

Università degli Studi di Palermo

Dottorato in Ingegneria Edile: Tradizione e  
Innovazione  
XXI Ciclo

ICAR 10

*Pietre artificiali cementizie negli edifici  
storici di Palermo.  
Proposte di restauro con tecnologie e  
calcestruzzi innovativi.*

Tesi di dottorato della Dott.ssa Serena Mineo

Coordinatore  
Prof. Ing. Giuseppe Pellitteri

Tutor  
Prof. Ing. Salvatore Lo Presti

Anni Accademici 2007, 2008, 2009, 2010

## INDICE

# **Pietre artificiali in conglomerato cementizio negli edifici storici di Palermo. Proposte di restauro con tecnologie e calcestruzzi innovativi.**

## PARTE I

*Le decorazioni in pietra artificiale realizzate tra la fine dell'ottocento e i primi del novecento.*

*Degrado e diagnostica.*

1. Introduzione
  - 1.1 la pietra artificiale e il contesto storico
  
2. La pietra artificiale in conglomerato cementizio
  - 2.1. materiali e colori: evoluzione e metodi di produzione
    - 2.1.1 il cemento
    - 2.1.2 l'acqua
    - 2.1.3 gli aggregati
  - 2.2. indagine tipologica
    - 2.2.1 rilevati plastico-architettonici
    - 2.2.2 lastre
    - 2.2.3 pavimentazioni "gettate"
    - 2.2.4 piastrelle
    - 2.2.5 elementi vari
  - 2.3. tecniche di formatura
    - 2.5.1 elementi realizzati in opera
    - 2.5.2 elementi realizzati fuori opera
    - 2.5.3 stampi
  - 2.4. lavorazione superficiale
    - 2.7.1 lavorazione a secco
    - 2.7.2 lavorazione a fresco
    - 2.7.3 strumenti e accessori
  - 2.8 tecniche costruttive di pavimenti, piastrelle e lastre
  
3. Le manifestazioni di degrado
  - 3.1 cause di degrado da agenti chimici
    - 3.4.1 carbonatazione
    - 3.4.2 attacco dei cloruri
  - 3.2 cause di degrado di natura fisico-meccanica
    - 3.4.1 cicli gelo disgelo
    - 3.4.2 variazione dell'umidità relativa

- 3.4.3 abrasione – erosione – urti
- 3.3 cause di degrado da agenti biologici
- 3.4 cause di degrado di altra natura
  - 3.4.1 difetti di produzione
  - 3.4.2 difetti di posa in opera
  - 3.4.3 gli interventi manutentivi
- 4. La diagnostica sulle pietre artificiali
  - 4.1. Prove in situ
    - 4.1.1 analisi pachometrica
    - 4.1.2 analisi magnetometrica
    - 4.1.3 analisi colorimetrica
    - 4.1.4 analisi ultrasuonica
    - 4.1.5 analisi termografica
    - 4.1.6 analisi endoscopica
  - 4.2. Prove in laboratorio
    - 4.2.1 prelievo del campione
    - 4.2.2 osservazione al microscopio ottico in sezione sottile (MOP)
    - 4.2.3 diffrazione ai raggi X (XRD)
    - 3.2.3 osservazione al microscopio elettronica a scansione (SEM)

## PARTE II

*La ricostruzione di parti mancanti di pietre artificiali in conglomerato cementizio.*

*Materiali e Tecnologie.*

- 5. I materiali per il ripristino
  - 5.1. I materiali cementizi
  - 5.2. I materiali polimerici
    - 5.2.1 le resine epossidiche
    - 5.2.2 le resine poliuretaniche
  - 5.3. I materiali compositi
- 6. Le tecniche d'intervento
  - 6.1. prodotti a base cementizia
    - 6.1.1 applicati a spruzzo
    - 6.1.2 applicati a spatola
    - 6.1.3 colati
  - 6.2. SCC
  - 6.3. HPC – RPC

## PARTE III

*Definizione processo di restauro della pietra artificiale.*

*Casi di studio.*

### 7. Progettazione processo di restauro

- 7.1 ricerca storico-archivistica
- 7.2 rilievo delle patologie di degrado
- 7.3 rilievo tridimensionale
  - 6.3.1 tecnica laser scanner 3D
  - 6.3.2 tecnica Z scann
- 7.4. modellazione dell'elemento rilevato
- 7.5. realizzazione di casseforme tramite fresatrice ad interfaccia cad/cam
- 7.6. sperimentazione e progettazione di materiali compatibili con l'elemento in pietra artificiale

### 8 Casi studio

- 8.1 La cultura tecnica di Palermo e l'ecllettismo di inizio secolo
  - 8.1.1 le prime sperimentazioni
  - 8.1.2 i protagonisti
  - 8.1.3 le realizzazioni
  - 8.1.4 le ditte produttrici
- 8.2 Palazzo dei Principi di Paternò
  - 8.2.1 Regesto documenti dell'archivio Zanca
  - 8.2.2 Il restauro degli acroteri di palazzo Paternò
- 8.3. Castello Utveggio
  - 8.3.1 rilievo 3D capitello
  - 9.3.2 elaborazione dei dati - modellazione elemento
  - 9.3.3 realizzazione cassaforma in resina
  - 9.3.4 programma diagnostico
  - 9.3.5 sperimentazione

#### *Tavole*

Indagine: caratteristiche dei materiali in commercio

Le norme UNI

#### *Bibliografia*

#### *Fonti per le illustrazioni*

## 1.INTRODUZIONE

Quasi tutta l'architettura Europea, a partire dal XV sec fino alla metà del XX, è caratterizzata dalla presenza di decorazioni plastico-architettoniche che arricchiscono gli edifici, sia nell'architettura monumentale che in quella minore. Le decorazioni plastiche così come gli elementi di completamento delle edifici inizialmente erano fatti in materiale lapideo, poi fu utilizzata, per realizzare queste parti, la cosiddetta tecnica dello "stucco" e del "marmorino", che ebbe larga diffusione fino alla fine dell'Ottocento sia per motivi estetici che economici, sino a quando cioè, grazie all'invenzione di un nuovo legante "il cemento Portland" fu messa a punto una nuova tecnologia costruttiva, raffinata e duttile, che consentiva di realizzare manufatti del tutto simili alle pietre naturali le cosiddette "pietre artificiali".

La pietra artificiale è un materiale costituito da un impasto a base di legante, cemento Portland o altro, sabbia e graniglia di pietra, a volte pigmenti, che miscelato con acqua, prende forma colato negli stampi e/o nelle casseforme. Esiste però una duplice valenza offerta dall'innovativo processo costruttivo, una strutturale e tecnica, l'altra formale e decorativa, legata ad un significativo valore estetico, oltre che costruttivo vero e proprio; la pietra artificiale viene vista come elemento plasmabile che può lavorarsi alla stregua di una scultura, si adatta ad esprimere il dinamismo plastico, l'organicità delle strutture come imitazione delle forme del mondo vegetale.

In questa tecnologia possiamo ritrovare due concetti fondamentali : quello dell'artificio e quello dell'imitazione della pietra naturale.

Un manufatto, un ornato, una partizione architettonica, se realizzati in materiale lapideo artificiale, possono sempre essere definiti come elementi o membrature in pietra

artificiale, se ciò serva a distinguerli da oggetti analoghi realizzati o realizzabili in pietra naturale. Tuttavia accanto al significato mimetico, che pure fu molto criticato all'inizio del XX secolo, associato questo all'eccesso decorativo del nuovo materiale, va sottolineata una valenza espressiva del cemento, ben rappresentata da un'infinità di ornati, spesso pezzi unici, realizzati o realizzabili in virtù delle caratteristiche plastiche e di resistenza meccanica, proprie della malta cementizia. Si pensi, ad esempio alle balaustre dei balconi, ai mascheroni, alle fasce più o meno estese di decorazioni fito e zoomorfe.

L'espressione "pietra artificiale" o "marmo artificiale" sembra più corretta allorché si intenda un manufatto realizzato ad imitazione del naturale, nel significato di imitazione materica più che formale; in termini di struttura, apparenza della grana, tinta, anche con lavorazione superficiale "a togliere". Il conglomerato è realizzato con legante aereo, misto o eminentemente idraulico, sabbia silicea, ghiaino, graniglia, frammenti di rocce, pigmenti prevalentemente minerali. L'elemento può essere confezionato fuori opera od in opera, e spesso, ma non sempre, richiede una lavorazione, con martellina, bocciarda ecc., tipica della pietra naturale.

Quando invece un manufatto, in conglomerato a base di cemento Portland, lisciato e sagomato in opera o gettato fuori opera, concorra alla definizione dell'apparato decorativo e si faccia rilevante la riproduzione di forme a discapito dell'aspetto di "imitazione di materiale" naturale esistente, sembra appropriata l'espressione "decorazione in cemento", "cemento artistico", "cemento decorativo". È qui che il nuovo materiale acquista un proprio ruolo espressivo ed è associato in particolare modo all'architettura liberty; in ogni caso al periodo del decorativismo eclettico. Le forme tipiche del periodo diventano realizzabili proprio in funzione delle

caratteristiche meccaniche e plastiche della malta cementizia con o senza armatura.

La ragione della sua diffusione è legata alla capacità del materiale a prestarsi a qualsiasi forma, alla sua economicità ed al periodo ricco di sperimentazioni di materiali nuovi e tecniche nuove. E' una lavorazione più vicina all'alto artigianato che alla produzione industriale, si può dire che i manufatti in P.A. siano un primo tentativo di prefabbricazione nell'edilizia, essi vengono, infatti, prodotti fuori opera, dentro le botteghe, questo tipo di materiale viene utilizzato alla fine dell'800 per un periodo relativamente breve nella storia dell'architettura, e non va oltre la prima guerra mondiale.

Al di là di questa data viene utilizzato per produrre materiali da costruzione, come i blocchi di cemento, e si utilizzerà una tecnica industrializzata. La scomparsa dei cementi decorativi dalle tipologie residenziali è stata rapida come la loro ascesa. Mentre negli edifici rappresentativi permane fino agli anni venti la tendenza al monumentale, la crisi edilizia corrispondente alla guerra incide drasticamente sul settore abitativo, e di conseguenza blocca ogni estro ornamentale.

Alla base del presente studio vi è l'intento di considerare le decorazioni in pietra artificiale in conglomerato cementizio, realizzate tra la fine dell'ottocento e i primi anni del novecento, come opere "storiche" frutto di abilità manuali e saperi artigianali. Assurdamente i danni maggiori provocati su questi elementi sono proprio da attribuirsi ad interventi manutentivi il cui esito talvolta risulta deturpante, tanto da compromettere la durabilità della pietra artificiale e da modificarne l'espressività materica stravolgendone a volte anche la cromia originale.

L'obiettivo di tale lavoro è quello di proporre per la prima volta al suo restauro conservativo, attraverso l'utilizzo delle tecniche d'intervento disponibili, tenendo conto della varietà delle situazioni particolari, allo scopo di evitare interventi radicali di rifacimento, partendo dalla considerazione che non si possa intervenire su alcun edificio o elemento architettonico se non si conoscono i processi di formazione dell'uno o dell'altro.

Negli interventi di recupero seguiti si è perso di vista l'intento col quale era nata la pietra artificiale, che era quello di voler imitare la pietra naturale. Il proposito di voler imitare il materiale naturale implicava una scelta accurata della graniglia e delle polveri di varie pietre, dalla granulometria differente, miscelate seguendo delle vere e proprie "ricette", messe a punto dal maestro e conservate come gelosi segreti di bottega.

Ma la grande varietà degli impasti è stata soppiantata da un unico conglomerato, utilizzato per gli interventi, chiaramente il materiale finale risulta diverso da quello autentico, sia nella composizione, sia nell'aspetto esteriore. Si cerca quindi di porre rimedio alla diversità di colore mediante rivestimenti con pitture coprenti, ma nulla si può fare per la mancanza della grana superficiale e delle lavorazioni superficiali che tanto avevano impegnato i maestri stucchinai e che concorrevano a far sembrare questi manufatti quasi identici alla pietra vera. Le motivazioni di tali scelte sono sia economiche, un conglomerato così composto costa meno, sia pratiche, le operazioni sono semplificate, infatti per risalire alla composizione originale dei manufatti occorre eseguire delle analisi, e poi ricercare le pietre da cui ricavare le graniglie per l'impasto.

Per facilitare la posa in opera sovente gli elementi ricostruiti vengono pensati in un pezzo unico, ma se da una parte un minor numero di giunti riduce i problemi collegati al ritiro

della malta di giunzione, dall'altra si producono elementi più rigidi ai quali viene impedito ogni movimento. Dei manufatti originali non viene riproposta altro che la forma, ma i principi dell'artificio e dell'imitazione caratteristici di tale tecnica si sono persi per lasciare spazio a ragioni di economicità e praticità.

Per la pietra artificiale s'impone un indispensabile recupero storico e culturale che affronti adeguatamente la sua conservazione, troppo spesso compromessa da interventi inadeguati.

### 1.1 LA PIETRA E IL CONTESTO STORICO

Liberty, Jugendstil, Modern Style, Art Nouveau, Arte Jòven, Floreale, ecc.

La pietra artificiale, da semplice espediente per tagliare sui costi divenne dapprima una consuetudine, per la capacità di fornire un'immagine aulica a un prezzo ragionevole e, ancora, un'autentica e consapevole scelta di opportunità altrimenti non realizzabili, come testimonia l'osservazione del tripudio formale espresso dalle esecuzioni più tarde. Gli stilemi assunti divennero più arditi e alle forme medievali, rinascimentali, neogreche e di un timido liberty, si preferirono quelle manieriste, neobarocche, art decò o fusioni eclettiche, impiegando una più matura perizia tecnica per generare tinte chiaroscurali attraverso oggetti plastici e pronunciati.

Dal Rinascimento ad oggi, gli architetti hanno provato ad impiegare materiali artificiali per garantire alle loro opere una maggiore durata. Tra gli altri Bramante, Palladio, e Bernini, che tentarono di imitare la pietra naturale con impasti di calce. Un tempo, il termine pietra artefatta era di uso comune per indicare i blocchi di calcestruzzo adoperati non solo nei

lavori marittimi, o di regimentazione dei fiumi, ma anche nell'edilizia, Il Cavaliere San Bertolo ha ricordato come, nella prima metà dell'Ottocento, fosse costume nella padana Alessandria di valersi di pietre artificiali "invece della pietra da taglio, specialmente per la costruzione delle parti angolari delle muraglie nelle fabbriche civili".

L'uso della pietra artificiale in architettura si diffuse, comunque, allo scadere dell'Ottocento, contemporaneamente al più vasto impiego del cemento per realizzazione di elementi decorativi quali conci etc., e, nei primissimi anni di questo secolo, ha avuto felici applicazioni nel campo del restauro monumentale.

Primi esempi a Firenze inizi '900:

- Metope Palazzo Grifoni (Budini-Gattai) in Via dei Servi e Piazza SS. Annunziata
- Zoccolature Palazzo Corsi in via Tornabuoni, dell'ex convento degli Scolopi in via Martelli e della Biblioteca Marucelliana.

## 2. LA PIETRA ARTIFICIALE IN CONGLOMERATO CEMENTIZIO

Il problema del lessico.

Con l'espressione "pietra artificiale"<sup>1</sup> si intenda un manufatto realizzato ad imitazione del naturale, nel significato di imitazione materica più che formale; in

---

<sup>1</sup> **Pietre artificiali.** — “Da noi, le pietre artificiali più comuni sono i *Laterizi*, ....

Vanno annoverati fra le Pietre artificiali anche le *malte*, i *calcestruzzi* ed i *cementi armati*: le prime composte di *calce* o *cemento*, *sabbia* ed *acqua*; i secondi composti di *calce* o *cemento*, *sabbia* e *ghiaia*.

Con la cottura in fornaci comuni od a fuoco continuo delle varie *pietre calcari*, si ottengono le *calci*, i *cementi* ed i *gessi*, che si impiegano per l'impasto delle malte suddette.”

termini di struttura, apparenza della grana, tinta, anche con lavorazione superficiale "a togliere". Il conglomerato è realizzato con legante aereo, misto o eminentemente idraulico, sabbia silicea, ghiaino, graniglia, frammenti di rocce, pigmenti prevalentemente minerali. L'elemento può essere confezionato fuori opera od in opera, e spesso, ma non sempre, richiede una lavorazione, con martellina, bocciarda ecc., tipica della pietra naturale.

Di seguito si riportano alcuni esempi che chiariscono come, modificando il conglomerato con l'opportuna scelta dei materiali e dei colori, fosse possibile imitare la pietra naturale.

Imitazione di una *roccia magmatica intrusiva* come il granito, la sienite ecc., con impasti di graniglia, cemento e pigmenti coloranti, foggiate in lastre, o stesi in opera, lavorati e spesso accostati in diverse cromie.

Imitazione del *Ceppo* con un impasto a grana fine alternato a zone con ciottoli colorati centimetrici, liscio o lavorato in superficie, generalmente in blocchi o lastre di grande spessore.

Imitazione della *Pietra di Viggiù*<sup>2</sup> con un impasto brunastro a granulometria fine. Questa pietra era infatti molto diffusa nell'edilizia del XIX secolo sia per i rivestimenti che per le decorazioni.

Imitazione dei *Travertini* è invece caratteristica degli anni '20: il travertino, del tutto sconosciuto nella tradizione architettonica milanese e lombarda, si diffuse infatti in quegli anni. La tessitura, ricca di cavità allineate, veniva replicata con una malta chiara percorsa dalle cavità lasciate da cristalli di sale opportunamente inseriti nell'impasto.

Quando invece un manufatto, in conglomerato a base di cemento Portland, liscio e sagomato in opera o gettato fuori opera, concorra alla definizione dell'apparato decorativo e si faccia rilevante la riproduzione di forme a discapito dell'aspetto di "imitazione di materiale" naturale esistente, sembra appropriata l'espressione "decorazione in cemento", "cemento artistico", "cemento decorativo". È qui che il nuovo materiale acquista un proprio ruolo espressivo ed è associato in particolare modo all'architettura liberty; in ogni caso al periodo del decorativismo eclettico. Le forme tipiche del periodo

---

<sup>2</sup> La pietra di Viggiù è una fine arenaria di colore grigio paglierino estratta dalle cave della Val Ceresio in provincia di Varese, nei pressi del paese di Viggiù.

diventano realizzabili proprio in funzione delle caratteristiche meccaniche e plastiche della malta cementizia con o senza armatura.

## 2.1 materiali e colori

Da un punto di vista compositivo, la pietra artificiale è costituita da quattro componenti: l'aggregato, il legante, l'acqua e gli additivi.

L'aggregato lapideo più spesso chiamato impropriamente inerte, può essere differenziato a seconda della sua granulometria in: sabbia e ghiaia o pietrisco.

Anche il legante può essere costituito da vari sistemi, il più diffuso dei quali, è il cemento Portland.

Per comprendere meglio quali erano i materiali utilizzati agli inizi del novecento si è dato un sguardo a quelle che erano le norme in quel momento in vigore e si comincia con l'emanazione nel 1907 delle *“Norme e Condizioni per le prove e l'accettazione degli agglomeranti idraulici”* con Regio decreto n.10, il 23 maggio 1932 vengono emanate le *“Norme per l'accettazione degli agglomeranti idraulici e per la esecuzione delle*

*opere in conglomerato cementizio”* con Regio decreto n.832....

L'aggiunta di ulteriori materiali, come la pozzolana naturale o il calcare, la cenere di carbone o la loppa d'altoforno, proveniente dalle scorie di altre lavorazioni, determina una differente classificazione del cemento: Portland di miscela, pozzolanico, d'altoforno, composito a seconda della quantità delle materie prime e seconde presenti.

La pietra artificiale è, dunque, un materiale composito formato da aggregati lapidei, tenuti insieme da un collante di natura inorganica, costituito da una miscela di acqua e legante, in alcuni casi colorata con l'aggiunta di eventuali pigmenti.

### 2.1.1 il cemento

L'evoluzione della pietra artificiale ha camminato parallelamente all'evoluzione dei cementi.

Il cemento risulta indispensabile alla realizzazione delle pietre artificiali, per via della sua ottima capacità di presa e indurimento, che consentono al

contempo alti spessori di malta, e durezza omogenea anche negli strati non superficiali<sup>3</sup>.

Il vocabolo cemento<sup>4</sup>, che indica un legante idraulico, compare nella seconda metà del XVII secolo, fino ad allora indicava una miscela di sabbia e calce spenta.<sup>5</sup>

L'incertezza nell'uso della terminologia accompagna gli esordi della produzione dei leganti idraulici cementizi e i primi tentativi per una loro classificazione e "dettagliata nomenclatura" sulla base dello sviluppo degli studi e delle cognizioni chimico-fisiche, consentono solo in parte di ricostruire tipi e sviluppi della produzione<sup>6</sup>. Attorno al tema si concentrano ingenti sforzi produttivi e tecnici nei quali si intrecciano differenti "saperi" (in

---

<sup>3</sup> Nell'antica Bottega Meli di via dei Serragli a Firenze, ancora negli anni '50/'60, titolare Rolando Meli, si preferiva utilizzare i cementi delle marche Bruschi o Belliano (attualmente non più in commercio) per via della loro colorazione chiara rispetto agli altri; questo consentiva di ottenere cromatismi più idonei perlomeno nella formatura di pietre artificiali tipiche dell'area fiorentina.

<sup>4</sup> Cemento dal significato latino di pietra grezza da legare.

<sup>5</sup> Cfr. C. Gorla, "Evoluzione storica dei leganti e dei conglomerati dall'empirismo alla loro conoscenza razionale", in Aa. Vv., *Cemento Storia Tecnologia Applicazioni*, Fratelli Fabbri Editori, Milano 1976, p.46.

<sup>6</sup> La letteratura che si occupa degli agglomeranti idraulici e ne tenta una classificazione è vasta: oltre ai testi francesi e tedeschi, si possono ricordare gli opuscoli pubblicitari delle diverse ditte (specialmente nel Monferrato), i manuali di F. Molinari, Laterizi, gessi, pozzolane, calci e cementi, Milano 1887; A. Arlorio, *Cementi Italiani*, Milano, 1893; L. Mazzocchi, *Calce e cementi*, Milano, 1895; P. Vacchelli, *Le costruzioni in Calcestruzzo ed in cemento armato*, Milano, 1899; C. Zamboni, *Il cemento Portland della ditta F.lli Pesenti fu Antonio di Alzano Maggiore*, Bergamo, 1901; gli articoli su *Il cemento*, dal 1904, per giungere a L. Bertelli, *Cementi e calci idrauliche*, Milano, 1912; G. Sylva, *I Cementi*, 1913.

primis la geologia e la mineralogia per lo studio metodico dei banchi, la fisica per i processi di cottura, la chimica per l'analisi e il controllo, la meccanica per la tecnologia industriale), e dalle generiche categorie di "agglomeranti" descritti negli opuscoli degli anni Settanta-Ottanta dell'Ottocento (calci grasse, magre, idrauliche, eminentemente idrauliche, uso Palazzolo, cementi) si perviene presto ad una ricca articolazione dei soli cementi, variamente denominati: Portland, cementi a lenta o a rapida presa, cementi pozzolanici, "calci limite", cementi Parker, "romani" o cementi di grappiers, i trass, cementi di scorie, cemento bianco, magnesiaco, cemento selenitoso, "cemento granito", etc. La distinzione fondamentale, anche perché induce considerevoli varianti nell'organizzazione dei processi produttivi, resta quella tra naturale e artificiale.

La produzione italiana principalmente si avviò verso il primo tipo, poiché "le nostre pietre calcaree si prestano non solo per fabbricare i prodotti cementizi comuni, ma sono eccellenti anche per fabbricare cementi più fini e perfetti, ad es.: Grenoble,

Kufstein, ecc, che ancora si importano dall'estero, in grande quantità"<sup>7</sup>.

Uno prima di applicazione di miscela a caratteristiche idrauliche<sup>8</sup>, dopo il periodo romano, venne effettuata dall'inglese **John Smeaton**<sup>9</sup> nel 1774, per le fondazioni del faro di Eddystone, per le quali venne impiegato come legante un miscuglio di calce viva, argilla, sabbia, e scorie di ferro compresse, la cui caratteristica fondamentale era quella di indurire in acqua.

---

<sup>7</sup> Francesco Molinari, Appunti sulle pietre da Calce e da Cemento, Milano, 1893. Il tema della maggiore affidabilità del naturale o dell'artificiale registrerà opinioni discordanti nei primi anni Dieci, con la diffusione del processo artificiale.

<sup>8</sup> Il legante era fatto con una malta di parti uguali di calce e trass olandese. Smeaton fece delle prove sui calcari e trovò che la calce ottenuta dal calcare del lias azzurro di Aberthaw della contea di Clamorghan era migliore perché donava maggiore solidità alle murature sott'acqua.

<sup>9</sup> "John Smeaton, uno dei più celebri pionieri dell'ingegneria civile inglese, nato ad Austhorpe (Leeds)" cfr. p.42.

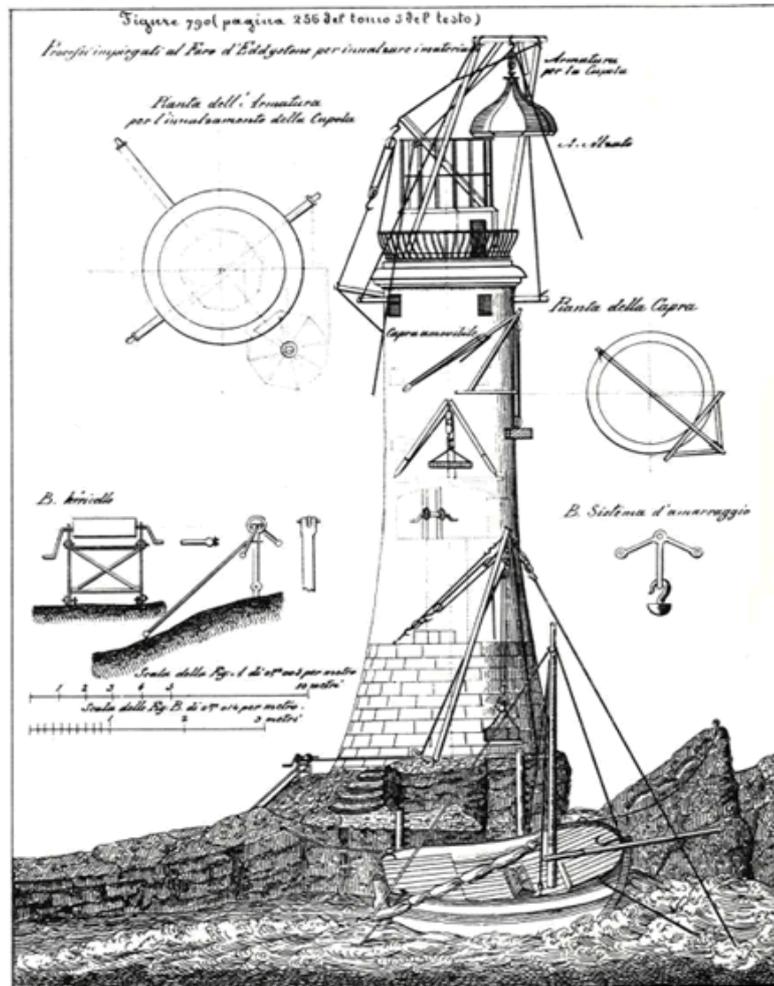


Fig.: Il faro di Edelgotsen in una rappresentazione di M. G. Venezia 1849.

Il successo ottenuto dalla nuova tecnica costruttiva, introdotta in via sperimentale da John Smeaton, indusse molti a tentare una razionalizzazione del procedimento. Così nel 1796 **James Parker** brevettò un cemento idraulico naturale ottenuto dalla macinazione di noduli di calcare impuro contenenti argilla; tale nuovo tipo di cemento prese il nome di Cemento del Parker o Cemento Romano.

Il cemento più usato per la realizzazione della pietra artificiale è il cemento Portland, che è un materiale particolarmente idoneo, sia per la sua capacità di resistenza, che per la sua vocazione a costituire forme plastiche architettoniche quanto mai complesse e assolutamente inusitate fino alla sua comparsa.

Il cemento Portland fu scoperto in Inghilterra agli inizi dell'Ottocento, fu fabbricato rudimentalmente per la prima volta dall'inglese Joseph Aspdin<sup>10</sup> nel 1824. Egli utilizzava per la sua cottura un normale forno da calce nel quale immise una miscela finemente macinata di calcare e argilla<sup>11</sup>. Il prodotto ottenuto, dopo l'indurimento, per la somiglianza che aveva con il colore grigio e l'aspetto lapideo, alla pietra cavata nella località di Portland, fu appunto chiamato, dallo stesso Aspdin, "Cemento Portland". Da subito apprezzato per le sue particolari doti di tenacità, durezza e idraulicità, che non trovano paragone con nessun'altra calce fino ad allora

---

<sup>10</sup> Joseph Aspdin, fornaciaio della contea di York, ottenne il brevetto n° 5002 nel dicembre 1824, per il cemento Portland.

<sup>11</sup> Isaac Charles Johnson, contemporaneo e concorrente di Aspdin, visse 101 anni, in una confessione sosteneva che questi non avesse appieno nel suo brevetto descritto certi particolari delle operazioni, come la temperatura di cottura utilizzata, e che appena la miscela di calcare e argilla era pronta e pure il carbone per caricare il forno, Aspdin con le sue mani aggiungeva la sostanza segreta che donava al cemento le alte qualità idrauliche.

conosciuta. Infatti le malte di calce aerea, applicate sulle superfici per le decorazioni, indurivano in maniera disomogenea dall'esterno verso l'interno ed in tempi piuttosto lunghi.

Il cemento Portland si distingue in naturale ed artificiale, a seconda che venga prodotto da marne naturali (calcare argilloso) oppure da miscele di calcari argillosi a diverso tenore di argilla.

Il cemento naturale si ottiene sottoponendo a cottura ad alta temperatura (circa 1350 gradi) le marne.

Questo materiale non era un vero e proprio cemento come lo intendiamo oggi, ma piuttosto un legante fortemente idraulico. Solo nell'1845, un'altro inglese Isaac Johnson, scoprì che se si portava la miscela di partenza ad una cottura vicina alla scorificazione, usando temperature assai più elevate che in precedenza, si otteneva un legante con eminentissime qualità idrauliche, peraltro molto simile ai cementi attuali. Il Portland naturale è ad oggi quasi completamente sostituito da quello artificiale, ottenuto mediante un dosaggio preciso di calcare e argilla da cuocere insieme, al fine di produrre un legante omogeneo e qualitativamente migliore.

Oggi che è stata studiata ed analizzata in ogni sua caratteristica la chimica legata ai componenti, siamo riusciti a raggiungere attraverso l'adeguata combinazione di questi prodotti, una costanza produttiva praticamente assoluta, tale da permetterne l'utilizzo in opere quanto mai eterogenee ed in situazioni ambientali le più diverse.

Lo sviluppo dell'industria del cemento dalla metà dell'Ottocento, diviene costante, sino a sostituire completamente la produzione delle tradizionali calci aeree.

Il Portland, di origine inglese, appare fin dall'inizio il "re" dei cementi, un "materiale essenzialmente moderno"<sup>12</sup>. Gli sforzi degli industriali, si concentrano presto sulla ricerca di calcari marnosi selezionati e la messa a punto di macchinari e processi di cottura e lavorazione adeguati ad ottenere tale materiale, dapprima prodotto a Palazzolo artificialmente sul modello dei procedimenti esteri, e successivamente come cemento naturale nelle officine casalesi e bergamasche<sup>13</sup>.

---

<sup>12</sup> Op.cit. L. Mazzocchi, Calce e cementi, Milano, IV ed., 1915, p. XII.

<sup>13</sup> Cfr. Antonio Pesenti, "Storia del cemento Italiano", I Congresso Nazionale del Cemento, Casale Monferrato, 1937. Cfr. anche C. Goria, "Evoluzione storica dei leganti e dei conglomerati dall'empirismo alla loro conoscenza razionale", in Aa. Vv., Cemento. Storia, tecnologia, applicazioni, Milano, 1976, pp. 11-80.

Le provenienze principali dei cementi sono: Arona, Palazzolo, Casale Monferrato, Bergamo e Grenoble<sup>14</sup>.

In particolare in Italia “i primi studi sui leganti idraulici cominciarono intorno al 1846 nella zona di Casale Monferrato in Piemonte, ricca di giacimenti marnosi, la cui composizione offriva la possibilità di ottenere direttamente ottimi cementi a lenta presa e a rapida presa”<sup>15</sup>.

L'altro cemento molto usato nella realizzazione di pietre artificiali, principalmente per la facilità di poterne gestire le cromie fu il “cemento bianco”.

Nel 1923, dalle pagine di *Le industrie Costruttive*, lo studioso della chimica del cemento F. Ferrari<sup>16</sup> ricorda che è stato proprio "l'alto interesse per la decorazione artistica, della facile disponibilità di un materiale bianco dai caratteri chimici e fisiomeccanici del Portland ad aver "da gran tempo sollecitato gli sperimentatori alla ricerca di metodi pratici per l'ottenimento di tal prodotto ".

---

<sup>14</sup> Cfr. Geom. Augusto Basile, *L'allievo Capomastro-Costruttore*, Casa Editrice Sonzogno, Milano, 1906, p.47.

<sup>15</sup> Cfr. T. Iori, *Il cemento armato in Italia – Dalle origini alla seconda guerra mondiale*, EdilStampa Roma, 2001, p.22.

<sup>16</sup> Fabio Ferrari, nato a Pistoia nel 1878, laureato in chimica presso l'Università omonima. Lavora a Livorno come analista nella Cementeria Italiana.

Cfr. Fabio Ferrari, *Sul cemento bianco, il Cemento e le Industrie costruttive*, Torino 1923, p. 1.

Un vero cemento Portland bianco fu realizzato soltanto dopo il 1900 a seguito degli studi dei Newberry e di Richardson<sup>17</sup> e di F. Ferrari<sup>18</sup>. Nel ciclo di lavorazione bisogna evitare tutto quanto può inquinare il colore, e cioè: come combustibile nei forni si deve usare coke di petrolio, oppure nafte fini senza ceneri, o, meglio di tutto il metano; il clinker deve essere macinato con mulini corazzati con piastre di quarzite ed usando come sfere ciottoli di quarzite, poiché o le ceneri nel fumo oppure lo sfregamento col rivestimento metallico dei mulini sarebbero deteriori per il bianco, che verrebbe macchiato o di grigio o di ruggine.

Questo Portland bianco è interessante per confezionare manufatti simili al marmo, mescolandolo con pietrisco di marmo e sabbia calcarea o silicea bianca.

### ***Metodi di produzione dei cementi naturali a lenta presa***

La fabbricazione di tale cemento richiedeva la materia prima e cioè di carbonato di calce argilloso.

---

<sup>17</sup>

<sup>18</sup> I quali consigliarono di fare aggiunte alla miscela di calcare puro e di caolino bianco di fondenti bianchi, quali i fluoruri di calcio o di sodio, di borace o di acido borico, di leucite che è un silicato di alluminio e potassio.

Poiché è difficile che in una stessa cava si trovino minerali con la stessa composizione chimica, è necessario effettuare analisi chimiche sul materiale cavato.

Le tecniche utilizzate agli inizi del Novecento per verificare che l'intero banco cavato fosse idoneo per la produzione di tale tipologia di cemento erano le seguenti:

**-Operazioni preliminari:** si riduceva il campione, opportunamente scelto, in polvere fina, dalla quale si prelevavano, pesandoli con una bilancia, solamente uno o due grammi.

Questo preciso quantitativo di materiale si faceva prima essiccare in una stufa ad una temperatura variabile,  $100\div 120^{\circ}\text{C}$ ; tale operazione serviva per asportare dal campione tutta l'acqua che poteva contenere; successivamente il campione essiccato e veniva posto in una fiala o capsula di vetro.

Si versavano successivamente su tale polvere  $20\text{ cm}^3$  di acqua distillata e successivamente poco per volta  $10\text{ cm}^3$  di acido cloridrico puro concentrato.

Scaldando leggermente la capsula, l'acido cloridrico sul calcare produceva una effervescenza che permaneva fino a quando non veniva eliminato del tutto il gas di acido carbonico.

Rimanevano a questo punto nella capsula solamente un residuo di silice e silicati e talvolta sabbie quarzose; la soluzione liquida che conteneva la calce, la magnesia, l'ossido di ferro e l'allumina non in combinazione intima con l'argilla.

***-Determinazione del contenuto di silice:*** il contenuto della capsula veniva fatto passare, attraverso un filtro, in una fiala in modo che sul filtro restassero tutte le sostanze indissolubili.

A tale punto il filtro ed il suo contenuto si facevano essiccare a bagnomaria, e successivamente, mettendoli in una capsula di platino, si pesava il tutto.

Da questo peso totale si toglieva quello conosciuto della capsula e delle ceneri del filtro, trovando il peso preciso del residuo insolubile e cioè dei silicati cristallini e delle sabbie quarzose.

***-Determinazione dell'allumina e del perossido di ferro:*** si prendeva la soluzione filtrata e su di essa si versava qualche goccia di acido nitrico e si riscaldava in modo da far passare il ferro allo stato di perossido, dunque si saturava tutto con ammoniaca e si riscaldava a bagnomaria.

Si formava allora un precipitato che, raccolto su un filtro e pesato, epurando il risultato del peso della

capsula, dava il peso netto del perossido di ferro e dell'allumina.

*-Prove di cottura:* estratta la pietra da cemento e portata in officina al fine di ridurla a dimensioni più appropriate, la si faceva cuocere in appositi forni.

La cottura ad elevate temperature, infatti, dà luogo, nella pietra da calcare, a fenomeni fisici quali un cambiamento dei caratteri esterni e a fenomeni chimici come la combinazione tra gli elementi costitutivi della pietra.

La cottura della pietra era un'operazione assai difficile in quanto il fuoco doveva essere gradatamente accresciuto e mantenuto vivo senza interruzioni, per eliminare l'acqua e l'anidride carbonica.

I forni nei quali poteva cuocere la pietra erano di vario tipo e con forme svariate, dipendenti dal procedimento di calcinazione che si adottava e dalla natura del combustibile che si impiegava.

Per la cottura del calcare in genere si poteva operare per infornate successive e distinte oppure disporre che il lavoro nel forno fosse continuo; il combustibile poteva essere fatto ardere assieme alla pietra disponendolo a strati alternati o

confusamente, a contatto di questa oppure in focolare distinto.

In base a tali procedimenti non pochi erano ovviamente i sistemi di forni impiegati per la cottura dei cementi.

In generale comunque i forni principalmente utilizzati erano di tre tipologie:

- forni per combustibili a fiamma corta e lavoro intermittente;
- forni sistema Hoffmann;
- forni sistema Dietzsch.

I forni del primo tipo avevano una sezione verticale che era simile a quella di due tronchi di cono sovrapposti per le basi e raccordati a superficie curva, la sezione orizzontale invece era circolare.

L'altezza variava tra i 5 e i 10 metri e la larghezza tra i 3 ed i 5 metri.

Si sovrapponeva alla loro imboccatura un altro camino per attivare e regolare la combustione.

Il combustibile era a contatto con il calcare e l'operazione di carica si faceva con alternanza tra carbone pietra.

Il primo strato poggiante sulla griglia era di combustibile; seguiva uno strato di calcare che poteva variare da uno spessore di venti ad uno di

trenta centimetri; quindi un altro di combustibile, e così via.

L'operazione di carica è facilitata da una o più aperture praticate nella parete del forno che poi venivano richiuse. Ultimata la carica del forno, con muratura provvisoria si accendeva allora uno strato di carbone che bruciando comunicava l'accensione allo strato superiore, si lasciava a questo punto che la cottura avesse luogo per tutti gli strati.

In media la cottura durava circa 5 o 6 giorni e, non appena ultimata, si procedeva al raffreddamento della massa per circa 3 o 6 giorni.

In generale per forni ordinari le operazioni di carica, cottura e scarica duravano dagli 8 ai 12 giorni, ma a volte ne occorrevano anche 14.

I combustibili più utilizzati erano, e tuttora sono, il coke e l'antracite.

I Forni Hoffman erano fornaci a lavoro continuo e generalmente venivano utilizzati per la cottura di laterizi e pietra da calce, ma talvolta potevano essere utilizzati per la cottura del calcare da cemento.

Essi erano costituiti da una galleria a pianta circolare con volta ricoperta di sabbia oppure da due tratti rettilinei e paralleli raccordati alle estremità da una galleria semicircolare avente uguale sezione

della prima e cioè due metri in altezza e tre in larghezza.

La galleria si divideva in circa quindici o venti scompartimenti uguali, separati da porte in lamiera di ferro.

Ogni scompartimento comunicava esternamente tramite una apertura di dimensioni minime che serviva per caricare della pietra e scaricare gli scomparti.

Inoltre, comunicava con il camino centrale per mezzo di un canale o di un condotto comandabile da una valvola.

Nella volta erano praticati tanti fori cilindrici rivestiti di ghisa, che la attraversano nello spessore ed erano chiusi da cappelli pure in ghisa i quali si internavano con dei risvolti nella sabbia che copriva la volta; da tali fori veniva caricato il combustibile in ogni scomparto.

La pietra calcarea introdotta dall'apertura veniva disposta regolarmente negli scomparti, restringendosi dall'alto verso il basso per facilitare il passaggio dei gas e della corrente che andava al camino.

Altri vani, a forma di stretti pozzi circolari, erano lasciati in corrispondenza dei fori di caricamento del

combustibile affinché il medesimo possa giungere fino al suolo del forno.

Tali fornaci funzionavano esattamente allo stesso modo sia per la cottura dei laterizi che per quella del calcare da calce o da cemento.

I Forni con sistema Dietzsch o anche detti forni a piani, invece, erano costituiti da una griglia, la quale fino alla linea che separa la camera dal crogiuolo era caricata con pietra cruda.

Su questa si disponeva uno strato di combustibile a cui si dava accensione; su questo, a combustione completata, veniva disposta della pietra cruda e poi di nuovo uno strato di combustibile e così via per tutta l'altezza del crogiuolo.

Nel frattempo dall'apertura veniva gettata della pietra cruda in una camera di riscaldamento, indicata in figura 48 dalla lettera E, fino a riempirla tutta; la pietra si disponeva naturalmente a scarpa sul piano che divide la camera D dal crogiuolo.

Intanto in questo avveniva la cottura della pietra messa a contatto del combustibile acceso. In tal modo, utilizzando dei combustibili a lunga fiamma, i gas per effetto del tiraggio riscaldavano la pietra contenuta nella camera di riscaldamento E, la quale

era così preparata alla successiva calcinazione completa.

Quando la prima pietra posta nel crogiuolo era cotta, la si faceva scendere a mano a mano nella camera di raffreddamento togliendo dalla griglia il corrispondente quantitativo di materia cruda.

Nello stesso tempo, con delle pale manovrate dalle aperture indicate in figura dalle lettere L e H, si faceva discendere la pietra dalla camera di riscaldamento al crogiuolo e continuando l'operazione in tale modo il lavoro diventava continuo.

La giusta cottura del calcare si poteva verificare dalle aperture J e bisognava che il fuoco non discendesse sotto il livello del crogiuolo.

Le cariche di combustibile si eseguivano di norma ogni mezz'ora e la pietra rimaneva per circa 12-24 ore nella camera di riscaldamento, circa 1-2 ore nel crogiuolo e circa 12-15 ore nella camera di raffreddamento.

Il forno poteva funzionare ininterrottamente per circa quattro o sei mesi.

**-Macinazione:** La pietra estratta dal forno non passava subito alle apposite macchine per la macinazione, ma si sottoponeva prima ad una

cernita, nella quale venivano scartati i pezzi cotti non perfettamente (riconoscibili per il minor peso, dalla friabilità e dalla tinta giallastra), che poi erano sottoposti ad una nuova cottura, e quelli troppo cotti dal maggior peso e dalla tinta grigiastra.

Nel materiale scartato dal forno, oltre alle pietre troppo cotte o quelle cotte troppo poco, si potevano ancora individuare: polvere di colore grigiastro, costituita in parte dalle ceneri del combustibile ed in parte da pietra che aveva subito un eccesso di cottura e che raffreddandosi era spontaneamente polverizzata oppure polvere di colore giallastro, proveniente dall'estinzione della pietre mascotte; oppure ancora dei frammenti simili a scorie provenienti dal deterioramento del rivestimento refrattario.

Secondo l'accuratezza della cernita, si avevano corrispondenti variazioni della bontà del cemento, che veniva distinto in commercio per tipi di prima, seconda o terza qualità.

Le pietre di cemento ben cotte, a causa della loro durezza, per essere ridotte in polvere fina, richiedevano l'utilizzo di macchine molto robuste.

In genere le operazioni relative alla macinazione si susseguivano nel seguente modo: la pietra ben cotta,

quando era di notevoli dimensioni, veniva portata in appositi frantoi per essere ridotta in frammenti di circa 4 cm.; il tipo di frantoio più comune era quello generalmente detto a ganasce o frantoio di Blake.

Quest'ultimo poteva tritare circa 5000 kg. di cemento cotto ogni ora ed era costituito da due ganasce di ghisa bianca, a volte scanalate, in modo quasi da formare una specie di imbuto a tramoggia.

Una ganascia rimaneva fissa mentre l'altra era animata da un movimento oscillatorio e, per effetto di questo, la pietra grassa introdotta nell'imbuto rimaneva tritata dalla ganascia mobile contro quella fissa, cadeva verso la parte inferiore con le dimensioni volute.

Il materiale risultante da questa prima macinazione, escluso quello troppo grosso che veniva rigettato dentro il frantoio, era ridotto a dimensioni anche minori da macine o molazze verticali, costituite da grosse e pesanti ruote in ghisa o anche da molini a cilindri orizzontali.

Quando la materia, dopo questa seconda macinazione, era delle dimensioni volute, la si faceva passare dentro delle macine orizzontali, che dovevano ridurla allo stato di polvere impalpabile.

Queste macine erano costituite da due mole di pietra disposte orizzontalmente sullo stesso asse, con diametro pari circa a 1,20-1,50 m., e delle quali quella inferiore era fissa e l'altra girava intorno all'asse con velocità che poteva variare tra i 90 e 120 giri al minuto. La materia veniva introdotta dal centro tra di esse.

Tali macine potevano polverizzare da dodici a sedici tonnellate di cemento nelle dodici ore di lavoro.

La polvere di cemento così ottenuta passava per ultimo ai Buratti, i quali separavano il cemento ridotto al grado di finezza richiesto, da quelle parti che non lo fossero ancora e che si facevano ritornare nelle macine.

Questi buratti potevano essere cilindrici a sezione poligonale, e costituiti da una maglia metallica con aperture di dimensioni differenti a seconda della finezza che si voleva ottenere oppure costituiti da un piano inclinato animato da scosse e formato da una tela metallica finemente bucherellata sulla quale si faceva scendere la polvere di cemento.

Finalmente il cemento, passato attraverso i buratti, entrava nei magazzini e da qui distribuito in sacchetti o botti.

*-Conservazione del cemento macinato:* il cemento macinato, generalmente, non si metteva subito in commercio, ma dai buratti veniva passato in grandi silos opportunamente arieggiati, nei quali lo si lasciava riposare per almeno qualche settimana e talvolta fino a due o tre mesi.

Se lo si fosse adoperato appena uscito dalle macine, le malte avrebbero fatto presa troppo rapidamente a discapito della resistenza finale; quest'ultima, inoltre, dapprima sarebbe aumentata con la durata della permanenza del cemento nei silos, ma sarebbe poi diminuita sensibilmente quando questo soggiorno fosse stato troppo prolungato.

La permanenza del cemento quindi, doveva essere calcolata in base alla quantità della calce viva mescolata con questo e alla stabilità dei sali che lo costituivano; infatti, la calce, per effetto dell'umidità contenuta nell'aria che attraversa la massa di cemento depositata nei silos, si idrata e cioè ha luogo la formazione di idrato di calce, grazie al quale si ha un miglioramento della qualità del cemento stesso.

Se il cemento una volta venduto doveva essere sottoposto a lunghi viaggi oppure non doveva essere subito impiegato, bisognava riporlo in fusti di legno

rivestiti di carta incatramata, al fine di impedire ogni azione dell'aria e dell'umidità.

***Metodi di produzione dei cementi artificiali a lenta presa***

***-Materie prime:*** non sempre si trovano filoni o blocchi calcarei di composizione chimica abbastanza omogenea, o sufficientemente estesa, per potere alimentare una produzione continuata di cemento; si può in tali casi ricorrere alla fabbricazione del cemento artificiale cocendo fino al principio di fusione una miscela di calcare misto con argilla.

Le materie più convenienti per formare detta miscela sono il carbonato di calce puro, come ad esempio la creta e l'argilla di composizione uniforme, ed è importante comunque che le materie prime siano di composizione quanto più pura possibile, e cioè che non contengano sabbie o materie organiche.

***-Miscela delle materie prime:*** la prima operazione da compiersi era il mescolamento delle materie prime per ottenere un miscuglio che fosse fisicamente e chimicamente omogeneo in ogni sua parte.

Qualora le materie prime fossero suscettibili a diluirsi facilmente, il procedimento che si adoperava per confezionare la miscela era il seguente: le materie prime ridotte in polvere venivano introdotte insieme ad un certa quantità d'acqua in un bacino di mescolamento a pianta circolare nel quale, per il movimento di un albero verticale fisso ad una grossa traversa in legno, delle robuste aste di ferro ruotavano ad una velocità di circa dodici giri al minuto.

Questo movimento di rotazione provocava la formazione della miscela e la riduzione di questa in una specie di latte o poltiglia molto diluita o argillosa.

Nella parete circolare del bacino vi era una apertura ed una parete metallica a piccolissimi fori che fungeva da scaricatore.

Per tale apertura passava la miscela che veniva condotta, tramite appositi canali, ai così detti bacini di deposito.

Questi erano disposti gli uni di fianco agli altri, erano costruiti in muratura comune ed avevano una profondità che poteva variare da novanta centimetri ad un metro; avevano dimensioni pari a trenta metri di lunghezza e venti metri di larghezza; ognuno di

questi era munito di una saracinesca che serviva per asportare via l'acqua in eccesso nella parte già indurita.

Una nuova parte di poltiglia passava attraverso una saracinesca, formando così un altro deposito e così via fino a che il bacino non si era indurito.

La massa pastosa decantava nel bacino esposta all'azione dell'aria per più mesi (solitamente uno o due), fino a che non aveva preso consistenza tale da potere essere tagliata e portata negli essiccatoi.

**-Dosaggio:** non si poteva effettuare in proporzioni di peso, ma si doveva effettuare in proporzioni di volumi.

Un operaio prelevava ogni quindici-venti minuti uno o due litri di latte calcareo-argilloso, che usciva dal canale scaricatore del bacino di mescolamento, e quando venivano raccolti quattro o otto litri di miscela si analizzava la materia solida in essa contenuta oppure si formava una mattonella di prova che veniva cotta in forni speciali, di cui si verificava poi la qualità.

In tal modo si potevano correggere in tempo utile gli errori di dosaggio.

Non si poteva comunque dire a priori quale fosse il dosaggio migliore per formare miscele, poiché esso

variava con la natura e la qualità delle materie prime ed anche in base al metodo di trattamento.

**-Essiccamento:** le mattonelle di miscela che derivavano dai bacini di deposito contenevano una notevole quantità d'acqua, troppa perché si potessero sottoporre a cottura, ed era per tale motivo che prima dovevano essere essiccate.

Il metodo più semplice era disporle in spazi aperti e piani, coperti da tettoie ben ventilate, ma tale metodo risultava essere troppo lungo e non era applicabile di inverno.

Tali inconvenienti potevano essere risolti riscaldando il suolo dello spiazzo o posando le mattonelle su lastre di metallo riscaldate da focolari speciali.

Il grado di essiccamento da raggiungere doveva essere tale che la pasta non doveva contenere più del 5% di umidità, ma era sempre meglio che la pasta da introdurre nei forni fosse completamente secca.

**-Cottura:** le mattonelle essiccate venivano introdotte nei forni e cotte; da questo punto in poi la fabbricazione del cemento artificiale coincideva esattamente con quella del Portland naturale come descritta prima.

Per confezionare pietre artificiali si consiglia di utilizzare cementi con titolo 325, in quanto avendo una reazione di presa più lenta di quelli con titolo maggiore, consentono una migliore lavorabilità. Inoltre, maturando più gradualmente, raggiungono nel tempo maggiore consistenza con minor rischio di cavillature. C'è poi un'ulteriore considerazione che porta ad escludere il cemento a titolo alto. Esso infatti per sua natura non consentirebbe ai vari strati di malta necessari a formare manufatti in opera, di accorparsi omogeneamente, col rischio implicito di possibili scrostature.

#### 2.1.2 Gli aggregati

*“Sarà ottima nel suo genere, quella sabbia che, strofinata o stretta nel pugno, stride, e quella che, raccolta in una veste candida, non la macchia nè vi lascia residui di terra.”* Con belle immagini ed efficacemente, Leon Battista Alberti definisce concisamente il modo empirico con cui stabilire se una sabbia è di buona qualità. La sabbia è l'inerte principale con cui dare struttura e ossatura alle malte. Essa può essere di estrazione fluviale, di cava

e anche marina; in ogni caso dovrà essere priva di elementi fangosi. Inoltre sono inadoperabili tutte quelle sabbie che provengano da rocce disgregatesi spontaneamente. Per l'utilizzo della sabbia di mare, quando non se ne possa fare a meno, sono assolutamente indispensabili ripetuti lavaggi con acqua dolce per eliminare qualsiasi residuo di sali in essa immancabilmente presenti. La sabbia migliore deve essere spigolosa, possibilmente silicea e di grana ruvida. Gli elementi costituenti la sabbia dovranno avere un diametro oscillante fra 0 e 3 mm., pure considerando ancora sabbia quella contenente granuli che raggiungono i 5 mm. Una buona sabbia, purché abbia matrice litica idonea, può essere ottenuta anche attraverso la macinazione di rocce mediante l'uso di frantoi. In questo caso l'inerte ottenuto avrà certamente sfaccettature particolarmente spigolose e quindi ottimali a ben strutturare la malta che lo contiene.

Per concludere occorre rammentare che a maggiori spessori di malta corrispondono inerti di pezzatura più grossolana e in quantità più elevata. E altresì evidente che in special modo per lo strato di finitura superficiale, normalmente di spessore ridotto,

occorrerà usare invece sabbia di particolare finezza in una malta relativamente grassa.

Estratto dal **Regio decreto 10 Gennaio 1907**  
“*Norme e Condizioni per le prove e l'accettazione degli agglomeranti idraulici*”

**Sabbia normale:** “ La sabbia normale è quella i cui granuli passano attraverso un vaglio in lamiera con i fori circolari del diametro di millimetri 1,5 e restano sopra un altro vaglio, pure in lamiera, con fori circolari del diametro di un millimetro.

La sabbia normale serve a confezionare le malte per le prove degli agglomerati idraulici.

Per le prove di controllo, nei casi di contestazione e per confronti d'interesse generale, si adotterà la sabbia normale del Ticino sopra Pavia , come da deliberazione presa dall'Associazione Italiana per gli studi sui materiali da costruzione al Congresso di Pisa del mese di Aprile del 1905”.

**Applicazione del decreto:**Le prove di resistenza eseguite sui materiali agglomeranti venivano eseguite su provini di malta, operando in condizioni sempre identiche al fine di ottenere risultati confrontabili.

A tale scopo allora risultava necessario operare con un tipo di sabbia che fosse sempre identico, tale sabbia era detta sabbia normale.

La sabbia infatti poteva influire sulla resistenza di un “agglomerante” sia per la sua composizione chimica, sia per quella granulometrica.

La sabbia costituita da un solo minerale era la più idonea ad essere una sabbia normale, infatti in Germania si utilizzava come sabbia normale quella di Freienwalde che era composta quasi tutta di silice. In Italia furono esaminate moltissime sabbie naturali, e confrontate con altre artificiali ottenute polverizzando del marmo e della silice, e da tutte queste esperienze si giunse alla conclusione che la composizione chimica delle sabbie aveva una importanza trascurabile, ed è invece la composizione granulometrica che doveva essere sempre costante se si volevano ottenere resistenze tra loro confrontabili.

Le sabbie lavate ed asciugate venivano così suddivise in tre differenti categorie mediante la vagliatura:

- Con granelli di diametro compreso tra 0,5 e 0,10 millimetri

- Con granelli di diametro compreso tra 1 e 1,5 millimetri
- Con granelli di diametro compreso tra 1,5 e 2 millimetri

L'esperienza portò alla scelta di una sabbia del secondo tipo come sabbia normale.

La difficoltà di reperire una sabbia silicea indusse i tecnici a fissare come sabbia tipo quella del Ticino sopra Pavia che era una sabbia siliceo-silicata in gran parte fina, che conteneva circa l'8,8% di sabbia normale ed era composta essenzialmente di granuli di quarzo.

Nel 1932 cambia il l

***Dal Regio decreto 10 Gennaio 1932:*** - Per sabbia normale, da impiegare nella confezione delle malte per le prove degli agglomeranti idraulici, s'in- tende quella prelevata dal Po a monte della città di Torino. Essa è costituita da granuli che passino attraverso ad un vaglio di lamiera dello spessore di i millimetro con fori circolari del diametro di mm. 1,5 e restino sopra altro vaglio con fori circolari del diametro di i millimetro.

### 2.1.3 GLI INERTI INERTI DI MARMO

Vi sono casi in cui risulta utile, se non indispensabile, impastare nelle malte, anche o solo inerti di marmo di diversa granulometria e colore. E il caso tipico dei marmorini, che però, visto il diverso argomento di questa pubblicazione, ci riserviamo di descrivere e approfondire in altra e più specifica occasione.

E importante invece l'uso che se ne fa per imitare con malte di cemento, paramenti o strutture in travertino.

C'è peraltro poco da dire su questo inerte, che al contrario della sabbia non prevede particolari selezioni, se non quelle relative alle granulometrie più adatte che possono variare da pezzature anche grossolane, fino a raggiungere l'impalpabilità di un talco.

#### INERTI DI TRAVERTINO

Di più difficile approvvigionamento rispetto al marmo, è però ad esso preferibile per confezionare malte cementizie idonee ad imitarlo, I vantaggi derivanti dal suo utilizzo sono soprattutto due: da un lato migliore lavorabilità e scorrevolezza per gli attrezzi di formatura; all'altro, maggiore resistenza all'aggressione acida delle piogge "moderne".

#### 2.2 INDAGINE TIPOLOGICA

### 2.2.3 pavimentazioni “gettate”

A partire dalla fine del ‘500, e soprattutto nei secoli XVII e XVIII, si diffonde progressivamente la tecnica del “*pavimento alla veneziana*”.

Durante il 700, i flussi migratori tra Venezia, l’Europa e le Americhe si fecero intensi, favorendo una ulteriore diffusione dei pavimenti gettati fuori dei confini della penisola italiana, soprattutto in Francia<sup>19</sup>.

I pavimenti alla veneziana sono inoltre presenti in molte aree dell’Italia, gran parte delle abitazioni realizzate tra gli inizi dell’800 e i primi anni del novecento, presentano ambienti finiti con pavimenti gettati. Anche in numerosi spazi esterni porticati troviamo pavimentazioni gettate, ricordo forse dei tradizionali terrazzi delle logge veneziane o originale prosecuzione della tradizione degli acciottolati liguri, in cui campi e fasce di graniglia si uniscono con decori a zone mosaicate.

Paston, pastellon e terrazzo veneziani sono sempre citati, nelle fonti, come pavimentazioni gettate, continue, apparentemente indifferenziate per composizione e aspetto. I terrazzi veneziani

---

<sup>19</sup> Cfr. Jean Rondelet: *Traité théorique et pratique de l’art de bâtir* edito a Parigi nel 1867 (vedi tome XII. capitolo XII, pag 253 e sgg.: *Des Pavés a la vénitienne, dits composés et paviments terrazzati*).

sembrano caratterizzati, almeno in origine, dall'assenza di disegni e di significative variazioni formali e materiali, Venezia in particolare è ricca anche di pavimenti gettati preziosamente decorati.

Il disegno della pavimentazione, molto spesso, negli interni come negli esterni, ricalca, quasi ne fosse una proiezione, la morfologia delle strutture di copertura dei vani e degli spazi, riproducendone più o meno fedelmente le decorazioni. Nervature e spigoli delle volte, cassettonati e travi dei solai, trovano corrispondenza nelle fasce che spesso suddividono il pavimento in campi regolari, o in più articolate partizioni, al loro interno, motivi geometrici, floreali o zoomorfi arricchiscono il pavimento, quasi fosse un tappeto, e ricalcano le forme di stucchi ed affreschi che spesso li sovrastano. Anche in assenza di così nette corrispondenze, i pavimenti più ricercati presentano sempre una o più fasce perimetrali che chiudo il sistema decorativo e mediano il disegno rispetto alle irregolarità del perimetro murario (fuori squadra, ingombri irregolari) e ai suoi punti singolari (imbotti di porte e finestre, gradini).

Gli intrecci tra campi di forme e dimensioni diverse, tra fasce e decori, i più vari, geometrici e liberi, danno vita ad una grande variabilità di situazioni .

Fig...Album dei Pavimenti Ing. Ghilardi & C. 1928.

I pavimenti in getto sono il risultato di un complesso procedimento costruttivo<sup>20</sup> che consiste nella realizzazione di un calcestruzzo gettato in fasi successive con la sovrapposizione di strati di spessore, composizione e funzione diversa. Solo alla fine di questo procedimento il disegno appare nella sua completezza. L'aspetto finale è solo la faccia visibile dell'ultimo strato, opportunamente trattato e lavorato, che tuttavia è tanto profondamente legato agli strati sottostanti da non essere concepibile senza di essi e senza le operazioni precedenti. L'aspetto di campi fasce e decori tipico di questa tecnica, appare così determinato dai materiali che li compongono, dalle forme delle loro pezzature, dal peso e dai rapporti con cui i grani delle diverse grandezze sono tra loro miscelati, dalla composizione e dal colore degli "impasti" in cui sono inglobati.

## 2.5 tecniche di formatura

---

<sup>20</sup> Vedi par. 2.8

L'imitazione della pietra avveniva con diverse modalità in funzione del risultato che si voleva ottenere realizzando, rilevati plastici, finti bugnati, sagome, modanature, piattabande, ecc.

#### 2.5.1 elementi realizzati in opera

È consuetudine e conveniente realizzare in opera tutti quegli oggetti che consentono il “marciare” del modine. Sono perciò da escludersi, cornici con arricchimenti, bassorilievi scultorei e membrature normalmente non giacenti sulla facciata (mensole, balaustre etc.).

Stabilite le forme e le partiture, per realizzare i rilievi architettonici di maggiore sporgenza, in ogni modo per oggetti finali superiori ai 4 centimetri, è indispensabile impostare direttamente sul muro vivo opportune ossature fittili<sup>21</sup>. Si predispongono sulla muratura le apparecchiature di riferimento per lo scorrimento del modine. In tal modo e con l'ausilio del modine stesso, sarà facile controllare che

---

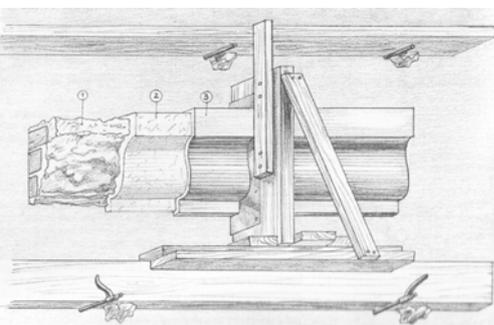
<sup>21</sup> “ossature in cotto”, consentivano qualsiasi aggiustamento partitivo e maggiore precisione esecutiva, dall'altro abbisogna per cornici orizzontali di opportune chiodature di sostegno. Tali chiodature venivano peraltro predisposte quale ancoraggio permanente, infiggendole direttamente nelle commettiture dell'apparecchiatura muraria.

l'oggetto dei conci in laterizio permetta anche l'applicazione del successivo, necessario spessore di malta.

Indicazioni specifiche per confezionare e applicare, malte cementizie e malte di grassello atte a realizzare membrature architettoniche esterne, in pietra artificiale.

Rinzaffo prima operazione manuale ed energica, da applicare sull'ossatura, dovrà essere particolarmente scabra e non superare lo spessore di 6-7 mm. Sul rinzaffo, successivamente alle consuete bagnature, si stende un'arricciatura di circa 2 cm. di spessore. Dopo la sua applicazione, l'arriccio verrà "dirozzato" mediante lo scorrimento del modine sulla malta ancora plasmabile. Si otterrà così il rilevato plastico al grezzo, ma già conforme al suo profilo definitivo.

L'applicazione del velo di finitura è da realizzare su sottofondo ben tirato, ma non secco per agevolare il marciare del modine, ed è indispensabile che sia applicato nella stessa giornata di lavoro. Solo così avremo infatti la garanzia di completa omogeneità del manufatto, che peraltro è ancor più importante quando si preveda una finitura traumatizzante quale



la scalpellatura o la subbiatura. L'applicazione viene eseguita con la cazzuola; si provvederà poi a plasmare definitivamente il rilevato con l'apposito modine che avremo cura di far scorrere sempre nello stesso verso, per ottenere una superficie perfettamente liscia.

## 2.5.2 elementi realizzati fuori opera

### 2.7 lavorazione superficiale

Una caratteristica peculiare della pietra artificiale è il trattamento finale delle superfici. La simulazione del materiale naturale passa attraverso la finitura, le tecniche di rifinitura erano in parte, elaborate e messe a punto secondo una prassi esecutiva funzionale agli attributi propri degli ornati cementizi e in parte, derivavano dalla consolidata tradizione da scalpellino per la pietra naturale.

Prima che per ragioni mimetiche, la rifinitura delle superfici era una necessità di ordine pratico. Essa doveva eliminare le patine neutre superficiali, ricche di cemento, sempre presenti dopo la sformatura degli elementi d'ornato, che non rendevano visibile la grana dell'impasto.

Era inoltre utile per eliminare eventuali disomogeneità cromatiche, dovute a differenze di idratazione dell'ossido di calce in particolari condizioni di temperatura ed igrometria dell'ambiente, soprattutto per le parti realizzate a piè d'opera.

Ed in fine, la cura prestata all'ottenimento di ornati ad imitazione della pietra naturale, in fase di selezione degli aggregati e dei cementi, non poteva ritenersi compiuta senza una lavorazione delle superfici a vista, nella maggior parte dei casi a martellina o a scalpello<sup>22</sup>. Per i manufatti in cemento le lavorazioni di finitura, venivano eseguite normalmente dopo 15-20 giorni, prima cioè del loro completo indurimento (28 giorni). In questo breve periodo, si maturano infatti superfici sufficientemente stabilizzate per sostenere il "trauma" delle lavorazioni "a levare", ma ancora abbastanza "morbide" per facilitarle. Tuttavia anche sulla pietra artificiale si possono eseguire lavorazioni a fresco, come è sempre indispensabile fare con le malte di grassello<sup>23</sup>.

---

<sup>22</sup> Vedi par. 2.7.1.

<sup>23</sup> Cfr. M. Cavallini C. Chimenti, "La Pietra Artificiale", Ed. Alinea, Firenze 1996, p.102.

### 2.7.1 strumenti e accessori

Gli strumenti utilizzati per la realizzazione di pietre artificiali sono legati in parte alla tradizione del muratore, dovendo modellare i materiali tipici del cantiere edile, in parte a quella dello scalpellino, per imitare le finiture storiche della pietra.

Per cui l'attrezzatura generica come la livella, utilizzata per controllare il piano, il metro, la corda per battere i piani, le squadre per controllare l'ortogonalità delle superfici, i regoli per tirare l'intonaco, la cazzuola, lo spaladiere, il frattone, il frattazzo, il pialletto e la caldarella o secchio, sono quindi affiancate da scalpelli, subbie, simile allo scalpello ma con una punta piramidale, mazzuolo, utilizzato per percuotere in modo più efficace subbie e scalpelli, martelline, bocciarde, ecc.

Nel lavoro artigiano gli strumenti hanno un ruolo di primaria importanza; laddove viene ritenuto necessario, lo strumento viene creato per l'occasione, per poi entrare a far parte del bagaglio di utensili.

Una nota particolare va fatta per quegli strumenti, i *modani*, che si utilizzavano per realizzare le modanature in opera.

Il modano è una sagoma ritagliata in lamiera zincata spessa 5/10 mm, che riproduce il negativo del profilo del rilevato plastico che si vuole ottenere, a grandezza naturale.

Successivamente il modano viene bloccato su apposita intelaiatura in legno semplicemente con chiodi d'acciaio.

L'apparecchio così costituito viene fatto scorrere, sempre per un verso, sulla malta ancora fresca, finché, asportando il materiale in eccesso, non si sia perfettamente plasmata la sagoma desiderata. Questo attrezzo può essere utilizzato *sciolto* cioè senza intelaiatura, in lamiera nuda, soprattutto per formare archivolti<sup>24</sup>.

Il modano si utilizza per di più per cornici lineari, per realizzare le cornici degli archi si utilizza la *randa*.

Quando il centro dell'arco è in un punto praticabile, si provvede a fissare una stecca orizzontale attraverso i due stipiti, badando a sistemarla, per archi perfettamente circolari, un po' più in basso del suo centro. In mezzo alla stecca si applica poi un "naso" verticale, anch'esso di legno e al suo centro

---

<sup>24</sup> È rilevante in questo caso la perizia dell'operatore, che dovrà gradatamente modificare l'inclinazione del *modano sciolto*, affinché la cornice si formi senza restringimenti o difetti.

si infigge un robusto chiodo con la funzione di perno. Ad esso verrà quindi collegato mediante apposita asola di scorrimento in lamiera, un regolo a mo' di raggio, a cui infine - dall'altro capo - si fissa il modine prescelto, sormontato da adeguato tacchetto distanziatore.

La perfetta rotazione garantita dalla randa, consente ogni volta manufatti di estrema precisione anche con profili di notevole complessità. Resta a questo punto da chiarire la funzione del "naso": esso serve a tenere la stecca orizzontale sotto l'impostare del semicerchio dell'arco, permettendo così al modine di raggiungere le estremità dell'archivolto da formare.

### 2.7.2 lavorazione a secco

#### SUBBIATURA

Le incisioni prodotte dalla subbia sono indubbiamente le più rustiche e profonde. Gli elementi maggiormente vocati a questa finitura sono perciò e quasi esclusivamente bozzati ad alto rilievo plastico. In ogni modo la subbiatura sarà sempre eseguita su superfici estese e piane, pertanto anche le bozze più aggettanti avranno il canale arrotato, mentre il nastrino che le perimetra può essere, sia

arrotato che spianato a scalpello. Più raramente la subbiatura invade tutte le superfici della bozza.

E di tutta evidenza che per poter eseguire la subbiatura, lo strato di malta pigmentata sarà più spesso che per qualsiasi altra finitura, comunque non inferiore ai 5-6 millimetri.

#### SCALPELLATURA

È una finitura particolarmente espressiva eseguita con uno scalpello normalmente lungo circa 20 centimetri, dalla tipica punta a taglio. Le superfici che si ottengono sono caratterizzate da scabrosità. Anche questa lavorazione è spesso (ma non canonicamente) contornata da nastrino e può connotare anche cornici di dimensioni adeguate.

#### MARTELLINATURA

È una tipica finitura “gentile” eseguita sempre usando l’attrezzo in verticale, dall’alto in basso. Le superfici che si ottengono sono tramate con molta precisione, e quando la martellina sia provvista di denti, le sue solcature conferiscono ai manufatti una preziosità che evoca la filigrana. Si consiglia sempre l’uso di attrezzi medio-piccoli per non percuotere troppo e con ciò indebolire le superfici. Per questa finitura è indispensabile un contorno a nastrino levigato.

#### BOCCIARDATURA

Finitura ottenibile con apposito martello, predisposto all'inserimento di teste metalliche diverse per dimensioni e peso, ma sempre caratterizzate dalla presenza di file regolari di punte a piramide. Con questo attrezzo è possibile "granire" una superficie, conferendole un'espressività simile alla martellinatura dentata, ma il cui andamento a tappeto non ha caratterizzazione né verticale, né orizzontale. Al solito si raccomanda l'uso di bocciarde leggere e finiture perimetrali levigate.

#### LEVIGATURA A SMERIGLIO

È la finitura più epidermica della pietra artificiale, si ottiene molto semplicemente mediante l'abrasione delle superfici. Alla fine di un'operazione lunga e paziente si produce l'effetto pietra, consumando completamente l'impronta della precedente piallettatura. Gli smerigli, una volta naturali, sono oggi sintetici e disponibili in granulometrie diverse. Si consiglia di usarli sempre su supporti pre bagnati e, a lavorazione conclusa, è indispensabile lavare la pietra artificiale con acqua ed acido muriatico in ugual misura. Un'abbondante risciacquo concluderà il lavaggio. Il risultato finale è di grande efficacia e la verosimiglianza alla pietra davvero stupefacente.

### 2.7.3 lavorazioni a fresco

#### PARTITURE

Sono incisioni poco profonde che suggeriscono efficacemente sia la suddivisione dei conci, che dei segmenti di modanatura. Si eseguono unicamente sulla malta fresca con attrezzi diversi: a taglio e a cuneo. Inoltre, con incisione più leggera, si disegnano sempre a fresco anche i nastri da levigare.

Qualche volta, solcature fitte e parallele sono riscontrabili anche come finitura di bozzati rustici. La loro esecuzione avviene graffiando le superfici di ogni bozza con idonee spatole metalliche dentate).

#### FINTA SUBBIATURA

Quando convenga, imitare a fresco anche una superficie subbiata. Col semplice ausilio di una spatola a uncino e grande perizia, si può infatti evitare l'uso della sabbia senza che ciò vada a decremento dell'esito finale.

### 2.8 tecniche costruttive di pavimenti in getto, piastrelle e pannelli

Le tecniche di costruzione dei pavimenti gettati variano da regione a regione. Le diversità riguardano

non tanto la successione delle fasi quanto il loro numero, lo spessore degli strati, la terminologia e, in genere, gli accorgimenti e gli espedienti esecutivi accessori.

Si riportano due tecniche costruttive in cui è presente il legante cementizio, la prima tratta da *I pavimenti alla veneziana* di Antonio Crovato. La seconda da *L'arte di fabbricare* di Giovanni Curioni. Nella prima tecnica A. Crovato descrive i singoli strati necessari per la realizzazione del pavimento alla veneziana<sup>25</sup>.

Il legante utilizzato è appunto il cemento. Le caratteristiche della superficie cromatica realizzata saranno lucida, rigida, omogenea. Si precisa inoltre che le grandi superfici necessitano di giunti ed i pavimenti in calce risultano più morbidi ed elastici. I pavimenti in cemento hanno generalmente disegni geometrici più semplici ed eseguiti con la tecnica delle sagome e non dello spolvero.

Inoltre questi pavimenti sono più durevoli e facilmente mantenibili ma anche facilmente fessurebili. Si passa alla descrizione dei singoli strati

---

<sup>25</sup> Cfr. A. Crovato 1989 "*I Pavimenti alla veneziana*"  
Le tecniche, i tipi e la fase di costruzione  
del terrazzo in cemento, pag. 61 a seg.

componenti:

SOTTOFONDO: rottami impastati con cemento in rapporto volumetrico di 4 : 1; il sottotondo viene battuto, livellato e rullato. (Di solito si inserisce una maglia elettrosaldata per rendere il sottotondo omogeneo)

COPERTA: strato di circa cm 2 di cotto macinato impastato con cemento in rapporto volumetrico di 3:1.

STABILIDURA: strato di spessore da cm 1 - 1,5, steso a secco, costituito da polvere di marmo sottile e grossa e cemento.

SEMINA: sulla stabilidura viene seminata la scaglia di vario colore e granulometria a secco.

BAGNATURA: si bagna la stabilidura fino a rendere la malta tenera per permettere la penetrazione della scaglia.

RULLATURA: eseguita con il rullo contemporaneamente alla bagnatura.

BATTITURA: eseguita con ferro da bater subito dopo la rullatura

LISCIATURA: effettuato con la cazzuola, si liscia la boiaccia di cemento si eliminano le bollicine d'aria sulla superficie.

LEVIGATURA: dopo 8 - 10 giorni il pavimento è

pronto per essere levigato.

STUCCATURA: eseguita a base di olio di lino cotto e gesso da sarti.

(Può essere anche fatta con cemento e calce o mastici per marmi a base di resine sintetiche)

LUCIDATURA: dopo la stuccatura si rileviga il pavimento con abrasivi fini, lo si lava e infine lo si lucida con cera o con acido ossalico.

A. Crovato descrive inoltre il metodo di realizzazione del *granulato impastato*<sup>26</sup>.

Esso viene eseguito impastando granulato di piccolo vaglio (fino a 5 mm ) con cemento in rapporto volumetrico di 1:1 e viene steso sopra la coperta con la cazzuola per un centimetro di spessore.

Nella seconda tecnica analizzata, Giovanni Curioni descrive i singoli strati, necessari per la realizzazione del *battuto marmoreo alla veneziana*<sup>27</sup>, la loro composizione, posa in opera e stagionatura.

Precisa che il legante la malta cementizia e lo spessore complessivo del pavimento è di cm. 16- 17.

---

<sup>26</sup> Cfr. A. Crovato 1989 “*I Pavimenti alla veneziana*”

Le tecniche, i tipi e la fasi di costruzione del terrazzo in cemento, pag. 61 a seg.

<sup>27</sup> Cfr. G. Curioni 1865 - 1884 “*L’arte di fabbricare*”

Cap. XI - Opere per pavimenti Battuti marmorei alla veneziana paragr. 370- pag. 466 e seg.

Singoli strati componenti:

PRIMO STRATO MASSICCIATA di malta cementizia:  
strato unico di cm. 13- 14.  
componenti: 1/3 calcina + 1/3 pozzolana naturale o  
artificiale + 1/3 polvere di marmo (metà polvere fina  
e metà dimensione miglio).

Posa in opera: si conguaglia col badile, poi col  
rastrello di ferro, quindi si batte col mazzapicchio in  
modo da ridurlo a metà della grossezza e si lascia  
riposare per 3 - 4 giorni, secondo le stagioni, finchè  
siasi assodato la qualcosa avviene allorquando  
manifesta dalle crepolature alla superficie.

Preparazione superficie: si picchietta la superficie  
colla penna del martello da muratore.

SECONDO STRATO MALTA CEMENTIZIA

strato unico di cm 2,5-3.

Componenti: tritumi di laterizi cotti della grossezza  
di una fava e buona calcina.  
posa in opera si distende mediante la cazzuola  
quadra, si lascia far presa per 24 ore, quindi si batte  
gagliardamente colla zanca, e poi si lascia riposare  
lo strato di malta per 24 ore.

TERZO STRATO MALTA CEMENTIZIA

STUCCO componenti: calcina + pozzolana naturale  
o artificiale + polvere di marmo (impasto molle)

posa in opera strato uniforme steso mediante cazzuola, si lascia riposare per 2 o 3 ore.

Tracciamento con uno stile: si tracciano i compartimenti che deve presentare il pavimento.

Posa contorni: con la mano si conficcano nel detto stucco alcuni pezzetti di marmo in modo da fare i contorni.

semina: alla rinfusa si seminano in ciascun intervallo i pezzetti di marmo colorato affondamento nello stucco: si umetta la superficie e con cilindro metallico

munito di lungo manico di legno si carrucola la superficie finché diventi lattiginosa e finché i pezzi marmorei siano immersi nello stucco e nel sottostante strato di malta da scomparire.

Battitura con la zanca di ferro: in ogni senso e a colpi uguali dopo di che si lascia riposare per alcuni giorni.

Riempimento giunti: si stende su tutto il battuto una lattata calce mescolata con polvere di marmo fine alcuni giorni di riposo.

Rotatura: fregare lungamente la superficie del battuto mediante pietra arenaria della figura e dimensione di un mattone fissata all'estremità di un bastone di legno si lascia il pavimento a riposo per

alcuni mesi.

Rotatura a secco con pietra arenaria e sabbia fine (due o tre giorni di riposo).

Oliatura: oliatura con olio di lino con canovaccio dato in tre mani a distanza un giorno l'una dall'altra (3 gg di intervallo)

asciugatura mediante segatura fine di legno.

Nota: negli angoli dove non arriva il cilindro metallico si affondano i pezzi col mazzapicchio o con pestello di legno.

Le tecniche realizzative di piastrelle e lastre in finta pietra variano da regione a regione in quanto in quanto legate a saperi artigianali di bottega.

Si riportano le tecniche di esecuzione di tali manufatti realizzati in una bottega artigiana agli inizi del Novecento a Rocca San Casciano, in provincia di Forlì<sup>28</sup>.

Piastrelle per pavimentazioni.

- Preparazione dello stampo

Per realizzare questi elementi occorreva un ampio bancone di lavoro, su cui veniva poggiata una piastra

---

<sup>28</sup> Cfr. Atti del Convegno di Studi di Bressanone, 13-16 luglio 2004. Architettura e Materiali del Novecento, Conservazione, Restauro, Manutenzione. Aa. Vv. ed. Arcadia, p.288-289.

di ottone di dimensioni maggiori rispetto a quelle dell'elemento che si voleva produrre.

I limiti dimensionali della piastrella venivano conferiti posando una cornice quadrangolare realizzata con lamine metalliche, che definiva il perimetro dell'elemento, alta circa 2 cm.

All'interno del suddetto perimetro trovava posto un profilo metallico di alcuni millimetri di altezza, che riportava il limite del disegno da realizzare.

La presenza della piastra di ottone aveva la funzione di agevolare la separazione del pezzo, ma poteva essere d'ausilio anche un distaccante. Il materiale utilizzato a tal fine era l'olio da motore usato, sia per il suo basso costo, sia perché risultava il più efficace. Tale distaccante steso usando un pennello, avendo cura che tutta la superficie ne fosse rivestita. Il suddetto olio, oltre a facilitare l'operazione del distacco, aveva anche la funzione di conferire impermeabilità all'elemento finito.

#### GETTO DEL PRIMO STRATO

Gli impasti per il primo strato, che non superava mai i 4 mm e che avrebbe costituito la finitura superficiale del pezzo, si realizzavano utilizzando una graniglia molto fine, cemento bianco, terre colorate. Questo impasto veniva fatto colare,

utilizzando piccoli cucchiaini muniti di beccuccio, all'interno dello stampo, avendo cura (di rispettare il disegno in rilievo ivi presente.

Si trattava di operazioni molto delicate in quanto si doveva assolutamente evitare di portare a contatto due colori diversi, altrimenti si sarebbe persa la trama del disegno.

Sul suddetto sottile strato di getto veniva eseguita l'operazione dello "spolvero", cioè la ricopertura della superficie appena gettata con un leggero velo di cemento grigio, con l'ausilio di un setaccio a maglie molto sottili. In questo modo si garantiva una migliore aderenza tra i due getti consecutivi.

Fatto ciò si procedeva all'estrazione della griglia, che aveva consentito la formazione del disegno decorativo fungendo da guida.

- GETTO DEL SECONDO STRATO

Veniva poi realizzato il secondo impasto composto da cemento grigio, sabbia medio-fine e acqua; questo veniva colato nella forma sino a raggiungere lo spessore di circa 2 cm.

- Pressatura

Portate a termine queste operazioni, l'elemento doveva essere pressato. A tal fine si utilizzava una pressa, ancorata al soffitto, che aveva la funzione di

compattare il getto rendendo la superficie liscia, annullando cioè quelle piccole linee di separazione rimaste dopo l'asportazione del profilo metallico utilizzato per realizzare il disegno. Al termine della pressatura veniva rimossa la lamina quadrangolare che delimitava il contorno e la lastra metallica su cui era stato eseguito il getto.

#### Essiccazione

una volta pressata la piastrella risultava compatta e pronta per essere posta nell'essiccatoio.

All'interno di questo ambiente vi erano molti ripiani suddivisi in scansie, ove si alloggiavano le piastrelle per farle asciugare. L'operazione veniva favorita da un sistema di arieggiamento interno. Al termine del processo la piastrella finita risultava pronta per la posa in opera, e non necessitava di alcuna levigatura, in quanto la compressione eseguita con la pressa l'aveva fatta aderire perfettamente alla lamina di ottone, conferendo alla superficie in vista planarità e lucentezza.

#### - posa in opera

All'interno dell'ambiente, che poteva anche non essere perfettamente quadrangolare, venivano posate le piastrelle a formare una cornice regolare;

all'interno di tale spazio altre piastrelle andavano a formare disegni geometrici, floreali o a tappeto.

Le piastrelle venivano poste in opera con l'ausilio di impasti a base di cemento.

#### Pannelli in finta pietra

bancone di lavoro in cemento. di circa 140 cm di lunghezza e 90 cm di larghezza, su cui venivano realizzati i pannelli, che sarebbero poi stati assemblati in opera.

#### Preparazione del tavolo

Sul bancone venivano fissati con una boiaccia degli elementi in gesso, precedentemente formati, che avrebbero dato i limiti al pannello da realizzare. Una volta disposta la "cassaforma" di contenimento del getto, si doveva procedere alla stesura sul bancone, con un pennello, di olio da motore usato, che aveva la funzione di non far aderire il successivo getto al tavolo di lavoro. La creazione di questo film di separazione era di fondamentale importanza per la riuscita del pezzo, per cui si cercava di cospargere perfettamente la superficie usando anche un panno di cotone o di lana.

#### • GETTO DEL PRIMO STRATO

Preparata la superficie si poteva gettare il primo strato. Questo primo impasto, che al termine dei lavorazioni sarà quello visibile, era costituito da sabbia fine, cemento bianco dalla scarsa resistenza, acqua, ossidi e graniglie di diverse pezzature.

La colorazione dell'impasto cementizio era conferita dagli ossidi, che venivano dosati con piccoli misurini: per guidare i lavoratori in questa operazione di pesatura era fondamentale l'esperienza acquisita nel lavoro di bottega.

In alcuni casi veniva miscelato del cemento grigio da presa, se veniva richiesta una certa resistenza meccanica all'elemento, o se il pezzo finito doveva assumere una colorazione scura.

Quando la miscela raggiungeva la giusta consistenza veniva gettata sul tavolo: lo strato che costituiva era di norma molto sottile, intorno ai 4 mm, superando questa misura solo quando la pezzatura della graniglia di marmo aumentava considerevolmente.

In alcuni casi occorreva dare movimento all'impasto creando delle venature con particolari pennelli provvisti di linguette di gomma, che idoneamente utilizzati avrebbero reso l'elemento finito simile nell'aspetto ad un marmo venato.

Prima che questo getto facesse presa, si eseguiva lo “spolvero”, cioè veniva cosparsa la superficie con polvere

di cemento grigio in modo da migliorare l’aggrappo del successivo getto, realizzando una superficie scabra.

- GETTO DEL SECONDO STRATO

Successivamente veniva realizzato un impasto con cemento grigio, sabbia fine e acqua.

Questo veniva disposto nella cassaforma al di sopra dello strato precedente, sino a formare uno spessore di circa 2 cm, eseguendo l’operazione con molta cura per evitare che durante la colatura si verificasse la miscelazione con lo strato sottostante, che non aveva ancora terminato la fase di presa.

- Posa dei ferri

Dopo il getto del secondo strato venivano posati i ferri, che avevano la funzione di aumentare capacità statiche dell’elemento, sia alle azioni verticali, nel caso di pannelli da fissare in pareti. Che a flessione, nel caso di elementi costituenti gradini.

- GETTO DEL TERZO STRATO

Terminata la posa dei ferri veniva realizzato il terzo getto, con il medesimo impasto del precedente, sino a costituire un ulteriore strato di circa 2 cm, che si rasava in superficie utilizzando una cazzuola. Prima di proseguire le operazioni di finitura, si attendevano alcuni giorni, permettendo ai getti di indurire.

- Distacco del pezzo dalla cassaforma

Trascorso il tempo necessario alla presa si procedeva al distacco del pezzo dalla cassaforma. In prima battuta venivano rimossi con colpi di mazzuolo gli angolari e altri eventuali elementi di gesso che di norma erano a perdere, salvo nel caso di strutture a L utilizzate per formare i gradini. Mediante piccoli scalpelli e spatole si cercava di separare dal bancone il pezzo.

Era estremamente importante che l'elemento si staccasse perfettamente, senza perdita di porzioni superficiali, onde evitare di realizzare integrazioni sicuramente visibili e distinguibili dal resto, data la notevole difficoltà di riproporre un impasto identico. Si otteneva così dallo stampo l'elemento grezzo, che si rovesciava sul bancone per essere successivamente levigato.

- La levigatura

Per la levigatura si utilizzava una pietra di fiume molto dura con una notevole presenza di silice.

L'operazione si eseguiva a mano, avendo cura di fasciarsi con garze le dita. La pietra si faceva scorrere con forza sulla superficie tenendola costantemente bagnata. In altri casi, quando la superficie da lavorare era molto estesa, si usava uno strumento detto "orso", costituito da un manico a legno lungo circa mezzo metro, alla cui estremità si trovava un elemento a U di metallo che veniva ribattuto con un mazzolo attorno al sasso, sino a bloccarlo saldamente.

Anche utilizzando questo strumento si doveva comunque fare attenzione che la superficie fosse sempre umida, infatti attorno allo strumento veniva arrotolato uno straccio bagnato.

A questa operazione di levigatura ne seguiva un'altra, questa volta da eseguirsi utilizzando una a più tenera, chiamata "colombina" (pietra arenacea locale).

Tale operazione doveva essere molto delicata e di precisione tanto da potersi eseguire solo a mano l'ausilio dell'orso". Queste successive levigature avevano lo scopo di portare in superficie la graniglia affogata nel sottile getto superficiale. A questo punto

le pezzature di marmo appaiono appianate e ben visibili, la superficie è lucida, ma presenta anche micropori che naturalmente si formano durante le fasi di getto. Allo scopo di ridurre la porosità della superficie del pannello, veniva stesa una “boiacca” di sottile spessore, composta da acqua, cemento bianco e ossidi del medesimo colore di quello usato nell’impasto iniziale.

- La finitura

Atteso il tempo necessario alla boiacca per indurirsi, si poteva procedere all’ultima levigatura manuale utilizzando nuovamente la pietra “colombina”. Al termine di questa fase il pezzo poteva dirsi finito, pronto per la posa in opera. Ovviamente le operazioni di finitura erano riservate alle sole parti visibili e non a quelle facce che sarebbero in seguito state fissate alla struttura portante, in alcuni casi, quando il pezzo andava montato, congiuntamente con altri, a costituire la pelle ad esempio di un portale, potevano essere lasciati i ferri sporgenti dal pannello finito, in modo da poterli connettere agli altri elementi in opera. Questo espediente, quando era applicabile, facilitava molto anche l’operazione di distacco dell’elemento gettato dal tavolo di lavoro, permettendo di agire con azioni manuali più

diffuse e non concentrate in alcuni punti, come accadeva nel caso di distacco con spatole e piccoli martelli, il ferro a sporgere, di connessione tra pannelli contigui, sarebbe stato alla fine nascosto dalla posa di altri elementi e dalle stuccature realizzate in opera, con una boiaccia cromaticamente simile al pannello, previo fissaggio con la malta di cemento alla struttura portante.

### 3. Le manifestazioni di degrado

Quello che riguarda il degrado dei materiali lapidei, artificiali o naturali, utilizzati nella costruzione di opere di interesse storico, artistico o architettonico e i fattori che ne rappresentano le cause, è un problema che in questi ultimi decenni sta assumendo sempre maggiore rilevanza, ed è ben nota a tutti la responsabilità che assume in questo contesto lo sviluppo delle attività umane negli ultimi due secoli, industrializzazione e urbanizzazione, con i loro prodotti immessi in atmosfera, sostanze che costituiscono un rischio per l'integrità di questi materiali comunque soggetti a fenomeni di alterazione naturale nella loro interazione con gli agenti ambientali.

Il degrado di una pietra, è il processo attraverso il quale essa raggiunge un nuovo equilibrio dinamico, comunque suscettibile di ulteriori sviluppi, legato alle variazioni delle condizioni ambientali con le quali si trova ad interagire. Questo è un fenomeno in continua evoluzione, che non si arresta nel tempo e piuttosto può essere accelerato da determinati contesti, dalla presenza isolata o sinergica di specifici fattori ambientali.

Tra questi l'attacco chimico, la disgregazione meccanica, le fratture dovute alla solidificazione dell'acqua di imbibizione, alla crescita di cristalli salini, alla corrosione di metalli o minerali presenti. La deturpazione dovuta alla migrazione all'interno della pietra di sostanze colorate provenienti da materiali vicini, come la ruggine, o l'alterazione del colore originale a causa del dilavamento differenziale delle componenti della pietra.

L'abrasione, l'attrito, le fratture da stress, dovute a particelle trasportate dal vento, a shock sismici, a vibrazioni indotte dal traffico veicolare, alla presenza umana.

L'alterazione tanto chimica che fisica dovuta all'attività biologica di microrganismi, funghi, alghe e muschi. L'esfoliazione (caduta degli strati superficiali della pietra) o la disgregazione (lo scindersi nei singoli costituenti mineralogici) che possono essere prodotte da una messa in opera non appropriata. I danni sia meccanici che chimici che sorgono quando si usano sostanze per riparazioni che non siano stabili ad esposizioni prolungate o che siano comunque incompatibili con le pietre stesse.

Il danno dovuto al deposito casuale sulla superficie di fuliggini, polveri, grasso, vernici.

Il clima costituisce un parametro fondamentale nella qualità e nella quantità dei processi di alterazione della pietra. La temperatura e la presenza di acqua, legata alle precipitazioni, sono fattori che favoriscono il procedere delle reazioni chimiche. In regioni interessate da climi caldi e umidi i fenomeni di degrado sono essenzialmente di tipo chimico. Al contrario, in regioni aride, sia calde che fredde, ma caratterizzate da scarsità di acque meteoriche, procedendo più velocemente gli agenti della disgregazione fisica, tra cui i cicli di insolazione e gli sbalzi termici che danno luogo a fratture. Nelle zone con clima temperato, è essenziale la quantità di pioggia e la misura dell'evaporazione, che pesa

sulla possibilità che l'acqua ha di rimanere a contatto con la materia.

Le proprietà chimiche, fisiche, mineralogiche, rappresentano caratteristiche importanti per la risposta che questa può offrire all'attacco degli agenti ambientali. Aspetti fondamentali per predire il deterioramento di una pietra sono la sua composizione chimica e la sua porosità che possono favorire fenomeni quali l'accrescimento di cristalli di sali, causa di microfessurazioni. Tessitura, mineralogica e grana influenzano invece di più gli aspetti fisici del decadimento.

Per procedere all'analisi delle tipologie di alterazione, che si possono distinguere nelle pietre artificiali, bisogna indagare sulla natura del materiale e sulle tecniche di produzione degli elementi costituenti. Considerando che il materiale di costituzione è spesso un conglomerato cementizio armato, si sono considerate le cause di degrado legate al calcestruzzo armato, inoltre trattandosi di materiali lapidei, anche se "artificiali", si considerano le patologie di degrado tipiche dei lapidei naturali, di cui anch'esse sono composte.

Getti e forme che si sviluppano in lunghezza, infatti, possono facilmente fessurarsi a causa dei ritiri in fase di asciugatura, ma anche elementi di volume ridotto, quali mensole, spalle, ecc., possono dare luogo a degradi che, in questi casi, si manifestano sugli strati più superficiali durante il processo di asciugatura.

Gli elementi aventi anche solamente funzione decorativa, ma che devono presentare comunque una certa resistenza, come colonnine per balaustre, mensole per cornici, ecc., è necessario che siano armati, introducendo nell'impasto strutture in ferro. Queste strutture, di varia forma e dimensione (tondini, regge, lamiera, ecc.) però, costituiscono il punto debole del sistema per i pericoli di ossidazione e, quindi, di fessurazione del manufatto, anche se si deve osservare che, trattandosi di opere anteriori al 1910-1920, il

ferro utilizzato aveva caratteristiche diverse dall'attuale (era un materiale più ricco in carbonio) e risulta più resistente ai fenomeni corrosivi. In caso di ossidazione delle armature, e quindi del loro progressivo aumento di volume, infatti, le tensioni che si generano all'interno dei manufatti portano quasi sempre alla formazione di fenditure, in genere corrispondenti alla direttrici prevalenti in cui è collocata l'armatura stessa e, con il tempo, al distacco di parti anche consistenti del manufatto<sup>29</sup>.

Le situazioni che si possono presentare sono numerose e non è possibile stabilire una casistica, poiché ogni volta bisognerà tenere conto non solo dei fattori singoli e delle loro interazioni, ma anche del peso che possono avere nell'intero processo di degrado.

### 3.1 Cause di degrado da agenti chimici

#### 3.1.1 carbonatazione

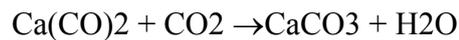
Il decadimento del pH nel calcestruzzo è l'effetto maggiormente noto e più deleterio per la durabilità del conglomerato cementizio armato, causato dal processo di carbonatazione. Tale processo, nelle condizioni ambientali che caratterizzano le nostre regioni, è tra le cause principali di degrado dei manufatti in calcestruzzo armato. La carbonatazione avviene ad opera dell'anidride carbonica presente in misura sufficiente anche in ambienti rurali e la sua velocità aumenta al crescere della pressione parziale e della concentrazione della CO<sub>2</sub> più o meno elevata nell'atmosfera inquinata dei centri urbani.

L'anidride carbonica reagisce, in presenza di umidità, con diversi composti della pasta di cemento idrata, anzi più propriamente è l'acido carbonico che essa forma con l'acqua

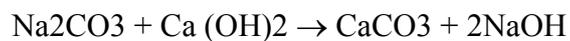
---

<sup>29</sup> Cfr. Paolo Gasparoli. Le superfici esterne degli edifici, degrado tecniche di progetto tecniche di manutenzione, ed. Alinea.

presente nei meati della matrice cementizia a reagire. Di particolare rilevanza é soprattutto la reazione con l'idrossido di calcio libero, presente nei calcestruzzi in proporzioni variabili a seconda del tipo di legante ma non trascurabili, con formazione di carbonato di calcio, secondo lo schema semplificato:



La reazione procede dalla superficie del manufatto a contatto con l'atmosfera verso l'interno. Il processo é condizionato dalla presenza, all'interfaccia tra zona già carbonatata e zona non ancora carbonatata, di un esile strato di soluzione acquosa satura di alcali, KOH e NaOH, detti precursori<sup>30</sup>. La CO<sub>2</sub> si combina dapprima con gli alcali formando i relativi carbonati e sono questi ultimi a reagire con la calce libera formando CaCO<sub>3</sub> e rimettendo in libertà gli idrossidi alcalini secondo lo schema:



La profondità dello strato carbonatato dipende dalla diffusione dell'anidride carbonica all'interno del calcestruzzo. La velocità di avanzamento del fronte di carbonatazione, é regolato, teoricamente, dalla legge di Fick<sup>31</sup> diffusione di un gas attraverso un solido poroso secondo la quale il livello di penetrazione é direttamente proporzionale alla radice quadrata del tempo con una costante di proporzionalità che dipende dalle caratteristiche del calcestruzzo e dall'ambiente esterno. Nel calcestruzzo, le caratteristiche che ne influenzano la permeabilità, come il grado e il tipo di porosità ed il contenuto in acqua, risultano determinanti; una microtessitura caratterizzata da una porosità fine e diffusa, aumentando la superficie specifica del legante, favorisce la carbonatazione. Le condizioni

---

<sup>30</sup> Cfr. P.G. Malerba, Controlli non distruttivi sulle strutture in cemento armato in l'Edilizia e l'Industrializzazione n. 11/1998.

<sup>31</sup> Cfr. P.G. Malerba, op. cit..

ambientali che favoriscono massimamente la velocità di avanzamento del fronte della carbonatazione sono state individuate in temperature superiori ai 15-20 gradi ed umidità relative tra il 50% e il 70%, tali cioè da permettere il verificarsi delle reazioni ma sufficientemente basse da impedire l'intasamento da parte dell'acqua liquida dei pori del calcestruzzo che ostacolerebbe il trasporto della CO<sub>2</sub> in fase gassosa<sup>32</sup>.

Lo spessore del manufatto gioca anch'esso un ruolo non trascurabile in relazione al fatto che l'umidità liberata dalla reazione di carbonatazione deve poter diffondere verso l'esterno perché l'equilibrio igrometrico tra interno del manufatto ed ambiente sia mantenuto. Se la diffusione del vapore è troppo lenta, la pressione di vapore all'interno del calcestruzzo giunge a saturazione impedendo la diffusione dell'anidride carbonica all'interno del manufatto.

Il fronte dei precursori avanza nel tempo, interessando strati sempre più profondi e dividendo il calcestruzzo in due zone con caratteristiche chimiche e fisiche nettamente distinguibili.

Nella zona carbonatata si rileva una maggiore densità (l'aumento di peso specifico può arrivare al 2-3 %) con un aumento della resistenza a compressione, forti ritiri locali e pH inferiore al limite di corrosione sotto sforzo delle armature a causa della neutralizzazione del Ca(OH)<sub>2</sub> libero al quale maggiormente si deve l'elevata basicità del calcestruzzo fresco. Non appena il fronte dei precursori tocca la superficie dei tondi si innescano le azioni elettrochimiche di corrosione. I diversi idrossidi ed ossidi idrati di ferro che si possono formare a seconda delle condizioni di corrosione (non sono in grado di formare uno schema protettivo, compatto ed aderente alla superficie metallica, che impedisca

---

<sup>32</sup> Cfr. M. Collepari, L. Coppola, Diagnosi delle strutture in calcestruzzo, in "Durabilità e restauro delle opere in calcestruzzo", Ed. Enco, 1993.

l'ulteriore avanzamento dell'ossidazione. L'aggressione, dunque, procede fino a ridurre considerevolmente la sezione resistente delle armature la cui collaborazione con calcestruzzo risulta per di più limitata dal decadimento dell'aderenza. I prodotti della corrosione inoltre, possono occupare un volume, anche solo dal punto di vista del calcolo stechiometrico, circa sei volte maggiore dello stato metallico aggredito. In relazione alla capacità di tali prodotti idrati di trattenere fisicamente molte molecole d'acqua, l'aumento di volume all'interfaccia metallo-calcestruzzo può essere anche molto più cospicuo e generare elevate tensioni puntuali di trazione nel calcestruzzo che, sommate alle tensioni da ritiro impedito, ne provocano la fessurazione ed i ben noti fenomeni di "spalling".

I distacchi di frammenti di calcestruzzo, ponendo allo scoperto il tondo, ne accelerano considerevolmente il degrado. Il ritiro dovuto alla carbonatazione è stato spiegato con lo scioglimento dei cristalli di  $\text{Ca(OH)}_2$  sottoposti alla compressione indotta dal ritiro per essiccazione ed alla seguente precipitazione del  $\text{CaCO}_3$  (che ha una solubilità praticamente nulla in acqua) negli spazi vuoti esenti ovviamente da tensioni.<sup>8</sup>

Il ritiro da carbonatazione, sommandosi a quello dovuto all'essiccamento produce, in certe condizioni ambientali, un ritiro totale più che doppio.

In relazione quindi alla estensibilità del conglomerato ed alla resistenza a trazione, il ritiro totale può essere fonte di fessurazioni che, incrementando bruscamente la permeabilità del copriferro ne accelerano la carbonatazione e la seguente fessurazione. È stato infatti rilevato come la velocità di avanzamento della carbonatazione rispettasse sensibilmente la legge di proporzionalità alla radice quadrata del tempo solo in calcestruzzi di classe 400 esenti da fessurazioni.

Quando il calcestruzzo è soggetto all'alternanza di bagnature ed asciugature il ritiro di carbonatazione, durante la fase di asciugatura, diviene progressivamente sempre più evidente. Il ritiro totale ad ogni fase di asciugatura aumenta poiché la carbonatazione incrementa la quota parte irreversibile del ritiro totale. Può essere importante anche notare che la carbonatazione che avviene contemporaneamente all'essiccamento produce un ritiro totale inferiore a quello misurabile se la carbonatazione agisce solo in seguito all'essiccamento poiché nel primo caso una larga parte della carbonatazione avviene con umidità relative superiori al 50%, condizioni per le quali il ritiro da carbonatazione è ridotto. Ritornando agli effetti chimici della carbonatazione è importante notare che, oltre alla trasformazione degli idrossidi basici in carbonati, anche altri componenti della pasta di cemento idrata vengono decomposti con la formazione di silice idrata, ossido ferrico ed allumina.

La decomposizione dei composti alluminati comporta la rimessa in libertà dei pericolosi ioni cloruro che vi fossero stati eventualmente complessati, resi maggiormente pericolosi inoltre dall'abbassamento del pH.

In ogni caso, nel calcestruzzo di cemento portland, la carbonatazione provoca la perdita delle sue capacità leganti nei confronti dei cloruri pertanto, il pericolo di corrosione aumenterà anche per tenori di cloruro nel calcestruzzo inferiori allo 0,4% rispetto al peso del cemento. L'azione della carbonatazione e la contemporanea presenza di cloruri costituisce una delle condizioni più temibili per la corrosione delle armature.

### 3.1.2 Attacco dei cloruri

E' nota da tempo l'azione corrosiva esercitata dai cloruri di qualsiasi tipo (di sodio o di calcio) sull'acciaio in genere e sui ferri di armatura in particolare. Il meccanismo corrosivo

si esplica mediante un'azione incisiva e localizzata (pitting) che consiste nella rimozione dello strato di ossido ferrico compatto e protettivo (passivante) che in presenza di cloruro diviene incoerente e consente, quindi, l'ulteriore ossidazione del ferro.

Nel caso dell'acqua del mare, il calcestruzzo del copriferro può essere più facilmente attaccato dall'azione dei sali creando così condizioni più favorevoli alla penetrazione ed all'attacco dei cloruri verso i ferri d'armatura.

Nel caso delle strutture in calcestruzzo per opere stradali ed autostradali la presenza dei cloruri è determinata dalla necessità, durante la stagione invernale, di spargere sul manto stradale dei sali decongelanti - quasi sempre a base di cloruro di calcio o di sodio - per accelerare la rimozione del ghiaccio. In queste condizioni, la penetrazione del cloruro dall'ambiente verso i ferri di armatura può essere accelerata dalla disintegrazione del copriferro in calcestruzzo a causa di cicli di gelo-disgelo.

Per una buona protezione dei ferri di armatura, occorre fondamentalmente:

- a) limitare il rapporto acqua/cemento per ridurre la "microporosità" ed aumentare l'impermeabilità del calcestruzzo;
- b) compattare completamente il calcestruzzo mediante, una efficace ed omogenea vibrazione o, qualora ciò sia di difficile esecuzione, aumentare adeguatamente la lavorabilità del calcestruzzo in relazione ai sistemi di vibrazione disponibili;
- e) aumentare lo spessore del copriferro il quale dovrà essere tanto maggiore quanto peggiore è la qualità intrinseca del calcestruzzo, cioè quanto più alto è il rapporto acqua/cemento.

Il cloruro è stato per lungo tempo considerato un agente aggressivo solo dei ferri di armatura. Più recentemente si è

scoperto che esso può danneggiare più o meno gravemente anche il calcestruzzo. L'azione corrosiva del cloruro sui ferri di armatura non dipende dal particolare tipo di sale; quella aggressiva nei confronti del calcestruzzo, invece, è significativamente diversa a seconda che il sale sia costituito da NaCl o da CaCl<sub>2</sub>.

#### **L'azione del cloruro di sodio sul calcestruzzo.**

Il cloruro di sodio può venire in contatto con le strutture in calcestruzzo delle opere marittime oppure con quelle esposte ai sali disgelanti, molto spesso a base di questo sale, per la rimozione del ghiaccio nella stagione invernale.

Il cloruro di sodio è in grado di innescare la cosiddetta "reazione alcali-aggregato" nel caso in cui il calcestruzzo sia stato confezionato con aggregati reattivi. Questa reazione è generalmente associata alla presenza di alcali (sodio e potassio) nel cemento e di silice amorfa o scarsamente cristallina in alcuni aggregati. In teoria qualsiasi forma di silice, anche quella cristallina come il quarzo, la tridimite e la cristobalite, possono interagire con il sodio ed il potassio per dar luogo ad una sorta di silicato alcalino gelatinoso capace di rigonfiarsi in ambiente umido. Tuttavia, la capacità di produrre silicato sodico aumenta ad diminuire del grado di cristallini della silice e diventa massima se la silice è amorfa come in alcune forme di minerali silicei (opale e calcedonio). La reazione alcali-aggregato comporta un rigonfiamento localizzato dagli aggregati reattivi che si manifesta nel tempo con fessurazioni di forma irregolare dalle quali fuoriesce un liquido gelatinoso e biancastro (silicato sodico). Alla fessurazione segue solitamente il distacco superficiale del calcestruzzo a causa dell'azione dirompente provocata dal rigonfiamento degli aggregati. Poiché il decorso della reazione alcali-aggregato richiede in genere tempi molto lunghi (da qualche mese a qualche decina d'anni), il fenomeno, si presenta molto insidioso in

quanto comporta il degrado della struttura quando essa è ormai da tempo in pieno servizio. Sono stati individuati alcuni parametri fondamentali della reazione alcali-aggregato, che concorrono al decorso del fenomeno distruttivo: la reazione alcali-aggregato si manifesta tanto più velocemente ed intensamente quanto più aumentano:

il contenuto di sodio e di potassio nella fase acquosa che riempie i pori capillari della pasta cementizia;

la quantità degli aggregati silicei criptocristallini ed amorfi;  
umidità relativa dell'ambiente.

E' sufficiente che manchi una delle tre suddette condizioni perché il fenomeno non si manifesti o si manifesti senza danni apparenti: per esempio, in ambienti secchi gli aggregati reattivi possono coesistere con gli alcali del cemento senza alcun danno per il calcestruzzo. D'altra parte in ambienti umidi e con cementi ricchi di alcali la reazione alcali-aggregato può decorrere con gravi danni anche se la silice degli aggregati è scarsamente amorfa o per lo più ben cristallizzata. La presenza di cloruro di sodio in un ambiente umido circostante le strutture di calcestruzzo può provocare un grave peggioramento nello stato di salute del materiale, in questo caso è lo ione sodio, e non il cloruro, che congiuntamente all'acqua crea le condizioni per un grave degrado del conglomerato. Ovviamente anche la penetrazione e la concomitante azione corrosiva del cloruro sui ferri delle strutture armate, è fortemente favorita quando il copriferro viene fessurato ed in parte rimosso dalla reazione alcali-aggregato. Rimane il fatto che il cloruro di sodio è in grado di danneggiare sia i ferri di armatura sia il calcestruzzo nel caso in cui quest'ultimo contenga degli aggregati potenzialmente reattivi.

Le prevenzioni da attivare in queste circostanze sono fondamentalmente due: - non impiegare aggregati reattivi sulla base delle prove descritte nella norma UNI 8520; -

impiegare cementi pozzolanici o d'altoforno, oppure aggiungere al cemento Portland materiali pozzolanici quali la cenere volante o il fumo di silice.

**L'azione del cloruro di calcio sul calcestruzzo.**

Il cloruro di calcio é largamente impiegato, come il cloruro di sodio, come sale disgelante nella stagione invernale per rimuovere il ghiaccio. La sua azione disgelante è considerata più efficace, soprattutto per la rapidità, che non quella del cloruro di sodio. Anche il cloruro di calcio, al pari del cloruro di sodio, oltre a provocare la corrosione dei ferri di armatura é in grado di danneggiare gravemente il calcestruzzo. Quest'azione aggressiva, tuttavia, si esplica in modo significativamente diverso per il tipo di danno, per il meccanismo e la velocità del fenomeno. Il calcestruzzo a contatto con cloruro di calcio tende a fessurarsi e delaminarsi a causa della disintegrazione della pasta cementizia che avvolge gli aggregati. Il meccanismo attraverso il quale questo sale danneggia il calcestruzzo si esplica attraverso una reazione tra il  $\text{CaCl}_2$  che penetra dall'ambiente del calcestruzzo e la calce, né del cemento, con la formazione di un ossicloruro di calcio idrato ( $3\text{CaO}\cdot\text{CaO}_2\cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ):

$$3\text{CaCl}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO}\cdot\text{CaO}_2\cdot 15\text{H}_2\text{O}$$

In sostanza, il cloruro di sodio agisce sugli aggregati (se reattivi) producendo ossicloruro di calcio idrato. Esistono due aspetti molto interessanti che rendono questo processo unico rispetto a tutti gli altri fenomeni di degrado del calcestruzzo: il primo riguarda l'effetto della temperatura, ed il secondo quello della porosità. Per quanto concerne la temperatura, l'azione del  $\text{CaCl}_2$  é tanto più aggressiva quanto più bassa é la temperatura. In particolare a  $5^\circ\text{C}$  l'azione distruttiva, registrabile attraverso la diminuzione di resistenza meccanica del calcestruzzo, é molto più rapida che non alle temperature superiori. Per quanto riguarda l'effetto della porosità del calcestruzzo sull'azione aggressiva di

CaCl<sub>2</sub>, si è trovato che, contrariamente a tutti gli altri fenomeni di degrado, l'azione distruttiva procede tanto più intensamente quanto minore è la porosità della pasta cementizia, cioè quanto minore è il rapporto acqua-cemento del calcestruzzo.

### 3.2 cause di degrado di natura fisico-meccanica

#### 3.2.1 Cicli di gelo disgelo

Le alternanze termiche naturali, possono avere conseguenze completamente diverse a seconda che la temperatura cambi o meno intorno allo 0°C. Il calcestruzzo, anche se ben mescolato e di composizione costante, è costituito di elementi (pasta di cemento ed aggregati) che presentano coefficienti di dilatazione termica diversi. La pasta di cemento, per esempio, ha un coefficiente di dilatazione termica di circa  $9,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ , mentre gli aggregati presentano un coefficiente di dilatazione termica che può variare da  $11 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$  se silicei a  $5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$  se calcarei. Da ciò si può desumere che variando ciclicamente la temperatura per esempio tra 10°C e 40°C, insorgono delle sollecitazioni a fatica all'interfaccia pasta-aggregato soprattutto in calcestruzzi con aggregati calcarei. Questi effetti sono, tuttavia, trascurabili rispetto a quelli molto più severi che si manifestano quando la temperatura cambia ciclicamente intorno allo 0°C ed il calcestruzzo è saturo di umidità. Infatti, quando l'acqua congela, il suo volume aumenta di circa il 9% ed è in grado di provocare una pressione capace di distruggere progressivamente il calcestruzzo, soprattutto se il fenomeno si ripete ciclicamente, per effetto di una tipica rottura a fatica.

L'azione alternata dei cicli di gelo e disgelo può provocare danni molto gravi nelle opere situate in climi molto rigidi. Il fenomeno degradante si manifesta sotto forma di

fessurazioni, sfaldamenti e distacchi superficiali. Affinché si manifesti il degrado è necessario che il grado di saturazione (cioè la percentuale in volume di acqua presente nei pori del materiale rispetto al volume totale dei pori stessi) superi il 91,7%. In queste condizioni (grado di saturazione critica), infatti, l'aumento di volume dell'acqua provocato dal congelamento non è più in grado di essere contenuto all'interno dei pori non ancora saturi d'acqua. La valutazione della resistenza ai cicli di gelo-disgelo di un calcestruzzo viene eseguita attraverso la misura del modulo elastico dinamico, determinato mediante la rilevazione della velocità degli ultrasuoni.

### 3.2.2 variazione dell'umidità relativa

Le variazioni di umidità relativa (U.R.) nell'ambiente possono generare uno stato tensionale nel calcestruzzo attraverso l'insorgere di variazioni dimensionali. Se queste tensioni si tramutano in fessure, si può innescare un processo di degrado delle strutture (soprattutto nei ferri di armatura) anche se la composizione del calcestruzzo è potenzialmente adeguata ad assicurare la durabilità del materiale: l'accesso di aria (ossigeno ed anidride carbonica) e di umidità attraverso le fessure può provocare sia una rapida carbonatazione del copriferro, sia l'ossidazione dei ferri. Quando umidità relativa dell'ambiente scende al di sotto del 95% il calcestruzzo tende ad essicarsi ed a contrarsi (ritiro); e il contrario avviene se il materiale si trova in ambienti con U.R. maggiore del 95% o addirittura Sotto acqua (rigonfiamento).

In presenza di vincoli il rigonfiamento induce sollecitazioni di compressione sopportabili dal materiale, mentre il ritiro genera degli stati tensionali di trazione che possono provocare fenomeni fessurativi a causa della minore resistenza a trazione del materiale.

### 3.2.3 abrasione – erosione – urti

In alcuni casi il calcestruzzo é chiamato a resistere all'usura e agli urti.

L'abrasione, gli urti, l'erosione e la cavitazione<sup>33</sup> possono provocare una sensibile e rapida degradazione del materiale.

L'**abrasione**, che consiste nell'asportazione del materiale a causa dell'attrito superficiale esercitato da polveri più dure del materiale stesso, può essere misurata con prove, tutte più o meno arbitrarie, nelle quali si cerca di riprodurre una determinata azione abrasiva usando polveri metalliche o carburo di silicio.

La resistenza all'abrasione é migliorata usando rapporti a/c più bassi, evitando impasti ricchi di sabbia, preferendo calcestruzzi magri e con aggregati grossi più duri, ma soprattutto applicando sul calcestruzzo ancora fresco uno spolvero costituito da cemento, additivi disperdenti ed inerti duri.

Lo spolvero, che viene successivamente incorporato nel calcestruzzo sottostante mediante frattazzatura manuale o meccanica, ha la funzione di rinforzare il calcestruzzo sulla superficie. Ciò si realizza attraverso l'aggiunta di cemento e quindi con l'abbassamento del rapporto a/c sulla superficie della lastra, ad esempio dove, a causa del bleeding, il rapporto a/c risulterebbe particolarmente elevato.

L'**erosione** consiste in un'azione di usura provocata dall'acqua in movimento e contenente particelle solide sospese.

Le conseguenze dell'erosione dipendono molto dalla velocità dell'acqua, dalla presenza di vortici e dalla qualità del calcestruzzo. In particolare é consigliabile aumentare il volume di inerti grossi e duri, che risultano più resistenti

---

<sup>33</sup> Cfr. M. Collepari, Scienza e tecnologia del calcestruzzo, ed. Hoepli, 1991, pag.497.

all'erosione della malta cementizia, diminuire il rapporto a/c ed aumentare quello i/c, mentre sembra trascurabile l'influenza del tipo di cemento. Anche in questo caso, ovviamente, la qualità della superficie del materiale è fondamentale per ottenere strutture resistenti all'erosione, e quindi l'applicazione di uno spolvero per rinforzare superficialmente il calcestruzzo si rende necessario.

L'**urto** di colpi su di una massa di calcestruzzo può provocare lo sgretolamento della superficie nel punto colpito e per un raggio poco esteso; il resto della massa non soffre, ne presenta delle fenditure. Tanto più resiste il calcestruzzo se è armato, specialmente con un'armatura reticolare, oppure a spirale<sup>34</sup>.

### 3.3 cause di degrado da agenti biologici

Il degrado biologico è causato dall'azione di animali o di piante. Per tale motivo prende il nome di bioteterioramento. Si definisce biodeterioramento “qualunque tipo di alterazione irreversibile, conseguente dell'attività metabolica di una o più popolazioni viventi, qualunque sia l'ordine di grandezza degli individui da cui esse sono composte”. In climi freddi e per lunghi periodi piovosi, come accade in molti paesi europei, il danno provocato dagli agenti biodeteriogeni è inferiore rispetto a quello provocato dalla cristallizzazione dei sali o dalla gelatività, mentre nei climi caldi e umidi, esso è maggiore.

I biodeteriogeni<sup>35</sup> possono essere:

Autotrofi, in grado, cioè di sintetizzare da sé le molecole organiche, necessarie alla loro funzione vitale;

---

<sup>34</sup> Cfr. L. Santarella, *Cemento armato la tecnica e statica*, 22° edizione ampliata ed aggiornata, Ed. Hoepli, 1998.

<sup>35</sup> Cfr. P. Sanpaolesi, *Discorso sulla metodologia generale del restauro dei monumenti*, ed. Edam, Firenze 1973, p. 107

Eterotrofi, non autosufficienti per il loro sostentamento. Hanno bisogno di altri organismi per alimentarsi, in quanto, privi di clorofilla, non possono compiere la fotosintesi. Mentre per altri tipi di materiale organico, come il legno, libri, tessuti, pelle ecc, il biodeterioramento è provocato solo dagli eterotrofi, quello della pietra è legato tanto agli autotrofi, quali, alghe, cianobatteri, batteri, licheni, alghe, muschi e piante superiori, quanto agli autotrofi, come funghi, uccelli ecc.

### **Microrganismi autotrofi**

I parametri ambientali necessari per la loro formazione e sopravvivenza degli autotrofi<sup>36</sup> sono la luce, essenziale per la fotosintesi, l'ossigeno, necessaria per la respirazione cellulare, l'anidride carbonica necessaria per l'organizzazione del carbonio e l'acqua, indispensabile per lo svolgimento delle funzioni metaboliche.

Si fornisce di seguito, una breve panoramica degli autotrofi:

#### **Batteri.**

Sono chiamati batteri chemiosintetici, perché partecipano al ciclo dell'azoto e dello zolfo, in seguito ai quali si verifica un degrado di tipo chimico dovuto alle reazioni di ossidazione-riduzione che esplicano nei loro processi metabolici. Il tipo di alterazione rinvenuto sulle pietre è molto simile a quello dovuto agli inquinamenti atmosferici, per cui riesce difficile distinguere l'origine della causa. Si potrebbe stabilire la giusta provenienza dell'alterazione includendo, nelle indagini diagnostiche, anche lo studio dei parametri di inquinamento atmosferico.

#### **Licheni<sup>37</sup>.**

---

<sup>36</sup>Cfr. L. Lazzarini, M. Laurenzi Tabasso, *Il restauro della pietra*, Ed. Cedam, Padova 1886, p.146; Cfr. anche R. Peruzzi, *La conservazione dei materiali lapidei: cause di degradi e interventi diagnostici*, in A. Bellini., *Tecniche della conservazione*, Francangeli, Milano 2005, p. 76.

<sup>37</sup> Cfr. G. Carbonara (diretto da), *Atlante del Restauro*, vol. XVII, tomo I, UTET, Torino 1996, p. 434-435; C. Fiori, S. Lorusso, R. Petrella, *Restauro, manutenzione, conservazione dei Beni Culturali: materiali*,

Essi ricoprono estese superfici di manufatti siano essi di pietra calcarea, sedimentaria e silicea.

Sono il risultato dell'associazione di due organismi, un fungo con alghe verdi o azzurre. Il loro tessuto vegetativo si chiama tallo ed è diverso da quello degli organismi che lo compongono. Sono molto visibili ad occhi nudo, grazie alle forme macroscopiche e dai colori vivaci, giallo, bianco, arancio.

Si sviluppano in ambienti ben ossigenati esposti ad irraggiamento solare diretto o in zone d'ombra e la loro penetrazione non è molto profonda. Ma non hanno la capacità di "selezionare", durante l'assorbimento di aria e acqua, i relativi inquinanti che esse trasportano, in quanto mancano di aperture stomatiche o di cuticole.

La loro consistenza può essere crostosa, fogliosa o fruticosa. La differenza è determinata dal tallo. Ad esempio, quelli crostosi e fogliosi hanno un aspetto appiattito. In questo caso, il tallo può essere o legato alla superficie lapidea o a strati più profondi; nei fogliosi, il tallo è attaccato al substrato solo nella sua parte centrale, mentre nei fruticosi, esso aderisce al substrato solo con la base e la restante parte si presenta a ciuffi ramificati. Essi producono sostanze acide quali acido carbonico, che reagendo con pietre calcaree genera bicarbonato solubili, acido ossalico, che reagendo con minerali del substrato dà luogo a vari ossalati (sali) a seconda dei cationi presenti.

Anche per i licheni, si verifica che, il tipo di alterazione prodotto da loro sulle pietre è molto simile a quello dovuto agli inquinamenti atmosferici. Spesso, infatti gli ossalati possono essere prodotti anche dall'alterazione-

---

*prodotti, tecniche*, Editrice Pitagora, Bologna 2003, p. 61-69; P. Sanpaolesi, *Discorso sulla metodologia generale del restauro dei monumenti*, op. cit., p. 82-89; G. Perusini, *Introduzione al restauro: storia, teorie e tecniche*, op. cit., p. 91-92.

trasformazione di antichi trattamenti di lucidatura o protezione dei marmi. Stabilire la veridicità dell'ipotesi biologica o antropica dell'origine degli ossalati è di fondamentale importanza ai fini della conservazione del manufatto. Perché la causa dell'alterazione stabilisca la successiva operazione di restauro.

### **Alghe e muschi<sup>38</sup>.**

Per ciò che concerne le alghe, a differenza dei licheni non penetrano in profondità, ma formano sulla pietra degli strati di consistenza e colorazione differente, a seconda che il supporto sia asciutto o umido. La patina biologica che si viene a formare costituisce un ottimo ricettacolo di inquinanti atmosferici. Sono dannose non solo per processi di degrado chimico, ma anche perché mantengono un'umidità costante sulla superficie della pietra. Tra le alghe più diffuse, spiccano le alghe azzurre, che si sviluppano in ambienti umidi e poco illuminati e provocano sui materiali la formazione di depositi nerastri, e le alghe verdi presenti in zone umide e illuminate ma al riparo da irraggiamento diretto; quest'ultime provocano patine verdi sui muri dell'edificio e su statue. Per i muschi, anche loro coprono solo la superficie, senza penetrare il materiale, si sviluppano dove si hanno depositi di humus o accumuli di residui organici generati da altri batteri organici o vegetali. Hanno una consistenza stratiforme e un colore verdastro.

### **Piante superiori**

Le piante superiori causano un forte degrado meccanico, perché non solo con il loro sviluppo ne possono impedire o ridurre la visibilità, ma anche perché le radici, penetrando nei giunti tra i conci di pietra, esercitano una dannosa azione di cuneo. Inoltre, creano corsie preferenziali per

---

<sup>38</sup> G. Perusini, *Introduzione al restauro: storia, teorie e tecniche*, Ed. del Bianco, Udine 1985, p. 74-75-76.

penetrazione di acque meteoriche, con tutti i danni che ne conseguono.

#### **Microorganismi eterotrofi: Funghi<sup>39</sup>**

I funghi si formano in presenza di elevati tassi di umidità. Oltre alla dissoluzione del materiale lapideo, provocano estese macchie che oscillano dal rossastro al bruno fino al nero.

#### **Volatili<sup>40</sup>**

Frequente è la presenza di escrementi animali (volatili) sulla superficie del calcestrutto. La loro presenza è fortemente nociva, per il grado di acidità di alcuni componenti. Si annovera la presenza di acido urico, fosforico e nitrico. Oltre a questo attacco chimico diretto alla pietra, è stata dimostrata la possibilità che gli escrementi, in particolare di piccione, funzionino come terreno di coltura per diversi microrganismi eterotrofi, capaci a loro volta di esercitare un'azione dannosa nei riguardi della pietra.

### 3.4 cause di degrado di altra natura

#### 3.4.4 difetti di produzione

costringere l'ornato entro le conoscenze tecniche statuite per una buona confezione del cemento può aver ingenerato i primi difetti, estrapolati dalle difficoltà opposte dall'applicazione di una tecnica concepita per la formatura di elementi strutturali, a una produzione che si voleva risondesse ai caratteri del materiale naturale. la necessità di disporre barre di armatura in sagome articolate generava errori ora in difetto, ora in eccesso - nel valutarne la corretta dimensione, il tipo e l'entità in relazione alle quantità e

---

<sup>39</sup> D. Chiesi, *Degrado e diagnostica*.

<sup>40</sup> Cfr. C. Fiori, S. Lorusso, R. Petrella, *Restauro, manutenzione, conservazione dei Beni Culturali: materiali, prodotti, tecniche*, Editrice Pitagora, Bologna 2003, p. 62.

caratteristiche del conglomerato cementizio adoperato, con esito, comunque, di una alterazione del comportamento in opera; in più la conformazione delle barre nell'assecondare gli ornati era costretta a curvature eccessive che sembrano, una volta in esercizio, da sole in grado di innescare processi autonomi di ossidazione. In fase di getto, la difficile vibratura dell'impasto, la mancata ingabbiatura delle armature con il conseguente probabile spostamento delle stesse, l'assenza di distanziatori dalla superficie esterna, andavano a scapito della possibilità di garantire il corretto involuppo delle barre di armatura e la necessaria entità dei ricoprimenti. A questa circostanza è da sommarsi un altro dato sul quale riflettere: la natura liscia delle barre adoperate incapace, nella maggioranza dei casi, di garantire una perfetta adesione con il calcestruzzo e, conseguentemente, di assicurare il corretto trasferimento delle tensioni fra i due materiali. Infine, le tecniche di finitura in opera, o comunque dopo l'indurimento del pezzo, su spessori accresciuti potevano originare la messa in vista del ferro per una scorretta valutazione dello strato da rimuovere o per interventi maldestri e profondi. I difetti menzionati sono stati ipotizzati e poi convalidati per i basamenti bugnati in cui si è osservato l'affioramento dell'armatura in superficie: la realizzazione delle bugne rustiche richiedeva infatti un trattamento di finitura successivo al getto di un impasto stipato in calco aperto che ne produceva una o più in sequenza.

Uno strato sovradimensionato avrebbe consentito la lavorazione a utensile: scalpello, subbia, gradina. Una lavorazione superficiale che, adatta al materiale lapideo naturale, non si è mostrata compatibile con le modalità di produzione artificiali: in assenza di una stima calibrata del sovradimensionamento cui assoggettare lo strato superficiale, poteva accadere, durante le operazioni di finitura, di ridurre

L'entità del copriferro oltre una soglia minima e talvolta fino all'affioramento delle barre, annullando così la protezione garantita loro dal ricoprimento. Dalle increspature della superficie di diverse bugne è apparsa, in più punti, la convessità di un tondino di ferro che, esposto all'azione dell'ossigeno, in ambiente umido, è stato investito da un processo di corrosione; questo, proseguendo poi verso l'interno, ha macchiato alcune bugne e altrove ha esteso l'area di disgregazione della componente litoide marginale all'affioramento. La trama metallica, evidenziata da questo meccanismo, ha mostrato barre prive di distinzione dimensionale e di soluzioni di continuità tra bugne contigue, con disposizione talmente complessa da denunciare il mancato rispetto delle regole basilari del costruire in cemento armato: limitazione delle curvature, corretto ammaraggio nel calcestruzzo, osservanza dei valori minimi di copriferro e interferro. La mancanza di una disposizione regolare della armatura, da cui è deducibile la probabile assenza di disegni esecutivi di dettaglio, conferma l'ipotesi avanzata rendendo evidente quanto risultasse difficoltosa la previsione della sua posizione da parte delle maestranze addette alla lavorazioni di spuntatura e palesando la conseguente elevata probabilità di incorrere in errori.

Riconducibile prevalentemente all'impiego di: barre lisce è il difetto riscontrato diffusamente in lesene e parapetti. L'osservazione induce a ritenere che questa circostanza, accompagnata da un rilievo di spessori di copriferro assai ridotti, giustifichi la presenza delle molte lesioni della componente litoide lungo le linee di disposizione dell'armatura metallica, dovute a uno slittamento reciproco che ha generato tensioni di trazione, a cui la pietra artificiale non è in grado di resistere.

#### 3.4.5 difetti di posa in opera

Le peculiarità rilevate dall'analisi delle più consuete modalità di connessione hanno indotto ad approfondire la conoscenza, per disporre di basi adeguate a intessere relazioni con il degrado riscontrato, o possibile, al fine di verificare rapporti di causalità.

la presenza di un quadro fessurativo che evidenzia la giustapposizione e, talvolta, le modalità di connessione, distingue intanto la realizzazione fuori opera dei pezzi di pietra artificiale da una finitura con intonaco di cemento e graniglia di ossature ottenute sagomando il supporto. Un indizio importante per introdurre a categorie di lavoro differenti con alterazioni e degradi peculiari.

Quando paramenti spogli dovevano accogliere i pezzi di pietra artificiale, avendo previsto a tale scopo per la connessione unicamente ramponi di ferro in attesa, occorreva abbozzare il rustico delle membrature architettoniche con un getto di calcestruzzo che doveva costituire un ringrosso.

Questo poteva formarsi con l'utilizzo di cassaforme lignee, predisponendo tasche o lasciando ferri in attesa per il successivo collegamento agli elementi decorativi che, altre volte, potevano essere adoperati per contenere il getto, determinando una connessione diretta e un legame solidale.

La presenza di tale interfaccia, comunque, introducendo un vincolo rigido fra i ferri del supporto e quelli previsti per l'ancoraggio dei pezzi di pietra artificiale, trasmette al sistema d'ornato ogni, pur piccolo, movimento o vibrazione della struttura. L'incapacità dell'elemento decorativo di adattarsi può denunciare in alcuni punti la soluzione di continuità, con un distacco nel luogo di giustapposizione, nonché produrre linee di fratture nella parte più debole rappresentata dal pezzo in pietra artificiale se di ridotto spessore. Si è ritenuta quindi questa solidarietà all'origine

delle lesioni osservate tutte le volte che lastre di pietra artificiale rivestono il paramento murario.

Altra possibilità di distacco si è riscontrata nel caso di elementi decorativi ancorati introducendo staffe o tondini di ferro, entro i fori - appositamente rivolti all'esterno - dei laterizi del paramento. Può essere stato il peso dei pezzi a determinare il distacco, o ancora i movimenti subiti dal supporto a denunciare, in tal caso, la discontinuità intrinseca al semplice accostamento.

Tinteggiatura, è l'intervento di manutenzione più grave di ormai larga diffusione. La reinterpretazione cromatica snatura la logica della scelta originaria, quando non produce ulteriori problemi di degrado:

intonaci che impediscono la traspirabilità, apportano sali, reagiscono con i supporti, celano la progressione di alterazioni da sanare. L'incompatibilità chimica, quanto quella fisica, fra l'autentico, pensato per essere lasciato a faccia vista, e posticce finiture ad intonaco, hanno per tali motivi innescato in alcuni casi rigetti e scagliature di parti dell'ornato originario, mostrato efflorescenze e macchie di ossido, rigonfiamenti e distacchi.

Altrettanto deturpanti sono le osservate riprese locali, con malte cementizie o resine, e gli interventi di integrazione di parti, acquisiti dalle tecniche di risanamento del cemento armato, traslando metodi e prodotti senza conoscere e riconoscere la specificità della pietra artificiale.

In falso storico è poi rappresentato dalle innumerevoli sostituzioni di interi elementi decorativi preparati con modalità che ripercorrono sì la tradizione, ma con modelli che vengono riprodotti sui pochi elementi decorativi ancora

integri, forzatamente prelevati; i calchi sono realizzati in silicone e raramente in gesso e ne' i procedimenti sono gli stessi, ne' lo sono i materiali: ai due strati originari è stato sostituito un unico strato, confezionato con "malta da restauro", poi, dopo il posizionamento in opera, intonacato o tinteggiato per assimilarne l'immagine ai pochi ornati superstiti Tutto quanto descritto, sul piano concettuale, sta producendo una incultura diffusa e un repertorio di tecniche operative per il recupero della pietra artificiale affatto congruenti con la sua natura intrinseca e con il suo valore storico.

## 8. La diagnostica sulle pietre artificiali

Le cause di degrado delle pietre in conglomerato cementizio sono, come si è visto nel paragrafo precedente, numerosissime e non sempre ben definite e presentano spesso il problema di non essere sempre evidenziabili tramite un semplice sopralluogo un esame visivo e neppure tramite prove in situ o in laboratorio. La diagnosi del degrado si presenta molto complessa poiché il più delle volte si ha il concorso di più cause: alcune che hanno contribuito solo ad originare i fenomeni; altre invece che sono intervenute successivamente ad aggravare le situazioni.

L'analisi del manufatto, oggetto di studio, deve essere fatta attraverso un accurato sopralluogo in cui vengono individuati i difetti e i fenomeni di degrado palesemente manifesti. Correlato da un'adeguata documentazione fotografica accompagnata da una mappatura grafica sistematica della posizione dei difetti che permetterà in un secondo tempo di poter confrontare gli esiti di prove diagnostiche con i dati registrati.

L'analisi deve proseguire attraverso delle prove da effettuare in sito generalmente di tipo semidistruttivo o totalmente non distruttivo, effettuate in opera e con le quali si cerca di ottenere velocemente informazioni sullo stato del manufatto sia a scopo di controllo che di rilievo.

Si definiscono non distruttive tutte quelle tecniche più o meno sofisticate applicate a strutture, superfici o particolari architettonici che non richiedono demolizioni e quindi, oltre a non compromettere minimamente l'integrità funzionale dell'edificio o di sue parti, non ne alterano l'aspetto o la materia. In questi casi l'ispezione e la lettura dei dati vengono eseguiti strumentalmente

Alcuni di questi metodi sono più orientati alla restituzione fisica dell'oggetto, altri alla rilevazione di degradi di parti non accessibili o alla messa in evidenza di inefficienze di tipo prestazionale.

Nel caso di decadimenti prestazionali la lettura è di solito riferita alla prestazione in esame (come p. es. in caso di isolamenti termici o acustici), mentre in altre situazioni si deve ricorrere a letture indirette che necessitano di successive interpretazioni.

Il più delle volte, infatti, i metodi di indagine non distruttiva non conducono direttamente alla diagnosi ma richiedono il contributo di specialisti per la interpretazione dei risultati in relazione alla loro complessità ed ai problemi interpretativi connessi alla gestione di più informazioni analitiche.

I metodi semidistruttivi non causano distruzione né modificano ineliminabilmente l'oggetto ma si limitano, in genere, solo a modestissime alterazioni del manufatto quali piccoli fori o prelievi di campioni di dimensioni millimetriche (10 ÷ 15 mm o anche più piccoli).

Le tecniche sono molteplici, basate su principi diversi, e vengono utilizzate per l'individuazione e la misura di alcune caratteristiche del materiale indagato (resistenza, modulo di

elasticità grado di corrosione,.... spessore dello strato degradato,...).

Le ipotesi formulate in base ai risultati delle indagini in situ, correlate da un'adeguata campagna di campionamento di parti in pietra artificiale, devono essere verificate attraverso opportune prove di laboratorio, in modo da individuare il meccanismo di degrado, soprattutto in relazione alla sequenza ed alla complementarità delle varie cause.

1) analisi al microscopio ottico polarizzatore in luce trasmessa (MOP), in sezione sottile, rivolta alla definizione delle caratteristiche composizionali, strutturali e tessiturali di ciascun campione

2) analisi per diffrazione dei raggi X, molto efficace dal punto di vista qualitativo per identificare i vari prodotti cristallini; essa fornisce, tuttavia, solo indicazioni approssimative dal punto di vista quantitativo;

3) microscopia elettronica a scansione (SEM) corredata di microanalisi, che consente di identificare i prodotti, soprattutto quelli presenti nella matrice cementizia, in base alla loro morfologia ed alla loro composizione elementare.

Nei paragrafi successivi si analizzano più in dettaglio le tecniche a disposizione.

## 4.1. Prove in situ

### 4.1.1 analisi pacometrica

La prova pacometrica<sup>41</sup> è regolamentata dalla norma BS 1881/204:2004.

Attraverso il pacometro<sup>42</sup> si misura il campo magnetico determinato dalla presenza di materiali ferrosi nelle vicinanze della superficie del calcestruzzo oggetto di indagine.

---

<sup>41</sup> Cfr. enciclopedia Wikipedia, sotto licenza Creative Commons Attribution/Share-Alike License.

Attraverso tali misurazioni si possono rilevare, come se proiettate sul piano costituito dalla superficie del calcestruzzo:

la posizione (tale da consentire la stima dell'interferro e del copriferro) e il diametro delle armature poste su piani paralleli a quello di indagine;  
passo delle staffe.

La prova viene effettuata facendo scorrere la sonda sull'elemento indagato. In presenza di elementi magnetici la centralina emette un segnale acustico, di intensità via via crescente all'approssimarsi del metallo, e visualizza i dati su un display digitale. Mediante conversioni automatiche, lo strumento è in grado di fornire in tempo reale la sezione delle barre rilevate.

Lo strumento permette inoltre di rilevare tutte le informazioni legate alla presenza di altri elementi metallici sotto traccia (zanche, catene, tiranti, capichiave, putrelle, tubi, ecc.).

Nel caso si debba determinare il copriferro prima dell'esecuzione della prova va eliminato l'intonaco.

Grazie alle prove pacometriche si possono individuare anche le zone di conglomerato non attraversate da armature al fine dell'effettuazione di ulteriori prove distruttive, quali le prove di compressione su carote di calcestruzzo (serve ad individuare la zona dove prelevare la carota), e non, quali le prove sclerometriche e/o ultrasoniche (sonreb) che sono tutte influenzate dalla presenza di armature.

Per quanto sopra la prova pacometrica dovrebbe essere effettuata prima di ogni altro tipo di prova distruttiva e non. La prova pacometrica è quindi l'analisi iniziale che,

---

<sup>42</sup> Il pacometro è uno strumento digitale che si basa sul principio dell'induzione magnetica. I pacometri di ultima generazione basano il loro funzionamento sul fenomeno delle correnti parassite o correnti di Foucault o correnti di eddy (dall'inglese eddy: vortice) sono delle correnti indotte in masse metalliche conduttrici che si trovano immerse in un campo magnetico.

congiuntamente alla prova di carbonatazione, permette di iniziare un percorso che porta alla determinazione delle caratteristiche del calcestruzzo.

#### 4.1.2 analisi magnetometrica

La magnetometria è un'indagine non invasiva che consente di ottenere preziose informazioni per una corretta valutazione delle resistenze meccaniche di una struttura senza ricorrere a campionamenti o prove dirette.

La magnetometria consente di localizzare in modo rapido ed accurato la presenza e l'orientamento degli elementi metallici di rinforzo (armature) presenti in strutture di calcestruzzo armato, di misurare con precisione lo spessore del copriferro e di effettuare una stima del diametro del tondino.

Viene anche impiegata per individuare tubature d'impianti in murature o pavimentazioni sistemi di vincolo metallici dei rivestimenti in lastre di pietra, catene e tiranti all'interno di solai o di murature.

Il magnetometro è costituito da una centralina e da una sonda che genera un campo magnetico indotto: quando muovendo la sonda sulla superficie, un metallo entra nel campo magnetico della sonda, quest'ultimo subisce uno smorzamento proporzionale alla massa metallica e inversamente proporzionale alla distanza tra corpo metallico e sonda. Il campo d'azione della sonda può essere di 6 o di 12 cm. La risoluzione è inversamente proporzionale all'ampiezza del campo di misura.

Questo tipo di indagine ha come limite la distanza, infatti se il corpo metallico è a distanza troppo elevata rispetto al campo di misura non viene rilevato<sup>43</sup>.

#### 4.1.3 analisi colorimetrica

---

<sup>43</sup> Cfr. p. Gaparoli, le superfici esterne degli edifici, degradi criteri di progetto, Tecniche di manutenzione, ed. Alinea Firenze 2002, pag.43.

I test colorimetrici si basano sull'utilizzo di soluzioni chimiche che messe a contatto con la struttura da indagare reagiscono in vario modo con i componenti del calcestruzzo e ne colorano la superficie diversamente, mettendo in mostra la presenza o meno delle sostanze che hanno provocato la situazione di degrado. La misura dello strato di calcestruzzo penetrato dalla sostanza aggressiva consente di stabilire con esattezza lo spessore di conglomerato da rimuovere e da sostituire con malte o betoncini da restauro. Una valutazione errata dello spessore di calcestruzzo penetrato ad esempio per difetto, può lasciare all'interno dell'opera sostanze capaci di corrodere nuovamente le armature, oppure per eccesso può far aumentare notevolmente il costo del restauro<sup>44</sup>.

I più comuni test colorimetrici sono quelli della fluoresceina (per la diagnosi dell'attacco dei cloruri) e della fenolftaleina (per la diagnosi della carbonatazione).

Prova colorimetrica alla fluoresceina (Metodologia definita dalla norma UNI 792845), consiste nello spruzzare su una carota di calcestruzzo una soluzione a base di fluoresceina ed una a base di nitrato d'argento<sup>46</sup>. Il calcestruzzo si colora di rosa chiaro nella zona penetrata dal cloruro (per via di un complesso chimico che si forma per reazione tra cloruro argento e fluoresceina) ed in colore scuro nella zona non penetrata dal cloruro (per via della formazione di ossido d'argento nero). Il confine tra la zona rosa e quella scura in varie carote consente di determinare il fronte di avanzamento del cloruro attraverso il copri ferro.

---

<sup>44</sup> Cfr. L. Coppola, A. Borsoi e M. Collepari, Proposta di modifica della UNI 7928 per una estensione alla prova in sito, ed. Enco, Treviso.

<sup>45</sup> Cfr. UNI 7928 Determinazione della penetrabilità dello ione cloruro.

<sup>46</sup> Si preparano due Soluzioni una a base di fluoresceina 0,1g in 100 cm<sup>3</sup> di alcool etilico al 70% e l'altra contenente nitrato d'argento in concentrazione acquosa pari a 0,1 mol/l (17 g/l). Cfr. L. Coppola A. Borsoi M. Collepari, op. cit. pag.1.

Prova colorimetrica alla fenoftaleina, deve essere effettuata immediatamente dopo il prelievo del campione, determina la profondità di carbonatazione (Metodologia definita dalla norma UNI 994447), si utilizza una soluzione all 1% di fenoftaleina in alcool etilico che viene spruzzata su una carota di calcestruzzo, il procedimento sfrutta le proprietà del reagente che cambia colore, la superficie si colora di rosso magenta, se la soluzione viene a contatto con calcestruzzo molto alcalino (ph 10) per la presenza di  $Ca(OH)_2$  ed appare incolore se viene a contatto con un calcestruzzo che per effetto della carbonatazione non presenta tracce di  $Ca(OH)_2$  essendosi questo composto completamente trasformato in  $CaCO_3$  pH – 8,6.

Il confine tra i due colori rispetto alla superficie esposta all'aria, indica lo spessore del calcestruzzo carbonatato e quindi non più capace di proteggere i ferri dai processi corrosivi.

#### 4.1.4 analisi ultrasonica

Si tratta di tecniche nate per applicazioni nell'ambito dell'ingegneria meccanica ed aeronautica per il controllo della componentistica metallica, in particolare per rilevare l'eventuale presenza di “cricche” all'interno dei materiali metallici, e successivamente adottate anche in campo edilizio per rilevare in modo quantitativo alcune caratteristiche meccaniche dei manufatti edilizi.

Il metodo<sup>48</sup> consiste nel far propagare all'interno del sistema in questione una serie di onde elettromagnetiche nel campo delle frequenze ultrasoniche. L'impulso ultrasonico é ottenuto applicando un rapido cambio di potenziale da un

---

<sup>47</sup> Cfr. UNI 9944/1992, Corrosione e protezione dell'armatura del calcestruzzo. Determinazione della profondità di carbonatazione e del profilo di penetrazione degli ioni cloruro.

<sup>48</sup> Cfr. norma UNI EN 583-1:2004.

trasmettitore ad un cristallo piezoelettrico trasduttore che emette vibrazioni alla sua frequenza fondamentale; l'onda ultrasonica prodotta, induce una vibrazione meccanica di particelle in un materiale con frequenze superiori a quelle del campo dell'udibile (frequenze udibili dall'uomo: comprese tra i 16 Hz e i 20 KHz)<sup>49</sup>. Le frequenze delle vibrazioni meccaniche utilizzate nel calcestruzzo ed in materiali simili sono comprese tra 25 KHz e i 200 KHz.

Un impulso applicato ad un elemento costruttivo produce:

- onde longitudinali o di compressione (onde che si propagano all'interno di un materiale con spostamento delle particelle parallelo alla direzione di propagazione);
- onde trasversali o di taglio (onde che si propagano all'interno di un materiale solido con spostamento delle particelle perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda);
- onde superficiali ( onde che si propagano lungo la superficie di un elemento entro cui penetra per meno d una lunghezza d'onda);
- onde piane (onde i cui punti aventi la stessa fase giacciono su superfici piane parallele).

Queste tipologie di onde si propagano con differente velocità in mezzi diversi, e possono cambiare modo di propagazione se incontrano una superficie di separazione tra due mezzi diversi. Le onde di compressione possono essere utilizzate in solidi, in liquidi ed in aeriformi, le altre onde si propagano unicamente nei solidi (hanno un modulo di taglio elevato). La misura della velocità delle onde di propagazione può essere effettuata per riflessione o per trasmissione, che richiede l'impiego di un coppia di sonde: una sonda trasmittente piezoelettrica, posta a contatto con la superficie del calcestruzzo, invia le onde ultrasoniche, che vengono raccolte

---

<sup>49</sup> Cfr. V. Deutsch, M. Vongt, Ultrasonic testing, ed. Carl Deutsch, 1990.

da una sonda ricevente e convertite nuovamente in un segnale elettrico.

L'apparecchiatura collegata alle sonde misura il tempo di transito.

La velocità di propagazione degli ultrasuoni si calcola in base al tempo di transito dell'impulso ultrasonico e alla lunghezza del percorso (distanza tra le due sonde trasmettenti e riceventi) del suono con la relazione:  $V=L/t$  in cui:  $V$  = velocità ultrasuoni (m/sec);  $L$  = lunghezza del percorso (m);  $t$  = tempo di transito (sec).

All'inizio di ogni campagna di misure è opportuno eseguire la taratura della strumento.

Per quanto concerne la mutua posizione delle sonde, sebbene la propagazione dell'energia sia massima in direzione ortogonale alla superficie della sonda, è possibile effettuare le misure non solo su facce opposte (trasmissione diretta), ma anche su facce adiacenti (trasmissione semidiretta). E' anche possibile operare sulla stessa faccia (trasmissione superficiale), tuttavia l'energia è minima, e la trasmissione è particolarmente influenzata dallo stato superficiale del getto. Poiché quest'ultimo tipo di misura può produrre risultati poco rappresentativi per la struttura nel suo insieme, dovrebbe essere utilizzato solo per il controllo della profondità delle fessurazioni superficiali. Per l'esecuzione della prova, occorre essere sicuri che le onde ultrasoniche vengano effettivamente trasmesse alla superficie in esame. E' pertanto necessario effettuare più letture del tempo di transito, sino a che venga raggiunto il valore minimo. La norma prevede la possibilità di usare frequenze comprese tra i 50 e 60 KHz nella maggior parte delle applicazioni, e stabilisce prescrizioni per quanto concerne la redazione del rapporto, che deve riportare:

- marca dello strumento, accuratezza della lettura, frequenza;

- descrizione della struttura o del provino sottoposto a prova;
- descrizione del calcestruzzo;
- composizione del calcestruzzo (tipo di cemento, contenuto di cemento, rapporto acqua/cemento, tipo e dimensioni degli inerti, additivi utilizzati);
- condizioni del getto, temperatura e stagionatura del cls al momento della prova;
- schizzo che illustri la posizione delle sonde, il percorso di propagazione e l'eventuale posizione delle armature;
- condizioni della superficie sottoposta alla prova;
- stima dell'umidità;
- lunghezza del percorso di propagazione, metodo di misura e accuratezza della misura,
- misura della velocità;
- eventuale misura corretta della velocità, in presenza di barre di armatura.

Di seguito si riportano fattori che influiscono sulla propagazione delle onde ultrasoniche nel calcestruzzo. Entità del carico: un campione di prove relativo a misure di velocità ultrasonica su provini cubici, sottoposti ad un carico inferiore a quello di rottura, ha messo in evidenza una correlazione significativa tra velocità (espressa in percentuale rispetto alla velocità misurata sul provino scarico) e carico (espresso in percentuale rispetto al carico di rottura) per valori di compressione superiori al 50% del carico di rottura, la velocità si riduce sino a raggiungere il 50% di quelle a rottura.

Età del cls: in genere la velocità degli ultrasuoni aumenta con la maturazione, ad uno stesso valore di velocità, la resistenza del calcestruzzo maturato in acqua risulta inferiore a quella relativa alla maturazione in aria.

Forma e dimensioni della struttura: Secondo la norma la velocità degli ultrasuoni è indipendente dalla forma e dalle

dimensioni della struttura sottoposta a prova, purché la dimensione minima laterale sia non inferiore a mm.80, per una frequenza di trasmissione di 50 KHz al di sotto di tale valore, la velocità si riduce.

Lunghezza del percorso: esiste una dipendenza solo nel caso di percorsi molto brevi, dovuta alla natura eterogenea del calcestruzzo; variando il percorso da mm. 150 a mm. 500, la variazione di velocità è pari al 4% e al 2-5% del calcestruzzo rispettivamente secco e saturo. Come già visto, le norme BS4408 impongono comunque valori minimi della lunghezza dell'elemento esaminato in funzione del tipo di trasmissione utilizzato.

Presenza di armature: in prossimità delle barre di armatura. La velocità risulta maggiore in quanto l'impulso rilevato dalla sonda ricevente avrà viaggiato in parte nelle barre (la velocità degli ultrasuoni nell'acciaio è maggiore rispetto a quella nel calcestruzzo). Per quanto è possibile, è pertanto opportuno evitare che il tratto interessato dalla misura sia attraversato dalle barre di armatura, in caso contrario occorre applicare un fattore di riduzione.

Rapporto acqua/cemento: la velocità ultrasonica si riduce all'aumentare del rapporto acqua/cemento.

Stato di sollecitazione: la velocità degli ultrasuoni aumenta per carichi inferiori al 20% del carico di rottura, e si riduce drasticamente se gli sforzi superano il 70% del carico di rottura.

Temperatura: La velocità degli ultrasuoni varia di qualche unità percentuale per una temperatura ambientale compresa tra 0°C e 40°C. Secondo la norma la velocità non varia in modo significativo se la temperatura del calcestruzzo è compresa tra 5°C e 30°C.

L'umidità del calcestruzzo: l'effetto di questo fattore ha effetti modesti: secondo la norma i provini in condizioni sature presentano velocità maggiori del 2% rispetto a quelli in

condizioni secche (in casi eccezionali é stata osservata una maggiorazione del 5%); é comunque possibile introdurre un coefficiente di correzione.

#### analisi termografica

La termografia è un metodo di indagine impiegato in diversi campi.

In ambito manutentivo viene utilizzata allo scopo di rilevare:

- dispersioni termiche
- distacchi d'intonaco o di rivestimenti
- anomalie strutturali (colonne murate, aperture tamponate, discontinuità, ...)
- fenomeni dovuti all'umidità.

L'apparecchiatura termografica rileva le radiazioni elettromagnetiche nello spettro infrarosso termico. Vi sono due intervalli di azione:

- da 3 a 5 microns (short wave) o 770 ÷ 1100 nm (near infrared)
- da 7,5 a 12  $\mu\text{m}$  (long wave) o (far infrared).

Per lo studio dei diversi campi si rende necessario assumere condizioni al contorno differenti.

Per effettuare il test è necessario creare un gradiente di temperatura all'interno dell'oggetto. Il flusso di calore conseguente sarà funzione della conducibilità termica, della densità e del calore specifico del materiale. Se ci sono discontinuità che presentino una diffusività termica differente da quella di gran parte del materiale, si creeranno al di sopra della posizione dei vuoti, delle variazioni di temperatura (caldo o freddo) che genereranno differenti valori termici.

E opportuno che le dispersioni termiche siano rilevate nella stagione invernale, quando nei locali interni è in funzione l'impianto di riscaldamento e, quindi, si possono adeguatamente evidenziare dispersioni di calore. La prova va eseguita all'esterno dell'edificio. Laddove la resistenza

termica dei materiali è più bassa, dove cioè si ha maggior dispersione termica, la temperatura superficiale esterna della parete sarà più alta rispetto a quella delle superfici a maggior resistenza termica (dovuta a caratteristiche o spessori dei materiali costituenti, oppure alla presenza di isolamenti termici). I distacchi dei sistemi di rivestimento (intonaci, lastre di pietra, pellicole pittoriche, piastrelle ceramiche, ecc.) vengono indagati sfruttando le proprietà coibenti dell'aria a riposo. Quando si produce un distacco con formazione di camera d'aria tra rivestimento e supporto, il comportamento termico della superficie cambia. Per evidenziare queste diversità di comportamento la condizione più semplice è quella di sfruttare il riscaldamento solare diretto (per le facciate est, sud ed ovest) o produrre un riscaldamento indiretto (per le facciate nord). Durante la fase di riscaldamento il calore viene trasmesso, per conduzione, all'interno della parete, aumentandone la temperatura. Laddove sia presente una camera d'aria tra il sistema di rivestimento e la muratura, il calore verrà invece accumulato dall'aria. Durante la fase di raffreddamento, le parti con distacchi, dunque, risulteranno più calde e le differenze di temperatura verranno adeguatamente rilevate dall'apparecchiatura termografica.

Le anomalie strutturali si rilevano sfruttando le differenti proprietà termiche dei materiali. In una facciata, un pilastro in pietra o in cemento armato, avendo un'inerzia termica superiore a quella del mattone, risulterà termicamente più freddo.

Infine le patologie umide possono essere studiate senza modificare le condizioni termiche del contorno: una muratura bagnata, infatti, è sempre più fredda.

In generale il rilievo termografico ha il vantaggio di poter studiare le superfici a distanza, di essere un'indagine

completamente “non distruttiva”, e di consentire il monitoraggio di tutta la superficie in esame.

Di contro si hanno misurazioni non sempre precise (specie se la superficie da esaminare è molto distante) e frequenti difficoltà di interpretazione dei risultati, dato che le condizioni termiche di contorno si modificano in maniera spesso molto veloce.

#### 4.1.6 analisi endoscopica

L'endoscopia è una tecnica visiva che, attraverso un particolare strumento, l'endoscopio, permette di osservare i manufatti al loro interno. Viene impiegata per l'analisi dei sistemi di rivestimento. Per esempio è possibile misurare lo spessore delle lastre di pietra di un rivestimento, rilevare la morfologia di una muratura a sacco oppure la geometria di un solaio in legno controsoffittato.

L'endoscopio è uno strumento ottico, simile ad un periscopio. È composto da una sonda, che può essere dotata di uno specchietto che permette la visione laterale, da un corpo che trasmette l'immagine all'oculare e da un oculare attraverso il quale l'operatore vede l'immagine rilevata. Per osservare l'interno del manufatto è necessario entrare con parte dell'endoscopio (la sonda ed il corpo) all'interno di un foro, un'apertura esistente o un buco eseguito con il trapano, generalmente di dimensioni comprese tra 8 e 16 mm.

L'immagine visiva osservata può essere frontale, obliqua in avanti, perpendicolare all'asse dell'endoscopio ovvero obliqua in dietro.

L'endoscopio è dotato di una sorgente luminosa che permette di illuminare l'interno del foro o dell'intercapedine osservata. All'interno del corpo e della sonda dell'endoscopio si trovano il sistema di illuminazione ed il sistema di trasferimento dell'immagine.

Esistono tre tipologie di endoscopi:

rigido a luce calda: l'immagine è trasmessa attraverso lenti e l'illuminazione è garantita da una lampadina montata in cima alla sonda;

rigido a luce fredda: l'immagine arriva all'oculare attraverso lenti e l'illuminazione arriva alla sonda trasferita con fibre ottiche da una sorgente esterna; flessibile: l'immagine e l'illuminazione sono trasmesse con fasci di fibre ottiche, la sorgente luminosa è esterna.

In generale i sistemi di trasferimento dell'immagine a lenti ed a fibre ottiche, quando queste sono di ottima qualità, offrono le stesse prestazioni.

Il sistema di illuminazione a luce calda ha il vantaggio di non alterare significativamente i colori dei materiali osservati e di garantire rese luminose che permettono una buona visione, ma ha lo svantaggio di surriscaldare materiali che possono essere infiammabili (p. es. il legno) e di avere una "zona morta" della sonda dove è alloggiata la lampadina.

Il sistema di illuminazione a luce fredda offre i vantaggi di non avere zone morte della sonda e di non apportare calore ai materiali ma lo svantaggio di garantire una resa luminosa inferiore e provocare un'importante alterazione dei colori che rende a volte poco riconoscibili i materiali.

Le osservazioni con endoscopio richiedono in genere adeguata preparazione ed allenamento in quanto la visione è deformata dal sistema di lenti. L'endoscopio può essere collegato ad una telecamera o ad una fotocamera per la registrazione fotografica o digitale delle immagini osservate.

## 4.2. Prove in laboratorio

### 4.2.1 prelievo del campione

Il campionamento deve essere:

programmato ed eseguito sulla base del tipo di analisi che si intendono effettuare,

meno dannoso possibile per il manufatto,

ridotto nel numero, meglio prelevare in più fasi sulla base dei risultati acquisiti,

ridotto nelle dimensioni,

rappresentativo del fenomeno da studiare,

selettivo in modo da semplificare l'interpretazione dei risultati.

Attraverso l'identificazione di alcune caratteristiche mineralogiche e la misura di alcuni parametri chimici e fisici, è possibile ottenere in laboratorio informazioni identificative del materiale in esame e sull'entità delle sue alterazioni.

Le analisi di laboratorio vengono sempre effettuate su campioni direttamente prelevati dall'oggetto da analizzare.

Da qui l'importanza di un corretto campionamento: l'esatta metodologia, indicata dalla Raccomandazione Normal 3/8050, può essere sintetizzata come segue:

1. il campionamento dev'essere effettuato solo su autorizzazione dell'organismo che ha la tutela del manufatto (nel caso di edifici vincolati), dopo aver ben definito con i ricercatori le finalità dell'indagine;

---

<sup>50</sup> Raccomandazione Normal 3/80, *Campionamento Prelievi di materiale in opera per gli studi mineralogici, chimici, fisici e biologici*, 1980. La Commissione NORMAL (Normativa Manufatti Lapidei) opera sotto il patrocinio dei Centri CNR-Opere d'arte di Milano e Roma e dell'Istituto Centrale per il Restauro. Ha lo scopo di stabilire metodi unificati per lo studio delle alterazioni dei materiali lapidei e per il controllo dell'efficacia dei trattamenti conservativi di manufatti di interesse storico-artistico.

2. il campionamento deve essere effettuato solo da chi eseguirà le analisi o in sua presenza;
3. una copia del piano di lavoro programmato, con tutta la documentazione inerente il campionamento, deve essere depositata presso l'Organismo di tutela e conservata nel relativo fascicolo;
4. il numero e la dimensione dei prelievi devono essere minimi, compatibilmente con le finalità dell'analisi;

#### Campionamento di materiali per indagini

5. i campioni devono essere prelevati da zone prescelte tenendo conto della necessità di non alterare per quanto possibile l'estetica del manufatto e la sua consistenza materica;
6. la scelta del tipo di campione da prelevare deve essere fatta sia in base ai diversi litotipi presenti sia in base ad una attenta osservazione visiva in loco, da cui dovranno emergere, ad esempio, eventuali differenze originarie riscontrabili nell'ambito di uno stesso litotipo, forme diverse di degradazione, l'eventuale influenza di variabili quali la quota, l'esposizione, la possibilità di dilavamento da pioggia ed eventuali precedenti interventi di restauro o sostituzione;
7. i prelievi possono essere effettuati in superficie o in profondità. Nel primo caso si farà uso di pennelli a setola morbida, di bisturi o di scalpelli, rispettivamente per materiale polverulento, incoerente o coerente. Lo spessore del materiale da prelevare nei singoli casi varia in funzione della natura del materiale e del suo degrado. E buona norma effettuare prelievi per campionature di tutti gli strati presenti, ivi compreso il materiale apparentemente inalterato. Nel secondo caso (prelievi in profondità) si ricorre ad un'opportuna carotatrice a rotazione con punta a ghiera diamantata o in metallo duro: il diametro della carota deve essere il più piccolo possibile, ma compatibile, naturalmente con la disomogeneità del materiale. Quando possibile i

campioni in profondità vanno prelevati nella stessa posizione in cui sono stati prelevati i campioni superficiali o in posizioni molto prossime. L'operazione di carotaggio deve essere effettuata, per quanto possibile, a secco al più basso numero di giri per evitare un eventuale surriscaldamento del materiale. Si ricorre ad un carotaggio ad umido solo quando non è possibile intervenire altrimenti, ma è necessario segnalare questa condizione e tenerla presente al momento dell'analisi. Il foro lasciato dalla carota nel manufatto deve essere chiuso (per evitare una zona preferenziale di ulteriore degrado) utilizzando materiale le cui caratteristiche chimiche e fisiche siano tali da impedire effetti secondari;

8. per ogni prelievo è necessario valutare le dimensioni dell'area interessata e della profondità del prelievo, per rendere confrontabili i risultati delle analisi;

9. il campione prelevato deve essere riposto in contenitori di materiale inerte, a chiusura ermetica, preventivamente pesati e contrassegnati con la stessa sigla corrispondente al prelievo. E buona norma effettuare nel più breve tempo possibile una pesata per valutare, successivamente, il contenuto di acqua libera presente nel campione al momento del prelievo;

10. è necessario accompagnare il campionamento con una documentazione fotografica che rappresenti sia la zona interessata prima e dopo il prelievo che i singoli campioni prelevati, con una descrizione dettagliata del loro stato.

#### 4.2.2 osservazione al microscopio ottico in sezione sottile<sup>51</sup> (MOP)

Il microscopio da mineralogia o microscopio polarizzatore è diverso dal microscopio ordinario (o da biologia) perché possiede un sistema polarizzante. Questo sistema è costituito

---

<sup>51</sup> UNI 9724-4:1990 Materiali lapidei. Confezionamento sezioni sottili

attualmente da due lamine di polaroid<sup>52</sup>. Quella inferiore, detta polarizzatore, trasforma la luce normale in luce polarizzata in un piano (Fig. ), ciò significa che le vibrazioni del vettore elettrico E sono parallele tra loro in tutti i punti dell'onda. In ognuno di tali punti il vettore oscillante E e la direzione di propagazione formano un piano chiamato piano di vibrazione.

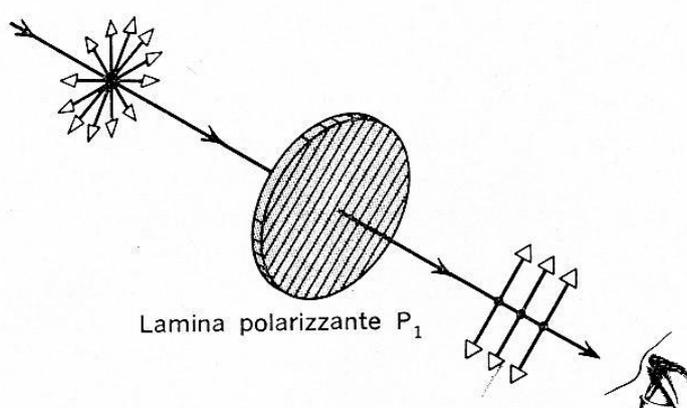


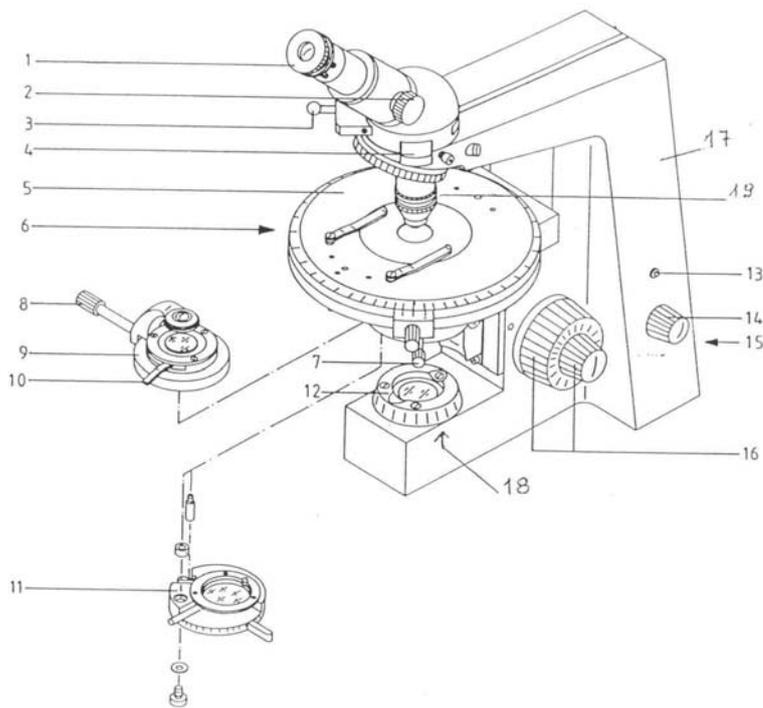
Fig. Una lamina produce luce polarizzata in un piano. Le sottili linee indicate indicano le molecole lunghe incorporate nella lamina durante la lavorazione in una plastica, che viene poi sottoposta a trazione affinché le molecole si allineino parallelamente alla direzione di propagazione. Ovviamente non sono visibili all'occhio nudo, ma determinano la direzione di polarizzazione della luce. La caratteristica della lamina è di polarizzare la luce.

Il vettore magnetico vibra perpendicolarmente al vettore elettrico e alla direzione di propagazione nel piano definito piano di polarizzazione. (Figura ). L'altra lamina polaroid, orientata a  $90^\circ$  rispetto alla prima, è detta analizzatore (il termine "nicol", non essendo più utilizzato il prisma di Nicol, andrebbe abbandonato).

Il polarizzatore è collocato sotto il tavolino del microscopio, che è girevole e graduato; l'analizzatore si trova tra l'obiettivo e l'oculare, sopra una fenditura a  $45^\circ$  rispetto alla direzione di vibrazione del polarizzatore ove è possibile inserire una lamina ausiliaria, il cosiddetto compensatore, e prima di

<sup>52</sup> Il polaroid (film plastico prodotto dalla Polaroid Corporation of Cambridge, Massachusetts) consiste di molecole organiche, generalmente alcol polivinilico, con struttura a catena, che vengono allineate per stiramento e trattate con iodio.

un'altra lente ausiliaria, detta lente di Bertrand o di Amici o, più correttamente, di Bertrand-Amici. Sia l'analizzatore sia la lente di Bertrand-Amici sono inseribili a volontà. Il polarizzatore dei microscopi moderni trasmette la luce polarizzata nel piano E-W, per accordi internazionali stipulati nel 1972. La direzione di trasmissione è N-S nei microscopi vecchi e soprattutto in quelli antichi, che non avevano un sistema di illuminazione artificiale come quelli attuali, ma utilizzavano uno specchio per raccogliere i raggi luminosi davanti una finestra possibilmente esposta a Nord perchè tale luce è più ricca di radiazioni a lunghezza d'onda più corta rispetto alla luce solare.



Con il microscopio polarizzatore, variando opportunamente le condizioni di lavoro, si possono effettuare una serie di osservazioni che permettono di studiare le proprietà ottiche

dei minerali trasparenti e infine di identificarli sulla base di queste.

1) Osservazioni in luce parallela al solo polarizzatore

-Si toglie la lente convergente del gruppo condensatore oppure, in assenza di questa, si abbassa di circa 2 cm il gruppo condensatore; obiettivo a piccolo o medio ingrandimento, diaframma semichiuso, tensione della lampadina medio-bassa.

In queste condizioni si osservano:

- Colore e pleocroismo eventuale;
- Sfaldature, fratture
- Contorno e abito di minerali colorati
- Rilievo
- Indice/i di rifrazione

2) Osservazioni in luce parallela a polarizzatori incrociati

-Uguale assetto del punto 1 con l'inserimento dell'analizzatore.

In queste condizioni si osservano:

- Forma dei frammenti e abito dei minerali incolori
- Massima birifrangenza
- Tipo di estinzione e angolo
- Segno dell'allungamento
- Colori di interferenza anomali
- Geminazioni e zonature.

3) Osservazioni in luce convergente a polarizzatori incrociati

- Si alza al massimo il gruppo condensatore e si inserisce la lente convergente accessoria, se c'è, si apre il diaframma, se presente, si regola la tensione della lampadina al massimo consentito, obiettivo al massimo ingrandimento, si inseriscono sia l'analizzatore che la lente di Amici.

Poiché la distanza fra la sezione sottile e l'obiettivo diminuisce con l'aumentare dell'ingrandimento, porre molta attenzione nell'effettuare correzioni alla messa a fuoco per

evitare rotture della sezione e danni all'obiettivo.

In queste condizioni si osservano:

-Figure di interferenza

-Segno ottico

-Stima del 2V

-Dispersione degli assi ottici, se presente

-Polarizzazione rotatoria, se presente.

Tale sequenza di operazioni non può essere applicata rigidamente in ogni occasione e su qualsiasi granulo; è importante quindi, prima di effettuare un approfondito esame ottico di un minerale, riconoscerne la natura (cristallo isotropo, uniassico o biassico) e scegliere quelle osservazioni coerenti con la classe ottica di appartenenza.

Come si potrà notare negli esempi di osservazioni ottiche indispensabili per caratterizzare minerali appartenenti a ciascuna delle tre classi ottiche, non è necessario né conveniente procedere nell'ordine indicato, anzi è opportuno iniziare da una osservazione in luce convergente con polarizzatori incrociati e lente di Amici (detta anche osservazione conoscopica) che consente di chiarire immediatamente la classe ottica di appartenenza.

#### 4.2.3 diffrazione ai raggi X (XRD)

La diffrazione di raggi X (XRD), utilizzata su campioni in polvere, è una tecnica analitica che consente di individuare sostanze inorganiche quali materiali costitutivi (es. pigmenti e intonaco) e di restauro oltre i prodotti inorganici di degrado, quando essi risultino cristallini, anche nel caso che siano presenti in piccolissime quantità.

L'analisi qualitativa si riferisce alla identificazione di fasi<sup>53</sup> presenti nei materiali a composizione mista oppure al riconoscimento di fasi a componente singolo.

La principale risorsa di informazioni per l'identificazione di fasi ignote è il Powder biffraction File, ossia un archivio elettronico (o cartaceo) dove sono contenute informazioni cristallografiche per più di 300000 fasi inorganiche ed organiche.

La diffrazione è una informazione primaria, che combinata con l'analisi elementare identifica senza ambiguità una certa fase cristallina.

Le impronte di diffrazione sono generalmente note da esperimenti condotti con radiazione X su materiale policristallino (registrate su pellicola oppure da rivelatore fotonico).

Tuttavia è possibile anche calcolare lo "spettro" di diffrazione a partire dalla struttura determinata su cristallo singolo.

In realtà con il termine fase ignota si intende una fase riconosciuta in passato (e quindi già identificata) ma non facilmente identificabile nel campione in esame.

Ovviamente le potenzialità di questo tipo di metodo crescono con il tempo, ossia più fasi nuove vengono identificate attraverso accurate metodologie cristallografiche maggiori sono le possibilità di riconoscere tali fasi in campioni in esame.

### **Co-presenza di più fasi**

Se in un campione policristallino esistono più fasi, la diffrazione da polveri conterrà picchi corrispondenti a

---

<sup>53</sup> La struttura cristallina di molte fasi solide è nota, perché identificata con metodi diffrattometrici a partire dalla introduzione di queste tecniche, cioè a partire dalla prima metà del XX secolo.

distanze interplanari di tutte le fasi, complicando il riconoscimento delle stesse.

Un'analisi qualitativa per diffrazione dei raggi X sul calcestruzzo (possibilmente privato dei suoi inerti e prelevato da una zona di sicuro degrado) confermerà o meno la presenza di:

$\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (gesso biidrato)

$\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$  (ettringite)

$\text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSiO}_3 \cdot 15 \text{H}_2\text{O}$  (thaumasite)

La presenza o meno di residui di clinker non idratato<sup>54</sup>.

In genere il gesso e l'ettringite presenti in una pasta di cemento 'giovane' (meno di una settimana), in conseguenza della presenza del solfato di calcio come regolatore della presa del cemento, non sono più rilevabili con i raggi X in una pasta di cemento "matura".

L'analisi per diffrazione dei raggi X su un campione prelevato nello strato di calcestruzzo penetrato dal cloruro consente di evidenziare l'eventuale formazione di ossicloruro ( $3\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ) responsabile del severo degrado del calcestruzzo esposto al trattamento di sali disgelanti a base di  $\text{CaCl}_2$ . Nel caso che questo tipo di degrado venga accertato, è necessario che il materiale da impiegare per il ripristino sia adeguatamente scelto in vista di un ulteriore degrado.

Questa tipologia di prova, detta anche XRD (X-Ray Diffraction), di un materiale solido, consente di avere informazioni addizionali che permettono di interpretare meglio il risultato dell'analisi chimica.

L'analisi per diffrazione dei raggi X è applicabile solo ai solidi cristallini, nei quali gli atomi che compongono il materiale sono disposti in modo geometricamente ordinato; infatti in tali tipi di solidi gli atomi occupano delle posizioni

---

<sup>54</sup> Cfr. O. Fiandaca V. Rinaldo, Una città artificiale a messina simulazione d'ornato su modelli di pietra, ed Sicania, 2005, pag. 77.

corrispondenti ai vertici di figure geometriche ben precise, denominate celle elementari.

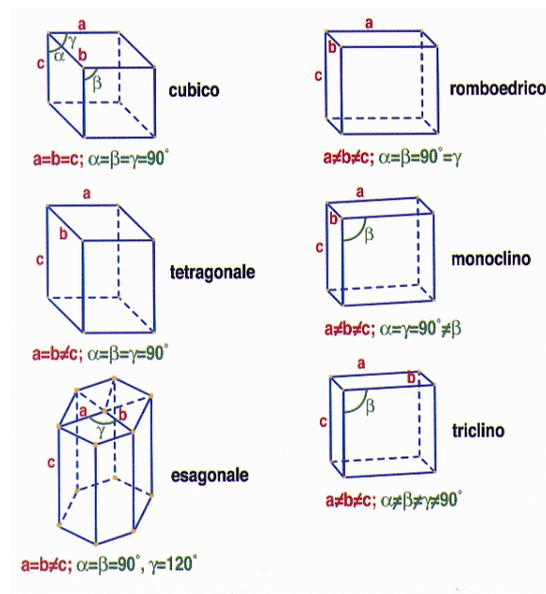


Fig: Celle elementari spaziali

Traslando nelle tre direzioni dello spazio una cella elementare si può ottenere la rappresentazione cristallografica del solido.

Esistono inoltre alcuni solidi cristallini costituiti da atomi (per esempio il diamante o la grafite) o da ioni (per esempio il cloruro di sodio costituito da  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$ ), in generatesi può affermare che: per i prodotti inorganici che costituiscono i materiali da costruzione, il reticolo cristallino è formato generalmente da ioni, mentre nei materiali metallici sono gli atomi a costituire il reticolo cristallino.

Non sempre gli atomi o gli ioni si dispongono in maniera ordinata ai vertici del reticolo cristallino, ma talvolta, essi sono "disturbati" dal raggiungere questa situazione ordinata, assumendo una disposizione più o meno irregolare; in tale caso si dice allora che il solido è amorfo.

Questo ad esempio è il caso della silice ( $\text{SiO}_2$ ) che può cristallizzare in diverse forme, quali il quarzo  $\alpha$ , il quarzo  $\beta$ , la cristobalite, la tridimite, ma può anche rimanere amorfa

come avviene per esempio nelle pozzolane, o in altri minerali silicei come l'opale ed il calcedonio.

La diffrazione dei raggi X, consente di riconoscere solo un prodotto cristallino, emettendo dei segnali in forma di picchi, mentre presenta solo una banda diffusa per i materiali amorfi diventa dunque difficile individuare una serie di distanze reticolari caratterizzanti quel composto.

Ogni piano reticolare si comporta rispetto ai raggi X esattamente come una riga in un reticolo di diffrazione per la luce visibile.

Le posizioni delle righe spettrali, quali risultano dalla diffrazione della luce visibile di un reticolo a righe, dipendono dalla distanza fra le righe successive; analogamente, la diffrazione dei raggi X è determinata dall'intervallo fra i piani successivi.

Per meglio comprendere questo concetto si può fare riferimento alla figura 75.

Si supponga che le rette AA, BB, e CC rappresentino un certo numero di piani reticolari in un reticolo spaziale, i cui punti siano gli atomi che costituiscono il cristallo; se un fascio parallelo di raggi X incide su un cristallo in modo che l'angolo d'incidenza sia  $\theta$ , una parte del fascio, per esempio LM, viene riflesso in M lungo MN dagli atomi nel piano AA. Altri raggi, per esempio PQ, penetrano nel cristallo e vengono riflessi, per esempio lungo QN, dagli atomi nel piano BB, analogamente si hanno riflessioni sugli altri piani come ad esempio CC.

A questo punto se la differenza tra il percorso LMN e quello PQN è eguale a un numero intero di lunghezze d'onda, i due fasci, da L e da P, si addizionano rinforzandosi dopo la riflessione e ne risulta un intenso fascio N diffratto.

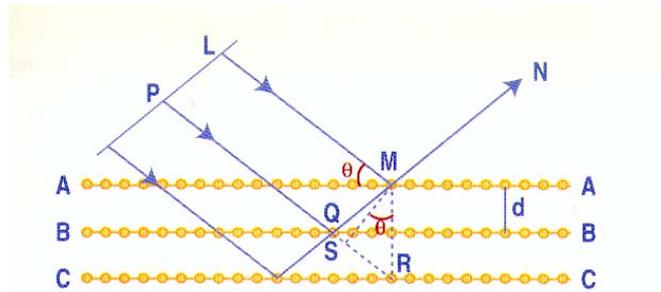


Fig: Riflessione dei

Per individuare la situazione di sovrapposizione e di rinforzo dei raggi diffratti, si può a questo punto tracciare da M la perpendicolare MR ai piani di riflessione, e la MS perpendicolare a QR; la differenza fra i percorsi LMN e PQN è eguale a  $QM - QS$ , e poiché, come si può notare dalla figura,  $QM = QR$ , la differenza tra i percorsi è eguale ad SR. Dato che l'angolo SMR è uguale all'angolo d'incidenza  $\theta$ , si deduce che SR è uguale a:

$$2d \sin \theta$$

in cui, d rappresenta la distanza fra due piani reticolari successivi.

Perché si abbia un massimo di riflessione, questa deve essere un numero intero (n) di lunghezze d'onda ( $\lambda$ ).

Si ha allora che la condizione, che si applica anche ai raggi riflessi dagli altri piani, può essere definita tramite l'equazione di Bragg:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

In tale modo essendo nota una certa lunghezza d'onda nota, d e  $\lambda$  sono determinati.

Facendo poi variare l'angolo di incidenza dei raggi X rispetto al piano degli atomi, si avrà un aumento graduale dell'angolo di incidenza  $\theta$ , dal quale dipende l'intensità della diffrazione, si trovano una serie di posizioni, corrispondenti ad  $n = 1, 2, 3, 4$ , ecc., per le quali si verificano massimi di riflessione, separati da regioni in cui i vari raggi diffratti non sono in fase e quindi si annullano l'un l'altro.

Per mezzo di un cristallo è possibile, quindi, ottenere uno "spettro" di raggi X in cui i massimi di diffrazione vengono chiamati di primo, secondo, terzo, ecc. ordine al variare del valore di  $n$ .

Da tale spettro, tramite l'ausilio dell'equazione di Bragg, è possibile determinare la distanza  $d$  che separa i piani reticolari.

Per arrivare alla individuazione di solidi cristallini in un materiale, viene impiegato il così detto metodo delle polveri, che consiste nel sottoporre a diffrazione dei raggi X il materiale ridotto in polvere, infatti nella polvere i cristalli sono orientati casualmente in tutte le direzioni e pertanto un certo numero di essi avranno sempre i loro piani reticolari nella direzione esatta affinché sia applicabile l'equazione di Bragg.

L'applicazione di tale metodo ha però dei limiti, quale quello di non potere riconoscere a causa dell'assenza di picchi sul

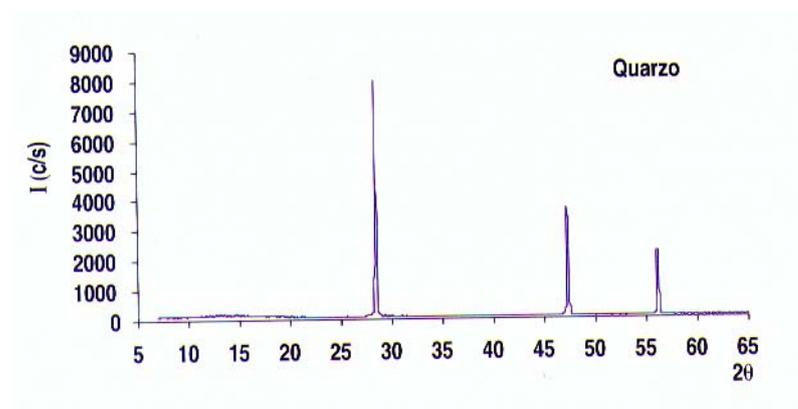


Fig: Diffrattogramma del quarzo

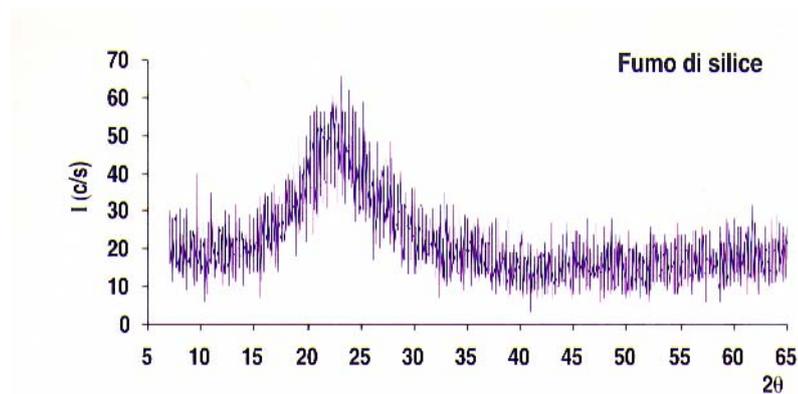


Fig: Diffrattogramma  
amorfa

Ciò significa che la diffrazione dei raggi X non consente di distinguere tra un materiale costituito da solo quarzo, ed un altro contenente quarzo e silice amorfa: in entrambi i casi verranno evidenziati solo i picchi del quarzo.

Non ostante questo disagio la diffrazione dei raggi X resta uno dei metodi più efficaci per una valutazione qualitativa dei prodotti solidi cristallini presenti in un materiale, infatti ad esempio consente facilmente di distinguere i sali cristallini presenti in una miscela, dalla cui analisi chimica non si sarebbe potuto arrivare alla identificazione dei singoli prodotti.

#### 4.2.4 osservazione al microscopio elettronica a scansione (SEM)

È una tecnica di indagine, quanto mai attuale, necessaria ed insostituibile nella Caratterizzazione microstrutturale del materiale. Essa consente di individuare la morfologia delle fasi presenti e, quando è corredata di microsonda, di effettuare la microanalisi delle stesse, cioè di individuarne la natura e talora la composizione.

Il Microscopio Elettronico a Scansione (SEM) è uno strumento elettro-ottico che permette, in seguito all'emissione di un fascio di elettroni, di analizzare i vari segnali prodotti dall'interazione degli elettroni del fascio con il campione in esame.

L'elaborazione di questi segnali consente di ottenere un'ampia gamma di informazioni non solo morfologiche, ma anche compositive e strutturali relative alle varie parti di cui è costituito il campione.

Il SEM, infatti, pur essendo nato con una vocazione di microscopio ad elevata risoluzione e tridimensionalità, negli ultimi anni si è rivelato assai efficace anche nell'analisi della composizione chimica e dell'orientazione cristallografica di un campione, permettendo analisi puntuali e areali, sia qualitative che quantitative.

L'estrema versatilità di questo strumento è inoltre garantita dalla varietà tipologica dei campioni che possono essere analizzati, sia per quanto riguarda la loro natura (solo materiali contenenti fluidi non sono analizzabili) che la loro forma e dimensioni (di qualunque forma, fino a circa un decimetro cubo), nonché per la facile preparazione dei campioni stessi, che, qualora non siano naturalmente conduttivi (metalli), devono solo essere ricoperti da un sottilissimo strato di un elemento conduttore (grafite o oro).

Per quanto riguarda i principi teorici e pratici di funzionamento del SEM e delle parti di cui è composto esiste un'esauriente letteratura (si veda alla fine del testo) a cui si rimanda per eventuali approfondimenti. In questo testo, ampiamente tratto dalla letteratura sopra citata, vengono illustrati in maniera schematica e generale l'apparato sperimentale e i principi basilari del suo funzionamento, facendo particolare riferimento alla strumentazione in dotazione presso questo Laboratorio.

#### Apparato sperimentale

Il SEM è schematicamente costituito dai seguenti elementi (Fig. ):

- 1) una colonna elettronica, dove viene creato il fascio di elettroni;

- 2) una camera da vuoto, ove il fascio elettronico interagisce con il campione;
- 3) vari tipi di rivelatori, che acquisiscono i segnali dell'interazione fascio-campione e li trasferiscono agli elaboratori;
- 4) un schermo, in cui si ricostruisce l'immagine dal segnale.

La sorgente elettronica in cima alla colonna genera il fascio elettronico, mediante un filamento (comunemente di tungsteno) che, portato ad elevata temperatura, produce elettroni per effetto termoionico. Gli elettroni vengono quindi fatti accelerare ad energia variabile tra alcune centinaia ed alcune decine di migliaia di eV (in genere da 200 eV a 30 keV) grazie ad un anodo posto sotto il filamento. Il fascio che emerge dalla sorgente è divergente, ma viene fatto riconvergere ed è focalizzato da una serie di lenti elettromagnetiche e di fenditure all'interno della colonna. All'estremità inferiore della colonna, una serie di bobine di scansione deflette il fascio fornendogli un movimento alternato lungo linee parallele ed equidistanti, in modo che, una volta raggiunta la superficie del campione, vada a ricoprirne un'area predefinita. Il fascio, infine, focalizzato dalla lente finale, esce dalla colonna e va a colpire il campione all'interno della camera da vuoto. Come gli elettroni del fascio penetrano all'interno del campione, essi perdono energia, che viene riemessa dal campione sotto varie forme. Ogni tipo di emissione è potenzialmente un segnale dal quale creare un'immagine.

Interazione fascio-campione e produzione dei segnali

Dall'istante in cui il fascio elettronico colpisce la superficie del campione gli elettroni del fascio iniziano ad interagire con i nuclei e le nuvole elettroniche degli atomi di cui è costituito il campione, attraverso due meccanismi principali: diffusione elastica e diffusione anelastica.

Il risultato di questi processi è la produzione di una notevole varietà di segnali:

elettroni secondari, elettroni retrodiffusi, elettroni assorbiti, elettroni trasmessi, elettroni Auger, coppie elettrone-lacuna, radiazione elettromagnetica (nello spettro UV-IR) e radiazione X.

La regione del campione da cui si originano i segnali di interazione con il fascio e da cui questi escono per venire rivelati è chiamata volume di interazione (Fig. 2). La forma e le dimensioni di tale volume dipendono dalle caratteristiche del fascio incidente e dalla composizione del campione e, in molti casi, risultano più estese del diametro del fascio determinando così il limite di risoluzione, che nel caso del microscopio utilizzato è di 50Å.

Il SEM in esercizio presso questo Laboratorio è dotato di tre diversi rivelatori per l'acquisizione di tre dei segnali prima elencati, ed esattamente:

- elettroni secondari (Secondary Electrons, SE)
- elettroni retrodiffusi (Backscatter Electrons, BSE)
- radiazione X.

dall'interazione fascio-campione.

Formazione dell'immagine

A differenza del microscopio ottico, che fornisce un'immagine reale del preparato in esame, il SEM, grazie alla scansione del fascio elettronico, restituisce un'immagine virtuale a partire dai segnali emessi dal campione. La scansione infatti consente al fascio di colpire la superficie del campione linea per linea, fino a coprire l'area da esaminare, e i segnali così generati variano di intensità, punto per punto, in funzione delle anisotropie morfologiche, chimiche e strutturali del campione. Tali segnali vengono raccolti dagli appositi rivelatori e da analogici sono poi convertiti in segnali digitali per poter essere elaborati in maniera opportuna.

Per visualizzare i segnali in un'immagine attraverso uno schermo a tubo catodico (CRT), la deflessione del fascio avviene in sincronia con il pennello del CRT, che è modulato con l'intensità del segnale. In questo modo il sistema riporta il segnale punto per punto sul monitor, facendo corrispondere ad ogni punto un pixel, creando così l'immagine.

**Controllo delle funzioni dello strumento**

Per "controllo delle funzioni dello strumento" si intende tutta quella serie di operazioni che l'operatore deve compiere per ottenere "la migliore analisi possibile", che sarà, a seconda del rivelatore utilizzato, un'immagine tridimensionale, un'analisi chimica, ecc., che è lo scopo finale del lavoro.

Ad eccezione di poche operazioni che possono essere compiute anche meccanicamente dall'operatore (ad es.: movimento del campione) il controllo dello strumento è completamente automatizzato ed avviene attraverso alcuni software specifici installati su diversi computer.

Le più intuitive tra queste operazioni riguardano direttamente il campione: il suo posizionamento, quindi il suo movimento laterale e verticale, la sua messa a fuoco e la scelta dell'ingrandimento da utilizzare. Altre funzioni fondamentali riguardano invece il fascio elettronico, che può essere adeguatamente configurato a seconda del tipo di analisi da effettuare. I parametri che possono essere modificati sono sostanzialmente due: l'accelerazione (agendo sulla differenza di potenziale, variabile da alcune centinaia di Volt a 30kV) e il diametro finale o spot-size (che può variare da circa un micron ad alcuni micron, intervenendo sulle lenti elettromagnetiche).

**Uso dello strumento: alcuni esempi**

È necessario mettere bene in evidenza una considerazione di carattere generale prima di entrare nello specifico riguardante l'uso del SEM: non esiste un'analisi uguale ad un'altra, o, in altre parole, ciascuna analisi è il risultato di una serie di

operazioni, condizionate da numerose variabili, che permettono di ottenerla. Alcune di queste variabili sono già state accennate (accelerazione e spot-size), ma molte altre vanno tenute in considerazione, tra cui la natura del materiale, la sua preparazione, la distanza tra l'uscita del fascio e il campione (Working Distance), la posizione del rivelatore e la sua configurazione, ecc.

Oltre a questo, va aggiunto che le condizioni ottimali individuate per ottenere la migliore analisi tramite un tipo di rivelatore non è detto che siano ancora quelle ottimali utilizzando un altro rivelatore.

Nella pratica, per gli usi più comuni del SEM, sono state individuate delle condizioni "di compromesso" grazie alle quali poter effettuare delle buone analisi, con ognuno dei tre rivelatori, senza dover intervenire "sensibilmente" sui parametri variabili.

Come si spiegava precedentemente, questo SEM è equipaggiato con tre diversi rivelatori che permettono quindi l'acquisizione di tre tipi diversi di segnali:

1. elettroni secondari (Secondary Electrons, SE)
2. elettroni retrodiffusi (Backscatter Electrons, BSE)
3. radiazione X.

1. Gli elettroni secondari sono elettroni a bassa energia (fino a poche decine di eV) provenienti dalla porzione più superficiale del campione (pochi nm). La proprietà principale di questo tipo di segnale è quella di essere fortemente controllato dalla morfologia del campione, pertanto l'immagine risultante sarà l'immagine in bianco e nero dell'area interessata dalla scansione del fascio in cui il contrasto delle tonalità di grigio metterà in risalto l'aspetto tridimensionale dell'oggetto in esame. L'utilizzo di questo tipo di segnale, è intuitivo, sarà rivolto allo studio delle caratteristiche morfologiche di oggetti tridimensionali o dei loro rapporti strutturali. Alcuni esempi di campioni studiati in

questo Laboratorio sono: cristalli singoli di zircono, microstrutture su superfici di cristalli di quarzo, fibre di amianto, pollini, coralli, microfossili

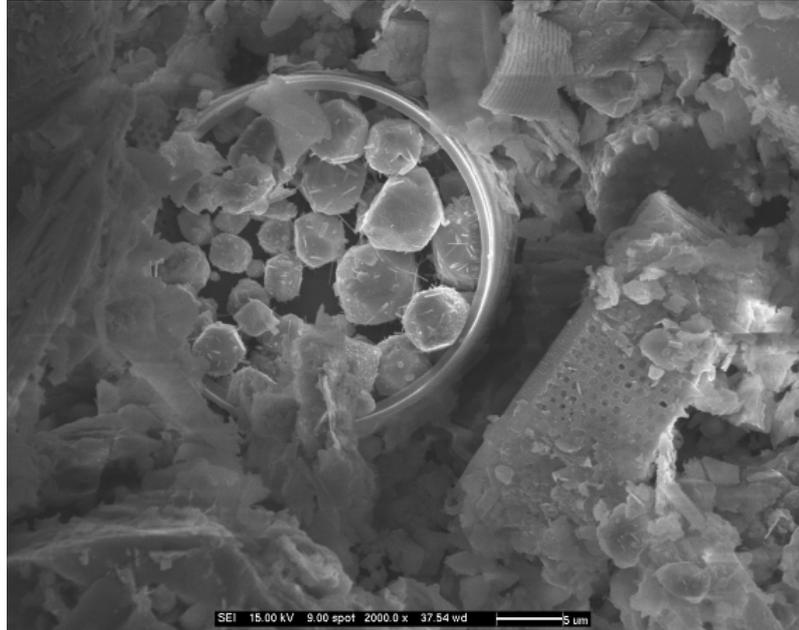
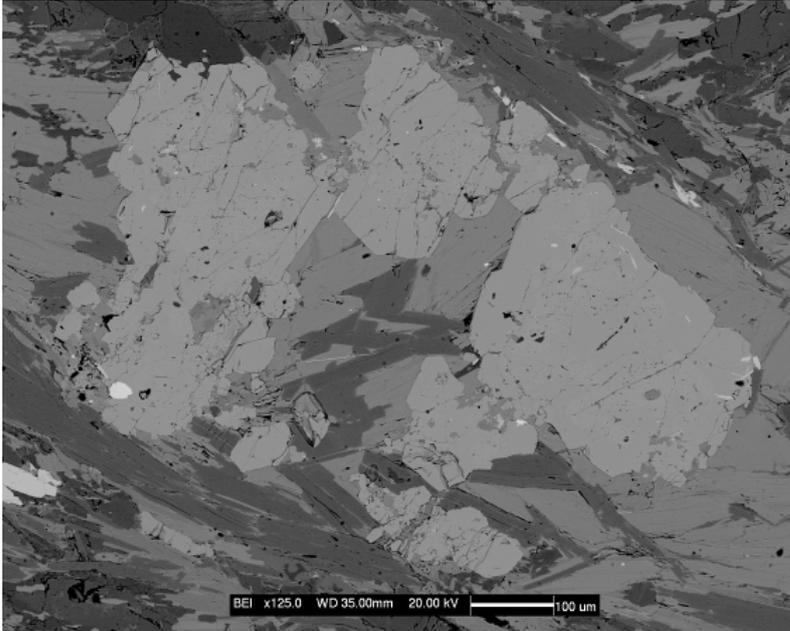


Fig Immagine da elettroni secondari di sedimenti contenenti diatomee (due esemplari di forma cilindrica, cui interno si osservano le pirite).

Gli elettroni retrodiffusi sono elettroni ad alta energia (da 50 eV all'energia degli elettroni del fascio) prodotti fino ad una certa profondità del campione (pochi micron). La loro energia dipende direttamente dall'energia del fascio incidente e dalla composizione chimica (più precisamente, dal peso atomico medio) del materiale di cui è costituito il campione, quindi l'immagine risultante sarà un'immagine in bianco e nero dell'area interessata dalla scansione del fascio in cui il contrasto delle tonalità di grigio metterà in risalto la diversità di composizione chimica delle diverse parti che compongono il campione. In particolare, risulteranno relativamente più chiare le parti composte da un materiale a peso atomico medio elevato e più scure le parti a peso atomico medio inferiore; il caso estremo è il nero che corrisponde a non emissione (parti vuote del campione). In questo Laboratorio gli elettroni retrodiffusi vengono comunemente usati

nell'analisi di materiali, naturali e artificiali, già preparati in sezione sottile per lo studio al microscopio ottico, e quindi analizzabili al SEM dove si possono studiare, ad ingrandimenti molto più elevati, i rapporti microstrutturali fra le diverse fasi mineralogiche e la distribuzione degli elementi chimici all'interno delle stesse fasi (Fig. ).



ne da elettroni  
un campione di  
ni tonalità di grigio  
n diversa fase

Per completezza di informazione bisogna aggiungere che una piccola parte degli elettroni retrodiffusi è controllata dal reticolo cristallino del minerale colpito dal fascio elettronico. Utilizzando particolari configurazioni e dispositivi di cui questo SEM è provvisto è possibile ottenere informazioni anche sull'orientazione cristallografica delle singole parti di cui il campione è costituito (EBSD).

A differenza dei primi due tipi di segnale (elettroni) la radiazione X55 non fornisce un'immagine legata ad un

---

<sup>55</sup> La radiazione X deriva dalla ionizzazione dell'atomo nelle orbite più interne da parte del fascio incidente. Un elettrone primario può espellere un elettrone dell'orbita K, L o M dell'atomo, perdendo allo stesso tempo, per diffusione anelastica, l'energia EK, EL, EM, corrispondente all'orbita dell'elettrone con cui ha interagito.

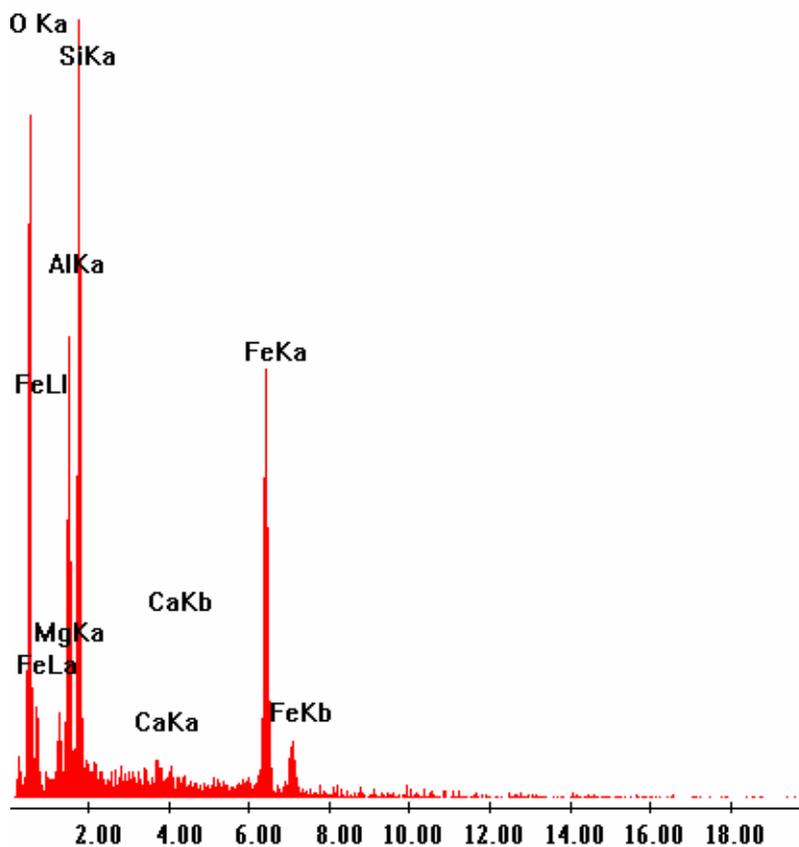
contrasto topografico (SE) o compositivo (BSE) dell'area interessata dalla scansione. Infatti lo scopo della microanalisi RX è quello di ottenere un'analisi chimica puntuale di un oggetto in esame. Per questo motivo viene interrotta la scansione del fascio che può essere quindi posizionato a piacere su un qualsiasi punto dell'area da analizzare. L'immagine risultante sarà uno spettro di Raggi X (Fig. ) da cui si può risalire alla composizione chimica del materiale analizzato, dal momento che ogni picco dello spettro è riconducibile ad una ben precisa specie atomica.

---

L'atomo ionizzato potrà riacquisire la stabilità scendendo a livelli energetici inferiori, sia mediante l'occupazione della lacuna da parte di elettroni più esterni, con concomitante emissione del fotone X corrispondente, sia mediante l'emissione di un altro elettrone che ha assorbito l'energia appena liberata (elettrone Auger).

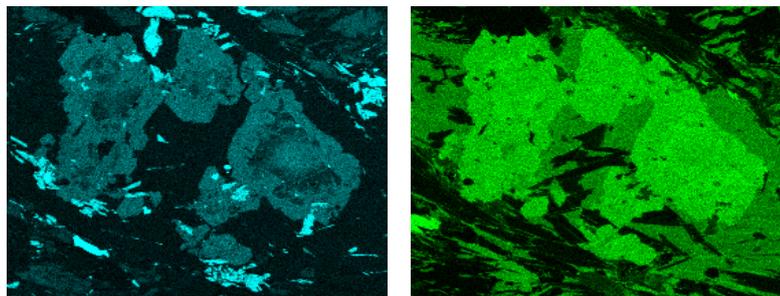
Le radiazioni X così emesse sono caratteristiche dell'atomo che le hanno prodotte e ne consentono il riconoscimento. Poiché il bombardamento elettronico genera non solo lo spettro caratteristico, ma anche uno spettro continuo (radiazione di fondo), dovuto all'interazione fra gli elettroni primari e i nuclei degli atomi, è necessario far uso di opportuni sistemi di rivelazione (spettrometro EDS, nel nostro caso) che permettano di analizzare e separare le diverse energie delle radiazioni, per poterne poi fare una misura, da cui infine sarà possibile ricavare la composizione del campione.

o di Raggi X in cui i  
identificano le diverse  
che di cui è costituito  
izzato del campione.



Esiste inoltre la possibilità di acquisire la radiazione X anche permettendo al fascio elettronico un movimento di scansione su un'area. In questo caso la radiazione, raccolta dallo spettrometro punto per punto e opportunamente restituita al CRT, fornisce una mappa della distribuzione per ogni elemento chimico considerato sotto forma di immagine (a toni di colore) dell'area esaminata (Fig. ). Nella mappa così visualizzata l'intensità della radiazione X, e quindi la concentrazione dell'elemento, è proporzionale alla luminosità del punto riprodotto sullo schermo, e quindi la variazione della concentrazione dell'elemento chimico corrisponde alla variazione delle intensità di colore, risultando più chiare le aree più ricche nell'elemento considerato.

Fig. Mappe della distribuzione degli elementi calcio (a sinistra) e ferro (a destra) nello stesso campione di Fig. 4



## 9. I materiali per il ripristino

La scelta dei materiali più idonei da impiegare per il restauro di opere in calcestruzzo degradate dipende fortemente dalle considerazioni emerse nella diagnosi del degrado di una determinata struttura, e quindi, dalle cause che l'hanno provocato (attacco solfatico, gelo-disgelo, fessure di origine termica, ecc.). I materiali da impiegare, quindi, debbono essere in grado di resistere a quelle sollecitazioni di carattere chimico, fisico o meccanico alle quali il calcestruzzo originale non è stato in grado di resistere.

Una prima distinzione netta tra i materiali da impiegare nel restauro può essere fatta tra:

- materiali a base cementizia;
- materiali a base polimerica (resine epossidiche, poliuretaniche, ecc.).

### 5.1 I materiali cementizi

Per quanto concerne i prodotti a base cementizia, un primo criterio da adottare per la scelta dei materiali da restauro va ricercato tra le raccomandazioni fornite dalle normative nazionali ed europee. Così, per esempio, se il degrado diagnosticato si basa sull'attacco dei cloruri è evidente che il materiale da impiegare nel restauro deve essere capace di resistere a questo specifico tipo di attacco. Accanto a questo criterio di carattere generale, il materiale

impiegato nel restauro deve aggiuntivamente presentare un'ottima aderenza al conglomerato originale: i materiali per il restauro a base cementizia, infatti, presentano l'inconveniente del ritiro igrometrico a causa del quale essi subiscono una contrazione differenziale rispetto al conglomerato originale, nel quale il ritiro si è ormai quasi completamente esplicato. Da ciò deriva l'esigenza, per i prodotti a base cementizia da impiegare nel restauro, di compensare il ritiro attraverso l'impiego di agenti espansivi. Sulla base di queste considerazioni le malte e i calcestruzzi da impiegare nel restauro sono caratterizzati in generale dai seguenti parametri di composizione:

- impiego di superfluidificanti per abbassare il rapporto a/c ed ottenere quindi un calcestruzzo impermeabile;
- impiego di fumo di silice per migliorare ulteriormente la resistenza agli attacchi chimici (cloruri, solfati, alcali);
- impiego di agenti espansivi per compensare il ritiro ed evitare il distacco.

In aggiunta a queste materie prime, quasi sempre presenti in tutti i prodotti cementizi per il restauro, possono essere adottati altri particolari accorgimenti composizionali per soddisfare le specifiche esigenze prestazionali:

- impiego di cementi Portland a basso tenore di C3A per resistere ai solfati;
- impiego di cementi d'altoforno per resistere all'attacco dei cloruri;
- impiego di fibre polimeriche per contrastare gli effetti fessurativi del ritiro plastico;
- impiego di fibre metalliche per migliorare la duttilità e la resistenza agli urti;
- impiego di agenti aeranti per contrastare gli effetti dei cicli di gelo-disgelo.

In genere i materiali da restauro a base cementizia sono prodotti industrialmente sulla base di controlli composizionali e prestazionali.

Esiste una vasta gamma di questi prodotti in funzione anche delle particolari tecniche applicative:

- per colaggio di betoncini entro casseri se si tratta di riparare spessori relativamente elevati (> 5 cm);
- a spruzzo (o a cazzuola) se si tratta di riparare, con malte, superfici di grande estensione e di piccola spessore (> 5 cm);
- per iniezioni di boiacche cementizie se si tratta di consolidare strutture in calcestruzzo difetto se per vespai interni o microfessure (> 1 mm).

Le principali caratteristiche (non necessariamente tutte) da valutare nella scelta delle malte e dei calcestruzzi da impiegare nel restauro sono:

- la consistenza delle malte o calcestruzzi freschi variabile entro valori che dipendono dall'applicazione: da uno spandimento alla tavola a scosse (secondo UNI EN 12350-5:2001) di 80-90% per le malte da applicare a spruzzo fino ad uno spandimento di 150-200% per malte autolivellanti; per i calcestruzzi, generalmente impiegati per colaggio entro casseri, si richiede uno slump di 22-26 cm;
- l'assenza di bleeding (da valutare secondo UNI 8998) indipendentemente dalla consistenza;
- la resistenza meccanica a compressione generalmente compresa tra 60 e 100 MPa;
- la resistenza meccanica a flessione generalmente compresa tra 8 e 10 MPa;
- il modulo elastico variabile da 25000- 30000 MPa per le malte e 35000-40000 MPa per i calcestruzzi,
- l'impermeabilità valutata attraverso la penetrazione all'acqua sotto pressione (da 1 a 7 bar) (secondo la norma UNI EN 12390-8:2009) che deve essere minore di 20 mm [1, 2];

- la resistenza agli attacchi chimici provocati dal solfato, dal cloruro, dagli alcali e dall'anidride carbonica aggressiva;
- la compensazione del ritiro attraverso un'espansione contrastata (secondo le norme UNI 8147 e 8148:2008) superiore a 300 m/m per le malte e 200 m/m per i calcestruzzi;
- l'assenza di fessure da ritiro plastico (grazie alla presenza di fibre polimeriche) per le malte da applicare a spruzzo;
- la duttilità, da valutare attraverso la curva carico-deflessione (secondo ASTM C-1018), su provini di malta o calcestruzzo rinforzati con fibre metalliche;
- la resistenza agli urti da valutare con la prova di caduta da 460 mm di una sfera di acciaio (massa di 4,5 Kg) (secondo ACI Committee 544);
- la resistenza all'abrasione da valutare mediante riduzione dello spessore di una lastra sottoposta ad usura standardizzata (abrasimetro di Amsler o di Taber);
- la resistenza alla formazione del ghiaccio (grazie alla presenza di agenti aeranti) nei materiali destinati al restauro di opere esposte ai cicli di gelo-disgelo (UNI 7087:2002).

Nel caso di boiacche cementizie, da impiegare per l'iniezione ed il consolidamento di strutture macroporose o fessurate, le principali caratteristiche prestazionali, in alternativa alle prime due sopra riportate ed in aggiunta a tutte le altre, sono:

- la fluidità da valutare mediante lo svuotamento del cono di Marsh (meno di 20-30 s), per favorire l'impregnazione consolidante;
- l'assenza di bleeding per evitare vuoti interni laddove si raccoglie l'acqua essudata.

In sostanza, stabilito attraverso la diagnosi il tipo di degrado delle strutture in calcestruzzo danneggiate, l'utente dovrebbe orientarsi, nella scelta del materiale più idoneo, verso quei prodotti per i quali esiste una consolidata documentazione di prove sperimentali eseguite secondo metodi "formati"

oppure, ancorché non formati, descritti in dettaglio. Dopo questo screening iniziale, per eliminare i prodotti inidonei o non accompagnati da documentazione di dati, i rimanenti prodotti candidati all'impiego verranno esaminati per valutare sperimentalmente sia le caratteristiche di carattere generale (Lavorabilità, resistenza meccanica, compensazione del ritiro, impermeabilità), sia quelle in relazione all'impiego specifico (resistenza agli urti e curva di carico -deflessione).

### 9.1. I materiali polimerici

I materiali polimerici sono costituiti da molecole di prodotti organici collegati tra loro fino a formare una catena lineare più o meno ramificata o anche una struttura reticolata tridimensionale. Il processo di collegamento tra le singole molecole (A) fino a formare il polimero (**An**) prende il nome di polimerizzazione, mentre il prodotto di partenza costituito dalle singole molecole è denominato monomero. Il numero (n) di molecole contenute in un polimero prende il nome di grado di polimerizzazione. Maggiore è n, maggiore è la consistenza del polimero. In genere, il monomero è un gas o un liquido, mentre il polimero è un liquido molto viscoso o più frequentemente un solido. In sostanza, il processo di polimerizzazione comporta sempre una transazione dallo stato gassoso a quello liquido, o da quest'ultimo a quello solido.

Esistono vari tipi di polimeri e molti di essi sono destinati al settore delle costruzioni. Quelli che maggiormente interessano il campo del restauro delle costruzioni sono prodotti solidi ottenuti per polimerizzazione di un monomero liquido. Il monomero liquido può essere applicato sulla superficie di una muratura in calcestruzzo o in mattoni per dar luogo, a polimerizzazione terminata, ad un film solido, più o meno impermeabile ed aderente al supporto. E' questo

il caso di un rivestimento pellicolare applicato sulla superficie del materiale da proteggere. Se il liquido monometrico é caricato con materiale in polvere o granulare si può ottenere una pasta o una malta da applicare come intonaco a spessore centimetrico. Se la carica é costituita da aggregati più grossi di 5 mm si ottiene un vero e proprio calcestruzzo polimerico. Se il liquido é relativamente poco viscoso esso può essere iniettato all'interno di un solido poroso e, a polimerizzazione terminata, il solido risulta più o meno consolidato a seconda del riempimento dei macropori e delle macrocavità con il liquido monometrico. In genere, il riempimento dei micropori con un liquido monometrico risulta più efficace che non con una sospensione acquosa cementizia a causa dell'impedimento delle particelle di cemento ad attraversare ed a impregnare pori di dimensione minore della dimensione delle particelle di cemento (1-100  $\mu\text{m}$ ). Un risultato migliore, ancorché inferiore a quello conseguibile con l'impregnazione di liquidi organici monomerici, può essere ottenuto mediante l'iniezione di micro-cemento (1-100  $\mu\text{m}$ ) in sospensione acquosa. Tuttavia, per il riempimento delle macrocavità di una costruzione difettosa le "boiacche" cementizie si presentano più vantaggiose che non i liquidi monometrici per il minor costo ed il minor calore sviluppato: infatti, il calore che si libera durante il processo di polimerizzazione é così elevato che può arrivare a riscaldare la massa iniettata anche per alcune centinaia di °C; il fenomeno é tanto più accentuato quanto più grande é il rapporto volume/superficie della cavità.

<b>TIPO DI POLIMERO</b>	<b>APPLICAZIONE</b>
<b>Resine Epossidiche</b>	rivestimento superficiale, impregnazione cavità, sigillatura di fessure, giunzione strutture

<b>Resine poliuretaniche</b>	rivestimento superficiale, impregnazione cavità, sigillatura di fessure, giunzione strutture
<b>Resine viniliche</b>	rivestimento superficiale
<b>Resine alchidiche</b>	rivestimento superficiale
<b>poliacrilati</b>	rivestimento superficiale
<b>Silani</b>	impregnazione parziale

Un'altra applicazione, simile alla precedente, riguarda l'iniezione di liquidi monomerici all'interno di fessure della larghezza di qualche frazione di millimetro. In tal caso, il grande potere adesivo dei liquidi monomerici, una volta consolidati, porta fino alla completa saldatura della preesistente lesione.

Infine, è degna di menzione l'applicazione forse più efficace dei polimeri che consiste nel far aderire due superfici anche di materiale diverso (legno, ceramica, metallo, malta, ecc.) in modo da realizzare una giunzione delle due strutture.

Nel campo delle costruzioni in calcestruzzo questa caratteristica dei materiali polimerici viene utilizzata nel restauro delle strutture rinforzate, mediante applicazione di una lamiera di acciaio (beton plaqué), sfruttando la grande capacità di adesione del polimero tanto all'acciaio quanto al calcestruzzo. Uno degli appunti più critici che viene sollevato per questa tecnica riguarda la inaffidabilità della struttura in casi di incendio, sia per la diretta esposizione del metallo alle eventuali fiamme, sia per la scarsa resistenza del polimero alle alte temperature.

Tutte le applicazioni sopra descritte riguardano per lo più polimeri il cui processo di polimerizzazione avviene solo in situ. Si tratta, in genere, di due componenti monomerici A e B, entrambi liquidi finché sono conservati separatamente. Allorquando sono mescolati insieme, con o senza cariche aggiuntive, reagiscono per produrre, attraverso il processo di copolimerizzazione, un solido dopo la loro applicazione sul o dentro il materiale da costruzione. Rientrano in questa categoria le resine epossidiche e quelle poliuretatiche, entrambe basate sull'impiego di due componenti.

Oltre ai processi di polimerizzazione in situ di sistemi bicomponenti (resine epossidiche e poliuretatiche) o monocomponenti (stirolo, metilmetacrilato) esistono, però, anche delle applicazioni nelle quali la trasformazione del monomero in polimero è già stato realizzato prima dell'applicazione sul o dentro il materiale da costruzione. Rientrano in questa categoria i poliacrilati e le resine viniliche. In questo caso il polimero è stato ottenuto in un impianto chimico di polimerizzazione e viene applicato o disciolto in un solvente organico (resine viniliche) o emulsionato in acqua (lattici poliacrilici). Il prodotto viene quindi applicato su una superficie per ottenere dopo l'evaporazione del solvente o dell'acqua, un rivestimento filmogeno. In questo caso, ovviamente durante l'applicazione non avviene polimerizzazione, ma soltanto un essiccamento del polimero disciolto o emulsionato per evaporazione del solvente.

Questo tipo di applicazione, basata sull'impiego di un polimero solido già formato e disciolto o emulsionato in un solvente che funge da veicolo liquido, non può ovviamente essere utilizzata in quei restauri nei quali l'evaporazione del solvente risulta impedita o comunque ostacolata. Ciò si

verifica per esempio nel consolidamento per impregnazione, o per sigillatura di lesioni, o per giunzione di due strutture, dove l'evaporazione del solvente non può avvenire o risulta comunque fortemente rallentata; inoltre, quando anche la rimozione del solvente avvenisse, il polimero solido depositato non è in grado di assicurare il riempimento dei vuoti creati dall'evaporazione del solvente, a meno che il parziale riempimento dei vuoti non sia funzionale, in vista di uno specifico obiettivo, come si verifica per esempio nel caso di alcuni polimeri silanici. Per questo motivo, i polimeri già formati e disciolti o emulsionati trovano applicazione, quasi esclusivamente, quali rivestimenti superficiali: in questo caso, dopo l'evaporazione del solvente (organico o acquoso) verso l'aria, si forma un sottile strato protettivo del polimero solido sulla superficie della struttura trattata. Un'altra applicazione dei polimeri trattati già formati, dispersi in forma di emulsioni acquose (lattici), è quella di aggiungere questi prodotti ad un impasto fresco di malta o calcestruzzo per migliorarne l'adesione al supporto da riparare: la sottrazione del liquido acquoso, che funge da veicolante del lattice, è assicurata dalla reazione di idratazione del cemento ed il polimero che rimane inglobato nel conglomerato cementizio può così esplicare la sua funzione di migliorare l'adesione tra il supporto ed il nuovo strato di malta o calcestruzzo.

## 9.2. I materiali compositi

**FRP** è acronimo di **Fiber Reinforced Polymers** utilizzato per indicare una vasta categoria di materiali compositi che costituiscono la frontiera dell'attuale tecnologia delle

costruizioni. Essi sono costituiti da matrici polimeriche in cui sono immersi rinforzi di fibre tessute o unidirezionali.

L'impiego degli FRP copre principalmente tre categorie di funzioni:

struttura interamente in composito (travi, pannelli , gusci) armatura di materiali tradizionali quali calcestruzzo, muratura e legno, rinforzo di elementi strutturali esistenti di varia tipologia e materiale.

Nella prima categoria sono dominanti i profili pultrusi, leggeri, resistenti e sufficientemente rigidi; per essi si prospettano funzioni tipiche della struttura portante intelaiata. L'impegno maggiore attualmente punta a risolvere i problemi delle connessioni. Per gli altri elementi a lastra o guscio si possono riconoscere nelle nascenti costruzioni civili di composito le evoluzioni delle classiche applicazioni nei settori aeronautico, navale e automobilistico. I primi ponti e le prime unita' abitative interamente in composito cominciano a fare le loro apparizioni.

Nella seconda categoria sono dominanti barre e reti ottenuti con varia tecnologia. Questi sono utilizzati per armare travi e pareti di calcestruzzo o muratura ovvero per collaborare strutturalmente con il legno.

La presollecitazione si presenta particolarmente interessante per l'alto rapporto "resistenza /modulo E" dei cavi o barre di composito. I problemi di ancoraggio sono i maggiori campi di impegno della ricerca. Ponti presolleccitati e strallati sono ormai gia' in uso in varie parti del mondo.

La terza categoria e' quella che piu' delle altre si diffonde velocemente. Il rinforzo delle infrastrutture deteriorate o danneggiate vanta la maggiore numerosita' di applicazioni. La rapidita' degli interventi e la grande efficienza ha convinto molti progettisti ad imboccare questa strada. Il costo non e' elevato se si considera in confronto con tecnologie tradizionali in relazione ai tempi di esecuzione e difficolta' di

cantiere. Nelle zone sismiche il miglioramento del comportamento strutturale delle strutture esistenti si consegue spesso con sorprendente efficacia.

Si deve considerare l'alto rapporto "resistenza/peso" che per le strutture sottoposte alle azioni sismiche risulta determinante. In quest'ambito la tecnologia del *wrapping* (fasciatura) con compositi formati in sito costituisce una vera rivoluzione della ingegneria strutturale. Infatti, il confinamento delle colonne e il rinforzo flessionale e a taglio delle travi si consegue con facilità ed efficienza "cinturando" o "placcando" gli elementi strutturali con tessuti impregnati di resina. Le resine costituiscono la matrice del composito mentre le fibre del tessuto sono di varia natura: carbonio, aramide, vetro, polivinilalcol, o altre fibre minerali. Dosando strati e morfologie del composito si ottengono incrementi notevoli in resistenza e duttilità'.

Questo settore vanta rapido sviluppo applicativo mentre le metodologie di calcolo non sono del tutto sistemate e raccolte in norme o raccomandazioni. In particolare, il rinforzo a taglio delle travi di calcestruzzo armato è oggetto di ricerca per quanto riguarda schematizzazioni di calcolo e morfologie di applicazione.

Nella quasi totalità di questi interventi il rinforzo è esterno, quindi la trasmissione delle azioni dal composito alla struttura originaria avviene sulla pellicola esterna dell'elemento rinforzato. Nelle travi di calcestruzzo armato si indica con "copriferro" lo spessore esterno di calcestruzzo che deve essere in condizioni di trasmettere le predette azioni. La consistenza del supporto va valutata prima di ogni intervento e solo se ritenuta adeguata si può procedere alla applicazione. Tornano buone le metodologie di prova non distruttiva per acquistare gli elementi di giudizio.

Per le murature storiche il discorso si fa particolarmente interessante. Volte e cupole possono ottenere un aiuto di

incalcolabile efficacia se placcate di composito quando sono sottoposte ad azione sismica. Meccanismi di collasso possono essere impediti con il risultato di abbattere la vulnerabilità intrinseca di questi elementi strutturali. Nel settore delle decorazioni in pietra artificiale non si sono trovate applicazioni di restauro con materiali compositi, ma essendo questo un settore ancora poco indagato si ritiene possibile che questi materiali possano essere presto utilizzati.

## 6. Le tecniche di intervento

### 6.2 SCC

I calcestruzzi autocompattanti<sup>56</sup> si differenziano dai tradizionali conglomerati cementizi per un maggior volume del materiale fine ed un minor contenuto di aggregati grossi. Poiché dal punto di vista reologico il calcestruzzo può essere considerato un sistema costituito da due fasi di cui una, la pasta, costituisce il fluido trasportatore e l'altra invece, costituita dagli aggregati lapidei, rappresenta la fase "trasportata", per confezionare un calcestruzzo autocompattante altamente fluido si rende necessario aumentare il volume di materiale finissimo che costituisce il fluido trasportatore a scapito del minor volume di aggregato, in particolare di quello grosso che deve essere trasportato. Il volume di materiale finissimo però, non può essere raggiunto limitandosi ad incrementare il dosaggio di cemento: questo potrebbe causare fessurazioni dei getti, conseguenti ai maggiori gradienti termici oltre che a una minore stabilità dimensionale.

Occorre quindi utilizzare cemento combinato con materiale finissimo caratterizzato da lenta o nulla velocità di sviluppo del calore, come la *cenere volante*, il calcare macinato, la

---

<sup>56</sup> Self Compacting Concrete

loppa d'altoforno, il metacaolino, eccetera. Limitando il volume di aggregato grosso, non solo diminuisce la fase del sistema che deve essere trasportata, ma si riduce notevolmente il numero di collisioni tra i granuli dell'elemento lapideo che provocano il blocco del calcestruzzo nelle zone particolarmente congestionate dalle armature. Nei calcestruzzi autocompattanti il volume di sabbia risulta pressoché invariato rispetto a quello utilizzato per confezionare i calcestruzzi tradizionali. Per limitare il volume di acqua senza intaccare l'elevata fluidità richiesta per il self-compacting concrete, è necessario inoltre utilizzare efficaci additivi iper-riduttori di acqua.

I volumi di materiale finissimo e di aggregato grosso vengono stabiliti in base al grado di autocompattabilità che si vuole conseguire, e al livello di prestazione meccanica richiesta.

In base a questi parametri, i calcestruzzi autocompattanti vengono suddivisi in tre categorie:

§ Normal self-compacting concrete (NSCC), che include i calcestruzzi autocompattanti da utilizzare per getti in opera in cui è richiesta una resistenza caratteristica compresa tra 25 e 40 Newton al millimetro quadrato;

§ Precast self-compacting concrete (PSCC), che include calcestruzzi autocompattanti prevalentemente destinati al settore della prefabbricazione laddove è richiesta una resistenza variabile tra 45 e 60 Newton al millimetro quadrato;

§ High-strength self-compacting concrete (HSSCC), che include calcestruzzi caratterizzati da una resistenza maggiore uguale a 65 Newton al millimetro quadrato, utilizzati per strutture sia in opera che prefabbricate in cui, per particolari esigenze statiche, sono richieste per il calcestruzzo prestazioni meccaniche elevate.

Quando si confeziona un calcestruzzo autocompattante, per raggiungere i requisiti di deformabilità, mobilità in spazi ristretti ed elevata resistenza alla segregazione, è opportuno rispettare i requisiti composizionali riguardanti il volume di finissimo, la pezzatura massima ed il volume degli aggregati grossi, il rapporto acqua/finissimo, ed il volume di pasta.

Nei Normal self-compacting concrete, caratterizzati da minori volumi di legante rispetto a quelli richiesti per i PSCC e gli HSSCC, l'elevata stabilità e assenza di risalita d'acqua viene conseguita introducendo negli impasti un additivo modificatore di viscosità (Viscosity Modifying Agent). Si tratta di una particolare tipologia di additivi, che lasciano immutata l'elevata deformabilità conseguita grazie all'aggiunta degli additivi iper-riduttori di acqua, e garantiscono al tempo stesso un incremento del limite di scorrimento (della coesione) e dell'omogeneità del calcestruzzo che presenta così una segregazione praticamente nulla.

Aggiungendo questi modificatori di viscosità, si ottengono impasti dotati di elevate capacità reologiche che, nel contempo, allo stato di quiete, sono caratterizzati da assenza di segregazione dei componenti.

Questi additivi, durante la messa in opera, avvolgono gli aggregati grossi con uno spessore sufficiente di malta capace di ridurre notevolmente il numero di collisioni dei granuli di dimensioni maggiori ed eliminando di conseguenza l'effetto bloccaggio in corrispondenza dei restringimenti del cassero e attraverso le armature. Un buon agente viscosizzante è costituito da una miscela di polimeri idrosolubili che si assorbe sulla superficie dei granuli di cemento modificando la viscosità dell'acqua e influenzando le proprietà reologiche della miscela. Il suo meccanismo di funzionamento si basa su una duplice azione: diminuzione della viscosità e mantenimento della coesione interna del calcestruzzo durante

la fase di getto grazie alle catene polimeriche dell'additivo che si orientano secondo la direzione di scorrimento della miscela; resistenza alla segregazione conseguente all'aggregazione delle catene polimeriche, a calcestruzzo fermo. L'agente viscosizzante in questo modo permette di: perfezionare la reologia delle miscele aumentando la coesività ed eliminandone il bleeding; produrre calcestruzzi caratterizzati da una grande stabilità e una forte capacità di ritenzione d'acqua; ottenere una malta più omogenea in grado di mantenere in sospensione e trascinare le particelle solide del calcestruzzo garantendo un'ottima capacità di riempimento delle casseformi; rendere la miscela meno sensibile alle variazioni granulometriche della sabbia, alla forma e al grado di umidità degli aggregati e alle caratteristiche dei leganti; ottenere una maggiore flessibilità nella scelta e nella tipologia dei getti attraverso un basso rischio di segregazione, maggiori velocità e distanze di pompaggio; fornire un ampio range di tolleranza nel contenuto d'acqua d'impasto grazie all'effetto viscosizzante, senza problemi di segregazione.

### **La procedura per il disegno della miscela**

Un esempio di una procedura per rendere efficiente la progettazione delle miscele di SCC è indicata sotto. È basata su un metodo messo a punto da Okamura<sup>57</sup>.

La sequenza è determinata come:

- A) La definizione del contenuto d'aria desiderato (essenzialmente 2%)
- B) La determinazione del volume dell'aggregato grosso
- C) La determinazione del contenuto di sabbia
- D) La determinazione della composizione della pasta

---

<sup>57</sup> H. Okamura, M. Ouchi, "Self Compacting Concrete. Development present use and future". Atti del convegno Self Compacting Concrete Proceeding of the first international RILEM Symposium. Settembre 1999.

- E) La determinazione del rapporto ottimale acqua/polvere ed il dosaggio del superfluidificante nella malta
- F) Infine le proprietà del calcestruzzo sono valutate dalle prove standard.

A La definizione del contenuto d'aria desiderato (essenzialmente 2%)

Il contenuto d'aria può essere regolato generalmente al 2 per cento o ad un più alto valore specificato, quando deve essere progettato un calcestruzzo resistente al gelo-disgelo.

B La determinazione del volume dell'aggregato grosso

Il volume dell'aggregato grosso è definito dal peso specifico apparente. In generale l'aggregato grosso ( $D > 4$  millimetri) dovrebbe essere fra 50 e 60 %. Quando il volume dell'aggregato grosso del calcestruzzo eccede un determinato limite, l'eventualità dello scontro o del contatto fra le particelle dell'aggregato grosso aumenta velocemente ed aumenta il rischio di bloccaggio quando il calcestruzzo attraversa gli spazi fra le barre d'acciaio. Il migliore aggregato grosso dipende dai seguenti parametri:

Massima dimensione dell'aggregato. Minore è la dimensione massima dell'aggregato, più alta la proporzione dell'aggregato grosso.

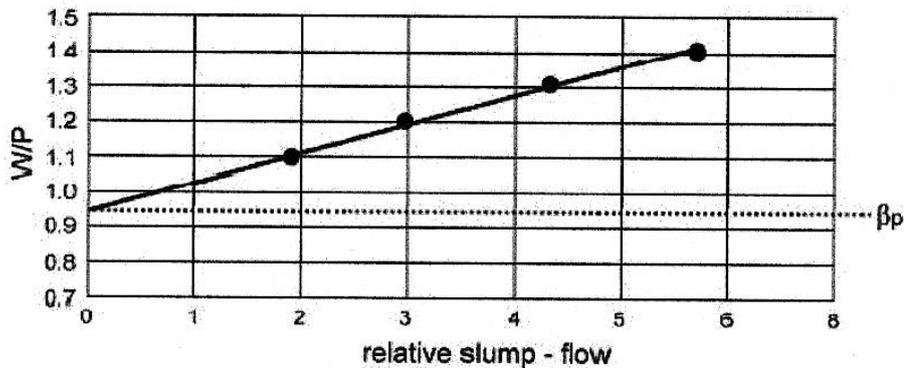
Aggregati schiacciati o arrotondati. Per gli aggregati arrotondati, può essere usato un maggiore contenuto rispetto a quello degli aggregati schiacciati.

#### C La determinazione del contenuto di sabbia

La sabbia, nel contesto di questa procedura della composizione della miscela, comprende tutte le particelle superiori a 0.125 mm e più piccole di 4 mm. Il contenuto della sabbia è definito dal peso specifico apparente. Il contenuto ottimale di volume della sabbia nella malta varia fra 40 e 50 % secondo le proprietà della pasta.

#### D Il progetto della composizione della pasta

Inizialmente il rapporto acqua/polvere per flusso nullo ( $\beta_p$ ) è determinato nella pasta, con la proporzione scelta di cemento e delle addizioni. Le prove al cono con i rapporti acqua/polvere fissati in volume, per esempio di 1/1, 1/2, 1/3 e 1/4, sono effettuate con una composizione di polvere selezionata, vedi la figura per i risultati tipici. Il punto dell'intersezione con l'asse y determina il valore  $\beta_p$ . Questo valore è usato principalmente per il controllo di qualità dell'acqua di nuove serie di cemento e di filler.



### E Determinazione del rapporto volumetrico ottimale di acqua/polvere e dosaggio del superfluidificante nella pasta.

Le prove con il cono e l'imbutto a V per la pasta sono effettuate variando i rapporti acqua/polvere nella gamma di 0.8-0.9. Il superfluidificante è usato per equilibrare la reologia della pasta. Il contenuto del volume della sabbia nella pasta rimane lo stesso di quello determinato sopra. I valori da raggiungere sono per l'abbassamento al cono di 24 - 26 centimetri e di un tempo dell'imbutto a V di 7 - 11 secondi. Ad abbassamento del cono fissato, dove il tempo dell'imbutto a V è più basso di 7 secondi, diminuisce il rapporto acqua/polvere. Dato un fissato abbassamento al cono e tempo dell'imbutto a V al di sopra di 11 secondi, il rapporto acqua/polvere dovrebbe essere aumentato. Se questi test di verifica non sono soddisfacenti, allora la particolare combinazione dei materiali è inadeguata. Una prova con un superfluidificante differente è l'alternativa preferita. La seconda alternativa è un nuovo additivo e come ultimo ricorso un cemento differente.

### 6.3 HSC, HPC, RPC

I calcestruzzi HPC sono stati sviluppati negli anni '80 mentre gli RPC negli anni '90. Le basi tecniche e tecnologiche risalgono però agli anni '50 con la teoria di Powers<sup>58</sup>.

HSC (High Strength Concrete), e HPC (High Performance Concretes) sono calcestruzzi ad alte prestazioni, che hanno una resistenza meccanica a compressione variabile tra 60 e 75 N/mm<sup>2</sup><sup>59</sup>, o aventi una resistenza cubica 55 e  $\leq 75$  N/mm<sup>2</sup> e un rapporto a/c minore di 0,45<sup>60</sup>. AA.VV. definiscono i materiali HPC come quei calcestruzzi ad alta resistenza meccanica caratterizzati da un valore della resistenza a compressione compreso nell'intervallo di 60 e 100 N/mm<sup>2</sup>. Pertanto, i calcestruzzi HSC ( $R_{ck} 75 \leq 115$  N/mm<sup>2</sup>) risulterebbero una sottoclasse degli HPC. Rispetto agli HSC i calcestruzzi ad alta prestazione devono garantire, oltre che un'elevata resistenza meccanica, anche una maggiore lavorabilità ed un'elevata durabilità. Pertanto una distinzione tra HSC ed HPC sta nel requisito obbligatorio dell'alta durabilità per questi ultimi (che normalmente non è correlata alla resistenza). Tali caratteristiche sono garantite dall'utilizzo di una diversa composizione della miscela: un ridotto rapporto a/c (0,40 - 0,25) per l'impiego di superadditivi, impiego di aggiunte minerali, da sole o in combinazione tra loro, ad alto comportamento pozzolanico e /o elevata area specifica (microsilice, ecc.) aggregati di frantumazione di alta qualità (basalto, granito, quarzite, ecc.) capaci di assicurare un'elevata resistenza meccanica intrinseca della

---

<sup>58</sup> Powers constatò che riducendo il rapporto acqua/cemento, diminuisce la porosità capillare ed aumenta la resistenza meccanica a compressione del conglomerato. Powers dimostrò che se teoricamente si potesse annullare completamente la tipica porosità presente nella microstruttura di una pasta cementizia si potrebbero raggiungere valori di 250 N/mm<sup>2</sup>. Cfr. Scienza e tecnologia del calcestruzzo, Mario Collepardi, terza edizione aggiornata, Ed. Ulrico Hoepli Milano, p176.

<sup>59</sup> Linee guida sul calcestruzzo strutturale a cura del Servizio Tecnico Centrale della Presidenza del Consiglio Superiore dei LL.PP.

<sup>60</sup> Linee Guida sui calcestruzzi strutturali ad alta resistenza, a cura sempre del summenzionato Servizio Tecnico Centrale,

roccia ed un'ottima adesione all'interfaccia tra l'elemento lapideo e la matrice cementizia<sup>61</sup>.

Gli HPC fanno parte dei calcestruzzi DSP (Densified with Small Particles)<sup>62</sup>.

### **Dai calcestruzzi HPC ai calcestruzzi RPC**

Evoluzione dei calcestruzzi HPC, la messa a punto di calcestruzzi speciali ad altissima resistenza meccanica, spesso fibrorinforzati, denominati **RPC (Reactive Powder Concrete)** con prestazioni straordinarie molto superiori a quelle del calcestruzzo HPC.

Anche gli RPC fanno parte dei calcestruzzi DSP (Densified with Small Particles).

Questi calcestruzzi innovativi prevedono resistenze meccaniche a compressione superiori a 200 N/mm<sup>2</sup> (RPC200) e con tecniche produttive più sofisticate (trattamento termico che consiste nel sottoporre il calcestruzzo indurito ad una temperatura fino a 400 °C) si può arrivare fino a 800 N/mm<sup>2</sup> (RPC800).

Oltre alla maggiore resistenza meccanica, con i materiali RPC viene radicalmente modificato il comportamento da fragile a duttile del calcestruzzo.

### Bibliografia

---

<sup>61</sup> Mehta ed Aïtcin proposero un metodo per il proporzionamento degli HPC con l'obiettivo di limitare il volume della pasta cementizia ad un terzo del volume del calcestruzzo (con ovvi vantaggi per la riduzione del ritiro igrometrico), e di impiegare cementi di miscela (per ridurre lo sviluppo del calore di idratazione). Cfr. P.C. Aïtcin, "The Art and Science of High-Performance Concrete", *Advances in Concrete Science and Technology, Proceedings of the Mario Collepari Symposium*, Rome, October 1997, Editor: P.K. Mehta, pg 107-124

<sup>62</sup> Dall'applicazione della microsilice nel settore del calcestruzzo nacquero i primi calcestruzzi **DSP (Densified with Small Particles)**, nome coniato da Bache, che sfruttano sia il comportamento pozzolanico della microsilice che le minuscole dimensioni delle particelle di cui è composta (50 – 100 volte più piccole di quelle del cemento).

Mario Collepardi, Calcestruzzi ad Altissima resistenza: HPC, DSP ed RPC - l'Industria Italiana del Cemento n° 708  
febbraio 1996

L. Coppola - R. Troili - M. Collepardi, Materiali Cementizia Innovativi dagli HPC verso gli RPC- parte I - l'Industria Italiana del Cemento n°695 1995

L. Coppola - R. Troili - - A. Borsoi - T. Cerulli - M. Collepardi, Materiali Cementizia Innovativi dagli HPC verso gli RPC- parte II - l'Industria Italiana del Cemento n°105  
febbraio 1995

## 8.CASI STUDIO

Ritenuta valida la metodologia sopra indicata, si è voluto procedere all'applicazione della stessa a casi reali.

Si sono scelti due edifici storici della città di Palermo, Palazzo dei Principi di Paternò e il grande albergo Castello Utveggiò.

La scelta è ricaduta su questi edifici in quanto, entrambi rappresentano una testimonianza emblematica del periodo storico oggetto di studio, il primo realizzato agli inizi del secolo, il secondo intorno al 1930 ricoprono perfettamente il trentennio di maggiore diffusione della tecnologia oggetto del presente lavoro.

### 8.1 La cultura tecnica di Palermo e l'eclittismo di inizio secolo

A Palermo intorno al 1860 con lo scopo di ridare splendore ai vecchi quartieri, fiorirono i primi progetti di riforma

urbanistica, un'operazione radicale di sventramento e demolizione degli antichi quartieri e la loro ricostruzione secondo i nuovi straordinari esempi di Torino, Firenze e soprattutto Napoli.

Fu proprio intorno al 1860 che il Sindaco Duca della Verdura ed il Consiglio Civico diedero l'incarico ad una commissione costituita da sei architetti, tra i quali figurava anche Giovan Battista Filippo Basile, di "Studiare un piano di fondamentali riforme ed ingrandimento" per migliorare le condizioni igieniche della città e la viabilità, nonché per prevedere ampliamenti della parte dei sobborghi"<sup>63</sup>.

Con il mandato si richiedeva l'apertura di strade che "a guisa di grandi arterie si insinuassero nei quattro quartieri interni", vennero così approvati tre distinti progetti che si basavano su criteri differenti e di conseguenza vi fu una mancata attuazione di qualsiasi soluzione.

Il primo di tali progetti fu denominato "Economico" e prevedeva un cauto sistema di tagli, demolizioni e rettifiche.

Il secondo invece fu detto "Grandioso" ed esso era "a dir poco faraonico e distruttore della struttura storica della città, procedeva all'apertura di quattro strade, larghe venti metri, che incrociandosi perpendicolarmente tra di esse e con il Cassaro e la Via Maqueda avrebbero diviso Palermo in sedici quartieri"<sup>64</sup>.

Infine il terzo venne soprannominato "Medio" e risultava essere un compromesso tra i primi due.

---

<sup>63</sup> La Duca R., *Palermo ieri ed oggi: la città*, Sigma Edizioni, Palermo, 1994, pag. 41.

<sup>64</sup> De Seta C.- Di Mauro L., *Le città nella storia d'Italia: Palermo*, Editori Laterza, Roma, 1998, pag156

Nessuno di questi progetti divenne esecutivo, ma venne solamente approvata nel 1861 la costruzione di un nuovo quartiere negli orti della proprietà Carella, in tale modo “l’agglomerato urbano venne a saldarsi con il Borgo S. Lucia e con altre zone già urbanizzate, sino al molo Nord”<sup>65</sup>.

Data la mancata attuazione dei “Piani” precedentemente citati, ne vennero redatti altri di parziale ampliamento che diedero il via all’espansione della città a macchia d’olio, ma poiché le soluzioni proposte erano del tutto frammentarie e non originate da un unico piano generale, in certi casi vennero addirittura ad aggravarsi le condizioni igieniche di alcuni quartieri.

La necessità di redigere un piano che potesse essere quanto più possibile organico portò nel 1884 all’elaborazione, da parte dell’ingegnere Castiglia, del “progetto di bonifica e del piano regolatore della città di Palermo”; tale progetto applicava la teoria dello sventramento per la bonifica delle zone malsane.

Veniva ripresa l’idea già formulata nel “piano Grandioso” della suddivisione della città in sedici quartieri mediante la costruzione di quattro grandi arterie stradali.

Prima dell’approvazione di tale “piano”, nel 1885, ne fu proposto un secondo, questa volta ad opera dell’ingegnere Felice Giarrusso, che sembrò rispondere meglio alle necessità cittadine e dunque si procedette al suo studio come Piano Particolareggiato.

L’originale “piano Giarrusso” non si libera, come nel caso del “piano Castiglia”, delle indicazioni redatte per il “piano

---

<sup>65</sup> La Duca R., *op. cit.*, pag. 42.

Grandioso”, proponendo anche in questo caso la suddivisione della città in sedici quartieri originati dalla costruzione di quattro grandi arterie stradali.

I tre progetti (Grandioso, Castiglia e Giarrusso) avevano in comune la costruzione di un rettilineo “lungo quanto il Cassaro e parallelo ad esso che dalle mura presso Porta di Castro sarebbe sceso squarciando l’Albergheria, piazza Ballarò, piazza Rivoluzione, fino al Foro Italico tra la porta dei Greci e via Alloro”<sup>66</sup>.

I tre “piani” avevano in comune inoltre la costruzione di una piazza che sarebbe dovuta sorgere al centro dell’Albergheria nella quale si sarebbero incrociate ad angolo retto la strada precedentemente descritta ed un’altra, anch’essa di nuova costruzione parallela alla via Maqueda, che si estendeva da poco sopra porta S. Agata fino a porta Carini, sventrando piazza dei Sette Angeli e la via Beati Paoli.

La costruzione di tale nuova via avrebbe comportato, tra l’altro, lo sventramento del mercato della Vucciria ed il suo risanamento, ma avrebbe conservato intatto l’ambiente settecentesco di Piazza San Domenico.

Il “piano Giarrusso” prevedeva dunque la costruzione di una nuova strada che aveva la funzione di collegare la stazione Centrale con i quartieri moderni ad occidente e con il porto.

Infatti la via Roma ha inizio proprio di fronte alla stazione e termina all’inizio della via Ingham, intersecando piazza San Domenico all’altezza del palazzo del Principe di Paternò.

---

<sup>66</sup> De Seta C.- Di Mauro L., op. cit., pag 159

Nel “piano Giarrusso”, inoltre, era prevista una quinta strada ortogonale al Cassaro e tangente alla Cala che avrebbe congiunto il bastione dello Spasimo e la porta San Giorgio.

Ad una prima stesura del “piano”, già nel 1886, ne seguì una seconda di riduzione alle sole “Opere urgenti di risanamento” che venne abbinata al “piano fognante del Castiglia” e venne approvata dalla Commissione dei Lavori Pubblici.

In pratica venne prevista una diminuzione dei costi delle opere di risanamento e delle quattro arterie previste nel Piano originario rimase per intero solamente la costruzione della via Roma; tali varianti inserite nel primitivo progetto del 1885 diedero origine nel 1889 all’approvazione da parte degli organi competenti al “Piano di Risanamento ed Ampliamento”.

Il taglio della via Roma, iniziato nel 1894, venne realizzato a brani: il primo andava da corso Vittorio Emanuele a piazza San Domenico (1894-1898); il secondo partiva da piazza San Domenico ed arrivava fino a via Cavour (1903-1908) ed infine l’ultimo tronco, realizzato negli anni tra il 1908 ed il 1922, andava da Corso Vittorio Emanuele a piazza Giulio Cesare; l’imbocco di fronte alla stazione venne realizzato nel 1933 su progetto di Giuseppe Capitò.

Il risultato, per via della duplice cortina di palazzi dal signorile impianto, sorti ai margini della lunga via, fu architettonicamente felice, ma l’opera, come già accennato in precedenza alterò il disegno storico della città, cancellando interi rioni, come ad esempio: Stazzone e Spedaletto, e travolse monumenti tra cui il monastero di Santa Rosalia, costruito nel 1709 ad opera di Giacomo Amato.

Anche piazza San Domenico rimase fortemente alterata infatti: “Ivi disparve il palazzo dei Duchi di Monteleone, fu tracciato il palazzo Montalbano, venne ridisegnato l’intero tessuto di case e strade traumaticamente trapassato dalla nuova arteria”<sup>67</sup>.

Inoltre rimasero irrisolti i problemi igienico-sanitari, la cui risoluzione era lo scopo principale dell’intervento, poiché la strada, se certamente rispondeva ai suoi obiettivi strategici di locomozione e collegamento, rimase un esempio isolato all’interno del contesto edilizio delle zone attraversate ed infatti, a valle e a monte di questa, permasero la congestione e la miseria degli antichi mercati e delle strette e tortuose viuzze, dominate da edifici ormai sempre più prossimi al crollo.

A tal proposito sembra opportuno concludere questo excursus sulle vicende urbanistiche di Palermo, nei primi anni del Novecento, attraverso una affermazione di De Seta “il taglio della via Roma costituì per molti aspetti una digressione rispetto alle opere di risanamento di cui necessitava il centro storico. Lungo il suo tracciato si andavano allineando architetture che rappresentano un campionario degli stilemi in voga tra i due secoli, con una imponenza di facciate monumentali cui fa riscontro una profondità limitata dalle esigenze imposte dalla preesistente maglia urbana.

Molti importanti edifici furono distrutti, spazi urbani come la piazza San Domenico stravolti senza che la nuova strada riuscisse ad imporre una forma nuova, come era avvenuto due secoli prima con il taglio della via Maqueda.

---

<sup>67</sup> Di Matteo S., *Palermo storia della città*, Kalos, Palermo, 2002, pag13

L'ingresso monumentale su progetto di Giuseppe Capito', sanciva il ritardo culturale e gli equivoci di una pratica urbanistica che aveva il suo modello nelle analoghe operazioni compiute in città italiane ed europee nel corso dell'ottocento senza tuttavia possederne la lucidità e l'ampiezza di visione"<sup>68</sup>.

#### 8.1.1 le prime sperimentazioni

A Palermo fu eseguito nel 1895, uno specifico studio comparativo su cementi Italiani ed Esteri, da Eugenio Manzella e Giuseppe Oddo<sup>69</sup>, i quali prendendo coscienza del sviluppo rapido e "dell'importanza straordinaria che vanno acquistando tali prodotti per gli usi svariati"<sup>70</sup>, reperendo i campioni dei diversi cementi allora in commercio, dalle fabbriche italiane ed estere, a mezzo di una circolare, nella quale era specificato il "desiderio di avere materiali freschi, in recipienti impermeabili all'umidità", effettuarono prove di resistenza meccanica<sup>71</sup>, sui quattordici campioni che avevano reperito.

I campioni, otto di provenienza italiana, erano così suddivisi: cemento idraulico a lenta presa, cemento a rapida presa, provenienti dalla fabbrica Marchino e C. di Casalmonferrato; cemento Portland 1<sup>a</sup> qualità extra proveniente dalla Fabbrica di calce e cemento di Casalmonferrato; cemento Portland 1<sup>a</sup> qualità marca A, cemento Portland 2<sup>a</sup> qualità, cemento a

---

<sup>68</sup> De Seta C.- Spadaio M.A.- Troisi S.,  
*Palermo Città d'arte*, edizioni Ariete,  
Palermo, 1999, pag 45

<sup>69</sup> .....

<sup>70</sup> Cfr. G. Oddo ed E. Manzella. Ricerca su alcuni cementi Italiani ed Esteri, Tipografia Lo Statuto, Palermo 1895, p.1.

<sup>71</sup> Le esperienze furono eseguite nel "Gabinetto di costruzioni della R. Scuola di Applicazioni" di Palermo, tra il 2 marzo 1894 ed 10 dicembre 1894.

pronta presa, provenienti dalla Società anonima di Casalmoferrato; cemento Portland a lenta presa, cemento romano a rapidissima presa, provenienti da Filippo Gavelli, Modigliana, Toscana.

Quattro cementi arrivarono dalla Germania e due dalla Francia in particolare da Grenoble.

Furono impastati ognuno con acqua, e preparati dei cubi di prova servendosi “di stampi di latta”, per testarne la resistenza alla pressione alla “leva”.

I risultati provarono che “i prodotti nazionali possano benissimo competere con quelli esteri, spesso senza ragione preferiti nelle costruzioni. I cementi Casale Monferrato, di buona qualità, hanno da soli una resistenza da potersi paragonare ai migliori materiali naturali impiegati nelle costruzioni”. Si specifica inoltre che spesso il cemento “viene corretto con la sabbia in proporzione di 1 : 1 : 2 : 3, il che diminuisce la resistenza nel rapporto di 1 : ½ : ¼ : 1/5.



Fig. ...Album dei Pavimenti Ing. Ghilardi & C. 1928.

## BIBLIOGRAFIA

- Volpiano M., Torino 1890. *La Prima esposizione italiana di architettura*, Celid, Torino 1999.
- Albenga G., *Sguardo sintetico all'evoluzione del cemento armato dall'origine ai nostri giorni*, Edizioni F. Fallii, Roma 1945.
- Gabetti R., *Origini del calcestruzzo armato*, II vol. Edizioni Ruata, Torino 1955.
- Gabetti R., Griseri A., *Architettura dell'ecllettismo. Un saggio su G.B. Schellino*, Einaudi, Torino 1973.
- De Fusco, *Storia dell'architettura contemporanea*, Laterza, Bari 1975.
- Gorla C., *Cemento: storia, tecnologia, applicazioni*. Fabbri Editori, Milano 1976.
- Nicoletti M., *L'architettura Liberty in Italia*, Laterza, Roma-Bari 1978
- De Seta C., *L'Architettura del Novecento*, in "Storia dell'arte in Italia", collana diretta da Ferdinando Bologna, UTET, Torino 1981.
- Pace S., *Un ecllettismo conveniente, l'architettura delle banche in Europa e in Italia 1788-1925*, in "Storia dell'architettura e delle città". Franco Angeli, Milano 1999.
- Pirrone Gianni– *Palermo Liberty*, PALERMO, Edizioni Sciascia, Roma, 1971
- Pirrone Gianni– *Architettura del XX secolo in Italia*, Edizioni Vitali e Ghianda, Genova, 1975
- Pirrone Gianni– *Villino Basile: PALERMO*, Officine Edizioni, Roma, 1981
- Rosario La Duca – *Repertorio bibliografico degli edifici pubblici e privati di Palermo, gli edifici fuori le mura*, Edizioni Dario Flaccovio, Palermo, 1991

- Cappellini Dante – *Il Palazzo delle Poste di Palermo*, Edizioni Guida, Palermo, 1993.
- *Manuale del recupero del centro storico di Palermo*, a cura di città di Palermo, Assessorato al Centro Storico di Palermo, Flaccovio Editore, Palermo, 1997.
- La Duca R., *Palermo ieri e oggi*, Edizioni Sigma, Palermo 1997.
- Fatta G., *Il balcone nella tradizione costruttiva palermitana*, Edizione Palumbo, Palermo 2002.
- Prescia S., *Palermo, la città disegnata. Viaggio nel tempo e nello spazio dal 1860 al 2000*. Ediltecnica srl, Palermo 2005.
- Benfratello S., *Lezioni di Tecnologia delle Costruzioni Edili*, Università di Palermo, Palermo 1928-29.
- *Il Cemento*, Rivista tecnica dei Materiali da costruzione, periodico bimensile illustrato diretto da G.Morbelli, Milano, 1904-1915.
- Nelva R., Signorelli B., *Lo studio Vandone di Cortemiglia tra eclettismo e Art Decò (1890- 1929)*, in "Bollettino S.P.A.B.A.", n.s. XXVII-XXIX, 1973-75.
- Nelva Riccardo – Signorelli Bruno, *Avvento ed evoluzione del cemento armato in Italia: il sistema Hennebique*, Edizioni Scienza e Tecnica, Milano, 1990.
- *L'Attività edilizia torinese nel 1900 – 1929*, in *Torino*, 1929 Scienza e Tecnica, Milano, 1990
- Collepari M., *Scienza e tecnologia del calcestruzzo*, Milano, 1991.
- AA.VV., *Calcestruzzi antichi e moderni: storia cultura e tecnologia*, Atti del convegno di studi di Bressanone 6-9 luglio 1993, Padova, 1993.

- AA.VV., *Architettura e materiali del novecento. Conservazione, Restauro, Manutenzione*, Atti del convegno di studi di Bressanone 13-16 luglio 2004, Padova, 2004.
- Nelva R., *Calcestruzzi armati e pietre artificiali nei primi anni di applicazione del "béton armé" in Italia*, "Recupero e conservazione", anno I, n. 3, 1995.
- Nelva R., *Calcestruzzi armati e pietre artificiali*, in "Recupero & Conservazione", I, n.3 aprile-maggio 1995.
- Nelva R., Signorelli B., *Impieghi della pietra artificiale e dei ferri battuti nelle architetture in Piemonte in epoca Art Nouveau*, in "Atti e Rassegna Tecnica della Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino, LUI (n.s.), n.2 giugno 1999.
- Amoroso G. G., *Il restauro della pietra nell'architettura monumentale*, Ed. Dario Flaccovio, Palermo 1995.
- Fiandaca O., Rinaldo V., *Una città artificiale a Messina, simulazione d'ornato su modelli di pietra*, Sicania, Messina 2005.
- A. Cerami - S. Lo Presti, *Prove sperimentali non distruttive per la determinazione della resistenza caratteristica cubica dei calcestruzzi cementizi*, in «L'industria delle costruzioni» Luglio-Agosto (1990).
- S. Lo Presti, *Il mix-design*, Co.Gra.S., Palermo 1990.
- S. Lo Presti, *Metodo complementare non distruttivo per la determinazione del valore caratteristico convenzionale Rck dei calcestruzzi in opera*, atti del convegno tecniche non distruttive di indagini sperimentali su strutture (Palermo 10 marzo 1995), Palermo 1995.
- Cavallini M., Chimenti C., *La pietra artificiale. Manuale per il restauro e il rifacimento delle*

*decorazioni plastico–architettoniche delle facciate*,  
Firenze, 1996.

- AA.VV., *Atlante del Cemento*, UTET, Torino 1998.
- Giola V., Torraca G., *Caratterizzazione di malte storiche. Metodi e problemi per un'indagine su cementi decorativi Liberty*, "Tema", n. 3, 1999.
- Cavallini M., Chimenti C., *Pietre e marmi artificiali. Manuale per la realizzazione e il restauro delle decorazioni plastico–architettoniche di esterni e interni*, Firenze, 2000
- Rino Sartori, *Pietre e "marmi" di Firenze, notizie storiche, antiche cave, genesi e presenza nei monumenti*, Alinea, Firenze 2002.
- Giola V., *Per una caratterizzazione dei cementi decorativi Liberty*, in AA.VV., *Lo stucco. Cultura, Tecnologia, Conoscenza*, Atti del Convegno di Studi Bressanone 10-13 Luglio 2001, Venezia, 2001.
- P. Barbera, *Architettura in Sicilia tra le due guerre*, Sellerio Editore, Palermo 2002.
- M. Collepari, *Il nuovo calcestruzzo*, Edizioni Tintoretto, Villorba 2003.
- AA.VV., *Restauro e Conservazione dei Beni Culturali: Materiali e Tecniche*, Atti del Convegno, Cassino 3-4 ottobre 2003.
- E. Ruggerone, *Diagnostica strutturale*, Dario Flaccovio, Palermo 2005.