



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PALERMO

Dipartimento di Progetto
e Costruzione Edilizia

**MATERIALI E TECNICHE PER LE FINITURE AD
INTONACO NELLA SICILIA OCCIDENTALE:
CONOSCENZA, ANALISI, PRESTAZIONI**

SSD: ICAR 10 - ARCHITETTURA TECNICA

DOTTORANDO: ING. GIUSEPPE COSTA

TUTOR: PROF. GIOVANNI FATTA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA EDILE: TRADIZIONE E INNOVAZIONE
XXII CICLO

COORDINATORE: PROF. GIUSEPPE PELLITTERI

Stampata a Palermo
da Giuseppe Costa
Febbraio 2011

INDICE

Premessa V

PARTE I

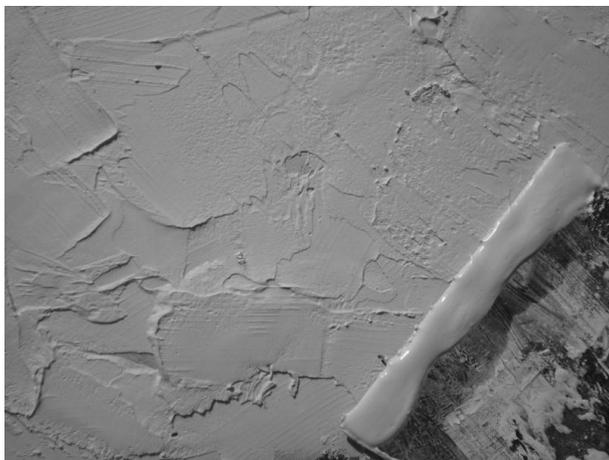
1. Le malte: definizioni, classificazioni e tecnologia	3
1.1. Terminologia	4
1.2. Tecniche di produzione	7
1.3. Malte per intonaco e per muratura	8
1.3.1. Gli intonaci: tecnologia e tecniche di realizzazione	11
Scheda: Intonaci a Palermo e nella Sicilia Occidentale	14
2. Aspetti tecnici nelle malte	19
2.1. Caratterizzazione meccanica	20
2.1.1. Requisiti e tecniche di analisi più comuni	21
2.2. Caratterizzazione fisica	26
2.2.1. Requisiti e tecniche di analisi più comuni	27
2.3. Caratterizzazione chimica	31
2.3.1. Requisiti e tecniche di analisi più comuni	33
2.4. Caratterizzazione morfologica	35
2.4.1. Requisiti e tecniche di analisi più comuni	36

3. La presenza sul mercato	43
3.1. Prodotti, materiali, scelte prestazionali	45
3.2. Le malte per intonaco di tipo tradizionale	47
3.3. Le malte per intonaco di tipo premiscelato	49
4. Programmi di sperimentazione sulle malte	53
4.1. Sperimentazioni a scala di edificio	56
4.2. Sperimentazioni a scala ridotta	58
4.3. Comportamento seminaturale su provini	60
4.4. Indagini in laboratorio su provini	63
5. Il quadro normativo di riferimento	71
5.1. Norme italiane: l'UNI	72
5.1.1. Raccomandazioni Nor.Ma.L.	74
5.2. Norme estere	76
5.2.1. Norme Rilem	78
5.3. Calce e sistemi di certificazione della sostenibilità	79

PARTE II

6. Malte a comportamento idraulico e semi-idraulico	85
6.1. Caratteristiche meccaniche, fisiche, chimiche e prestazionali	88
7. Calci aeree ed idrauliche	93
7.1. Calci aeree	93
7.2. Calci idrauliche	103
7.2.1. Calci idrauliche naturali	108
7.2.2. Calci idrauliche artificiali	110
8. Materiali a comportamento pozzolanico	115
8.1. Pozzolana	117
8.2. Cocciopesto	120
8.3. Altri materiali idraulicizzanti	122
9. Sabbie locali nel confezionamento delle malte idrauliche	125

10. Prodotti idraulici e semidraulici premiscelati	133
11. Le ‘ricette’ della tradizione	139
PARTE III	
12. La sperimentazione sulle malte idrauliche non cementizie	157
12.1. Valutazione della consistenza	160
13. Valutazione sperimentale delle resistenze meccaniche	165
13.1. Resistenze a flessione su travetti	169
13.2. Resistenze a compressione su monconi	171
14. Valutazione sperimentale delle caratteristiche di assorbimento capillare	177
15. Prove su intonaci con malte idrauliche non cementizie	189
15.1. Valutazione dell’aderenza al supporto su tavelle	191
15.2. Valutazione dell’assorbimento d’acqua a bassa pressione (metodo <i>Karsten</i>)	196
16. Analisi e sintesi dei risultati	203
17. Conclusioni	213
Ringraziamenti	217
BIBLIOGRAFIA	219



PREMESSA

L'intenso sviluppo tecnologico che ha interessato il settore delle costruzioni, in maniera particolare negli ultimi decenni, non ha escluso dalla ricerca tutti quei materiali che, per l'utilizzo consolidato dalla lunga tradizione costruttiva, ancora oggi si impiegano diffusamente sia nei cantieri di restauro e recupero edilizio, sia nei cantieri di nuova costruzione.

Le scelte tecniche dei progettisti, confortate dall'abitudine delle maestranze all'impiego di materiali e tecniche costruttive già noti e di semplice messa in opera, orientano verso l'utilizzo di sistemi costruttivi di tipo tradizionale, cui oggi, in virtù delle sempre più avanzate esigenze tecnologiche, si richiede un adeguato livello prestazionale.

Si intuisce quanto la richiesta di materiali ad elevate prestazioni sia necessaria nei cantieri di nuova costruzione, per i quali si richiedono di volta in volta (cioè a seconda delle circostanze) la rapidità di messa in opera, un'elevata durabilità dei materiali, un adeguato contenimento energetico, etc. Nel caso del cantiere di restauro e recupero edilizio, bisogna aggiungere a quelli anzidetti altri requisiti, derivanti dalla specificità del cantiere, dalle interazioni con gli apparati tecnologici già esistenti e, più in generale, dalla cultura tecnica del restauro che, oggi come non mai, richiede una sempre maggiore attenzione alla pratica costruttiva.

Se queste considerazioni possono avere validità generale nell'intero settore della costruzione edilizia, una rilevanza maggiore va data a quelle pratiche che, nella loro naturale evoluzione, hanno subito variazioni tali da considerare poco mutati il processo produttivo ed applicativo, dalla fase di produzione e trasformazione dei materiali, a quella di realizzazione degli elementi tecnici.

Nel campo delle malte e degli intonaci, che costituiscono l'argomento di base di questa ricerca, lo sviluppo delle conoscenze tecniche ha però comportato, nel corso dei decenni precedenti, un sempre più diffuso affiancamento, se non addirittura una sostituzione, dei materiali di base tradizionalmente impiegati nel cantiere edile, con altri, di caratteristiche simili e maggiormente economici, che però, in alcuni ambiti specifici, sono ritenuti inadeguati dalla cultura tecnica odierna.

Ci si riferisce, in particolare, al largo impiego di malte a base cementizia in sostituzione di prodotti tradizionali con una certa analogia nelle prestazioni, ma notevolmente differenti nella sostanza, quali le malte a base di calce idraulica naturale o quelle idrauliche e semi-idrauliche, confezionate con calce aerea ed aggregati idraulicizzanti.

Questo tipo di malte, assai note per il diffuso impiego e l'efficacia che hanno avuto nel passato, spesso legato anche a consolidate tradizioni, sia orali che scritte, ossia trasmesse attraverso la manualistica, sono state oggetto di approfonditi studi soprattutto sul finire del XIX secolo. Tali studi si sono svolti per lo più in parallelo con quelli analoghi, eseguiti sulle malte a base cementizia, che, come anzidetto, hanno via via sostituito quasi del tutto le malte di tipo tradizionale.

Anche a seguito del riconoscimento dei danni causati da un utilizzo incondizionato dei materiali cementizi, la cultura tecnica degli ultimi decenni ha nuovamente riscoperto le malte idrauliche tradizionali, per la maggiore compatibilità nel campo del restauro architettonico e del recupero edilizio, ovvero per la maggiore sostenibilità nel campo della nuova costruzione e della bio-edilizia.

Questo studio, inquadrandosi nell'ambito delle ricerche promosse sia dalle Università che dagli operatori economici e dalle aziende produttrici, in ambito nazionale ed internazionale nel campo delle malte, intende fornire un contributo per la conoscenza specifica delle malte a comportamento idraulico, confezionate senza componenti di origine cementizia.

In particolare, lo studio si propone di offrire una panoramica sulle conoscenze tecniche dei suddetti prodotti, con riguardo agli specifici impieghi con cui gli stessi vengono utilizzati dai progettisti; inoltre si vuole offrire un quadro delle più comuni modalità di sperimentazione dei prodotti e del sistema di applicazione ad intonaco.

Si osserva come in qualche caso sia stato necessario calibrare opportunamente le procedure di sperimentazione in funzione del comportamento semi-idraulico dei prodotti in esame, poiché, laddove previsto, le procedure sono spesso studiate per malte ad esclusivo comportamento aereo o idraulico, senza alcun riferimento a prodotti a comportamento intermedio.

Quindi, con riferimento ad alcuni prodotti premiscelati in stabilimenti attivi nel bacino di mercato della Sicilia Occidentale, ovvero con rife-

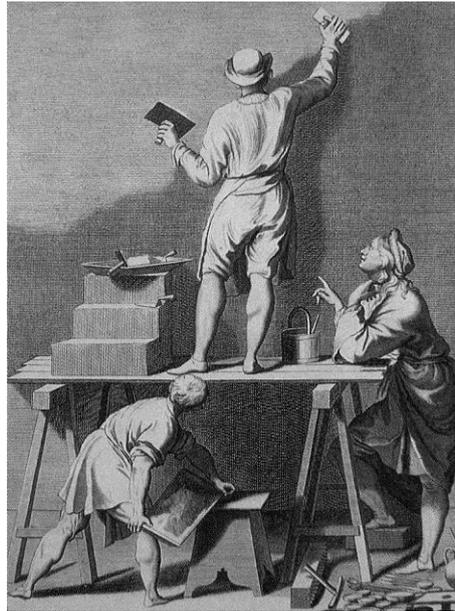
rimento a materiali confezionati secondo le “ricette” trasmesse dalla tradizione, a partire da materie prime anche di origine locale, si propone un’applicazione sperimentale su malte ed intonaci, condotta esclusivamente presso il Laboratorio di Edilizia del Dipartimento di Progetto e Costruzione Edilizia dell’Università di Palermo.

Lo studio, infine, propone un semplice quadro di analisi e confronto tra i dati ottenuti che, opportunamente calibrato, potrebbe utilmente essere impiegato da operatori del settore, come supporto nell’iter di definizione dei materiali nel processo progettuale di una costruzione edilizia.

Si ritiene quindi che la ricerca, nella parte sperimentale, possa avere interessanti sviluppi, attraverso l’ampliamento del campo d’indagine a proprietà che in questa sede non sono state indagate; particolare riguardo potrebbe essere assegnato alle metodologie di sperimentazione su campioni in opera, anche con riferimento alle interazioni con gli strati di finitura e/o con eventuali protettivi.



PARTE I



1. LE MALTE: DEFINIZIONI, CLASSIFICAZIONI E TECNOLOGIA

Il termine malta, in accordo con una definizione fornita da Menicali (1992), indica “un qualsiasi impasto reso plastico da una adeguata quantità d’acqua e composto da un legante e da una o più sostanze, aggiunte in funzione di scheletro inerte oppure per conferire particolari doti alla miscela”.

La complessità della definizione, caratterizzata da una serie di termini che, a breve, saranno esplicitati, fa comprendere la non immediata, seppur semplice, struttura di uno tra i materiali da costruzione più diffusi nella storia della tecnologia edilizia.

L’utilizzo della malta nella pratica costruttiva edilizia è accertato fin da epoche assai remote.

Allo stato delle conoscenze odierne, la malta più antica, confezionata con legante a base di calce e pietra, è stata rinvenuta in una pavimentazioneⁱ della Galilea meridionale, risalente al VII millennio a.C.

È risaputo che nel corso dei secoli, le malte conoscono una grande diffusione in tutte le civiltà del Mediterraneo, contribuendo, in maniera più o meno cospicua, all’avanzamento del livello tecnologico di conoscenza in campo edilizio.

Seppure il merito di aver tramandato queste conoscenze vada ai Romani, è certo che l’impiego di sostanze capaci di conferire particolari doti alla miscela plastica fosse già noto alle civiltà precedenti, quali, ad esempio, quella dei Fenici, ovvero, precedentemente, quella minoica di Cretaⁱⁱ.

L’estrema varietà di prodotti che, specialmente nel corso degli ultimi due secoli, in concomitanza con l’accelerato avanzamento delle tecnologie, possono indicarsi con il termine generico di malta, ha generato una grande confusione negli operatori del settore, per cui si è reso necessario disciplinare in modo univoco una materia sulla quale la storia della tecnologia non ha mancato mai di esprimersi. Tale esigenza in Italia è stata particolarmente sentita anche grazie allo sviluppo degli studi sull’argomento.

Ad oggi, pertanto, il documento UNI 10924:2001 “Beni culturali – Malte per elementi costruttivi e decorativi: classificazione e terminologia” attribuisce alla malta la definizione di *miscela di leganti inorganici od organici, aggregati prevalentemente fini, acqua ed eventuali*

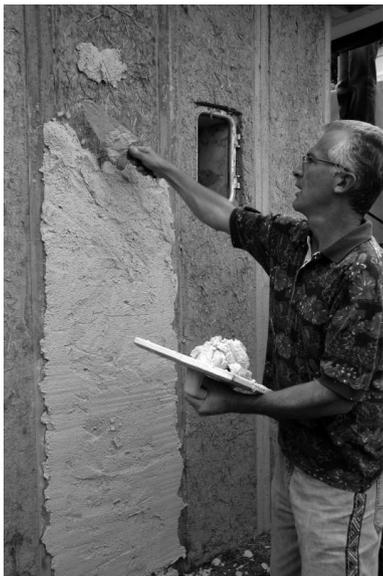


Fig. 1.1. Applicazione manuale di uno strato di intonaco su una superficie edilizia.

aggiunte e/o additivi organici e/o inorganici (o una miscela di solo legante e acqua) in proporzioni tali da conferire all'impasto, allo stato fresco un'opportuna lavorabilità e, allo stato indurito, adeguate caratteristiche fisiche (porosità, permeabilità all'acqua, ecc.), meccaniche (resistenza, deformabilità, aderenza, ecc.), di aspetto, di durabilità, ecc.

Una definizione così corposa fa comprendere quanto sia complesso provare a fornire una classificazione delle diverse miscele, che, per tipologia del legante, per natura e dimensioni dell'aggregato, per proporzioni tra le singole parti e/o per le caratteristiche materiche delle miscele stesse, si differenziano molto tra loro.

La classificazione delle malte non può, quindi, prescindere dall'analisi dei componenti. A ciò bisogna però aggiungere che le malte si differenziano tra loro anche in base ad altre caratteristiche, quali le metodologie di produzione e commercializzazione (ad esempio, malte premiscelate o confezionate a piè d'opera), quelle di posa in opera (ad esempio, malte per applicazione manuale, per iniezione o spruzzate), ovvero in base all'impiego che se ne intende fare nella costruzione edilizia (ad esempio, malte per intonaco, muratura, pavimentazioni, etc.).

La grande varietà di prodotti che, nelle proprietà del materiale, nella modalità di applicazione, ovvero nella specificità dell'impiego, presentano caratteristiche completamente differenti tra loro, rende manifesta la complessità tecnologica del tema, riguardo al quale, in questa sede, si approfondiscono i temi riguardanti la conoscenza tecnica delle caratteristiche principali, le modalità di sperimentazione ed i riferimenti normativi.

1.1. TERMINOLOGIA

Con riferimento alla più diffusa definizione di malta, ossia con specifico riguardo all'anzidetta definizione di cui al documento UNI 10924:2001, si ritiene opportuno fornire, in questa sede, una serie di precisazioni terminologiche di riferimento. La lunga tradizione, anche trattatistica, delle opere scritte sul tema della malte e degli intonaci, sebbene abbia diffuso ampiamente le conoscenze, ha anche contribui-

to ad ingenerare un po' di confusione in quanti non conoscono nel dettaglio l'argomento. Proprio per questa ragione, la Commissione UNI-Nor.Ma.L.ⁱⁱⁱ Beni Culturali, ha ritenuto opportuno, negli anni scorsi, introdurre una norma specifica al riguardo, al fine di determinare un riferimento univoco per gli operatori di settore, in ciò riprendendo la vecchia norma 23/87 "Terminologia Tecnica: Definizione e Descrizione delle Malte" della commissione Nor.Ma.L.

La suddetta norma UNI 10924:2001 non fornisce una definizione del *legante*, limitandosi a distinguere le malte in base alla natura del componente; la letteratura tecnica^{iv} ci suggerisce *che i leganti sono materiali che impastati con acqua formano masse plastiche che induriscono per dar luogo ad un composto unico, dotato di compattezza, in grado di resistere alle sollecitazioni meccaniche ed agli agenti atmosferici*.

Secondo la nota distinzione operata da L. J. Vicat nel 1818 in "Recherches expérimentales sur le chaux de construction, les béton set les mortiers ordinaires", i leganti vengono raggruppati nelle due grandi categorie dei *leganti aerei* e *leganti idraulici*.

Nella prima categoria vengono raccolti i leganti che possono indurire solo all'aria, mentre nella seconda quelli che induriscono anche in acqua. I leganti possono avere origine sia *organica* che *inorganica*: in questa sede si tratterà soltanto di quelli inorganici, definiti anche materiali *litoidi*, in quanto derivanti dai materiali litici, per cottura di rocce sedimentarie (sia solfatiche – gessi – che carbonatiche) o rocce metamorfiche^v.

In accordo con quanto anzidetto, la famiglia dei leganti aerei è costituita dalle *calci aeree*, dai *gessi* e dalle *argille*, mentre quella dei leganti idraulici dalle *calci idrauliche* e dai *cementi*. Nell'ambito della tesi non si tratterà dei gessi e delle argille, queste ultime, tra l'altro, scarsamente impiegate nella tradizione costruttiva della Sicilia Occidentale. Ci si riferirà, invece, ai cementi, soltanto con specifico riguardo alle relazioni che possono esserci con le tecniche di produzione, la costituzione e gli impieghi delle *calci idrauliche artificiali*^{vi}.

Sempre in accordo con la definizione di malta di cui alla norma UNI 10924:2001, gli *aggregati* vengono distinti, in base alla loro origine, secondo il seguente elenco:

a) sabbia:

- di fiume;
- di cava;
- di litorale;
- b) rocce frantumate;
- c) materiali naturali a comportamento pozzolanico;
- d) materiali artificiali a comportamento pozzolanico (per esempio “cocciopesto”);
- e) frammenti di malte indurite.

Nella parte II e III della tesi si avrà ampiamente modo di discutere degli aggregati, di cui alle suddette voci c) e d) che, in accordo con la tradizione costruttiva trasmessa dagli antichi trattatisti e dalla regola dell’arte, ancora oggi si impiegano per idraulicizzare le malte confezionate in cantiere, ovvero premiscelate in stabilimento, utilizzando leganti a base di calce aerea.

Con specifico riferimento all’aggregato, risulta opportuno, in questa sede, fornire una precisazione terminologica: fino a pochi decenni fa, sebbene fosse assai noto che, ad esempio, l’impiego di materiali a comportamento pozzolanico conferisse alla malta particolari caratteristiche, si è ritenuto che la frazione aggregata avesse soltanto una funzione meccanica, per cui ci si riferiva ad essa utilizzando il termine *inerte*. Essendo ormai stato da tempo confermato^{vii} che possono avvenire reazioni tra il legante ed alcune tipologie di aggregato, si preferisce utilizzare quest’ultimo termine, piuttosto che quello di *inerte*.

L’ultimo componente di una malta che necessita di precisazioni terminologiche è costituito dall’eventuale presenza di *aggiunte e/o additivi* al composto. Con questo termine devono intendersi le sostanze che vengono aggiunte al fine di conferire particolari caratteristiche tecniche all’impasto indurito, ovvero per migliorarne la lavorabilità.

L’uso degli additivi nelle malte è molto antico: tra i più diffusi si ricordano quelli di natura proteica, sia di origine animale che vegetale, quelli a base di polisaccaridi, gli oli ed i grassi. Quelli impiegati oggi dalle industrie produttrici di malte per l’edilizia assolvono, perlopiù, le seguenti funzioni^{viii}:

- accelerare o rallentare le reazioni di presa ed indurimento;
- migliorare la lavorabilità, riducendo sensibilmente la quantità d’acqua richiesta;
- aumentare il volume d’aria trattenuta;

- favorire la stagionatura;
- svolgere un'azione antiritiro;
- aumentare l'idrorepellenza.

Gli additivi oggi impiegati derivano in gran parte dall'industria chimica: vengono usate resine, polimeri organici, saponi, alcoli, etc.

1.2. TECNICHE DI PRODUZIONE

La definizione precedentemente introdotta del materiale malta ci suggerisce che il processo di produzione della stessa non è assolutamente immediato, data la complessità delle operazioni necessarie per ottenere il prodotto finale; si può altresì aggiungere che la figura dell'operatore, sia esso uno stabilimento produttivo, ovvero un semplice operaio edile, investe un ruolo assai rilevante nel suddetto processo.

Le caratteristiche del prodotto finale sono, infatti, legate alla tipologia ed alla qualità dei componenti di base, alla dimensione dell'aggregato, alle proporzioni tra le diverse parti, ma anche ad altri fattori, tra i quali si ricordano i tempi e le modalità di lavorazione e stagionatura dei componenti (si pensi, ad esempio, ai tempi di maturazione del grassello) e della miscela, ovvero alla manualità dell'operatore.

La complessità delle tecniche di produzione della malta costituisce un fattore determinante nel suo impiego e nella scelta di una determinata tipologia di prodotto, in funzione delle esigenze richieste.

La piena conoscenza delle stesse tecniche deve, quindi, essere alla base delle informazioni che il progettista deve possedere nella decisione dei materiali che devono essere impiegati nella costruzione edilizia. Ciò anche in ragione dell'impiego consolidato delle malte sia nella nuova costruzione, ma soprattutto nel recupero edilizio, laddove il tecnico deve confrontarsi con problematiche più complesse, quali quelle legate alla compatibilità con i materiali già esistenti.

L'innovazione tecnologica degli ultimi decenni ha contribuito a standardizzare alcune fasi del processo produttivo, ma ha anche ingenerato una perdita di consapevolezza dei processi e delle tecniche di produzione, da parte degli operatori che si inseriscono nelle ultime fasi della filiera produttiva.

L'utilizzo di malte premiscelate in stabilimento, infatti, da un lato garantisce il controllo della fasi produttive che, in accordo con le strategie di compartecipazione di diversi operatori al processo edilizio, viene demandato alle aziende produttrici; d'altro canto, però, non sempre viene garantita al tecnico la piena consapevolezza, ad esempio, dei componenti impiegati nella formulazione della miscela^{ix}.

Nel caso, invece, in cui vi siano problematiche legate alla compatibilità dei materiali con quelli già in opera, ovvero alla richiesta di miscele che non possono, per diverse ragioni essere formulate in cantiere (si pensi, ad esempio, alla mancata possibilità di comporre in stabilimento miscele con legante in pasta, stagionato per molti mesi, per indisponibilità del fornitore), si rende indispensabile la formulazione della miscela a piè d'opera, secondo le "ricette" trasmesse dalla tradizione. In queste circostanze il tecnico deve assolutamente avere piena consapevolezza dei processi produttivi, al fine di indirizzare gli operatori nella scelta di una determinata miscela, piuttosto che di un'altra, formulata diversamente, anche con componenti di origine diversa. Similmente non si può trascurare il fatto che le ricette tradizionali non possano essere applicabili nella forma trasmessa dai manuali, sia per la disponibilità mai certa delle materie, sia perché le nuove conoscenze permettono di migliorarle, pur partendo da composizioni simili.

Ad oggi, quindi, il tecnico si trova a dover scegliere tra due grandi insiemi possibili: utilizzare un premiscelato, la cui composizione potrebbe non essere proprio certa, ovvero una malta confezionata a piè d'opera, impiegando componenti di base, acquistati dai fornitori, con le opportune garanzie di produzione, e miscelandoli secondo le ricette di una tradizione aggiornata ad oggi.

In questa scelta, non possono non influire altri fattori, quali quelli economici ed operativi, che possono mostrare una maggiore convenienza in una direzione piuttosto che in un'altra.

1.3. MALTE PER INTONACO E PER MURATURA

Gli impieghi delle malte nel cantiere edile sono assai vari: in larga massima le malte possono classificarsi in malte per intonaco e malte per muratura, ma questa distinzione risulta insufficiente.

Sempre con riferimento al documento UNI 10924:2001 “Beni culturali – Malte per elementi costruttivi e decorativi: classificazione e terminologia”, del quale abbiamo già avuto modo di parlare precedentemente, le malte possono essere distinte in base all’ambiente (per interni e per esterni), in base a particolari destinazioni (malte per murature umide, per elementi interrati o per elementi a contatto con acqua), ovvero in base alla funzione, oltre che in base alla composizione, della quale si è già discusso.

La classificazione proposta dalla norma UNI 10924 in base alla funzione, risulta notevolmente più ampia di quella già introdotta, che si limita ai due soli impieghi negli intonaci e nelle murature: lo schema proposto è infatti il seguente:

- a) malte per muratura:
 - malte di allettamento,
 - malte di riempimento;
- b) malte per intonaci;
- c) malte per posa di rivestimenti per:
 - pavimentazioni,
 - pareti,
 - altri elementi architettonici;
- d) malte per decorazioni:
 - a spessore,
 - a rilievo,
 - statuarie,
 - strutturali (per esempio dei periodi liberty, decò);
- e) malte per impieghi particolari:
 - stuccature,
 - sigillature,
 - stilature/ristilature,
 - reintegrazioni;
- f) malte con caratteristiche particolari, per esempio:
 - resistenti all’umidità di risalita,
 - resistenti alle intemperie,
 - impermeabilizzanti,
 - additivate,
 - pigmentate.

La letteratura tecnica propone molti altri schemi di classificazione delle malte in funzione dell'utilizzo^x.

A seconda dell'impiego, le malte presentano una serie di requisiti, che possono anche essere sensibilmente diversi tra loro, in funzione della prestazione che lo specifico impiego richiede: le malte per muratura devono avere, ad esempio, un'adeguata resistenza meccanica, quelle per intonaci devono possedere una buona aderenza al supporto e buona elasticità, quelle per stuccature, sigillature e riempimento non devono presentare fenomeni di ritiro di notevole entità, etc.

La distinzione delle malte in base all'impiego, sebbene sia un metodo di classificazione molto antico^{xi}, è risultata tanto più opportuna nell'ultimo secolo, ossia da quando l'innovazione e l'avanzamento tecnologico nel settore, determinato anche dall'introduzione dei leganti a base cementizia, ha ridotto il campo di impiego delle malte più tradizionali, confezionate quasi esclusivamente con grassello di calce aerea, per indirizzare le diverse miscele verso funzioni più adeguate.

Basti, a tal proposito, pensare che molte murature dell'edilizia storica sono state realizzate impiegando malte di calce aerea, allo stato odierno più diffusamente usate per l'esecuzione di intonaci interni, che, seppur confezionate con leganti di eccezionale qualità, non possono



Fig. 1.2. Attrezzi di varia natura, risalenti al XVIII ed al XIX secolo, utilizzati per la lavorazione tradizionale degli intonaci. Si possono distinguere le cazzuoline per la stesura della malta, i ferri da ornato, il setaccio per la vagliatura dei materiali e gli atrezzi per la lucidatura a calco. (FEIFFER, 2000)

mai raggiungere le medesime prestazioni meccaniche di una malta composta con leganti idraulici (o idraulicizzati con aggregati a reattività pozzolanica), oggi necessariamente richiesti^{xii} per l'esecuzione di una nuova costruzione o per il consolidamento di una struttura muraria esistente.

1.3.1. Gli intonaci: tecnologie e tecniche di realizzazione

L'utilizzo più comune delle malte, per fini non strutturali, è sicuramente volto all'esecuzione delle finiture superficiali ad intonaco.

Sempre in accordo con la norma UNI 10924:2001 “Beni culturali – Malte per elementi costruttivi e decorativi: classificazione e terminologia”, l'intonaco viene definito “*rivestimento murale costituito da un sistema di strati di malta applicati in un'unica sequenza realizzativa, atto ad assolvere, ad indurimento avvenuto, funzioni di protezione e di finitura superficiale*”.

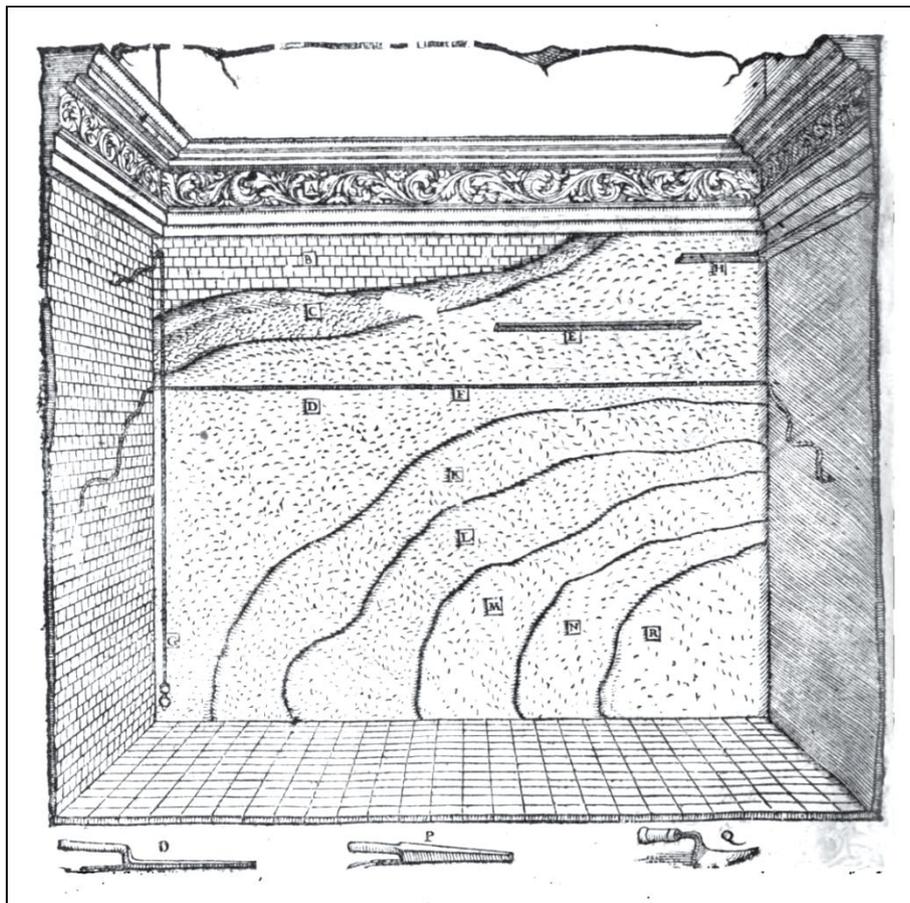
Con riferimento agli elementi costruttivi tradizionali, che ancora oggi assumono una notevole importanza per il diffusissimo impiego nella attuale pratica edilizia, l'intonaco può certamente annoverarsi tra quelli più studiati negli aspetti generali ed in quelli specifici, riferiti alle tradizioni locali, negli aspetti storico-materico-costruttivi ed in quelli tecnologici, anche in relazioni all'analisi delle caratteristiche meccaniche, chimiche, fisiche e prestazionali in genere.

L'interesse all'argomento non è recente: lo studio scientifico delle caratteristiche dei materiali che costituiscono l'intonaco può certamente farsi risalire all'inizio del XIX secolo, con le citate “Recherches...” di L. J. Vicat, ma con specifico riguardo al “materiale intonaco”, una prima sistematizzazione degli studi può farsi risalire all'inizio degli anni Ottanta del secolo scorso, quasi in concomitanza con l'organizzazione di alcuni convegni di studi^{xiii} che hanno raccolto le ricerche di diversi istituti in materia.

Nell'ultimo trentennio si registra quindi un costante interesse sulla materia che contribuisce in maniera continuativa ad accrescere le conoscenze in un campo su cui si addensano notevoli incertezze.

Ritornando alla definizione che la norma UNI fornisce per l'intonaco, si capisce, infatti, quanto siano ampie le relative possibilità rea-

Fig. 1.3. *Figura delle mura incrostate per ricever bene le pitture, & gl'istromenti per ciò fare.* (RUSCONI, 1660). La lunga tradizione costruttiva sugli intonaci, risalente agli scritti di Vitruvio, impone che le finiture vengano realizzate in un numero di strati che può arrivare fino a nove.



lizzative: nulla è infatti specificato sul numero e la consistenza degli strati, sulla tipologia di malta impiegata o impiegabile, né sulle modalità di lavorazione. Ciò in relazione, non solo alle diverse funzionalità di una superficie finita ad intonaco, ma anche in ragione del vasto campo di possibilità di realizzazione suggerite dall'archeologia, dalla storia, dalla letteratura tecnica, dalle tradizioni locali, dall'odierna cultura del restauro, dalle esigenze prestazionali, dall'avanzamento tecnologico, etc.

In questa sede, però, risulta opportuno fornire, come già fatto per le malte e le loro tecniche di produzione, alcuni termini di riferimento, ormai abbastanza riconosciuti negli studi di settore, al fine di creare una base comunicativa comune, rimandando, per gli eventuali appro-

fondimenti, a testi più specifici. A tal fine, Feiffer (2000) suggerisce una possibile descrizione, piuttosto condivisa dalla cultura tecnica, sebbene la tradizione storica e le terminologie locali testimoniano la presenza di un grande numero di possibilità realizzative (Vitruvio ci parla di intonaci a nove strati, utilizzati anche nelle costruzioni ordinarie) e di funzioni diverse: “... l’intonaco generalmente viene applicato in tre fasi successive: il *rinzaffo*, l’*arriccio* e il *velo* (*intonachino*, nda). Il rinzaffo ... è il primo strato dell’intonaco, composto da una malta più grassa^{xiv} di quella utilizzata per la muratura retrostante e una sabbia più grossa per ottenere una superficie scabra. [...] L’arriccio ha uno spessore di pochi millimetri e viene applicato dopo qualche giorno dal rinzaffo, che dev’essere mantenuto umido per facilitare la presa. La malta è leggermente più grassa della precedente, [...]. Il velo, altrimenti detto intonaco civile, stabilitura, malta fine, è lo strato finale. La malta è più grassa delle precedenti e gli aggregati sono molto fini per garantire la perfetta lisciatura della superficie^{xv}.”

In relazione all’intera struttura dell’intonaco, ciascuno strato, come noto, assolve funzioni diverse: quelli più interni tendono a regolarizzare la superficie della struttura muraria, e quindi a dare la forma e lo spessore all’intonaco, mentre quelli più esterni, realizzati con malte a grana più fine, tendono a rifinire la superficie.

La prassi costruttiva odierna ha ridotto il numero degli strati a due od anche ad un solo strato (nel caso di intonaci premiscelati in fabbrica ed opportunamente additivati per ridurre i notevoli fenomeni di ritiro). Nella comune terminologia di cantiere si parla, quindi, nel caso di intonaci a due o tre strati, ossia di *intonaco rustico*, intendendo con questo termine i primi strati (uno o due), applicati direttamente sulla muratura, regolarizzati, ma non rifiniti del tutto, e di *intonaco civile*, ed in questo caso va inteso lo strato destinato a chiudere e rifinire completamente la superficie.

Intonaci a Palermo e nella Sicilia Occidentale

Anche in relazione alle differenze climatiche ed ai materiali disponibili nelle diverse aree geografiche, si rivela spesso opportuna l'indagine sui siti specifici, attraverso la ricerca di informazioni sulla prassi costruttiva locale degli intonaci

Nell'area occidentale sicula queste indicazioni, che costituiscono la base comune di conoscenze relative al patrimonio costruito locale, sono più spesso desumibili dalla documentazione d'archivio, che oltre a riportare la terminologia locale, ci informa anche sugli aspetti tecnici del cantiere edilizio tradizionale, ovvero dagli antichi tariffari, piuttosto che dalle rare fonti trattatistiche. I tariffari ci fanno conoscere inoltre quale fosse il livello di qualità delle finiture.

Ovviamente un livello di conoscenza più specialistico può desumersi dagli studi scientifici svolti direttamente sui materiali ancora riscontrabili in opera, magari in occasione di interventi di recupero dell'edilizia tradizionale.



Fig. 1. L'intonaco viene utilizzato per la definizione delle geometrie architettoniche delle fronti monumentali. (foto ALESSANDRINI, 2001)

In quest'ambito possono inquadrarsi alcuni studi, svolti in ambito

accademico ovvero promossi dalle amministrazioni locali e sviluppati da enti di ricerca nazionali.

Fino alla fine del Settecento, le informazioni relative all'esecuzione dei rivestimenti ad intonaco si limitano a fornire i due soli termini rizzare e bianchiare.

Il primo termine ha un'evidente analogia col verbo arricciare, che fa, quindi, riferimento a quello strato dell'intonaco che abbiamo già definito arriccio. Il secondo, invece, può anche riferirsi col più corretto biancheggiare, che si riferisce più ad una tinteggiatura, piuttosto che ad uno strato di finitura vero e proprio dell'intonaco. Il bianchiato era certamente la finitura più frequente per interni.

Il primo strato di regolarizzazione delle superfici, che abbiamo denominato rinzaffo, assumeva le dizioni di ziffiato o rimbottonato, a seconda del grado di irregolarità del supporto, e quindi della granulometria dell'aggregato.

La malta impiegata era confezionata con grassello di calce (detto anche quacina insivata) e sabbie locali (di origine esclusivamente silicea, derivante da sabbia di mare lavata, od anche carbonatica, estratta da banchi di roccia friabile). Nel caso di utilizzo in parti a rischio di umidità la malta per intonaco veniva resa semi-idraulica o idraulica per aggiunta o sostituzione di parte dell'aggregato con pozzolana di importazione, ovvero con polvere di laterizi (tuffo). Il termine cocchiopesto, sul finire dell'Ottocento, era invece utilizzato per identificare i frantumi di laterizi a grana più grossa, e veniva adoperato per l'esecuzione di strati interni dell'intonaco.

La finitura di maggiore pregio era costituita dagli stucchi, che si distinguevano per l'utilizzo dei migliori grasselli, per la formulazione della malta, e della polvere di marmo, usata come aggregato, in dosaggi anche notevolmente grassi. La lavorazione consisteva in una continua operazione di lisciatura, prima con cazzuolino e fratazzo, poi con feltro e panni. In ambienti di qualità superiore la lustratura avveniva, come in altre aree geografiche, con l'uso di olii, cere e saponi, anche con l'utilizzo della cazzuola riscaldata.

L'uso di malta cementizia comincia a diffondersi a partire dal 1900, mentre, sempre a partire dai primi del Novecento, grande successo ebbe il famoso brevetto Li Vigni, che si proponeva di imitare tutte le pietre tufacee nella decorazione dei prospetti degli edifici. L'impasto dell'intonaco Li Vigni era formulato con una parte di calce grassa in pasta (ottenuta anche dalla cottura di calcari magnesiaci) e quattro di sabbia dolomitica, con l'aggiunta di materie coloranti. Il brevetto era connotato da due aspetti tra loro assai diversi: il primo, determinato dal tipo di materiale usato e dalle dosi impiegate nei componenti. Il secondo, ritenuto poco brevettabile, basato sulle capacità dell'operatore di imitare la pietra naturale nelle sue caratteristiche esterne e di modellare forme decorative.



Fig. II. Marchio del brevetto dei fratelli Li Vigni impresso sulla superficie di un edificio a Palermo (foto FATTA, 1999).

ALESSANDRINI, G. (responsabile scientifico e coordinatore della ricerca), *Il Centro storico di Palermo – La conoscenza per la manutenzione*, Roma, Con-

siglio Nazionale delle Ricerche, Istituto Nazionale di coordinamento Beni Culturali, Comune di Palermo, 2001

FATTA, G., *Intonaci a Palermo – Materiali e tecniche costruttive costruttive nella tradizione palermitana*, «Recupero e Conservazione», 1998, n. 24

FATTA, G., *Intonaci a Palermo – I fratelli Li Vigni e le innovazioni del Novecento*, «Recupero e Conservazione», 1999, n. 25

ⁱ Cfr. PECCHIONI, E., FRATINI, F., CANTISANI, E., *Le malte antiche e moderne tra tradizione ed innovazione*, Bologna, Pàtron Editore, 2008.

ⁱⁱ Già nel 1700 a. C. era frequente l'uso di frammenti di terracotta mescolati alla calce ed alla sabbia, per migliorare la resistenza meccanica della malta. Cfr. PECCHIONI et al., *Le malte antiche e moderne ...*, op. cit.

ⁱⁱⁱ Cfr. FEIFFER, C., *Nel nome delle NorMaL*, «Recupero e Conservazione», 2010, n. 91

^{iv} Cfr. GOTTARDI, V., *I leganti*, Bologna, Ed. Pàtron, 1978

^v Le rocce sedimentarie derivano dal disfacimento di materiali organici ed inorganici che una volta frammentati, vengono trasportati a valle dalle acque, e cementate attraverso la deposizione di sostanze disciolte. Le metamorfiche, invece, derivano dalla trasformazione della composizione mineralogica e della struttura di rocce che vengono a trovarsi in ambienti ad elevate pressioni e temperature.

^{vi} Per calci idrauliche artificiali si devono intendere, in accordo con quanto definito nella norma UNI EN 459-1:2002 “Calci da costruzione – Definizioni, specifiche e criteri di conformità”, le calci idrauliche indicate con la sigla HL (Hydraulic Lime), distinte dalle *calci idrauliche naturali*, indicate con la sigla NHL (Natural Hydraulic Lime).

^{vii} Cfr. BARONIO, G., BINDA MAYER, L., *Reazioni di aggregati in intonaci antichi*, in *L'intonaco. Storia, cultura e tecnologia*, Atti del convegno di studi Scienza e Beni Culturali, Bressanone, Padova, Ed. Libreria Progetto, 1985

^{viii} Cfr. PECCHIONI et al., *Le malte antiche e moderne ...*, op. cit.

^{ix} Si veda a tal proposito l'editoriale di C. Feiffer al numero 76/2007 della rivista *Recupero e Conservazione*, DeLettera Editore.

^x Tra i tanti, si ricorda per la ricchezza delle informazioni fornite a corredo della stessa classificazione, quello proposto da Broccolo (2000). La classificazione, che si riporta nella seguente tabella, indica, per ciascuna tipologia, le più diffuse composizioni dei leganti, l'eventuale presenza di additivi utili allo specifico impiego e le caratteristiche più salienti della miscela finale.

Classificazione della malta per impiego

- malte per murature
- malte per il risanamento (contro infiltrazioni di acqua)
- malte per il restauro dei monumenti
- malte consolidanti

malte per ripristini strutturali
malte per sottofondi
malte per finiture: rasanti, collanti
malte per demolizioni

Cfr. BROCCOLO, A., *Malte intonaci e paste nelle costruzioni e nel recupero*, Roma, Carocci Editore, 2000

^{xi} Già Marco Vitruvio Pollione, nel suo *De Architectura Libri X*, del I secolo a.C., fornisce le opportune specifiche per le malte da impiegare nei moli e nelle cisterne, nei pavimenti, negli intonaci e negli stucchi.

^{xii} Cfr. D.M. 14 gennaio 2008, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008 – Suppl. Ordinario n. 3°, recante le *Norme tecniche per le Costruzioni*, Cap. 11.10.2. Malte per muratura.

^{xiii} Tra le prime e più rilevanti occasioni di confronto degli studi sull'intonaco non possono non ricordarsi il primo convegno di studi *Scienza e Beni Culturali* tenutosi a Bressanone nel 1985 “L'intonaco: storia, cultura e tecnologia”, il quale era stato preceduto, nel 1984, dal convegno romano “Intonaci, colore e coloriture nell'edilizia storica”, i cui atti furono pubblicati a cura del Ministero per i Beni Culturali e Ambientali.

^{xiv} Una malta si definisce *magra* quando il legante non risulta sufficiente a riempire i vuoti esistenti fra i granuli dell'inerte, *grassa* se il legante riempie i vuoti dell'inerte in maniera leggermente superiore al dovuto, *molto grassa* o *ricca* o *forte* se il legante è usato in notevole quantitativo rispetto all'inerte. Cfr. FORTI, C., a cura di, *Antiche ricette di pittura murale*, Verona, Cierre Edizioni, 1998.

^{xv} Cfr. FEIFFER, C., *La conservazione delle superfici intonacate: il metodo e le tecniche*, Milano, Skira editore, 2000

2. ASPETTI TECNICI NELLE MALTE

Le problematiche relative alla conoscenza scientifica delle malte e degli intonaci possono riguardare materiali già in opera, ed eventualmente invecchiati, nel caso di applicazioni su antiche costruzioni, ovvero materiali che devono ancora essere confezionati per la messa in opera. Il problema conoscitivo dei materiali da costruzione si pone sempre innanzi al tecnico che si trova a dover operare in contesti edilizi di recupero o di nuova costruzione. Nel caso, però, di materiali compositi, quali le malte per intonaco in più strati, ciascuno dei quali costituito da una malta diversa, le tematiche si ampliano notevolmente: i fattori indagabili, infatti, non possono soltanto riguardare le caratteristiche generali, come nel caso di materiali di una certa omogeneità, magari lavorati industrialmente, seguendo processi produttivi che garantiscono l'univocità del comportamento, ad esempio, meccanico. Bisogna, infatti, indagare le caratteristiche dei singoli componenti, le proporzioni fra le diverse parti e quindi la miscela in tutte le sue proprietà, sia allo stato fresco che a quello indurito, insieme alle modalità di applicazione.

Inoltre, se ci si trova a dover operare nell'ambito del recupero edilizio, bisogna confrontarsi con materiali per i quali l'usura, il degrado e l'invecchiamento in genere non consentono di stabilire una serie di dati fondamentali per l'analisi materica.

Molte informazioni, anche essenziali, possono essere di difficile riscontro: si pensi, ad esempio, all'analisi di piccoli grani di carbonato di calcio, che potrebbero derivare dalla frazione aggregata, ovvero dalla mancata cottura dei calcari per la formazione dei leganti, etc.

Nel caso, invece, di malte di nuova produzione, resta sempre il dubbio che il confezionamento dei campioni eseguito in laboratorio possa non corrispondere pienamente con quanto previsto in cantiere, per le difficoltà determinate dall'approvvigionamento dei materiali, l'eventuale confezionamento a piè d'opera, i tempi e le modalità di stagionatura, le condizioni di esposizione, etc.

A tal proposito Mannoni (1990) si chiede se sia veramente possibile, con gli strumenti relativi alla conoscenza scientifica odierna, individuare ogni caratteristica di manufatti prodotti sulla base di un sapere che ha basi e spiegazioni radicalmente differenti¹.

Questa richiesta è lecita sia nel caso in cui si operi con manufatti dei quali si dispone soltanto del prodotto finale invecchiato, come asserisce lo stesso autore, sia nel caso in cui si operi con campioni di materiali che, seppur confezionati in accordo con le ormai consolidate procedure riconosciute anche in ambito internazionale, per la loro stessa natura composita non possono necessariamente avere le stesse caratteristiche di quelli che il tecnico andrà a mettere in opera, per le variabili dovute alle modalità di impasto, alla quantità d'acqua, ai tempi di lavorazione, necessariamente differenti tra le quantità di miscela confezionata in laboratorio e quelle prodotta in cantiere, etc.

Allo stato attuale delle cose possiamo quindi affermare che, nonostante la ricchezza di studi e di ricerche avviate in materia, non è possibile avere una completa conoscenza delle caratteristiche degli intonaci, ma tuttavia si ritiene possano essere ritenute univoche le metodologie di studio ed abbastanza rappresentativi i dati indagabili.

Ciò premesso, si ritiene che un significativo contributo alla conoscenza scientifica delle malte per intonaco possa derivare dallo studio di alcune caratteristiche che, secondo un'opportuna e consolidata classificazione categoricaⁱⁱ, possiamo distinguere in meccaniche, chimiche, fisiche e morfologiche.

2.1. CARATTERIZZAZIONE MECCANICA

La resistenza meccanica di una malta non può essere sempre vista come una “qualità”, ma piuttosto come una caratteristica che può influire in modo positivo o anche negativo sulle proprietà dell'intonaco, a seconda delle diverse situazioni.

Il comportamento meccanico è fortemente determinato dalle caratteristiche della miscela che la compone. La presenza di un legante idraulico, piuttosto che di un legante aereo, un buon assortimento granulometrico, composto da aggregati molto fini e da aggregati di media dimensione, una lenta stagionatura, etc. possono contribuire ad ottenere una malta con resistenza meccanica elevata.

I parametri più significativiⁱⁱⁱ per la caratterizzazione meccanica di una malta sono la resistenza a compressione, il modulo elastico a compressione e la resistenza a trazione.

Queste caratteristiche e le relative prove vengono, in genere, mutate dagli studi effettuati su malte cementizie, cementi e calcestruzzi, per i quali è imprescindibile riuscire ad ottenere una buona prestazione meccanica.

Oltre alle predette caratteristiche, la caratterizzazione meccanica può fornire dati sulla resistenza all'abrasione, sulla gelività, sul ritiro idrometrico e la dilatazione termica.

Di notevole interesse, per l'applicazione specifica sugli intonaci, risulta la valutazione dell'aderenza al supporto.

La caratterizzazione meccanica di una malta si traduce, spesso, nella stima quantitativa di dati ottenuti attraverso prove di determinazione delle proprietà meccaniche.

2.1.1. Requisiti e tecniche di analisi più comuni

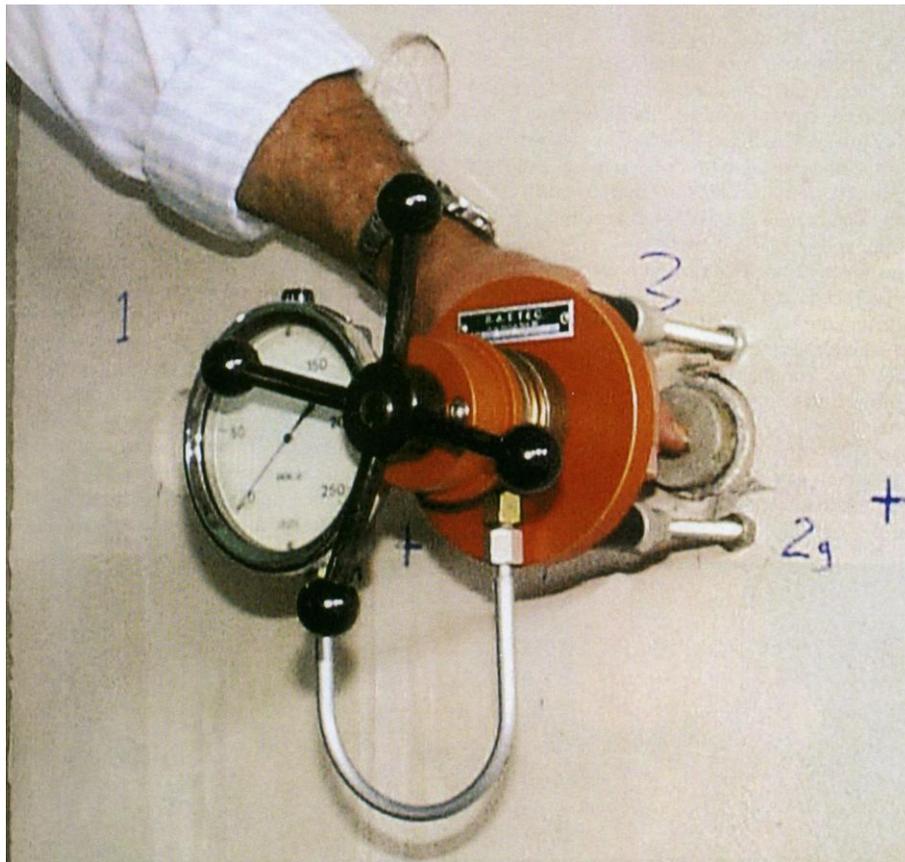
Ci sono casi in cui la resistenza meccanica elevata è un handicap per le caratteristiche globali della malta e dell'intonaco: pur tuttavia, si ritiene opportuno conoscerne sempre i valori per ogni considerazione conseguente. Gli intonaci, infatti, devono rispondere spesso ai requisiti di protezione e di finitura del paramento murario e, a tal fine, devono possedere determinate caratteristiche meccaniche.

Tra le più importanti, vi è l'elevata aderenza al supporto: gli intonaci confezionati utilizzando il grassello di calce hanno un'altissima capacità di adesione alla maggior parte dei supporti, per l'ottima plasticità^{iv} del legante e l'alto livello di ritenzione dell'acqua.

Il più delle volte non essendo particolarmente sollecitate dal punto di vista meccanico, l'unico requisito che si richiede alle malte per intonaco consiste nell'offrire una resistenza alle sollecitazioni meccaniche tale da impedirne i fenomeni di distacco, erosione e/o disgregazione^v.

Parecchi studi ed osservazioni hanno dimostrato che, con riguardo alle interazioni con il supporto murario, gli intonaci dovrebbero offrire una resistenza meccanica ed una rigidità assai simile a quella dei supporti cui sono applicati, così come dovrebbe aversi per il coefficiente di dilatazione termica: ciò al fine di evitare che si possano sviluppare coazioni tra gli strati dell'intonaco ed il supporto murario determinate dalle semplici forze agenti sull'intonaco, dovute al proprio peso, ovve-

Fig. 2.1. Valutazione dell'aderenza di una malta per intonaco al supporto attraverso la prova di strappo (pull – off).



ro da fattori esterni quali, ad esempio, le azioni sismiche (agenti nella direzione del piano della muratura) o le forti escursioni termiche.

Le analisi per la determinazione delle caratteristiche di resistenza meccanica possono essere svolte in situ, per malte già in opera, ovvero in laboratorio, su campioni appositamente preparati.

Lo studio delle caratteristiche meccaniche su campioni di malta prelevati in situ e condotti in laboratorio non è, in genere, ritenuto particolarmente significativo per l'esiguità degli spessori di materiale campionato, ovvero per l'inevitabile perdita di coesione tra le parti in campioni spesso degradati o, in generale, scarsamente resistenti, anche in ragione delle procedure di campionamento che, in ambito locale, possono essere anche notevolmente invasive.

Le prove di tipo meccanico eseguibili su intonaci in opera si limitano soltanto ad un ristretto numero di tipologie.

Gran parte delle procedure di valutazione delle caratteristiche meccaniche derivano dall'ampio campo di studi relativo ai cementi, nei quali la determinazione delle resistenze meccaniche ha una notevole importanza in relazione agli obblighi normativi e di sicurezza.

L'esecuzione delle prove ha un'operatività piuttosto semplice, poiché i modelli di riferimento nella definizione delle procedure sono di immediata comprensione anche per coloro che non sono avvezzi alle pratiche di laboratorio. Pur tuttavia, si riscontrano spesso alcune difficoltà legate alla specificità del comportamento di alcune malte, specialmente se a bassa resistenza. Alcune tra queste criticità saranno evidenziate, con riferimento a specifiche procedure di prova, nell'ultima parte della ricerca e, in relazione ad esse, si avanzano le proposte per una possibile soluzione.

I parametri di riferimento in relazione ai risultati delle prove risultano piuttosto ampi e spesso legati ad una classificazione della malta: in qualche caso, come vedremo, si riscontrano addirittura alcune vacanze normative negli intervalli di resistenza, come avviene per le malte a comportamento idraulico a bassa resistenza, per le quali non è prevista una classificazione adeguata.

La prova per valutazione dell'aderenza al supporto^{vi}, la cui procedura è oggetto della norma EN 1015-18, consiste nell'esecuzione di un taglio di forma circolare nello spessore dell'intonaco da indagare, al fine di isolare una determinata area della superficie intonacata dall'influenza delle zone vicine; successivamente sulla predetta area andrà incollata una piccola piastra metallica, munita di un perno che, opportunamente collegato ad un apparecchio fornito di dinamometro (ovvero di opportuna strumentazione in grado di leggere gli sforzi di trazione), viene sollecitato a trazione fino allo strappo dell'intonaco dal supporto. La lettura della tensione di rottura, unitamente alla modalità di rottura, forniscono un'informazione quali-quantitativa sull'aderenza della malta da intonaco al supporto.

La prova di resistenza superficiale all'impatto sferico (norma UNI PROVVISORIE 9269:1988 "Edilizia. Pareti verticali. Prova di resistenza agli urti) consiste nella valutazione del diametro dell'area danneggiata dall'impatto di una massa sferica che colpisce la superficie

Fig. 2.2. La prova di resistenza superficiale all'impatto sferico è largamente impiegata nella valutazione degli urti sulle superfici edilizie verticali per la facilità di esecuzione e la rapidità di lettura del risultato (foto TAVARES ET ALT., 2008).



con un'energia^{vii} univocamente determinata. Assai simile risulta la prova dello sclerometro a pendolo (*Schmidt hammer rebound test*), che fornisce informazioni sull'assorbimento di energia potenziale battente sulla superficie e trasformata in deformazione plastica della malta: la strumentazione legge l'entità del rimbalzo. La letteratura tecnica ritiene^{viii} che queste prove risultino poco significative per intonaci in calce, essendo gli strumenti tarati quasi esclusivamente per malte cementizie a resistenza più elevata, anche se negli ultimi anni sono state proposte diverse soluzioni al proposito, attraverso la modifica degli strumenti di valutazione^{ix}.

I metodi penetrometrici^x sono altresì impiegabili in situ per la valutazione dei parametri meccanici: particolarmente adatti alla valutazione della resistenza dei giunti in malta, qualora siano forniti di comparatori micrometrici possono essere anche impiegati nella valutazione della resistenza delle malte per intonaco.

La determinazione più esatta della resistenza a compressione di una malta è condotta su campioni appositamente predisposti in laboratorio: la prova consiste nel confezionamento di un travetto di dimensioni

standard che, portato a rottura per flessione, consente la successiva registrazione dei valori delle tensioni di rottura a compressione sui monconi. Questa tipologia di prova, della quale avremo modo di discutere in maniera più approfondita, è ritenuta dalla letteratura tecnica poco significativa, seppur consolidata dalla normativa, per analisi su campioni di malta non cementizia, per la lentezza dei fenomeni di presa^{xi}. A ciò si può aggiungere che la notevole dimensione del campione (un travetto di dimensioni pari a 40x40x160 mm), nonché la modalità di confezionamento a stampo, risultano poco pertinenti con gli effettivi spessori e le modalità di applicazione delle malte per intonaci.

La prova a compressione uniassiale è, altresì, utile per la determinazione del modulo elastico a compressione, attraverso una precisa lettura del diagramma sforzi-deformazioni.

Tra le prove per la determinazione della resistenza a trazione, le più comuni sono certamente quella indiretta, detta anche “brasiliana”, e quella per flessione, che precede la prova di resistenza meccanica a compressione. Meno diffusa è la prova di trazione diretta, nella quale il provino, opportunamente confezionato, viene sollecitato assialmen-

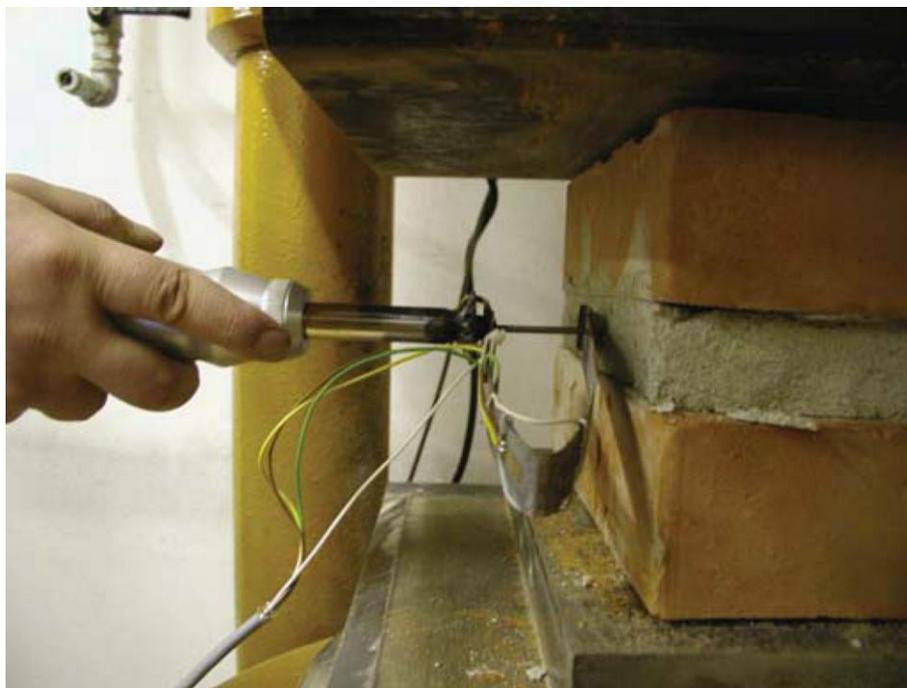


Fig. 2.3. I metodi penetrometrici possono distinguersi tra quelli che funzionano a percussione e quelli che, invece, funzionano anche a rotazione. La loro applicazione è certamente più nota nell'ambito della diagnostica sui materiali lignei (foto JURINA, 2007).

te. Pur ritenendosi scarsamente possibile avere un'immediata relazione tra le situazioni ricreate in laboratorio e quelle reali, dove la malta assume caratteristiche assai variabili, in relazione ai supporti, alle tecniche di lavorazione, all'esposizione termoigrometrica, etc., la conoscenza delle caratteristiche di resistenza a trazione ed a compressione della malta può essere utile per valutare, attraverso parametri di riferimento derivanti da procedure standardizzate, e quindi confrontabili tra loro, alcuni fenomeni reali, quali, ad esempio, la formazione delle fessure negli intonaci, per stati tensionali indotti da forze sia interne che esterne al sistema.

Le prove di valutazione della resistenza a flessione ed a compressione saranno anch'esse oggetto di un'analisi più approfondita nella parte finale della tesi.

2.2. CARATTERIZZAZIONE FISICA

Tra i molti parametri fisici riferibili alle malte, alcuni hanno certamente suscitato un maggiore interesse da parte dei ricercatori, anche per le strette relazioni che questi parametri hanno con la composizione chimica e mineralogica del materiale.

Le caratteristiche fisiche certamente più interessanti nel campo delle malte sono la porosità, l'assorbimento d'acqua, la permeabilità al vapore acqueo ed il contenuto d'acqua, in relazione all'ambiente circostante.

A queste devono certamente aggiungersi le caratteristiche ponderali relative alla densità, alla massa ed al peso specifico, ovvero quelle relative alla granulometria, all'igroscopicità.

La determinazione dei parametri fisici trova ampie applicazioni in edilizia, in relazione ai requisiti di traspirabilità dell'intonaco, leggerezza, isolamento termoacustico, aspetto, etc. Alcuni di essi risultano quindi di particolare interesse per la stretta relazione che possiamo instaurare, ad esempio, tra il requisito di traspirabilità e la permeabilità al vapore, tra la leggerezza e la determinazione del peso specifico o la porosità, etc.

Le prove più comuni per la caratterizzazione fisica sono eseguibili su campioni di malta prelevati in situ, ovvero su campioni appositamente confezionati in laboratorio.

Le prove di caratterizzazione fisica comprendono anche quelle eseguibili su campioni di malta fresca, utili per determinare la consistenza dell'impasto, la lavorabilità, i tempi di presa, il contenuto d'aria. Anche in questo caso, alcune tipologie di prova sono mutate dagli studi più strettamente riferibili alle malte cementizie.

La conoscenza scientifica dei parametri fisici è indispensabile per la diagnostica e/o la prevenzione dei più comuni fenomeni di degrado e/o alterazione macroscopica^{xii}: si pensi, ad esempio, alla relazione che la porosità può avere con i fenomeni di cristallizzazione dei sali all'interno delle murature o degli strati di intonaco, ovvero all'incidenza che un'elevata capacità di permeabilità al vapore acqueo può avere nel bilancio termogravimetrico degli ambienti interni.

2.2.1. Requisiti e tecniche di analisi più comuni

La valutazione della durabilità degli intonaci, intesa come la capacità di mantenere i livelli delle prestazioni e delle caratteristiche funzionali richieste nel tempo, sotto l'influenza di azioni prevedibili, in accordo con quanto definito nella norma UNI 11156-1:2006^{xiii}, è fortemente connessa alla verifica, anche qualitativa, della rispondenza di alcuni parametri fisici.

I requisiti fisici delle malte per intonaco possono essere anche notevolmente diversi a seconda dell'esposizione della superficie muraria, che può essere rivolta verso l'interno o verso l'esterno.

La loro conoscenza, come per gli altri parametri, è sempre opportuna a prescindere dalla singola applicazione, in quanto possono esserci casi in cui ad una determinata caratteristica è richiesto un livello alto, ed altri in cui alla stessa ne è richiesto uno molto basso.

Gli intonaci interni, ad esempio, vengono realizzati per lo più con malte aeree e svolgono un'importante azione di bilancio termogravimetrico, per cui necessitano di un'elevata permeabilità al vapore acqueo ed una buona capacità di assorbire (o anche rilasciare) acqua dall'atmosfera. L'intonaco per interni può anche contribuire

all'isolamento termico ed acustico degli ambienti confinati, seppur con spessori pari a pochi centimetri, per cui risulta utile avere un pacchetto di strati con una porosità abbastanza elevata, in modo da garantire un discreto isolamento attraverso l'aria contenuta all'interno dei pori. Le esigenze igienico-sanitarie relative all'aspetto superficiale degli intonaci per interni indicano che lo strato di finitura debba essere, nella maggior parte dei casi, rigorosamente liscio e che, quindi, la granulometria della frazione aggregata della malta impiegata per l'esecuzione della finitura sia ovviamente finissima.

Anche gli intonaci esterni, nella maggior parte delle applicazioni correnti, devono avere un'elevata permeabilità al vapore acqueo, per consentire la migrazione verso l'esterno dell'umidità presente negli ambienti interni e nello spessore della muratura. Alla stessa maniera, almeno nello strato di arriccio, l'intonaco esterno dovrebbe avere un basso coefficiente di assorbimento d'acqua, in modo da impedire che le acque piovane, o comunque presenti sulla superficie muraria, magari per inefficienza dei sistemi idraulici di smaltimento, possano infiltrarsi nella muratura e migrare verso gli ambienti interni, innescando i noti fenomeni di degrado dei materiali lapidei e delle murature.

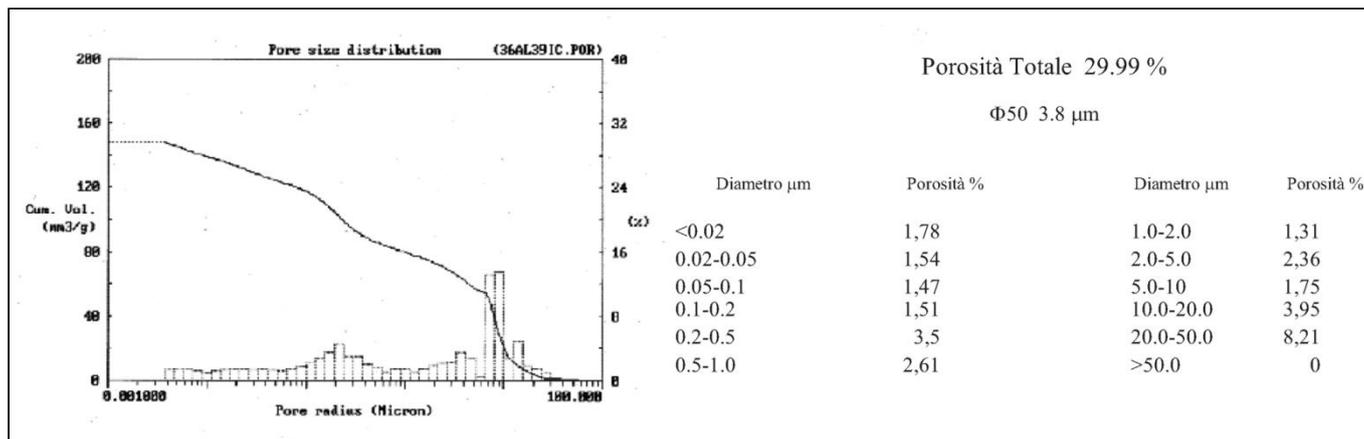
La capacità di assorbire acqua di una malta per intonaco e la permeabilità all'aria ed al vapore sono parametri influenzati dalla porosità che il materiale presenta.

La porosità è definita come il rapporto, espresso in percentuale, tra il volume dei pori (V_p) ed il volume di materiale in cui questi pori si trovano (volume apparente V_a), in accordo con quanto prescritto dalla norma UNI 11060: 2003^{xiv}:

$$P [\%] = \frac{V_p}{V_a} \cdot 100$$

Questa definizione, alquanto generale, necessita di alcune precisazioni: i pori, infatti, possono essere chiusi, ovvero in comunicazione tra loro e con l'esterno. In ragione di questa considerazione si definiscono la *porosità totale* e la *porosità totale aperta*, che prende in esame solo i pori comunicanti con l'esterno.

Le tecniche di analisi della porosità sono differenti, in funzione del parametro che vogliamo indagare: il volume apparente V_a si misura con



il picnometro a mercurio, mentre il volume reale V_r , determinato come la differenza tra il volume apparente V_a ed il volume della parte non porosa (ivi compreso l'eventuale volume dei pori non comunicanti), si misura col picnometro ad elio.

Va comunque sottolineato che, in generale, nelle malte la quasi totalità dei pori è comunicante con l'esterno, per cui la porosità totale si identifica il più delle volte con quella che abbiamo definito totale aperta.

I metodi ponderali vengono utilizzati per la determinazione della *porosità accessibile all'acqua* (detta anche efficace), ossia quella costituita da quei pori in cui l'acqua può entrare allo stato liquido, che si distingue anche in *porosità accessibile all'acqua a pressione ambiente* e *porosità accessibile all'acqua sotto vuoto*.

Di notevole importanza anche la conoscenza della distribuzione dei pori in funzione del diametro, utile, ad esempio, per comprendere la capacità che i pori hanno di contenere sali in forma cristallizzata, senza determinare fenomeni di disgregazione. La determinazione del diametro dei pori, che si effettua con porosimetro a mercurio forzato a pressione ad entrare nei pori più grandi e poi, per pressioni crescenti, in quelli più piccoli, è altresì utile per una più completa comprensione dei fenomeni di assorbimento d'acqua legati alla capillarità.

Pur essendo, però, la porosità un parametro di notevole interesse per la caratterizzazione fisica, un più immediato riscontro del comportamento di una malta per intonaco può trarsi dalle prove di assorbimento per immersione totale, a bassa pressione ovvero da quelle per capillarità, nonché dalle prove di permeabilità al vapore acqueo.

Fig. 2.4. Analisi porosimetrica di un campione di malta. Il campione, preventivamente essiccato in stufa, viene posto sotto vuoto e privato dell'aria contenuta all'interno della microstruttura. Il valore $\Phi 50$ indica che il 50% dei pori ha un diametro minore di $3,8\mu\text{m}$ (ALESSANDRINI, 2001).

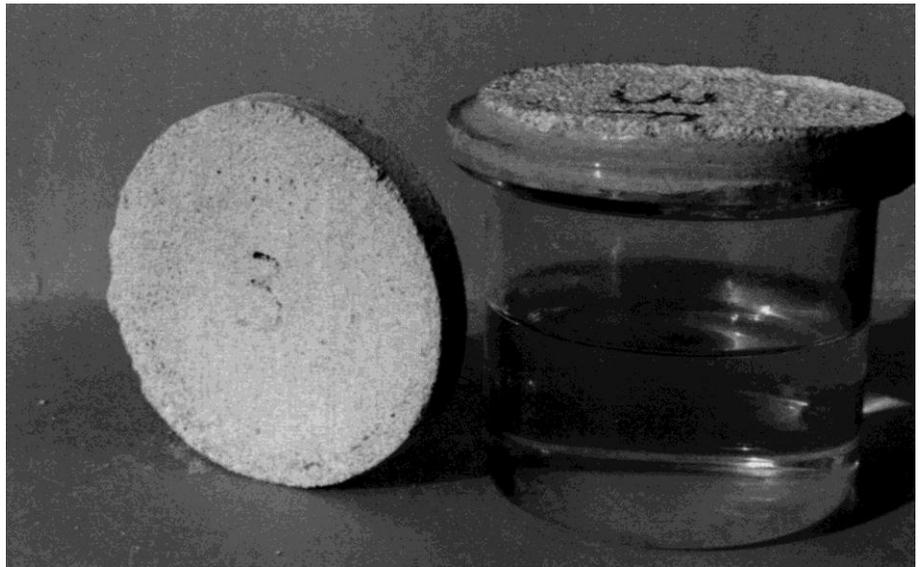
Queste tipologie di prova possono infatti essere meglio messa in relazione con le reali condizioni igrometriche in cui la malta si trova ad operare, anche se la riproduzioni in laboratorio delle assai variabili condizioni di umidità, spesso localizzate, cicliche, e quindi difficilmente riproducibili, non consente certamente un immediato riscontro. L'attendibilità di queste indagini risulta però notevole per la semplicità di esecuzione e la facilità di lettura del dato finale.

La prova di assorbimento per immersione totale viene effettuata con metodi ponderali su campioni essiccati e fornisce un coefficiente di imbibizione percentuale espresso in peso o in volume, ovvero un indice di saturazione, sempre in percentuale, che lega il coefficiente di imbibizione alla porosità totale.

La prova di assorbimento capillare può essere condotta, con modalità differenti, su campioni di malta prelevata in opera, ovvero su travetti appositamente confezionati^{xv}. La misura dell'assorbimento avviene sempre con metodi ponderali, attraverso misure ripetute nel tempo, ovvero misurando l'altezza della risalita capillare.

Anche la prova di assorbimento a bassa pressione può essere eseguita secondo diversi procedimenti: in ogni caso, però, la metodologia di prova è schematizzabile attraverso una piccola cella contenente acqua posta in perfetta aderenza con la superficie dell'intonaco, e collegata

Fig. 2.5. Dischetto di malta per intonaco di spessore pari a 10 mm e recipiente in vetro per l'esecuzione della prova di permeabilità al vapore secondo la norma DIN 52615. La prova misura la variazione di peso del sistema recipiente – acqua – malta, posto in ambiente a temperatura ed umidità controllata: la diminuzione è dovuta all'evaporazione dell'acqua attraverso la superficie dell'intonaco (foto COPPOLA, 1988).



ad una pipetta, sulla quale viene registrato, ad intervalli successivi, l'abbassamento determinato dalla quantità d'acqua assorbita attraverso la superficie di contatto tra la cella e l'intonaco^{xvi}.

La prova di permeabilità al vapore acqueo consiste nella predisposizione di un campione di malta di spessore determinato che viene posto, tramite opportune guarnizioni in gomma, al di sopra di una cella con funzione di tappo. La cella, contenente specifiche soluzioni acquose, viene posta in essiccatore e, tramite pesate successive, si determina il flusso di vapore acqueo che attraversa la superficie del campione.

Le prove sulla malta fresca sono utili per il controllo e la gestione delle fasi applicative: il controllo della consistenza^{xvii}, determinata per spandimento con tavola a scosse ovvero attraverso prove di penetrazione, aiuta a non eccedere nel contenuto d'acqua nell'impasto, e quindi a ridurre al minimo i fenomeni di ritiro; la determinazione dei tempi di lavorabilità e di presa^{xviii}, per penetrazione, spandimento o per adesione della malta fresca misurate ad istanti successivi, consente di gestire i processi di produzione della malta, ottimizzando la durata delle lavorazioni in cantiere e riducendo al minimo gli sprechi; la determinazione del contenuto d'aria della malta fresca^{xix}, ottenuta in apposito recipiente a pressione, ovvero ponendo l'impasto fresco in soluzione acquosa di alcole, può essere messa in relazione con l'indice di porosità totale che la malta avrà allo stato indurito.

2.3. CARATTERIZZAZIONE CHIMICA

L'approccio chimico nella conoscenza della malta ha, da qualche decennio, una notevole diffusione nel campo delle ricerche scientifiche, specialmente nel territorio italiano, dove l'orientamento metodologico multidisciplinare nello studio del patrimonio costruito storico ha coinvolto ambiti scientifici prossimi a quello dell'ingegneria edile e dell'architettura, quali la chimica, nel nostro caso, e la geologia, od anche settori più distanti, quali la biologia, ma anche la medicina, ad esempio nel settore della diagnostica per immagini.

La metodologia di analisi chimica di una malta ha notevoli punti di contatto con le tradizionali tecniche di studio dei leganti, ossia delle



Fig. 2.6. Determinazione della consistenza della malta fresca con metodo penetrometrico.



Fig. 2.7. La composizione mineralogica della malta può essere individuata attraverso l'analisi diffrattometrica sul campione polverizzato. (ALESSANDRINI, 2001)

calci e dei cementi, mirate alla conoscenza del contenuto e del dosaggio di alcuni componenti elementari; per dissoluzione in acido, possono, ad esempio, ottenersi informazioni circa la quantità di calcio, magnesio, alluminio o ferro (espressi in ossido), ovvero la presenza di composti, quali la silice, ovvero il contenuto di anidride carbonica (che ci informa sull'entità dei carbonati) e di acqua di assorbimento.

La malta, però, necessita di un'attenzione in più, rispetto a quella posta allo studio delle calci e dei cementi, dovuta alla presenza della frazione aggregata. Secondo Alessandrini, questa maggiore attenzione ha determinato due differenti metodologie di studio chimico delle malte. Da un lato la metodologia *tecnologica*, che considera la malta un materiale unitario e non la semplice somma di elementi chimici, ed utilizza, per la caratterizzazione, raffinate tecniche e strumentazioni analitiche. Dall'altro la metodologia degli *archeologi*, maggiormente interessati ai problemi di inquadramento cronologico, che, mirando alla ricerca di dati specifici, come la presenza di determinate componenti chimiche che indicano la provenienza di un materiale, o l'impiego, ad una certa data, di precise componenti, puntano su metodi più semplici e sull'utilizzo di strumentazioni a basso costo.

Le due metodologie hanno anche un differente approccio al campione esaminabile: i *tecnologi* esaminano un numero piccolo di campioni, ma in maniera molto approfondita, mentre gli *archeologi*, un numero elevato, anche se in modo più sommario^{xx}.

L'eterogeneità dei metodi di analisi chimica non consente, in questa sede, in accordo con quanto già visto per le altre forme di caratterizzazione, una presentazione completa di tutte le tecniche di analisi possi-

bili. Pur tuttavia si ritiene che la discussione riguardo ad alcune metodologie di studio possa essere alquanto significativa per inquadrare la complessità della caratterizzazione chimica, specialmente nella comune individuazione di determinate caratteristiche, quali la composizione mineralogica e chimica della malta, sia nella frazione legante che nella frazione aggregata, il grado di idraulicità, la presenza di sali solubili, particolarmente dannosi per l'attivazione dei fenomeni di degrado, l'eventuale presenza di additivi di origine organica, etc.

2.3.1. Requisiti e tecniche di analisi più comuni

Discutere dei requisiti chimici che una malta per intonaco deve possedere non è certamente una cosa immediata: dipende infatti dal tipo di intonaco che si intende esaminare, dall'utilizzo, dalla posizione all'interno della costruzione, nonché da questioni di origine economica. L'incompatibilità chimica di una malta per intonaco con il supporto o, in generale, con l'ambiente in cui l'intonaco viene realizzato, si manifesta lentamente, nel tempo, in presenza di determinate condizioni che possano innescare l'attivazione dei fenomeni di degrado chimico, nelle forme definite dalla norma UNI 11182:2006.

La presenza, ad esempio, di aggregati derivanti dalla sedimentazione di biocalcari di origine marina, ad elevato contenuto di cloruri, può determinare, nel caso in cui sulla componente aggregata non venga eseguito un accurato lavaggio con acqua desalinizzata, l'attivazione dei noti fenomeni di disgregazione della malta per cristallizzazione dei sali presenti nella miscela: tale fenomeno può, però, avvenire soltanto se la malta viene improvvisamente a trovarsi in condizioni fisiche tali da attivare i processi di migrazione e cristallizzazione dei sali.

Essere, quindi, a conoscenza della presenza di determinati componenti chimici nella malta, quali, in questo caso, i cloruri, è fondamentale per prevenire i fenomeni di degrado.

La diffrattometria R.X. consente di identificare con precisione la composizione mineralogica della malta, in termini qualitativi e semi-quantitativi dei componenti microcristallini presenti in concentrazione superiore al 5% della massa totale. Il campione viene polverizzato e posto all'interno dello strumento, il quale, ad analisi eseguita, fornisce



Fig. 2.8. La strumentazione per l'esecuzione delle analisi tramite spettrofotometria IR può essere agevolmente trasportata anche fuori dal laboratorio di sperimentazione.

un diagramma a picchi, nel quale a ciascun picco corrisponde la presenza, nel campione, di un determinato materiale cristallino.

Su campioni provenienti da intonaci esistenti, la prova è utile per determinare la presenza di minerali specifici, dovuti, ad esempio, all'impiego di un tipo di legante o di una malta non completamente carbonatata, la presenza di sali, di componenti derivate dal degrado della malta^{xxi}. Non è però possibile distinguere, ad esempio, se il carbonato di calcio riscontrato nel campione è maggiormente riferibile ai fenomeni di carbonatazione del legante, ovvero alla frazione aggregata, a meno che non venga precedentemente disposta la separazione tra le due frazioni^{xxii}.

Le componenti non cristalline, quali, ad esempio quelle di origine organica, o quelle amorfa, come la silice, sono, invece, riscontrabili attraverso gli strumenti per la spettrometria di fluorescenza a raggi X che, a differenza del diffrattometro, non leggono l'angolo di riflessione del raggio emesso sul cristallo, bensì l'energia emessa sotto forma di radiazione dall'elemento chimico analizzato. L'esito dell'indagine è una caratterizzazione quali-quantitativa della malta, anche nelle singole componenti legante ed aggregata.

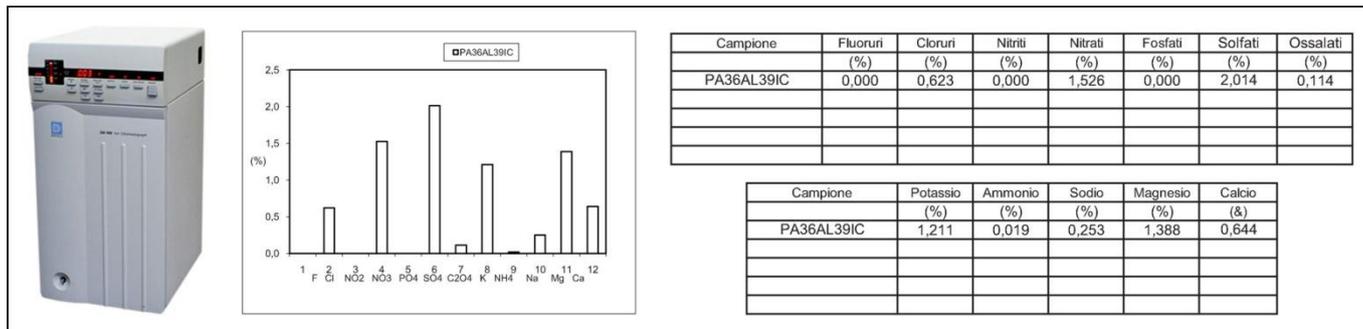
Un risultato simile è fornito dalla spettrofotometria IR, il cui principio di funzionamento si basa sulla capacità che tutte le sostanze organiche e moltissimi composti inorganici hanno di assorbire le radiazioni infrarosse, secondo spettri tipici per ciascuna sostanza.

Anche in questo caso l'analisi può essere effettuata sul campione totale o sulla sola frazione legante o aggregata.

L'eventuale presenza di ioni metallici è indagabile attraverso la spettrofotometria di assorbimento atomico.

La cromatografia ionica è, invece, un'indagine specifica per la determinazione quali-quantitativa esatta degli anioni dei cationi presenti nella malta. Questa tecnica è particolarmente utile per la valutazione dello stato di degrado di una malta, in base alla presenza di sali solubili presenti all'interno.

Il contenuto totale di carbonato può essere determinato per dissoluzione del campione essiccato in HCl: questa tecnica prende il nome di calcimetria volumetrica e può essere condotta anche separatamente sulla frazione legante e su quella aggregata.



La misura della conducibilità elettrica^{xxiii}, attraverso la misura della resistenza tra celle elettrolitiche, del campione macinato e posto in soluzione acquosa, permette di determinare rapidamente la presenza di sali solubili.

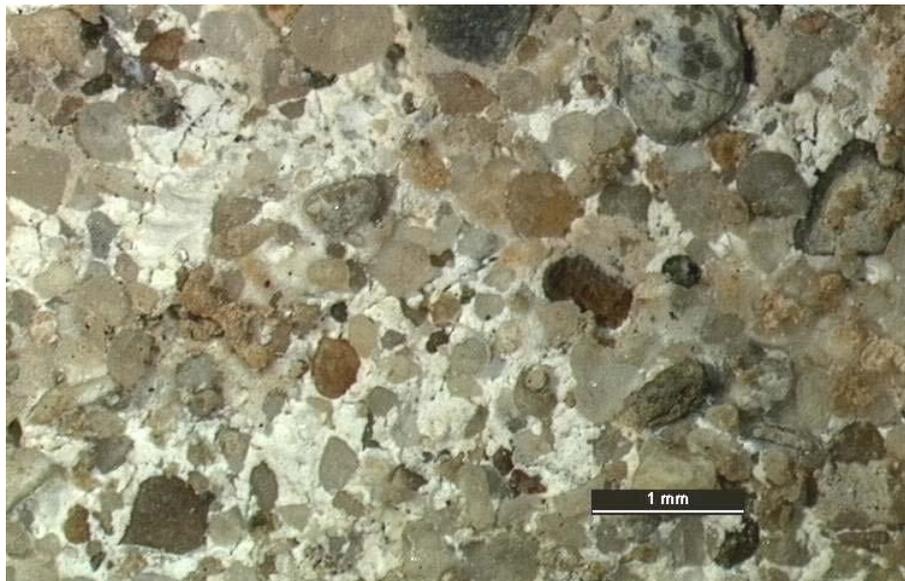
L'analisi dei campioni di malta ottenuti dalla formulazione di miscele che impiegano leganti idraulici non può effettuarsi, ad esempio, con tecniche come la diffrazione, in quanto i composti amorfi o non perfettamente cristallizzati, tipici delle malte idrauliche e cementizie, non potrebbero essere riconosciuti. Si utilizzano, in questo caso, le analisi termiche differenziali (DTA) e quella termogravimetrica (TGA). Queste consistono nel contemporaneo riscaldamento del campione, accuratamente macinato, e di un inerte di riferimento, e nella continua registrazione delle eventuali perdite di peso alle diverse temperature (TGA), ovvero nella registrazione delle differenze di temperatura tra il campione e l'inerte (DTA). La lettura delle curve dei termogrammi permette di risalire ai diversi componenti mineralogici ed organici costitutivi.

2.4. CARATTERIZZAZIONE MORFOLOGICA

L'approccio conoscitivo morfologico è quello che, tra gli altri aspetti, contribuisce ad arricchire i dati puramente materici sulla malta, con informazioni di carattere più generale sulla costituzione dell'intonaco. L'indagine macroscopica, di tipo visivo, prende in esame aspetti quali la funzione della malta (posizione stratigrafica), lo spessore degli strati, il colore e la tessitura superficiale, le modalità di lavorazione, la morfologia del degrado, la coesione fra gli strati, etc.

Fig. 2.9. La cromatografia ionica è una tecnica utile per la qualificazione e la quantificazione degli ioni disciolti in una soluzione acquosa contenente la polvere derivante dalla macinazione di un campione di malta essiccato (ALESSANDRINI, 2001).

Fig. 2.10. L'osservazione allo stereomicroscopio è un'operazione indispensabile per la separazione dei singoli strati dell'intonaco, al fine di sottoporre le diverse malte alle indagini chimiche su campioni macinati (foto ALESSANDRINI, 2001).



Gli aspetti visibili possono essere indagati in molte scale, da, quella del micron, attraverso le osservazioni al microscopio elettronico, fino a quella edilizia^{xxiv} o, più propriamente, visibile.

Le osservazioni possono essere svolte con tecniche che coinvolgono la sfera del visibile umano, quali, ad esempio, l'osservazione al microscopio ottico, ovvero con tecniche che sfruttano altre proprietà delle onde elettromagnetiche: si pensi, infatti, alle applicazioni termografiche sull'intonaco, utili a determinare l'eventuale presenza di distacchi^{xxv}, ovvero alle applicazioni magnetometriche, che rilevano la presenza di metalli al di sotto della superficie intonacata.

Le analisi possono, quindi, essere svolte sia in situ, per osservazione diretta sull'oggetto di indagine, che in laboratorio, su campioni appositamente trattati per l'osservazione: la più diffusa tecnica di preparazione del campione per la lettura morfologica della malta è quella che ne prevede la riduzione in sezione lucida o sottile.

2.4.1. Requisiti e tecniche di analisi più comuni

Le caratteristiche morfologiche di una malta sono sempre legate alle istruzioni e modalità per il confezionamento. In accordo, infatti, con la

lunga e consolidata tradizione orale e trattatistica, le differenti proporzioni fra le frazioni legante ed aggregata sono un carattere distintivo delle diverse tipologie di malta, anche in ragione degli usi specifici per le quali sono impiegate.

Tra le più comuni caratteristiche morfologiche indagate nei campioni di malta provenienti, per lo più, dal costruito storico, un certo rilievo è assunto dalla determinazione del rapporto legante/aggregato. Questo è possibile attraverso l'analisi morfologica della sezione lucida del campione al microscopio ottico in luce riflessa.

La stessa analisi microscopica può consentire altresì la lettura della sequenza stratigrafica dell'intonaco, il riconoscimento dell'orientamento^{xxvi} e delle caratteristiche morfologico-dimensionali degli elementi costitutivi, la stima delle quantità relative dei minerali che costituiscono i singoli strati. A questo possono aggiungersi le informazioni sulla natura degli eventuali depositi e delle forme di alterazione.

L'analisi per microscopia ottica in luce trasmessa è invece eseguita su sezioni di campione ridotte allo spessore di circa 30 μm , in modo da

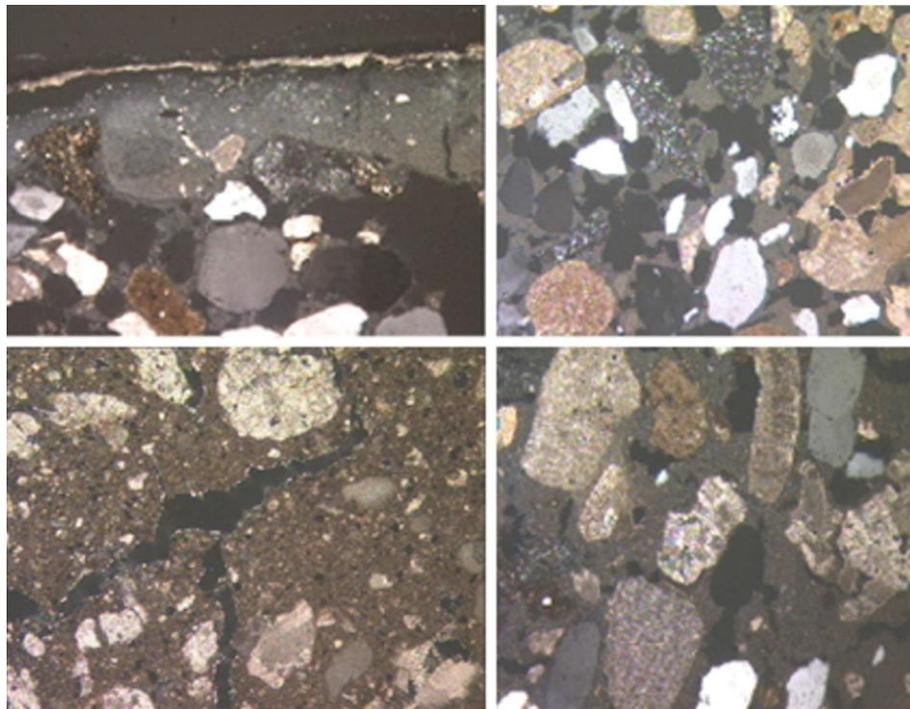


Fig. 2.11. La sezione sottile mostra, insieme alle caratteristiche mineralogiche, la stratificazione dell'intonaco, l'assortimento granulometrico dell'aggregato, la dimensione e la forma dei grani, la presenza di eventuali fessure da ritiro (foto ALESSANDRINI, 2001).

diventare trasparenti alla luce (altrimenti dette “sezioni sottili”). Questa tipologia di analisi, oltre che evidenziare alcune caratteristiche già desumibili dall’analisi della sezione lucida, consente di ottenere informazioni sulla natura mineralogico-petrografica dell’aggregato, ma anche sulla composizione del legante (ad esempio sul materiale impiegato per la preparazione della calce). Lo studio dei vuoti in sezione sottile, se il campione viene precedentemente impregnato con resine fluorescenti, può fornire indicazioni sul grado di idraulicità^{xxvii}.

Lo studio in sezione sottile può essere utile per determinare, inoltre, la presenza di *calcinelli*, ossia di porzioni di calce idratate e carbonatate in opera, indice di una mancata attenzione nelle fasi di spegnimento dell’ossido di calcio, e di una scarsa qualità dell’intonaco per le sovra-tensioni che l’aumento di volume del *calcinello* può determinare nella malta già indurita. Il riscontro, poi, di una notevole presenza di pori di grande dimensione può essere indice di un eccesso di acqua nell’impasto della malta.

L’analisi morfologica per microscopia può condursi anche con la tecnologia elettronica a scansione S.E.M., che consente l’osservazione del campione fino a 100.000 ingrandimenti e, utilizzando cristalli analizzatori, può anche fornire un’analisi qualitativa degli elementi chimici presenti. La caratterizzazione chimico-morfologica completa può ottenersi sia per il legante, nel caso in cui sia evidente la presenza di grumi, sia per la frazione aggregata, ovvero per gli eventuali depositi

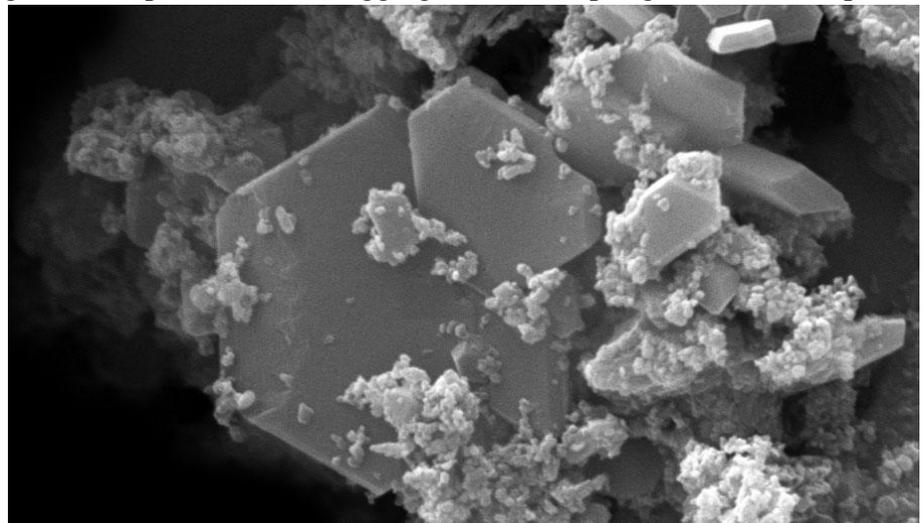


Fig. 2.12. Cristalli di portlandite (denominazione mineralogica dell’idrossido di calcio) osservati al microscopio elettronico a scansione SEM (RATTAZZI, 2007).

superficiali, nel caso di campioni prelevati da intonaci esistenti: in quest'ultimo caso, l'analisi può essere utile per individuare il più idoneo metodo per la rimozione e la pulitura delle superfici.

L'analisi al S.E.M. può altresì evidenziare i fenomeni di cristallizzazione dei sali e l'eventuale presenza di agenti biodeteriogeni, quali muffe e batteri.

Un'attenta osservazione della superficie intonacata può svolgersi in situ con la tecnica video-microscopica a fibre ottiche. La tecnica risulta particolarmente utile per la valutazione dell'efficacia di interventi di pulitura su porzioni ben individuate di superfici intonacate.

Oltre a svolgersi con le strumentazioni di tipo ottico che abbiamo visto finora, l'analisi morfologica può avvalersi anche di altre tecniche.

Le proprietà delle onde elettromagnetiche sono, ad esempio, utili per la valutazione delle variabili cromatiche, attraverso l'analisi colorimetrica o spettrofotometrica; questa analisi è indispensabile per gli interventi di ripristino di porzioni d'intonaco su superfici che presentano lacune, ovvero nel caso in cui si vogliono utilizzare tecniche di riequilibrio cromatico delle superfici intonacate.

La termografia invece, che estende lo spettro del visibile anche alle onde infrarosse, può avere applicazioni utili nelle operazioni di diagnostica su superfici trattate ad intonaco: possono rilevarsi, ad esempio, la forte presenza di umidità in determinate zone della muratura, che potrebbe essere dovuta all'alta concentrazione di sali solubili igroscopici, ovvero, come già detto, la presenza di distacchi, o di porzioni



Fig. 2.13. La termografia rivela le zone ad elevate presenza di umidità, dove è più probabile che possano attivarsi i meccanismi di degrado della malta.

di strati nascosti dalle finiture, a comportamento termico anomalo rispetto alle aree vicine, ovvero ancora la distribuzione in profondità di prodotti consolidanti iniettati in zone distaccate della superficie intonacata^{xxviii}.

Le proprietà delle onde sonore possono, invece, tornare utili per valutare la presenza di distacchi nell'intonaco con metodi ultrasonici.

ⁱ Cfr. MANNONI, T., *Dalle analisi dello stato attuale alla conoscenza dei modi di produzione degli intonaci*, in BISCONTIN, G. (a cura di), *Superfici dell'architettura: le finiture - Atti del Convegno di Studi, Bressanone, 26 - 29 giugno 1990*, Padova, Libreria Progetto Editore, 1990

ⁱⁱ Cfr. FEIFFER, C., *La conservazione ...*, op. cit.

ⁱⁱⁱ La scelta dei parametri è frutto delle ricerche pubblicate nel 1996 dal prof S. Di Pasquale sulle malte di calce idrata, nell'ambito di una convenzione di ricerca stipulata tra il Ministero per i Beni Culturali e Ambientali e l'Università di Firenze. Cfr. PECCHIONI et al., *Le malte antiche e moderne ...*, op. cit.

^{iv} La plasticità è la proprietà della malta, o del legante in pasta, di permettere deformazioni continue e permanenti in ogni direzione. Un materiale poco plastico è generalmente duro da lavorare, mentre un materiale plastico è facilmente lavorabile. Cfr. RATTAZZI, A., *Conosci il grassello di calce? Origine, produzione e impiego del grassello in architettura, nell'arte e nel restauro*, Monfalcone (GO), Edicom Edizioni, 2007

^v Così definiti, in accordo con quanto prescritto dalla norma UNI 11182:2006 *Beni Culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Descrizione delle forme di alterazione – Termini e Definizioni*.

^{vi} Per una più accurata analisi della prova di aderenza al supporto cfr. Parte III - § 15.1

^{vii} L'energia è determinata dalla massa della sfera, dall'altezza dalla quale viene fatta cadere, con velocità iniziale nulla, e dal percorso di caduta.

^{viii} Cfr. BINDA, L., SAISI, A., ANZANI, A., TIRABOSCHI, C., *Progetto di indagini per la diagnosi e metodi per il controllo dell'intervento*, in AA.VV., *Progettare il restauro, Atti del Corso*, Padova, Edizioni Libreria Cortina, 1999

^{ix} Cfr. TAVARES, M., MAGALHÃES, A. C., VEIGA, R., VELOSA, A., AGUIAR, J., *Métodos de diagnóstico para revestimientos de edificios antiguos. Importancia y aplicabilidad de los ensayos in situ*, «Revista Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico – PH», Aprile 2005

^x Per una più completa analisi dei metodi di valutazione dei parametri di resistenza meccanica delle malte attraverso prove con strumenti a percussione cfr. JURINA, L., *La caratterizzazione meccanica delle murature, Parte prima: Prove penetrometriche*, Proceedings of the International Conference C.I.A.S., Cipro, 2007

^{xi} A differenza delle malte cementizie, per le quali il valore della resistenza meccanica caratteristica è registrato nel termine ritenuto sufficientemente utile di 28 giorni,

le malte non cementizie hanno bisogno di tempi di stagionatura più lunga, poiché la variazione della resistenza caratteristica, ad esempio, a 28 ed a 90 giorni, è notevolmente differente. Si veda, a tal proposito, fra gli altri, VELOSA, A. L., CACHIM, P. B., *Hydraulic-lime based concrete: strenght development using a pozzolanic addition and different curing conditions*, «Construction and Building Materials», 2009, n. 23

^{xii} Cfr. nota ^v

^{xiii} Il cui titolo è *Valutazione della durabilità dei componenti edilizi . Parte 1: Terminologia e definizione dei parametri di valutazione*.

^{xiv} Il cui titolo è *Determinazione della massa volumica e della percentuale dei pori*.

^{xv} Circa le modalità di esecuzione della prova di assorbimento per capillarità su travetti appositamente confezionati, avremo modo di discutere meglio le procedure di prova nella Parte III - § 14.

^{xvi} Anche la prova di assorbimento a bassa pressione, condotta secondo il metodo Karsten, sarà meglio descritta nella Parte III - § 15.2.

^{xvii} Cfr., in ambito nazionale ed europeo, la norma UNI EN 1015-3:2007 *Metodi di prova per malte per opere murarie – Parte 3: Determinazione della consistenza della malta fresca (mediante tavola a scosse)* e la norma UNI EN 1015-4:2000 *Metodi di prova per malte per opere murarie – Determinazione della consistenza della malta fresca (mediante penetrazione della sonda)*.

^{xviii} Cfr., in ambito nazionale ed europeo, la norma UNI EN 1015-9:2007 *Metodi di prova per malte per opere murarie – Parte 9: Determinazione del tempo di lavorabilità e del tempo di correzione della malta fresca*.

^{xix} Cfr., in ambito nazionale ed europeo, la norma UNI EN 1015-7:2000 *Metodi di prova per malte per opere murarie – Determinazione del contenuto d'aria della malta fresca*.

^{xx} Cfr. ALESSANDRINI, G., *Gli intonaci nell'edilizia storica: metodologie analitiche per la caratterizzazione chimica e fisica*, in BISCONTIN, G., VOLPIN, S., (a cura di), *Superfici dell'architettura: le finiture*, Atti del VI convegno di studi "Scienza e Beni Culturali", Padova, Libreria Progetto Editore, 1990.

^{xxi} La presenza, ad esempio, di idromagnesite indica che siamo in presenza di una malta confezionata con calce magnesiaca, mentre la thaumasite indica che stiamo esaminando una malta cementizia in corso di alterazione. Cfr. PECCHIONI et al., *Le malte antiche e moderne ...*, op. cit.

^{xxii} La separazione della frazione legante dall'aggregato può avvenire per blanda macinazione del campione in un mortaio, tale da non portare alla frantumazione dell'aggregato, successiva frantumazione della malta con tecnica ad ultrasuoni e setacciatura. Il trattamento ad ultrasuoni e la separazione allo stereomicroscopio con bisturi e spatoline andranno ripetute fino alla completa separazione tra le due frazioni. Cfr. PECCHIONI et al., *Le malte antiche e moderne ...*, op. cit.

^{xxiii} Si definisce conducibilità elettrica specifica il reciproco della resistenza di un centimetro cubo di soluzione misurata ad una determinata temperatura, fra due elettrodi a facce piane parallele di superficie pari a 1 cm².

^{xxiv} Così definita da C. Feiffer, per indicare la scala della tipologia di analisi utili ad indagare, ad esempio, le relazioni tra l'intonaco e le superfici murarie (si ricordano, al proposito, le applicazioni termografiche, stratigrafiche e fotogrammetriche). Cfr. FEIFFER, C., *La conservazione ...*, op. cit.

^{xxv} Per l'analisi sperimentale della validità delle indagini termografiche per la valutazione di distacchi cfr. BRAVIN, E., CAROLI, L., ESPOSTI, W., LACCI, R., MERONI, I., POLLASTRO, C., TIRLONI, P., VAI, A., *Diagnosi non distruttiva*, «Modulo», 1993, n. 196.

^{xxvi} L'orientazione dei grani della componente aggregata può essere utile per ottenere alcune indicazioni sulla pressione che l'operatore ha esercitato nell'applicazione della malta. Cfr. PECCHIONI et al., *Le malte antiche e moderne ...*, op. cit.

^{xxvii} L'impiego di leganti a base di calce aerea determina una notevole microporosità nella malta, per cui, all'aumentare del grado di idraulicità di una malta si osserva una diminuzione della fluorescenza del campione, dovuta alla riduzione della porosità.

^{xxviii} Cfr. CODELLO, R., *L'intonaco: conoscenza e conservazione*, Firenze, Alinea, 1996

3. LA PRESENZA SUL MERCATO

Le difficoltà del tecnico di confrontarsi con le malte presenti sul mercato sono oggetto di recenti discussioni in letteratura tecnica ed in convegni specializzati: la scarsa trasparenza comunicativa delle aziende, l'impossibilità di riconoscere i vari componenti delle miscele commercializzate e la copertura delle stesse con brevetti non consentono infatti di confrontare tra loro i materiali. Al proposito scrive Feifer ([1], 2007):[...] *le indicazioni merceologiche confondono di proposito i dati, né si sa, fatto forse più grave, cosa c'è dentro il sacco che si acquista o, ancor peggio, se la descrizione corrisponde al contenuto.*

Per fare un esempio, il legante calce viene spesso indicato nelle schede descrittive con denominazioni commerciali piuttosto arbitrarie, sebbene sia prescritto che venga classificato ed indicato dai produttori in accordo con le norme internazionali: ritroviamo quindi in commercio le calce naturali, le romane, le etrusche, quelle cotte a legna, quelle soffici, le ecologiche, le calce forti e deboli, quelle tradizionali, etc.



Fig. 3.1. La fornitura in cantiere dei componenti della malta può avvenire, tra gli altri modi, in sacchi ed in bidoni che spesso vengono riutilizzati dalle maestranze.

Il caotico mercato non ci consente quindi di comprendere la corrispondenza scientifica tra la sostanza reale e la definizione merceologica perché fuori dal sacco non è obbligatoria la descrizione dei componenti. All'interno dei sacchi molte volte si trovano prodotti di grande qualità, molte altre volte, invece, oltre alla calce (o al posto della calce) si trovano cementi, resine secche, gessi, additivi inquinanti, etc.

L'autore già citato scrive ancora: *l'anarchia selvaggia, che caratterizza la produzione di prodotti per il restauro, e la mancanza di norme, che costringano a definire in modo esaustivo e completo il prodotto venduto esplicitando caratteristiche, componenti e metodi di produzione, confonde anche i tecnici più esperti.*¹

L'invasione del mercato edilizio con prodotti che presentano le più svariate caratteristiche certamente non agevola il tecnico, il quale trova enormi difficoltà a dover individuare, tra le tante, una malta che abbia le specifiche proprietà richieste in cantiere da una determinata applicazione.

Se già la scelta tra una malta confezionata in cantiere ed una premiscelata poteva essere difficile, laddove le esigenze principali non sono dettate esclusivamente dall'economia di cantiere, che si intende riferita non soltanto alla determinazione dei costi di produzione, ma anche ai tempi di esecuzione, tanto più un'offerta produttiva amplissima e poco codificata non contribuiscono a favorire confronti e paragoni tra prodotti con caratteristiche simili, utili per operare una oculata scelta tecnico-progettuale.

La possibilità di decisione tecnica relativa alla scelta di un prodotto a vantaggio di un altro può coinvolgere anche gli operatori esecutivi, grazie al contributo che questi possono offrire in relazione agli utilizzi pratici in cantiere: tuttavia va segnalato che negli ultimi decenni le stesse maestranze hanno perso parte della propria specializzazione, essendosi dovuti abituare ad operare con un maggior numero di tipologie di prodotto, e con nuove tecniche di lavorazione, a discapito di un sapere costruttivo, altamente consolidato dall'impiego di materiali di tipo tradizionale e dalla lunga tradizione costruttiva relativa alla regola dell'arte.

Il controllo sulla qualità e la provenienza della materia prima, garantito fino a qualche tempo fa dall'artigiano, che maneggiava di persona i materiali per poi metterli in opera con accorgimenti e correzioni che

derivavano dalla lunga tradizione della regola dell'arte, è oggi deman-
dato ai produttori dei materiali preconfezionati. Le logiche e le finalità
di chi produce non corrispondono con quelle dell'applicatore, pertanto
si assiste ad una carenza dei controlli in cantiere da parte dei costrutto-
ri, e spesso anche dei tecnici.

Il controllo dei materiali è invero possibile attraverso l'attenta lettura
delle schede tecniche che il produttore mette a disposizione, per lo più
su esplicita richiesta da parte del tecnico. Tuttavia la scheda tecnica
indica spesso elementi marginali e non sostanziali, e in essa per com-
prendibili gelosie di produzione, non vengono mai elencati i compo-
nenti reali ma le prestazioni con dati del tipo: coefficienti di resisten-
za, traspirazione, usura, ecc.

La letteratura tecnica ci informa inoltre che *le indicazioni presenti an-
ziché precise sono addirittura fuorvianti, perché si ritiene, sbagliando,
che un prodotto sia valido solo se il produttore lo dichiara con-
forme alla tradizione "secolare" oppure se risponde ad un travisato
senso di eco-compatibilità*ⁱⁱ.

La grande attenzione che oggi la cultura tecnica rivolge alle tecniche
costruttive tradizionali si traduce quindi nella possibilità di utilizzare
materiali le cui proprietà spesso hanno poco da condividere con quelle
dei materiali un tempo impiegati, tanto decantate dagli antichi trattati-
sti, specialmente laddove si ometta di dichiarare l'effettiva consistenza
materica di un prodotto, ovvero laddove una base di conoscenze tec-
nologiche sui materiali non consenta la piena gestione del processo
progettuale.

Le problematiche sulla conoscenza dei prodotti che il mercato offre
hanno una validità generale, che può essere estesa a tutti i cantieri edi-
li, anche se con specifico riguardo al cantiere di restauro; le stesse
questioni acquistano una maggiore importanza per le specificità relati-
ve alla compatibilità con i materiali esistenti, alla consistenza materica,
alla valenza estetica, etc.

3.1. PRODOTTI, MATERIALI, SCELTE PRESTAZIONALI

La produzione di mercato oggi si muove secondo due direzioni, che
traggono spinte anche dalla ricerca applicata. La prima è legata alla

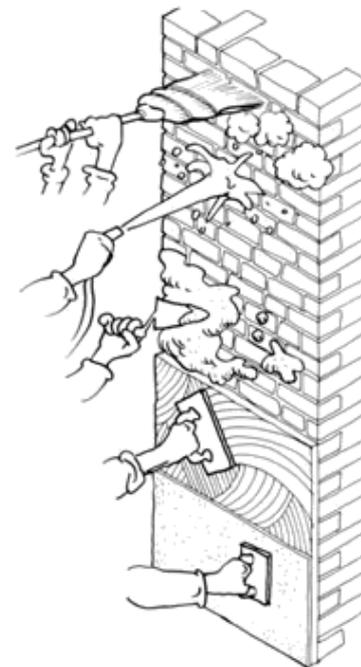


Fig. 3.2. L'applicazione di un in-
tonaco in più strati, anche nei casi
in cui i processi di produzione pre-
vedano una parziale meccanizza-
zione, richiede una prosecuzione
manuale delle operazioni, even-
tualmente supportata da strumen-
tazioni meccaniche (foto FEIFFER,
2000).

pura ricerca scientifica volta a trovare nuovi, migliori e più adatti prodotti tecnici, che possano essere diffusamente impiegati come soluzione delle più disparate problematiche che il cantiere edilizio possa offrire. La seconda direzione è, invece, maggiormente connessa al progressivo spegnersi della manualità artigiana, e quindi alla necessità di sopperire alla carenza di artigiani con prodotti e tecnologie preconfezionati, che possano essere impiegati anche da operatori non specializzati.

Ovviamente, all'interno del processo produttivo, i fattori economici sono un discriminante che indirizza sempre più la produzione verso un ribasso dei costi, spesso a svantaggio della qualità dei prodotti che, in molti casi, potrebbe richiedere tempi di produzione non sempre sostenibili (anche perché una qualità eccezionale dei componenti di base potrebbe non essere sempre richiesta). Si pensi, a tal proposito, alla tecnologia di produzione della calce che, per raggiungere un elevato livello qualitativo, avrebbe bisogno di maturazione del grassello in fossa per un periodo pari a lunghi mesi, se non anni. Ciò richiederebbe al produttore una notevole giacenza di prodotto, e quindi un costo di produzione più elevato di quello che, magari, lo stesso produttore sosterebbe se la calce venisse prodotta con tecnologie di estinzione a secco e commercializzazione del legante in pasta di calce idrata.

Un altro esempio di scarsa sostenibilità dei tempi di produzione potrebbe essere costituito dalle attese per la maturazione e/o asciugatura delle murature e degli strati più interni dell'intonaco.

L'impiego di materiali a comportamento noto è garanzia di adeguatezza del livello prestazionale richiesto: i prodotti presenti sul mercato, siano essi già pronti per la messa in opera, come nel caso delle malte premiscelate, ovvero siano semplici componenti che in cantiere andranno miscelate per dare il prodotto finito, devono essere quindi ben dichiarati dal produttore. Ciò al fine di evitare che il tecnico, inconsapevole del contenuto del sacco, compia errori dovuti alla scelta di un prodotto che non presenta caratteristiche di compatibilità con l'ambiente nel quale lo stesso prodotto va applicato. Un esempio è costituito dall'impiego nel restauro di malte premiscelate che spesso contengono percentuali di legante di origine cementizia, notoriamente poco compatibile con il costruito storico.

Molte caratteristiche prestazionali di una malta per intonaco dovrebbero, quindi, essere in genere prevedibili a partire dalla composizione. Ciò assume una notevole importanza qualora le malte venissero confezionate in cantiere, mentre nel caso di malte premiscelate i livelli prestazionali vanno assicurati dal produttore.

3.2. LE MALTE PER INTONACO DI TIPO TRADIZIONALE

Il confezionamento di malte per la realizzazione di intonaci di tipo tradizionale è ancora oggi diffuso grazie alla disponibilità di mercato dei singoli componenti. Il confezionamento in cantiere è assai frequente ove espressamente richiesto dagli uffici di direzione lavori, o, più comunemente, in quei cantieri laddove l'elevata disponibilità di spazi consente lo stoccaggio di materiali sciolti, magari con approvvigionamenti poco frequenti e quindi con un ridotto apporto di costi legati al trasporto.

Gli impasti vengono sempre formulati secondo le indicazioni espresse dalla direzione lavori, miscelando i componenti in determinate proporzioni che, per semplicità operativa, vengono espresse in volume: il dosaggio dovrebbe, quindi, essere effettuato impiegando apposite casse di dosaggio a volume noto. Assai diffuso per la rapidità esecutiva, ma altamente sconsigliato è l'utilizzo di metodi approssimativi per il dosaggio, come quello del "numero di palate"ⁱⁱⁱⁱ, per la scarsa possibilità di controllo dell'impasto, le cui prestazioni sono, in genere, presunte proprio in base alla composizione tra le parti.

Una particolare attenzione va posta all'impiego di aggregati in forma umida: in questo caso il loro quantitativo in volume andrebbe aumentato di circa il 15-20%.

L'utilizzo di leganti comunemente confezionati in sacchi da 10, 25 o 33 kg suggerisce che le proporzioni tra i componenti della malta vadano anche espresse in peso, specificando i pesi delle unità di volume dei singoli componenti.

Fig. 3.3. La produzione delle malte secondo tecniche tradizionali prevede l'impiego di materiali conformi a quelli descritti dagli antichi trattatisti.



L'impiego di additivi è, in genere, poco frequente, anche se in molti casi può essere utile, specialmente per diminuire l'apporto di acqua nell'impasto e quindi per ridurre i fenomeni di ritiro in fase di asciugatura, che determinano la formazione di fessurazioni sulla superficie dell'intonaco.

L'impasto manuale è frequente soltanto nel caso in cui vadano preparate piccole dosi, mentre quello con pale o marre^{iv} è ormai assai desueto, anche per la cessata abitudine di produrre e conservare il grassello in cantiere, in apposite fosse.

In generale l'impasto avviene con mezzi meccanici.

Le peculiarità della malta confezionata con grassello di calce, però, non consentono di accomunare del tutto le sue modalità di lavorazione con quelle proprie delle malte a base di cemento od anche premiscelate. Anzi, le lavorazioni possono essere fortemente diverse nel caso di utilizzo di leganti aerei od idraulici. L'untuosità della malta, particolarmente accentuata nel caso in cui vengano impiegati nella formulazione grasselli di elevata qualità, sconsiglia l'utilizzo della betoniera a bicchiere, per la difficoltà nell'impasto che le maestranze sono solite

risolvere aggiungendo acqua alla miscela, coll'evidente danno che questo può comportare. Più adatto, e quindi raccomandato, è invece l'utilizzo delle impastatrici orizzontali a mola, o molazze^v.

In fase di lavorazione, l'impiego di una malta che presenti già fenomeni di indurimento è, in generale, altamente sconsigliato. La pratica di aggiungere piccole quantità d'acqua all'impasto può essere tollerata soltanto entro poche ore dall'impasto, e nel caso di malte aeree con solo grassello e sabbia, poiché, nel caso in cui la malta abbia caratteristiche di idraulicità, la presa continua ad avvenire anche in presenza di acqua.

3.3. LE MALTE PER INTONACO DI TIPO PREMISCELATO

Le caratteristiche generali della malta, che possono essere presunte in base alla composizione, nel caso delle malte premiscelate risultano assicurate dalle aziende produttrici, che si fanno garanti di un processo produttivo altamente controllato.

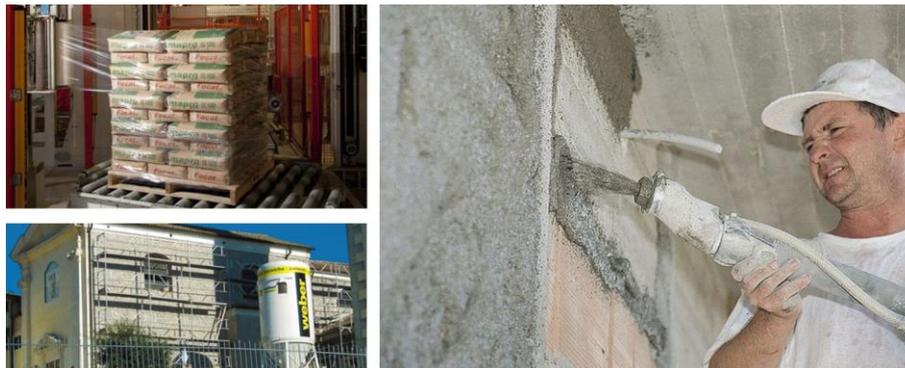
L'impiego di tecnologie a componentistica meccanica e nei casi più moderni anche elettronica, determina un controllo continuo della materia prima, delle fasi di impasto e del prodotto finale, tali da garantire il raggiungimento delle specifiche proprietà per le quali viene progettato il dosaggio dei componenti.

La forma con cui le malte premiscelate vengono messe in commercio può essere in polvere, asciutta, in modo che in cantiere sia richiesta soltanto l'aggiunta di acqua, ovvero anche in forma umida. La fornitura avviene in sacchi, ovvero in silos ed in bidoni, appositamente messi a disposizione del cliente da parte del fornitore.

La composizione della malta, come detto precedentemente, non sempre viene dichiarata del produttore, per cui la conoscenza completa delle materie utilizzate nella formulazione della miscela è assai difficile: piuttosto diffusa è la pratica di additivare le malte premiscelate con componenti che garantiscono il raggiungimento di determinate caratteristiche prestazionali.

In alcuni casi la dichiarazione fornita dal produttore è carente o addirittura falsa: recenti ricerche sui componenti di alcune malte premiscelate, diffuse nel mercato dei prodotti per il restauro, svolte in col-

Fig. 3.4. Le malte premiscelate possono essere fornite in sacchi, ma anche in silos o bidoni, e in qualche caso sono applicate con sistemi meccanici a spruzzo grazie all'impiego, nella miscela, di fluidificanti.



laborazione tra I.C.R.^{vi}, Fondazione Centro Conservazione e Restauro dei Beni Culturali – La Venaria Reale, Università della Tuscia e Roma Tre, e presentate al salone internazionale dell'edilizia SAIE 2007, hanno mostrato, grazie ad analisi di caratterizzazione chimico-fisica, come in molti casi campioni di malta premiscelata per rinaffo o per finiture, che i produttori avevano dichiarato composti con leganti idraulici di tipo naturale NHL, fossero invece confezionati con leganti idraulici HL o, addirittura, con cemento Portland.

È, inoltre, prassi abbastanza comune che le malte premiscelate vengano additivate con componenti appositamente aggiunte per migliorare alcune caratteristiche del prodotto finale. Tra gli additivi più utilizzati si devono ricordare alcune resine^{vii}, che aumentano la lavorabilità dell'impasto, la plasticità, ovvero la resistenza meccanica. Le capacità adesive vengono incrementate dall'utilizzo di collanti acrilici o vinilici in emulsione, mentre gli eteri di cellulosa sono largamente impiegati per le proprietà di ritenzione idrica. Diffuso è anche l'impiego di alcuni sali per il conferimento di proprietà aeranti (es. abietato sodico), fluidificanti (es. naftalensolfonato sodico) o impermeabilizzanti (es. alcuni stereati)^{viii}.

L'impiego di additivi nella formulazione delle miscele è, in genere, scarsamente dichiarato. Sebbene, infatti, il loro utilizzo sia strettamente finalizzato al miglioramento di alcune prestazioni della malta, deve anche segnalarsi che la presenza di talune componenti, in determinati contesti, potrebbe essere incompatibile, ad esempio, con i supporti, e quindi potrebbero attivarsi fenomeni di degrado non previsti. Si pensi, ad esempio, agli inconvenienti legati all'apporto di sali solubili, ovvero al caso in cui l'utilizzo di additivi impermeabilizzanti determini

DATI CARATTERISTICI		
Tipo di malta	Malta per scopi generali per intonaci interni/esterni (GP)	EN 998-1
Natura chimica del legante	Pura Calce Idraulica Naturale NHL 3.5	EN 459-1
Intervallo granulometrico	0 - 1,4 mm	EN 1015-1
Massa volumica apparente della polvere	≈ 1,20 kg/dm ³	UEAtc
Conservazione	≈ 12 mesi nella confezione originale	
Confezione	Sacchi 25 kg	

DATI TECNICI secondo Sistema di Qualità		
Acqua d'impasto	≈ 5,5 l / 1 sacco 25 kg	
Consistenza malta fresca 0'	≈ 174 mm	EN 1015-3
Massa volumica apparente della malta fresca	≈ 1,50 kg/dm ³	EN 1015-6
Massa volumica apparente della malta indurita essicata	≈ 1,35 kg/dm ³	EN 1015-10
pH impasto	≥ 12	
Aria occlusa / Aria occlusa intonacatrice	≥ 20%	EN 413-2
Temperature limite di applicazione	da +5 °C a +35 °C	
Spessore max per strato	≈ 2 cm	
Resa	≈ 12 kg/m ² per cm di spessore	

PRESTAZIONI FINALI		
Coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore acqueo (μ)	≤ 6	EN 1015-19
Assorbimento d'acqua per capillarità	Categoria W0	EN 998-1
Porosità	≥ 40%	WTA 2-2-91/D
Reazione al fuoco	Classe A1	EN 13501-1
Resistenza a compressione a 28 gg	Categoria CS II	EN 998-1
Aderenza al supporto (laterizio)	≥ 0,2 N/mm ² - FP: B	EN 1015-12
Conducibilità termica (λ _{10, dry})	0,45 W/mK (valore tabulato)	EN 1745
Durabilità (al gelo-disgelo)	Valutazione basata sulle disposizioni valide nel luogo di utilizzo previsto della malta	EN 998-1
Indice di radioattività	I = 0,26	UNI 10797/1999

Fig. 3.5. La scheda tecnica di una malta premiscelata non fornisce alcuna informazione su dati significativi come il rapporto legante/aggregato e sulla presenza di additivi, limitandosi a fornire parametri fisico – meccanici, magari in riferimento a norme poco diffuse, e prestazioni finali.

l'occlusione del sistema capillare dei vuoti, che consente la permeabilità del vapore acqueo, e quindi, nelle applicazioni ad intonaco, la riduzione della capacità di traspirazione dei setti murari.

ⁱ L'individuazione delle criticità del mercato dei prodotti per l'edilizia, con specifico riguardo a quelli per il restauro, è stata effettuata in una serie di editoriali che il prof. Feiffer ha pubblicato, in qualità di direttore, all'interno della rivista «Recupero e Conservazione». Nella stessa serie il prof. Feiffer individua le criticità determinate dalla diffusa perdita dei saperi artigianali. Cfr. FEIFFER, C., *Il supermercato dei prodotti per il restauro*, «Recupero e Conservazione», 2007, n. 75

ⁱⁱ Cfr. FEIFFER, C., *Artigiani e sirene?*, «Recupero e Conservazione», 2007, n. 77

ⁱⁱⁱ Nel caso in cui i materiali di base vengano forniti in cantiere in mucchio, le maestranze sono spesso solite rifornirsi dal mucchio attraverso una pala manuale, e quindi a “misurare” il volume di materiale in relazione al numero complessivo delle prese dal mucchio.

^{iv} Attrezzo diffuso nella tradizione costruttiva per impastare la malta od anche per agevolare, attraverso il mescolamento, il processo di estinzione della calce viva. Ha una forma simile a quella di una zappa, ma con un manico più lungo.

^v L'impiego delle impastatrici a mola è però sconsigliato nel caso in cui l'aggregato impiegato nella formulazione della malta è costituito da sabbie calcaree o marmi teneri, che potrebbero essere ulteriormente macinati per l'azione di schiacciamento della mola, determinando, quindi, una variazione della granulometria dell'impasto. Cfr. RATAZZI, A., *Conosci il grassello di calce?*, op. cit.

^{vi} L'Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro (ex Istituto Centrale per il Restauro) istituito con D.P.R. del 26 novembre 2007, n. 233, è un organo tecnico dotato di autonomia speciale del Ministero per i Beni e le Attività Culturali ed è specializzato nel campo del restauro e della conservazione del patrimonio culturale. L'Istituto è stato fondato nel 1939, su progetto di Giulio Carlo Argan e Cesare Brandi per rispondere all'esigenza di impostare l'attività di restauro su basi scientifiche e di unificare le metodologie di intervento sulle opere d'arte e i reperti archeologici. Il suo primo direttore è stato Cesare Brandi.

^{vii} La resina melamminica ha, ad esempio, la capacità di ridurre la quantità d'acqua nell'impasto, mentre l'epossidica migliora le prestazioni meccanica della malta ed aumenta la capacità di ritenzione idrica, ritardando i fenomeni di presa e quindi riducendo l'entità delle fessurazioni da ritiro.

^{viii} Cfr. BROCCOLO, A., *Malte intonaci e paste*, op. cit.

4. PROGRAMMI DI SPERIMENTAZIONE SULLE MALTE

Gli studi scientifici degli ultimi decenni hanno sempre mostrato un crescente interesse nei confronti del settore delle malte, sia con riferimento alle problematiche più strettamente legate ai materiali ed alle tecniche di produzione dell'edilizia storica, sia con riferimento alle caratteristiche materiche delle malte di produzione attuale, per applicazioni nel restauro e recupero edilizio, ovvero nelle nuove costruzioni.

L'interesse ha coinvolto, con finalità anche piuttosto differenti, gli enti e le istituzioni della ricerca, in primo luogo le università, ma anche tantissimi enti pubblici e privati che si siano trovati a dover operare col materiale malta per esigenze di tipo professionale. A questi soggetti devono, inoltre, aggiungersi tutti quei laboratori che si occupano di sperimentazione al servizio dell'industria, e quindi della formulazione dei composti per la produzione delle malte premiscelate che vengono distribuite sul mercato.

Come già visto nel cap. 2, le analisi di caratterizzazione effettuabili su campioni di malta o sulle superfici rifinite ad intonaco sono davvero molteplici e tutte finalizzate ad ottenere parametri di valutazione quali-quantitativa sul comportamento delle malte.

Già fin dagli anni Ottanta, però, qualche istituto di ricerca¹ ha provato a riordinare le differenti tipologie di analisi in una serie di classi, facendo riferimento non tanto al tipo di parametro indagabile, bensì alla scala dimensionale della sperimentazione, ed alle condizioni ambientali di prova.

Questo tipo di classificazione risulta assai utile per delineare un quadro dell'ampio panorama delle ricerche sul tema degli intonaci e delle malte per intonaco. A tal fine risulta opportuno chiarire che lo studio della letteratura tecnica relativa al tema di ricerca ha tenuto in minore considerazione quelle ricerche relative alla semplice caratterizzazione materica di malte esistenti nell'edilizia storica, spesso non mirate all'analisi delle prestazioni, utile per l'individuazione delle malte che potranno utilizzarsi per le integrazioni, i ripristini, etc.

È stato invece particolarmente approfondito lo stato dell'arte relativo a quelle ricerche volte ad individuare le caratteristiche prestazionali di malte di nuova produzione, confezionate secondo ricette di tipo tradizionale, che non impiegano leganti a base cementizia, ovvero premi-

scelate in stabilimento, per utilizzi in cantieri di restauro e recupero edilizio, ovvero in edifici contemporanei.

In base alle suddette premesse, gli studi di settore sono stati classificati secondo il seguente schema:

- Sperimentazioni a scala di edificio: possono farsi rientrare in questa tipologia tutti quei programmi di sperimentazione, nei quali le caratteristiche prestazionali degli intonaci e delle malte vengono analizzate su superfici effettivamente realizzate, con materiali a composizione nota, su strutture edilizie esistenti, in seno alle quali le condizioni ambientali sono già determinate ed eventualmente monitorate e verificabili. Rientrano, quindi, in questa tipologia le sperimentazioni svolte su realizzazioni recenti, condotte sotto stretto controllo, e quelle su realizzazioni invecchiate, nelle quali le condizioni ambientali sono note grazie ad una continua operazione di monitoraggio;
- Sperimentazioni a scala ridotta: questa tipologia raccoglie tutte quelle sperimentazioni condotte su una serie di applicazioni realizzate in ambienti esterni su un unico supporto, in relazione al quale possano ritenersi costanti le condizioni di esposizione ambientale (ad esempio, un muro continuo, isolato dal terreno ed uniformemente esposto agli agenti atmosferici).

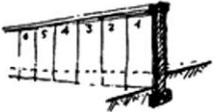
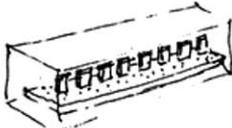
Le suddette sperimentazioni tendono a verificare la compatibilità di materiali e sistemi di realizzazione con i supporti cui vengono applicati, ovvero con le specifiche condizioni ambientali in cui si trovano ad operare (si pensi, ad esempio, all'esposizione delle pareti, alle condizioni termoigrometriche della muratura, alla eventuale presenza di sali, alle condizioni di carico, etc.). Presentano però una specificità in relazione all'edificio ed alle micro condizioni di esposizione in cui le malte vengono poste ad operare, con particolare riferimento ai supporti, ai parametri termoigrometrici locali, etc.

Questo tipo di sperimentazione può dare risultati immediati per alcune tipologie di parametri indagabili, ma gli esiti più interessanti si hanno nel caso in cui le sperimentazioni si protraggano per alcuni anni, poiché, in questo caso, si possono raggiungere notevoli risultati in relazione alla compatibilità tra le malte ed i supporti, con riguardo anche alle condizioni ambientali ed all'attivazione dei fenomeni di degrado, ovvero ancora indicazioni sulla durabilità.

La classificazione delle tipologie di sperimentazione diffuse in letteratura tecnica prosegue con quelle che richiedono una minore onerosità in termini di costi, tempi ed impegno. Si parla, in questo caso, di prove di comportamento condotte su provini, che possono essere raccolte secondo gli ulteriori due schemi:

- Prove seminaturali su provini: si tratta di confrontare il comportamento di un numero medio-grande di provini di limitate dimensioni, confezionati su supporti appositamente predisposti, spesso in laboratorio con particolare riferimento agli aspetti materiali locali (per esempio, tavelle di laterizio, blocchi di calcarenite conchiliare – che costituiscono, nell'area della Sicilia Occidentale, il materiale più comunemente impiegato dalla tradizione per la rea-

Fig. 4.1. La classificazione delle modalità di sperimentazione proposta da Appendino (1986) si mostra ancora oggi utile per inquadrare le ricerche in materia di intonaci che sono state svolte negli ultimi anni.

REALIZZAZIONI SPERIMENTALI A SCALA DI EDIFICIO	REALIZZAZIONI SPERIMENTALI A SCALA RIDOTTA	PROVE DI COMPORTAMENTO SEMINATURALI SU PROVINI	PROVE DI COMPORTAMENTO IN LABORATORIO SU PROVINI
 <p>Risultati: comportamenti di un sistema in svariate condizioni reali</p> <p>Mezzi e costi: elevati</p> <p>Tempi occorrenti: - 1+2 anni per indicazioni di compatibilità e di incompatibilità - molti anni per indicazioni di durabilità</p> <p>Interscambi: ING:Indicazioni su condizioni critiche d'impiego e su incompatibilità relative ad una certa categoria di sistemi</p> <p>USC:Dati per l'allestimento di una nuova realizzazione sperimentale</p>	 <p>Risultati: comportamenti confrontabili di alcuni sistemi in condizioni critiche</p> <p>Mezzi e costi: medi</p> <p>Tempi occorrenti: - 1+2 anni per indicazioni di compatibilità e di incompatibilità - molti anni per indicazioni di durabilità</p> <p>Interscambi: ING:Indicazioni, come in 1ª colonna :Riscontro, come in 4ª colonna</p> <p>USC:Dati per il progetto di nuove sperimentazioni</p>	 <p>Risultati: comportamenti confrontabili di svariati sistemi in alcune condizioni critiche riassunte su provini posti o interposti in ambienti reali</p> <p>Mezzi e costi: medi</p> <p>Tempi occorrenti: da 1/2 a 1/4 dei tempi occorrenti per le realizzazioni sperimentali</p> <p>Interscambi: ING:Indicazioni, come in 1ª colonna :Riscontro, come in 4ª colonna</p> <p>USC:Dati per il progetto di nuove prove seminaturali</p>	 <p>Risultati: comportamenti confrontabili di molti sistemi in condizione critica simulata su provini posti in ambiente artificiale di laboratorio</p> <p>Mezzi e costi: ridotti</p> <p>Tempi occorrenti: relativamente brevi</p> <p>Interscambi: ING:Riscontro di comportamenti anomali o poco chiari di una certa categoria di sistemi</p> <p>USC:Dati per il progetto di nuove prove di laboratorio</p>

lizzazione delle strutture murarie – blocchi di calcestruzzo alleggerito, etc...), ed esposti all'esterno alle medesime condizioni ambientali, in modo da recepire con grande intensità i fattori climatici e di inquinamento che provocano il degrado e l'invecchiamento dei sistemi, allo scopo di accelerare e rendere più manifesti i risultati;

- Prove di comportamento in laboratorio su provini: l'ultima tipologia di sperimentazione consiste nella realizzazione di provini in laboratorio e nell'applicazione dei noti metodi per la caratterizzazione, eventualmente, su provini sottoposti a programmi di invecchiamento accelerato, attraverso l'utilizzo di strumenti in grado di ricreare artificialmente le condizioni che possono provocare il degrado dei sistemi in esame, ed accelerare il raggiungimento di eventuali condizioni critiche.

4.1. SPERIMENTAZIONI A SCALA DI EDIFICIO

La sperimentazione a scala di edificio è la tipologia maggiormente utilizzata dagli operatori professionali che intendono testare prodotti con specifiche caratteristiche, specie in cantieri per i quali è prevista una durata complessiva delle lavorazioni talmente lunga da consentire il raggiungimento di un risultato scientifico soddisfacente, e quindi l'impiego generalizzato del prodotto che, tra quelli esaminati, ha offerto le migliori prestazioni, compatibilmente con le esigenze che l'edificio richiedeva.

In ambito nazionale sono molte le sperimentazioni condotte a questa scala. Codello (2003) conduce una sperimentazione a Venezia riguardante l'intonaco da risanamento: nel corso della sperimentazione, vengono inizialmente analizzati alcuni intonaci già in opera, nelle loro caratteristiche igrotermiche (contenuto di umidità e situazione climatico – ambientale), chimiche (determinazione dei sali idrosolubili) e porosimetriche. Successivamente si procede al monitoraggio, tramite sonde, dei parametri igrotermici all'interno delle murature, ad altezze variabili, al fine di valutare l'efficacia dell'intonaco risananteⁱⁱ, riscontrando una generale diminuzione dell'umidità all'interno delle murature trattate con i materiali oggetto della sperimentazione.



Fig. 4.2. La sperimentazione proposta da Codello (2003) valuta la variazione delle caratteristiche igrotermiche su murature storiche trattate con intonaci da risanamento a Venezia, ponendo all'interno della sezione muraria, ad altezze variabili, un sensore di rilevamento continuo.

Assai simile il lavoro svolto da Tinè (2001) nell'isola di Ortigia a Siracusa, nel corso del quale sono state sottoposte a sperimentazione alcune malte premiscelate da impiegare sulle facciate degli edifici costituenti il fitto tessuto edilizio di Ortigia. In particolare, nel corso della sperimentazione, si è accertato che la causa principale del degrado degli intonaci applicati sulle fronti architettoniche fosse legata ai fenomeni di risalita capillare nella struttura muraria; pertanto, nel corso delle indagini che si sono concentrate su un edificio-tipo messo a disposizione dall'amministrazione comunale, sono state effettuate misure mirate alla valutazione del contenuto igrometrico della muratura, ripetute nel tempo, per verificare l'effettiva traspirabilità delle finiture superficiali. Nel corso della ricerca sono state altresì valutate le proprietà di adesione dei nuovi intonaci ed il contenuto quali-quantitativo dei sali idrosolubili. In parallelo, la sperimentazione è stata eseguita in laboratorio su provini di malta, per ottenere una caratterizzazione completa dei materiali.

Anche Tavares et al. (2008) hanno condotto ricerche con applicazioni su edifici storici. In particolare, questi ultimi si sono occupati della fortezza militare di Santa Martaⁱⁱⁱ a Lisbona, le cui superfici architettoniche esterne manifestavano una notevole presenza di forme di

Fig. 4.3. Tavares (2008) valuta l'assorbimento a bassa pressione col metodo Karsten su superfici d'intonaco realizzate su un edificio di interesse storico.



alterazione, probabilmente dovute all'elevato tasso di umidità relativa, all'aggressività degli aerosol marini, ad elevato contenuto salino, nonché all'assenza di protezioni adeguate, sistemi di smaltimento delle acque efficaci e manutenzioni regolari. I materiali indagati nel corso della sperimentazione sono intonaci in malta idraulicizzata con l'utilizzo di cemento, metacaolino^{iv}, calce idraulica e filler^v di argilla espansa. Le analisi effettuate hanno riguardato la misura della permeabilità all'acqua a basse pressioni, della resistenza superficiale per impatto sferico, dell'aderenza al supporto e della resistenza alla penetrazione.

4.2. SPERIMENTAZIONI A SCALA RIDOTTA

La sperimentazione a scala ridotta è diffusa nell'ambito delle collaborazioni tra enti di ricerca ed altre istituzioni, spesso scuole edili, industrie, etc., che possano dare un supporto nella realizzazione di pannelli

rivestiti con materiali diversi, ma sottoposti alle medesime condizioni fisiche ed ambientali.

Nell'ambito di questa tipologia rientrano le sperimentazioni condotte dai Politecnici di Torino e Milano, da Appendino, Bardelli et al. (1984), in collaborazione con lo IACP di Milano e l'ANVIDES^{vi}, nel corso delle quali sono stati indagati sistemi di tinteggiatura e rivestimento delle facciate applicati su porzioni analoghe vicine di una facciata, facendo variare nelle diverse parti, a seconda delle esigenze, o la costituzione del sistema, o le diverse condizioni che manifestano criticità in relazione alla realizzazione del sistema stessa (nel caso in esame, ad esempio, l'alcalinità residua dei rappezzi, o il tipo di fissaggio al supporto).

Anche D'Orazio (1994) utilizza la metodologia di sperimentazione a scala ridotta per una valutazione di confronto tra intonaci realizzati secondo le ricette degli antichi trattatisti ed intonaci di uso corrente, ovvero formulati in maniera sperimentale: in questo caso, la verifica del comportamento è attuata attraverso lo studio di proprietà fisiche e di caratteristiche chimiche dei prodotti impiegati, anche su campioni realizzati in laboratorio.

La valutazione dei prodotti applicati in opera è effettuata anche attraverso le proprietà di lavorabilità dell'impasto, la facilità di posa in opera, l'entità dei fenomeni di ritiro, il grado di carbonatazione della

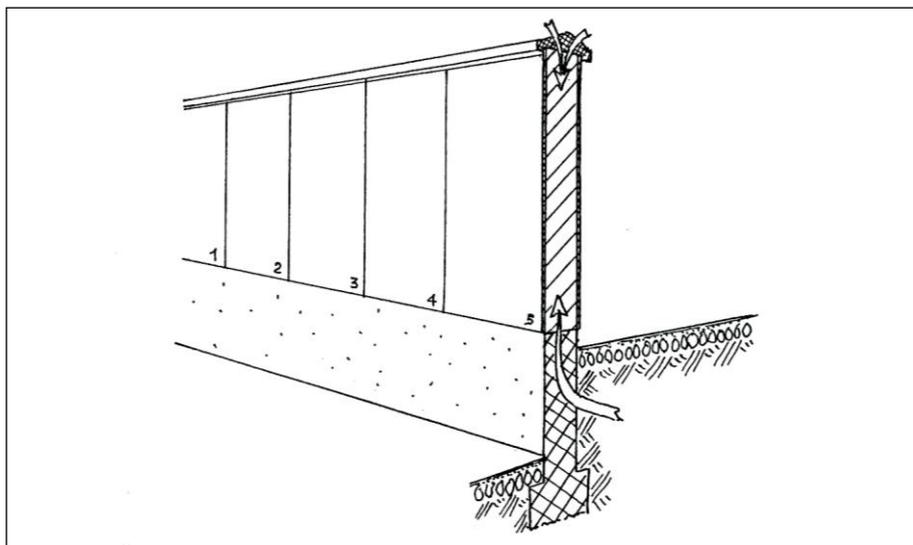


Fig. 4.4. Lo schema di realizzazione della sperimentazione condotta da Appendino (1984) riporta i punti di criticità per umidità di risalita dalla fondazione e per acque eventualmente infiltratesi da un'inefficacia del sistema di rivestimento superiore della parete muraria.

Fig. 4.5. Le sperimentazioni a scala ridotta prevedono che le condizioni di esposizione dei pannelli siano identiche, per cui sono necessarie pareti murarie di lunga estensione sulle quali non si abbiano parzializzazioni espositive dovute, ad esempio, alla formazione di ombre.



calce, la presenza di rigonfiamenti e distacchi, la misura dell'aderenza al supporto.

Alaimo (2005) utilizza la sperimentazione a scala ridotta per individuare nuovi prodotti (malte ed intonaci) da applicare in ambito edilizio storico e monumentale, sulla base di indagini conoscitive dei materiali impiegati nel territorio siciliano, al fine di diffondere, con adeguati strumenti informatici, i risultati tecnico-scientifici al maggior numero di utenti potenziali in Italia e nei paesi mediterranei^{vii}. Nel corso della ricerca, vengono sperimentati 39 nuovi impasti, formulati sulla base di studi ed analisi composizionali e mineralogiche-petrografiche effettuate su campioni prelevati in diversi comuni della Sicilia. Di questi, si verifica la compatibilità con i supporti lapidei regionali, anche in riferimento all'ambiente locale, effettuando prove di stesura su diverse tipologie di materiali lapidei siciliani, e caratterizzando le proprietà di adesione e compatibilità, formulando, inoltre, adeguati codici di stesura.

4.3. COMPORTAMENTO SEMINATURALE SU PROVINI

Per comportamento “seminaturale” di un materiale deve intendersi la risposta manifestata nel caso in cui lo stesso venisse esposto a condizioni ambientali simili a quelle che si prevede possano presentarsi nelle applicazioni reali, pur non essendo il materiale applicato su edifici o strutture edilizie reali.

Le prove di comportamento seminaturale su provini presentano caratteristiche molto comuni con le sperimentazioni a scala ridotta, solo che, a differenza di queste, la malta non viene stesa su supporti murari, posti quindi ad operare nelle medesime condizioni in cui, lo stesso

materiale, si troverebbe se fosse definitivamente applicato su quel determinato elemento tecnologico, bensì su pannelli, di materiale via via differente, a seconda delle proprietà che si intende esaminare e dei supporti che, si prevede, possano essere più diffusamente impiegati negli interventi in cui il sistema indagato verrà utilizzato.

Inoltre, la realizzazione di pannelli di dimensioni piuttosto limitate, rende agevole la loro movimentazione, per cui, nell'ambito di questa tipologia di sperimentazione, si preferisce quasi sempre porre il sistema nelle condizioni operative più sfavorevoli, seppur congruenti con quelle reali, al fine di valutare la durabilità in tempi non eccessivamente lunghi.

In quest'ambito si possono inquadrare le ricerche condotte da Scarzella, Trivella et al. (1992), riguardanti i sistemi di tinteggiatura e di pitturazione applicati in edilizia^{viii}. I provini esaminati nel corso di questa sperimentazione sono costituiti da tavelle laterizie, intonacate con malta di sabbia, calce e cemento bianco, e rifinite con uno strato di finitura in sabbia fine e calce. Sulle stesse è stato realizzato un risalto, tale da simulare la situazione reale di uno spigolo intonacato, quale potrebbe essere, in una facciata, lo spigolo di una cornice od il risalto di una bugna. Le tavelle, sulle quali sono stati applicati i sistemi di tinteggiatura e pitturazione che costituiscono l'oggetto di sperimentazione, sono stati quindi esposti a sud, in un campo di sperimentazione, con la superficie in esame inclinata di 45° rispetto al piano orizzontale, e su di esse, ad intervalli ripetuti nel tempo, si è rilevato, in accordo con le procedure di prova riconosciute in ambito internazionale, il grado di sfarinamento, l'ingrigimento e la ritenzione di sporco, la disgregazione ed il dilavamento del rivestimento, ed infine la fessurazione superficiale.

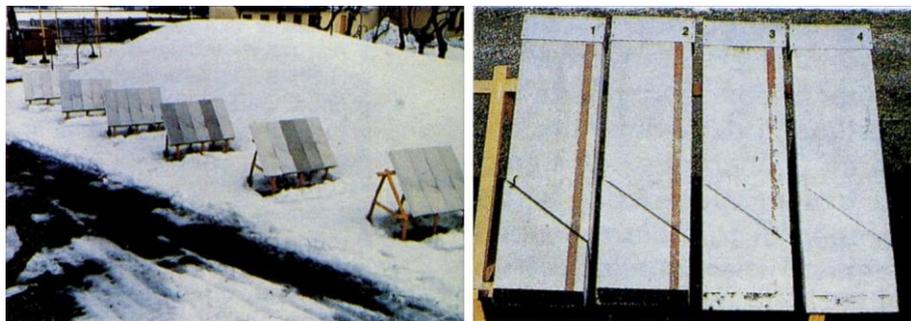


Fig. 4.6. Alle economie derivanti dall'esecuzione della sperimentazione su elementi di piccola dimensione, facilmente trasportabili, non corrisponde una rapidità della sperimentazione. La possibilità, però, di esporre in ambiente naturale i pannelli con un'inclinazione predeterminata può accelerare i processi di invecchiamento dei campioni.

Caponetto e Rodonò (2008) espongono ad invecchiamento naturale campioni di intonaco in cocciopesto (premiscelato con calce idraulica naturale ed additivato con inerte lavico idraulicizzante^{ix}, ovvero silicato di sodio^x, ovvero “silica fumes”^{xi}). Di questi, vengono esaminate, dopo 6 mesi dall’inizio dell’esposizione, per poi ripetersi dopo 12 e 24 mesi, alcune caratteristiche, quali l’indice sclerometrico, l’aderenza al supporto e la capacità di imbibizione.

Il programma di ricerca PRIN 2004 “Metodi di controllo della stabilità materica e cromatica di intonaci e di lastre in calcestruzzo per esterni”^{xii} prevedeva di esporre una serie di provini in ciascuna delle città sedi delle unità di ricerca (Napoli, Ancona e Genova), al fine di effettuare un confronto del degrado e della stabilità materica e cromatica.

Con particolare riferimento ai sistemi di finitura a calce, l’unità di Ancona si è occupata della realizzazione dei provini, costituiti da pannelli di 24x12 cm in laterizio, sui quali viene steso un fondo di malta a base di calce ed uno strato di finitura dispendioso millimetrico. L’esposizione dei materiali è avvenuta su pannelli posti in verticale (a 90°), in difformità da quanto indicato dalla norma ISO TC61, che consiglia un angolo di esposizione inferiore di 10° rispetto alla latitudine del sito prescelto, al fine di evitare sostanziali modifiche alle condizioni di esposizione naturale, quali, ad esempio, un più alto grado di umidificazione, una minore ritenzione di particolato, ed una maggiore temperatura superficiale.

La verifica di durabilità di sistemi di finitura in esposizione reale è stata affrontata da Lane (2000), il quale fornisce indicazioni circa l’influenza, sui risultati di prova, dei sistemi di fissaggio, dell’angolo di inclinazione rispetto all’orizzontale, della temperatura della radiazione solare, dell’umidità relativa.

L’accelerazione degli effetti dell’invecchiamento attraverso modalità di sperimentazione condotte in laboratorio rende, negli ultimi anni, scarsamente interessanti le sperimentazioni su provini esposti in ambiente naturale, ciononostante si ritiene ugualmente interessante riconoscere questa possibilità di sperimentazione per le economie offerte rispetto alle sperimentazioni a scala di edificio ed a scala ridotta, nonché per la diretta corrispondenza tra le situazioni ambientali di esposizione e quelle di applicazione reali.

4.4. INDAGINI IN LABORATORIO SU PROVINI

L'economia dei sistemi di sperimentazione in laboratorio in termini di costi di realizzazione, nonché di tempi di esecuzione, rende questa tipologia di indagine la più diffusa ed impiegata nell'ambito delle sperimentazioni su malte, anche in ragione della maggiore possibilità, rispetto alle altre metodologie, di porre a confronto diretto un maggior numero di sistemi, messi ad operare alle medesime condizioni ambientali.

Le potenzialità offerte dalle sperimentazioni in laboratorio sono notevolissime: è infatti sempre possibile realizzare, in accordo con le procedure standardizzate di confezionamento, un numero elevato di provini aventi la medesima formulazione, al fine di sottoporli alle diverse procedure di prova. Ma è anche possibile verificare che alcune proprietà di determinati sistemi possano non essere strettamente correlate alle modalità di confezionamento.

Il limite offerto dalla sperimentazione in laboratorio è, però, costituito dal fatto che i risultati ottenibili per le prove di tipo prestazionale potrebbero avere poco in comune con le prestazioni che lo stesso sistema offrirebbe se venisse messo ad operare in condizioni reali: ciò è dovuto al fatto che il cantiere non possa, in generale, offrire le stesse condizioni di controllo ottenibili in laboratorio (si pensi, ad esempio, alle modalità di stagionatura di un provino in malta all'interno di una camera climatica con condizioni di umidità relativa dell'aria e temperatura fisse nel tempo; una condizione simile, in un cantiere dove quella tipologia di malta è impiegata per la realizzazione di un intonaco esterno, è assolutamente impensabile).

Ciononostante, il confronto tra le caratteristiche prestazionali di sistemi a comportamento simile tra loro è assai utile per l'individuazione del sistema a comportamento migliore.

Le sperimentazioni in ambito nazionale ed internazionale sono molte. Arioglu e Acun (2006) propongono un protocollo di sperimentazioni di laboratorio per la valutazione di malte da restauro per intonaco che, partendo dalla conoscenza scientifica dei materiali in esame, giunge alla formulazione di una miscela, successivamente esaminata attraverso prove di caratterizzazione fisica e meccanica, supportata da opportune analisi mineralogico-petrografiche, attraverso osservazioni SEM

di sezioni sottili, ovvero tramite diffrattometria a raggi X. Alle analisi di caratterizzazione, gli autori associano una serie di test di durabilità, che potrebbero consistere nell'applicazione di una serie di cicli di bagnatura ed essiccazione dei campioni, ovvero di gelo-disgelo, ovvero ancora nella simulazione di un invecchiamento tramite immersione in soluzioni sature di solfato di sodio decaidrato che, attraverso la con-

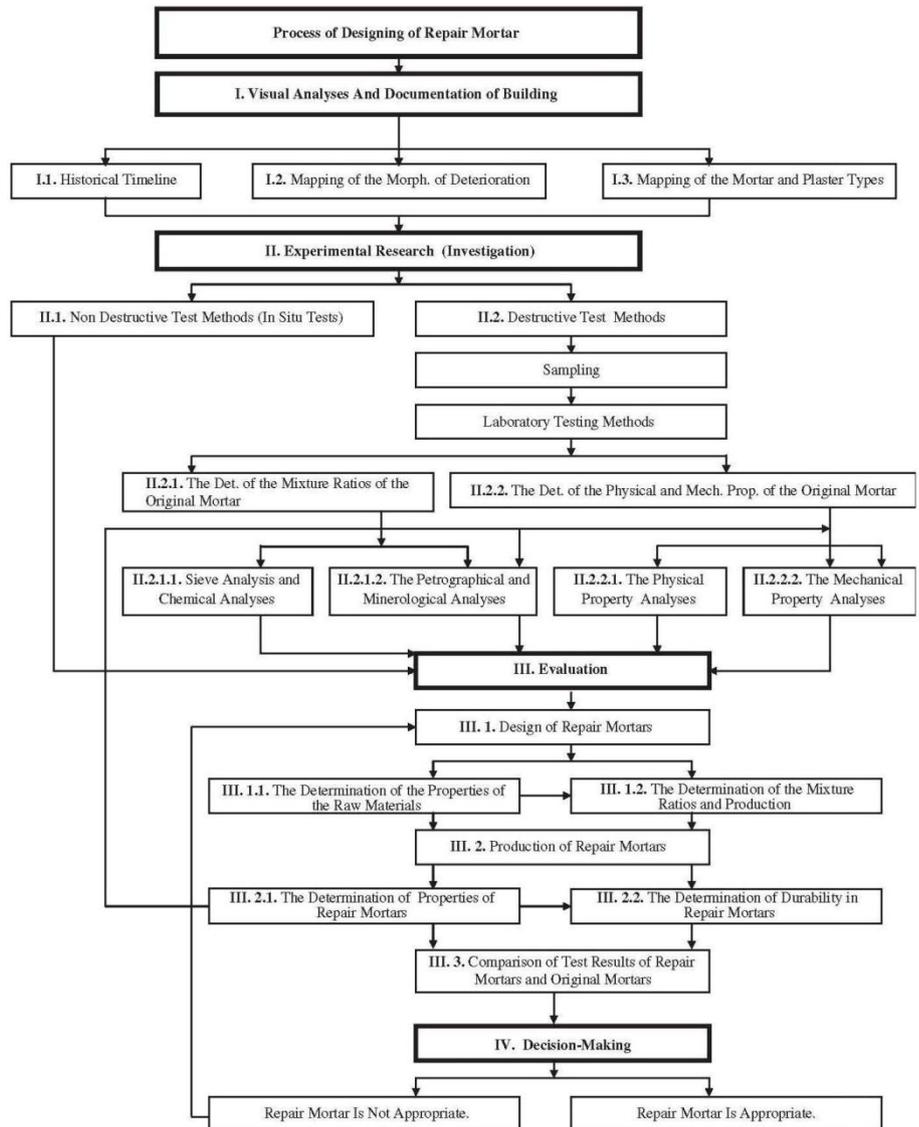


Fig. 4.7. Diagramma di flusso relativo ad una metodologia sperimentale usata nella progettazione di malte da restauro per intonaci. (ARIUGLU, 2006)

tinua cristallizzazione del sale, accelera l'attivazione dei processi di disgregazione della malta.

Caponetto e Rodonò (2008) propongono per gli stessi materiali indagati nel corso della sperimentazione su provini esposti ad invecchiamento naturale^{xiii}, l'analisi delle medesime caratteristiche in seguito all'applicazione di una serie di cicli di invecchiamento accelerato. La simulazione all'interno della macchina delle stesse condizioni climatico-ambientali, cui i campioni sarebbero esposti se fossero messi realmente in opera nell'area geografica nella quale avviene la sperimentazione (ossia quella catanese), è affrontata dagli autori raccogliendo i dati climatici dell'area a partire dal 1968. Successivamente si caratterizza la sequenza naturale delle quattro stagioni climatiche, assimilando queste ultime a condizioni climatiche semplici, simulabili dalla macchina, e si determinano quindi i parametri termo-igrometrici di riferimento, la quantità di precipitazioni e l'irraggiamento, che andranno, infine, impostati nella macchina per la costruzione dei cicli di in-



Fig. 4.8. Pannelli confezionati con malte in terra a scarsa resistenza meccanica, predisposti per la valutazione dell'aderenza su un supporto anch'esso in terra. (D'ORAZIO, 2004)

vecchiamento.

Gli stessi autori evidenziano, inoltre, la necessità di standardizzare i criteri di impostazione dei cicli, al fine di ottenere risultati maggiormente confrontabili tra loro.

D’Orazio, Munafò et al. (2004) propongono una sperimentazione su intonaci in terra, ai fini di un possibile riutilizzo nei cantieri odierni.

Gli autori suggeriscono di confrontare i risultati delle prove realizzate su campioni di intonaco confezionato con terre, con altri ottenuti da campioni di intonaco confezionati secondo tecniche più comuni (ovvero con calce idraulica, calce aerea, cemento Portland, cemento bianco e gesso misto a calce).

Le caratteristiche esaminate da D’Orazio, Munafò et al. riguardano il ritiro igrometrico^{xiv}, l’assorbimento d’acqua per capillarità, la resistenza all’erosione^{xv}, quella meccanica per flessione e compressione, ed infine quella allo strappo, per aderenza. Il confronto con gli intonaci “normali” e quello con gli intonaci in terra non confezionati in opera, già disponibili sul mercato, mostra l’inadeguatezza di alcuni sistemi ad elevata rigidità, soprattutto per ciò che riguarda la compatibilità con il supporto in terra.

Gasparoli, Sabbadini, et al. (2001) si occupano di intonaci in argilla per applicazioni in ambienti interni. La sperimentazione viene condotta su applicazioni stese su supporti in cemento armato, mattone cotto e mattone crudo, e le caratteristiche indagate riguardano l’assorbimento d’acqua a bassa pressione con tubo di Karsten, l’aderenza al supporto, alle quali si aggiungono le prove di imbibizione per assorbimento capillare e per assorbimento totale, condotte su provini di malta di 5x5x5 cm, appositamente confezionati ed essiccati all’aria, fino a peso costante. Anche Gasparoli, Sabbadini et al., come D’Orazio, Munafò, et al., mettono a confronto il comportamento dei campioni in esame, con premiscelati a base di argille e con intonaci tradizionali a calce.

Le procedure di sperimentazione tramite assorbimento a bassa pressione con tubi di Karsten e prova di aderenza al supporto, sono state impiegate anche da Dessy, Galimberti et al. (2000) per la valutazione della resistenza di alcuni intonaci all’aggressione chimica. In questo caso le prove vengono effettuate su campioni di intonaco stesi su pannelli realizzati in muratura di mattoni pieni: un terzo



della superficie intonacata viene protetta con pannelli in policarbonato, al fine di proteggerla dall'azione di invecchiamento, che simula l'aggressività dovuta alle cosiddette "piogge acide". Il test di invecchiamento, condotto in laboratorio, consiste nell'esposizione dei pannelli a cicli di bagnatura e successiva asciugatura dei campioni spruzzati con acque addizionate con CO_2 ($\text{pH} = 5,6$), che simulino le piogge non inquinate, ovvero con acque addizionate con acido solforico ($\text{pH} = 3,5$), a simulazione di piogge che, assorbendo vari contaminanti presenti nell'aria, divengono "acide". La sperimentazione ha mostrato che l'esposizione delle superfici intonacate

Fig. 4.9. Esposizione dei pannelli in intonaco ai raggi UV per la valutazione della durabilità in laboratorio (DESSY, 2000)

ad agenti aggressivi, oltre a comportare un'erosione degli strati di finitura, accelera l'invecchiamento con un aumento dei valori di permeabilità all'acqua.

L'efficacia dei sistemi ad intonaco di tipo risanante, capaci di "mascherare" gli effetti della notevole presenza di umidità nelle murature, viene indagata da D'Orazio, Stazi et al. (1997), attraverso una sperimentazione su muretti posti ad operare in condizioni di continuo assorbimento d'acqua per capillarità, per poi valutare i tempi di imbibizione e asciugatura con i diversi sistemi oggetto della sperimentazione. L'assorbimento continuo di acqua viene simulato anche con soluzioni sovrasature di solfato di sodio, per ricreare le condizioni di cristallizzazione salina, che costituiscono la maggiore causa di degrado associata all'umidità. Le prove vengono sempre eseguite tramite confronto con soluzioni analoghe, nelle quali è altresì prevista la presenza di una barriera chimica. La capacità deumidificante viene valutata attraverso la stima dei tempi e dei modi di assorbimento e smaltimento dell'umidità, ossia attraverso la valutazione delle caratteristiche di permeabilità al vapore e di assorbimento per capillarità; la valutazione delle proprietà meccaniche e della struttura porosa sono, invece, indice della resistenza alle sollecitazioni legate all'umidità.

ⁱ Molte problematiche relative alla sperimentazione di prodotti per la finitura delle superfici esterne degli edifici sono state esaminate nel corso di una collaborazione scientifica tra la Soprintendenza per i Beni Ambientali ed Architettonici del Piemonte, il Politecnico di Torino ed altre istituzioni, svoltasi tra gli anni Ottanta e Novanta dello scorso secolo, i cui primi risultati furono già pubblicati in occasione di un importante convegno di studi, tenutosi a Roma nel 1984, sul tema degli intonaci nell'edilizia storica. Cfr. APPENDINO, P., BARDELLI, P.G., BORASI, V., NEGRO, A., SCARZELLA, P., *Le tecniche ed i materiali non tradizionali: problematiche e ricerca*, in *Intonaci, colore e coloriture nell'edilizia storica, atti del convegno di studi Roma 25-27 ottobre 1984*, «Bollettino d'arte», 1986, Supplemento al n. 35-36

ⁱⁱ La sperimentazione si è svolta tra il 1996 ed il 2001 grazie al contributo della Sait-Gobain Weber, azienda leader nella produzione di materiali e sistemi per l'edilizia.

ⁱⁱⁱ La fortezza militare di Santa Marta è un complesso edilizio realizzato nel XVII secolo sulla linea costiera di Lisbona, con una struttura muraria irregolare realizzata in pietra e mattoni e rifinita con una malta di calce di colore rossastro dovuto alla presenza di terre locali nell'impasto. Cfr. TAVARES, M., MAGALHÃES, A. C., VEIGA, R., VELOSA, A., AGUIAR, J., *Repair mortars for a maritime fortress of the XVII th*

century, International Conference on Construction Heritage in Coastal and Marine Environment, Lisbona, 28 – 30 Gennaio 2008

^{iv} Il metacaolino è un prodotto derivante dalla cottura a circa 600-700°C di argille ad elevato contenuto caolinitico, successivamente macinate, spesso utilizzato in sostituzione del cocchiopesto.

^v Il filler è una frazione di aggregato con passante al setaccio 0,075 mm maggiore del 90% (in accordo con la norma UNI 2332-1979 “Vagli di controllo. Stacci di controllo e relativi fondi e coperchi. Dimensioni e tolleranze”, oggi ritirata).

^{vi} L'ANVIDES (Associazione Nazionale Imprese di Restauro, Coloritura, Decorazione, Stuccatura e Verniciatura) è un'associazione apolitica, fondata su basi democratiche e senza fini di lucro, che ha lo scopo di tutelare gli interessi tecnici, economici, sindacali e culturali delle imprese di: verniciatura, imbiancatura, restauro, decorazione, stuccatura, manutenzione, e finiture edili in genere nonché di trattare tutti i problemi che interessano le stesse.

^{vii} Il progetto *Le malte e gli intonaci nell'edilizia storica e monumentale della Sicilia: caratterizzazione compositiva e ricerca di nuovi prodotti compatibili con i supporti lapidei regionali*, PON – Ricerca Scientifica, Sviluppo tecnologico e Alta Formazione – 2000 – 2006, Mis. I.3 e Mis. III.1, D.M. 8 agosto 2000, n. 593, art. 12, si è svolto tra il 2003 ed il 2006, coinvolgendo diversi partners ed istituzioni, quali il Parco Scientifico e Tecnologico della Sicilia, PSTS s.c.p.a., il Centro per la Protezione ambientale e l'Analisi dei materiali, CEPA s.r.l., l'Istituto Superiore di Ricerca e formazione sui Materiali speciali per le tecnologie avanzate e per l'ambiente, ISRIM s.c.a.r.l., il Consorzio Catania Ricerche, CCR, l'IBM e l'Università degli Studi di Palermo.

^{viii} La classificazione in due categorie dei sistemi di tinteggiatura e pitturazione, definita dalla norma UNI 8752:1985, è utile per distinguere il carattere non pellicolante dei primi, da quello dei secondi, che impiegando, spesso, materiali di origine organica, si presentano sotto forma di pellicola.

^{ix} Prodotto fornito dalla ditta Guglielmino Group. Cfr. CAPONNETTO, R., RODONÒ, U., *La valutazione del decadimento prestazionale di componenti edilizi tipici del contesto mediterraneo*, in MAGGI, P.N., DANIOTTI, B., ALAIMO, G., CIRIBINI, A., MORRA, L., NICOLELLA, M., RODONÒ, U., *La durabilità dei componenti edilizi*, Palermo, Editecnica, 2008.

^x Additivo in grado di accelerare i tempi di asciugatura della miscela e di aumentare le capacità di impermeabilizzazione all'acqua. Cfr. CAPONNETTO, R., RODONÒ, U., *La valutazione del decadimento*, op. cit.

^{xi} Additivo in grado di ridurre il ritiro plastico ed aumentare le proprietà deumidificanti. Cfr. CAPONNETTO, R., RODONÒ, U., *La valutazione del decadimento*, op. cit.

^{xii} Il programma di ricerca è stato elaborato presso le unità di ricerca costituite presso l'Università degli Studi di Napoli “Federico II”, Dipartimento di Ingegneria Edile – Napoli, l'Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Architettura Tecnica e Produzione Edilizia – Ancona, e l'Università degli Studi di Genova, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica – Genova.

^{xiii} Cfr. Parte I - § 4.3

^{xiv} Il ritiro igrometrico viene valutato dopo 7 giorni dal confezionamento dei provini.

^{xv} La prova di erosione, particolarmente importante per le costruzioni in terra, è effettuata in accordo con la norma neozelandese NZS 4298:1998 *Materials and Workmanship for Earth Buildings, Standards New Zealand*, detta anche prova di Geelong.. Questa consiste nel far cadere da un contenitore, una quantità d'acqua pari a 100 ml, sotto forma di gocce, tramite una flebo, da un'altezza di 40 cm, su campioni di 3x10x10 cm, inclinati di 27° rispetto all'orizzontale. L'indice di erosione si valuta in base alla profondità dei fori causati dalle gocce d'acqua.

5. IL QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO

Un settore di conoscenze così ampio, come è quello delle malte, in relazione al quale sono tantissimi gli autori che hanno fornito, a partire dall'opera vitruviana, un contributo di saperi sempre più avanzati, avverte, oggi come non mai, la necessità di una base informativa e normativa comune a tutto il settore delle costruzioni, specialmente con riferimento al grandissimo numero di specificità regionali che i materiali componenti della malta e l'elemento costruttivo intonaco hanno assunto nei secoli passati.

Nel corso degli ultimi decenni hanno, quindi, acquisito una sempre maggiore importanza tutte quelle norme, emanate dagli istituti di normazione riconosciuti nei diversi ambiti nazionali e sovranazionali, che regolamentano la materia, a partire dagli aspetti terminologici, passando per quelli legati alle modalità di produzione, ovvero per quelli inerenti le attività di diagnostica dei materiali esistenti, fino ad arrivare alle procedure di sperimentazione per i materiali di nuova concezione.

Le difficoltà di chi vuole muoversi in quest'ambito sono notevoli: sono infatti molti gli Stati che hanno adottato, al proposito, una propria normativa, spesso calibrata sulla base delle singole necessità nazionali, che spesso trovano una scarsa corrispondenza con quelle degli Stati vicini. Tuttavia vi sono istituzioni che, avendo ottenuto un riconoscimento sovranazionale, hanno emanato norme che vengono riconosciute in ambiti internazionali.

Nel territorio italiano, ad esempio, è assolutamente dichiarato il valore delle norme emanate da quegli istituti normatori internazionali che godono di un riconoscimento da parte di tutti gli Stati del mondo, ovvero ancora, è allo stesso modo espressa, attraverso il recepimento delle direttive di ordine superiore, la validità delle norme emesse da istituti fondati dagli Stati membri dell'Unione Europea. Spesso, infatti, gli istituti normatori dei singoli Stati, ovvero anche quelli a riconoscimento sovranazionale, ma non universale (ad esempio quello europeo), si limitano a recepire ed a far proprie le norme emesse a livello superiore.

Se a tutto ciò si aggiunge che, per alcuni specifici aspetti per lo più legati alla ricerca scientifica, spesso non si possa fare riferimento alle

norme riconosciute nell'ambito della nazione nella quale la ricerca venga sviluppata, ma si debba far riferimento a quelle di origine estera, anche in ragione della mancata coerenza di molte prescrizioni normative, si capisce quale possa essere la difficoltà di colui che, non essendo particolarmente esperto, intenda muoversi in accordo con gli standard ufficiali.

5.1. NORME ITALIANE: L'UNI

In ambito italiano, l'istituto normatore principale è l'UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione, che emette norme anche nel settore tematico delle malte per intonaco. L'istituto, fondato nel 1921, presenta la forma giuridica di un'associazione privata di imprese, professionisti, associazioni, enti pubblici, centri di ricerca ed istituti scolastici, che non ha alcun fine di lucro e risulta ufficialmente riconosciuto dallo Stato Italiano e dall'Unione Europea. L'UNI, inoltre, rappresenta l'Italia presso le organizzazioni internazionali di normazione europea (CEN) e mondiale (ISO).

Lo scopo dell'ente è quello di elaborare norme tecniche che, tra l'altro, siano strumenti di supporto all'innovazione tecnologica ed alla qualità dei prodotti e dei processi. Le norme sono quindi documenti che definiscono lo stato dell'arte di prodotti, processi e servizi e, pur essendo di applicazione volontaria, forniscono agli operatori riferimenti certi, che possono assumere anche rilevanza contrattuale.

In accordo con le procedure normative internazionali, l'UNI si occupa anche di recepire obbligatoriamente le norme EN, emanate dal CEN – European Committee for Standardization – che svolge una funzione analoga a quella dell'UNI nell'ambito della Comunità Europea, ossia con riferimento ai 31 stati membri della comunità. L'obbligatorietà del recepimento, da parte dell'UNI, delle norme europee EN comporta anche il ritiro delle eventuali norme in contrasto.

Similmente l'UNI può direttamente, o per tramite del CEN, recepire norme adottate dall'ISO – International Organization for Standardization – che regolamentano le relazioni commerciali a livello mondiale, esclusivamente tra i 160 paesi che hanno manifestato l'interesse da parte dei propri mercati al processo normativo internazionale.

Fig. 5.1. L'Ente Nazionale Italiano di Unificazione – UNI – è riconosciuto dallo Stato Italiano per l'attività normativa svolta anche nel settore delle malte per intonaco.



Nel caso in cui l'UNI adotti, a livello nazionale, una norma ISO, questa diviene un riferimento anche per le attività che si svolgono all'interno delle frontiere dell'Italia, e la norma acquisisce la doppia sigla UNI ISO. Similmente, qualora il mercato unico europeo valuti la validità di una norma internazionale ISO, questa viene adottata senza modifiche ed acquisisce la sigla EN ISO; qualora, infine, il recepimento della norma comunitaria da parte dell'UNI sia obbligatorio, la norma proposta all'utente nazionale porta con sé la sigla di tutti gli istituti normatori suddetti, ossia UNI EN ISO.

Ciascun istituto normatore è costituito, al proprio interno da Comitati Tecnici (Technical Committee TC), ai quali è assegnato il compito di occuparsi delle diverse famiglie di argomenti trattati dall'intero istituto.

Nell'ambito dell'UNI, i comitati tecnici, prendono il nome di Commissioni Tecniche, e, ad esse, è affidata la funzione di pianificazione e controllo delle attività, mentre la stesura dei documenti viene affidata ad un gruppo, guidato da un relatore, che viene detto Project Leader (Gruppo di lavoro).

Il processo normativo prevede che, prima della pubblicazione di una norma, tutte le parti economico/sociali interessate possano essere coinvolte, attraverso commenti, nella fase istruttoria, al fine di ottenere il massimo consenso possibile per il testo della norma in esame: gli organismi di normazione nazionali, in ambito europeo ed internazionale, svolgono, al proposito, la funzione di interfacciamento con gli organi tecnici superiori.

Proprio la consensualità tra le parti interessate e la condivisione dello stato dell'arte, sulla base delle conoscenze acquisite e dell'esperienza maturata, consentono di differenziare le pubblicazioni normative in diverse forme: il Rapporto Tecnico (TR) ha un carattere esclusivamente informativo, la Specifica Tecnica (TS) rappresenta uno stato dell'arte non ancora consolidato e, per questo, sottoposto a periodi di verifica della validità, mentre la Norma Tecnica esprime il massimo livello di consenso sullo stato dell'arte.

Nell'ambito tematico delle norme, le norme attualmente circolanti in Italia costituiscono, perlopiù, un recepimento, spesso con traduzione, di norme emesse a livello centrale europeo. L'attività di normazione in materia è stata spesso condotta o seguita, nel territorio nazionale,

Fig. 5.2. L'Organizzazione internazionale di standardizzazione ISO raccoglie 160 membri in rappresentanza di altrettante nazioni. Sono ancora molti, però, i paesi non ancora rappresentati all'interno della stessa.



non direttamente dall'UNI, ma da un ente federatoⁱ chiamato UNI-CEMENTO (Ente Federato di normazione dei leganti idraulici, malte, calcestruzzi e cemento armato), eventualmente in collaborazione con la Commissione Cemento, malte, calcestruzzi e cemento armato. In ambito europeo, invece, l'attività normativa viene direttamente condotta dai Comitati Tecnici: tra questi, si ricordano per la notevole produzione normativa sul tema delle malte il CEN/TC 125 "Masonry" ed il CEN/TC 51 "Cement and building limes".

Alcune delle norme emesse dal comitato tecnico CEN/TC 125 saranno oggetto di discussione nella terza parte della ricerca.

5.1.1. Raccomandazioni Nor.Ma.L.

Nell'ambito tematico delle malte (ma anche di altri materiali, quali le pietre, gli stucchi, i prodotti ceramici, il legno ed i metalli), specialmente per le applicazioni relative alla diagnostica ed al restauro, la normativa italiana presenta, rispetto alle norme di tutti gli altri paesi, una particolarità assai apprezzata negli ambienti scientifici, e per questo diffusa a livello internazionale.

La novità, determinata dal notevole patrimonio culturale italiano e dal dibattito che, a partire dal secondo dopoguerra, scaturì nella comunità nazionale (ma anche internazionale) sul deterioramento che interessava i materiali costituenti le opere d'arte di interesse storico-artistico-architettonico, consiste nell'istituzione, nel 1982, di una commissione scientifica che, secondo quanto espresso da un apposito decreto Ministero per i Beni Culturaliⁱⁱ, proceda alla *normalizzazione di metodi di studio e controllo dei manufatti artistici in pietra*ⁱⁱⁱ.

La commissione prese il nome NorMaL (Normativa Materiali Lapidei), ma il campo di interesse della commissione non si limitò ai soli materiali lapidei, per i quali era stata istituita, bensì si estese ad un numero ben più ampio di materiali, diffusamente impiegati nella realizzazione di manufatti artistici, ovvero a problematiche correlate ad alcuni aspetti specifici legati alla conservazione (studio dei parametri ambientali e dell'umidità nelle murature), ovvero ancora all'emissione di linee guida da adottare nella pianificazione di un progetto di intervento.

L'attività normativa della commissione si è tradotta, nel corso degli anni, nell'emissione di alcuni testi, oggi ben noti a coloro che con preparazione e consapevolezza si interessano, con profili professionali diversi, alle problematiche correlate alla conservazione del patrimonio architettonico ed artistico. Questi testi hanno preso il nome di *Raccomandazioni*. Data la multidisciplinarietà dei compiti della Commissione, già col decreto di istituzione del 1982, si stabilì di suddividere la Commissione in 5 gruppi di lavoro:

- Gruppo NorMaL C – metodologie chimiche;
- Gruppo NorMaL P – metodologie petrografiche;
- Gruppo NorMaL B – metodologie biologiche;
- Gruppo NorMaL F – metodologie fisico-meccaniche;
- Gruppo NorMaL M – malte (caratterizzazione)

Nel corso degli anni, riconosciutane l'esigenza tecnico-scientifica, sono stati creati nuovi gruppi di lavoro, ciascuno dei quali, per motivi organizzativi, è caratterizzato da una sigla^{iv}. Le malte, pur coinvolgendo in maniera trasversale più gruppi di lavoro, costituiscono l'argomento di studio del GL 11 *Metodologie caratterizzazione malte storiche e da restauro*, coordinato dalla d.ssa Giovanna Alessandrini del CNR.

Dalla sua istituzione, fino al 1997 la Commissione NorMaL ha emesso 44 raccomandazioni, pubblicate a cura del Consiglio Nazionale delle Ricerche e dell'Istituto Centrale del Restauro e caratterizzate, oltre che dal titolo, da un numero relativo all'ordine progressivo di stampa ed uno relativo all'anno di stampa.

L'esigenza di ufficializzare l'attività normativa della Commissione, determinò la totale confluenza della stessa all'interno dell'Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), e quindi l'istituzione della Commissione UNI Beni Culturali – NorMaL. Il riconoscimento da parte dell'UNI delle attività svolte dalla Commissione NorMaL, reso possibile grazie ad una convenzione stipulata nel 1997 tra il Ministero BB.CC. ed l'ente di normazione italiano, ha contribuito a far assumere ai documenti elaborati come Raccomandazioni il carattere di vere e proprie Norme, e quindi a darne una maggiore e più capillare diffusione anche in ambito europeo, e più facile reperibilità attraverso il sito dell'UNI.

Dal 1997 al 2010 la commissione ha elaborato 53 norme UNI, alcune delle quali rappresentano un aggiornamento e/o una revisione di una precedente raccomandazione NorMaL.

Il continuo richiamo alla normativa italiana in merito alla conservazione dei beni culturali, da parte di colleghi europei, ha indotto l'UNI a proporre alla Commissione Europea di Normativa (CEN) l'attivazione di un comitato tecnico dedicato alla conservazione dei beni culturali. Nel 2002 la proposta è stata accettata ed è quindi stata concordata la struttura del nuovo comitato CEN/TC 346 - *Conservation Cultural Property*, che presenta, al proprio interno cinque gruppi di lavoro, con obiettivi differenziati.

Proprio in virtù di un maggior dialogo tra il Comitato Tecnico TC 346 e la Commissione Italiana UNI Beni Culturali – NorMaL, quest'ultima ha riconfigurato la costituzione dei propri gruppi di lavoro, definendo 5 *Gruppi specchio – GL*, le cui tematiche di normativa corrispondono a quelle dei gruppi europei, ed in cui confluiscono, secondo le specifiche competenze, i componenti della precedente struttura, che operano attraverso *Gruppi Specialistici GS*.

5.2. NORME ESTERE

Già nel § 5.1 si è visto, in linea generale, quali siano, a livello sovranazionale, gli istituti normatori ufficialmente riconosciuti da più Stati, sia in ambito europeo, che in ambito mondiale, limitatamente ai 160 stati membri dell'ISO, e quali siano le procedure di redazione e di approvazione delle norme comunitarie e mondiali, nonché il ruolo che gli istituti normatori nazionali hanno nei processi internazionali.

Le norme che però si possono esaminare, ai diversi livelli, sono molte di più e tutte si contraddistinguono per la presenza di una sigla. Restando nell'ambito dei paesi che aderiscono all'ISO, si ricorda che tutti gli stati membri dell'Unione Europea sono, allo stesso tempo, mem-

Fig. 5.3. Il CEN controlla l'attività normativa svolta da tutti gli istituti delle nazioni europee.





Fig. 5.4. Gli Stati Uniti d'America svolgono attività normativa anche in forma autonoma ed in concorrenza all'ISO. L'ASTM è l'istituto che regola le procedure sui materiali ed opera in campo internazionale.

bri dell'organizzazione internazionale di standardizzazione.

Tantissime delle norme nazionali degli stati europei, come nel caso italiano, sono però derivanti dal recepimento di norme comunitarie, ossia sono anche norme del tipo EN, per cui, spesso, il riferimento a norme come quelle austriache (ASI), inglesi (BSI), svedesi (SIS), svizzere (SNV), francesi (AFNOR) o tedesche (DIN), tra le altre, può essere ridondante, qualora il testo normativo non sia stato redatto in ambito esclusivamente nazionale.

In ambito extraeuropeo sono membri ISO i principali paesi degli altri continenti, come il Canada (il cui acronimo normativo è SCC), l'Argentina (IRAM), il Giappone (JISC) e l'Australia (SAI), ma anche paesi ad economie meno forti, quali il Botswana (BOBS), l'Iraq (COSQC), Trinidad e Tobago (TTBS) e le Filippine (BPS).

Gli Stati Uniti, che comunque hanno una rappresentanza in seno all'ISO, presentano una situazione molto decentralizzata e settorializzata, costituita da un istituto centrale di amministrazione e coordinamento, l'ANSI (American National Standards Institute), che opera per accreditamento di singole organizzazioni che sviluppano norme, le SDO (Standards Developing Organizations).

Le norme americane elaborate dalle SDO sono spesso prese come riferimento dai mercati internazionali, in concorrenza con quelle ISO, in ragione della presenza di multinazionali americane nei processi di definizione delle stesse. Nel settore delle sperimentazioni sui materiali, ad esempio, si richiede spesso, anche per mezzo di disposizioni legislative, la conformità alle norme americane emesse dall'ASTM (American Society for Testing and Materials), organismo che si autodefinisce associazione internazionale no profit.

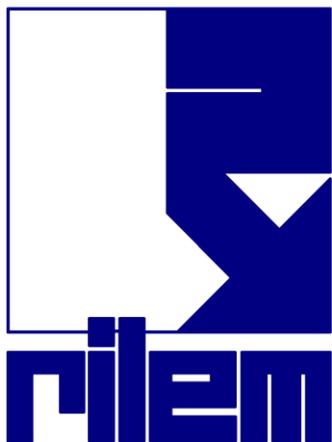


Fig. 5.5. Nel territorio europeo ed in parte extracomunitario le attività dei laboratori di edilizia vengono promosse, ed in parte regolamentate da una rete internazionale dei laboratori: il RILEM.

5.2.1. Norme RILEM

Gli istituti normatori finora visti hanno tutti competenza nei più svariati campi commerciali, dal settore edile, a quello agroalimentare, dall'industria chimica, ai servizi finanziari.

Ci sono però istituti che, diversamente dalle singole commissioni tecniche, o dalle organizzazioni di standardizzazione del modello americano, operano con sufficiente autonomia nel solo campo delle costruzioni. È il caso del RILEM – International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures^v.

Questa istituzione trae origine da un incontro^{vi}, avvenuto a Parigi nel 1947, tra i direttori di laboratorio di quindici nazioni, le cui relazioni internazionali erano state interrotte dalla guerra. La configurazione dell'istituto di cooperazione internazionale per le prove e le ricerche sui materiali e le strutture, fu quindi definita nel corso degli incontri successivi, tenutisi in Italia ed in Svizzera, che coinvolsero trenta nazioni e che portarono alla nomina del presidente, il professor Gustavo Colonnetti, componente fondatore dell'associazione.

Gli obiettivi del RILEM riguardano la promozione di un'edilizia sostenibile e sicura, a prestazioni elevate e caratterizzata da rapporti costi-benefici adeguati, l'individuazione di nuove direzioni di ricerca e di forme di cooperazione internazionale finalizzate ad un ampliamento dell'accesso alle conoscenze avanzate per promuovere l'eccellenza nelle costruzioni.

Anche il RILEM presenta una struttura normativa di tipo piramidale, composta da un consiglio direttivo e da una serie di uffici, i comitati delle attività tecniche (TAC Technical Activities Committee), affiancati da un comitato consultivo di gestione ed un ufficio di segretariato. A questi bisogna aggiungere un'ulteriore serie di uffici, costituita dagli EAC – Educational Activities Committee, che si occupano della promozione delle attività formative del RILEM nel mondo, attraverso l'istituzione di corsi di formazione o la pubblicazione di materiale didattico.

I TAC si occupano di promuovere presso l'amministrazione centrale tutte le attività proposte al RILEM, come le conferenze ed i workshop. Le attività del RILEM vengono quindi diffuse nelle usuali forme di diffusione del sapere scientifico, ossia attraverso articoli sul proprio

periodico *Materials and structures*, ovvero tramite atti normativi noti come raccomandazioni, tramite relazioni, compendi, etc.

Di particolare interesse, per ciò che riguarda la produzione documentaria sul tema delle malte per intonaco, le attività promosse dal TC 203-RHM: *Repair mortars for historic masonry*, quelle del TC SGM: *Specification for non-structural grouting of historic masonries and architectural surfaces*, ovvero quelle del TC 25-PEM: *Protection et erosion des Monuments*.

5.3. CALCE E SISTEMI DI CERTIFICAZIONE DELLA SOSTENIBILITÀ

Una recente applicazione di sistemi normativi alle malte di calce per l'esecuzione di intonaci consiste nella certificazione relativa alla sostenibilità ambientale dei materiali confezionati con leganti prodotti con tecniche di tipo tradizionale, ad impatto energetico basso.

Il dibattito e la letteratura scientifica, negli ultimi tempi, si sono indirizzati, anche nel campo delle malte per intonaco, verso le problematiche relative all'impiego della calce come materiale 'verde' e 'sostenibile', e per questo sempre più oggetto di interesse da parte di progettisti e addetti ai lavori^{vii}.

Secondo la World Commission on Environment and Development^{viii} lo sviluppo sostenibile deve rispettare tre condizioni generali concernenti l'uso delle risorse naturali da parte dell'uomo:

- il tasso di utilizzazione delle risorse rinnovabili non deve essere superiore al loro tasso di rigenerazione;
- l'immissione di sostanze inquinanti e di scorie nell'ambiente non deve superare la capacità di carico dell'ambiente stesso;
- lo stock di risorse non rinnovabili deve restare costante nel tempo.

La produzione e l'utilizzo della calce possono, quindi, essere definite attività sostenibili: la reperibilità della materia prima, costituita dal calcare, è infatti altissima, così come risulta assai elevata la sua capacità di formazione con processi naturali (attraverso i fenomeni di erosione e dissoluzione, con successiva precipitazione e sedimentazione). Produrre calce, però, vuol dire anche rilasciare in atmosfera una quantità di CO₂ assai maggiore di quella che viene riassorbita durante i processi di carbonatazione, in ragione dell'impiego quasi esclusivo dei combustibili fossili per l'alimentazione dei forni: l'elevato rendimento

Fig. 5.6. La sezione italiana dell'U.S. Green Building Council ha recentemente introdotto in Italia il sistema di certificazione LEED delle costruzioni a basso impatto ambientale.



dei forni moderni, che evidenzia l'efficienza dei sistemi di produzione della calce, specialmente al confronto con altri settori industriali, la possibilità di utilizzo di biomasse, in alternativa ai combustibili fossili, e, in ogni caso, il confronto tra le emissioni di anidride carbonica nei cicli produttivi della calce e del cemento (che richiede temperature di cottura assai più elevate), portano ad affermare che la prima possa essere ritenuta un materiale sostenibile.

In accordo con quanto affermato, l'impiego della calce nelle costruzioni contribuisce in maniera rilevante al raggiungimento della certificazione LEED (Leadership in Energy and Environment Design)^{ix} per i progetti di costruzione.

La finalità della certificazione LEED consiste nella diffusione dell'impiego di materiali ecologici, come la calce, negli interventi di recupero del patrimonio storico-architettonico, dove questa assume un ruolo sempre più rilevante, e nei processi di costruzione di edifici di nuova realizzazione, dove ancora è diffuso l'impiego di materiali che, in questa ed in altre prospettive, risultano meno virtuosi.

Il sistema LEED è uno standard applicato in oltre 100 paesi del mondo, sviluppato dall'U.S. Green Building Council (USGBC), associazione no profit che promuove e fornisce un approccio globale alla sostenibilità, fondata nel 1993 ed attiva anche in Italia con un protocollo

Fig. 5.7. I requisiti caratterizzanti la sostenibilità dell'edificio certificato LEED vengono distinti in sei categorie, cui se ne aggiunge una settima, che ha come obiettivo l'incentivazione delle caratteristiche regionali rispetto a quelle nazionali.



LEED di certificazione presentato nell'aprile del 2010.

Il sistema di certificazione ha natura volontaria ed è applicabile, nelle sue articolazioni, all'ambito delle nuove costruzioni, degli edifici esistenti e delle piccole abitazioni, al fine di raggiungere uno standard comune di misurazione degli edifici a basso impatto ambientale.

ⁱ Gli Enti Federati sono associazioni che svolgono attività normativa per un particolare settore industriale, rispettando gli scopi e lo statuto dell'UNI. Lo studio e la predisposizione dei progetti di norma viene fatto, tramite le Commissioni Tecniche, a diretto contatto con il settore industriale di competenza, e la trasformazione in Norma avviene soltanto dopo la valutazione e l'approvazione della Commissione Centrale Tecnica UNI. Cfr. SIVIERO, E., CANTONI, R., FORIN, M., *Durabilità delle opere in calcestruzzo: degrado del calcestruzzo, corrosione delle armature, prevenzione, misura della durabilità, sperimentazione e controlli*, Milano, Ed. Franco Angeli, 1995.

ⁱⁱ Il Ministero per i Beni Culturali e Ambientali fu istituito nel 1974, con il d.l. 14 dicembre 1974, n. 657, dal quarto governo Moro, ed il primo Ministro fu Giovanni Spadolini.

ⁱⁱⁱ Cfr. il decreto di istituzione della Commissione NorMaL, DM 11 novembre 1982.

^{iv} Per una completa visione dei gruppi di lavoro della Commissione UNI Beni Culturali – NorMaL, de icampi di attività e dei Coordinatori, si veda ALESSANDRINI, G., *La conservazione dei Beni Culturali e la normativa tecnica: un rapporto trentennale. Passato, presente ... futuro*, «Kermes – La rivista del restauro», 2008, n. 71.

^v L'acronimo RILEM deriva dal nome esteso che l'istituzione possiede in lingua francese: Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages.

^{vi} L'incontro fu promosso da Robert L'Hermite, direttore del "Laboratoires du Bâtiment et des Travaux Publics de Paris".

^{vii} Cfr. RATTAZZI, A., POLIDORO, C., *La calce nel sistema LEED. Un materiale antico con un futuro verde e sostenibile*, «Recupero e Conservazione», 2010, n. 90.

^{viii} Cfr. WCED (1987) *Our Common Future*, Report of the World Commission on Environment and Development, Oxford University Press, Oxford.

^{ix} Il sistema di valutazione LEED, sviluppato dal Green Building Council per definire i parametri che designano una 'costruzione verde', si basa sull'attribuzione di crediti per ciascuno dei requisiti caratterizzanti la sostenibilità dell'edificio. Questi vengono raggruppati in sei categorie, in relazione a ciascuna delle quali l'impiego della calce garantisce l'acquisizione di un numero specifico di crediti (fino ad un massimo di 69), finalizzati al raggiungimento di un livello di certificazione (garantito da un numero di punti pari a 26, per il raggiungimento di un livello base).



PARTE II

6. MALTE A COMPORTAMENTO IDRAULICO E SEMI-IDRAULICO

Le malte idrauliche e semi-idraulicheⁱ sono, in generale, quelle confezionate con leganti idraulici, ad esempio cemento e/o calce idrauliche, ovvero anche con legante aereo, calce aerea, ed aggregati in grado di conferire alla malta le caratteristiche di idraulicità.

A differenza di quelle aeree, ove la presa e l'indurimento avvengono soltanto se esposte all'aria (per reazione con l'anidride carbonica contenuta nell'aria, nel caso di malte confezionate con calce aerea, ovvero per perdita dell'acqua di impasto, se a base di gesso), le malte idrauliche, come è noto, fanno presa e induriscono all'aria, ma anche e soprattutto in ambiente umido, o addirittura subacqueo.

Trascurando le caratteristiche delle malte a base cementizia che, pur avendo alcune proprietà in comune con quelle confezionate con leganti idraulici naturali, ovvero con aggregati idraulicizzanti, non costituiscono l'oggetto di questo studio, si può affermare che le malte idrauliche si caratterizzano, anche in relazione alle proprietà della frazione aggregata, per l'ottima lavorabilità, dovuta alla consistenza pastosa, alla coesione ed al forte potere adesivo. In qualche caso le malte idrauliche presentano anche una consistenza plastica ed elastica che le rende simili alle malte aeree.

L'impiego di malte con caratteristiche di idraulicità, ottenute per aggiunta di componenti idraulicizzanti, risale all'antichità. Già i Greci e gli Etruschi conoscevano il fatto che impiegando materiali naturali, come la pietra pomice ed i tufiⁱⁱ, od anche i laterizi macinati, nella formulazione di miscele con calce aerea si otteneva una malta in grado di indurire in ambiente umido o in acqua, per la realizzazione, ad esempio, dei moli dei porti.

Fu soprattutto la civiltà romana, però, quella che maggiormente contribuì alla diffusione delle malte idrauliche negli impieghi edilizi ed alla codificazione del sapere tecnologico.

I Romani, come i Greci, gli Etruschi ed i Fenici prima di loro, sapevano bene che alcuni depositi vulcanici, mescolati a sabbia e calce, erano in grado di dare una malta che faceva presa in acqua. Grazie all'utilizzo della pozzolana, riuscirono a raggiungere un notevole progresso nelle costruzioni, ad esempio, delle opere idrauliche, anche per la maggiore velocità che il processo di carbonatazione della calce ri-

chiede nelle malte idrauliche, rispetto alle malte aeree. Il progresso della civiltà romana nell'utilizzo delle malte idrauliche fu anche dovuto al sapiente dosaggio dei componenti nelle miscele ed alla lavorazione più o meno compattata dei getti. Ove non fosse disponibile il materiale vulcanico, furono frequentemente utilizzati i frammenti di materiali artificiali, come il laterizio e le ceramiche: è anzi, possibile che l'utilizzo del cocchiopesto nella formulazione di una malta di calce fosse addirittura precedente a quello dei materiali piroclastici, come testimoniato da alcuni ritrovamenti risalenti alla civiltà minoica di Creta (XVIII sec. a.C.)ⁱⁱⁱ.

I Romani impiegarono le malte idrauliche con pozzolana nelle opere idrauliche, con il sistema a getto dentro le casseforme, ma anche per l'esecuzione di intonaci esterni e per i pavimenti, specialmente laddove fossero presenti problemi di umidità proveniente dal sottosuolo.

Le malte confezionate con cocchiopesto, così come indicato negli scritti vitruviani, erano maggiormente impiegate in epoca romana per l'esecuzione degli intonaci, ovvero per il rivestimento interno delle cisterne.

Le conoscenze dei Romani sulle malte idrauliche e semidrauliche ri-



Fig. 6.1. Le tecniche dei Romani ebbero grande diffusione in tutto l'impero: l'uso del cocchiopesto come materiale idraulizzante è testimoniato nelle terme di Fiesole a Firenze, nel I secolo a. C.

In questo caso la proprietà richiesta alla malta consiste nell'impermeabilizzazione delle parti murarie.

masero pressoché immutate per diversi secoli. Durante il Medioevo si assiste ad un graduale declino della qualità delle malte, per l'impiego di calce in zolle mal cotte, senza l'aggiunta di cocchiopesto. Una maggiore attenzione ai processi di produzione si osserva a partire dal XII secolo, per l'esecuzione delle cattedrali gotiche. L'interesse per le tecniche degli antichi riprende, però, soltanto durante il Rinascimento, grazie alla riscoperta degli scritti di Vitruvio: in questo periodo viene reintrodotta l'utilizzo diffuso della pozzolana, grazie anche alla ripresa generale dell'economia, dei commerci e del trasporto. Durante il Seicento ed il Settecento molti autori si cimentano nel tentativo di riprodurre le eccezionali caratteristiche delle malte antiche di riconosciuta superiorità tecnica, formulando, qualche volta con scarso successo, ricette spesso ricche di additivi ritenuti in grado di conferire le caratteristiche richieste

Dall'aggiunta nell'impasto di aggregati reattivi, in grado di conferire caratteristiche di idraulicità più o meno spiccate alle tradizionali malte di grassello, a partire dalla seconda metà del XVIII secolo si passava con infinite cautele alla cottura di quei calcari argillosi che, tranne in pochi casi, la tradizione costruttiva escludeva dall'utilizzo. Infatti, in alcune regioni, come ad esempio il Veneto, si conoscevano bene le proprietà delle calce derivanti dalla cottura dei calcari marnosi locali. In questo periodo furono però effettuati i primi studi a carattere scien-

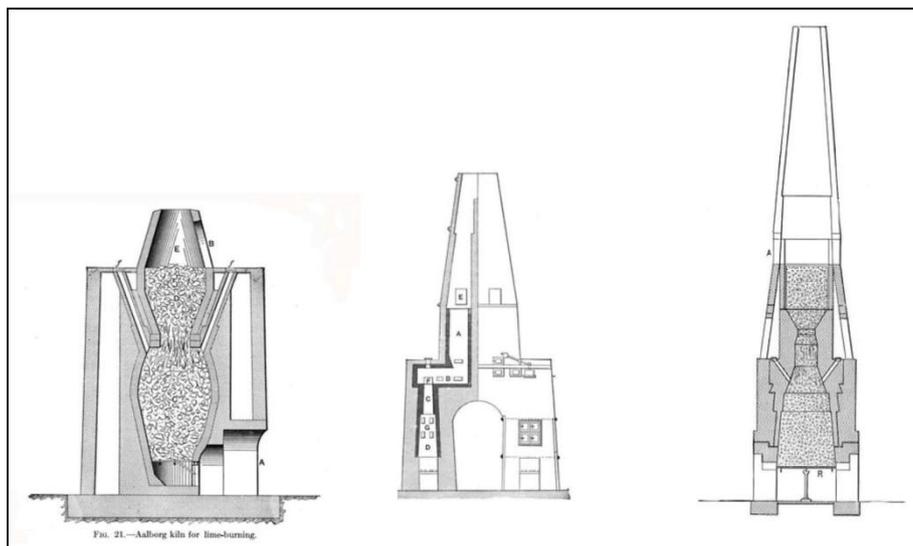


Fig. 6.2. La produzione dei nuovi leganti a partire dal XIX secolo si accompagna all'avanzamento tecnologico delle fornaci che richiedono temperature di cottura sempre più elevate.

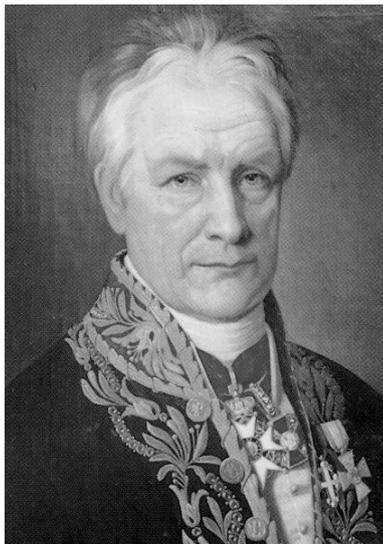


Fig. 6.3. Le sperimentazioni di Louis Vicat (1786 – 1861) sulle malte con caratteristiche di idraulicità rivestono ancora oggi un grande interesse per il rigore con cui furono condotte.

tifico (quindi riproducibili e misurabili) sulle malte idrauliche, grazie alle ricerche di insigni ingegneri, quali Smeaton, Parker e Vicat.

Le ricerche interessarono sia la cottura di calcari impuri ricchi di argilla, impiegati occasionalmente nell'antichità^{iv}, più coscientemente in epoca tardo – rinascimentale per la produzione di calci idrauliche naturali, sia l'aggiunta di agenti idraulicizzanti ai diversi tipi di malte.

Nel 1756 Smeaton sperimentò, per la costruzione del faro di Eddystone, una malta resistente all'acqua di mare utilizzando una calce ottenuta dalla cottura di un calcare argilloso contenente circa l'11% di argilla. J. Parker, nel 1796 brevettò il "cemento romano", un prodotto ottenuto dalla cottura di calcari cavati nel territorio circostante la città di Londra, con elevati contenuti di argilla (circa il 45%) e temperature di cottura superiori rispetto a quelle impiegate da Smeaton.

All'inizio del XIX secolo, L.J. Vicat approfondì le conoscenze scientifiche sul concetto di idraulicità e sui meccanismi di presa, proponendo alcuni criteri per la valutazione delle caratteristiche idrauliche delle malte.

Gli studi di Vicat costituiscono la base per tutte le successive ricerche sull'idraulicità dei leganti, che porteranno, pochi anni dopo la loro pubblicazione, alla produzione del "cemento Portland", ottenuto per raggiungimento, in fase di cottura, dei 1300-1400°C, temperatura necessaria per la sinterizzazione della calce e dell'argilla, e la conseguente formazione del clinker.

6.1. CARATTERISTICHE MECCANICHE, FISICHE, CHIMICHE E PRESTAZIONALI

Le malte non cementizie con caratteristiche di idraulicità sono da sempre impiegate invece di quelle di calce aerea, specialmente laddove sono richieste prestazioni meccaniche migliori, ovvero qualità tipicamente proprie delle malte idrauliche, come la capacità di far presa in ambienti umidi, o quella di rendere poco permeabile la superficie sulla quale vengono applicate.

Gli impieghi delle malte idrauliche non cementizie negli interventi sull'architettura storica risultano particolarmente opportuni, come ormai diffusamente riconosciuto dalla cultura tecnica. Le ricostruzioni

ed i risarcimenti di parti della muratura esistente, i consolidamenti della stessa od anche l'utilizzo come strato di base per gli intonaci, ne fanno un materiale comunemente impiegato per le caratteristiche di resistenza e porosità assai simili con quelle dei più frequenti materiali lapidei che caratterizzano l'architettura storica.

Le prestazioni meccaniche offerte non sono estreme e d'altronde ciò non solo non viene richiesto, ma in molti casi potrebbe essere addirittura controindicato per l'eccessiva rigidità che la malta determinerebbe nella muratura, o nello strato di intonaco (si pensi, ad esempio, ai fenomeni di distacco degli intonaci eccessivamente rigidi come quelli a base cementizia dai supporti poco rigidi, od ai sovraccarichi cui si trova ad operare un elemento a rigidità assai maggiore di quella dell'elemento vicino^v).

Il valore piuttosto basso del modulo elastico, determinato dall'elevata flessibilità dei legami, conferisce a questa tipologia di malte una deformabilità relativa sufficientemente alta, tale da sopportare in parte gli assestamenti delle strutture murarie e le sollecitazioni dovute alle escursioni termiche, alle variazioni dell'umidità relativa dell'aria, alle vibrazioni, etc.

Le malte a base di calce idraulica o idraulicizzate presentano una struttura finemente porosa, che conferisce loro un certo potere termoisolante, pur essendo meno impermeabili e resistenti al gelo delle malte cementizie^{vi}. L'elevata porosità garantisce un'alta traspirabilità ed una bassa resistenza alla diffusione del vapore, requisiti particolarmente apprezzati nelle applicazioni per intonaco. Coppola (1998) ha mostrato che un confronto tra malte composte con diversi tipi di legante rivela che la resistenza alla diffusione del vapore di una malta di grassello è da 3 a 5 volte minore di quella di una malta di calce idraulica, e fino a 100 volte minore di quella di una malta cementizia, con rapporto legante/aggregato pari a 1:3.

A differenza delle malte di calce aerea, dove la presa e l'indurimento avvengono per reazione con l'anidride carbonica contenuta nell'aria, nelle malte di calce idraulica l'indurimento è regolato dalla reazione di idratazione dei silicati e degli alluminati di calcio presenti nel materiale di partenza^{vii}, con formazione di nuovi composti idrati insolubili in forma cristallina stabile. Se la malta è confezionata con calce aerea ed aggregati idraulicizzanti, la reazione di formazione dei silicati e degli

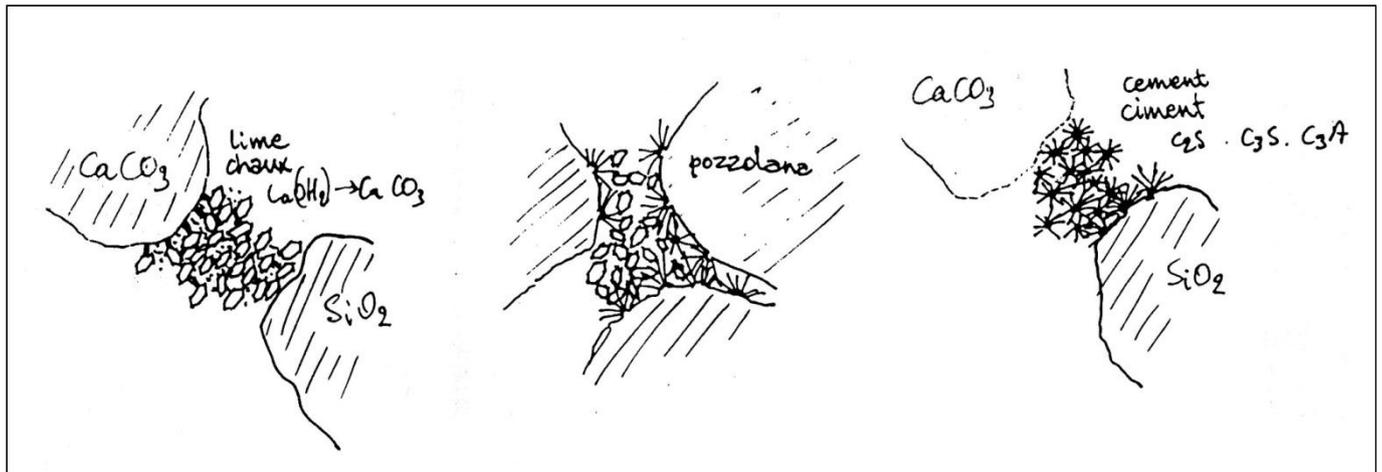


Fig. 6.4. Le malte idrauliche confezionate con calci idrauliche od a componenti idraulicizzanti manifestano in fase di presa ed indurimento un comportamento intermedio tra quello di una malta di calce aerea e quello di una malta cementizia.

alluminati di calcio idrati avviene in ambiente acquoso tra l'idrossido di calcio (della calce aerea) e la silice e l'allumina contenuti nell'aggregato.

Le malte confezionate con materiali pozzolanici presentano quindi processi di presa ed indurimento dovuti sia alla frazione aerea, sia a quella idraulica derivante dalla formazione dei composti idrati. A differenza, però, delle più comuni malte bastarde, confezionate con calce aerea e cemento, i due processi non avvengono in tempi separati^{viii}, ma contemporaneamente: i composti idraulici (silicati idrati di calcio - C-S-H - ed alluminati idrati di calcio - C-A-H^{ix}) non sono già presenti nell'impasto fresco, ma devono formarsi per reazione tra l'idrossido ed i componenti reattivi dell'aggregato. Questa reazione, che avviene a temperatura ambiente, in fase eterogenea (liquido-solido) è piuttosto lenta, anche se lo è meno del processo di carbonatazione della frazione aerea eccedente, per cui i due processi, quello idraulico e quello di carbonatazione, si sovrappongono armonicamente per buona parte dell'iter di maturazione dell'impasto^x.

La lentezza dei processi di indurimento delle malte pozzolaniche consente grandi deformazioni plastiche, che vanno a vantaggio della stabilità delle fabbriche e dei manufatti confezionati con esse, e permette la continua trasformazione delle materie idraulicamente attive, che continuano a rassodare e rafforzare ancor più i manufatti col passare dei secoli. Ciò risulta senza alcun dubbio vero ed utile nelle murature e negli intonaci ad elevato spessore, ma se pensiamo alle continue va-

riazioni dei carichi agenti sulle superfici, ad esempio per le continue variazioni termiche, si capisce quanto possa essere utili l'impiego di una malta altamente plastica.

Sempre con riferimento agli impieghi nelle strutture storiche, l'assenza di componenti tipiche dei leganti a base cementizia, quali i solfati ed altri sali, ivi compresi quelli derivanti dai meccanismi di degrado del cemento, determina una maggiore compatibilità con i materiali esistenti.

Nel caso in cui la malta sia confezionata con grassello di calce, un'interessante proprietà, evidenziata da Rattazzi (2007) è determinata dai fenomeni di ricostruzione autogena delle fessure: secondo l'autore, infatti, nel caso in cui l'acqua riuscisse ad entrare nelle fini cavillature che si determinano normalmente in un impasto indurito a seguito delle diverse sollecitazioni, l'idrossido di calcio ancora presente nella malta si dissolverebbe e, carbonatandosi, si diffonderebbe nelle fessure. Se poi, in presenza di elevate quantità d'acqua e di anidride carbonica, si attivano i fenomeni di trasformazione del carbonato insolubile in bicarbonato di calcio solubile ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), la riprecipitazione del carbonato può contribuire, anche in questo caso, a sigillare le microfessure formatesi nella malta.

ⁱ Per malta semi-idraulica, secondo le indicazioni derivanti dai manuali d'uso comune tra il XIX ed il XX secolo, deve intendersi una malta confezionata con legante aereo ed aggregato in parte sabbioso ed in parte a reattività pozzolanica. Cfr. FATTA, G., CAMPISI, T., LI CASTRI, M., VINCI, C., *The façades along the Cassaro in Palermo: historical buildings characterization, degradation, restoration norms for interventions*, «Conservation Science in Cultural Heritage», 2009, n. 9

ⁱⁱ I materiali piroclastici impiegati dai Greci provenivano dall'isola di Thera, oggi-Santorini. Cfr. PECCHIONI et al., *Le malte antiche e moderne ...*, op. cit.

ⁱⁱⁱ Cfr. BENSTED, J., COLEMAN, N.J., *La sorprendente storia del cemento e del calcestruzzo dalle origini dell'età della pietra al 1900 d.C.*, «L'industria italiana del cemento», 2004, n. 801.

^{iv} Il più antico sito ove sia stata impiegata una malta di calce idraulica naturale, sabbia e ghiaia, risale a circa 7600 anni fa, ed è stato portato alla luce a Lepensky Vir, a nord della penisola balcanica, durante uno scavo sulle rive del Danubio. In questo caso, il materiale impiegato per la cottura della calce non fu colto sul luogo, ma fu portato dal sito più vicino ove si potessero trovare carbonati marnosi idonei a produrre una calce a presa idraulica e non aerea, posto a circa 300 km più a nord. La malta servì da pavimento per un riparo di pescatori dell'età della pietra. Cfr. QUAR-

NETI, G., *Restauro & Colore. L'Empirico e la Regola dell'Arte, Corso teorico – pratico*, Grigno (Trento), Scuola d'arte muraria Calchèra San Giorgio, 2009

^v Secondo le più elementari metodologie di ripartizione di un carico tra più elementi con rigidità diverse, è infatti noto che lo stesso carico venga ripartito in proporzione alla rigidità dell'elemento, per cui l'impiego di un intonaco, o di una porzione muraria, con rigidità notevolmente maggiore del supporto o della muratura circostante, determinerebbe un sovraccarico dell'elemento stesso.

^{vi} Cfr. FEIFFER, C., *La conservazione ...*, op. cit.

^{vii} I silicati e gli alluminati reattivi si formano durante la cottura per reazione chimica tra i minerali argillosi e gli ossidi di calcio.

^{viii} I tempi di presa ed indurimento del cemento sono, infatti, più rapidi di quelli della calce aerea.

^{ix} Gli acronimi CSH (Calcium Hydrated Silicate) e CAH (Calcium Aluminate Hydrated) derivano da una terminologia sintetica adottata quasi esclusivamente nella chimica del cemento, dove la C indica l'ossido di calcio CaO, S indica la silice SiO₂, A indica l'allumina Al₂O₃, ed H indica l'acqua H₂O.

^x Cfr. RATTAZZI, A., *Conosci il grassello di calce?...*, op. cit.

7. CALCI AEREE ED IDRAULICHE

Si è finora visto che i leganti impiegati per il confezionamento delle malte non cementizie con caratteristiche di idraulicità sono, in ogni caso, prodotti derivanti dalla cottura di rocce di tipo calcareo.

Prescindendo da ipotesi, origini dell'utilizzo casuali e consapevoli, è certo che l'uomo preistorico dovette notare che una parte dei sassi scelti a caso per la delimitazione dei fuochi all'aperto perdeva coesione sotto l'azione del calore del fuoco e, in presenza di acqua, si sbriciolavano in una polvere di colore chiaro: pur non sapendo cosa fosse successo, l'uomo aveva cotto una pietra, producendo un legante che, spento in acqua, si era indurito all'aria.

I leganti a base di calce, sia essa di tipo aereo od idraulico, condividono, nel processo produttivo della calce, l'impiego della stessa roccia da frantumare e portare a cottura. Soltanto che, nella produzione della calce aerea, la roccia calcarea deve essere purissima, ad elevatissimo contenuto di calcari e povera di impurità, mentre nella produzione del legante idraulico, le caratteristiche di idraulicità derivano proprio dalle impurità (a base, per lo più, argillosa) contenute nella roccia o mescolate ad essa nel processo di cottura.

I due leganti, pur essendo piuttosto simili tra loro, presentano notevoli differenze, non solo, come abbiamo visto, nei diversi impieghi derivanti dal comportamento in fase di presa ed in seguito ai processi di indurimento, ma anche nei processi di produzione, piuttosto differenti tra loro, ovvero nelle caratteristiche chimico-fisiche.

7.1. CALCI AEREE

Le caratteristiche generali delle calce aerea sono particolarmente note dalla letteratura tecnica che, nel corso dei decenni passati, ne ha approfondito la conoscenza in termini di produzione, caratteristiche, chimica di base e disponibilità sul mercato.

Risulta, però, opportuno in questa sede riprendere alcuni concetti di base, utili per una comprensione più immediata delle problematiche connesse all'impiego della calce aerea nella produzione delle malte idrauliche, evidenziando i più recenti sviluppi delle ricerche connesse

all'impiego di questo legante. Si evidenziano, in particolare, le differenze tra le comuni forme con cui viene commercializzata la calce aerea, e le peculiarità della forma tradizionalmente più diffusa ed oggi spesso invocata: il grassello.

La calce aerea si ottiene per cottura (*calcinazione*) di rocce calcaree con un contenuto di carbonato di calcio e/o di calcio e magnesio maggiore del 95%, a temperature pari a circa 850°Cⁱ.

Le eventuali impurità presenti nella roccia calcarea, contenute nel limite del 5%, possono essere dovute alla presenza di frazioni silicee o argillose, e non devono mai superare la suddetta percentuale in volume, poiché se la cottura della roccia avvenisse a temperature poco superiori gli 850-900°C, tali impurità potrebbero determinare una limitata idraulicità del prodotto finale, che verrebbe, così snaturato.

La presenza del magnesio, invece, determina una minore reattività della calce, pur essendo particolarmente apprezzata in alcune applicazioni (cfr. § 1 – Scheda: *Intonaci a Palermo e nella Sicilia Occidentale*, circa l'impiego dei calcari magnesiaci per la produzione degli intonaci Li Vigni).

La cottura, secondo le tecniche tradizionali, si realizzava in forni a funzionamento periodico, che operavano per cicli di cottura, tramite caricamento del forno, cottura e successiva estrazione della calce viva dopo il raffreddamento.

La scarsa efficienza per perdita di calore, i lunghi tempi di cottura e la notevole manodopera richiesta dai forni a fuoco intermittente, hanno portato, nel corso dei secoli allo sviluppo di tecnologie a fuoco continuo. I sistemi impiegati oggi per la cottura dei calcari consistono in impianti fissi, realizzati sempre a tecnologia a fuoco continuo, ed in grado di garantire temperature più elevate di quelli tradizionali ed una produttività costante. Possono essere *di tipo verticale*, ed in questo caso rappresentano l'evoluzione dei forni più antichi, ove però è ottimizzato il consumo di combustibile e sono minimizzate le perdite di calore, e *di tipo rotante*.

Nei forni di tipo verticale si distingue, partendo dall'alto, tra una zona di preriscaldamento, ove il calcare, a contatto con i fumi, si riscalda, una zona dove avviene la calcinazione, e la zona più bassa, dove il contatto con l'aria fredda, aspirata dal basso per tiraggio naturale o forzato, raffredda il calcare prima che venga definitivamente scaricato.

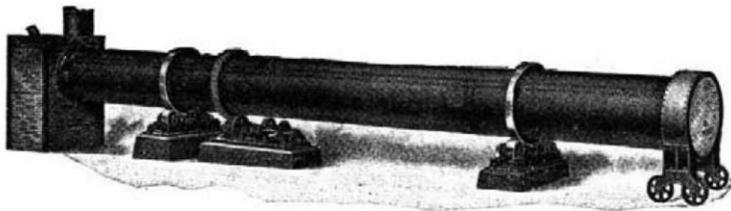


FIG. 115.—Exterior view of rotary kiln. (Bonnot & Co.)

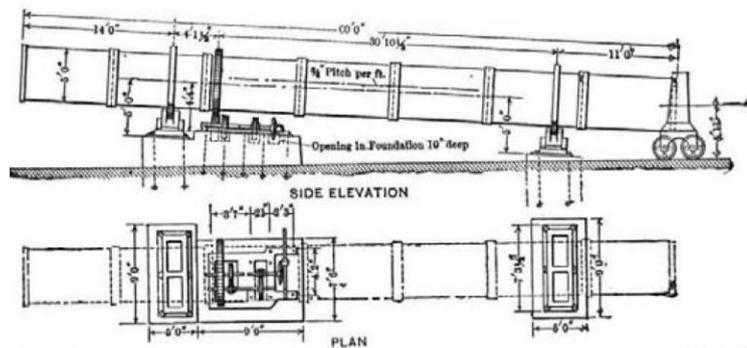


FIG. 116.—Plan and elevation of 60-foot rotary kiln. (Engineering News)

I forni rotanti, introdotti alla fine del XIX secolo, ed assai simili a quelli impiegati per la produzione del cemento, sono costituiti da una colonna di 2-3 metri di diametro, inclinata di alcuni gradi rispetto all'orizzontale, lunga decine di metri e meccanicamente rotante per consentire il rimescolamento del calcare che, caricato dall'alto, raggiunge nella zona intermedia la massima temperatura, per poi venire scaricato in basso. Le produzioni consentite dal forno rotante sono notevolmente maggiori di quelle del forno verticale, pur essendo i consumi di energia maggiori.

Un'altra tipologia è costituita dai *forni a letto fluido*, dove il calcare è introdotto in polvere di circa 0,2-0,3 mm di diametro, ed è tenuto in sospensione da una corrente vorticoso di gas ad alta temperatura. Il forno è suddiviso in ripiani sovrapposti, permeabili ai gas, ed il trasporto del calcare in moto turbolento al piano immediatamente inferiore avviene attraverso scarichi di troppopieno.

L'utilizzo di frammenti calcarei di grosse dimensioni, comporta una notevole difficoltà nella fuoriuscita del gas di decomposizione, per cui



Fig. 7.1. Il forno rotante brevettato da Fredrick Ransome nel 1885 fu largamente utilizzato soprattutto nell'industria del cemento.

spesso possono esservi, nella calce viva, piccoli frammenti di carbonato di calcio non decomposto.

Il raggiungimento di temperature superiori ai 900°C richiesti per la produzione della calce viva, spesso necessarie per avere una calcinazione completa anche delle parti interne dei frammenti calcarei, può determinare fenomeni di sinterizzazione dei cristalli di calce viva (si parla, in questo caso, di *calce stracotta*), e quindi una riduzione della reattività in fase di spegnimento.

Lo spegnimento o estinzione della calce viva è quel processo che ne consente l'utilizzo come legante: la reazione avviene con acqua ed il prodotto che si ottiene presenta, in eccesso d'acqua, una forma plastica e lavorabile, che in espota all'aria indurisce.

Il processo di idratazione della calce, il cui prodotto finale è idrossido di calce, comporta un aumento di volume apparenteⁱⁱ pari a due o tre volte il volume iniziale dell'ossido di calcio ed un forte sviluppo di caloreⁱⁱⁱ.

L'idrossido di calcio, che in mineralogia è chiamato *portlandite*, presenta una forma cristallina e, con un'aggiunta limitata di acqua, diventa plastico. La plasticità è dovuta alla forma cristallina assunta dalla portlandite che, analogamente a molti minerali argillosi, ha una forma lamellare e, sia per la natura cristallina, sia per la natura chimica, presenta una spiccata tendenza ad adsorbire acqua alla superficie dei cristalli, creando uno strato avvolgente che ne aumenta la distanza reciproca (da cui il rigonfiamento), riduce l'attrito meccanico tra le particelle solide ed aumenta la viscosità della pasta.

La manualistica tradizionale indica tre principali metodi di spegnimento: per fusione, per aspersione^{iv} e per immersione^v. Il metodo della fusione è quello più usato nell'edilizia tradizionale e prevede il trattamento della calce viva, che si presenta nelle forme di zolle, con acqua, all'interno di fosse, scavate nel terreno.

Secondo Valadier (1828-39) lo spegnimento avveniva in due fosse, delle quali la prima, detta bagnolo, veniva posta in posizione superiore rispetto all'altra, aveva il fondo inclinato e veniva dotata di una saracinesca sollevabile ed una grata: all'interno di essa si gettava la calce viva e l'acqua in quantità non eccessiva, avendo cura di rimescolare l'impasto con zappe molto lunghe, dette marre, fino ad ottenere la consistenza ottimale. A quel punto si alzava la saracinesca e si faceva



Fig. 7.2. Spegnimento della calce all'interno di bagnolo secondo la tecnica tradizionale.

scivolare l'impasto nella fossa inferiore, previa setacciatura per eliminare le parti grossolane non ben spente o le impurità, lasciandolo stagionare.

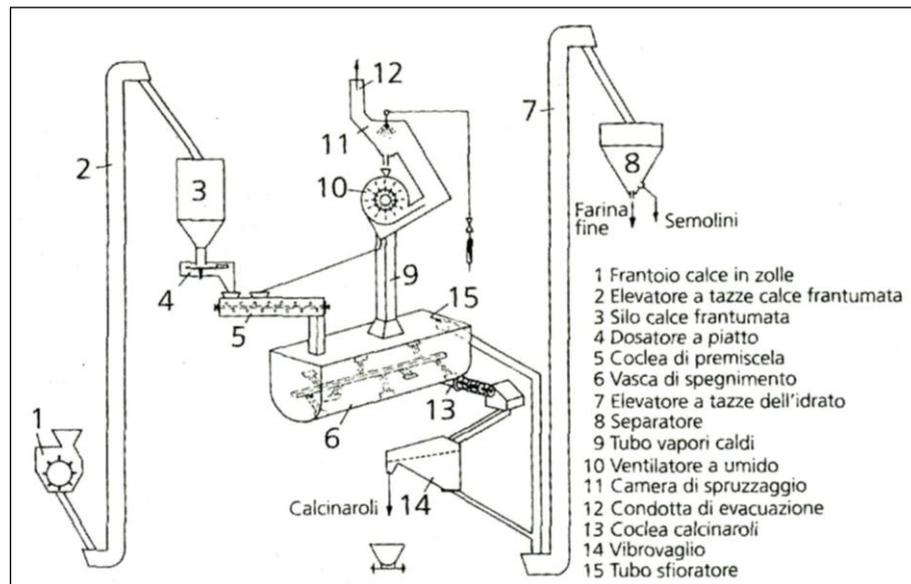
I metodi di spegnimento attuale della calce si basano sul rapporto stechiometrico dell'ossido di calcio con l'acqua, per ottenere idrossido di calcio in forma di polvere secca: le zolle vengono frantumate e trattate con acqua o vapore acqueo nella quantità moderatamente in eccesso rispetto a quella strettamente necessaria. Il prodotto che se ne ottiene può essere distinto in *fiore di calce* e *calce idrata da costruzione*.

Il fiore di calce è una polvere di calce idrata con almeno il 91% di idrossido di calcio, umidità inferiore al 3%, impurezze inferiori al 6% ed una granulometria molto fine, ottenuta per ventilazione.

La calce idrata da costruzione ha, invece, una granulometria maggiore della precedente ed un contenuto d'idrossido non inferiore all'82% in peso.

Le altre forme con cui si presenta la calce sono il *grassello*, la *crema di calce*, il *latte di calce* e l'*acqua di calce*. Queste forme derivano tutte dall'impiego di tecniche di spegnimento in eccesso di acqua.

Fig. 7.3. Schema di funzionamento di un impianto di estinzione della calce a secco.



La crema o latte di calce sono sospensioni acquose lattiginose e fortemente basiche che si differenziano soltanto in relazione alla densità e consistenza. Lasciandole sedimentare, queste sospensioni si separano in due strati: quello superiore è l'acqua di calce, una soluzione acquosa, limpida, satura di idrossido di calcio, mentre quello inferiore, sedimentato e compatto, è costituito dalla pasta che, dopo idonea maturazione, diventerà il grassello di calce.

È noto fin dall'antichità che, per ottenere un grassello di ottima qualità, dopo l'estinzione ad umido della calce viva, la miscela idrata debba essere lasciata riposare per un adeguato periodo di tempo, affinché possa raggiungere lo stato di maturazione ottimale. Le fonti storiche consigliano di attendere molto tempo prima che il grassello venga utilizzato, in modo che anche le parti più difficili da idratarsi possano spegnersi senza lasciare residui. Plinio il Vecchio, nella sua *Naturalis Historia* accenna a regole che vincolavano la maturazione del grassello per tre anni.

Quasi del tutto sostituito, nei processi di produzione industriale moderni, dalla calce idrata in polvere, per la facilità con cui quest'ultima viene confezionata, commercializzata e trasportata, il grassello di calce, pur presentandosi nella stessa formulazione chimica, presenta caratteristiche significativamente diverse. Le proprietà reologiche (pla-

sticità, ritenzione d'acqua, viscosità dinamica) e quelle meccaniche sono sempre superiori rispetto a quelle di una pasta di calce idrata commerciale. Inoltre, mentre la maturazione di un grassello prodotto tradizionalmente comporta sempre un miglioramento delle sue caratteristiche, la maturazione di una pasta di calce idrata non determina alcun sensibile miglioramento.

I recenti studi di Rodriguez-Navarro (1998 – 2005) hanno messo in luce le modificazioni microstrutturali subite dal grassello in fase di maturazione, che determinano l'esaltazione delle proprietà reologiche. Una maturazione prolungata del grassello sott'acqua determina una marcata riduzione dimensionale dei cristalli di portlandite, ed una variazione della loro forma cristallina: i cristalli formati durante lo spegnimento, aventi forma prismatica e dimensioni prevalentemente maggiori di $0,2 \mu\text{m}$, termodinamicamente instabili, cambiano forma, assumendo quella lamellare, e generando cristalli submicronici, raggiungono, molto lentamente, una situazione di equilibrio termodinamico. I numerosissimi cristalli submicronici e nanometrici di nuova formazione, presenti solo nel grassello a lunga stagionatura, hanno la

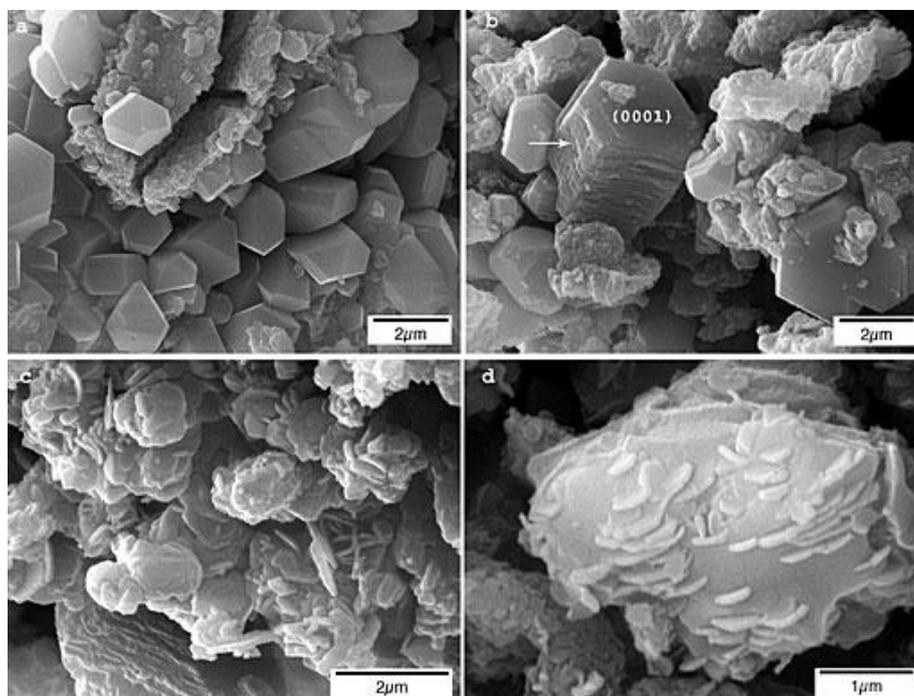


Fig. 7.4. Confronto di morfologia dei cristalli di portlandite al microscopio elettronico:

- a) pasta di calce idrata;
- b) grassello invecchiato 2 mesi;
- c) grassello invecchiato 6 mesi;
- d) grassello invecchiato 24 mesi

capacità di adsorbire una maggiore quantità d'acqua rispetto ai più grossi cristalli prismatici, e, riducendo l'attrito interno del sistema, conferiscono al grassello le eccellenti qualità reologiche note da lungo tempo. Inoltre, l'acqua assume una resistenza alla suzione capillare sensibilmente maggiore rispetto alla rimanente acqua libera, e ciò influisce notevolmente sul processo di carbonatazione, rallentandolo, e sul conseguente sviluppo delle proprietà meccaniche. Inoltre, con riferimento al comportamento colloidale delle dispersioni acquose di idrossido di calcio, è stato mostrato, sempre negli studi di Rodriguez-Navarro (1998 – 2005), che i processi di aggregazione delle particelle, che hanno un impatto negativo sulla reologia e sulla reattività alla carbonatazione delle calce idrate, possono avvenire sul grassello quando questo viene sottoposto ad essiccamento, mentre nelle paste di calce idrata, il fenomeno aggregativo, nella sua forma stabile^{vi}, si determina già durante il processo produttivo industriale.

Ciò rende del tutto falsa la comune credenza che una pasta confezionata con calce idrata in polvere, con una prolungata conservazione sott'acqua, possa acquistare le stesse proprietà di un grassello ottenuto

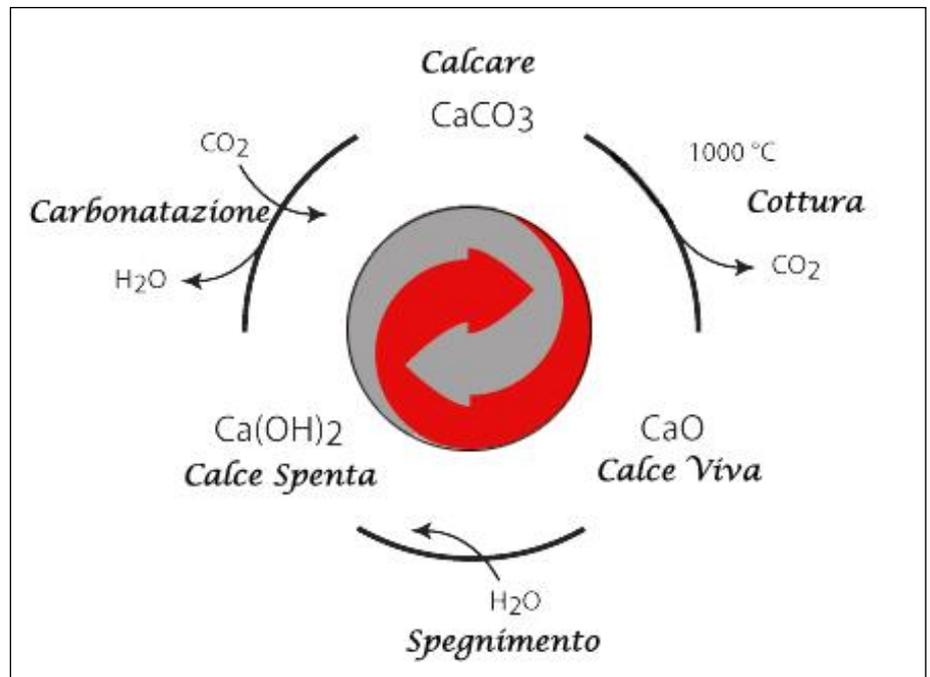


Fig. 7.5. La schematizzazione tradizionale del ciclo della calce risulta piuttosto riduttiva in ragione delle differenti caratteristiche delle forme con cui la calce viene prodotta e commercializzata.

secondo le tecniche tradizionali.

La reazione di carbonatazione della calce avviene, come è noto, con formazione di carbonato di calcio.

La reazione è fortemente esotermica, ma il rilascio del calore^{vii} avviene in forma molto lenta, in ragione della cinetica assai lenta della reazione.

L'azione legante della calce aerea si manifesta in due fasi che si succedono senza soluzione di continuità temporale: la presa e l'indurimento. La presa è causata, prevalentemente, dall'evaporazione dell'acqua libera di costituzione: passate poche ore, od alcuni giorni dall'applicazione, l'idrato di calcio sciolto in acqua tende a precipitare ed a saldarsi alle particelle di idrato di calcio in sospensione, de-

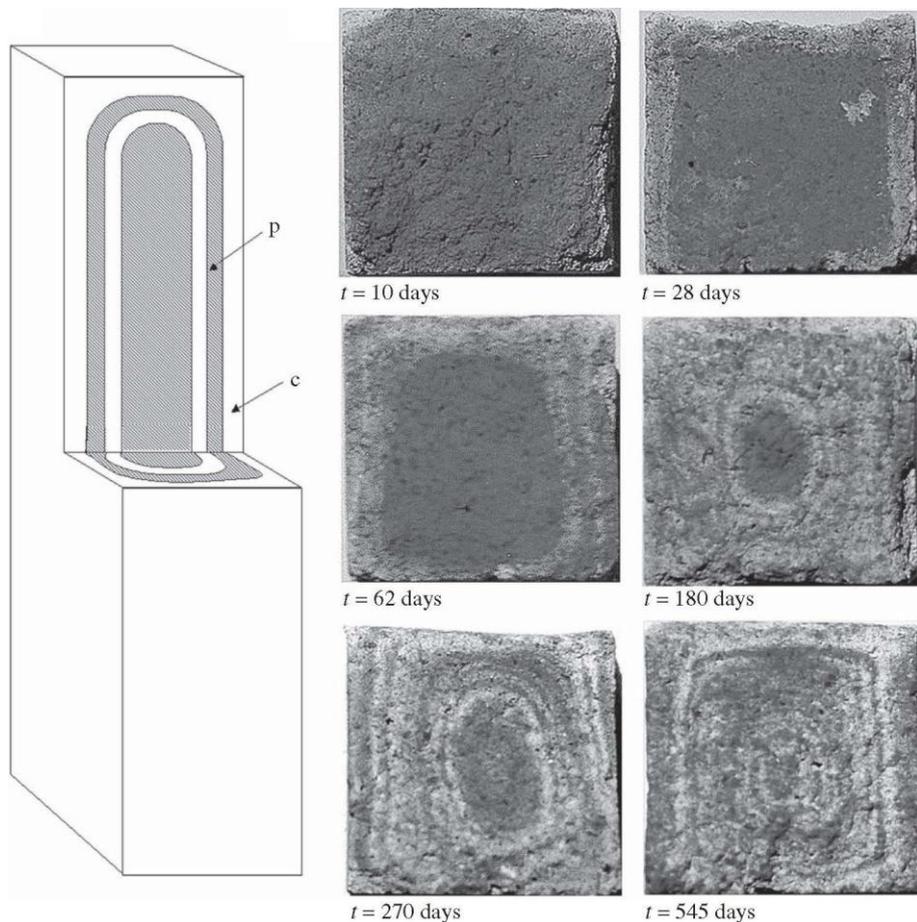


Fig. 7.6. Gli studi di Rodriguez Navarro mostrano che la carbonatazione nelle malte con grassello di calce avvenga secondo geometrie circolari costituite da strati a contenuto di carbonato di calcio differente (*p* e *c*).

Fig. 7.7. La degradazione differenziale, classificata dalla norma UNI 11182:2006, mostra evidenti analogie con le geometrie recentemente evidenziate da Rodriguez Navarro.



terminando una graduale riduzione del volume della malta (ritiro igrometrico) ed un rassodamento della stessa. L'indurimento è, invece, legato alla reazione di carbonatazione della calce, ed è accompagnato da un indurimento della superficie per formazione di un reticolo cristallino di carbonato, dall'espulsione dell'acqua di reazione, da un aumento di volume del carbonato rispetto all'idrato di calcio (circa il 12%) e dallo sviluppo di calore.

La reazione di carbonatazione, pur essendo spontanea, ha, però, una velocità pressoché nulla, qualora avvenga tra l'idrossido di calcio in forma solida e l'anidride carbonica gassosa. Pertanto, l'indurimento non potrebbe mai avvenire se la malta perdesse troppo rapidamente tutto il suo contenuto d'acqua.

Il restringimento dovuto alla perdita di acqua, però, determina le microfratture che consentono all'anidride carbonica di giungere in profondità; inoltre, la formazione di acqua nella reazione di carbonatazione, sopperisce alla perdita della stessa in fase di presa, e, dissolvendo l'idrossido di calcio solido, rende possibile la successiva reazione con l'anidride carbonica.

L'aggregato concorre alla stabilità dimensionale, ed a rendere sufficientemente porosa la malta entro la quale si deposita il carbonato. Il fenomeno procede finché è presente nella malta l'acqua necessaria a sciogliere continuamente l'idrossido di calcio.

Si capisce quindi che una calce ad elevato contenuto d'acqua, quale è il grassello di calce ben stagionato, raggiunga un grado di carbonatazione maggiore, con risultati di gran lunga migliori dal punto di vista delle resistenze meccaniche.

Secondo recenti teorie, inoltre, la reazione di carbonatazione che si compie nelle malte confezionate con grassello di buona qualità e molto stagionato, decorre in forma intensa, periodica e secondo determinate geometrie (dette 'anelli di Liesegang'), più velocemente e con un più alto grado di carbonatazione rispetto alla reazione che si ha per una malta confezionata con paste di calce idrata o grasselli poco invecchiati^{viii}.

7.2. CALCI IDRAULICHE

Anche con riferimento alle calci idrauliche si riportano le caratteristiche generali delle stesse, note in letteratura tecnica, con particolare riferimento alle modalità di produzione, commercializzazione ed ai meccanismi di presa ed indurimento.

Il grado di idraulicità dipende dal quantitativo di minerali argillosi presenti nella roccia naturale o nelle miscele artificiali impiegate per la preparazione della calce stessa.

Secondo gli studi proposti da Vicat (1818), l'idraulicità può essere valutata attraverso il rapporto tra le percentuali in peso degli ossidi derivanti dalla componente argillosa e quelli della componente calcarea. Il rapporto tra la somma delle percentuali di silice, allumina e ossidi di ferro (componenti acide) e la somma delle percentuali dell'ossido di calcio e di magnesio, a cui si possono aggiungere gli ossidi di sodio e di potassio (componenti basiche), definisce il noto *indice di idraulicità I*, dato dalla seguente formula, dove si considerano le percentuali in peso dei singoli composti:

$$I = \frac{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}{CaO + MgO}$$

L'indice rappresenta la capacità della calce di fare presa ed indurire in un tempo minore o maggiore, e di conservare le proprie qualità di resistenza anche in ambiente molto umido o sommerso. Ad un aumento dell'indice di idraulicità corrisponde una diminuzione della durata dei tempi di presa e di indurimento.

In funzione dell'indice di idraulicità, le calci idrauliche possono essere classificate in cinque categorie: calci debolmente idrauliche, calci mediamente idrauliche, calci idrauliche, calci eminentemente idrauliche e calci limite.

Secondo uno studio proposto da Mariani (1976) e ripreso da Montagni (2000), le caratteristiche delle cinque categorie possono riassumersi nella tabella 7.1, dove è riportato, come termine di paragone, anche il cemento a presa rapida.

Le basse temperature di cottura raggiunte nelle fornaci del passato, suggeriscono che le calci prodotte fino al XIX secolo certamente rientrassero nella categoria di quelle debolmente idrauliche, o, al più, di quelle mediamente idrauliche, pur presentando composizioni estre-

denominazione	indice di idraulicità	composizione % di argilla	CaCo3 % nella materia prima	tempo di presa
calci debolmente idrauliche	0,10-0,16	5,3-8,2	94,7-91,8	16-30 gg
calci mediamente idrauliche	0,16-0,31	8,2-14,8	91,8-85,2	10-15 gg
calci idrauliche propriamente dette	0,31-0,42	14,8-19,1	85,2-80,9	5-9 gg
calci eminentemente idrauliche	0,42-0,50	19,1-21,8	80,9-78,2	2-4 gg
calci limite	0,50-0,65	21,8-26,7	78,2-73,3	Presa rapida
Cemento a presa rapida	0,65-1,20	27-40	73-60	istantanea

Tab. 7.1. Classificazione delle calci idrauliche proposta da Mariani (1976) e Montagni (2000).

mamente variabili, in funzione dei diversi tipi di roccia o di miscele artificiali impiegate per la cottura.

Solo con l'avvento dei moderni forni verticali o rotanti si sono potute raggiungere le temperature di 1100-1250°C, necessarie per la produzione della calce idraulica.

La calcinazione avviene elevando lentamente la temperatura per distribuire il calore all'interno della fornace, eliminando per gradi l'acqua derivante dall'igroscopia dei materiali argillosi e evitando la

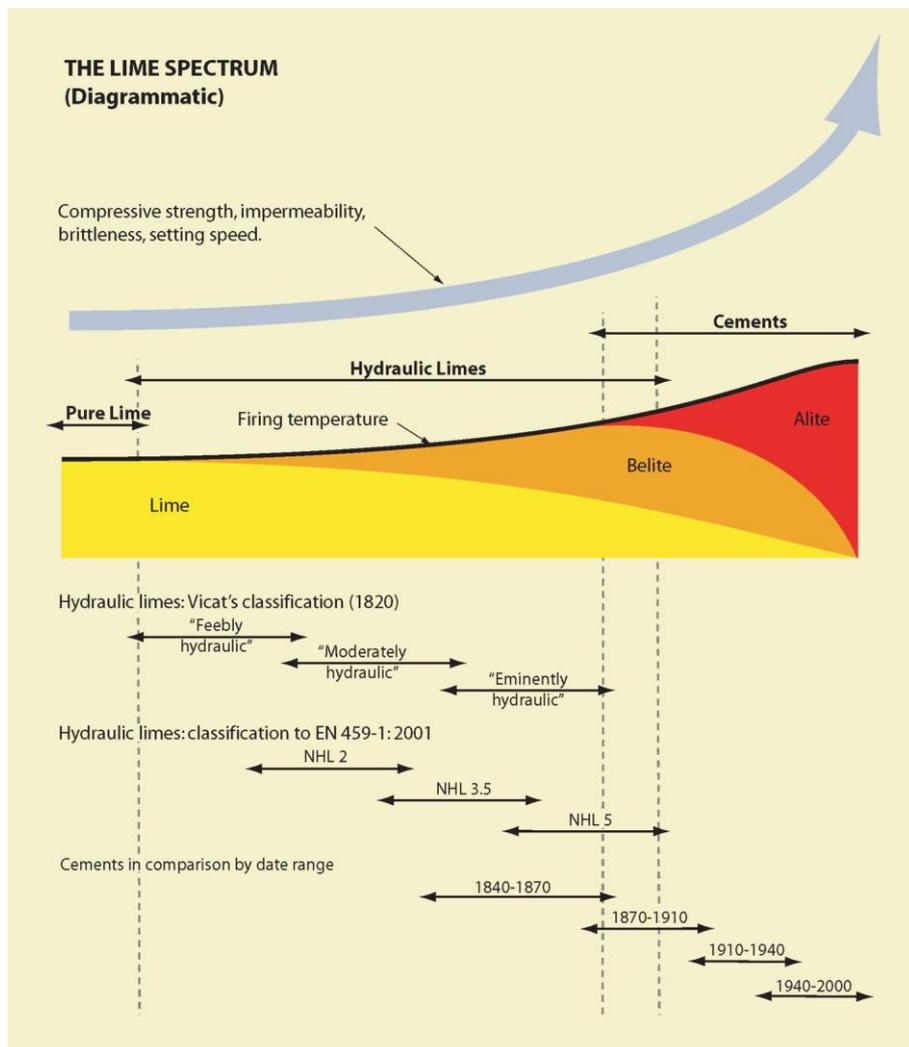


Fig. 7.7. Il diagramma proposto da Brocklebank (2006) mette in relazione le caratteristiche di idraulicità delle calci con la classificazione proposta da Vicat e con quella della norma EN 459-1.

formazione di parti vetrificate, che impediscono la combinazione dei componenti e la formazione della calce viva.

Tra i 600 ed i 900°C si ha la formazione della silice, dell'allumina e degli ossidi di ferro, derivanti dai composti amorfi ottenuti per distruzione della struttura cristallina delle argille, contestualmente alla formazione degli ossidi di calcio.

Tra i 1000 ed i 1200°C, l'ossido di calcio comincia a reagire con la silice SiO_2 e l'allumina Al_2O_3 , con formazione del silicato bicalcico $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (secondo la terminologia sintetica del cemento C_2S), componente principale della fase mineralogica detta belite, e, in minor quantità, di alluminato tricalcico $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (sinteticamente indicato con C_3A).

A temperature più elevate (circa 1250-1450°C) si assiste alla formazione del silicato tricalcico C_3S , o $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, costituente principale dell'alite, fase mineralogica predominante nei moderni cementi e presente, in proporzioni limitate, anche nelle calce idrauliche, dove la temperatura del forno è localmente più alta.

A cottura ultimata le zolle calcinate presentano un colore grigio-giallognolo; lo spegnimento avviene con estrema cautela nel dosaggio della quantità d'acqua. Una quantità d'acqua insufficiente lascerebbe, infatti, ossido di calcio non spento che, come abbiamo visto, idraterrebbe successivamente, provocando rigonfiamenti e fratture nella malta. L'eccesso d'acqua, invece, provocherebbe una repentina idratazione dei silicati e degli alluminati, determinando una presa ed un indurimento prematuro del legante.

Le calce debolmente e mediamente idrauliche vengono spente in bagnoli, come per la calce aerea, ed accumulate in fosse, dove l'idratazione avviene piuttosto lentamente, ed il prodotto che si ricava è una pasta simile al grassello, ma meno untuosa e con minori proprietà adesive.

Le calce eminentemente idrauliche vengono, invece, spente per asperzione in strati di 10-15 cm, con acqua in quantità pari al 15-20% in volume, sufficiente a spegnere la calce e ridurla in polvere senza idratare i silicati e gli alluminati; la calce impiega circa 15-20 giorni per idratarsi completamente, poiché il basso contenuto di calce viva reattiva, a causa delle elevate temperature di cottura, richiede tempi di idratazio-

ne maggiori di quelli richiesti per le calce debolmente e mediamente idrauliche.

Nella produzione commerciale, dopo lo spegnimento e la stagionatura al riparo, nel corso della quale viene esalato molto vapore acqueo, la calce idraulica, ormai ridotta in polvere, passa attraverso le varie fasi di setacciatura che selezionano le porzioni di diversa granulometria e reattività^{ix}.

Una volta poste in opera, le calce idrauliche induriscono secondo due differenti processi:

- indurimento idraulico: idratazione dei silicati e degli alluminati, con formazione di un reticolo microcristallino di silicati e alluminati idrati di calcio;
- indurimento aereo: carbonatazione della calce.

La reazione idraulica, piuttosto rapida e simile a quella che avviene nel cemento, avviene per l'idratazione dei silicati C_2S e degli alluminati C_3A , con formazione di composti idrati e di portlandite.

I silicati, gli alluminati ed i ferriti di calcio, che a temperatura ambiente sono fasi anidre ed instabili in presenza di acqua, messi a contatto con quest'ultima, solubilizzano e formano le corrispondenti fasi idrate, insolubili, che riprecipitano in forma di gel e, in parte, di sostanze microcristalline. Questi materiali prendono coesione fortemente e idratano con il tempo. Si riporta, per comprendere i meccanismi di idratazione, la reazione relativa al silicato bicalcico:



che, secondo la terminologia sintetica del cemento, può scriversi:



Il silicato di calcio idrato (CSH) ha una composizione chimica variabile ed una struttura a strati, con molecole di acqua interposte.

La reazione aerea di carbonatazione dell'idrossido di calcio formatosi durante lo spegnimento della calce e nel corso della reazione di idratazione, è del tutto simile a quella che abbiamo visto per le calce aeree e procede, molto lentamente, alla formazione di carbonato di calcio. L'influenza che la reazione aerea possiede sulle proprietà meccaniche

del prodotto finale è assai limitata, anzi, secondo Colombo, Sansonetti, et al. ([4], 2006), qualora l'indurimento avvenga in acqua, la malta raggiunge, in un tempo massimo di cinque mesi, una notevole resistenza meccanica.

7.2.1. Calci idrauliche naturali

La norma UNI EN 459-1:2002 “Calci da costruzione. Definizioni, specifiche e criteri di conformità” definisce idrauliche naturali le *calci prodotte dalla cottura di calcari più o meno argillosi o silicei, con successiva riduzione in polvere mediante spegnimento con o senza macinazione. Tutte le NHL (Natural Hydraulic Lime – calce idraulica naturale, n.d.r.) hanno la proprietà di fa presa e indurire in acqua. L'anidride carbonica atmosferica contribuisce al processo di indurimento.*

La suddetta norma definisce anche le calci idrauliche naturali NHL con materiali aggiunti, ossia quelle con *l'aggiunta di prodotti speciali che possono contenere idonei materiali pozzolanici o idraulici fino al 20%, in massa, contrassegnati con l'aggiunta della lettera “Z”.*

La definizione fornita dalla norma EN 459-1, recepita dall'UNI, distingue chiaramente le calci idrauliche naturali NHL, derivanti dalla cottura di calcari impuri, da quelle ottenute con l'aggiunta di materiali idraulici, che possano variare le caratteristiche dei calcari d'origine, nella proporzione fino al 20% in massa, contraddistinte dall'aggiunta della sigla Z.

È importante che l'aggiunta di materiali ai calcari di cottura sia specificata, poiché nel caso in cui i materiali aggiunti siano la polvere di mattone macinata o la pozzolana, le caratteristiche del prodotto finale sono sempre riconducibili a quelle di una calce idraulica naturale: l'idraulicità, infatti, se la cottura non avviene a temperature assai elevate, è dovuta, come detto, alla sola belite, unica fase mineralogica formatasi nel corso della cottura. La recente modifica della norma EN 459-1, recepita dall'UNI nel 2010, ha modificato la terminologia relativa alle calci idrauliche ottenute per aggiunta di materiali idraulici, che vengono adesso contraddistinte dalla sigla FL.

Qualora, invece, dovessero esservi in fase di cottura additivi come le scorie d'altoforno granulate, le ceneri di carburante polverizzate ed altri materiali idraulicizzanti derivanti da processi produttivi ad alta temperatura, se la cottura avvenisse a temperature superiori a 1260°C , si avrebbe anche la formazione dell'alite, il cui componente principale, come abbiamo precedentemente visto, è il silicato tricalcico (C3S), che fa presa assai più rapidamente ed è tipico dei cementi.

Sempre in riferimento alla direttiva EN 459-1, le calce idrauliche naturali sono definite secondo tre tipologie: le NHL 2, 3.5 e 5, dove le cifre affiancate alla sigla indicano la resistenza normalizzata a compressione, espressa in N/mm^2 , dopo 28 giorni, determinate secondo la EN 459-2:2001.

Appare opportuno segnalare come le attuali denominazioni non abbiano un chiaro riferimento a quelle utilizzate da Vicat e poi confermate nell'uso fino ad anni a noi più vicini. Secondo Brocklebank (2006), ad esempio, è importante rilevare che la classe moderna più debole di calce idrauliche naturali, la NHL 2, non è analoga a quella che Vicat (1818) indicò come "debolmente idraulica", bensì corrisponde alla "moderatamente idraulica", così come la NHL 3.5, che negli ultimi anni viene indicata dai produttori come la soluzione migliore per ogni applicazione edilizia, si accosta maggiormente alla "eminentemente idraulica". Le NHL 5, poi, possono addirittura raggiungere le prestazioni meccaniche dei "cementi naturali" indicati da Vicat, ottenuti per cottura di marne ad elevate percentuali di argilla e allumina.

Si rileva quindi, allo stato attuale, anche alla luce del recente aggiornamento della norma UNI EN 459-1:2010, una vacanza normativa in corrispondenza delle calce "debolmente idrauliche" indicate da Vicat, particolarmente diffuse nella costruzione pre-industriale, che si pongono, in termini di resistenza, tra le calce aeree e le NHL 2, e che, secondo Brocklebank, potrebbero indicarsi con la sigla NHL 1.

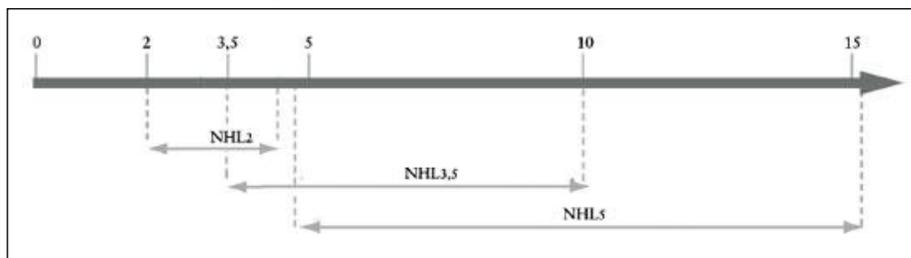


Fig. 7.8. La correlazione tra le denominazioni proposte dalla norma EN 459-1 ed i valori di resistenza meccanica a compressione mostra una vacanza normativa per valori inferiori a 2 MPa.

Ciononostante va rilevata ed apprezzata la precisazione operata dalla norma sull'origine delle calce idrauliche naturali, che ad oggi consente a ciascun operatore di riconoscere una calce idraulica assolutamente esente da cemento grazie all'utilizzo di una semplice sigla.

Risulta inoltre opportuno segnalare ancora oggi il largo impiego di alcune calce idrauliche particolarmente apprezzate per la lunga tradizione manifestata negli ultimi due secoli: ci si riferisce, in particolare, alle pregiate qualità di calce idrauliche naturali derivanti dalla cottura dei calcari marnosi veneti (la calce negra o padoana, indicata da Palladio e prodotta presso i colli Euganei, o quella prodotta col calcare rosato di Castel Gavazzo, nel bellunese) o della pietra alberese bergamasca (di colore giallo pallido, cavata in val Seriana e nella valle del Brembo, in grado di dare una calce idraulica naturale bianca). Non indifferente l'importazione che ancora oggi si effettua da Grenoble, in Francia, e da Kufstein, in Austria.

Ancora apprezzata e diffusamente commercializzata la calce francese Lafarge, ottenuta per cottura di calcari contenenti circa il 10% di silice misti a modeste quantità di clinker bianco, che quindi si classifica tra le calce del tipo NHL-Z, o come recentemente modificato, FL.

7.2.2. Calce idrauliche artificiali

Sempre in accordo con la norma UNI EN 459-1:2002 le calce idrauliche artificiali, indicate con la sigla HL (Hydraulic Lime), sono *costituite prevalentemente da idrossido di calcio, silicati di calcio e alluminati di calcio prodotti mediante miscelazione di materiali appropriati*. Ovviamente, anche in questo caso, le calce *hanno la proprietà di fare presa e indurire in acqua, mentre l'anidride carbonica atmosferica contribuisce al processo di indurimento*.

A differenza di quelle naturali, quindi, l'idraulicità della calce è ottenuta per miscelazione di materiali e non in via esclusiva, o comunque principale, per cottura di calcari marnosi.

Preferite dall'industria produttiva alle calce idrauliche naturali per la maggiore possibilità di controllare le capacità idrauliche, tramite un'attenta formulazione dei dosaggi, le calce idrauliche artificiali sono state anch'esse sperimentate da Vicat (1818) tramite miscelazioni a

secco o ad umido, e successiva cottura, di calcari puri misti ad argilla, o di grassello di calce ed argilla (*calce idraulica biscotta*).

L'uso di loppa d'altoforno^x nella produzione di calci eminentemente idrauliche artificiali ed idrauliche artificiali è piuttosto recente, così come quello di clinker di Portland.

Il clinker di cemento Portland è un materiale a comportamento idraulico, composto per almeno due terzi da silicato bicalcico C_2S e silicato tricalcico C_3S , mentre la parte rimanente è composta da ossido di alluminio Al_2O_3 (indicato con A), ossido di ferro (indicato con F) ed altri ossidi. Si ottiene per cottura, sino a sinterizzazione, di una miscela di materie prime contenente ossido di calce (in quantità variabile tra il 56 ed il 68%), silice (16-26%), allumina (4-8%), ossido ferrico (2-5%) e modeste quantità di altri materiali, finemente macinate e miscelate.

L'impiego di clinker, piuttosto diffuso nella pratica industriale odierna, muta completamente le caratteristiche della calce idraulica, rendendola assai simile ad un cemento, specialmente nelle caratteristiche di resistenza meccanica.

Il clinker presenta, infatti, un elevato contenuto di alite, il cui prodotto di idrolisi CSH è assai simile a quello derivante dall'idrolisi del silicato bicalcico, seppure la reazione avvenga con una velocità assai maggiore.

La notevole presenza di alluminato tricalcico C_3A , comporta, inoltre, un altro inconveniente, specialmente per le applicazioni che la calce idraulica artificiale potrebbe avere nel recupero del patrimonio costruito. I leganti ricchi in alluminato tricalcico manifestano, infatti, una presa troppo rapida, dovuta alla velocità della reazione di idratazione degli alluminati e, per questa ragione, necessitano dell'aggiunta di un regolatore di presa. Nel clinker di cemento Portland il regolatore più comunemente impiegato è il gesso $CaSO_4$, che rallenta la formazione degli alluminati idrati CAH, formando preventivamente un sale particolarmente voluminoso chiamato ettringite^{xi}.

La presenza di ioni solfato SO_4^- all'interno della malta può risultare particolarmente dannosa, poiché in presenza di umidità – cosa piuttosto frequente nelle murature storiche – può determinare la ricristallizzazione di sali che, notoriamente, presentano un volume piuttosto elevato. Con queste condizioni, si registrano spesso fenomeni più o meno

localizzati di disgregazione della malta che, se estesi, possono portare alla perdita dell'intonaco.

L'attivazione di questi meccanismi di degrado potrebbe, inoltre, essere accentuata dalla scarsa permeabilità della malta idraulica confezionata con prodotti di origine cementizia.

ⁱ I calcari contenenti carbonati doppi di calcio e magnesio con contenuto di $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ fino al 10% sono detti *magnesiaci*, quelli con contenuto di $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ fino al 50% sono detti *dolomitici*, quelli con contenuto di $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ fino al 90% sono detti *dolomie calcaree*, mentre quelli il cui contenuto di $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ è pari al 100% sono, infine, detti *dolomie*.

ⁱⁱ L'aumento di volume apparente contribuisce a definire la *resa in grassello*, mentre l'aumento di volume solido assoluto è pari a circa il 95%. La resa in grassello è un parametro merceologico che distingue le calce vive grasse da quelle magre. È espressa come il volume di grassello fresco che si ottiene da una determinata massa di calce viva, e la si misura in m^3/ton . Secondo il R.D. 16/11/1939 n. 2231, la resa è $\geq 2,5 \text{ m}^3/\text{t}$ per una calce grassa, e $\geq 1,5 \text{ m}^3/\text{t}$ per una calce magra.

ⁱⁱⁱ Mentre la decomposizione del carbonato di calcio richiede una quantità di calore pari a 397 Kcal/Kg di calcare, corrispondenti a 708 Kcal/Kg di calce viva, la reazione di spegnimento della calce viva rilascia una quantità di calore di idratazione pari a 278 Kcal/Kg di CaO. Cfr. RATAZZI, A., *Conosci il grassello di calce?...*, op. cit.

^{iv} Lo spegnimento per asperione prevedeva la collocazione della calce viva in un bacino, successivamente ricoperto da una coltre di sabbia, e quindi l'aggiunta di acqua.

^v Il metodo per immersione prevede che la calce viva venga frantumata in piccoli blocchi, successivamente posti all'interno di un panierino, quindi immersi in acqua ed immediatamente estratti, prima di sciogliersi, nel pieno della reazione di idratazione.

^{vi} Esiste anche una forma aggregativa meno stabile delle particelle colloidali, che, esercitandosi con deboli forze attrattive, diviene reversibile se le particelle vengono nuovamente disperse in soluzione acquosa.

^{vii} Il calore rilasciato durante la reazione di carbonatazione è pari a 364 Kcal/Kg di idrossido di calce.

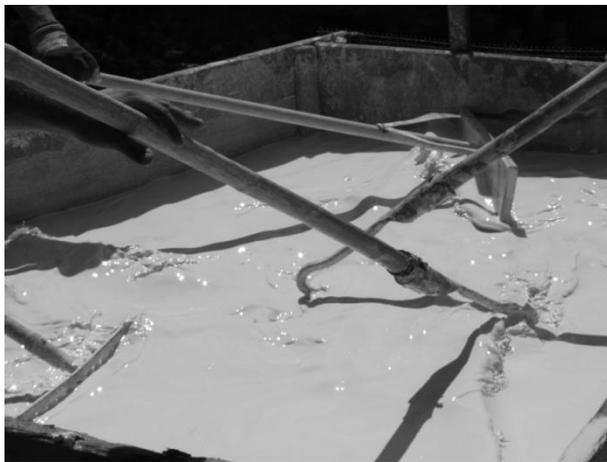
^{viii} La reazione di carbonatazione non avverrebbe, infatti, in maniera uniforme, seguendo un cammino diffusivo lineare, bensì nella forma più veloce degli 'anelli di Liesegang', caratterizzati da un'alternanza di anelli concentrici ricchi di calcite CaCO_3 ed anelli ricchi di portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Cfr. RATAZZI, A., *Conosci il grassello di calce?...*, op. cit e RODRIGUEZ-NAVARRO, C., CAZALLA, O., ELERT, K., *Liesegang pattern development in carbonating traditional lime mortars*, Proc. of the Royal Society, A, 458, London, 2002.

^{ix} Si distingue la frazione fine (fiore di calce) da quella grossolana, costituita da incotti, stracotti e grappiers (granuli duri vetrificati). La frazione più grossolana può essere ulteriormente sottoposta ad estinzione seguita da macinazione, ottenendo un

cemento a lenta presa (cemento di grappiers) utilizzabile tal quale o miscelabile al fiore di calce per aumentarne l'idraulicità ed il potere legante (calce idraulica pesante). Cfr. SCARZELLA P., *Malte a vista con sabbie locali nella conservazione degli edifici storici, Atti del seminario, Torino, 6-8 luglio 2000, vol. 4.1 Terminologia*, Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria dei Sistemi Edilizi e Territoriali, Torino, 2000.

^x Scoria siderurgica in granuli vetrosi, ottenuta raffreddando bruscamente la scoria fusa con acqua.

^{xi} L'ettringite formatasi in fase di presa del cemento, necessaria per consentirne il trasporto e la lavorabilità, è detta primaria, per distinguerla dall'ettringite secondaria che, in determinate condizioni fisico ambientali (presenza di ioni solfato nell'ambiente) può manifestarsi anche nel calcestruzzo indurito, per reazione con l'idrossido di calcio Ca(OH)_2 e quindi con l'alluminato idrato CAH presente nel cemento, comportandone la distruzione per le sovratensioni dovute ai voluminosi cristalli di formazione.



8. MATERIALI A COMPORTAMENTO POZZOLANICO

Le proprietà di idraulicità conferite alle malte da *sostanze, naturali e artificiali, note sotto il nome generico di pozzolana e considerate come agglomeranti a cui fa difetto la calce*ⁱ, sono note fin dall'antichità.

Nel § 6 abbiamo visto che l'impiego di aggregati con proprietà idraulicizzanti, come le polveri frantumate di laterizi, fosse già diffuso nella civiltà antiche, come quella minoica, addirittura per la realizzazione di manufatti dove le proprietà idrauliche si ritenevano particolarmente opportune (ad esempio, nella realizzazione di pavimentazioni).

La necessità tecnologica di confezionare malte con determinate caratteristiche, quali ad esempio l'elevata resistenza meccanica, per la realizzazione di murature, intonaci, pavimenti, rivestimenti di opere idrauliche, etc., ha portato, specialmente con la civiltà romana, ad un larghissimo impiego delle malte idrauliche.

Abbiamo però visto che, sebbene le proprietà delle calce idrauliche naturali fossero in parte note da molto tempo, in ragione degli impieghi specifici che venivano effettuati delle stesse, le difficoltà di produzione legate sia alla cottura dei calcari contenenti determinate quantità di argilla, sia alle modalità di spegnimento delle calce vive, non ne hanno consentito un'ampia diffusione, se non in ambiti locali estremamente ristretti, per lo più a partire dal '500.

Se a ciò aggiungiamo l'enorme diffusione delle conoscenze tecnologiche operata dalla civiltà romana, si capisce perché, fino all'avvento dell'era industriale moderna, le malte idrauliche maggiormente diffuse fossero quelle confezionate con calce aerea ed aggregati a comportamento pozzolanico, anche per evidenti ragioni di controllo dei dosaggi.

Persino il nome del materiale naturale più diffusamente utilizzato per il conferimento delle proprietà idraulicizzanti deriva dall'impiego di una polvere vulcanica, estratta dai Romani nell'area napoletana, ed in particolare dall'area di Pozzuoli, da cui il nome *pulvis puteolana* (polvere di Pozzuoli o pozzolana), ovvero presso i colli Albaniⁱⁱ, più vicini alla capitale dell'impero.



Fig. 8.1. La morfologia dei colli Albani mostra in termini molto evidenti l'origine vulcanica del territorio.

Tutti i materiali pozzolanici si distinguono per l'elevato contenuto di silice e allumina attiveⁱⁱⁱ che, combinandosi facilmente con gli idrossidi di calcio, permettono la formazione degli idrosilicati e degli alluminati idrati di calcio.

Nel § 6.1 sono stati mostrati i meccanismi di reazione della silice e dell'allumina con l'idrossido di calcio contenuto nel legante aereo.

In accordo con la norma UNI EN 197-1:2006 "Cemento – Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni", i materiali pozzolanici sono definiti materiali naturali silicei o silico-alluminosi che non induriscono di per sé quando sono mescolati con acqua, ma se finemente macinati, e in presenza di acqua, reagiscono a temperatura ambiente con l'idrossido di calcio disciolto, dando origine a composti di silicato e alluminato di calcio, del tutto simili a quelli derivanti dai processi di indurimento dei leganti idraulici.

Ad una indagine microscopica i composti idrati CSH e CAH si presentano inizialmente nella forma di una flocculazione gelatinosa, entro la quale si depositano i cristalli che ne determinano l'indurimento, mentre alla superficie si forma uno strato di carbonato di calcio.

La granulometria fine dei materiali pozzolanici è una caratteristica imprescindibile per il loro utilizzo, poiché l'aumento di superficie esterna delle particelle aumenta la reattività della polvere, e quindi la capacità di formare i composti idrati che sviluppano la resistenza meccanica della malta.

Non tutti i materiali presentano però le stesse caratteristiche, o manifestano effetti identici nel conferimento dell'idraulicità; risulta pertanto opportuno conoscerne le proprietà specifiche, soprattutto in ragione delle prestazioni che sono in grado di conferire alle malte. Rattazzi (2007), ad esempio, indica che i materiali pozzolanici più teneri, come

ad esempio il cocciopesto, producono malte più flessibili (cioè con una migliore resistenza a flessione), mentre i materiali ad idraulicità latente^{iv}, più duri, ottenuti ad alte temperature (come ad esempio le scorie vetrose d'alto forno), tendono a conferire agli impasti maggiore rigidità e durezza, con caratteristiche più vicine a quelle degli impasti cementizi.

Il mercato attuale propone ancora l'utilizzo di materiali idraulicizzanti per il confezionamento delle malte in cantiere, soprattutto in virtù della riscoperta delle pregiate qualità delle malte tradizionali da parte della cultura tecnica. Si rileva, però, che spesso le informazioni fornite a corredo della fornitura di materiale sono piuttosto scarse, e si limitano spesso ad indicare la sola granulometria dell'aggregato che, pur essendo, come vedremo a breve, un parametro di fondamentale importanza nella scelta del materiale, non risulta essere l'unica caratteristica cui ci si dovrebbe riferire nella scelta dello stesso.

I materiali più diffusi nel mercato odierno sono certamente le pozzolane ed il laterizio frantumato. Si osserva, però, che scarsamente sono indicate dai produttori e dai distributori, oltre alle caratteristiche generali, anche la provenienza dei materiali, anch'essa di notevole importanza per risalire alle proprietà generali.

8.1. POZZOLANA

Come è noto, la pozzolana è un deposito incoerente di origine vulcanica; viene estratta in Italia non solo presso Pozzuoli, ma anche in altre zone della Campania, del Lazio, in provincia di Viterbo, e nella Sicilia orientale, sui monti Iblei. In Europa, altre zone di estrazione di materiali analoghi sempre di origine vulcanica, sono la regione dell'Eifel in Germania, l'Olanda (dalla quale si estrae il terrazzo – trass – d'Olanda) e l'isola di Santorini, in Grecia. La pozzolana è costituita da silice reattiva, silicati idrati di allumina ed altri componenti in quantità minori.

Si presenta, in generale, nella forma di un tufo derivato da lapilli e cenere vulcaniche cementate labilmente dall'azione degli agenti atmosferici. Il materiale, poco coerente e a grana fine, appena dopo l'eruzione, e al momento della deposizione, si raffredda rapidamente, diventando

vetroso e coriaceo. Nel caso in cui si presenti coerente come il tufo, l'utilizzo in edilizia ne richiede la frantumazione e la riduzione in polvere.

Nel caso in cui, invece, abbia una consistenza incoerente, a granuli scarsamente cementati, è molto simile alla normale sabbia o alla terra sabbiosa e può essere impiegata dopo una semplice setacciatura.

Menicali (1992) ne suggerisce la macinazione nel caso in cui la pozzolana venga impiegata nelle malte per manufatti con superficie finale liscia e soprattutto nelle opere marittime, dove occorre una grande superficie di contatto tra la pozzolana ed il legante per raggiungere le prestazioni finali richieste in queste strutture.

La natura dura e granulata la rende idonea a distribuire i ritiri volumetrici della massa al pari della sabbia.

Le pozzolane, che sarebbe meglio definire “materiali a comportamento pozzolanico”, possono essere naturali o artificiali: quelle naturali sono utilizzabili senza alcun trattamento termico, mentre le artificiali assumono carattere pozzolanico per effetto di alcuni trattamenti termici che ne trasformano la primitiva natura. Le pozzolane naturali pos-



Fig. 8.2. Cave di pozzolana in attività nel territorio laziale, in provincia di Viterbo.

sono anche avere una forma più compatta, come nel caso dei *trass* tedeschi o del tufo giallo napoletano. Rientrano nella categoria delle pozzolane naturali anche le radiolariti e le farine fossili, rocce silicee sedimentarie di origine organica, costituite da microrganismi a scheletro siliceo, nonché le argille vetrificate per il contatto con lave incandescenti.

La composizione delle pozzolane varia, specialmente per quelle naturali, da una specie all'altra. Mediamente la loro composizione è la seguente:

SiO ₂	45 – 52%
Al ₂ O ₃	15 – 23%
Fe ₂ O ₃	6 – 12%
CaO	3 – 9%
MgO	1 – 4%
NaO + K ₂ O	3 – 13%

In base alla reattività con la calce, le pozzolane vengono classificate in energiche e deboli; le energiche presentano spiccate proprietà idrauliche, pertanto induriscono maggiormente e danno prodotti ad elevata resistenza meccanica, conformemente a quanto prescritto dal R.D. n.2230 del 16/11/1939 “Norme per l'accettazione delle pozzolane e dei materiali a comportamento pozzolanico”. Con riguardo agli altri parametri di idraulicità (capacità di far presa e indurire in acqua, proprietà di idrorepellenza, etc.), le informazioni sulla reattività della pozzolana sono piuttosto scarse in letteratura. La reattività della pozzolana, però, non dipende soltanto dalla sua composizione chimica, bensì dalla struttura più o meno amorfa dei suoi componenti.

Altre caratteristiche, quali il peso specifico ed il colore, sono variabili in funzione della località di provenienza. Riguardo al colore, ad esem-

Fig. 8.3. Pozzolane di differente qualità cromatica e granulometrica.



pio, Quarneti (2009) indica che se ne trovano di bruno-rossicce e violette nei dintorni di Roma (Tivoli), di colore bigio quelle di Bacoli, presso Pozzuoli; nero a Torre Annunziata; tendenti al rosso quelle di Monte Paternò in Sicilia e di colore bigio scuro quelle di Monterosso, nel ragusano.

Le indicazioni degli antichi trattatisti sulla qualità delle pozzolane basandosi sull'intensità del colore si sono dimostrate, così come indicato da Quarneti (2009), del tutto errate. La qualità della pozzolana è, invece, espressa dalla sua elevata quantità di silice, pertanto, secondo lo stesso autore, la pozzolana migliore ai fini dell'idraulicità, ma non sempre ai fini dell'applicazione, è quella estratta nell'isola di Santorini, nell'Egeo, per il contenuto di silice pari al 69,2%.

8.2. COCCIOPESTO

Il cocchiopesto è il materiale più comunemente usato, in sostituzione della pozzolana, per la realizzazione di intonaci e finiture particolari con caratteristiche di idraulicità.

Si ottiene dalla polverizzazione del laterizio cotto, derivante, in particolare, dai rottami di prodotti aventi spessore sottile (tegole, mattonelle, vasellame, etc.), in cui l'azione del calore ha determinato una scomposizione più spinta del silicato d'alluminio e la vetrificazione di parte della massa in profondità.

Anche in questo caso l'attività pozzolanica dipende dai composti derivati dalla cottura dei materiali argillosi (silice e allumina), in fase vetrificata, e dalle modalità di fabbricazione. L'effetto idraulicizzante è tanto più deciso quanto più i laterizi sono ben cotti.

La macinazione spinta e la successiva vagliatura servono ad aumentare la superficie del cocchiopesto e quindi ad aumentarne la reattività.

Nell'impiego del cocchiopesto occorre, tuttavia, tenere rigorosamente presente che la composizione dei materiali argillosi utilizzati per la fabbricazione dei laterizi, e la temperatura di cottura, rivestono una notevolissima importanza. La migliore reattività con l'idrossido di calcio si ottiene dai frammenti di stoviglie e tegole perché lo spessore sottile non richiede una temperatura elevata, ed inoltre perché lo spessore notevole impedisce la buona cottura e la vetrificazione nelle parti



più interne: in accordo con quanto indicato da Baronio e Binda (1997), la temperatura di cottura del laterizio non deve superare i 950°C. La bassa temperatura di cottura è, tra l'altro, indice di un'elevata porosità nel laterizio, e pertanto si accompagna, anche dopo la frantumazione, ad un aumento della superficie della polvere, sulla quale possono avvenire le reazioni di formazione dei silicati e degli alluminati di calcio, responsabili dei processi di idratazione ed indurimento della malta. L'utilizzo di cocciopesto altamente poroso, e l'operazione di lisciatura e battitura dell'intonaco, sono caratteristiche imprescindibili per la buona esecuzione della finitura superficiale, perché consentono alla calce non solo di avvolgere sodamente il granulo di mattone, ma di compenetrarlo attraverso la porosità, portando ad una dissoluzione dei grani più fini, grazie al notevole aumento della superficie di reazione, che riesce a comprendere anche buona parte della superficie dei pori. Pertanto l'utilizzo di frammenti di laterizi moderni, quali, ad esempio, gli scarti di lavorazione dei mattoni forati, che impiegano temperature di cottura più elevate, è sconsigliata per la scarsa azione pozzolanica. Le malte confezionate con cocciopesto, qualora questo venga sottoposto ad una fine setacciatura, sono particolarmente apprezzate non solo per la realizzazione dei sottofondi dell'intonaco, ma anche per l'esecuzione degli strati di finitura, grazie all'elevata resistenza alle intemperie ed alla tinta gradevole, simile a quella del mattone, che viene quasi sempre mantenuta in vista per decorare le facciate degli edifici in sostituzione del tinteggio tradizionale.

Un comportamento simile a quello del cocciopesto è posseduto dalla *caolinite*, una qualità pregiata di argilla: questa, però, prima di essere

Fig. 8.4. L'utilizzo del cocciopesto è diffuso nella tradizione costruttiva sia nell'esecuzione di intonaci rivestimenti con proprietà impermeabilizzanti, sia nella realizzazione di pavimenti in battuto. Le immagini rivelano l'impiego di un aggregato spesso non finemente pestato, il cui utilizzo contraddice le indicazioni suggerite dalle conoscenze tecniche odierne.

aggiunta alla malta, necessita di essere macinata e cotta a 700 – 730°C, per liberare la silice e l'allumina dai reticoli cristallini dei minerali argillosi. Il caolino calcinato ha il pregio di essere piuttosto chiaro, quasi bianco, e di non alterare, quindi, il colore degli impasti, ma il difetto di assorbire una quantità d'acqua tale da esporre la malta al rischio di fessurazioni, specialmente se usato in percentuali elevate nella miscela.

Avendo una temperatura di calcinazione simile a quella dei calcari dolomitici, può essere cotto insieme ad esso, ottenendo una calce idraulica che, in area genovese, dove il suo impiego è stato particolarmente diffuso, assume il nome di 'calce porcellana'.

8.3. ALTRI MATERIALI IDRAULICIZZANTI

Nel § 8.2 si è discusso delle pozzolane naturali; tutti i materiali aventi proprietà idraulicizzanti ma derivanti da processi di trattamento termico, sono anche detti pozzolane artificiali, e si contraddistinguono tutti per l'elevato contenuto di silice ed allumina attive.

Tra questi materiali, si ricordano le *argille cotte*, ottenute per riscaldamento a temperature comprese tra 600 e 900°C e successiva macinazione, le *ceneri volanti*, che si presentano nella forma di microsferette vetrose prodotte dalla combustione, in impianti termoelettrici, di carbone polverizzato, ed in particolare dei minerali silicatici presenti in esso come impurezze. Le ceneri volanti possono presentare anche percentuali del 10-15% di ossido di calcio, e quindi manifestano attività idraulica latente^v. La presenza di carbone incombusto in quantità pari al 2-8%, conferisce loro un colore piuttosto scuro.

Altro materiale ad attività pozzolanica è la *microsilice*, o fumo di silice – *silica fumes* –, ottenuta dalla condensazione dei fumi prodotti con forni ad arco elettrico nella metallurgia dei quarzi e delle leghe del silicio, particolarmente attiva per il contenuto di silice amorfa pari a circa l'85-95%. Come il caolino, richiedono, però, una quantità d'acqua notevole.

Di origine biologica sono le *ceneri di riso*, derivanti dalla combustione della pula di riso, ricavata dalle operazioni di decorticazione dei

chicchi. Le particelle sono costituite da silice amorfa e presentano una microstruttura cellulare a grande sviluppo superficiale ($50-60 \text{ m}^2/\text{g}$)^{vi}. In altri casi, invece, i materiali sono scarti dell'industria siderurgica, spesso di natura vetrosa. Le *scorie d'altoforno* si ottengono per rapido raffreddamento di una scoria fusa proveniente dalla riduzione chimica in altoforno di minerali ferrosi per la produzione di ghisa. Avendo un contenuto anche in ossidi di calcio e magnesio, presentano anch'esse un'attività idraulica latente, che si manifesta in ambiente basico, quale quello in presenza di $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Gli impieghi della scoria d'altoforno sono diffusi nel campo dei cementi.

Una minore idraulicità è conferita alle malte anche impiegando polveri di *basalto* sottoposto a cottura, ovvero *ceneri di carbon fossile o vegetale*, impiegate, ad esempio, in alcune zone del Magreb, nel nord-Africa, per impastare la calce con una parte della cenere del combustibile che è servito per calcinarla.

Di notevole interesse per la consolidata applicazione che ha avuto nel corso della storia, soprattutto a Venezia, è il *granzolo di vetro*^{vii}, ossia la scoria dell'industria vetraria, che a Murano vanta ancora oggi una consolidata tradizione. Questo è una silice quasi del tutto cotta ad alte temperature che, oltre a conferire alla malte le note proprietà idraulizzanti, determina una particolare resistenza meccanica in virtù della durezza dei grani vetrosi.

ⁱ Cfr. MENICALI, U., *I materiali dell'edilizia storica – tecnologia e impiego dei materiali tradizionali*, Roma, La Nuova Italia Scientifica, 1992

ⁱⁱ I colli Albani sono un gruppo di rilievi costituiti dalla Caldera e dai coni interni di un vulcano quiescente localizzato a sud-est di Roma.

ⁱⁱⁱ La silice e l'allumina attive sono ossidi del silicio e dell'alluminio che non presentano una forma cristallina stabile e chimicamente inerte (quale, ad esempio, potrebbe essere quella dei cristalli di silicio contenuti nelle rocce sedimentarie) bensì una forma amorfa e vetrosa derivante dall'improvviso raffreddamento di materiali fortemente riscaldati.

^{iv} I materiali ad attività idraulica latente hanno proprietà idrauliche ma, a differenza di quelli a comportamento pozzolanico, che induriscono solo reagendo con la calce, quelli ad attività idraulica latente, se finemente macinati, ed in presenza di acqua, possono indurire, sebbene lentamente, anche in assenza di idrossido di calcio.

^v Cfr. nota precedente.

^{vi} Cfr. COLOMBO, C., SANSONETTI, A., ALIVERTI, L., *Le malte: composizione, tecnologia e classificazione 5. L'aggregato*, «Recupero e Conservazione», 2006, n. 70

^{vii} L'utilizzo del granzolo di vetro è testimoniato, tra gli altri, dal trattatista padovano Giuseppe Viola Zannini, il quale nella sua opera *Della Architettura, Libri Due*, del 1629, nel capitolo “Della pratica delle malte” rammenta:

“...le smaltature di calcina bianca di lucido splendore, dentro alla quale in cambio di arena si pone granzolo di vetro, qual si compra a murano, et in altri luoghi dove è la maccina da farlo o la scolatura del ferro, che sono gocce, che cascano nel fuoco a modo di liquida cera, mentre il ferro bolle, le quali ammassate insieme si convertono in pietra, che marogna si chiama; et questa minutamente pesta a modo di terazzo, et mescolata con la calce fa la smaltatura molto forte, et dura”.

9. SABBIE LOCALI NEL CONFEZIONAMENTO DELLE MALTE IDRAULICHE

Nella gran parte delle tipologie di malta, la frazione aggregata rappresenta circa il 65-70% del volume, pertanto alcune sue caratteristiche, ed in particolare la purezza, la granulometria e la geometria dei grani, sono decisive sulla qualità del prodotto finale.

La citata norma UNI 10924:2001 che classifica e definisce la terminologia relativa alle malte per elementi costruttivi e decorativi, distingue, in base alla sua origine, in aggregato costituito da sabbia naturale (di fiume, di cava e di litorale), da rocce frantumate, da materiali a comportamento pozzolanico e da frammenti di malte indurite.

L'impiego della frazione aggregata nelle malte facilita il passaggio dell'anidride carbonica, ma anche dell'acqua, responsabili dei processi di indurimento e presa, rispettivamente, nelle malte aeree ed in quelle idrauliche; l'aggregato svolge, inoltre, una non secondaria funzione estetica, in quanto, per la granulometria ed il colore, influisce notevolmente sulle proprietà ottiche della malta e, nel caso in cui possieda una reattività chimica, si è visto quanto decisamente possa influire sulle proprietà dell'impasto fresco ed indurito.

In questa fase, si vuole però discutere sull'influenza che una eventuale frazione aggregata non reattiva (o, quantomeno, assai scarsamente reattiva), comunemente detta inerte, possa avere sulle malte non cementizie con caratteristiche di idraulicità.

L'impiego di malte *semidrauliche* nel territorio della Sicilia è stato, nella tradizione costruttiva locale, piuttosto diffuso. In accordo con Fatta ([1], 1998), nell'esecuzione degli intonaci, *“sulle parti a rischio di umidità la malta di rinaffo si rendeva semidraulica con l'aggiunta di pozzolana nel rapporto in volume di 1:1:1 con calce aerea e sabbia, fino a 2:1:2 se il legante era tratto da calcari particolarmente puri. In opere di minore importanza veniva sensibilmente ridotta la percentuale della costosa pozzolana, riducendone l'impiego fino ad 1/4 rispetto alla quantità di sabbia richiesta. La malta diveniva idraulica se l'unico inerte era costituito da pozzolana con dosatura legante/inerte nel rapporto di 1/2, con un aumento del prezzo di applicazione”*.

L'impiego, quindi, di sabbie nel confezionamento di malte con proprietà idrauliche deriva da una consolidata prassi dettata, probabilmente in primo luogo, da esigenze relative ai costi di produzione ed approvvigionamento dei materiali a reattività pozzolanica che, in determinati contesti geografici, avevano indubbiamente un costo maggiore rispetto alle sabbie estratte localmente.

Similmente si può affermare che l'impiego, all'interno della frazione aggregata, di parti sabbiose inerti miste a parti reattive, possa derivare dalla diffusione delle conoscenze scientifiche, ma anche derivanti dalla regola dell'arte, in relazione alle proprietà dei materiali idraulicizzanti impiegati anche in proporzioni piuttosto ridotte per migliorare le caratteristiche di resistenza delle più comuni malte di calce aerea e sabbia.

In accordo con quanto specificato da Colombo, Sansonetti, et al. ([5], 2006) in relazione al confezionamento di una malta di utilizzo generico, gli aggregati (non reattivi, nda) devono presentare una buona resistenza a compressione, bassa porosità, basso coefficiente d'imbibizione e assenza di composti idrosolubili (come potrebbero essere i sali, responsabili dei fenomeni di degrado dei materiali lapidei), di sostanze polverulente e argillose o di terreno organico. I grani con superficie rugosa aumentano l'attrito reciproco e quindi la resistenza

Fig. 9.1. La forma dell'aggregato influenza la lavorabilità ed il comportamento finale della malta indurita:

a) l'aggregato a forma arrotondata determina una malta molto lavorabile ed a consistenza plastica;

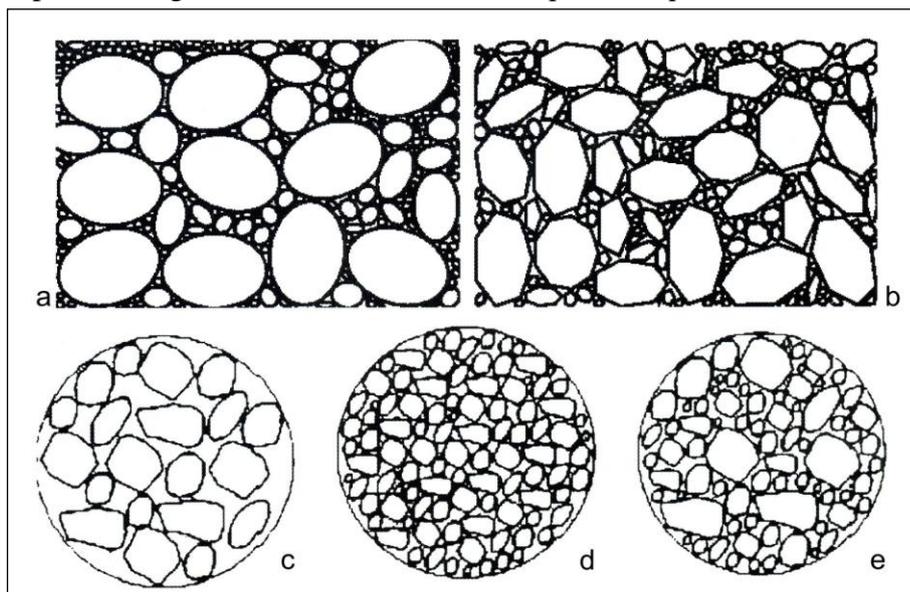
b) le azioni tra i grani nell'aggregato a spigolo vivo non consentono piccolissime rotazioni degli stessi, se non con un'azione maggiore in certe direzioni, per cui la lavorabilità della malta risulta minore.

L'assortimento granulometrico si accompagna ad una minore quantità di legante nell'impasto.

c) distribuzione unimodale dei grani, con grande quantità di vuoti tra gli stessi;

d) distribuzione bimodale;

e) distribuzione assortita, con ridotto volume di spazi vuoti.



della malta dopo la presa.

L'inerte frammisto alle particelle del legante svolge la funzione di scheletro in tutto il corpo della malta, contrastando in modo omogeneo il ritiro del legante, dovuto all'evaporazione dell'acqua ed al prodursi del nuovo assetto cristallino.

Le caratteristiche principali richieste all'aggregato possono riferirsi alla forma, alla dimensione, alla superficie, alla porosità, alle caratteristiche meccaniche, all'umidità, nonché alla composizione dei grani.

La *forma* dell'aggregato influenza notevolmente la lavorabilità: la figura 9.1 evidenzia, in via del tutto intuitiva, che la forza necessaria a modellare un insieme di solidi di forma regolare (arrotondata) è minore di quella richiesta per modellarne un insieme di forma irregolare (piatta, allungata o angolare).

In rapporto alla *granulometria*, gli aggregati si possono classificareⁱ in:

- finissimi (fillers), quando al setaccio di 0,075 mm passa più del 90% dell'aggregato;
- fini (sabbie) quando al setaccio di 4 mm passa più del 95%;
- grossi (ghiaietto) quando al setaccio di 4 mm passa meno del 95%.

Le sabbie a granulometria assortita oltre ad offrire una limitata resistenza al ritiro della malta, diminuiscono la plasticità del legante. Pur tuttavia, l'impiego di sabbie selezionate per setacciatura ed a granulometria uniforme risulta inadeguato, poiché non essendoci granuli di diverse dimensioni che possano riempire gli interstizi tra un grano e l'altro, si lasciano più spazi con solo legante, come mostrato nella figura 9.1; ciò rende necessario l'impiego di un quantitativo maggiore di legante nell'impasto, con un relativo aumento dei fenomeni di ritiro.

Pertanto il confezionamento della malta deve prevedere una granulometria ben assortita. La curva granulometrica teorica proposta da Fuller & Thompson rappresenta la distribuzione capace di assicurare la massima compattazione delle particelle dell'aggregato ed è rappresentabile secondo la formula:

$$P = 100 \sqrt{d/D}$$

dove P è la percentuale di passante per ogni singolo diametro (d) rapportato al diametro massimo (D) delle particelle più grosse. Tuttavia, in accordo con quanto specificato da Pecchioni, et al. (2008), una malta confezionata con una frazione aggregata perfettamente rispondente alla suddetta curva determinerebbe un impacchettamento tale da non consentire la lavorazione della malta, per cui, in accordo con le normative tecniche di molti paesi, il diagramma di Fuller viene solitamente affiancato da altre due curve che rappresentano l'area di tolleranza utile, detta fuso granulometrico, all'interno della quale si rappresenta la distribuzione granulometrica dell'aggregato.

È importante notare che ad un ampliamento del fuso granulometrico corrisponda spesso un aumento della quantità di legante richiesto dall'impasto. La corrispondenza tra l'assortimento della granulometria della frazione aggregata ed il fuso granulometrico è pertanto utile per contrastare i fenomeni di ritiro che, specialmente nelle malte idrauliche, possono assumere un'entità piuttosto rilevante.

La *tessitura superficiale* dell'aggregato, oltre che avere una relazione con la resistenza meccanica a compressione, in relazione all'attrito tra i grani, ha una notevole influenza sull'aderenza tra il legante e la frazione aggregata, e quindi sulla resistenza a trazione della malta.

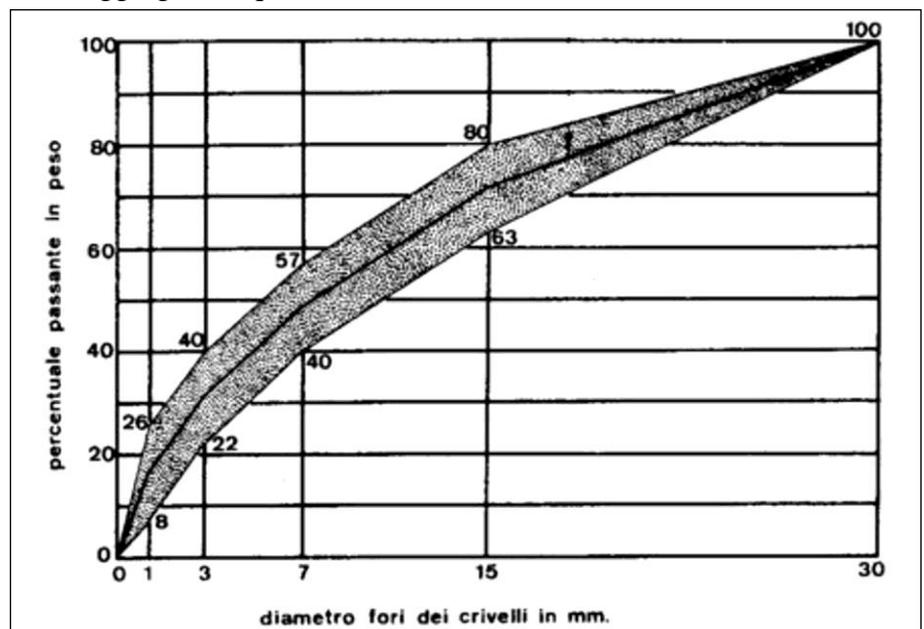


Fig. 9.2. Il fuso granulometrico teorizzato da Fuller & Thompson per la confezione del conglomerato cementizio, assume una certa validità anche in relazione alle minori dimensioni dell'aggregato richieste dalle malte.

La quantità d'acqua richiesta dalla miscela, che, come visto precedentemente, influisce notevolmente sulle caratteristiche meccaniche e fisiche del prodotto finale, ha una stretta relazione con la *porosità* ed il contenuto d'acqua o *umidità* dell'aggregato: una porosità elevata può infatti determinare un eccessivo assorbimento dell'acqua di impasto da parte dell'aggregato, e quindi una presa troppo rapida, che può essere compensata soltanto da un aumento della quantità d'acqua d'impasto, necessario anche per consentirne la lavorabilità.

Viceversa, si può determinare anche la condizione in cui un elevato assorbimento dell'acqua da parte della frazione aggregata, successivamente rilasciata, compensando la quantità d'acqua rapidamente perduta nei fenomeni di presa, riesca a rallentare i fenomeni di indurimento dell'idrossido di calcio, con le evidenti ripercussioni sulla plasticità dell'impasto indurito, ovvero a migliorare quelli di indurimento delle fasi idrate alluminatiche e silicatiche.

Le *caratteristiche meccaniche* della frazione aggregata, pur avendo un ruolo importante nella miscela, non sono particolarmente significative, in quanto risultano sempre di entità superiore rispetto a quelle della malta, specialmente nelle malte idrauliche con resistenza non elevata.

Anche la *composizione* delle sabbie influisce sulle caratteristiche finali delle miscele, specialmente se all'interno della frazione inerte sono contenuti minerali composti da sali, come i solfati, che, portati in soluzione e successivamente cristallizzati, determinano la disgregazione dell'impasto indurito.

La stessa natura delle sabbie può comportare variazioni nelle caratteristiche della malta: Pecchioni, et al. (2008) riportano, ad esempio, che le sabbie dolomitiche presenti nel territorio nazionale ed in particolare anche nella Sicilia Occidentale, a contatto con il silicato idrato di calcio CSH del legante, possano subire un processo di dedolomitizzazione, con formazione di silicato di calcio, gel di silice e ossido di magnesio che, a lungo termine, possono provocare espansioni nella malta, per idratazione dell'ossido di magnesio ed assorbimento d'acqua da parte del gel di silice.

Similmente, la presenza di composti silicei a struttura cristallina disordinata, specie se sottoposti a frantumazioni molto spinte, possono determinare anch'essi, in condizioni ambientali specifiche caratteriz-

zate da un'elevata alcalinità, la formazione di gel amorfi di silice, che, in tempi molto lunghi, causano fratture da sovratensione nella malta. Gli aggregati calcarei, invece, mostrano una rilevante solubilità in acqua debolmente acida per inquinamento, pertanto, in relazione a questo parametro, mostrano una resistenza minore rispetto, ad esempio a quelli siliceiⁱⁱ.

La dissoluzione del carbonato di calcio della frazione aggregata calcarea in acque debolmente acide, può, inoltre, determinare il trasporto dei carbonati sulla superficie dell'intonaco, secondo il noto fenomeno carsico, e pertanto, specie sulle finiture, possono manifestarsi inestetici sbiancamenti superficiali.

Nel territorio della Sicilia Occidentale, le ricerche svolte da Alessandrini (2001) nel centro storico di Palermo, mostrano che l'aggregato più comunemente utilizzato è costituito, fino al XVIII secolo, da una sabbia con grani arrotondati di natura calcarea e silicea, mentre, a par-



Fig. 9.2. La geologia dei colli che circondano la città di Palermo mostra, nelle zone a sud-ovest della città la presenza di ammassi dolomitici che, nella storia urbana, risultano utilizzati anche come cave per la produzione di aggregati.

tire dal XIX secolo, è piuttosto diffuso anche l'impiego dell'aggregato dolomitico.

Queste considerazioni confermano quanto già espresso da Fatta ([1], 1998) e Fatta (1999), il quale indica che la sabbia calcarea venisse estratta da cavità imbutiformi rinvenute in alcune zone dell'intorno urbano, la quarzosa dalle cave presso Ficuzza, mentre quella silico-calcarea venisse dragata dal fondo marinoⁱⁱⁱ o cavata dalle spiagge a sud-est della città, in prossimità della foce del fiume Oreto. L'impiego, invece, delle sabbie dolomitiche a grani fratturati, cavate per lo più sulle colline che circondano la città, a Boccadifalco, deriva dall'interesse scientifico che, ai primi del Novecento, portò allo studio delle sabbie nel confezionamento di malte aeree^{iv}, ed alla formulazione degli impasti per intonaco che negli anni a seguire diverranno particolarmente noti come "intonaci Li Vigni", dal nome dei due fratelli che, nel 1901, brevettarono questa particolare finitura.

L'uso di aggregato, in ambito locale, è sempre fortemente condizionato dalla reperibilità in loco e dai costi di trasporto, anche per le aziende produttrici di materiali in stabilimento, poiché l'utilizzo di aggregati lontani dagli impianti di produzione non risulta economicamente conveniente. Si capisce, quindi, per quale motivo gli aggregati più utilizzati nelle aree territoriali della Sicilia Occidentale siano quelli di natura carbonatica a base calcarea e/o dolomitica, in accordo con la natura litologica del territorio occidentale siculo.

ⁱ Cfr. COLOMBO, C., SANSONETTI, A., ALIVERTI, L., *Le malte: composizione, tecnologia e classificazione 5. L'aggregato*, «Recupero e Conservazione», 2006, n. 70

ⁱⁱ La solubilità e la reattività con l'acqua meteorica sono stati indagati da Fratini (1990) confrontando le resistenze meccaniche di malte confezionate con aggregati calcarei e silicei, esposte a piogge neutre o debolmente acide. Cfr. FRATINI, F., *Degrado dei manufatti in calcestruzzo: influenza dei componenti e delle modalità di confezionamento sulle caratteristiche e sulla durabilità*, «Arkos notizie Gor», 1990, n. 9/10.

ⁱⁱⁱ L'approvvigionamento di sabbie marine richiedeva però un aggravio dei costi per i necessari lavaggi con acqua dolce che la sabbia doveva subire prima di essere impiegata nell'impasto delle malte per l'esecuzione di intonaci.

^{iv} Gli studi sulle sabbie nel confezionamento di malte aeree, vennero condotti, nel 1902, dal prof. Eugenio Manzella, docente di chimica docimastica presso l'Università d Palermo, e, successivamente, nel 1905, da Giovanni Salemi Pace, pro-

fessore di Meccanica Applicata alle Costruzioni, presso la R. Scuola d'Ingegneria di Palermo. Cfr. FATTA, G., *Intonaci a Palermo – Materiali e tecniche costruttive costruttive nella tradizione palermitana*, «Recupero e Conservazione», 1998, n. 24, e, dello stesso autore, *Intonaci a Palermo – I fratelli Li Vigni e le innovazioni del Novecento*, «Recupero e Conservazione», 1999, n. 25.

10. PRODOTTI IDRAULICI E SEMIDRAULICI PREMISCELATI

Nella parte I, ed in particolare nel § 3.3, si è osservato che l'avanzamento tecnologico, la necessità di contenere i costi di produzione in edilizia e di ottenere prodotti a prestazioni costanti hanno determinato una notevole diffusione, nel mercato edilizio, delle malte premiscelate in stabilimento.

Alla luce di quanto visto finora, possiamo aggiungere che, in relazione all'impiego di prodotti idraulici a base non cementizia, è richiesta al tecnico un'attenzione particolare nella scelta del prodotto che si intende impiegare nel manufatto edilizio, specialmente qualora ci si trovi a dover operare in cantieri di recupero.

L'impiego di calce idrauliche naturali, ed in particolare della calce NHL 3.5, è negli ultimi anni ritenuto una soluzione adeguatamente applicabile alla grande maggioranza dei problemi che si presentano in edilizia e che richiedono l'impiego di malte con caratteristiche di idraulicità. Ciononostante, questo tipo di calce presenta, in alcuni casi un indice di idraulicità troppo elevato, e quindi non può essere ritenuto adeguata.

Le soluzioni offerte dal mercato industriale sono molte ed in gran parte rimandano all'impiego di materiali tradizionali, in accordo con quanto richiesto dalla cultura tecnica, ma anche dalle autorità di vigilanza, ed in particolare dalle Sovrintendenze.

L'elevata meccanizzazione degli impianti di produzione ha inizio con l'avvento, negli anni Sessanta, dei silos forniti di vaglio di controllo. Precedentemente, le operazioni di vagliatura delle materie prime venivano eseguite a mano, con l'impiego di vagli meccanici a scosse. Ai silos è sempre affiancato un impianto di aspirazione delle polveri in



Fig. 10.1. I primi impianti di produzione di malte premiscelate vengono meccanizzati soltanto a partire dagli anni Sessanta.

eccesso nella miscela, ad esempio, per eccessiva presenza di filler nella frazione aggregata.

La miscelazione, che nei primi impianti di produzione industrializzata avveniva prelevando con carriere le quantità necessarie di materie prime, che venivano pesate sulla bilancia ed immesse nell'impianto di miscelazione ed insaccamento, viene successivamente meccanizzata, per l'impianto di produzione continua, attraverso le cabine di controllo dei meccanismi di prelievo delle sabbie, funzionanti tramite serrande comandate direttamente da un operatore posto all'interno della cabina. L'impiego di prodotti e sistemi di fabbricazione industriale offre molte garanzie circa le caratteristiche del prodotto finale: il controllo in stabilimento della frazione legante e dell'aggregato rispetto alla provenienza, alle caratteristiche fisiche e chimiche, all'assortimento del fuso granulometrico, ma anche rispetto alle proporzioni tra le parti, garantiscono l'utente finale dagli errori e dalle incertezze derivanti dall'approvvigionamento di materiali sfusi in cantiere, dalla possibilità che gli stessi possano essere alterati¹, ovvero, ancora, dagli errori di formulazione delle miscele.

La produzione industriale è spesso preferita, anche perché garantisce, grazie alla formulazione esatta ed ai continui controlli, i migliori risul-

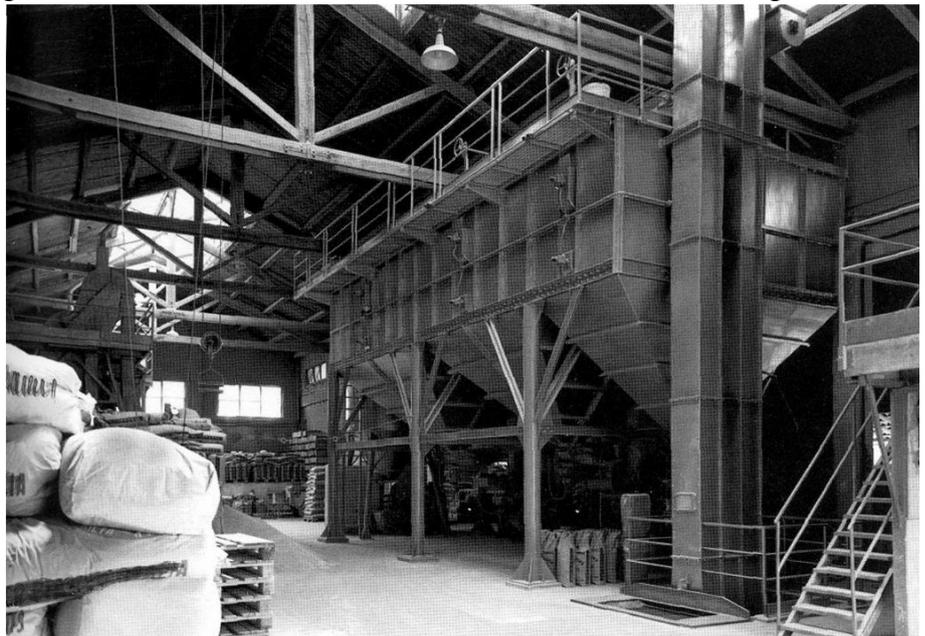


Fig. 10.2. I silos, oltre a consentire lo stoccaggio dei materiali, ne permettono la vagliatura, per il controllo delle granulometrie nella miscela.

tati in termini di durabilità del prodotto finale. Al proposito, ad esempio, basta ricordare che semplici controlli in laboratorio sull'indice di pozzolanicità degli aggregati (detto indice di Chapelle) sono utili a combinare nel giusto rapporto la polvere pozzolanica di finezza media conosciuta, con la giusta quantità di idrossido di calcio, al fine di comporre impasti estremamente equilibrati che non mostrino né eccesso di pozzolana (o altro materiale idraulicizzante), né quantità rilevanti di calce libera.

Inoltre, la standardizzazione delle produzioni industriali può offrire garanzie nel miglioramento delle caratteristiche della miscela, sia con riguardo alle fasi di lavorazione, sia con riferimento al prodotto finale. A questo proposito ci si può, ad esempio, riferire all'aggiunta, nell'impasto, di additivi: ad esempio, la polpa di cellulosa, qualche volta utilizzata dalle industrie produttrici, svolgendo la funzione di ritentore idrico, può costituire, nella preparazione di miscele con calce aerea idrata ed aggregato pozzolanico, una valida alternativa all'impiego del grassello ben stagionato, che, naturalmente, costituisce la riserva d'acqua nell'impasto, necessaria per consentire una buona riuscita dei fenomeni di indurimentoⁱⁱ.

Certamente risulta difficile che la produzione industriale possa impiegare, nella formulazione di malte idrauliche, leganti in pasta per le difficoltà di produzione, confezionamento e trasporto: abbiamo, infatti, visto che la presenza d'acqua nell'impasto determina l'attivazione dei fenomeni di presa ed indurimento nella malta, il che comporterebbe l'inizio della presa all'interno del sacco.

Proprio per questa ragione, ma anche per la facilità di produzione, le malte idrauliche premiscelate vengono prodotte impiegando leganti in polvere, quale la calce idrata, quella idraulica, ed, ovviamente, i cementi.

Gli aggregati utilizzati possono essere reattivi e non, privilegiando in qualche caso gli aggregati inerti provenienti, per economia di produzione, dalle medesime aree geografiche in cui si trovano gli stabilimenti, sebbene oggi le spese di trasporto siano assai meno rilevanti che in passato.

Ben poco, purtroppo, viene dichiarato sulle caratteristiche dei materiali utilizzati nella preparazione delle miscele: i produttori tendono a dichiarare, in generale, le caratteristiche tecniche del prodotto finale, co-



Fig. 10.3. Negli impianti più avanzati le operazioni di miscelazione sono altamente meccanizzate, così come quelle di preparazione delle confezioni da porre in commercio.

sì come risulta dai certificati di prova sulla malta indurita redatti dai laboratori interni agli stabilimenti, o da quelli esterni appositamente incaricati a svolgere le prove su richiesta dei produttori.

Le caratteristiche dei leganti, le modalità di produzione, l'eventuale presenza di silicati tricalcici, tipici del cemento, o di composti estranei ai cicli produttivi della calce (come i solfati), nonché di additivi, specie se organici, sono totalmente omesse, o, in qualche caso, dichiarate all'interno di sigle comprensibili soltanto da tecnici particolarmente competenti nel settore.

Sulle caratteristiche, ad esempio, dell'aggregato pozzolanico, le informazioni si limitano soltanto alla granulometria: eppure abbiamo visto quanto sia differente il comportamento di una pozzolana rispetto ad un'altra, in relazione alla sua origine. Nel corso dei capitoli precedenti, si è anche mostrato quanto possa risultare simile ad una malta cementizia, una miscela confezionata con pozzolane artificiali, quali le scorie d'altoforno, od anche quanto sia scarsa la reattività di un cocchiopesto derivante non dalla frantumazione dei rottami di laterizio a spessore sottile, bensì dagli scarti di lavorazione di laterizi moderni, quali i mattoni forati.

Le ricerche svolte in collaborazione tra I.C.R. Venaria Reale, Univer-



Fig. 10.4. Le confezioni vengono quindi trasportate su nastri all'interno dello stabilimento, per essere assemblate su pallettes.

sità della Tuscia e Roma Treⁱⁱⁱ, mostrano addirittura che, in qualche caso, le dichiarazioni dei produttori non possano nemmeno ritenersi attendibili.

Una ricognizione sulle schede tecniche dei premiscelati esenti da cemento, prodotti da alcune aziende di vasta o minore rilevanza nazionale, con bacini di mercato anche internazionali, mostra, nella descrizione dei componenti utilizzati nella formulazione delle miscele^{iv}, l'uso di termini spesso vaghi, che a volte svolgono una funzione esclusivamente pubblicitaria e non tecnica: non è infatti raro leggere sulle schede tecniche che la malta è confezionata con calce idrata e piccole quantità di legante idraulico (senza specificarne il tipo), oppure con calce aerea e basso tenore di cemento (che, evidentemente, serve a conferire una determinata caratteristica idraulica). In altri casi si legge che il legante è costituito da calce idraulica, senza alcuna specifica sull'origine naturale o artificiale, ed in altri che l'aggregato è costituito da coccio macinato, senza indicazioni sull'origine e sui caratteri tecnici del laterizio.

Non è raro, poi, trovare strane indicazioni circa l'utilizzo di generici 'leganti idraulici a reattività pozzolanica', che non definiscono né la qualità del legante, né la reattività pozzolanica di una eventuale frazione aggregata presente nella miscela; in qualche caso, la fantasia dell'utente è stimolata dall'utilizzo, nella descrizione di alcune componenti, dell'aggettivo 'speciale' o del prefisso 'eco-', utilizzato per indicare l'origine naturale di un componente.

Insieme a queste indicazioni, del tutto generiche e spesso fuorvianti, derivanti da logiche esclusivamente "commerciali", vi sono però, da parte di aziende piuttosto serie, anche indicazioni ben precise sulla qualità del legante, spesso indicato con la denominazione o sigla richiesta dalle norme europee, sulla composizione e granulometria delle sabbie, così come sulla provenienza dell'aggregato reattivo.

Al tecnico si presenta quindi il seguente scenario delle aziende produttrici:

1. aziende che non forniscono alcuna informazione;
2. aziende che forniscono informazioni parziali, spesso di origine pubblicitaria, assolutamente non significative;
3. aziende che forniscono informazioni non corrette, né attendibili;

4. aziende che accompagnano il prodotto con schede tecniche adeguate e complete.

Con riguardo, infine, all'utilizzo degli additivi, le dichiarazioni dei produttori sono quasi sempre molto scarse e si limitano, ove presenti, ad indicare soltanto la funzione svolta dagli stessi.

ⁱ Si pensi, ad esempio, alla possibilità che gli aggregati possano essere dilavati, con eventuale perdita della frazione più fine che, specie per gli aggregati pozzolanici, costituisce la parte più reattiva.

ⁱⁱ Con riferimento ai fenomeni di indurimento delle malte idraulicizzate, cfr. § 6.1.

ⁱⁱⁱ Cfr. § 3.3.

^{iv} Le miscele, ovviamente, non sono in nessun caso perfettamente esplicitate, per ovvie ragioni di produzione industriale.

11. LE ‘RICETTE’ DELLA TRADIZIONE

Il confezionamento in cantiere di malte con caratteristiche di idraulicità, a partire dai componenti di base, è una prassi ancora piuttosto consolidata, specialmente laddove l’approvvigionamento dei materiali comunemente impiegati assume un costo limitato, ovvero perché il livello tecnico dell’opera è talmente elevato da obbligare dosaggi e pratiche speciali, ovvero ancora piuttosto basso da non consentire di far fronte agli alti costi dei materiali industriali.

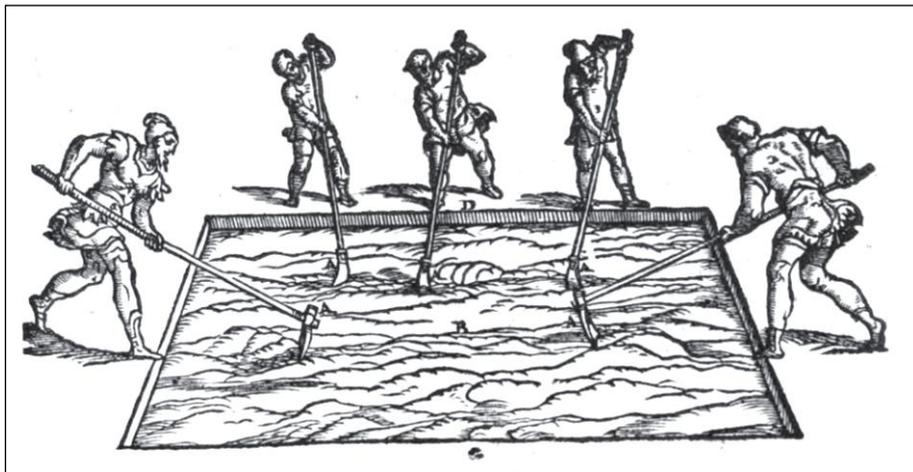
È soprattutto nei cantieri di recupero che l’esigenza di formulare malte di tipo tradizionale, in accordo con quanto richiesto dalla cultura tecnica, richiede un’attenzione particolare agli operatori del settore: la cura dei particolari è, in questo caso, non più rimandabile agli stabilimenti produttivi, pertanto in cantiere bisogna curarsi che i leganti siano ben conservati e che non sia consentito loro di far presa preventivamente, che il grassello possa stagionare con cura, che le proporzioni fra i componenti siano rispettate, secondo le indicazioni della direzione lavori, etc.

In alcuni casi, soprattutto per operazioni di grande cura e per quantitativi di prodotto di notevole entità, può essere opportuno richiedere agli stabilimenti produttivi operanti nel territorio di formulare loro stessi le malte, secondo le precise indicazioni dei progettisti, magari in accordo con le caratteristiche dei materiali già riscontrati in opera. È questa una prassi piuttosto diffusa che, rimandando allo stabilimento la formulazione della miscela, può anche prevedere l’impiego di leganti in pasta di elevata qualità, qualora l’approvvigionamento in cantiere e l’utilizzo della malta siano piuttosto immediati.

In altri casi risulta opportuno formulare in cantiere le malte che si dovranno utilizzare, magari perché il quantitativo di prodotto richiesto è piuttosto ridotto, oppure per indisponibilità degli impianti di miscelazione locali.

In questo caso, le cautele con cui bisogna operare sono notevoli: sebbene, infatti, i componenti di base, forniti dai produttori o dai commercianti locali, possano, di per sé, rispondere ai più adeguati requisiti di qualità, la buona riuscita del prodotto finale è demandata all’operatore che dovrebbe essere in grado di formulare la malta nelle giuste proporzioni. La perdita, a tal proposito, della ‘confidenza’ da

Fig. 11.1. Figura del modo di macerare la calce (Rusconi, 1660). Le tecniche di produzione dei leganti tradizionali certamente non possono essere più realizzate in cantiere. Tuttavia i produttori commercializzano ancora leganti prodotti in maniera tradizionale.



parte delle maestranze con l'impiego di materiali tradizionali, che nel corso dell'ultimo secolo sono stati spesso sostituiti dai materiali industriali o da quelli a base cementizia, determina alcune incertezze cui possiamo sopperire riscoprendo le regole della lunga tradizione costruttiva.

Queste regole risultano spesso codificate negli antichi trattati di architettura, nei manuali e nei regolamenti, che avevano il ruolo di trasmettere il sapere costruttivo o la 'regola dell'arte' da una generazione all'altra, prescindendo dalle sempre efficaci forme di tradizione orale. Gli studi svolti, nel corso degli ultimi decenni, sulle 'ricette' tradizionali riguardanti le malte, in tutti gli utilizzi possibili in edilizia, sono notevoli¹, ed a questi ci si intende appoggiare, in questa sede, per individuare le possibili varianti nella formulazione di malte per intonaci con caratteristiche di idraulicità non conferite dall'utilizzo di leganti a base cementizia.

Crediamo pertanto che in questa sede possa ritornare utile una rassegna critica delle formulazioni diffuse dalla trattatistica e dalla manualistica, dall'epoca dei Romani, fin quasi ai giorni nostri, che evidenzia le differenti proporzioni tra le componenti degli impasti, anche in relazione ad alcune specificità legate al contesto storico ed ambientale nel quale le ricette vennero proposte.

La storia della trattatistica, anche con riferimento alla formulazione di malte con caratteristiche di idraulicità, ha origine sempre dagli scritti di Marco Vitruvio Pollione, il quale, nel suo *De Architectura* (I sec. A.



Fig. 11.2. Le opere della trattatistica e della manualistica pubblicate a partire dal XV secolo, spesso sull'impronta dell'analogica opera vitruviana costituiscono ancora oggi una rilevante risorsa di informazioni, nonostante le moderne scoperte tecnologiche abbiano confutato alcune teorie e formulazioni un tempo ritenute valide.

ottenuta per aggiunta di una frazione di laterizi pestati alla più comune malta di calce aerea:

[...] Una volta raffreddata (la calce, nda) la si mescola con sabbia nel rapporto di uno a tre se questa è di cava, di uno a due se invece è di fiume; così si ottiene un dosaggio ben equilibrato. Ma il risultato sarà ancora migliore se alla sabbia di fiume o di mare si aggiungerà la terza parte di frammenti di coccio pestato e setacciato. [...]

Più avanti, invece, con riferimento agli impieghi nella realizzazione di strutture portuali, lo stesso autore propone la ricetta di una malta le cui caratteristiche di idraulicità sono ottenute per totale sostituzione della frazione aggregata sabbiosa con pozzolana. Il rapporto legante aggregato suggerito da Vitruvio è pari a 1:2ⁱⁱ.

L'impiego di calci idrauliche ottenute per cottura di calcari marnosi è testimoniato per la prima volta da Francesco di Giorgio Martini, il quale nel suo primo *Trattato di Architettura, Ingegneria e Arte Militare*, del 1456, ne prescrive l'utilizzo in riferimento alla produzione di malte idrauliche applicabili nei muri umidi:

[...] Una natura di pietra bigia in Toscana è ditta Albizzano, della quale si fa calcina in li loci umidi di grandissima tenacità: di colore di cenere. [...] la sua mistione con arena di fiumi è: due parti di arena et una di calcina; con le altre tre parti di arena et una calcina. [...]

Lo stesso autore, con riferimento all'uso del cocciopesto, sempre nello stesso trattato, riprende la ricetta proposta da Vitruvio, aggiungendo che il laterizio pestato provenga dalla frantumazione di vecchie tegole:

[...] et è da intendere che universalmente ogni calcina mista con arena fluviale o maritima, se a quella sarà aggiunto la terza parte di testi pesti ovvero di antiqui tegoli, molto più tenace che senza diverrà. [...]

I trattati successivi al XV secolo riprendono spesso le affermazioni dei predecessori, ripercorrendo le stesse formulazioni e proponendo utilizzazioni varie nelle applicazioni edilizie. Procedendo secondo un ordine cronologico, si osserva che nel 1615, Vincenzo Scamozzi, nel suo trattato su *L'idea della architettura universale*ⁱⁱⁱ, al proposito delle

malte con cocchiopesto, suggerisce esplicitamente l'impiego della malta semidraulica sia nell'esecuzione della muratura, sia ancora nella preparazione degli strati di supporto dell'intonaco.

L'uso di materiali a reattività pozzolanica di natura artificiale differenti dal cocchiopesto è documentato, tra gli altri autori, da Bernard Belidor, il quale, nel 1739, ne *La Scienza degli Ingegneri*^{iv}, suggerisce l'impiego sia della cenere derivante dalla cottura dei calcari, che delle scorie di ferro, come materiali idraulicizzanti impiegabili nelle malte, non fornendo però alcuna proporzione tra le parti.

Nella stessa opera, l'autore informa anche circa l'impiego *di un sesto di polvere di tegolo passata allo staccio* nella preparazione di malte confezionate con calce di Bologna al Mare, *che è eccellente adoperata nell'acqua*, mentre *non val nulla a secco* (cioè come calce aerea).

Questa informazione ci racconta, evidentemente, della scarsa fiducia che si aveva nelle malte confezionate con calci ottenute dalla cottura di calcari impuri, quale certamente doveva essere la suddetta, che manifestava, invece, eccellenti qualità negli utilizzi idraulici, sebbene si ritenesse che le proprietà idrauliche potessero essere conferite esclusivamente da una quantità così ridotta di cocchiopesto (appena un sesto).

La vecchia formula vitruviana relativa all'impiego di una terza parte di cocchiopesto, viene ripresa da molti autori nel corso dei secoli compresi tra il XV ed il XIX. Tra gli antichi trattatisti, vale certamente la pena di ricordare Lodovico Bolognini, il quale nel 1778, nel suo testo *Il muratore reggiano*, fornisce una variante alla ricetta vitruviana, aggiungendo, nell'impasto, una frazione di calce viva^v. Le conoscenze tecniche odierne sconsigliano fortemente questa formulazione, in quanto la presenza di una frazione di calce non bene spenta potrebbe determinare la formazione di piccoli crateri nell'intonaco dovuti all'espulsione di materiale per eccessivo aumento di volume delle particelle di calce viva, che verrebbero ad idratarsi in opera:

Ancora nel 1830 Quirico Viviani si confronta con l'opera vitruviana, e nella sua opera circa *L'architettura di Vitruvio tradotta in italiano da Quirico Viviani*, egli fornisce la ricetta per le opere 'a cazzuola':

[...] per le opere poi di minor entità, e che si fanno, come dicesi, a cazzuola, si tralasciano i rottami (di pietre, impiegati per opere grandiose, nda), ed il miscuglio si fa risultare di due parti di pozzolana, una di calce ed una di sabbia pura. [...]

Fig. 11.2. Figura del modo del preparare il marmo per l'incrostare (Rusconi, 1660). L'attenzione dei mastri era rivolta alla qualità della materia di base che, prima di essere impiegata, subiva attenti processi di frantumazione, vagliatura e pulitura.



Si capisce che la modifica della ricetta vitruviana vista precedentemente, che prescriveva l'impiego di un rapporto legante/aggregato pari a 1:2, qui portato ad 1:3, doveva certamente accompagnarsi ad una frazione legante particolarmente grassa, data la ridotta quantità di legante nella malta. Inoltre, l'impiego di una frazione di sabbia nell'impasto suggerisce che per l'esecuzione degli intonaci non fosse certamente richiesto alla malta di raggiungere le stesse caratteristiche di idraulicità richieste nei moli portuali.

L'influenza delle scoperte scientifiche tra la fine del Settecento e l'inizio dell'Ottocento determina una certa influenza sulle ricette indicate dalla letteratura tecnica del periodo, che, rispetto alle precedenti, si distinguono per un maggior dettaglio circa le proprietà dei materiali

di base, sulla conoscenza delle attività di sperimentazione dei contemporanei e sull'approccio al problema della formulazione accompagnata da indagini preliminari. Nel 1832, Antoine Chrysostome Quatremère de Quincy, nel suo *Dizionario storico di architettura*, scrive:

[...] le malte fatte con calci grasse e pozzolane energiche, o molto energiche, riesciranno sempre più dure, quanto più si avvicineranno alla proporzione di un volume di calce grassa in pasta dura e 2 o 3 volumi di pozzolana in polvere asciutta. Lo stesso succederà colla malta a calce mezzamente idraulica, composta di un volume di calce e 2 di pozzolana. Un volume di calce eminentemente idraulica con due di sabbia quarzosa, o calcare, formerà una malta suscettibile del maggior consolidamento.

Del resto Vicat consiglia di procedere sempre ad indagini preliminari per determinare le proporzioni più adatte.

Per tesi generale si ritenga che sarà sempre meglio peccare per difetto di calce che per eccesso quando si tratti di miscuglio di calce grassa e pozzolana qualunque siasi, e che dovrà osservarsi l'opposto nelle calci idrauliche od eminentemente idrauliche mescolate con sabbie quarzifere o calcari. [...]

Nello stesso anno, le *Istituzioni di architettura, statica e idraulica*, di Nicola Cavalieri San Bertolo, nel Vol. II – Capo IV, riportano un elenco ragionato di ricette relative a malte di calce e pozzolana, miste con proporzioni assai differenti, in funzione dell'uso che se ne intende fare. Si osserva in particolare che le caratteristiche di idraulicità di una malta potevano certamente considerarsi differenti per le applicazioni ad intonaco, nelle quali il rapporto legante/aggregato assume il valore massimo, e per le murature di pietrame, dove la formulazione della malta risulta piuttosto magra:

[...] §551. Generalmente in Roma dagli odierni costruttori si stabiliscono presso a poco le seguenti proporzioni fra la calcina e la pozzolana nella composizione delle malte, secondo i vari usi a cui sono destinate. La convenienza di tali proporzioni sembra giustificata dalle prove di una diuturna esperienza.

Malte per usi diversi

Calcina Pozzolana

1. Per muri di pietrame o sia pezzi di tufo vulcanico 0,15 0,85

2. Per muri di tavolozza, o sia frantumi di laterizi	0,25	0,75
3. Per muri di mattoni	0,30	0,70
4. Per muri di mattoni a cortina rotati in costa	0,45	0,55
5. Per pavimenti mattonati	0,36	0,64
6. Per le selciate in malta	0,22	0,78
7. Per gl'intonachi	0,40	0,60
[...]		

Nella prima metà del XIX secolo le sperimentazioni sono molte ed alcune raggiungono anche una certa fama, per la grande diffusione che gli autori del periodo danno alle pubblicazioni degli sperimentatori francesi ed inglesi. Nel 1847, ad esempio, Luigi Masieri, nella riedizione del trattato di Francesco Milizia, *Principj di architettura civile. Opera illustrata dal professore architetto Giovanni Antolini. Seconda edizione milanese migliorata per cura del Dottor L. Masieri*, fornisce nella Parte Terza – Cap. V la ricetta del famoso ‘cemento di Lorient’^{vi}:

[...] il famoso cemento di Lorient si fa con calce di molto tempo estinta parti 2
 Sabbia scabra di fiume parti 3
 Polvere stacciata di mattoni nuovi parti 1
 Di tutto si compone malta liquida, e a misura che si lavora si aggiunge nell’arnese detto conca, calce viva parti 1
 Mescolando ben bene, e adoperandola subito, fa presto presa, non si dilata e non si restringe. [...]

Come abbiamo già avuto modo di dire le diffuse pratiche degli sperimentatori sette - ottocenteschi possono oggi essere messe in dubbio, sulla base delle conoscenze tecniche raggiunte dalla cultura odierna. Sulla falsariga di Nicola Cavalieri San Bertolo, anche le *Istruzioni pratiche sull’arte di costruire le fabbriche civili*, Vol. I – Cap. IV, di Antonio Cantalupi, del 1862, forniscono differenti composizioni per le malte idrauliche confezionate con calce e polvere di mattoni o pozzolana:

[...] *Le malte idrauliche sono composte di calce idraulica e sabbia, oppure di calce grassa e pozzolana naturale od artificiale. Esse si distinguono in malte comuni idrauliche – malte per cappe – e malte per gli intonachi.*

La malta comune idraulica è composta di calce, sabbia e polvere di mattoni, in proporzioni diverse, a norma delle circostanze, che possono variare nei seguenti quattro modi, cioè:

1^a specie: 1 di calce in pasta, 1 1/2 di sabbia, 1/2 di polvere di mattoni

2^a specie: 2/5 3/10 3/10

3^a specie: 1/3 1/3 1/3

4^a specie: 2/5 1/5 2/5

[...] *La malta o calcestruzzo per cappe è composta da due parti di calcina comune in pasta e da tre parti di polvere di mattoni. [...]*

Le malte per gli intonachi possono essere di quattro specie, in relazione alle dosi diverse degli ingredienti.

La malta della 1^a specie è composta da una parte di calcina comune in pasta, e di tre parti di polvere di mattoni o di pozzolana. [...]

La malta della 2^a specie è preparata con una parte di calcina idraulica in pasta, una parte di polvere di mattoni e due parti di sabbia. [...]

La malta della 3^a specie vien fatta con una parte di calcina idraulica in polvere, passata allo staccio fino e mescolata con una parte di pozzolana e due parti di sabbia. [...]

La malta della 4^a specie è composta di tre parti di calcina comune caustica^{vii}, da una parte di calcina comune in polvere, di sedici parti di pozzolana e di quattro parti d'acqua. [...]

Tra i più lunghi repertori di ricette proposte dagli autori ottocenteschi, una particolare nota di merito va posta all'opera di, Giovanni Curioni, *L'arte di fabbricare, ossia corso completo di istituzioni teorico-pratiche*, del 1864. Questi fornisce sulla base degli scritti pubblicati alcuni decenni prima da Luigi Ponza di San Martino, e da J. Claudel e L. Laroque^{viii}, un compendio di 'ricette' di malte idrauliche e cementizie con calcina, sabbia e pozzolana,:

[...] *MALTE IDRAULICHE. Le malte idrauliche sono quelle che si compongono di calcina idraulica e di sabbia, o di calcina un poco idraulica e di sabbia, oppure di calcina comune con pozzolana.*

Il Ponza di San Martino, nel mentre dice che la confezione della malte idrauliche, che ambedue si riducono, dopo la manipolazione, ad avere volume eguale a quello della sabbia impiegata, e composte come segue:

1° Malta idraulica formata di 1 parte di calcina idraulica e 3 parti di sabbia comune;

2° Malta idraulica fatta con 2 parti di calcina idraulica in pasta mescolata con 5 parti di sabbia. [...]

Claudel e Laroque, come risultati di numerose osservazioni e di accurate esperienze, hanno dedotto potersi ottenere buone malte idrauliche, osservando, per ogni metro cubo di malta, gli ingredienti che seguono:

Per una malta poco idraulica: 0mc,340 di calcina grassa estinta per fusione con 0mc,820 di coccio; 0mc,250 di calcina grassa anche estinta per fusione con 0mc,940 di sabbia unita a 0mc,200 di pozzolana.

Per una malta idraulica: 0mc,333 di calcina idraulica estinta per fusione con 1mc,020 di sabbia; 0mc,370 di calcina idraulica anche estinta per fusione con 0mc,950 di sabbia; 0mc,440 di calcina di calcina idraulica estinta per immersione con 1mc,000 di calce poco idraulica estinta per fusione con 0mc,450 di sabbia unita a 0mc,450 di pozzolana.

Per una malta molto idraulica: 0mc,360 di calcina idraulica estinta per fusione con 1mc,000 di sabbia e 0mc,040 di pozzolana; 0mc,400 di calcina idraulica anche estinta per fusione e 1mc,000 di sabbia, oppure 0mc,650 di calcina idraulica in pasta con 1mc,000 di sabbia. [...] MALTE CEMENTIZIE CON CALCINA SABBIA E POZZOLANA. *Il Ponza di San Martino indica undici diverse composizioni di queste malte cementizie formate in volume:*

1° Con 2 parti di calcina in pasta, 3 di sabbia e 1 di coccio;

2° Con 4 parti di calcina in pasta, 3 di sabbia e 3 di coccio;

3° Con 1 parte di calcina in pasta, 1 di sabbia e 1 di coccio;

4° Con 2 parti di calcina in pasta, 1 di sabbia e 2 di coccio;

5° Con 1 parte di calcina comune viva in pietra 2 parti di coccio;

6° Con 4 parti di calcina idraulica in polvere, 1 di sabbia lavata e 2 di pozzolana;

7° Con 2 parti di calcina comune in pasta e 3 di coccio;

8° Con 1 parte di calcina comune in pasta e 3 parti di coccio o pozzolana;

9° Con 1 parte di calcina idraulica in pasta, 2 di sabbia e 1 di coc-
cio;

10° Con 1 parte di calcina idraulica in polvere passata allo staccio
fino, mescolata con 2 parti di sabbia e 1 di pozzolana;

11° Con 3 parti di calcina comune viva in pietra, 1 parte di calcina
comune in polvere, 16 parti di pozzolana fina e 4 parti d'acqua.

[...]

La trattazione del Curioni fa comprendere quale fosse il livello di completezza delle informazioni raggiunto, sul finire dell'Ottocento, dalla letteratura tecnica. Le indicazioni di Vitruvio, ritenute dalla letteratura precedente comunque valide, venivano messe in parziale discussione, grazie alla pratica svolta dai tecnici impegnati nella ricerca, tramite le *numerose osservazioni ed accurate esperienze*.

Ancora nel XX secolo, nonostante l'avanzamento delle tecnologie nel campo dei cementi e dei calcestruzzi, Umberto Strada, nel suo manuale *La tecnica del costruire - La teoria e la pratica nell'arte edilizia*, del 1955, fornisce le *composizioni pratiche per formare un metro cubo di malta*. Le informazioni di Strada sono arricchite, in qualche caso, con una maggiore indicazione sulle modalità di impasto, ed in particolare sul quantitativo d'acqua richiesto e sulle ore di lavoro necessarie per il confezionamento da parte di un *manovale calcinarolo*. Ciò rispecchia certamente l'interesse del periodo verso le problematiche organizzative del cantiere, determinanti nella previsione dei costi di produzione. Una nota va pure posta al modo di formulazione delle ricette operato da Strada, il quale, in qualche caso, fornisce una differente misura dei componenti utilizzati nella miscela, in ragione delle modifiche operate dal mercato che, ancora oggi, distribuisce i leganti in sacchi di un determinato peso, mentre gli aggregati sono spesso forniti in cumuli:

[...] *Malta idraulica nel rapporto volumetrico 1:3; normalmente usata nelle murature di pietrame, e nelle malte dei calcestruzzi magri per fondazione:*

	<i>da Kg. 250 a 300 per costruzioni all'aria</i>
<i>calce idraulica in polvere</i>	<i>da Kg. 300 a 350 per fondazioni e per costruzioni sommerse in acqua dolce e di mare</i>
<i>sabbia viva granita</i>	<i>mc. 1,00</i>
<i>acqua</i>	<i>mc. 0,35</i>

manovale calcinarolo ore 5

Malta idraulica nel rapporto 1:2; per murature e mattoni:

calce idraulica in polvere Kg. 300 a 350

sabbia viva granita mc. 0,950

acqua e mano d'opera come sopra

Malta idraulica nel rapporto 2:3; per rabbocature e nelle malte per calcestruzzi grassi:

calce idraulica in polvere Kg. 350 a 450

sabbia viva granita mc. 0,900

acqua e mano d'opera come sopra

Malta idraulica nel rapporto 3:4; per arricciature, e da usarsi nelle malte per calcestruzzi in lavori importanti e subacquei:

calce idraulica in polvere Kg. 450 a 550

sabbia viva granita mc. 0,850

acqua e mano d'opera come sopra

[...] Si possono avere buone malte idrauliche anche dalla mescolanza di calce comune, spenta, con pozzolana, e più precisamente per ogni metro cubo di malta:

Malta idraulica nel rapporto 2:5; (è il rapporto più comunemente usato):

calce dolce^{ix} in pasta (preferib. grassa) mc. 0,36

pozzolana " 0,90

acqua " 0,20

od anche nel rapporto 1:4;

calce dolce in pasta " 0,25

pozzolana " 1,00

Malta per intonaco nel rapporto 1:3;

calce dolce in pasta " 0,30

pozzolana " 0,90

Malta idraulica nel rapporto 1:2; (malta ricca e impermeabile)

calce dolce in pasta (anche se magra) mc 0,42

pozzolana " 0,84

Con l'impiego della calce idrata, si hanno i seguenti dati:

Malta da muro:

pozzolana mc. 1,00

calce idrata ql. 1

acqua mc. 0,220
pozzolana “ 0,84

Malta da intonaco:

pozzolana “ 1,00
calce idrata ql. 1,10

Malta da stabilitura (colla):

pozzolana vagliata fina mc 1,00
calce idrata ql. 1,40
oppure: fiore di calce idrata ql. 1,20

Approfittando delle qualità leggermente pozzolaniche del coccio, o polvere ottenuta dalla macinazione di laterizi ben cotti (le stesse proprietà hanno anche le ceneri del carbon fossile e di quello vegetale), si possono avere buoni risultati anche dal seguente impasto:

calce dolce in pasta mc 0,300
sabbia “ 0,800
coccio in polvere “ 0,150

Per località lontane dai centri di produzione di buona calce idraulica, e lontane da cave di pozzolana, per lavori andanti si può usare utilmente una malta debolmente idraulica, detta comunemente Malta semidraulica, formata da calce in pasta, sabbia e pozzolana a terzi uguali:

calce dolce in pasta mc 0,42
pozzolana “ 0,42
sabbia viva “ 0,42
acqua e mano d'opera come sopra

[...]

Certamente, alla luce di quanto visto finora, potrebbero fare un po' sorridere quelle tecniche che, alla ricerca degli elevati livelli di qualità raggiunti dal "cemento" degli antichi romani, vedevano proporre soluzioni il cui impiego è oggi confutato dalle conoscenze tecniche.

Ciononostante, è lecito ritenere che le infinite cautele adoperate nella scelta di materiali ad elevata qualità e nella lavorazione delle miscele dovessero certamente consentire la buona riuscita delle ricette e delle modalità di confezionamento proposte, almeno in alcune soluzioni specifiche.

Un'attenta analisi delle ricette viste finora consente di trarre alcune osservazioni circa la varietà delle formulazioni: ad esempio, l'analisi del rapporto legante/aggregato reattivo nelle malte confezionate con grassello di calce e cocciopesto, mostra un valore minimo, pari a 0,33, nell'impasto proposto da Curioni dove 1 parte di calcina comune in pasta, va mescolata con 3 parti di cocchio, ed un valore massimo, pari a 2, nella ricetta proposta dallo stesso Curioni, dove 2 parti di calcina in pasta si compongono con 3 di sabbia ed 1 di cocchio, e parzialmente ripresa da Strada, con la sola diminuzione della frazione sabbiosa.

La stessa analisi può condursi sugli impasti di grassello e pozzolana: in questo caso, il rapporto legante/pozzolana assume un valore minimo, pari a 0,18, nella ricetta proposta da Nicola Cavalieri di San Bertolo, per il confezionamento di malte da impiegare nelle murature di pietrame o pezzi di tufo vulcanico, mentre il valore massimo, pari all'unità, viene assunto nella formulazione proposta da Strada dove 1 parte di calce dolce in pasta si compone con una parte di sabbia ed 1 di pozzolana.

Alla stessa maniera, si possono indagare i rapporti tra la frazione legante e quella aggregata reattiva, nelle miscele con calce idraulica: in questo caso, il valore minimo è assegnato al formulato proposto da Quatremère de Quincy, nella ricetta composta di un volume di calce mezzamente idraulica e 2 di pozzolana. Quello massimo, pari a 9, è, invece, assegnato dal Curioni nel formulato con 0,360 mc di calce idraulica, 1 mc di sabbia e 0,04 mc di pozzolana. Si escludono, ovviamente, i formulati dove le caratteristiche di idraulicità sono esclusivamente dovute al solo utilizzo di calce idraulica.

Riguardo, poi, all'analisi del rapporto legante/aggregato, il valore minimo è assunto sempre dall'impasto proposto da Nicola Cavalieri di San Bertolo, composto con l'85% di pozzolana ed il rimanente 15% con calce, mentre le malte più grasse sono quelle formulate da Cantalupi, per l'esecuzione delle cappe, con due parti di calce e 3 di cocchio, ovvero quelle dette di 4^a specie, con due parti di calce, 1 di sabbia e 2 di cocchio, dove il rapporto legante aggregato assume un valore pari a 0,67. Lo stesso valore è raggiunto dalle malte proposte da Nicola Cavalieri di San Bertolo per l'esecuzione di intonaci, con un impasto composto al 40% di calce, ed al rimanente 60% di pozzolana.

ⁱ Cfr., a questo proposito, ARCOLAO, C., *Le ricette del restauro. Malte intonaci, stucchi dal XV al XIX secolo*, Venezia, Saggi Marsilio, 1998, e FATTA, G., *Usa ed evoluzione dell'intonaco nella storia: materiali e tecniche*, Palermo, Reprint, 1995.

ⁱⁱ Cfr. Vitruvio, *De Architectura*, libro V – Capo XII (b):

[...] dev'essere fabbricata con polvere pozzolana importata da quella regione che si estende da Cuna fino al promontorio di Minerva, mescolata con calce nel rapporto di due a uno. [...]

ⁱⁱⁱ Cfr. Vincenzo Scamozzi, *L'idea della architettura universale*, Parte II, Libro settimo, Capo XVII:

[...] la quale (calcina, nda) riesce ottima ad uso delle malte da muratura; perché avendo molto nervo ella porta tre parti di sabbia di cava, ed una sola di calce; ovvero due parti di quella di Fiume, ò di Mare in caso di bisogno, e aggiungendole la terza parte di vasi, ò tegole peste minutamente fa' presa grandissima nelle mura, e anco nelle infrascature sotto a gli intonachi [...].

^{iv} Cfr. Bernard Belidor, *La Scienza degli Ingegneri*, Libro terzo, Capo V:

[...] i dintorni di Tournay (nelle Fiandre, nda) forniscono una pietra bianca durissima e che dà una calce eccellente. Quando questa pietra è nel forno se ne staccano alcune particelle che cadono su la grata, ove si mescolano colla cenere di carbon fossile; e siccome questa cenere non si compone in fin dei conti che di particelle di carbon fossile calcinato, dalla mistura che se ne fa hassi la cenere di Tournay, che si pone in commercio dai mercanti tal e quale esce dai forni.

Mostrando l'esperienza che la pietra dura fa sempre una buona calce ed una malta eccellente per le opere idrauliche, quando è mista a polvere proveniente dal carbone o dalle scorie di ferro che si cava dalle fucine, come ho detto nel quarto capitolo, non è meraviglia che la cenere di Tournay si presti eminentemente all'uso medesimo, perché partecipa in uno delle qualità di queste due materie, né dubito che le particelle di carbone che trovansi unite alla cenere contribuiscano molto a farle acquistare la proprietà, come vedremo, d'indurirsi nell'acqua. [...]

^v Cfr. Lodovico Bolognini, *Il muratore reggiano*:

[...] si prende una parte di mattone pesto sottilmente, e setacciato, due parti di sabbia fina passata pel vaglio, calcina vecchia, spenta in quantità sufficiente da formare coll'acqua un impasto al modo solito, e in questo mentre sia adacquata per favorire l'estinzione della calce viva, che si metterà polverizzata sino alla quantità del quarto sopra tutta la massa già divisata.

Le materie essendo bene incorporate conviene impiegarle immediatamente, poiché la minima dilazione può rendere l'uso difettoso, o impossibile. [...]

^{vi} Già sommariamente riportata dal Milizia nella prima edizione dei *Principj ...*, e ben descritta da Jean Rondelet nel *Trattato teorico pratico dell'arte di edificare*, del 1817, in accordo con quanto pubblicato dal signor M. Lorient nel 1773.

^{vii} Da intendersi calce viva.

^{viii} Cfr. PONZA DI SAN MARTINO, L., *Istituzioni di architettura civile raccolte e ordinate*, Torino, Presso Giuseppe Pomba e C.^a, 1836, e CLAUDEL, J., LAROQUE, L., *Pratique de l'art de construire. Maçonnerie*, Paris, Carilian-Goeuryet, 1850.

^{ix} Col termine *calce dolce* deve intendersi una calce ricavata da calcari bianchi, ad alto contenuto di carbonati, raccomandata per intonaci, finiture, etc. Ad essa si contrappone la cosiddetta *calce forte*, ottenuta dalla cottura di calcari con contenuto di argilla non superiore al 5-10%, e quindi con deboli proprietà idrauliche. Cfr. PECHIONI et al., *Le malte antiche e moderne ...*, op. cit.

PARTE III



12. LA SPERIMENTAZIONE SULLE MALTE IDRAULICHE NON CEMENTIZIE

Le specificità relative al comportamento delle malte idrauliche non cementizie costituiscono un tema di ricerca poco dibattuto dalla letteratura scientifica, anche con riguardo alle modalità di sperimentazione. Abbiamo già visto che questa tipologia di malte presenti alcune specificità sia in relazione alle modalità di confezionamento, spesso derivanti dall'utilizzo di componenti di per sé non idrauliche, ma in grado di conferire all'impasto le caratteristiche di idraulicità richieste dall'utilizzatore, sia in relazione alle caratteristiche del prodotto finale. Il tema della sperimentazione su questa tipologia di malte è un utile argomento di discussione sulle relative caratteristiche di idraulicità e sulle potenzialità applicative di prodotti particolarmente diffusi nel mercato edilizio; risulta oltremodo utile fornire alcuni dati caratterizzanti i prodotti in questione, sia nella forma premiscelata, presente sul mercato, sia nella forma confezionata secondo le ricette tradizionali. Le esperienze che in questa sede vengono presentate sono state tutte condotte presso il Laboratorio di Edilizia del Dipartimento di Progetto e Costruzione Edilizia dell'Università di Palermo, ed hanno interessato una serie di prodotti premiscelati, o confezionati dallo scrivente



Fig. 12.1. Il Laboratorio di Edilizia del DPCE dell'Università di Palermo ha una sezione dedicata allo studio delle caratteristiche meccaniche delle malte.

all'interno dello stesso laboratorioⁱ. Gli aggregati di natura calcarea provengono dalle cave attive presso il rilievo montuoso della Montagna Grande, nel trapanese, mentre la provenienza di quelli di natura dolomitica è riconducibile alle cave localizzate a monte della frazione di Boccadifalco, sulle colline intorno alla città di Palermo.

In particolare i materiali forniti sono:

- premiscelato 1: impasto di calce idraulica naturale NHL 3,5 ed aggregato calcareo con curva granulometrica continua da 0 a 3 mm, confezionati nel rapporto in volume di 1:3, ed additivati, in percentuale ridotta, con cellulosa e fibre polimeriche utili ad aumentare la ritenzione idrica del prodotto ed a contrastare i fenomeni di ritiro;
- premiscelato 2: impasto costituito da una miscela, in rapporto 1:3, di leganti e laterizio macinato, lavato e disidratato, con curva granulometrica continua da 0 a 1,8 mm. La frazione legante è composta per metà da fiore di calce puro al 99%, mentre l'altra metà è costituita da calce idraulica naturale. Sono presenti cellulosa e fibre polimeriche, in piccole percentuali, utili ad aumentare la ritenzione idrica del prodotto ed a contrastare i fenomeni di ritiro;
- premiscelato 3: impasto costituito da una miscela, in rapporto 1:3, di leganti e pozzolana, con curva granulometrica continua da 0 a 1,8 mm. La frazione legante è composta all'80% da fiore di calce ed al rimanente 20% da calce idraulica naturale. Sono presenti cellulosa e fibre polimeriche utili ad aumentare la ritenzione idrica del prodotto ed a contrastare i fenomeni di ritiro;
- grassello di calce, stagionato per 18 mesi, derivante dalla cottura di calcari ad elevata purezza, identificabile attraverso la sigla EN 459-1 CL 90-Sⁱⁱ;
- calce idraulica naturale, identificabile attraverso la sigla EN 459-1 NHL 3,5ⁱⁱⁱ, con indice di idraulicità pari a 0,49;
- pozzolana grigia con granulometria 0-2 mm, proveniente dalla provincia di Viterbo;
- coccio macinato, lavato e disidratato, con granulometria 0-2 mm, di colore rosso e/o giallo, proveniente dalla frantumazione di vecchi laterizi in argilla, cotti a bassa temperatura;

- sabbia calcarea, con granulometria 0-2 mm, e contenuto di calcare pari al 98,5% proveniente dalle cave site in contrada Domingo, nel trapanese;
- sabbia dolomitica, con granulometria 0-2 mm, proveniente dalle cave a monte della frazione di Boccadifalco a Palermo.

La sperimentazione presenta i risultati delle prove eseguite sulle malte premiscelate, prodotte e commercializzate nel territorio della Sicilia Occidentale, aventi caratteristiche di idraulicità non derivanti dall'impiego di leganti di natura cementizia, e su una serie di impasti formulati in laboratorio secondo alcune tra le 'ricette' di tipo tradizionale, viste nel capitolo precedente. A questi impasti devono aggiungersene altri formulati con miscela di leganti aerei ed idraulici naturali, composti in diverse proporzioni, in accordo con quanto proposto da molte aziende produttrici, che, come già visto nel corso dei capitoli precedenti, sono piuttosto solite aggiungere almeno una piccola percentuale di legante idraulico agli impasti con calce aerea, più spesso idrata, ed aggregati a reattività pozzolanica.

La scelta dei prodotti è stata eseguita in ragione della rappresentatività che gli stessi costituiscono nel mercato, nonché per la specificità di impiego che, soprattutto le sabbie locali, hanno nel bacino della Sicilia Occidentale.

Nel corso della sperimentazione sono state per lo più utilizzate, come vedremo, le norme EN recepite dall'UNI ed aventi validità nel territorio nazionale ed europeo. In relazione proprio all'utilizzo delle norme più comunemente impiegate da parte degli istituti di ricerca, ma anche degli enti di certificazione dei materiali, è via via evidenziata una serie di criticità delle stesse procedure, poco note in letteratura tecnica, ma immediatamente riscontrabili per coloro che si accingono ad eseguire le prove sui materiali, in accordo con le procedure riconosciute dai più diffusi istituti normatori.

Le criticità evidenziate hanno, in qualche caso, un riscontro generale, che può estendersi a tutte le tipologie di malte indagabili con quella determinata procedura. In altri casi, più frequentemente, la criticità è relativa al comportamento specifico delle malte idrauliche non cementizie, certamente dissimile da quello delle malte aeree, ma spesso assai poco confrontabile con quello delle malte cementizie, che presentano sempre, insieme ad altre caratteristiche, una resistenza maggiore.



Fig. 12.2. L’inserimento nella macchina mescolatrice degli aggregati avviene dall’alto, nei primi 15 s di mescolamento. Ciò determina una notevole dispersione di polveri, con una conseguente perdita di materiale.

Le prove eseguite sul prodotto indurito sono quelle di resistenza meccanica a flessione su travetti ed a compressione sui monconi, cui si aggiunge la prova di assorbimento per capillarità. Le prime osservazioni che possono condursi riguardano le modalità di confezionamento e la valutazione della consistenza della malta.

12.1. VALUTAZIONE DELLA CONSISTENZA

In accordo con la norma UNI EN 1015-2:2007 “Metodi di prova per malte per opere murarie – Parte 2: Campionamento globale delle malte e preparazione delle malte di prova”, la preparazione di campioni di malta a partire da costituenti secchi ed acqua, ovvero da miscele pre-dosate e leganti, prevede l’impasto di un quantitativo di materiali compreso tra i 0,5 ed i 2,5 dm³, all’interno di un miscelatore a tazza in acciaio, della capacità di 5 litri, conforme alla descrizione fornita nella norma EN 196-1, relativa alle prove sui cementi^{iv}.

Già questa prima indicazione ci fa comprendere quali possano essere le possibili criticità dettate dalla normativa: nel §3.2, infatti, avevamo accennato alle modalità di lavorazione delle malte formulate con grassello di calce, che per l’elevata untuosità, preferiscono l’impasto con molazza alla miscelazione col sistema a tazza, all’interno del quale risulta necessario aggiungere un quantitativo d’acqua maggiore rispetto

a quello più strettamente indispensabile per la buona riuscita della miscela. Ciononostante, l'elevata praticità di utilizzo, all'interno di un laboratorio, del sistema a tazza, lo rende certamente preferibile rispetto a quello con le mole.

La fase di mescolamento prevede che siano seguite le indicazioni fornite dal produttore; qualora queste non siano disponibili, la norma prevede che si operi nella seguente maniera: aggiungere l'acqua all'interno del miscelatore, quindi i componenti secchi della malta, durante i primi 15 secondi di funzionamento a bassa velocità. Completare il mescolamento per altri 75 secondi, se non diversamente specificato dal produttore.

Per le malte predosate, alle quali occorre aggiungere soltanto il legante, la norma prevede invece che si mescoli nei primi 15 secondi il legante con l'acqua, e che poi si aggiungano le frazioni aggregate, continuando la fase dell'impasto per altri 75 secondi di funzionamento del miscelatore, sempre a bassa velocità.

Queste procedure, perfettamente rispondenti alle caratteristiche dei materiali a base cementizia, o comunque confezionati in polvere, contraddicono le prassi di formulazione degli impasti idraulici di tipo tradizionale, con legante in pasta ed aggregato pozzolanico, per i quali una buona regola dell'impasto consiste nel miscelare per bene il legante con la polvere idraulicizzante, aggiungendo l'acqua indispensabile per l'attivazione dei fenomeni di presa ed indurimento soltanto dopo avere amalgamato bene il tutto.

In effetti, la sperimentazione ha mostrato che l'esecuzione di impasti di tipo tradizionale in laboratorio secondo le indicazioni normative, non conduce ad una buona riuscita della miscela: si osserva, infatti, che una parte del grassello non riesce ad assemblarsi coll'aggregato, rimanendo adesa alle pareti della tazza, a meno che non si aggiunga un leggero eccesso di acqua nell'impasto e non si prolunghino i tempi di mescolamento.

Per questa ragione la procedura di mescolamento, in laboratorio, delle malte con miscelatore a tazza non ha subito modifiche nel confezionamento degli impasti a partire dai componenti secchi premiscelati, mentre è stata lievemente modificata, nel corso della sperimentazione, per gli impasti formulati secondo ricette tradizionali. In particolare si è previsto di inserire nel miscelatore il legante con l'acqua ritenuta ini-

Fig. 12.3. Sequenza operativa delle fasi di preparazione del campione di malta fresca del quale si intende valutare la consistenza.



zialmente sufficiente, avviando così il mescolamento ed inserendo le frazioni aggregate nei primi 15 secondi. Il mescolamento, in accordo con le procedure della norma UNI EN 1015-2:2007, si prosegue per altri 75 secondi; successivamente, grazie ad una valutazione qualitativa della consistenza dell'impasto, si aggiunge, se ritenuto opportuno, dell'acqua nella quantità ritenuta sufficiente a garantire un'adeguata lavorabilità alla malta, e si prosegue il mescolamento nel dispositivo a tazza per ulteriori 90 secondi ripetendo, ove necessario, l'operazione fino al raggiungimento della consistenza desiderata.

Tale operazione, piuttosto discutibile se riferita alla ripetibilità della sperimentazione, è ritenuta indispensabile in relazione alla quantità d'acqua, sempre piuttosto variabile, contenuta nel grassello.

Una modalità di valutazione quantitativa della consistenza è contenuta nella norma UNI EN 1015-3:2007 "Metodi di prova per malte per opere murarie – Parte 3: Determinazione della consistenza della malta fresca (mediante tavola a scosse)": questa prevede che la malta fresca venga introdotta, in due strati assestati con 10 colpi di pestello, all'interno di una forma tronco-conica, posta sopra una tavola rotante



Fig. 12.4. Al termine della prova su tavola a scosse, si ottiene un disco di malta, la cui misura del diametro costituisce il parametro di riferimento della caratteristica indagata.

con superficie vitrea oleata; successivamente, una volta estratta la forma tronco-conica, si procede allo spandimento della malta sulla tavola che, a tale scopo, viene fatta sobbalzare per 15 volte, con una frequenza di una scossa al secondo.

La misura del diametro del disco di malta ottenuto con questa procedura è indice della consistenza della malta, ed è valutata in relazione alla densità della malta fresca, in accordo con i dati posti all'interno della tabella 2 contenuta nella norma UNI EN 1015-2:2007.

Per le malte oggetto della sperimentazione, il diametro di riferimento relativo alla consistenza mediante tavola a scosse è sempre pari a 175 ± 10 mm.

Densità della malta fresca (kg/m^3)	Valore di spandimento (mm)
>1200	175 ± 10
>600 fino a ≤ 1200	160 ± 10
>300 fino a ≤ 600	140 ± 10
≤ 300	120 ± 10

Tab 12.1. Definizione del valore di spandimento dei diversi tipi di malta in relazione alla densità della malta fresca.

ⁱ La fornitura delle malte premiscelate, dei leganti e degli aggregati pozzolanici è stata gentilmente concessa da un'azienda operante nel territorio della Sicilia Occidentale, la S.I.R.GUM s.r.l.

ⁱⁱ In accordo con la norma UNI EN 459-1:2002 "Calci da costruzione – Definizioni, specifiche e criteri di conformità" le calci sono identificabili con una sigla, in accordo con quanto riassunto nello schema seguente:

Designazione	Sigla
Calce calcica 90	CL 90
Calce calcica 80	CL 80
Calce calcica 70	CL 70
Calci dolomitiche 85	DL 85
Calci dolomitiche 80	DL 80
Calce idraulica 2	HL 2
Calce idraulica 3,5	HL 3,5
Calce idraulica 5	HL 5
Calce idraulica naturale 2	NHL 2
Calce idraulica naturale 3,5	NHL 3,5
Calce idraulica naturale 5	NHL 5
a)	Inoltre, le calce aeree sono classificate in base alle loro condizioni di consegna: come calce viva (Q) o calce spenta (S). Nel caso particolare di calci dolomitiche idrate, il grado di idratazione è definito come segue: S1, semi-idrate; S2, completamente idrate.

Le cifre poste al fianco delle calci identificate dalle sigle CL e DL indicano che il contenuto degli ossidi di calcio e magnesio è superiore, in percentuale, alla cifra indicata. Per le calci identificate dalla sigla CL il contenuto di ossido di magnesio è inferiore al 5%. La cifra, invece, posta al fianco delle calci idrauliche, indica il valore limite inferiore della resistenza normalizzata alla compressione della calce, espressa in MPa, dopo 28 giorni dal confezionamento.

ⁱⁱⁱ Cfr. nota precedente.

^{iv} Questo quantitativo, come vedremo, nel caso in cui l'impasto debba servire per il confezionamento di travetti da sottoporre alla prova di flessione e compressione sui monconi, ovvero da sottoporre alle prove di assorbimento per capillarità, deve essere di 1,5 l, o almeno pari a 1,5 volte la quantità di materiale necessario per l'esecuzione della prova.

13. VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELLE RESISTENZE MECCANICHE

La resistenza meccanica di una malta a comportamento idraulico costituisce, grazie ad una consolidata tradizione legata alla formazione tecnico – specialistica degli ingegneri e degli architetti, il parametro più comunemente impiegato nella scelta di un materiale, poiché soprattutto negli impieghi di materiali che abbiano una valenza strutturale, tale parametro assume certamente un ruolo importante.

Pur non essendo, in molti casi, la caratteristica principale cui bisognerebbe riferirsi, anche nella scelta delle malte per intonaco la resistenza meccanica è addirittura utilizzata per la classificazione commerciale di alcuni materiali (si pensi, ad esempio, alle calce idrauliche).

Non avendo, infatti, una relazione immediatamente diretta con le altre caratteristiche, la resistenza meccanica, con particolare riferimento alla compressione, si pone spesso come parametro fondamentale, cui appoggiarsi anche per la valutazione delle altre proprietà: abbiamo, al proposito, visto nel corso dei capitoli precedenti che le malte con resistenze meccaniche elevate presentano spesso anche una rigidità elevata, una ridotta plasticità, una bassa permeabilità all'acqua ed al vapore, insieme ad altre caratteristiche.

Proprio il riferimento ai materiali cementizi costituisce la base conoscitiva in relazione alla quale sono state sviluppate le procedure normative. Questo aspetto comporta, nella definizione delle modalità di prova, alcune criticità simili negli aspetti generali, con quanto già visto in relazione alle norme sul confezionamento degli impasti.

L'analisi delle criticità delle procedure di sperimentazione delle resistenze meccaniche per malte è un aspetto parzialmente già indagato nella letteratura tecnica: il problema più evidente riguarda i tempi di maturazione degli impasti che, in analogia con quanto richiesto per i cementi, si stimano in 28 giorni. Sappiamo bene, però, che questi tempi così ristretti, che nel caso delle applicazioni cementizie derivano dalla necessità di raggiungere piuttosto rapidamente una resistenza meccanica tale da garantire la prosecuzione dei lavoriⁱ, non possono trovare un'adeguata corrispondenza nelle malte idrauliche non cementizie, né, tantomeno, nelle malte aeree.

Fig. 13.1. Il confezionamento dei provini avviene secondo le procedure previste dalla EN 1015-11, con la sola modifica dei tempi di maturazione all'interno dello stampo, che vengono elevati da due a cinque giorni.



La norma che in Italia regola le procedure di valutazione delle resistenze meccaniche sulle malte è la UNI EN 1015-11:2007 “Metodi di prova per malte per opere murarie – Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione ed a compressione della malta indurita”.

Questa prevede che il confezionamento dell’impasto venga realizzato, in accordo con la discussa norma UNI EN 1015-2, nella quantità minima di 1,5 litri o, comunque, di 1,5 volte la quantità di prodotto ritenuta necessaria per l’esecuzione della prova, e che venga determinata la consistenza della malta, in accordo con quanto già visto nella norma UNI EN 1015-3.

Le prove vanno eseguite su prismi di malta aventi le dimensioni di 160x40x40 mm: si distinguono due modalità di confezionamento, a seconda del legante impiegato per la preparazione della miscela. Se la malta presenta caratteristiche di idraulicità, con legante eventualmente misto calce aerea/cemento, con la quantità di calce aerea non eccedente il 50% della massa totale di legante, la norma prevede una modalità di preparazione dei provini; diversamente si opera nel caso in cui la malta abbia più spiccate caratteristiche aeree, con una quantità di cemento non eccedente il 50% della massa totale del legante.

Nel primo caso si riempie lo stampo con due strati di malta, ciascuno dei quali viene assestato con 25 colpi di pestelloⁱⁱ, eliminando successivamente l’eccesso di malta, e lasciando piana la superficie superiore del provino. Nel caso in cui la malta abbia un comportamento prevalentemente aereo, alla base dello stampo si pongono, su una lastra di vetro, due strati di garza di cotone bianco e si procede al riempimento ed all’assestamento della malta come anzidetto; successivamente si copre lo stampo con altri due strati di garza e con sei fogli di carta da

filtro assorbente, sui quali va disposta una seconda lastra di vetro. Lo stampo va quindi capovolto, si solleva la lastra superiore e si interpongono altri sei strati di carta da filtro. Successivamente si capovolge di nuovo lo stampo e si pongono i campioni a stagionare, sotto un carico di circa 5 kg, tra le due lastre, i fogli di carta assorbente e la garza.

Il carico, la carta da filtro e la garza vanno quindi rimossi dopo circa tre ore, ovviamente ponendo grande attenzione nei capovolgimenti dello stampo.

La conservazione dei provini per le fasi di stagionatura va effettuata ad una temperatura di $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, ed a condizioni di umidità relativa del $95\% \pm 5\%$ (od all'interno di un sacchetto di polietilene) per 7 giorni, mentre per i rimanenti 21 giorni l'umidità relativa va mantenuta al $65\% \pm 5\%$.

I provini, secondo la procedura EN 1015-11, vanno mantenuti nello stampo per 5 giorni, qualora siano confezionati con malte aeree, o con contenuto di cemento non eccedente il 50% del legante, mentre, se le malte sono confezionate con leganti idraulici diversi dal cemento, ritardate o con contenuto di calce aerea non eccedente il 50% del legante, la rimozione dallo stampo avviene dopo due giorni.

Questa procedura di confezionamento e di maturazione del provino si mostra particolarmente articolata ed operativamente complessa; inoltre non fornisce alcuna indicazione in merito alle malte le cui caratteristiche di idraulicità derivano esclusivamente dall'utilizzo di aggregati a reattività pozzolanica.

In ragione di questa considerazione, nel corso della sperimentazione si è preferito adottare, in qualunque caso, le modalità di confezionamento e maturazione relative alle malte idrauliche, o con contenuto di calce aerea non eccedente il 50% del legante. Questa scelta avrebbe però comportato la rimozione dei provini dallo stampo dopo due soli giorni dall'impasto: alcune prove su campioni di sacrificio hanno mostrato che, in più casi, dopo due giorni la malta non ha ancora raggiunto un indurimento tale da consentire la movimentazione dei campioni, per cui si è scelto di procedere alla rimozione dagli stampi dopo cinque giorni, in accordo con le procedure relative alle malte aeree.

Concordemente con quanto indicato dalla norma EN 1015-11, le prove sono state effettuate dopo 28 giorni dal confezionamento.

Le criticità relative alle modalità di confezionamento e stagionatura dei provini, in parte rilevate precedentemente, sono state anche oggetto di osservazioni da parte di Velosa et al. (2002): questi hanno evidenziato le difficoltà di manovra degli stampi nel caso in cui debbano confezionarsi malte di tipo aereo, e le difficoltà di indurimento nelle condizioni espresse dalla norma EN 1015-11.

Gli stessi autori, proprio in riferimento alle applicazioni su malte confezionate con calce aerea ed aggregati pozzolanici, hanno proposto alcune modifiche alle suddette procedure, distinguendo tre diverse condizioni di stagionatura dei provini:

- condizione 1 – stagionatura a $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ed umidità relativa del $50\% \pm 5\%$, all'interno dello stampo per 7 giorni;
- condizione 2 – stagionatura a $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ed umidità relativa del $50\% \pm 5\%$, con un foglio di carta da filtro sui due lati dello stampo per 7 giorni;
- condizione 3 – stagionatura a $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ed umidità relativa del $50\% \pm 5\%$, con trattamento giornaliero di vaporizzazione di 20 cc d'acqua, dalla data di rimozione dallo stampo a quella di prova.

La terza condizione, nell'intenzione degli autori, intende approssimare le situazioni reali in cui l'elevata umidità relativa notturna prevale nel corso dell'anno. Come sottolineato dagli stessi, però, la vaporizzazione dell'acqua determina un'alterazione della superficie esposta.

In ogni caso, è stato osservato che le caratteristiche meccaniche dei provini stagionati con ciascuna delle precedenti condizioni risultano leggermente superiori rispetto a quelle dei provini stagionati in accordo con le procedure EN 1015-11.

Riguardo ai tempi di maturazione, molti contributi presenti in letteratura tecnicaⁱⁱⁱ suggeriscono che le prove vengano eseguite non dopo 28 giorni dal confezionamento, bensì, ad esempio, a 90 giorni, ed anche oltre, ossia quando l'indurimento maggiore avrà determinato una resistenza meccanica più simile a quella che la malta riuscirà a raggiungere una volta terminati definitivamente i fenomeni di presa ed indurimento che, come già visto, possono avere una durata pari anche ad alcuni anni.

13.1. RESISTENZE A FLESSIONE SU TRAVETTI

La prova di resistenza a flessione sui travetti confezionati e lasciati stagionare per 28 giorni, secondo le procedure anzidette, è in grado di restituire, per ciascun campione di malta, un valore caratteristico che, messo al confronto con quello di altri formulati, consente al tecnico o, più in generale, a colui che dovrà operare con quella malta, quali possano essere le caratteristiche di resistenza della miscela a fenomeni di trazione. Le rotture per trazione possono essere dovute, nelle applicazioni ad intonaco, ad esempio, ad una sovratensione nella muratura, con formazione di fessurazioni, ovvero ad una differenza fra le dilatazioni termiche della muratura e dell'intonaco, oppure ancora alla cristallizzazione dei sali, per aumento del volume dei cristalli all'interno dei pori, etc.

La prova è effettuata tramite un'apposita apparecchiatura, conforme alle caratteristiche specificate dalla norma, ed in grado di applicare sensibilmente un carico verticale, attraverso lo spostamento di un pistone oleodinamico, con lettura istantanea della pressione dell'olio.



Fig. 13.2. Per effettuare la prova di rottura a flessione si utilizza un dispositivo da inserire nella pressa ed in grado di applicare lo schema di carico previsto dalla norma.

Lo schema di carico, riportato nella figura X, prevede che il travetto venga simmetricamente appoggiato su due cilindri, di diametro e lunghezza fissati, distanti tra loro 10 cm, mentre il carico è applicato da un cilindro superiore delle stesse dimensioni di quelli precedenti, posto sul piano assiale dello schema simmetrico di carico.

La strumentazione, in accordo con la norma EN 1015-11, deve rispondere a determinati e piuttosto ristretti criteri di tolleranza nella restituzione dei carichi.

La velocità con cui il carico va applicato deve essere compresa tra 10 N/s e 50 N/s^{iv}, mentre la rottura deve avvenire tra i 30 s ed i 90 s. Chiaramente, per le malte a bassa resistenza, la velocità del carico deve essere piuttosto bassa, per consentire la rottura nei periodi indicati. Quindi si procede alla registrazione del carico ed al calcolo della resistenza meccanica f , espressa in N/mm², ossia della tensione normale massima ottenibile, secondo le regole della scienza delle costruzioni, mediante la formula:

$$f = 1,5 \frac{Fl}{bd^2}$$

dove F è il massimo carico applicato al provino, espresso in Newton (N), mentre l , b e d sono, rispettivamente, la distanza tra gli assi di appoggio, la larghezza e l'altezza del provino, espressi in millimetri (mm).

Essendo le grandezze l , b e d sempre fisse e pari, rispettivamente a 100, 40 e 40, la macchina impiegata nel corso della sperimentazione è in grado di restituire automaticamente la resistenza meccanica a flessione.

È interessante osservare che la strumentazione impiegata nel corso della sperimentazione, costituita da una pressa Controls, modello Autotomax 5 da 250 kN, provvista di apposito accessorio per l'esecuzione delle prove di resistenza a flessione sui travetti, richieda, per un corretto funzionamento, l'inserimento di un ulteriore parametro all'interno della macchina, detto "sensibilità".

Ricordando che nel diagramma tensioni/deformazioni di un materiale, una volta raggiunta la rottura si determina, per ulteriori deformazioni, un decremento dello stato tensionale all'interno dello stesso, la sensibilità può definirsi quel determinato valore del decremento di carico

successivo alla rottura del materiale, superato il quale la procedura di carico si arresta.

La corretta impostazione di questo parametro consente alla macchina di arrestarsi automaticamente nel momento in cui avviene la rottura, e di restituire quindi correttamente il massimo valore raggiunto dal carico, e quindi la tensione di rottura.

Per le prove di resistenza a flessione eseguite nel corso della sperimentazione, la sensibilità è stata impostata al più piccolo valore inseparabile nella strumentazione, pari 0,01 kN, anche in ragione della scarsa resistenza delle malte indagate.

L'analisi dei risultati di prova, riportati in figura 13.5, ci informa che la resistenza meccanica a flessione assume valori molto vari da un campione all'altro, senza mostrare apparentemente alcuna particolare tendenza in relazione alle caratteristiche di formulazione della malta. Possiamo però osservare che, a parte qualche caso anomalo, la resistenza flessione media dei campioni esaminati è pari a circa 0,20 MPa.

13.2. RESISTENZE A COMPRESSIONE SU MONCONI

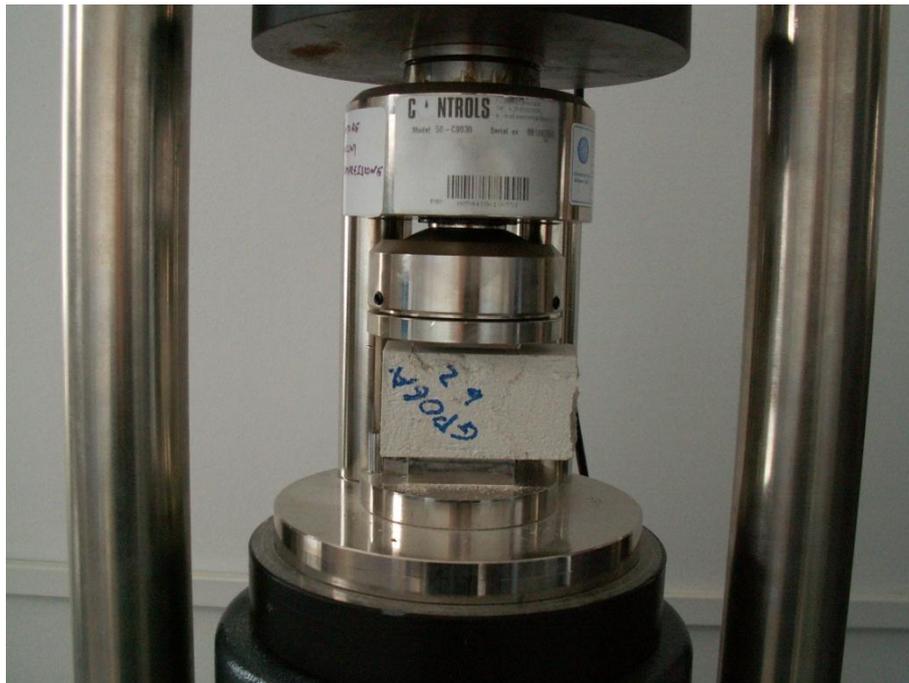
Una volta portati a rottura per flessione i travetti di malta, si procede con la prova per la valutazione della resistenza meccanica a compressione sui monconi.

La strumentazione impiegata è identica a quella vista precedentemente, soltanto che, per l'esecuzione delle prove di resistenza a compressione occorre cambiare l'accessorio che andrà inserito nella pressa.

La norma fornisce indicazioni molto precise sulle modalità di posizionamento dei campioni all'interno della pressa, sulle caratteristiche dei materiali a contatto con i campioni, etc. Queste problematiche, però, interessano poco l'utente finale in quanto, in generale, le aziende produttrici di macchine per laboratori provvedono sempre ad aggiornare i propri prodotti con le nuove disposizioni normative.

L'unica attenzione richiesta all'utente consiste nel porre cura che il campione venga disposto nella strumentazione in modo che tra le piastre di carico ed il campione sia perfettamente inscrivibile un cubo di lato pari a 40 mm.

Fig. 13.3. Anche la prova di rottura a compressione necessita di un apposito dispositivo che andrà inserito all'interno della pressa, per applicare lo schema di carico richiesto dalla EN 1015-11.



Il carico va applicato con una velocità compresa tra i 50 N/s ed i 500 N/s, in modo che la rottura avvenga sempre in un periodo compreso tra i 30 ed i 90 secondi^v: nel corso della sperimentazione è stata sempre adottata la velocità di carico minore.

La tensione di rottura è semplicemente calcolabile dividendo il carico massimo applicato sul provino, corrispondente alla rottura dello stesso, per l'area della sezione piana del cubo anzidetto.

Nella prova di resistenza a compressione, la sensibilità della strumentazione assume un ruolo importante: un valore di sensibilità eccessivamente ridotto potrebbe infatti arrestare la prova pur non avendo portato il provino a rottura^{vi}. Viceversa, un valore troppo elevato di questo parametro non consente alla macchina di arrestarsi automaticamente, poiché l'elevata plasticità della malta e l'attrito tra i frammenti determinano una resistenza residua che, se la procedura di carico dovesse continuare ancora per qualche secondo dopo la rottura, porterebbe ad un incremento del carico massimo applicato, con una conseguente erronea sovrastima della resistenza a compressione.

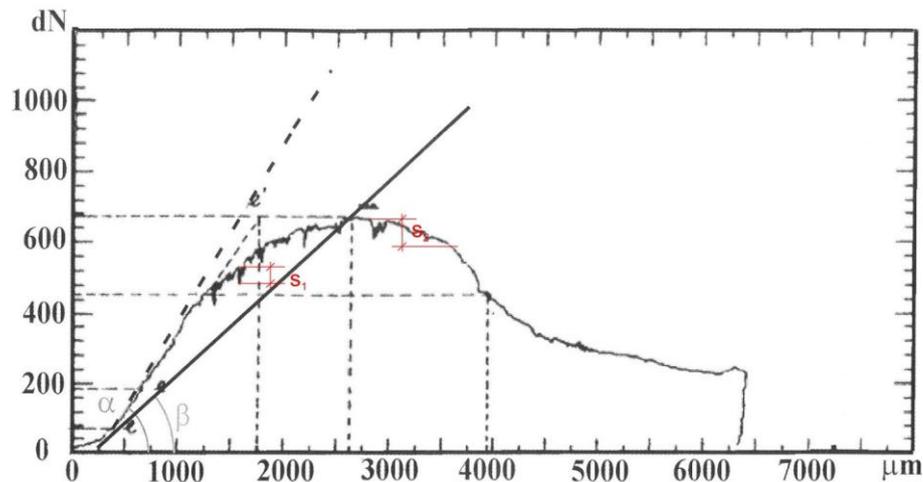


Fig. 13.4. Il diagramma sforzi-deformazione aiuta a comprendere che un valore di sensibilità ridotto (quale è in figura il valore s_1) determinerebbe un'interruzione della prova prima del raggiungimento della rottura. Sui diagrammi potrebbe inoltre essere determinato il modulo elastico di Young secante e/o tangente. La strumentazione impiegata nella nostra sperimentazione non consente di determinare la lettura dei moduli di elasticità, che potrebbero costituire un utile parametro caratterizzante della malta.

L'esecuzione di prove su campioni di sacrificio ha portato a stimare che un valore della sensibilità pari a $0,1 \div 0,2$ kN risulta compatibile con le caratteristiche delle malte in esame. Si comprende che, qualora si dovessero indagare malte a resistenze maggiori, questo parametro andrebbe necessariamente aumentato.

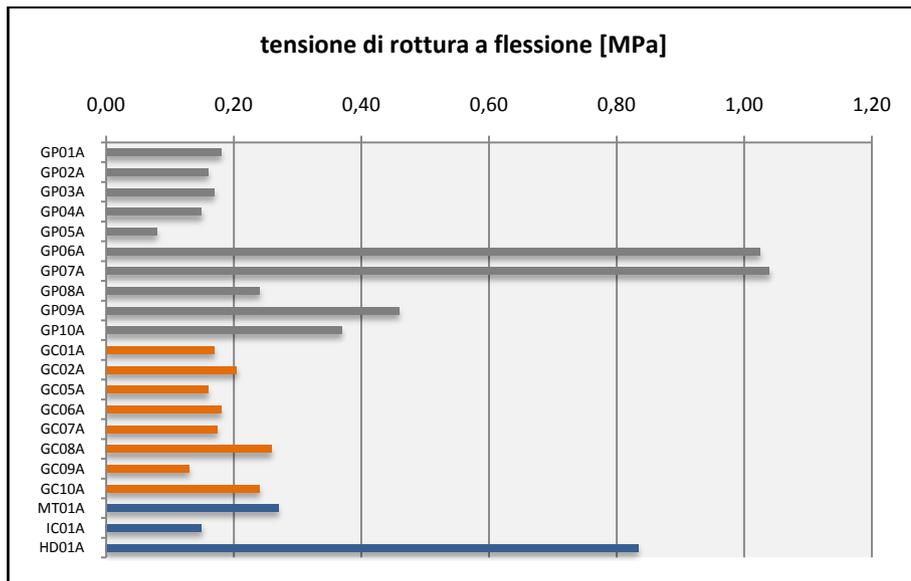
Lo studio dei risultati di prova conferma, ad esempio, che le malte con caratteristiche di idraulicità più spiccate, dovute alla presenza di una percentuale di calce idraulica nella frazione legante, manifestano una maggiore resistenza meccanica a compressione.

Si osserva, inoltre, che i campioni che manifestano una più elevata resistenza meccanica a compressione sono, mediamente, quelli confezionati con pozzolana ed una frazione di calce idraulica nella miscela.

Similmente, tra i materiali premiscelati, si osserva che il campione di malta confezionato anch'esso con pozzolana ed una miscela di leganti costituita da fiore di calce aerea e calce idraulica manifesta spiccate caratteristiche di resistenza meccanica a compressione.

Da un confronto con le caratteristiche di resistenza meccanica con malte analoghe, riscontrate in letteratura, possiamo osservare inoltre che i valori più simili di resistenza si hanno nei campioni ad idraulicità più spiccata per la presenza di calce idraulica. Ciò potrebbe portarci a dire che la pozzolana impiegata, le cui caratteristiche di idraulicità non erano state rese note dal distributore, potrebbe essere di minore qualità rispetto a quella utilizzata nelle sperimentazioni di confronto^{vii}.

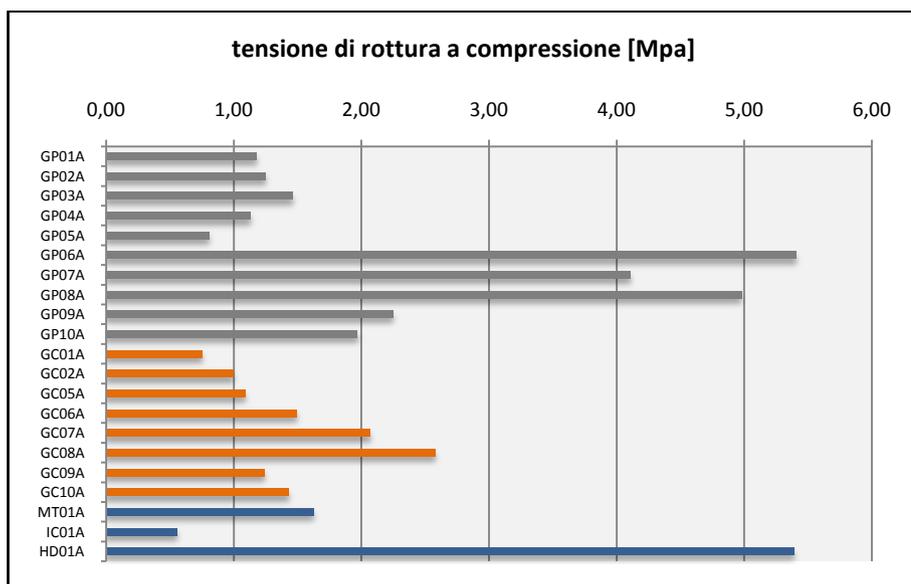
id campione	malta premiscelata	grassello di calce	calce idraulica	pozzolana	cocciopesto	sabbia calcarea	sabbia dolomitica	tensione di rottura a flessione [MPa]	tensione di rottura a compressione [MPa]
GP01A			●	● ●				0,18	1,18
GP02A			●	● ● ●				0,16	1,25
GP03A			●	● ● ●				0,17	1,46
GP04A			●	● ● ● ●				0,15	1,14
GP05A			●	●		●		0,08	0,81
GP06A			●	● ● ●				1,03	5,41
GP07A			●	● ● ●				1,04	4,11
GP08A			●	● ● ●				0,24	4,98
GP09A			●	●			●	0,46	2,25
GP10A			●	●		●		0,37	1,97
GC01A			●		● ● ●			0,17	0,75
GC02A			● ●		● ● ●			0,21	1,00
GC05A			●		● ● ●			0,16	1,09
GC06A			●		● ● ●			0,18	1,50
GC07A			●		● ● ●			0,18	2,07
GC08A			●		● ● ●			0,26	2,58
GC09A			●		●	●		0,13	1,24
GC10A			●		●		●	0,24	1,43
MT01A	●	premiscelato 1 a base di calce idraulica naturale ed aggregato calcareo, confezionati nel rapporto in volume di 1:3						0,27	1,63
IC01A	●	premiscelato 2 a base di fiore di calce, calce idraulica naturale e cocciopesto, nel rapporto in volume legante/aggregato pari a 1:3						0,15	0,56
HD01A	●	premiscelato 3 a base di fiore di calce, calce idraulica naturale e pozzolana, nel rapporto in volume legante/aggregato pari a 1:3						0,84	5,39



Tab. 13.1. (a fronte) La tabella mostra la formulazione dei campioni esaminati nelle prove di verifica della resistenza meccanica a flessione ed a compressione, riportando le proporzioni in volume tra i componenti ed valori di resistenza relativi.

Fig. 13.5. Diagramma relativo alle caratteristiche di resistenza meccanica a flessione dei campioni indagati.

Fig. 13.6. Diagramma relativo alle caratteristiche di resistenza meccanica a compressione dei campioni indagati.



ⁱ Ci si riferisce, a tal proposito, alle operazioni di rimozione delle casseforme nei sistemi strutturali in conglomerato cementizio armato.

ⁱⁱ Il pestello è costituito da una bacchetta rigida di materiale non assorbente a sezione quadrata, di larghezza pari a 12 ± 1 mm. Nel corso della sperimentazione, si è, però, preferito adottare l'asestatore a scosse conforme alla norma EN 196-1.

ⁱⁱⁱ Cfr., fra i tanti contributi, GHRICI, M., KENAI, S., SAID-MANSOUR, M., *Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements*, «Cement & Concrete Composites», n. 29, 2007, od anche LANAS, J., PÉREZ BERNAL, J.L., BELLO, M. A., ALVAREZ GALINDO, J.I., *Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars*, «Cement And Concrete Research», 2004, n. 34.

^{iv} È piuttosto significativo segnalare che la revisione della norma EN 1015-11 operata nel 2007, rispetto a quella del 2001, abbia lasciato invariato l'intervallo di tempo nel quale si prevede che avvenga la rottura, pur riducendo la velocità di carico della prova, da un intervallo di valori compreso tra 50 e 100 N/s, all'intervallo tra 10 e 50 N/s, proprio per consentire una migliore stima delle resistenze meccaniche anche per le malte a bassa resistenza.

^v In questo caso, la revisione della norma del 2007 non ha comportato modifiche alle velocità di applicazioni del carico, come già visto nella nota precedente.

^{vi} Un calo di tensione minimo, dovuto, ad esempio, ad una rottura molto localizzata, potrebbe infatti determinare l'arresto della prova, pur non manifestandosi nel campione alcun segno di rottura.

^{vii} Si vedano, ad esempio, le sperimentazioni condotte da Sala nelle attività di ricerca svolte presso l'Università degli Studi di Trento. Cfr. SALA, E., *Duttilità e confinamento delle murature storiche e caratterizzazione di malte pozzolaniche riportate nella trattatistica d'architettura (I sec. a.C. – 1864)*, Tesi di Dottorato in Ingegneria delle strutture, Modellazione, Conservazione e Controllo dei Materiali e delle Strutture, Università degli studi di Trento, relatori proff. Giuriani, E., Giustina, I., XX ciclo, 2005 - 2007

14. VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELLE CARATTERISTICHE DI ASSORBIMENTO CAPILLARE

Già nel § 2.2.1. abbiamo visto quanto possano essere significative le prove di assorbimento capillare per le dirette corrispondenze che possiamo instaurare con le applicazioni reali, sebbene queste ultime presentino sempre un'elevata variabilità, in ragione delle poco prevedibili condizioni di esposizione ambientale, e quindi una scarsa relazione con le controllate e rigide condizioni di assorbimento riprodotte in laboratorio.

L'assorbimento per capillarità delle malte è una caratteristica indagabile con diverse procedure, che si differenziano soprattutto per l'origine del campione: se infatti il campione proviene da un manufatto esistente, la procedura che andrà adottata è diversa da quella relativa ai campioni di malta confezionati in laboratorio. Inoltre, se il materiale da indagare è impiegato nel settore dei Beni Culturali, l'assorbimento per capillarità deve essere valutato secondo le norme appositamente definite.

Le normative approvate dall'UNI per la valutazione dell'assorbimento dell'acqua per capillarità sono molteplici: la prima, proposta dalla commissione Beni Culturali, è la UNI 10859:2000 "Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Determinazione dell'assorbimento d'acqua per capillarità", che costituisce una revisione della vecchia raccomandazione Nor.Ma.L. 11/85; la seconda, la UNI EN 15801:2001 "Conservazione dei beni culturali – Metodi di prova – Determinazione dell'assorbimento dell'acqua per capillarità",

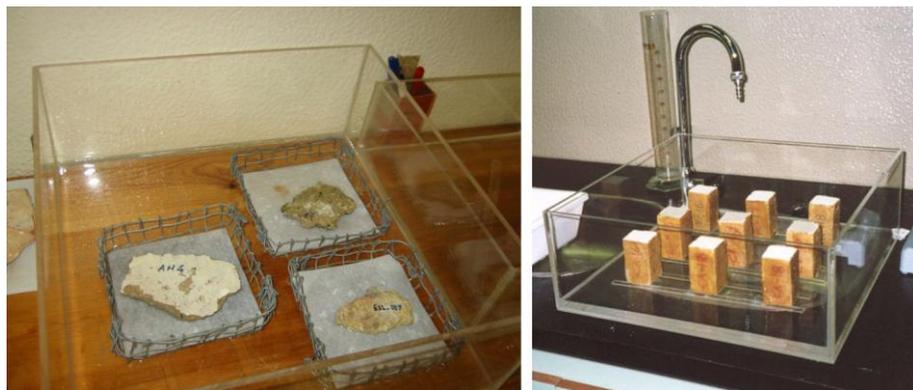


Fig. 14.1. La sperimentazione sui materiali lapidei proposta dalle norme UNI 10859:2000 e UNI 15801:2001, tra loro piuttosto simili, prevede procedure molto differenti da quella specifica per le malte.

assume un carattere più generale, rivolto a tutti i materiali inorganici porosi utilizzabili nel settore dei beni culturali o costituenti gli stessi, e recepisce, invece, la norma europea proposta dal comitato tecnico CEN/TC 346 – Conservation of cultural property.

Con specifico riguardo, infine, alle malte, vi è la norma UNI EN 1015-18:2004 “Metodi di prova per malte per opere murarie - Determinazione del coefficiente di assorbimento d’acqua per capillarità della malta indurita”, che è stata utilizzata nel corso della nostra sperimentazione, per l’approccio specifico al tema delle malte utilizzabili in qualunque settore.

La norma suddetta prevede che il confezionamento della malta avvenga alla stessa maniera di quanto abbiamo precedentemente visto nel caso della valutazione delle caratteristiche di resistenza meccanica, ossia tramite preparazione dell’impasto nella quantità opportunamente richiesta e registrazione del valore della consistenza, sempre in accordo con le procedure definite dalla EN 1015-3.

I provini prismatici di dimensioni 160x40x40 mm vanno confezionati secondo quanto già visto nella discussione della norma EN 1015-11 e lasciati stagionare sempre in accordo con le suddette procedure; le operazioni di preparazione e maturazione dei provini riportano una sola differenza rispetto a quanto prescritto dalla norma relativa alla valutazione delle caratteristiche di resistenza meccanica a flessione ed a compressione, che consiste nella disposizione, in qualunque caso, di un foglio di carta da filtro sul fondo dello stampo metallico e sulla superficie di malta, al fine di eliminare l’acqua in eccesso.

Ritenendo, però, opportuno procedere sempre al confezionamento dei provini prismatici secondo le stesse procedure, al fine di valutare le diverse caratteristiche su materiali che, si presuppone, siano stati confezionati identicamente, si è ritenuto opportuno di non adottare questa soluzione e di attenersi con quanto già detto nel corso del §13.

Al termine del periodo di maturazione, ossia dopo i 28 giorni dal confezionamento, i provini prismatici vanno sigillati sulle quattro facce lunghe e quindi rotti a metà.



Fig. 14.2. Il sigillante impiegato deve avere una consistenza pastosa per evitare che venga assorbito dal provino. La sua elevata elasticità richiede che, prima di dividere il campione in due parti, si provveda ad incidere la superficie del sigillante, in modo da indirizzare la relativa rottura e non determinare distacchi tra la malta ed il rivestimento laterale.

Queste operazioni risultano scarsamente definite dalla norma: infatti l'unica prescrizione aggiuntiva a quanto detto precedentemente consiste nella definizione di alcune caratteristiche del materiale sigillante, che, per esempio, può essere una paraffina od una resina sintetica reattiva, con punto di fusione maggiore di 60°C.

Nessuna specifica viene indicata, ad esempio, sulla consistenza del materiale sigillante (che può essere solido, liquido od in pasta) e sulle modalità di applicazione. L'applicazione di sigillanti in forma liquida, ottenuti, ad esempio, per fusione della paraffina solida a temperature maggiori di 60°C o con solventi volatili, determina un assorbimento del sigillante da parte della malta. Ciò comporta una notevole variazione della proprietà di assorbimento della malta, quantomeno in prossimità delle facce lunghe dei provini.

Inoltre il materiale impiegato può raggiungere, una volta solidificato, una rigidità tale da rendere difficoltose le operazioni di rottura dei solidi prismatici, determinando anche distacchi dello stesso sigillante dal provino, se non addirittura rotture all'interno dello stesso per un effetto di consolidamento delle superfici.

Le prove effettuate su campioni di sacrificio hanno portato ad una migliore identificazione del materiale sigillante compatibile con le caratteristiche richieste dalla norma e di semplice utilizzazione: la consistenza fluida è certamente una caratteristica di pregio, perché rende piuttosto agevole l'applicazione, che può essere effettuata tramite una spatola. L'elevata viscosità, invece, riducendo l'assorbimento da parte della malta, sminuisce lo sgradito effetto di consolidamento superficiale della stessa.

In virtù di queste considerazioni, il sigillante impiegato nel corso della sperimentazione è una resina acrilica spatolabile, solubile in acqua, con punto di fusione pari a 70°C e tempo di lavorabilità di circa un'ora. Si osserva inoltre che il materiale impiegato presenta un'elasticità compatibile con le caratteristiche della malta.

Un'ulteriore criticità va rilevata nei confronti delle modalità di rottura: è infatti opportuno che questa avvenga in maniera non casuale, poiché se la malta ed il sigillante dovessero rompersi in punti anche scarsamente distanti tra loro, potrebbero esserci porzioni di superfici laterali non sigillate, od anche provini inutilizzabili. Nel corso della sperimentazione si è preferito quindi procedere alla rottura del provino per incisione delle quattro facce ed inserimento forzato di un cuneo, in modo che la formazione delle fessurazioni venga guidata, senza, al contempo, ottenere distacchi tra i due materiali.

Una volta effettuata la rottura, i provini, ripuliti dalle polveri e dalle frazioni incoerenti presenti sulle superfici di rottura, vengono essiccati in una stufa ventilata alla temperatura di $60 \pm 5^\circ\text{C}$, fino a raggiungere una massa costanteⁱ.

La norma prevede quindi che, solo per le malte da restauro, venga registrata la massa secca di ciascun provino: questo dato, nel corso della nostra sperimentazione, è stato registrato per tutti i provini.

A questo punto può rilevarsi una ulteriore criticità: il mancato completamento dei processi di indurimento per formazione dei silicati e degli alluminati idrati, ovvero per carbonatazione dell'idrossido di calcio, determina ad appena 28 giorni dal confezionamento della malta un'elevata presenza d'acqua nel provino, specialmente in quelli confezionati con grassello ben stagionato dove, come abbiamo visto in precedenza, il contenuto d'acqua viene rilasciato molto lentamente. L'essiccazione dei provini pertanto arresta la prosecuzione dei



Fig. 14.3. L'essiccazione dei provini, da eseguire prima dell'immersione, tende ad eliminare tutto il contenuto d'acqua all'interno dei campioni, arrestando i fenomeni di indurimento che, dopo 28 giorni dal confezionamento, certamente sono ancora presenti negli stessi.

fenomeni di indurimento, per cui, come visto nel caso in cui abbiamo valutato le caratteristiche di resistenza meccanica, l'indice di assorbimento che andremo a misurare potrà essere anche notevolmente differente da quello che la malta avrebbe se le fosse consentito di portare a termine i processi di indurimento, o quantomeno di raggiungere un grado di maturazione piuttosto simile a quello finale.

Inoltre, una volta giunti a contatto con l'acqua, i cristalli di portlandite (idrossido di calcio) presenti nell'impasto ed entrati nuovamente in soluzione riprendono a reagire con l'anidride carbonicaⁱⁱ, determinando una variazione nella struttura chimica del provino, con una conseguente modifica della massa che, seppure risulti piuttosto contenuta nei tempi della prova, potrebbe influire nella stima degli indici di assorbimento.

Si stima che una più corretta valutazione delle caratteristiche di assorbimento capillare potrebbe effettuarsi a 90 giorni dal confezionamento, come proposto dalla letteratura tecnica negli esempi relativi alla valutazione delle resistenze meccaniche.

Una volta essiccati, i provini vengono disposti in una bacinella con le facce spezzate dei prismi rivolte verso il basso, tenute a distanza dalla base del recipiente attraverso un supporto costituito, ad esempio, da una rete a fili sottili, ed immersi in acqua ad una profondità compresa tra i 5 ed i 10 mm.

Una particolare cura va posta nell'immersione del provino, che avviene ad assetto inclinato, poiché le superfici spezzate potrebbero avere una ruvidità tale da determinare un intrappolamento di bolle d'aria.

Si attiva quindi il cronometro, coprendo la bacinella per evitare l'evaporazione dai provini bagnati e ponendo cura che il livello dell'acqua si mantenga costante per tutta la prova.

A questo punto la norma EN 1015:18 fa una differenza tra malte da impiegare nei cantieri di restauro e malte diverse da queste: per le seconde, la procedura prevede che i provini vengano rimossi dalla bacinella dopo 10 minuti, rapidamente asciugati sulla superficie bagnata con un panno umido, quindi pesati e ricollocati nella bacinella, per ripetere poi lo stesso procedimento a 90 minuti dall'immersione.

Per le malte da restauro la norma prescrive, invece, che i provini vadano rimossi dalla bacinella dopo 24 ore e pesati, quindi divisi nel senso della lunghezza per misurare la profondità di penetrazione dell'acqua al centro del provino, con accuratezza di 1 mm.

Questa particolare procedura risulta indispensabile per attribuire alla malta la definizione di malta da risanamento (R)ⁱⁱⁱ, conformemente a quanto prescritto dalla norma UNI EN 998-1:2004 "Specifiche per malte per opere murarie – Malte per intonaci interni ed esterni", dove la penetrazione dell'acqua dopo la prova di assorbimento d'acqua per capillarità deve essere ≤ 5 mm.

A questo punto il coefficiente di assorbimento può essere definito secondo due differenti formule, delle quali la prima viene impiegata per le malte diverse da quelle per restauro, mentre la seconda è impiegata esclusivamente per le malte da restauro.

$$C = 0,1 (M_2 - M_1) [kg/(m^2 \cdot min^{0,5})]$$

dove M_2 è la massa del provino a 90 minuti dall'immersione ed M_1 è la massa del provino a 10 minuti dall'immersione.

$$C = 0,625 (M_3 - M_0) [kg/m^2]$$

dove M_3 è la massa del provino a 24 ore dall'immersione ed M_0 è la massa essiccata del provino.

Tutte le masse sono espresse in grammi.

Nella nostra sperimentazione si è avuta cura di determinare la massa del provino in tutti i momenti richiesti dalla norma, per cui i coefficienti di assorbimento sono stati registrati secondo le due formule in ogni caso.

id campione	massa d'acqua assorbita dopo 10 min [g]	massa d'acqua assorbita dopo 90 min [g]	massa d'acqua assorbita dopo 24 ore [g]	coefficiente di assorbimento [kg/(m ² min ^{0,5})]	coefficiente di assorbimento [kg/m ²]
GP01A	42,11	45,71	47,41	0,35	29,60
GP02A	20,62	46,55	47,62	2,60	29,75
GP03A	22,57	48,17	49,51	2,55	30,90
GP04A	26,16	48,33	49,32	2,25	30,85
GP05A	20,20	45,22	46,69	2,50	29,20
GP06A	8,36	19,47	45,36	1,10	28,35
GP07A	7,74	18,07	45,16	1,00	28,25
GP08A	14,74	31,61	50,03	1,70	31,25
GP09A	20,87	44,72	46,63	2,39	29,14
GP10A	22,35	42,25	44,84	1,99	28,03
GC01A	23,83	47,44	49,10	2,35	30,65
GC02A	13,13	33,54	50,35	2,00	31,45
GC05A	16,36	44,83	53,97	2,85	33,75
GC06A	14,38	38,05	50,39	2,40	31,50
GC07A	15,99	38,80	49,70	2,30	31,05
GC08A	12,78	45,64	48,21	3,30	30,10
GC09A	14,87	24,60	40,52	1,00	25,35
GC10A	17,59	36,84	48,26	1,93	30,16
MT01A	20,89	39,89	40,71	1,90	25,45
IC01A	20,03	36,14	37,34	1,60	23,35
HD01A	4,70	10,68	25,25	0,60	15,75

Inoltre va rilevato che a 24 ore dall'immersione tutti i campioni hanno mostrato una bagnatura visibile della superficie libera superiore del provino, che evidenzia il raggiungimento di uno stato di saturazione della malta, per cui non si è reso opportuno procedere con la misura dell'altezza di risalita capillare. In qualche caso la saturazione del provino è stata raggiunta addirittura nei primi 90 minuti dall'immersione.

È altresì interessante confrontare insieme i dati relativi alle masse del provino in un diagramma massa d'acqua assorbita/tempo, al fine di valutare le differenti velocità con cui i provini giungono a saturazione. L'analisi dei dati sperimentali derivanti dall'esecuzione delle prove di assorbimento capillare mostra che i massimi valori dell'indice di as-

Tab. 14.1. Quantità d'acqua assorbita dai campioni esaminati dopo 10', 90' e 24 ore di immersione e relativi indici di assorbimento.

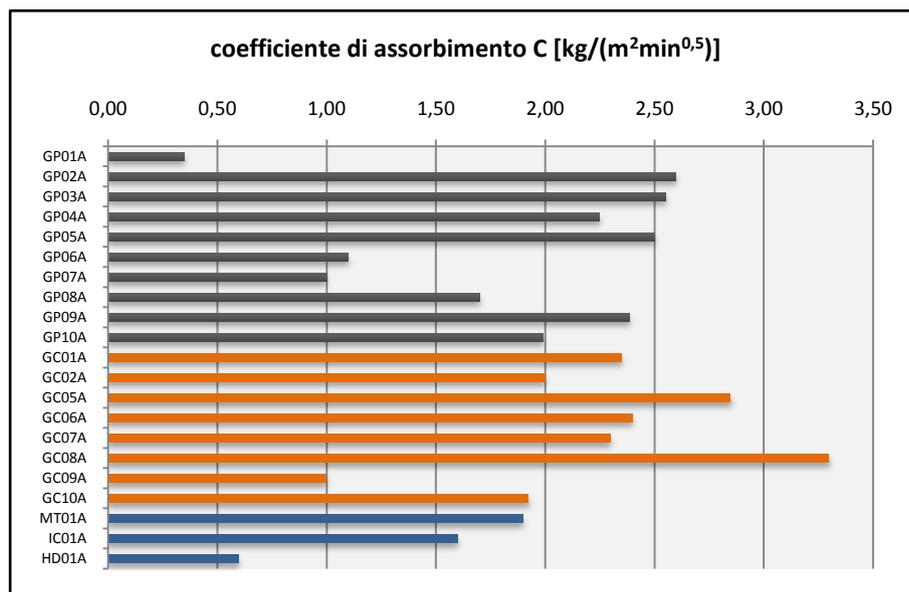
sorbimento, valutato secondo le due precedenti formule, è assunto dai provini contenenti il laterizio macinato.

Si osserva, addirittura, che a parte qualche eccezione, i campioni confezionati con pozzolana manifestano un assorbimento mediamente ridotto rispetto agli altri.

Il confronto tra i materiali premiscelati e quelli confezionati in laboratorio mostra, in riferimento all'indice di assorbimento valutato nelle 24 ore, un valore minore dello stesso in relazione ai prodotti premiscelati. Al proposito, possiamo affermare che il campione premiscelato confezionato con pozzolana ed una miscela di leganti costituiti da calce aerea ed idraulica, mostra i valori minimi dell'indice di assorbimento, valutato secondo le due modalità suddette.

L'analisi dei grafici in cui sono riportati gli andamenti della quantità d'acqua assorbita nelle 24 ore, possiamo affermare che i campioni confezionati con sola pozzolana ed una miscela di calce aerea ed idraulica assorbono, almeno inizialmente, una ridotta quantità d'acqua al confronto con gli altri provini.

Fig. 14.4. Coefficiente di assorbimento valutato secondo la formula indicata per le malte non da restauro, con riferimento alla differenza tra la quantità d'acqua assorbita tra 10 e 90 minuti. Si osserva che i campioni GP02A, GP03A, GP04A e GP05A manifestano, già dopo 90 minuti dall'inizio dell'immersione, una visibile traccia di bagnatura della faccia superiore del campione.



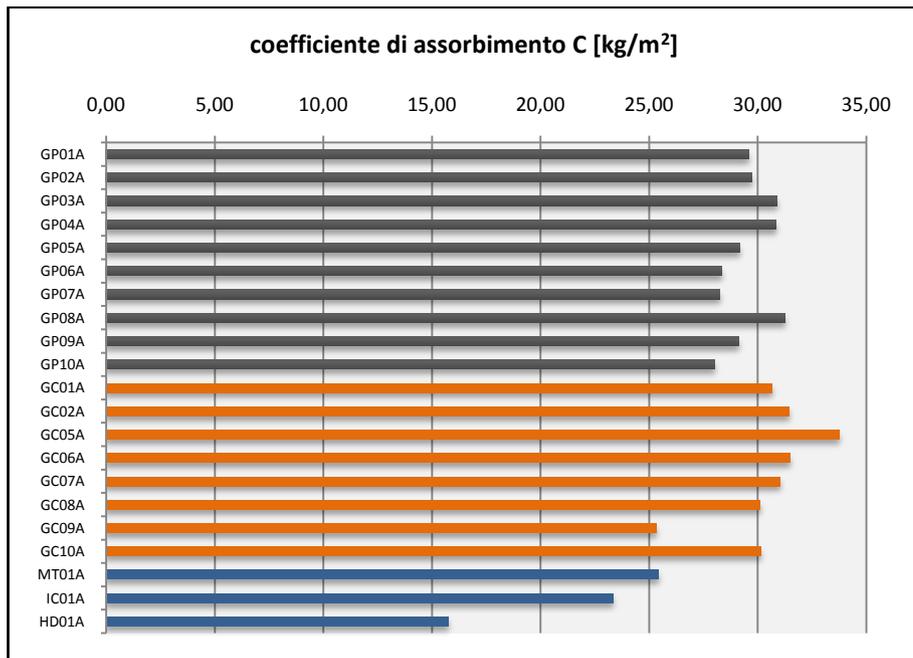


Fig. 14.5. Coefficiente di assorbimento valutato secondo la formula indicata per le malte da restauro, con riferimento alla sola quantità d'acqua assorbita nel corso dell'intera prova. I campioni premiscelati mostrano certamente le minori quantità d'acqua assorbita.

Fig. 14.6. L'andamento della quantità d'acqua assorbita nel corso delle prove mostra, tra i campioni di pozzolana, che i formulati contenenti una percentuale di calce idraulica hanno un minore assorbimento nel primo periodo, sebbene, dopo 24 ore, l'assorbimento totale dei campioni sia piuttosto analogo.

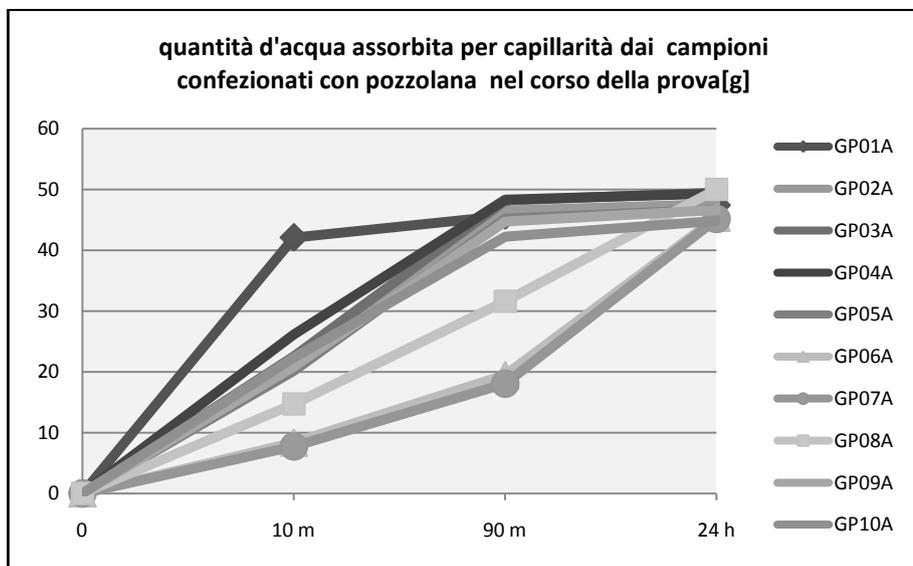
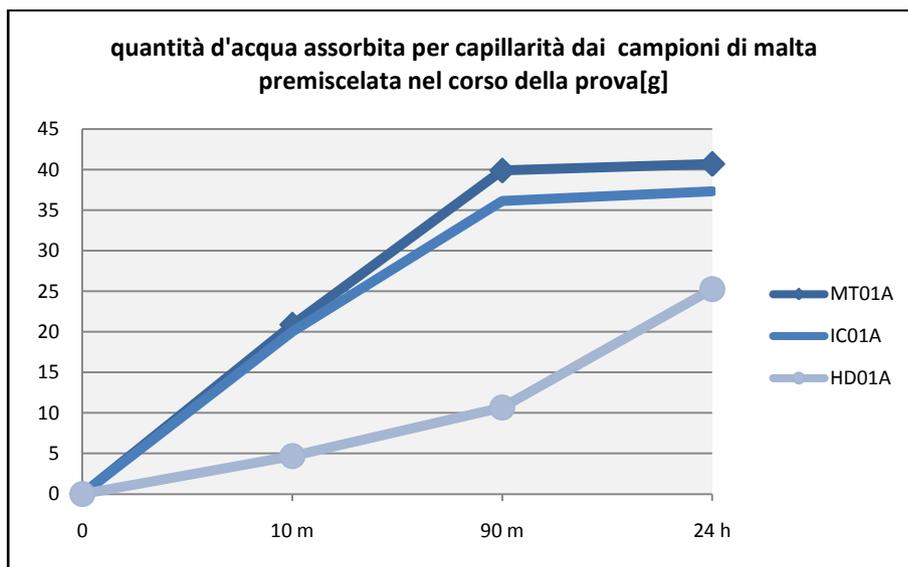
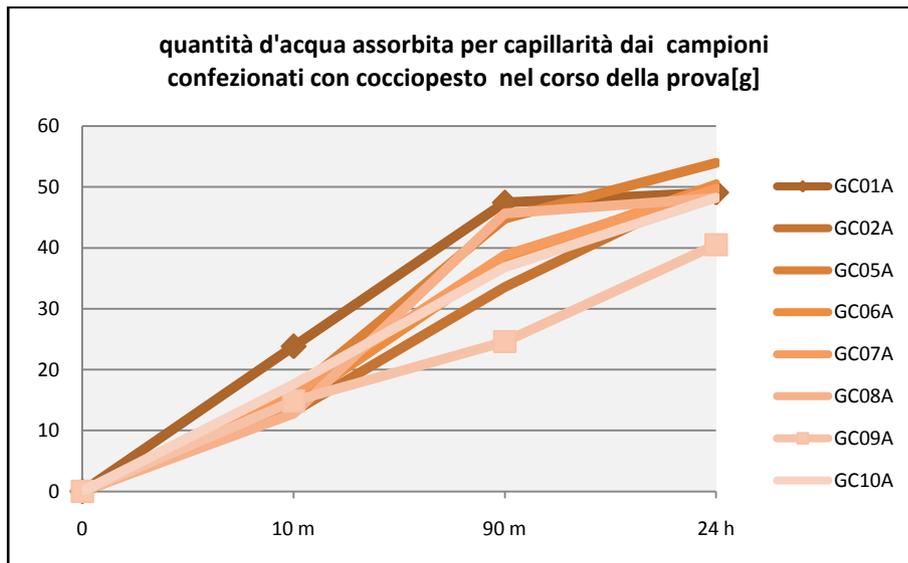


Fig. 14.7. L'andamento della quantità d'acqua assorbita nel corso delle prove mostra, tra i campioni di cocciopesto, che ad un comportamento sostanzialmente analogo dei campioni nei primi 10 minuti e nel corso dell'intera prova, non corrisponde una distribuzione uniforme delle grandezze dopo 90 minuti dall'inizio della prova. In questo caso l'assorbimento minore è mostrato dal campione contenete una frazione di sabbia calcarea.

Fig. 14.8. L'andamento della quantità d'acqua assorbita nel corso delle prove mostra, tra i campioni premiscelati, una notevole differenza di comportamento del campione contenete pozzolana ed una miscela di calce aerea ed idraulica.



ⁱ La massa può ritenersi costante qualora due pesate consecutive, distanti 24 h durante l'essiccazione, non differiscono tra loro di oltre lo 0,2% della massa totale.

ⁱⁱ Si ricordi che la reazione di carbonatazione dell'idrossido di calcio ha una velocità quasi nulla allo stato solido, ma risulta piuttosto veloce se la reazione avviene in presenza di acqua.

ⁱⁱⁱ Per malta da risanamento R deve intendersi una malta progettata per intonaci interni/esterni utilizzata su pareti di muratura umide contenenti sali solubili in acqua. Queste malte presentano una porosità e una permeabilità al vapore elevate e un'azione capillare ridotta.



15. PROVE SU INTONACI CON MALTE IDRAULICHE NON CEMENTIZIE

Le attività di sperimentazione in laboratorio su provini di intonaco realizzati su supporti riguardano lo strato di corpo dell'intonaco realizzato senza alcuna finitura. I supporti impiegati nel corso della sperimentazione sono costituiti da tavelle in laterizio: la scelta del supporto da utilizzare nel corso della sperimentazione deriva dall'enorme diffusione di questo materiale nel territorio della Sicilia Occidentale, sia per la realizzazione di nuove costruzioni, che per gli interventi di riconfigurazione e/o ricostruzione dell'edilizia storica, spesso in sostituzione o integrazione dei lapidei locali, costituiti da calcari compatti o, più frequentemente nell'area del palermitano ed anche del trapanese, da calcareniti di origine conchiliare.

L'utilizzo di supporti derivanti dalla produzione industriale deriva anche dalla facilità di reperimento, dalla leggerezza e maneggevolezza delle tavelle, caratteristiche imprescindibili per gli utilizzi in laboratorio, oltre che dalla consolidata esperienza diffusa nella letteratura tecnica al proposito.

Le modalità di preparazione e stesura dell'intonaco seguono le procedure specificate dalla norma UNI EN 1015-12:2002 "Metodi di prova per malte per opere murarie – Determinazione dell'aderenza al supporto di malte da intonaco esterno ed interno".

In particolare la procedura richiede che, al solito, venga impastata una quantità di malta pari al valore massimo tra 1,5 litri e 1,5 volte il volume di malta richiesta dalla prova; successivamente si procede alla registrazione del valore relativo alla consistenza della malta, confor-



Fig. 15.1. La quantità di malta richiesta dalla prova necessita di un impasto manuale, eseguito sempre con un attento controllo dei dosaggi delle componenti.

memente con quanto prescritto dalla EN 1015-3.

Nel corso della sperimentazione gli impasti sono stati effettuati a mano, sempre attraverso un attento controllo delle proporzioni e dei dosaggi delle diverse componenti.

Anche l'applicazione avviene a mano, attraverso cazzuola e fratazzo metallici, con uno spessore di malta pari a 10 ± 1 mm, garantito dalla presenza di due guide laterali, spesse 10 mm, con il supporto mantenuto in verticale nel corso dell'applicazione, proprio per simulare al meglio l'applicazione reale di intonaci su superfici verticali.

Le condizioni di maturazione degli intonaci stesi su tavelle sono del tutto analoghe a quelle viste finora: le tavelle vanno, infatti, imballate in un involucro costituito da un foglio di polietilene e mantenute per 7 giorni alla temperatura di $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Successivamente si procede alla rimozione dall'involucro ed alla conservazione all'aria con la stessa temperatura, ma con condizioni di umidità relativa del $65 \pm 5\%$, per altri 21 giorni.

Le criticità relative alla durata dei tempi di stagionatura evidenziate nel corso dei capitoli precedenti sono valide anche per queste applicazioni, in ragione di una maturazione dell'impasto ritenuta, in generale, insufficiente. Si evidenzia, inoltre, che sebbene la norma prescriba che la stesura dell'intonaco vada effettuata in verticale, nessuna indicazio-



Fig. 15.2. L'utilizzo di guide laterali consente, secondo la tecnica del *sestato*, di realizzare lo strato di intonaco con spessore uniforme, pari ad 1 cm.

ne viene fornita per la fase della stagionatura.

Nel corso della sperimentazione la stagionatura dello strato di intonaco è avvenuta con la tavella disposta in posizione verticale.

15.1. VALUTAZIONE DELL'ADERENZA AL SUPPORTO SU TAVELLE

La prova di aderenza di uno strato di malta per intonaco al supporto che, nel nostro caso, è costituito da una tavella in laterizio presuppone che la verifica vada effettuata attraverso lo strappo (pull-off) di un disco circolare di intonaco, opportunamente ritagliato dallo strato di malta. L'obiettivo della prova consiste nella misura della tensione di trazione che il disco esercita, reagendo alla sollecitazione impressa dall'esterno. Questa tensione, come vedremo, non equivale strettamente alla tensione che la malta ed il supporto esercitano tra loro all'interfaccia, che risulterebbe piuttosto difficile da misurare, date le intime connessioni che i legami chimici riescono ad instaurare tra il legante della malta e la superficie del supportoⁱ, bensì ad una tensione



Fig. 15.3. Appena stesa, la malta viene incisa nel suo spessore con un anello a profilo troncoconico, in modo che il campione da sottoporre alla trazione non sia affetto da azioni laterali, per opera dalla malta circostante.

di utile riferimento nel rapporto tra la malta ed il supporto.
La prova prevede, innanzitutto, che sullo strato di intonaco steso sulla tavella venga effettuata un'incisione mentre la malta è ancora fresca. L'incisione va effettuata attraverso un anello cilindrico metallico, con profilo tronco-conico a spigoli vivi e diametro interno di 50 ± 1 mm, avente le dimensioni rispondenti a quanto prescritto dalla norma UNI EN 1015-12:2002. L'incisione su malta fresca si effettua premendo l'anello sullo strato di malta, previa lubrificazione con olio minerale, con un leggero effetto rotatorio, fino a raggiungere il completo contatto con il supporto, quindi rimuovendo l'anello, sempre applicando una leggera rotazione e ponendo particolare attenzione affinché non venga compromessa l'adesione al supporto dei provini tagliati.
Dopo la stagionatura, i provini vengono ritagliati utilizzando una attrezzatura per carotaggio: nel caso di malte scarsamente resistenti, quali sono certamente le malte idrauliche non cementizie, ma anche, e soprattutto, quelle a base di calce aerea, la sperimentazione ha mostrato che l'operazione di carotaggio può risultare anche piuttosto invasiva per due ragioni. La prima criticità consiste nella sovrasolleccita-



Fig. 15.4. La resina impiegata per incollare le piastrine metalliche è una epossidica. Particolare attenzione va posta nel fatto che le resina, una volta appoggiata la piastrina, non coli lungo i bordi laterali del campione, determinando

zione che l'attrezzatura meccanica comporta e che, nel caso di malte scarsamente aderenti al supporto, determina il distacco, anche parziale, del disco d'intonaco già in fase di carotaggio; la seconda, invece, riguarda i fenomeni di rottura ed erosione superficiale dei bordi del disco d'intonaco provocati dall'improvviso contatto con la tazza rotante della carotatrice, che potrebbero ridurre la superficie di contatto tra il provino e la strumentazione di prova.

Una volta effettuati correttamente i tagli si procede con l'incollaggio di una piastrina metallica di diametro pari a 50 mm sui provini di intonaco, attraverso una resina epossidica bicomponenteⁱⁱ: la norma prescrive una particolare cura nella fase di incollaggio delle piastrine, che vanno centrate sui provini, senza che l'adesivo debordi, influenzando l'adesione tra la malta ed il supporto.

Una volta indurito l'adesivo si procede con la prova applicando, attraverso uno specifico strumento, una forza di trazione perpendicolare alla superficie dell'intonaco, con incrementi di carico compresi tra 0,003 N/(mm²·s) e 0,100 N/(mm²·s), in relazione al valore della forza di adesione attesoⁱⁱⁱ.



Fig. 15.5. La strumentazione utilizzata per l'applicazione del carico di trazione consente un controllo degli spostamenti sia attraverso la manopola centrale che attraverso la manovella laterale, per gli spostamenti micrometrici. Si dà lettura della tensione di picco, ossia del valore massimo raggiunto dalla tensione di trazione nel momento in cui avviene la rottura.

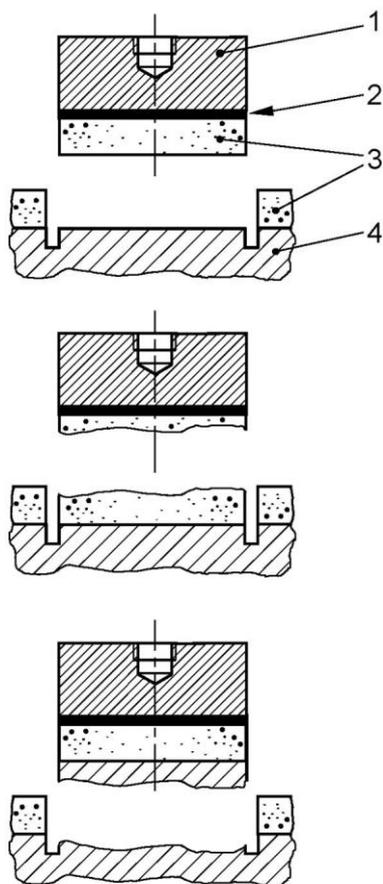


Fig. 15.6. Modalità di rottura previste dalla norma EN 1015-12.

1. Piastrina di estrazione
2. Strato di adesivo
3. Malta
4. Supporto

Si registra, quindi, la forza F_u con cui avviene il distacco, e si calcola la tensione di rottura f_u con la seguente formula:

$$f_u = \frac{F_u}{A}$$

dove A corrisponde all'area del provino.

Le ultime considerazioni sulla prova di valutazione dell'aderenza al supporto riguardano la modalità di rottura del provino: se, infatti, la rottura avviene all'interfaccia tra il supporto e l'intonaco, il valore della tensione di rottura è uguale alla forza di adesione; se invece la rottura avviene all'interno della malta, o addirittura del supporto, la forza di adesione è certamente maggiore di quella ottenuta dalla prova.

Nel corso della nostra sperimentazione, la situazione che più frequentemente si è verificata corrisponde alla modalità di rottura all'interfaccia tra la malta ed il supporto.

I campioni esaminati nel corso della sperimentazione sono in numero ridotto rispetto a quelli precedentemente visti. La motivazione di esclusione di alcuni campioni dall'indagine, oltre ad essere legate ad esigenze esecutive di sperimentazione, può anche essere adottata ad un infrequente utilizzo di malte costituite da una frazione aggregata totalmente reattiva, per cui si è preferito volgere l'attenzione ad un numero più limitato di campioni che comprendesse i tre premiscelati ed alcune formulazioni ritenute più facilmente applicabili nei cantieri attivi nel territorio occidentale siculo.

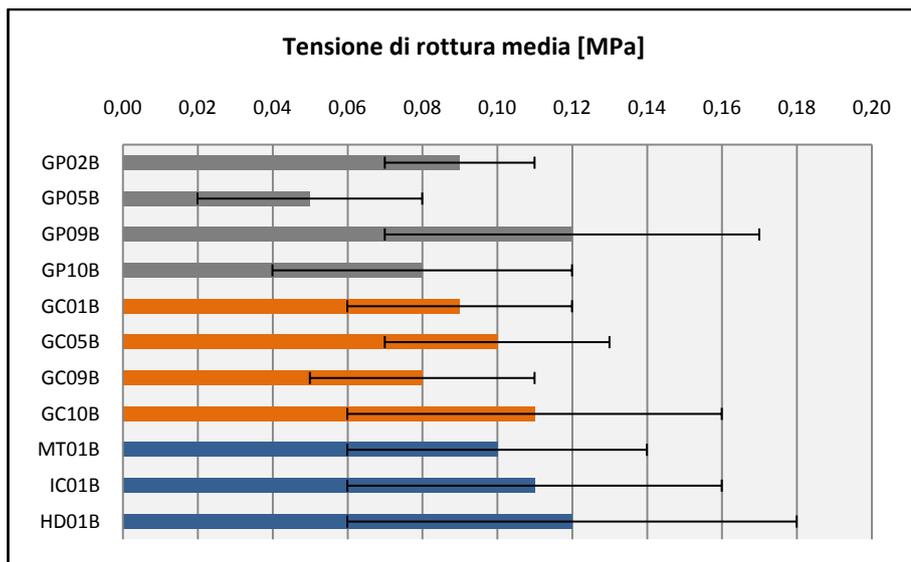
La prova di aderenza, che per ogni formulato, sempre in accordo con la procedura stabilita dalle norme europee, è stata eseguita su cinque campioni, mostra una notevole variabilità dei risultati conseguiti.

Si è ritenuto quindi opportuno valutare, insieme al valore medio della tensione di aderenza, anche il valore della deviazione standard statistica d , definita per un insieme di n termini x come:

$$d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_m - x_i)^2}{n - 1}}$$

dove x_m è il valore medio degli n termini x .

id campione	malta premiscelata	grassello di calce	calce idraulica	pozzolana	cocciopesto	sabbia calcarea	sabbia dolomitica	forza di adesione media [MPa]	dev. standard della forza di adesione [MPa]
GP02B			●	● ● ●				0,09	0,02
GP05B			●	●		●		0,05	0,03
GP09B			●	●			●	0,12	0,05
GP10B			●	●		●		0,08	0,04
GC01B			●		● ● ●			0,09	0,03
GC05B			●		● ● ●			0,10	0,03
GC09B			●		●	●		0,08	0,03
GC10B			●		●		●	0,11	0,05
MT01B	●	premiscelato 1 a base di calce idraulica naturale ed aggregato calcareo, confezionati nel rapporto in volume di 1:3						0,10	0,04
IC01B	●	premiscelato 2 a base di fiore di calce, calce idraulica naturale e cocciopesto, nel rapporto in volume legante/aggregato pari a 1:3						0,11	0,05
HD01B	●	premiscelato 3 a base di fiore di calce, calce idraulica naturale e pozzolana, nel rapporto in volume legante/aggregato pari a 1:3						0,12	0,06



Tab. 15.1. Formulazione delle malte utilizzate nella prova di aderenza al supporto ed indicazione dei risultati di prova, comprensivi della deviazione standard.

Fig. 15.7. Il diagramma mostra che, mediamente, anche in considerazione della deviazione standard registrata per ciascuna prova, l'aderenza migliore si ha per le malte premiscelate. Il campione HD01B mostra il comportamento migliore nei confronti dell'aderenza al supporto.

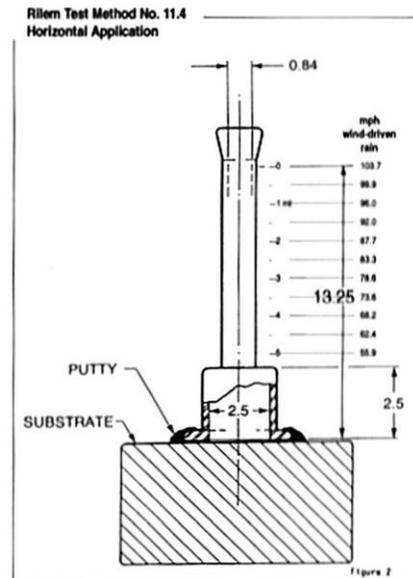
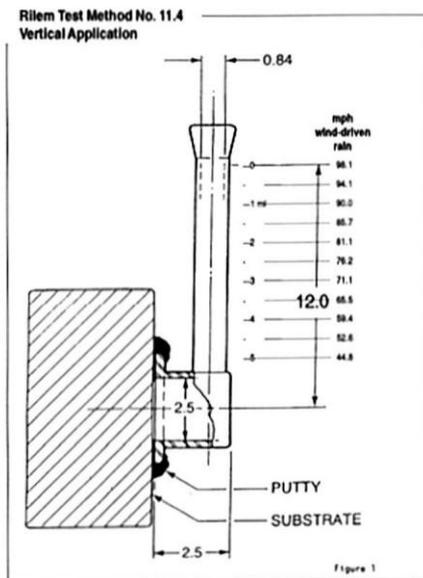
15.2. VALUTAZIONE DELL'ASSORBIMENTO D'ACQUA A BASSA PRESSIONE (METODO KARSTEN)

La norma di riferimento per la valutazione dell'assorbimento d'acqua a bassa pressione col metodo Karsten è la RILEM 25-PEM Essai n.II.4 "Absorption d'eau sous basse pression".

La norma è diffusamente impiegata, per la semplicità d'esecuzione, oltre che per la possibilità di esecuzione della prova sia in situ, che in laboratorio. La misura in laboratorio è comune per la caratterizzazione dei materiali non alterati e non trattati, mentre quella in situ può essere utile per valutare il grado di alterazione di un materiale o l'efficienza di un trattamento protettivo di idrorepellenza.

La prova può essere realizzata sia in orizzontale che in verticale al fine di simulare al meglio le reali condizioni in cui si trovano ad operare gli intonaci. Il trasporto in direzione verticale dell'acqua attraverso i pori interni alla malta avviene quando l'acqua entra dalla base di una struttura (si pensi alla dispersione di acque nel terreno alla base dei muri intonacati), ovvero attraverso i canali di scolo delle acque piovane. Il trasporto in direzione orizzontale avviene, invece, nel caso in cui le condizioni di vento agevolino la penetrazione della pioggia battente sulle superfici intonacate.

Fig. 15.8. La procedura di sperimentazione può essere applicata su superfici orizzontali, che simulano, ad esempio, il rivestimento sommitale di un muro, o su superfici verticali, che simulano i rivestimenti ad intonaco delle pareti verticali.



La strumentazione è costituita da una pipetta che presenta alla base un bordo piano, circolare ed aperto, che, attraverso uno strato di plastilina, può essere posto in aderenza alla superficie dell'intonaco che si intende esaminare. L'area di base della pipetta è di $4,9 \text{ cm}^2$. Sia la strumentazione per l'esecuzione della prova in orizzontale che quella per l'esecuzione in verticale, presentano una colonna verticale graduata, che viene riempita con 5 ml di acqua.

L'altezza della colonna, nelle applicazioni su superfici in verticale è 12 cm, misurati dal centro della base circolare alla sommità della colonna, mentre nel caso di applicazione in orizzontale l'altezza è di

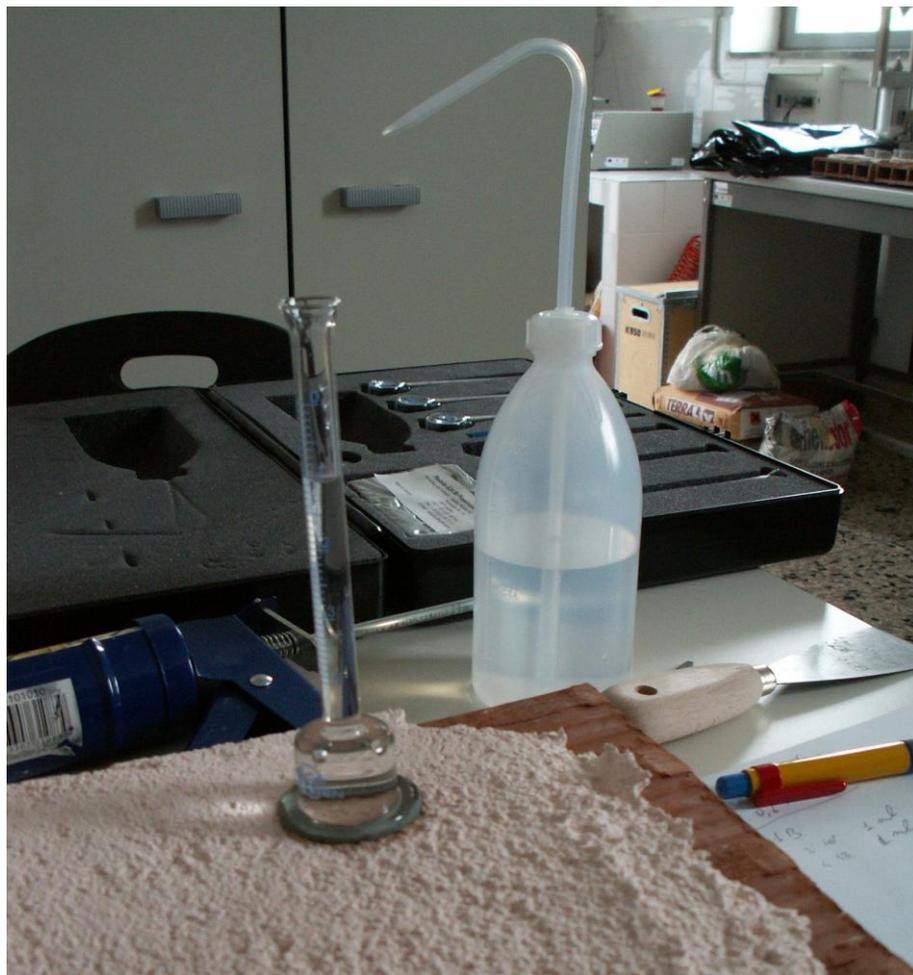


Fig. 15.9. Il riempimento della pipetta avviene con una bottiglia da lavaggio del tipo a spruzzo.

13,4 cm. La pressione esercitata dalla colonna d'acqua è pari a 1,17 kPa, corrispondenti alla pressione cinetica^{iv} di un vento di 152,8 Km/h, nelle applicazioni in verticale, mentre in quelle orizzontali la pressione è 1,31 kPa, corrispondenti alla pressione cinetica di un vento di 161,7 Km/h.

Nel corso della prova la pipetta va saldamente tenuta in aderenza alla superficie e riempita con acqua fino a raggiungere il livello massimo, indicato dalla cifra 0. La durata della prova è variabile e dipende dalle caratteristiche di assorbimento del materiale in esame. Nel corso della sperimentazione si è preferito procedere ad una lettura dell'assorbimento a 10 minuti.

L'elevata capacità di assorbimento di alcuni intonaci, però, ha richiesto, nel corso della prova, l'aggiunta di una determinata quantità d'acqua all'interno della pipetta. Si è quindi stabilito di procedere nella maniera seguente:

- si riempie la pipetta fino al livello massimo, dando così inizio alla prova;
- si osserva l'andamento dell'assorbimento per 10 minuti, dando lettura della quantità d'acqua assorbita nel corso della prova;
- qualora, nel corso dei 10 minuti la quantità d'acqua assorbita sia superiore ad 1 ml, si procede al riempimento della pipetta con 1 ml di acqua, fino a raggiungere il livello massimo, ponendo attenzione nel registrare l'intervallo di tempo trascorso dall'inizio della prova;
- si ripete il riempimento della pipetta tutte le volte che si rende necessario nel corso della prova.

L'operazione di riempimento della pipetta costituisce certamente una criticità nell'esecuzione della prova, ma è resa assolutamente necessaria nel caso in cui l'intonaco manifesti un assorbimento piuttosto elevato, per non variare eccessivamente il regime di carico idrostatico della prova.

Si determina quindi la velocità media dell'assorbimento a bassa pressione, esprimendola in millilitri al secondo, sia per la prova su superfici orizzontali, che per quella su superfici verticali.

Le superfici utilizzate per l'esecuzione delle prove sono quelle di malta stesa sulle stesse tavelle sulle quali, precedentemente, è stata valutata l'aderenza al supporto.

L'analisi delle velocità di assorbimento ricavate in seguito alle prove, oltre a rilevare che sulle superfici verticale si ha una velocità maggiore, per ovvie ragioni legate ad una maggiore pressione esercitata sulla malta, conferma che mediamente le malte confezionate con cocciopesto hanno un assorbimento maggiore delle altre, che si manifesta immediatamente, già nei primi minuti di prova.

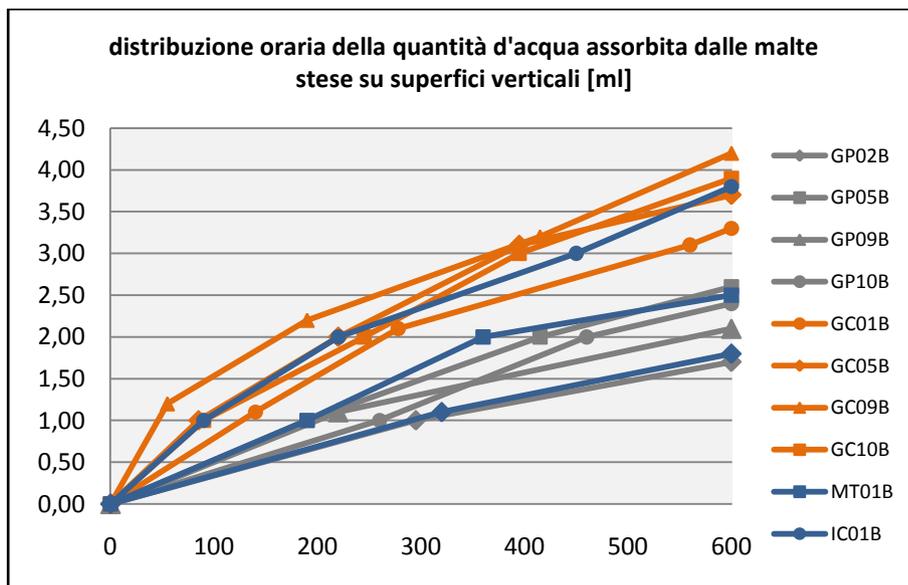
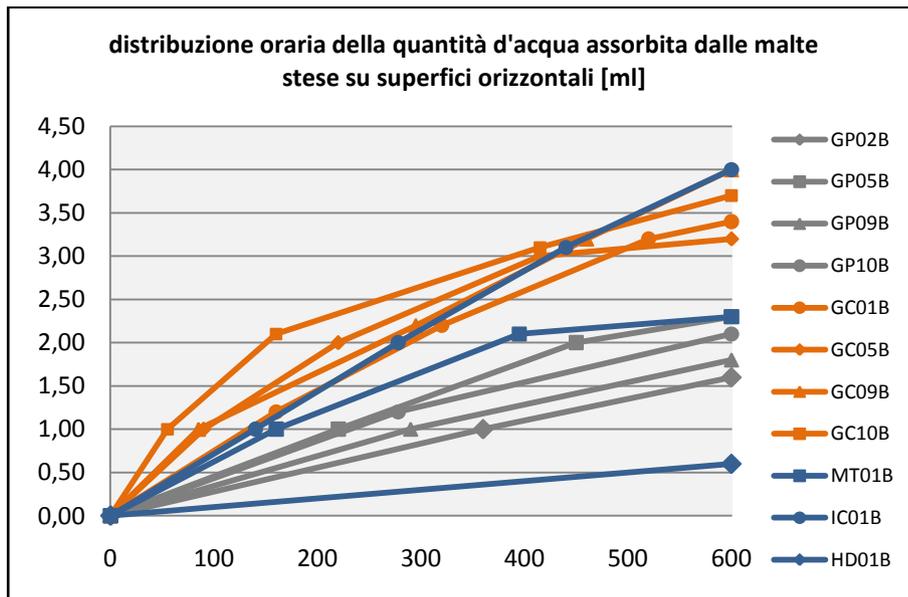
Ciò potrebbe essere spiegabile in ragione di una scarsa idraulicità del laterizio impiegato, che potrebbe accompagnarsi, allo stesso tempo, ad una elevata microporosità che aumenta i fenomeni di assorbimento capillare all'interno dei grani di laterizio frantumato.

id campione	velocità di assorbimento su tavella posta in posizione orizzontale [ml/(cm ² min)]	velocità di assorbimento su tavella posta in posizione verticale [ml/(cm ² min)]
GP02B	0,023	0,024
GP05B	0,033	0,037
GP09B	0,025	0,030
GP10B	0,030	0,034
GC01B	0,048	0,047
GC05B	0,045	0,052
GC09B	0,057	0,059
GC10B	0,052	0,055
MT01B	0,033	0,035
IC01B	0,057	0,054
HD01B	0,008	0,025

Tab. 15.2. Velocità di assorbimento calcolate in seguito alle prove col metodo Karsten.

Fig. 15.10. Andamento, nel corso dei 10 minuti di prova, della quantità d'acqua assorbita dalla malta stesa sulla tavella posta in posizione orizzontale.

Fig. 15.11. Andamento, nel corso dei 10 minuti di prova, della quantità d'acqua assorbita dalla malta stesa sulla tavella posta in posizione verticale.



ⁱ Si pensi, ad esempio, alle reazioni che possono avvenire tra l'idrossido di calcio presente nel legante, e le frazioni di silice e l'allumina reattive presenti nel laterizio che costituisce la tavella, con formazione dei composti idrati CSH e CAH.

ⁱⁱ Le due componenti sono costituite dalla resina e dal catalizzatore della reazione di indurimento.

ⁱⁱⁱ La relazione tra la forza di adesione attesa, espressa in N/mm^2 , e la velocità di carico, espressa in $\text{N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$, è desumibile dalla seguente tabella, contenuta nella norma EN 1015-12:2002.

Forza di adesione attesa [N/mm^2]	Velocità di carico [$\text{N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$]
<0,2	0,003 – 0,010
0,2 - <0,5	0,011 – 0,025
0,5 - < 1,0	0,026 – 0,050
>1,0	0,050 – 0,100

^{iv} La pressione cinetica del vento q_c , espressa in N/m^2 , è definita, in forma approssimata, tramite la formula:

$$q_c = \frac{\rho v^2}{2}$$

dove ρ è la densità dell'aria, espressa in Ns^2/m^4 , pari al rapporto tra il peso specifico γ (corrispondente a circa $0,127 \text{ N}/\text{m}^3$), e l'accelerazione di gravità g (pari a $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$), mentre v è la velocità del vento, espressa in m/s . Cfr., a tal proposito, CNR-DT 207/2008 "Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni".



16. ANALISI E SINTESI DEI RISULTATI

In accordo con quanto visto precedentemente possiamo certamente affermare che ciascuno dei risultati visti finora nel corso della sperimentazione presenta una sua specificità, in ragione soprattutto delle peculiarità di ciascun impasto. Ogni esito di prova ci permette, dunque, di trarre alcune considerazioni sul determinato campione, ovvero su una formulazione realizzata impiegando materiali analoghi a quelli utilizzati nella sperimentazione.

Avendo però a disposizione una gamma di prove si ritiene opportuno cercare un sistema che ne consenta una valutazione complessiva.

Lo studio dei risultati ottenuti nel corso della sperimentazione suggerisce pertanto di proporre una metodologia di lettura globale dei dati, che partendo dalle singole caratteristiche dell'impasto, si spinga agli eventuali utilizzi che le miscele possono avere nel cantiere edilizio: in relazione alle singole prove abbiamo infatti visto quali siano i comportamenti manifestati da ciascuna miscela e, senza indicare alcuna metodologia di valutazione, si è osservato che i diversi impasti manifestano caratteristiche tra loro differenti.

Abbiamo visto, ad esempio, che gli impasti contenenti una frazione di calce idraulica manifestano, in generale, una resistenza meccanica più elevata degli altri, o che quelli formulati con cocchiopesto hanno un assorbimento a bassa pressione mediamente maggiore.

Certamente alcune di queste caratteristiche possono essere determinanti nella scelta di una malta: si è visto, ad esempio, che non sempre l'elevata resistenza meccanica è un vantaggio, perché altrimenti si utilizzerebbero in ogni campo le malte cementizie. Viceversa, un'elevata aderenza al supporto, od una buona permeabilità al vapore sono spesso ritenute una caratteristica piuttosto positiva.

Vogliamo quindi proporre, in questa sede, un'ulteriore metodologia di analisi, che prescindendo parzialmente dalle singole caratteristiche degli impasti e che possa aiutare non a definire in assoluto il formulato che abbia le migliori prestazioni in tutti i casi, bensì quello che abbia una maggiore probabilità di garantire un comportamento migliore, rispetto agli altri, in determinate condizioni; qualora, inoltre, queste condizioni dovessero mutare, l'analisi dovrebbe indicare che la composizione del miglior formulato possa essere diversa dalla precedente, sia nel caso

in cui si tratti di malte premiscelate, che nel caso in cui l'impasto venga confezionato in cantiere.

La letteratura tecnica riporta spesso metodologie di analisi dei dati sperimentali piuttosto rigide, che pongano in relazione tra loro poche caratteristiche: Coppola (1988), ad esempio, pone in relazione l'assorbimento d'acqua per capillarità con la resistenza alla diffusione del vapore per classificare gli intonaci deumidificanti.

Quando le caratteristiche da confrontare sono più di una, secondo la metodologia proposta, si assegna ad ognuna un determinato peso; la somma dei prodotti tra i singoli pesi ed i valori delle relative caratteristiche, potrebbe determinare il prodotto più indicato. Questa metodologia è stata utilizzata, ad esempio, da Biscontin et al. (2009), nella valutazione di alcuni consolidanti per il legno.

In questa sede si intende ripercorrere quest'ultima metodologiaⁱ, che porta con sé alcune criticità in relazione all'assegnazione dei pesi alle grandezze fisiche in esame. Si propone di fornire non un'unica soluzione di lettura, bensì una serie di condizioni al contorno che possano aiutare colui che intende analizzare i dati ad individuare il prodotto che, in relazione a queste condizioni, offra le caratteristiche migliori.

Questa metodologia, certamente discutibile in relazione all'obiettività dei risultati proposti, offre interessanti sviluppi nel caso in cui le caratteristiche indagabili siano numerose, così come le condizioni al contorno. La scarsa numerosità della tipologia dei dati esaminabili risulta tuttavia rappresentativa per un'analisi di questo tipo.

I dati valutabili nel corso della nostra sperimentazione sono rappresentativi sia della formulazione della miscela, sia delle caratteristiche fisiche e meccaniche indagate nel corso della ricerca: i parametri di valutazione assumono quindi una diversa natura, poiché possono essere meramente descrittivi o quantitativi. Si è quindi scelto di inserire tra i parametri di valutazione i seguenti dati:

- la natura della formulazione della miscela, che viene distinta tra:
 - a. malta premiscelata;
 - b. malta confezionata in opera con legante costituito da solo grassello di calce;
 - c. malta confezionata in opera con legante costituito da una miscela di grassello di calce e calce idraulica naturale NHL
- resistenza meccanica a flessione;

- resistenza meccanica a compressione;
- coefficiente di assorbimento per capillarità per malte non da restauro, che indica l'assorbimento nei primi 90 minuti;
- coefficiente di assorbimento per capillarità per malte da restauro, in grado di indicare l'assorbimento nelle 24 ore;
- aderenza al supporto su tavelle in laterizio;
- velocità di assorbimento a basse pressioni col metodo di Karsten.

Appare evidente che qualora fosse possibile inserire altre caratteristiche, oltre alla precedenti, tra i parametri di valutazione, la metodologia, sebbene più complessa, garantirebbe una migliore garanzia di bontà della valutazione, sempre nell'ipotesi che si possa raggiungere una corretta rappresentazione della importanza di ciascuna caratteristica attraverso i pesi.

Ciascuna delle precedenti caratteristiche può mettersi in relazione con alcuni impieghi specifici, per cui, ad esempio, una malta confezionata con grassello di calce, potrebbe essere favorevolmente utilizzata nel caso in cui venisse richiesta una miscela ad elevato potere adesivo, e quindi preferita nella scelta dagli operatori del settore. Qualora, però, la suddetta malta non garantisse un'adeguata resistenza meccanica a compressione, richiesta, ad esempio, perché potrebbe rendersi opportuno impiegarla in spessori notevoli, si dovrebbe poter valutare quale, tra i formulati in esame, garantisce il soddisfacimento dei due requisiti, magari indicati con un ordine di priorità.

La procedura intende proprio rispondere a questa categoria di richieste.

In accordo con quanto detto precedentemente, sono state quindi scelte alcune condizioni che l'operatore potrebbe indicare nella valutazione con un ordine di priorità. Le condizioni indicate sono, nel nostro caso, suggerite dalla disponibilità dei dati rappresentativi per ciascun impasto; ogni condizione ha quindi una particolare relazione con almeno una delle caratteristiche indagate.

Qualora le caratteristiche disponibili fossero relative anche ad altri parametri, come ad esempio la permeabilità al vapore acqueo, si potrebbero indicare altre condizioni in relazione agli ulteriori dati disponibili. Sempre con riferimento alla permeabilità al vapore acqueo, po-

tremmo indicare tra le condizioni disponibili, l'eventuale impiego su murature altamente umide.

Ancora un altro aspetto, certamente di importanza non secondaria, potrebbe riguardare il costo relativo all'impiego di ciascun impasto, che andrebbe certamente messo in relazione con la disponibilità economica della committenza e che entrerebbe appieno in una valutazione costi-benefici relativa all'impiego dei prodotti indagati.

Le condizioni che nella nostra procedura di valutazione sono state scelte sono le seguenti:

- intonaco realizzato con malta a resistenza meccanica elevata;
- intonaco realizzato con malta ad aderenza al supporto elevata;
- intonaco da risanamento;
- intonaco monostrato.

Le prime due condizioni offrono certamente una immediata lettura dei dati esaminati: si capisce che l'utilizzo di un intonaco confezionato con malte a resistenza meccanica elevata abbia un diretto riscontro nei valori caratteristici della resistenza a flessione ed a compressione della malta, così come la condizione espressa dall'utilizzo di un intonaco realizzato con malta ad aderenza elevata, sia in relazione col valore dell'aderenza al supporto ottenuto secondo la procedura EN 1015-12. Possiamo però aggiungere che la prima condizione risulta parzialmente soddisfatta anche se nell'impasto è contenuta una parte di calce idraulica, mentre la seconda, che esprime l'aderenza al supporto, risulta in molti casi verificata anche dall'utilizzo di una malta confezionata con grassello di calce.

La condizione relativa all'intonaco da risanamento è certamente soddisfatta se la malta ha un ridotto indiceⁱⁱ od una scarsa velocità di assorbimentoⁱⁱⁱ. L'ultima condizione, espressa dall'utilizzo di un intonaco monostrato, può essere posta in relazione con l'utilizzo di una malta premiscelata^{iv}, o con un indice di assorbimento per capillarità ridotto nei primi 90 minuti^v.

La metodologia di valutazione, che nel corso di questa ricerca è stata sperimentata attraverso l'utilizzo di un foglio di calcolo elettronico, consiste nell'inserimento dei suddetti dati all'interno di una tabella costituita da un numero m di righe, ciascuna delle quali corrisponde ad una diversa miscela.

	Malta premiscelata	Malta confezionata in opera con solo grassello	Malta confezionata in opera con grassello e calce NHL	Resistenza a flessione [Mpa]	Resistenza a compressione [Mpa]	Coefficiente di assorbimento C_A [kg/(m ² *min ^{0,5})]	Coefficiente di assorbimento C_B [kg/m ²]	Aderenza al supporto [Mpa]	Velocità di assorbimento metodo Karsten [ml/(cm ² *min)]
1	Sì/No	Sì/No	Sì/No	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	Sì/No	Sì/No	Sì/No	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	Sì/No	Sì/No	Sì/No	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	Sì/No	Sì/No	Sì/No	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
...
<i>m</i>	Sì/No	Sì/No	Sì/No	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab. 16.1. Tabella dei parametri inseribili nel sistema di valutazione, per un numero di campioni pari a *m*.

La tabella presenta un numero *n* di colonne pari al numero delle caratteristiche indagate e/o disponibili: nella nostra sperimentazione, questo numero è pari a nove. Di queste colonne, le prime tre sono relative alle modalità di confezionamento della malta ed hanno un input di inserimento del tipo binario (sì/no), mentre le altre contengono dati quantitativi che vengono inseriti nella tabella secondo l'unità di misura specificata in testa a ciascuna colonna.

Una volta inseriti i dati all'interno della tabella ed operata la scelta delle condizioni al contorno che si intendono adottare, il sistema restituisce per ciascuna miscela un unico numero, rappresentativo di tutte le caratteristiche introdotte, che assume il valore massimo in corrispondenza della malta che presenta le migliori prestazioni, in rapporto a quanto richiesto.

A questo punto, il sistema compie alcune operazioni di calcolo che mettono in relazione il parametro inserito precedentemente, col relativo peso assegnato in base alle condizioni imposte dall'operatore.

L'operazione di calcolo che adesso andremo a descrivere necessita di alcune preliminari operazioni di modifica dei valori inseriti all'interno della tabella. Al fine, quindi, di poter procedere col calcolo matriciale, bisogna che i termini alfanumerici vengano trasformati in dati numerici, con ordine di grandezza tra loro paragonabile, affinché l'influenza che ciascuno di essi determina sulla valutazione complessiva non sia

dovuta all'unità di misura della singola caratteristica, bensì da un coefficiente che, come vedremo più avanti, determina il peso della caratteristica.

Il calcolatore opera quindi le seguenti operazioni: i dati di tipo binario, inseriti dall'operatore nel formato sì/no, vengono trasformati nel formato numerico 1/0, mentre sui dati di tipo numerico viene applicata un'operazione di divisione tra il singolo termine e la media dei dati relativi alla stessa colonna. Si costruisce in questa maniera una matrice algebrica A_{mn} , dove m è il numero delle righe della matrice, ed n indica il numero delle colonne.

Utilizzando il linguaggio algebrico possiamo quindi scrivere, per i termini a_{ij} della matrice A_{mn} , con riferimento ai corrispondenti termini d_{ij} della tabella dei dati inseriti dall'utente:

$$a_{ij} = 0 \div 1 \quad \text{se } j \leq 3$$

$$a_{ij} = m \cdot d_{ij} / \sum_{i=1}^m d_{ij} \quad \text{se } j > 3$$

Nel caso in cui la grandezza che si sta indagando contribuisca a definire le caratteristiche del prodotto in esame con un valore che, in generale, crescendo, tende ad identificare un materiale sempre meno adeguato alle esigenze richieste dall'operatore, il suddetto termine a_{ij} della matrice è sostituito dal suo reciproco a_{ij}^{-1} . Nella nostra sperimentazione i termini corrispondenti alle caratteristiche di assorbimento per capillarità ed a bassa pressione vengono valutati nella suddetta forma reciproca.

La costruzione della matrice A_{mn} fa comprendere che la procedura di valutazione possa essere adottata soltanto per confrontare miscele con caratteristiche tra loro assai simili: l'introduzione nella tabella, ad esempio, dei dati caratteristici di una malta cementizia, ad elevata resistenza meccanica ed a basso coefficiente di assorbimento per capillarità, determinerebbe uno scompensamento nei delicati equilibri tra l'ordine delle grandezze in esame.

I termini che, in maniera univoca, rappresentano tutte le caratteristiche delle malte in esame, e sui quali si basa la valutazione finale, possono essere raggruppati in un unico vettore colonna di valutazione, che pos-

siamo chiamare \underline{e}_{m1} , caratterizzato da un numero di righe ovviamente pari al numero delle miscele indagate m .

Questo vettore si ottiene operando la seguente operazione di calcolo matriciale tra la matrice ed un altro vettore colonna di ponderazione \underline{v}_{n1} , contenente i termini di peso delle grandezze esaminate, che tra poco andremo a definire. Secondo il linguaggio algebrico, si può scrivere:

$$\underline{e}_{m1} = A_{mn} \cdot \underline{v}_{n1}$$

ovvero

$$\begin{pmatrix} e_{1,1} \\ e_{i,1} \\ e_{m,1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,j} & a_{1,n} \\ a_{i,1} & a_{i,j} & a_{i,n} \\ a_{m,1} & a_{m,j} & a_{m,n} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_{1,1} \\ v_{j,1} \\ v_{n,1} \end{pmatrix}$$

dove il termine generico e_{i1} del vettore \underline{e}_{m1} è definito:

$$e_{i,1} = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot v_{j,1}$$

Restano ancora da definire i termini del vettore \underline{v}_{n1} . Questi costituiscono il peso che ciascuna caratteristica assume in relazione alle condizioni espresse dall'utente finale della metodologia di valutazione. La determinazione di questi termini costituisce certamente una criticità delle attività di analisi dei dati, per le difficoltà legate all'obiettività con cui possano essere determinati i valori ponderali.

Si osserva però, che nel caso in cui il numero di dati caratteristici sui quali deve essere effettuato il confronto dovesse crescere notevolmente, l'influenza determinata dalla singola caratteristica verrebbe certamente a diminuire, a meno che ad alcuni specifici termini non venga assegnata una preponderanza significativamente superiore rispetto a quella degli altri termini, per cui l'intera procedura potrebbe acquisire una certa rilevanza. Ciò sempre nell'ipotesi che all'operatore sia consentito imporre le condizioni al contorno che esplicitano le proprie scelte progettuali.

Nel corso della sperimentazione, data la ridotta numerosità delle caratteristiche indagate, il vettore di ponderazione \underline{v}_{n1} è costruito attraverso un vettore di base, che contribuisce a determinare una valutazione an-

che nel caso in cui l'operatore dovesse scegliere una sola condizione, cui vanno sommati i termini relativi alla prestazione richiesta dall'operatore:

$$v_{j,1} = v_{j,1}^0 + \sum v'_{j,1}$$

Dove $v_{j,1}^0$ costituisce il termine j-esimo del suddetto vettore base, mentre i termini assumono un valore diverso da zero qualora le condizioni espresse dall'operatore abbiano un riscontro sulla j-esima caratteristica.

Volendo fare un esempio, sempre con riferimento alla metodologia sperimentata, possiamo osservare la costruzione del termine di ponderazione dell'indice di assorbimento per capillarità tra i 10 ed i 90 minuti. Questo risulta costituito da un valore di base, che si pone pari all'unità, cui vanno sommati altri due termini, del quale il primo è dovuto alla scelta della condizione "intonaco da risanamento", mentre il secondo alla scelta della condizione "intonaco monostrato".

Si capisce che, nel caso in cui nessuna delle precedenti condizioni venissero espresse dall'operatore, la caratteristica ponderale assunta da questo termine è pari a quella espressa dal solo vettore di base. Viceversa, qualora venga espressa una qualunque delle suddette condizioni, al termine $v_{j,1}^0$, deve sommarsi il relativo termine $v'_{j,1}$, determinato in relazione al valore $v'_{j,1max}$, che viene assunto nel caso in cui la condizione espressa dall'operatore sia la prima tra le possibili:

$$v'_{j,1} = \frac{(q - p + 1) \cdot v'_{j,1max}}{q}$$

Dove p è la posizione che la condizione assume nell'elenco ordinato delle possibili, mentre q è il numero totale di condizioni esprimibili.

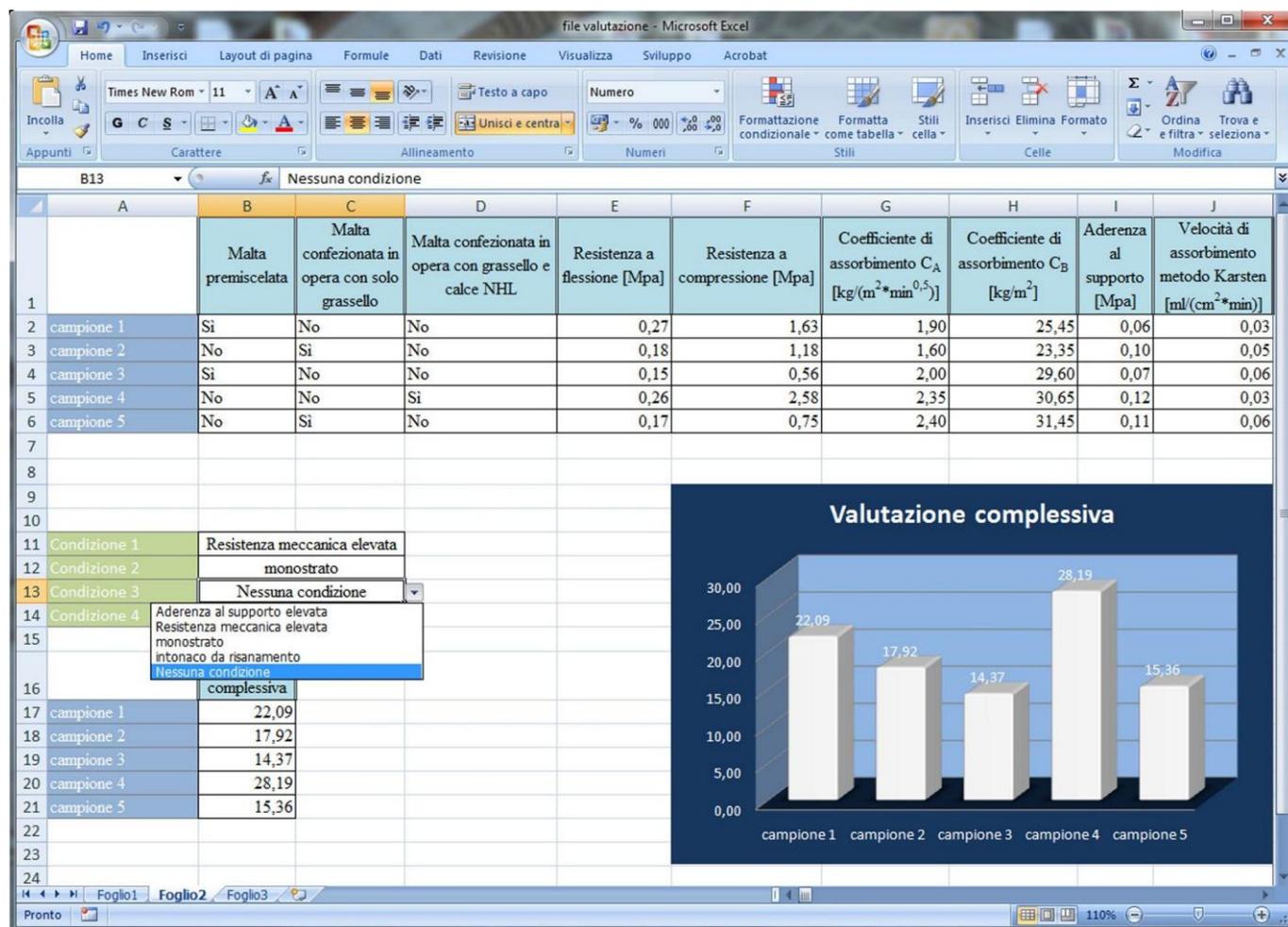
Con riferimento all'esempio già proposto, se la condizione "intonaco da risanamento" è espressa alle terza posizione, tra le quattro possibili, il relativo termine di ponderazione $v'_{j,1}$ è pari alla metà di $v'_{j,1max}$, che si è posto pari a 4.

Una volta ottenuto il vettore \underline{e}_{m1} , il sistema restituisce i generici termini e_{i1} in un'unica colonna, ed in corrispondenza del termine che assume il valore massimo, si individua il prodotto che, sempre in accordo

con le condizioni richieste dall'operatore, manifesta le prestazioni migliori.

Quest'operazione risulta immediatamente riscontrabile dall'utente attraverso la restituzione di un istogramma a colonne, in cui l'altezza della colonna relativa all'i-esimo campione è determinata proporzionalmente all'i-esimo termine del vettore di valutazione.

Fig. 16.1. Finestra di interazione con l'operatore. In accordo con la procedura proposta l'operatore, che si intende abbia già stabilito i pesi relativi a ciascuna caratteristica, dovrà soltanto inserire i dati di prova di ciascun campione ed imporre le condizioni di operatività della soluzione progettuale ricercata.



ⁱ La valutazione per pesi di grandezze tra loro differenti è stata teorizzata dal teorico inglese Dennis Victor Lindley, nel 1971, nel suo saggio *Making decisions*. Cfr. LINDLEY, D., *La logica della decisione*, Milano, Il saggiatore, 1990.

ⁱⁱ Valutato attraverso la procedura EN 1015-18.

ⁱⁱⁱ Valutata attraverso la prova di Karsten. Ad essa, inoltre, andrebbe associata anche una elevata permeabilità al vapore acqueo.

^{iv} Gli intonaci monostrato presentano alcune criticità in relazione alla compensazione delle fessurazioni da ritiro, inevitabilmente determinate dall'impiego di una malta con spessore notevole, e perfettamente visibili sulla superficie finita dell'intonaco. Per ovviare a questo problema, le malte che si utilizzano per l'esecuzione di intonaci monostrato presentano sempre alcuni additivi che riducono il ritiro, per cui le malte premiscelate vengono preferite per l'esecuzione di un intonaco monostrato. Queste considerazioni possono anche attuarsi in relazione ai costi di produzione: la riduzione dei tempi di lavorazione di un intonaco monostrato, può indicare la volontà da parte del committente di risparmiare sul costo di realizzazione, per cui la scelta dei materiali premiscelati, spesso più economici di quelli confezionati in cantiere, potrebbe rivelarsi, in ogni caso, la più indicata.

^v In accordo con quanto prescritto dalla norma UNI EN 998-1:2004, gli intonaci monostrato sono caratterizzati da un ridotto assorbimento d'acqua per capillarità, valutato nei primi 90 minuti, in accordo con la norma EN 1015-18.

CONCLUSIONI

La chiusura del triennio impone di dare al lavoro di ricerca svolto nel corso di questo periodo una conclusione che, alla luce di quanto è stato precedentemente discusso, deve ritenersi certamente parziale e non esaustiva.

Sebbene infatti la complessità dell'argomento, affrontata e discussa nel corso della prima e seconda parte della tesi evidenzia che le conoscenze nel campo delle malte per intonaco, con particolare riguardo a quelle idrauliche non cementizie, siano in continua evoluzione, nonostante la ricchezza delle ricerche svolte sull'argomento, le criticità evidenziate nel corso della sperimentazione, oggetto della terza parte della tesi, mostrano che la conoscenza degli aspetti tecnici di questa tipologia di malte merita ancora di essere approfondita, perlomeno in alcuni aspetti.

Abbiamo in effetti visto che il comportamento di queste malte, che potremmo definire intermedio tra le malte con calce aerea e le malte cementizie, assume caratteristiche in parte comuni con entrambe le tipologie di prodotto. Se però la conoscenza scientifica dei cementi, negli aspetti che riguardano le modalità di produzione, messa in opera, presa ed indurimento, caratteristiche del prodotto finale, anche con riguardo ai meccanismi di degrado, potrebbe ritenersi oggi piuttosto adeguata, in ragione degli approfonditi studi derivanti dagli impieghi strutturali, lo stesso non può dirsi per le calce aeree ed idrauliche, ancora oggi diffusamente impiegate nel confezionamento di malte sia aeree che idrauliche.

Trascurate spesso dalle ricerche internazionali per un progressivo disuso che, nel corso del Novecento, ha portato ad una parziale sostituzione delle stesse con i cementi negli impieghi in cui erano richieste determinate proprietà idrauliche, le calce aeree ed idrauliche sono tornate negli ultimi anni a suscitare l'interesse dei ricercatori e delle aziende produttrici in ragione delle indicazioni suggerite dalla cultura tecnica, specialmente nelle applicazioni di recupero edilizio, ma anche in relazione alle nuove costruzioni per le quali si richiede una maggiore sostenibilità ambientale rispetto al passato.

Un particolare interesse si rivolge alla forma "più nobile" con cui la calce aerea viene prodotta, il grassello, che se ben stagionato è da

sempre ritenuto un legante di eccezionale qualità, in rapporto a determinati usi.

Anche nelle applicazioni idrauliche, derivanti dall'impiego nella miscela di materiali idraulicizzanti, come la pozzolana od il cocchiopesto, il grassello, in accordo con quanto abbiamo visto nel corso della ricerca, è ritenuto dalla cultura tecnica un legante di pregio, soprattutto per l'elevato contenuto d'acqua che riesce a mantenere, con deboli legami chimici, nel corso dei fenomeni di presa ed indurimento. Abbiamo anche visto che questo legante determina nella malta finale un comportamento elasto-plastico ritenuto particolarmente adeguato nelle applicazioni ad intonaco.

Caratteristiche di pregio piuttosto simili le abbiamo viste anche in relazione alle calce idrauliche, ed in particolare in riferimento a quelle naturali, che mantenendo le caratteristiche generali della calce, possiedono di per sé le proprietà idraulicizzanti spesso richieste alla malta, e quindi non necessitano di aggregati reattivi nella formulazione.

Se però le conoscenze scientifiche di questi materiali non possono certamente porsi allo stesso livello di quelle relative ad altri materiali edili di tradizione consolidata, tanto più possiamo affermare che le incertezze nei riguardi di materiali a comportamento intermedio siano maggiori.

Nel corso della ricerca alcune di queste incertezze, soprattutto con riguardo alle modalità di sperimentazione e di conoscenza delle caratteristiche idrauliche, sono state rilevate, ed in particolare abbiamo visto le difficoltà di obiettività di alcune indagini, la cui applicazione spesso deriva dalla ricerca di analoghe caratteristiche in malte di natura diversa (spesso esclusivamente cementizia).

Questa ricerca potrebbe quindi estendersi, anche con riferimento allo studio di un maggior numero di proprietà caratterizzanti, fino a proporre nuove modalità di indagine, derivanti da quelle già diffuse dagli istituti normatori internazionali, ma corrette negli aspetti che hanno manifestato criticità.

Potrebbe altresì essere interessante valutare, con un attento programma di sperimentazione controllata, parametri come la durabilità di sistemi e soluzioni impiegabili in edilizia, ovvero ancora l'efficacia di utilizzazioni in ambienti poco favorevoli, quali potrebbero essere, ad

esempio, le murature umide in calcarenite conchiliare tipiche del costruito nella Sicilia Occidentale.

Certamente le osservazioni avanzate finora nel corso della ricerca costituiscono una base sulla quale è possibile costruire una più complessa attività che potrebbe certamente coinvolgere istituzioni esterne all'Università, in primo luogo le aziende produttrici che operano in accordo con quanto indicato dalle normative internazionali, dichiarando chiaramente le caratteristiche dei componenti prodotti e commercializzati, ovvero le composizioni delle miscele proposte sul mercato.

Anche la metodologia di valutazione dei risultati scientifici raggiunti nel corso di questa ricerca, se opportunamente calibrata e modificata, può contribuire, nonostante le difficoltà di obiettività già evidenziate, a valutare l'efficacia di una più completa sperimentazione che non si limiti a definire, come spesso succede, caratteristiche poco utili agli utilizzatori finali delle malte, bensì ad accrescere la consapevolezza circa il comportamento nel tempo di un prodotto che, come tutte le malte, dalla fase di applicazione a quella di utilizzo in opera, modifica notevolmente le sue proprietà.



RINGRAZIAMENTI

La realizzazione di questo lavoro di ricerca è stata resa possibile grazie al supporto di più soggetti, con i quali ho avuto modo di confrontarmi in diverse maniere nel corso del triennio, ed ai quali, adesso, vorrei porgere i miei ringraziamenti.

Innanzitutto sono grato nei confronti dell'azienda palermitana S.I.R.GUM s.r.l. – Siciliana Industria Rivestimenti, ed in particolare ai fratelli Terranova, per avermi fornito gratuitamente i materiali necessari per la realizzazione delle sperimentazioni, e per i preziosi consigli che mi hanno suggerito per l'esecuzione dei formulati sperimentali.

Vorrei inoltre manifestare la mia gratitudine al personale del Laboratorio di Edilizia (facente parte del Sistema di Laboratori di Ateneo UniNetLab dell'Università di Palermo) presso il Dipartimento di Progetto e Costruzione Edilizia, ed in particolare desidero ringraziare il responsabile scientifico, prof. Giuseppe Alaimo, per la fiducia accordatami nell'utilizzazione della strumentazione di laboratorio, ma anche il personale tecnico, sig. Guccione e arch. Munnia, per la continua presenza e disponibilità: un ringraziamento particolare va a Giuseppe Mendola, per avermi spesso affiancato nella comprensione e nell'utilizzazione degli strumenti.

Certamente l'inesperienza non aiuta nell'approcciarsi con gli aspetti pratici relativi all'utilizzazione di macchinari piuttosto complessi, per cui desidero anche ringraziare l'ing. Francesco Accurso e la dott. Eugenia Belluardo, che, con la loro presenza presso il Laboratorio di Edilizia, mi hanno offerto un'utile opportunità di confronto nelle prime esperienze di laboratorio.

Un affettuoso ricordo va anche ai docenti del comitato ordinatore del master di II livello in "Restauro, protezione e sicurezza degli edifici storici e monumentali" dell'Università di Firenze e del Collegio degli Ingegneri della Toscana, ed in particolare al prof. Gennaro Tampone ed all'ing. Paolo Del Soldato, con i quali, nel corso dei primi mesi del dottorato, ho avuto modo di confrontarmi anche in relazione al tema delle ricerche che avrei svolto nel triennio.

Un pensiero non può non essere rivolto a tutti i colleghi di corso, ed in particolare a Stefano, a Manfredi ed a Flavia, con i quali sono state as-

sai frequenti le possibilità di confronto e di discussione sulle tematiche dell'ingegneria edile.

Un ringraziamento va anche ai coordinatori ed a tutti i docenti del collegio di dottorato, e, più in generale, di tutto il Dipartimento di Progetto e Costruzione Edilizia, per i preziosi suggerimenti che mi sono stati forniti nel corso delle attività di ricerca, ma anche per le attenzioni che molti tra loro hanno mostrato nei miei confronti, sia nel caso in cui la conoscenza fosse consolidata in base al mio pregresso percorso di studi, sia nel caso in cui la possibilità di dialogo si sia offerta soltanto in occasione del corso di dottorato.

Vorrei, quindi, ringraziare Mario Li Castri, Calogero Vinci e Tiziana Campisi per la sincera amicizia mostratami e per le continue e numerosissime occasioni di confronto, collaborazione, scambio di idee ed aiuto occorso nelle attività di ricerca.

Certamente queste poche righe non possono comprendere la gratitudine nei confronti del mio tutor, prof. Giovanni Fatta, che fin dal corso di studi in Ingegneria Edile – Architettura, continua a guidarmi e ad indirizzare le mie attività scientifiche, trasmettendomi sempre, nonostante i numerosi impegni, i suoi interessi verso le tematiche inerenti la conoscenza e l'analisi dell'architettura tradizionale e stimolando in me la curiosità e l'intraprendenza nella ricerca.

L'ultimo pensiero va alla mia famiglia, a mio padre ed a mia sorella, che pazientemente continuano ad appoggiarmi nella scelta di proseguire gli studi, ed a colei che, pur non essendo più tra noi, sento, ancora oggi, forse più vicina e pronta a sostenermi: mia madre.

BIBLIOGRAFIA

- ADAM, J. P., *L'arte di costruire presso i Romani*, Milano, Longanesi, 1988
- AGHEMO, C., CIRILLO, E., FATO, I., FILIPPI, M., *L'umidità nelle murature: una metodologia di indagine*, «Recuperare», 1991, n. 7
- AGHEMO, C., CIRILLO, E., D'AMBROSIO, F. R., ALFANO, G., *La misura dell'umidità nelle pareti degli edifici*, «Recuperare», 1991, n. 7
- ALAIMO, R., *Le malte e gli intonaci nell'edilizia storica e monumentale della Sicilia: caratterizzazione compositiva e ricerca di nuovi prodotti compatibili con i supporti lapidei regionali*, Progetto PON – Ricerca Scientifica, Sviluppo tecnologico e Alta Formazione – 2000 – 2006, Mis. I.3 e Mis. III.1, D.M. 8 agosto 2000, n. 593, art. 12, 2003-2006
- ALAIMO, R., GIARUSSO, R. MONTANA, G., *I materiali lapidei dell'edilizia storica di Palermo, Conoscenza per il restauro*, Enna, IlionBooks, 2008
- ALESSANDRINI, G. (responsabile scientifico e coordinatore della ricerca), *Il Centro storico di Palermo – La conoscenza per la manutenzione*, Roma, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto Nazionale di coordinamento Beni Culturali, Comune di Palermo, 2001
- ALESSANDRINI, G., FASSINA, V., (a cura di), *Beni Culturali e Normativa Tecnica. 30 anni di attività della Commissione NorMaL e il comitato Europeo TC 346 – Conservazione Beni Culturali*, «Kermes – La rivista del restauro», 2008, n. 71
- ALESSANDRINI, G., *La conservazione dei Beni Culturali e la normativa tecnica: un rapporto trentennale. Passato, presente ... futuro*, «Kermes – La rivista del restauro», 2008, n. 71
- APPENDINO, P., BARDELLI, P.G., BORASI, V., NEGRO, A., SCARZELLA, P., *Le tecniche ed i materiali non tradizionali: problematiche e ricerca*, in *Intonaci, colore e coloriture nell'edilizia storica, atti del convegno di studi Roma 25-27 ottobre 1984*, «Bollettino d'arte», 1986, Supplemento al n. 35-36
- ARCOLAO, C., *Le ricette del restauro. Malte intonaci, stucchi dal XV al XIX secolo*, Venezia, Saggi Marsilio, 1998

- ARIOGLU, N., ACUN, S., *A research about a method for restoration of traditional lime mortars and plasters: A staging system approach*, «Building and Environment», 2006, n. 41
- BARBATI, C., CAMELLI, M., SCIULLO, G., *Il diritto dei beni culturali*, Bologna, Il Mulino, 2006
- BARONIO, G., BINDA MAYER, L., *Reazioni di aggregati in intonaci antichi*, in *L'intonaco. Storia, cultura e tecnologia*, Atti del convegno di studi Scienza e Beni Culturali, Bressanone, Padova, Ed. Libreria Progetto, 1985
- BARONIO, G., BINDA, L., *Essais de cristallisation du sulfate de sodium dans des conditions de temperature et d'humidité relative connues*, «L'Edilizia», 1990, n. 3
- BARONIO, G., BINDA, L., *The role of brick pebbles and dust in conglomerates based on hydrated lime and crushed bricks*, , «Construction and Building Materials», 1997, vol. 11, issue n. 1
- BENFARI, M. (a cura di), *Consolidamento strutturale e conservazione di intonaci e colori dei paramenti esterni - Atti del seminario di aggiornamento professionale*, Viterbo, Betagamma edizioni, 1993
- BENSTED, J., COLEMAN, N.J., *La sorprendente storia del cemento e del calcestruzzo dalle origini dell'età della pietra al 1900 d.C.*, «L'industria italiana del cemento», 2004, n. 801
- BINDA MAYER, L., BARONIO, G., *Indagine sull'aderenza tra legante e laterizio in malte ed intonaci di "cocciopesto"*, in *Intonaci, colore e coloriture nell'edilizia storica, atti del convegno di studi Roma 25-27 ottobre 1984*, «Bollettino d'arte», 1986, supplemento al n. 35-36
- BINDA, L., SAISI, A., ANZANI, A., TIRABOSCHI, C., *Progetto di indagini per la diagnosi e metodi per il controllo dell'intervento*, in AA.VV., *Progettare il restauro*, Atti del Corso, Padova , Edizioni Libreria Cortina, 1999
- BISCONTIN, G. (a cura di), *L'intonaco: storia, cultura e tecnologia - Atti del Convegno di Studi*, Bressanone, 24 - 27 giugno 1985, Padova, Libreria Progetto Editore, 1985
- BISCONTIN, G., DRIUSSI, G., *Indagini preliminari sull'azione di intonaci traspiranti su murature umide a Venezia*, «Recuperare», 1988, n. 7

- BISCONTIN, G. (a cura di), *Superfici dell'architettura: le finiture - Atti del Convegno di Studi, Bressanone, 26 - 29 giugno 1990*, Padova, Libreria Progetto Editore, 1990
- BISCONTIN, G., BENEDETTI, M., DAINESE, U. , DRIUSSI, G., MORABITO, Z., TONON, M., *Una metodologia di indagine per la valutazione sul consolidamento del legno*, in *Conservare e restaurare il legno – Conoscenze, esperienze, prospettive, Atti del Convegno di Studi, Bressanone, 23 – 26 giugno 2009*, Marghera – Venezia, Edizioni Arcadia Ricerche S.r.l., 2009
- BOLOGNINI, L., *Il muratore reggiano*, Reggio Emilia, Davolio, 1778
- BRAVIN, E., CAROLI, L., ESPOSTI, W., LACCI, R., MERONI, I., POLLASTRO, C., TIRLONI, P., VAI, A., *Diagnosi non distruttiva*, «Modulo», 1993, n. 196
- BROCCOLO, A., *Malte intonaci e paste nelle costruzioni e nel recupero*, Roma, Carocci Editore, 2000
- BROCKEBLANK, I., *The lime spectrum*, «Context», IHBC - Institute of Historic Building Conservation, 2006, n. 97
- CAGNANA, A., *I leganti, gli intonaci, gli stucchi*. In: *Archeologia dei materiali da costruzione. Manuali per l'archeologia*, a cura di CROGIOLO, G. P., OLCESE, G., Mantova, Ed. S.A.P. s.r.l., 2000
- CANTALUPI, A., *Istituzioni pratiche elementari sull'arte di costruire le fabbriche civili*, Milano, Galli e Omodei, 1874
- CAPONNETTO, R., RODONÒ, U., *La valutazione del decadimento prestazionale di componenti edilizi tipici del contesto mediterraneo*, in MAGGI, P.N., DANIOTTI, B., ALAIMO, G., CIRIBINI, A., MORRA, L., NICOLELLA, M., RODONÒ, U., *La durabilità dei componenti edilizi*, Palermo, Editecnica, 2008
- CAVALIERI SAN BERTOLO, N., *Istituzioni di architettura statica e idraulica*, Firenze, v. Batelli e Figli, 1832
- CLAUDEL, J., LAROQUE, L., *Pratique de l'art de construire. Maçonnerie*, Paris, Carilian-Goeuryet, 1850
- CODELLO, R., *L'intonaco: conoscenza e conservazione*, Firenze, Alinea, 1996
- CODELLO, R., *L'intonaco da risanamento a Venezia: sperimentazione sulle murature antiche*, Cavriago, ed. Bertani, 2003
- COLLEPARDI, M., COPPOLA, L., *Influenza delle fibre polimeriche sulla durabilità di intonaci a base di calce*, «L'Edilizia», 1992, n.7-8

- COLLEPARDI, M. [1], *Dal calcestruzzo antico a quello moderno. Parte I – Evoluzione dei leganti per malte e calcestruzzi*, «Enco Journal», 2008, n. 41
- COLLEPARDI, M. [2], *Dal calcestruzzo antico a quello moderno. Parte II – Il calcestruzzo romano*, «Enco Journal», 2008, n. 43
- COLLEPARDI, M., *Dal calcestruzzo antico a quello moderno. Parte II – Dall’Illuminismo ad oggi*, «Enco Journal», 2009, n. 44
- COLOMBO, C., SANSONETTI, A., ALIVERTI, L., *Le malte: composizione, tecnologia e classificazione 1. I leganti e la loro evoluzione storica*, «Recupero e Conservazione», 2005, n. 66
- COLOMBO, C., SANSONETTI, A., ALIVERTI, L. [1], *Le malte: composizione, tecnologia e classificazione 2. Malte moderne*, «Recupero e Conservazione», 2006, n. 67
- COLOMBO, C., SANSONETTI, A., ALIVERTI, L. [2], *Le malte: composizione, tecnologia e classificazione 3. I leganti: la calce aerea*, «Recupero e Conservazione», 2006, n. 68
- COLOMBO, C., SANSONETTI, A., ALIVERTI, L. [3], *Le malte: composizione, tecnologia e classificazione 4. I leganti: la calce idraulica*, «Recupero e Conservazione», 2006, n. 69
- COLOMBO, C., SANSONETTI, A., ALIVERTI, L. [4], *Le malte: composizione, tecnologia e classificazione 5. L’aggregato*, «Recupero e Conservazione», 2006, n. 70
- COLOMBO, C., SANSONETTI, A., ALIVERTI, L. [5], *Le malte: composizione, tecnologia e classificazione 6. Il ruolo dell’acqua e degli additivi impiegati nelle malte storiche*, «Recupero e Conservazione», 2006, n. 71
- COLOMBO, C., SANSONETTI, A., ALIVERTI, L. [6], *Le malte: composizione, tecnologia e classificazione 7. Differenti tipologie di malte (parte prima)*, «Recupero e Conservazione», 2006, n. 72
- COLOMBO, C., SANSONETTI, A., ALIVERTI, L. [7], *Le malte: composizione, tecnologia e classificazione 8. Differenti tipologie di malte (parte seconda)*, «Recupero e Conservazione», 2007, n. 73
- COLOMBO, C., SANSONETTI, A., ALIVERTI, L. [8], *Le malte: composizione, tecnologia e classificazione 9. Malte per intonaci*, «Recupero e Conservazione», 2007, n. 74
- COPPOLA, L., *Gli intonaci macroporosi*, «L’Edilizia», 1988, n. 3-4

- COPPOLA, L., *Dagli intonaci della Magna Grecia ai moderni intonaci macroporosi*, In: *Atti del seminario CIAS: Evoluzione nella sperimentazione per le Costruzioni, 26 aprile – 3 maggio 1998*, Corinto, Grecia, 1998
- COSTA, G., *Materiali e tecniche tradizionali ed innovative per le finiture ad intonaco nella Sicilia occidentale: conoscenza, analisi, prestazioni*. In: *L'attività di ricerca nel dottorato ambiti metodi prospettive*. Pavia, 17 settembre 2008, Pavia, TCP, 2008
- COSTA, G., *Prove per la caratterizzazione meccanica e fisica di malte di calce idraulica naturale e semi-idrauliche*. In: *L'attività di ricerca nel dottorato. CODAT 2009. Atti della giornata di studio, Messina, 18 novembre 2009*, Firenze, Alinea editrice, 2009
- COSTA G., FATTA G., *Morteros hidráulicos para enlucidos: caracterización mecánica y física de remedios tradicionales y productos industriales*, In *1er. Congreso Iberoamericano y VIII Jornada "Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio"*, atti del convegno, La Plata – Buenos Aires (Argentina), 10-11/9/2009
- CURIONI, G., *L'arte di fabbricare ossia corso completo di istituzioni teorico-pratiche*, Torino, Negro, 1864
- DESSY, P., GALIMBERTI, V., NIRONI, L., *Malte a base di calce aerea per la realizzazione di intonaci*, «L'Edilizia», 1999, n. 11-12
- DESSY, P., GALIMBERTI, V., NIRONI, L., *Piogge acide e durabilità dei rivestimenti di facciata. Valutazione della resistenza degli intonaci all'aggressione chimica*, «Materiali edili», 2000, n. 33
- DE VECCHI, A., FATTA, G., *Glossario per rivestimenti ad intonaco*, Palermo, Arti Grafiche Siciliane, 1992
- DI BATTISTA, V., CATTANEI, A., (a cura di), *Intonaco Terranova, Storia e attualità di un materiale*, Milano, Saint-Gobain Weber, La Litografica, 2005
- D'ORAZIO M., *Antiche ricette o nuove tecnologie?*, «Modulo», 1994, n. 202
- D'ORAZIO, M., *Il controllo dei fenomeni di trasporto dell'umidità negli intonaci: incidenza della composizione, delle tecniche di esecuzione e finitura. Fattori di crisi e limiti di impiego di intonaci "speciali"*, Tesi di dottorato in Ingegneria Edile. Tecniche della

- progettazione e produzione edilizia, Università degli Studi di Palermo, relatore prof. Stazi, A., VIII ciclo, 1994-1997
- D'ORAZIO, M., STAZI, A., MORICONI, G., CAPOZUCCA, A., *Umidità sotto controllo*, «Modulo», 1997, n. 230
- D'ORAZIO, M., *Gli intonaci e l'umidità*, Milano, BeMa ed., 1999
- D'ORAZIO, M., PLACIDO, M., DELLO, M., *Il recupero di intonaci in terra*, «Modulo», 2004, n. 297
- FASSINA, V., FAVARO, M., NACCARI, A., PIGO, M., *Evaluation of compatibility and durability of a hydraulic lime-based plaster applied on brick wall masonry of historical buildings affected by rising damp phenomena*, «Journal of Cultural Heritage», 2002, n.3
- FATTA, G., *Prove per la caratterizzazione fisica nell'ambito delle analisi sull'intonaco*, da una comunicazione svolta nel corso di aggiornamento su “*Il recupero dei rivestimenti ad intonaco – caratteristiche, degrado, interventi*”, tenuto a Palermo nei giorni 7-8 e 14-15 ottobre 1994
- FATTA, G., *Uso ed evoluzione dell'intonaco nella storia: materiali e tecniche*, Palermo, Reprint, 1995
- FATTA, G. [1], *Intonaci a Palermo – Materiali e tecniche costruttive costruttive nella tradizione palermitana*, «Recupero e Conservazione», 1998, n. 24
- FATTA, G. [2], *L'intonaco nella tradizione palermitana*, «Bollettino dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Palermo», 1998, n. 1
- FATTA, G., *Intonaci a Palermo – I fratelli Li Vigni e le innovazioni del Novecento*, «Recupero e Conservazione», 1999, n. 25
- FATTA, G., *L'intonaco Li Vigni. Storia di un brevetto*. In BARDELLI, P. G., FILIPPI, E., GARDA, E. (a cura di), *Curare il moderno: i modi delle tecnologie*, Venezia, Marsilio, 2002
- FATTA, G., CAMPISI, T., LI CASTRI, M., VINCI, C., *The façades along the Cassaro in Palermo: historical buildings characterization, degradation, restoration norms for interventions*, «Conservation Science in Cultural Heritage», 2009, n. 9
- FEIFFER, C., *La conservazione delle superfici intonacate: il metodo e le tecniche*, Milano, Skira editore, 2000
- FEIFFER, C. [1], *Il supermercato dei prodotti per il restauro*, «Recupero e Conservazione», 2007, n. 75

- FEIFFER, C. [2], *Tradizione e innovazione*, «Recupero e Conservazione», 2007, n. 76
- FEIFFER, C. [3], *Artigiani e sirene?*, «Recupero e Conservazione», 2007, n. 77
- FEIFFER, C., *Quale calce?*, «Recupero e Conservazione», 2008, n. 83
- FEIFFER, C., *Nel nome delle NorMaL*, «Recupero e Conservazione», 2010, n. 91
- FERRI, S., (a cura di), *Marco Vitruvio Pollione, Architettura*, Roma, Fratelli Palombi, 1960
- FORTI, C., a cura di, *Antiche ricette di pittura murale*, Verona, Cierre Edizioni, 1998
- FRATINI, F., *Degrado dei manufatti in calcestruzzo: influenza dei componenti e delle modalità di confezionamento sulle caratteristiche e sulla durabilità*, «Arkos notizie Gor», 1990, n. 9/10.
- FURLAN, V., *Tipologia e proprietà fondamentali degli intonaci*, in *Intonaci, colore e coloriture nell'edilizia storica, atti del convegno di studi Roma 25-27 ottobre 1984*, «Bollettino d'arte», 1986, supplemento al n. 35-36
- GALIMBERTI, V., MONTRUCCOLI, M. (responsabili scientifici), *Sperimentazione di malte per muratura*, «Murature Oggi», 1999, nn. 62-63-64-65
- GASPAROLI, P., SABBADINI, S., SCUDO, G., *Gli intonaci in argilla*, «Ambiente costruito», 2001, n. 4
- GASPAROLI, P., VALENTINI, M., *L'attacco di sali solubili su murature in laterizio*, «Recupero e Conservazione», 2003, n. 52
- GHRICI, M., KENAI, S., SAID-MANSOUR, M., *Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements*, «Cement & Concrete Composites», 2007, n. 29
- GOTTARDI, V., *I leganti*, Bologna, Ed. Pàtron, 1978
- HENRIQUES, F., CHAROLA, E., *Comparative study of standard test procedures for mortars*, in *8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Berlin, 1996
- JURINA, L., *La caratterizzazione meccanica delle murature, Parte prima: Prove penetrometriche*, Proceedings of the International Conference C.I.A.S., Cipro, 2007

- LANAS, J., PÉREZ BERNAL, J.L., BELLO, M. A., ALVAREZ GALINDO, J.I., *Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars*, «Cement And Concrete Research», 2004, n. 34
- LANE, S. G., *Real-time Weathering as a Test for Evaluating Paint Coatings*, «Metal Finishing», Volume 98, Issue 6, 2000
- LAURENZI TABASSO, M., *Intonaci per l'edilizia storica: il controllo di qualità delle materie prime e dei prodotti finiti*, in *Intonaci, colore e coloriture nell'edilizia storica, atti del convegno di studi Roma 25-27 ottobre 1984*, «Bollettino d'arte», 1986, supplemento al n. 35-36
- LINDLEY, D., *La logica della decisione*, Milano, Il saggiatore, 1990
- MALTESE, C., MALTESE DEGRASSI, L., (a cura di) *Francesco di Giorgio Martini, Trattati di architettura ingegneria e arte militare*, Milano, Il Polifilo, 1967
- MARIANI, E., *Leganti aerei ed idraulici*, Milano, Editrice Ambrosiana, 1976
- MASIERI, G., (a cura di), *Bernard F. Belidor, La scienza degli ingegneri nella direzione delle opere di fortificazione e di architettura civile*, Mantova, F.lli Negretti, 1832
- MENICALI, U., *I materiali dell'edilizia storica – tecnologia e impiego dei materiali tradizionali*, Roma, La Nuova Italia Scientifica, 1992
- MILIZIA, F., *Principj di architettura civile*, Finale Ligure, Stamperia Jacopo De Rossi, 1781
- MILIZIA, F., *Principj di architettura civile, Opera illustrata dal professore architetto Giovanni Antolini. Seconda edizione milanese migliorata per cura del Dottor L. Masieri*, Milano, Serafino Majocchi, 1847
- MONTAGNI, C., *Materiali per il restauro e la manutenzione*, Torino, UTET, 2000
- MORA, L., MORA, P., *Ispezione sullo stato dell'arte: materiali comunemente disponibili sul mercato ed impiegati per intonaci e colore*, in *Intonaci, colore e coloriture nell'edilizia storica, atti del convegno di studi Roma 25-27 ottobre 1984*, «Bollettino d'arte», 1986, supplemento al n. 35-36
- NIGRO, L., *Tecniche tradizionali ed innovative nel restauro degli edifici antichi. Prove e applicazioni nel recupero edilizio*, Tesi di dottorato in Ingegneria del Recupero Edilizio, Politecnico Torino,

- relatori proff. Dringoli, M., Maffei, P.L., coordinatore prof. Scarzella, P., X ciclo, 1993-1996
- PECCHIONI, E., FRATINI, F., CANTISANI, E., *Le malte antiche e moderne tra tradizione ed innovazione*, Bologna, Pàtron Editore, 2008
- PIANA, M., *Marmorino plasters in Venice between the XVI and XVIII Centuries*, in CAMPOSTRINI, P. (a cura di) *Scientific Research and Safeguarding of Venice. Research Programme 2004-2006*, IV, 2005 results, Venezia, 2006
- PONZA DI SAN MARTINO, L., *Istituzioni di architettura civile raccolte e ordinate*, Torino, Presso Giuseppe Pomba e C.^a, 1836
- QUARNETI, G., *Restauro & Colore. L'Empirico e la Regola dell'Arte, Corso teorico – pratico*, Grigno (Trento), Scuola d'arte muraria Calchèra San Giorgio, 2009
- QUATREMÈRE DE QUINCY, A. C., *Dizionario storico di architettura*, Mantova, F.lli Negretti, 1842
- RANCAN, A., *Intonaci degli edifici: proprietà fisico - chimiche, degrado e conservazione*, «L'Edilizia», 1990, n. 12
- RATTAZZI, A., *Conosci il grassello di calce? Origine, produzione e impiego del grassello in architettura, nell'arte e nel restauro*, Monfalcone (GO), Edicom Edizioni, 2007
- RATTAZZI, A., POLIDORO, C., *La calce nel sistema LEED. Un materiale antico con un futuro verde e sostenibile*, «Recupero e Conservazione», 2010, n. 90
- RIVA, G., *L'industria dei leganti idraulici di Vittorio Veneto: Un patrimonio da salvaguardare e da valorizzare*, in TICCIH, XIII International Congress 2006 – Industrial Heritage and Urban Transformation Productive Territories and Industrial Landscape, Atti del convegno, Terni/Roma, 14-18 settembre 2006
- RODRIGUEZ-NAVARRO, C., HANSEN, E., AND GINNELL, W. S., *Calcium hydroxide Crystal Evolution upon aging of lime putty*, J. Am. Ceram. Soc., Vol. 81, 1998
- RODRIGUEZ-NAVARRO, C., CAZALLA, O., ELERT, K., *Liesegang pattern development in carbonating traditional lime mortars*, Proc. of the Royal Society, A, 458, London, 2002
- RODRIGUEZ-NAVARRO, C., RUIZ-AGUDO, E., ORTEGA-HUERTAS, M., HANSEN, E., *Nanostructure and irreversible colloidal behavior*

- of Ca(OH)₂: implication in Cultural Heritage Conservation*,
Langmuir, 21 (24), 2005
- RUSCONI, G. A., *Della Architettura Libri Dieci*, Venezia, Appresso il Nicolini, 1660
- SALA, E., *Duttilità e confinamento delle murature storiche e caratterizzazione di malte pozzolaniche riportate nella trattatistica d'architettura (I sec. a.C. – 1864)*, Tesi di Dottorato in Ingegneria delle strutture, Modellazione, Conservazione e Controllo dei Materiali e delle Strutture, Università degli studi di Trento, relatori proff. Giuriani, E., Giustina, I., XX ciclo, 2005 - 2007
- SCAMOZZI, V., *L'idea dell'architettura universale di Vincenzo Scamozzi architetto veneto*, Venezia, Presso l'Autore, 1615
- SCARZELLA, P., NATALE, P., *Terre coloranti naturali e tinte murali a base di terre*, Torino, Stamperia artistica nazionale, 1989
- SCARZELLA, P., TRIVELLA, L., BROGGI, D., MELZI, M., GASPAROLI, P., *Sistemi di tinteggiatura e pitturazione alla prova. I risultati, a ventun mesi dall'esposizione all'esterno, di diversi sistemi di tinteggiatura e pitturazione su intonaco*, «Arkos - Periodico trimestrale del Gruppo Operativo Restauro», 1992, n. 17
- SCARZELLA, P., TRIVELLA, L., GASPAROLI, P., MELZI, M., *Mezzi per la tinteggiatura degli edifici storici*, «Recuperare», 1993, n. 2
- SCARZELLA P., *Malte a vista con sabbie locali nella conservazione degli edifici storici*, Atti del seminario, Torino, 6-8 luglio 2000, vol. 4.1 *Terminologia*, Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria dei Sistemi Edilizi e Territoriali, Torino, 2000
- SCHIELE, E., BERENS, L. W., *La calce. Calcare, calce viva, idrato di calcio*, Milano, Ed. Tecniche ET, 1976
- SIVIERO, E., CANTONI, R., FORIN, M., *Durabilità delle opere in calcestruzzo: degrado del calcestruzzo, corrosione delle armature, prevenzione, misura della durabilità, sperimentazione e controlli*, Milano, Ed. Franco Angeli, 1995
- STRADA, U. *La tecnica del costruire, La teoria e la pratica nell'arte edilizia*, Roma, Casa Editrice Tecnica Edile, 1955
- TAVARES, M., MAGALHÃES, A. C., VEIGA, R., VELOSA, A., AGUIAR, J., *Repair mortars for a maritime fortress of the XVII th century*, International Conference on Construction Heritage in Coastal and Marine Environment, Lisbona, 28 – 30 Gennaio 2008

- TAVARES, M., MAGALHÃES, A. C., VEIGA, R., VELOSA, A., AGUIAR, J., *Métodos de diagnóstico para revestimientos de edificios antiguos. Importancia y aplicabilidad de los ensayos in situ*, «Revista Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico – PH», Aprile 2005
- TINÈ, S., (a cura di), *Codice di pratica professionale per il restauro delle fronti esterne degli edifici di Ortygia*, Milano, De Lettera Editore, 1999
- TINÈ, S., *Codice di pratica professionale per il restauro delle fronti esterne degli edifici: l'esperienza di Ortygia*, Palermo, Dario Flaccovio Editore, 2001
- TORRACA, G., *Definizione delle proprietà richieste per le materie prime (leganti e inerti) e i prodotti finali (malte e intonaci)*, in *Intonaci, colore e coloriture nell'edilizia storica, atti del convegno di studi Roma 25-27 ottobre 1984*, «Bollettino d'arte», 1986, supplemento al n. 35-36
- VALADIER, G., *L'architettura pratica dettata nella Scuola e Cattedra dell'Insigne Accademia di S. Luca da Giuseppe Valadier architetto*, Roma, Società Tipografica, 1828-39
- VEIGA, R., FRAGATA, A., VELOSA, A., MAGALHÃES, A., MARGALHA, G., *Substitution mortars for application in historical buildings exposed to the sea environment. Analysis of the viability of several types of composition*, <http://conservarcal.lnec.pt/english/index.htm>
- VELOSA, A. L., CACHIM, P. B., *Hydraulic-lime based concrete: strength development using a pozzolanic addition and different curing conditions*, «Construction and Building Materials», 2009, n. 23
- VELOSA, A. L., VEIGA, M. R. [1], *Development of artificial ageing tests for renders – Application to conservation mortars*, <http://conservarcal.lnec.pt/english/index.htm>
- VELOSA, A., VEIGA, R. [2], *Use of additivated lime mortars for old building rehabilitation. Adapted testing methods*. In: *Proc. 9th Int. Conf. "Durability of building materials and components"*. Brisbane, Australia, March 2002
- VEIGA, M. R., MAGALHÃES, A. C., BOKAN-BOSILIKOV, V., *Capillarity test on historic mortar samples extracted from site. Methodology*

and compared results, 13th International Brick and Block Masonry Conference, Amsterdam, 4-7 Luglio 2004
VICAT, L. J., *Recherches expérimentales sur le chaux de construction, les béton set les mortiers ordinaires*, Parigi, Goujon, 1818
VIOLA ZANNINI, G., *Della Architettura, Libri Due*, Padova, 1629
VIVIANI, Q., *L'architettura di Vitruvio tradotta in italiano*, Udine, Fratelli Mattiuzzi, 1830-33
WCED, *Our Common Future, Report of the World Commission on Environment and Development*, Oxford, Oxford University Press, 1987

Sono stati, inoltre, consultati i seguenti siti internet:

<http://www.forumcalce.it>

<http://www.gbcitalia.org>

<http://www.uni.com>

<http://www.rilem.net>