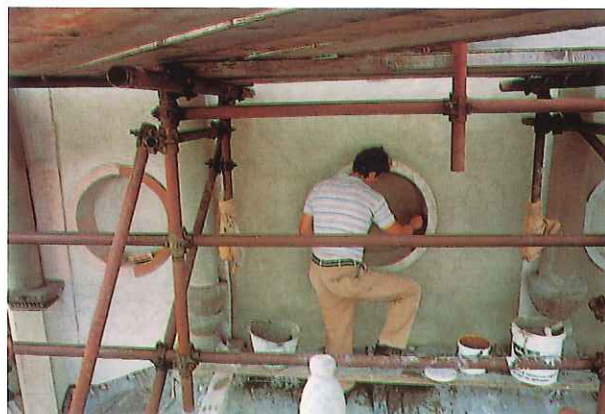
Una descrizione adeguata degli studi eseguiti e delle formulazioni applicate richiederebbe un apposito trattato.

Ci limitiamo perciò, in occasione di questa nota, alla



Fig. 11

Fig. 12



stampa e descrizione di alcune fotografie significative atte ad esemplificare il metodo seguito ed evidenziare alcuni effetti ottenuti.

3. CONCLUSIONI

Un'attenta diagnosi del degrado, seguita da una classificazione analitica, petrografica e fisico-meccanica del materiale lapideo, consentono la formulazione di prodotti tecnologicamente coerenti e compatibili. Tali prodotti sono stati utilizzati per consolidamenti, sigillature, ripristini e protezioni di svariati materiali lapidei con ottime durabilità che si evidenziano in diverse importanti opere di restauro eseguite sin dal 1979.



Fig. 13

Copia fedele della Madonna con Bambino effettuata con PREPARAZIONE ARCOL, in stampo di gomma silconica (l'originale, restaurata, è conservata in museo).

(Fig. 11 - 12). Campionature di intonaci a base grassello di calce colorato in pasta con cocchiopesto macinato in granulometria proporzionata. (INTONACHINO STORICO)

BIBLIOGRAFIA

BELLOCCHIO L.P.: Chiesa di S. Paolo Apostolo - restauro conservativo, fascicolo realizzato a cura della Parrocchia di S. Paolo d'Argon : Ottobre 1993

AA.VV.: Cappella Colleoni in Bergamo - restauro sculture, fascicolo realizzato a cura dell'Assessorato alla Cultura, Amministrazione Provinciale di Bergamo :

Pierluigi Lubrina Editore Luglio 1991

ALESSANDRINI G., BUGINI R., SALA G. «Cappella Colleoni (Bergamo) Parte Prima - qualificazione del materiale lapideo e stato di conservazione», Centro Gino Bozza Consiglio Nazionale delle Ricerche : Luglio 1987

INDICE DELLE NOTE PRESENTATE AL CONVEGNO

Alterazione delle pietre naturali ed artificiali: diagnosi e sistemi di risanamento

- Jörg W. Hansen:* **Le pietre naturali**
- Albert Jornet:* **Calcestruzzo, aspetti generali**
- Lucia Toniolo:* **Pietre naturali, meccanismi di alterazione**
- Roberto Rosignoli:* **Diagnosi del degrado su litotipi arenitici**
- Albert Jornet:* **La microscopia come strumento di diagnosi**
- Marzio Martinola:* **Calcestruzzi con inerti ticinesi**
- Marco Fioroni:* **Stato dei ponti nel Canon Ticino e strategie di manutenzione**
- Marzio Martinola:* **Strategie di risanamento del calcestruzzo danneggiato dalla corrosione degli acciai d'armatura**
- Marzio Martinola:* **Calcestruzzi durevoli ad alta resistenza**
- Pietro Teichert:* **Ripristino delle facciate di una casa-torre con lo spritzbeton**
- Lucia Toniolo:* **Pietre naturali, tecniche di restauro**
- Danilo Broggi:* **Pietre naturali, un esempio di restauro. Palazzo Meroni a Milano**
- Dario Rosignoli:* **Pietre naturali, due esempi di restauro**



Certified Quality System since **FEBRUARY 1993**



FORMULATI SPECIALI PER:

INDUSTRIA MINERARIA - INDUSTRIA DEL CEMENTO - INDUSTRIA DEL CALCESTRUZZO
RISTRUTTURAZIONE CIVILE ED INDUSTRIALE - RESTAURO MONUMENTALE - IMPERMEABILIZZAZIONE

TECNOCHEM ITALIANA S.p.A.

24030 BARZANA (BG) VIA SORTE, 2/4 - TEL. 035 55.48.11 - FAX 035 55.48.16 - E-mail: info@tecnochem.it - www.tecnochem.it