

Tecniche NDT per l'analisi dei materiali e la caratterizzazione meccanica di strutture murarie.

G.Porco, D.Romano

DIPARTIMENTO DI STRUTTURE, FACOLTÀ DI INGEGNERIA, UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA, RENDE (CS)

1. Premessa

Obiettivo del presente lavoro, è lo studio delle tecniche sperimentali per il controllo del degrado e per la caratterizzazione meccanica di elementi murari.

La scelta di tale argomento è basata sulla evidente necessità, da parte degli operatori del settore, di disporre di dati oggettivi per la valutazione dei livelli di affidabilità delle strutture murarie in zona sismica ed inoltre di possedere idonee procedure esplicative che consentano di giungere ad una programmazione delle operazioni investigative, di calcolo e di recupero di una struttura in muratura [1].

La procedura di diagnosi, per la valutazione del livello di degrado di un edificio consiste nella raccolta di dati sperimentali che, unitamente alle informazioni al contorno, di carattere ambientale, climatico, storico, strutturale, consente di stabilire le cause del dissesto e del degrado dei materiali [2].

La raccolta di dati sperimentali si basa sull'esecuzione di prove di carattere chimico-fisico e meccanico. Le prime, generalmente eseguite in laboratorio, prevedono il prelievo sulla struttura di porzioni di intonaco e di malta e sono finalizzate alla valutazione del degrado dei materiali. Le seconde, invece, da eseguire in sito, forniscono dei dati sui parametri meccanici e sullo stato di conservazione in termini di rigidità dei paramenti murari [8], [9].

Pertanto nelle successive sezioni, esaminate le procedure sperimentali di controllo e stabiliti gli obiettivi perseguibili tramite il loro impiego, si proporrà un protocollo procedurale di diagnosi, con una diretta validazione su un caso reale di studio.

2. Protocollo procedurale per il controllo del degrado e dello stato di consistenza delle strutture murarie

La conoscenza della natura dei materiali e delle cause del degrado sono indispensabili per poter prevedere e valutare la compatibilità (chimica, fisica, meccanica e biologica) tra i materiali, sia essi preesistenti o di primo impiego per gli interventi di consolidamento.

In questa ottica è utile disporre di una "procedura di diagnosi", che raccogliendo metodologie e tecniche sperimentali, costituisca un iter procedurale attraverso il quale si possano raccogliere informazioni dettagliate sulle caratteristiche delle murature storiche, sul loro degrado, nonché sulla compatibilità tra i materiali esistenti, i nuovi e le tecniche di restauro.

La procedura di diagnosi è raccolta in un protocollo (Fig.1) [6], [7] costituita da quattro fasi di indagine:

- Analisi dello stato di fatto;
- Prelievo di campioni di materiale visivamente degradato ed integro;
- Esecuzione di test sperimentali sui materiali degradati ed integri;
- Caratterizzazione meccanica delle murature in opera.

Per quanto attiene alle procedure sperimentali utilizzate nel protocollo procedurale di diagnosi proposto, esse possono essere rapidamente sintetizzate nei successivi paragrafi.

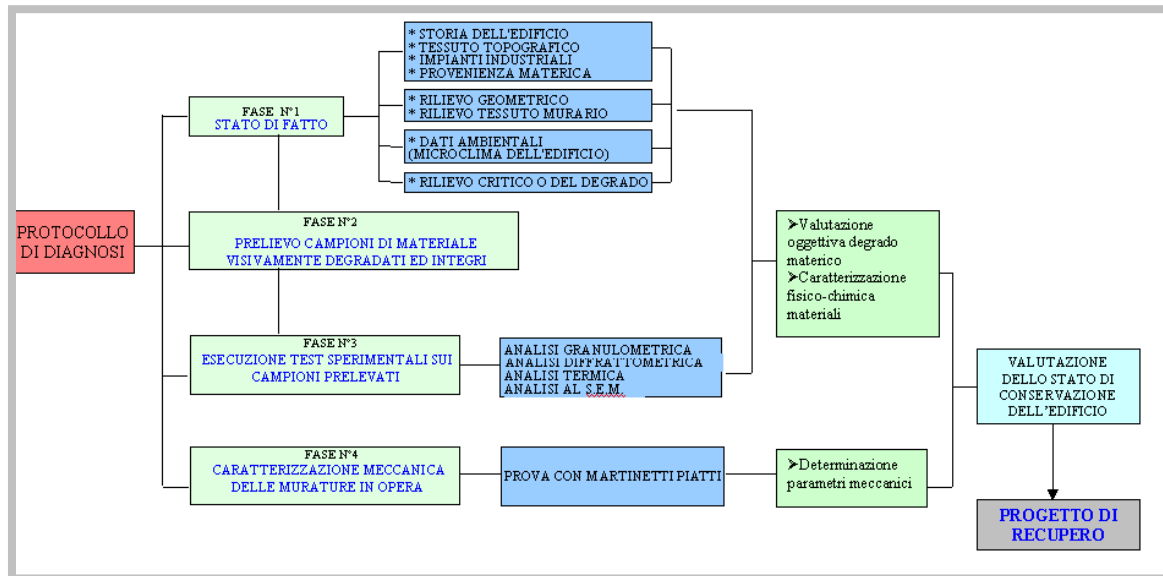


Fig.1: Schematizzazione del Protocollo di diagnosi

2.1 Analisi granulometrica

La ricostruzione della granulometria degli aggregati di malte esistenti prevede, in primo luogo, la separazione fisica delle parti finissime (legante) dall'aggregato. Successivamente per la determinazione della distribuzione granulometrica di una porzione di malta preparata, si ricorre alla separazione mediante setacciatura con stacci di diverso diametro ottenendo i pesi per le singole frazioni granulometriche. Le modalità di esecuzione della prova di setacciatura e le caratteristiche delle attrezzature sono contenute nelle norme: EN 933-2, ISO 3310-1, ISO 3310-2.

2.2 Analisi diffrattometrica

L'analisi per diffrazione dei raggi X consente di individuare la presenza di fasi cristalline all'interno di campioni opportunamente preparati. La diffrazione X su polveri è l'unico metodo analitico in grado di fornire informazioni qualitative e quantitative sui composti cristallini presenti su un campione solido.

2.3 Analisi termica

L'analisi termica è indispensabile per la caratterizzazione di composti chimici degradabili presenti nelle malte e negli intonaci. Dalla perdita di peso, in funzione della temperatura, si ottengono informazioni utili sulla composizione dei materiali. Dai termogrammi si può risalire alla determinazione quantitativa del legante presente nella malta o nell'intonaco e da indagini comparative si può valutare, ad esempio, se un campione è stato soggetto ad alterazioni.

2.4 Analisi al microscopio elettronico a scansione (SEM)

L'analisi al microscopio elettronico a scansione consente di valutare la morfologia fibrosa, lamellare, compatta, porosa e di eseguire l'analisi chimica puntuale degli elementi atomici mediante la sonda nota come Tecnica EDAX. Tale strumento permette altresì il riconoscimento dei prodotti di alterazione e la loro distribuzione, in modo da potere risalire alle cause del degrado attraverso l'osservazione delle variazioni strutturali subite dal materiale (fratture, decoesioni, ecc.) e dei suoi elementi cristallini (desquamazione, sfaldatura, ecc.).

2.5 Indagine con i martinetti piatti

Il fine di tale prova è la determinazione della tensione locale di lavoro e della tensione di prima fessurazione e di rottura.



Fig.2,3 – Prova con martinetto singolo e doppio

Ne esistono due tipologie, la prima, eseguita con martinetto singolo, si usa per valutare lo stato tensionale effettivo nella muratura, la seconda, invece, si attua con martinetti doppi e permette di determinare la resistenza a compressione di elementi murari, nonché i parametri di rigidezza.

La determinazione di tali parametri ha lo scopo di raffrontare i risultati delle analisi teoriche preliminari con le reali prestazioni che la muratura può offrire.

3.0 Un caso di studio: l'antico Borgo di Laino Castello

Il protocollo procedurale proposto è stato applicato su alcuni edifici in muratura siti nell'antico Borgo di Laino Castello (CS). Questo, situato su un colle a 400 m s.l.m., nel territorio del Parco del Pollino (Fig.4) è attualmente del tutto disabitato in quanto reso inagibile dalle frane provocate da una alluvione nel 1958 e da un terremoto nel 1982.

Il borgo risalente al XVIII secolo D.C., presenta ancora stradine ripide, vere e proprie rampe guerriere, resti di porte, torri e fortificazioni di tipica formazione medievale.



Fig.4-Il vecchio borgo di Laino Castello

Per brevità di esposizione si mostrerà in dettaglio la procedura di diagnosi condotta su un solo edificio (Fig.5), ciò al fine di esplicitare la cronologia di studio proposta e l'applicazione di alcune delle tecniche sperimentali discusse in precedenza.

EDIFICIO	N° 01			
Dati ambientali/Parete	P.ovest	P.sud	P.est	P.nord
Esposizione	O	S	E	N
Soleggiamento	M	S	M	S
Spazio antistante	SL	V	SL	SL
Altezza edificio antistante	A	Sm	A	A
Posizione rispetto ai venti	F	Pt	F	R
Traffico veicolare	A	A	A	A

Tabella 1- Dati ambientali Edificio 1

Le operazioni di rilievo, effettuate su tutte le pareti dell'edificio, hanno permesso di realizzare una mappatura dello stato di degrado, differenziando le zone alterate da quelle potenzialmente integre.

3.2 Prelievo di materiali visivamente integri e degradati

Eseguita la zonazione sulle pareti dell'immobile, distinguendo le zone alterate da quelle potenzialmente integre, si è passati al prelievo di due campioni di intonaco di cui uno visivamente degradato (1D – P2 – 0) e uno visivamente integro (2I – P2 – 0) sulla parete esposta a nord. Dalla figura 8, si nota come il campione alterato è stato prelevato da una zona caratterizzata da una forte presenza di umidità in concomitanza con fenomeni di erosione superficiale tali da aver causato fessure e distacchi dell'intonaco, contrariamente a quanto avviene nella zona in cui è stato prelevato il campione visivamente integro.

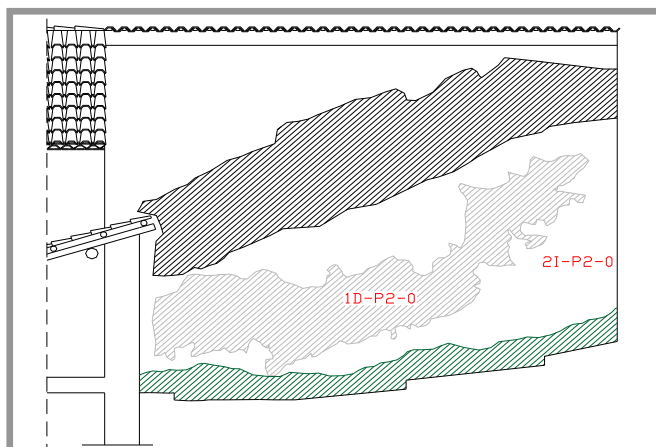


Fig.8 – Zone di prelievo

3.3 Esecuzione di test sperimentali sui materiali integri e degradati

Con riferimento agli intonaci della parete Nord, analizzeremo nel seguito i test sperimentali eseguiti sui campioni 2I-P2-0 e 1D-P2-0 (Fig.9,10).



Fig.9,10 – Campioni prelevati

Analisi granulometrica

Sui campioni prelevati dall'edificio oggetto di studio, sono state eseguite, previa separazione delle parti, analisi granulometriche.

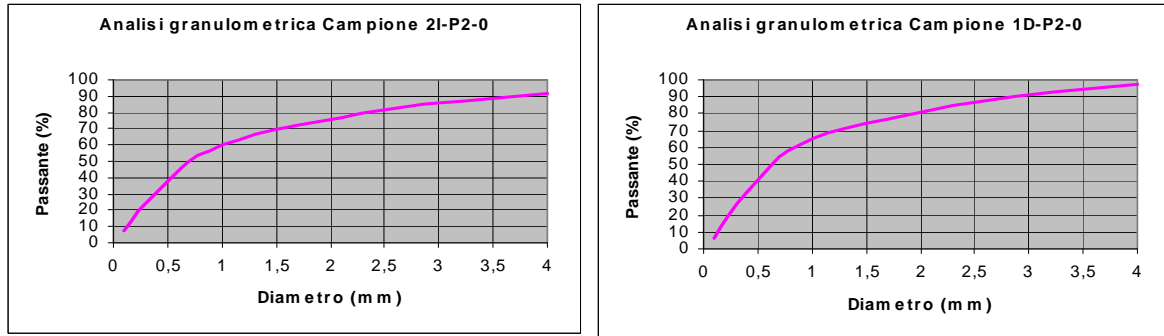


Fig.11,12 – Analisi granulometriche sugli intonaci

Le curve granulometriche riportate nelle figure 11 e 12, evidenziano una percentuale del 6% di passante a 0,09 mm per il campione degradato, mentre lo stesso passante sul campione integro è di circa il 7%.

Tale evidenza, ottenuta per comparazione, mostra una riduzione delle parti fini su entrambi i campioni, ascrivibile alla presenza di umidità e di erosione cui è stata sottoposta la parete in opera.

Analisi diffrattometrica

Le indagini diffrattometriche sono state condotte su due distinte porzioni, la prima ($p=0,09$ mm) rappresentativa del legante, la seconda con granulometria maggiore rappresentativa dell'aggregato.

Dagli spettri riportanti nelle figure seguenti (Fig.13,14), il legante è composto da dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, carbonato di calcio CaCO_3 e da una piccola percentuale di quarzo SiO_2 . Il componente principale nell'aggregato è, invece, la silice cristallina seguita, con quantità meno apprezzabili, dalla dolomite e dal carbonato di calcio.

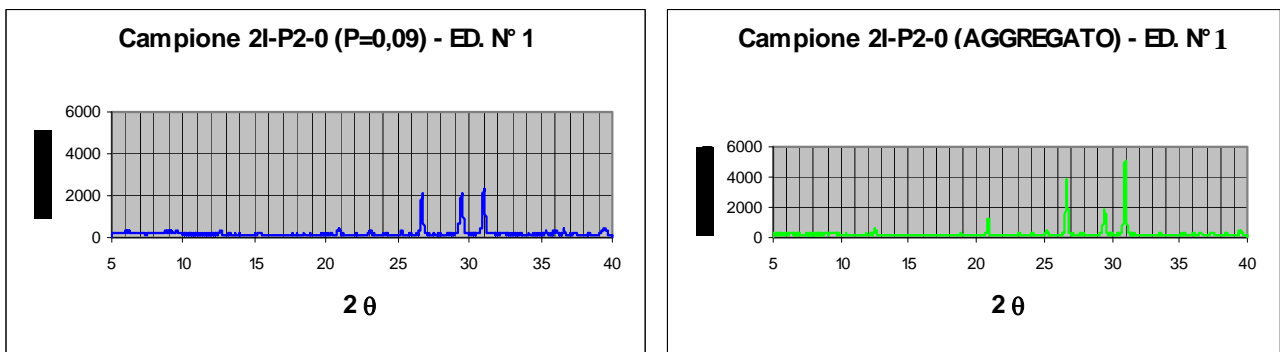


Fig.13,14 – Analisi diffrattometriche sull'intonaco

Analisi termica

Il termogramma relativo al campione 2I- P2-0, mostra che la percentuale di calcare e di dolomite risulta di circa l'84%. Tale percentuale, relativamente bassa, mette in evidenza che anche il campione visivamente integro è stato attaccato dall'azione dell'acqua. Infatti, nelle indagini termiche condotte su altri prelievi di intonaco integro la percentuale di tali sostanze è superiore al 95% (Fig.15).

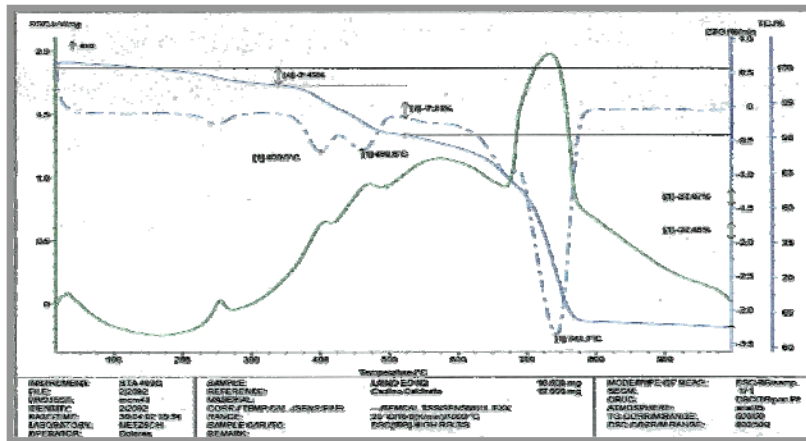


Fig.15 – Analisi termica sull'intonaco

Analisi al microscopio elettronico a scansione

Da quanto è risultato dalle indagini eseguite sugli intonaci (Fig.16,17), nel campione degradato è stata rilevata la presenza di Cloro, Sodio, Ferro, Bromo, Rame e Potassio in piccole percentuali. Tali elementi possono dare origine a composti salini dannosi al materiale e quindi si può desumere che in realtà nella zona in cui è stato prelevato il campione 1D-P2-0 si sta innescando un meccanismo di deterioramento di tipo chimico dovuto ai sali provenienti dal terreno trasportati dall'acqua.

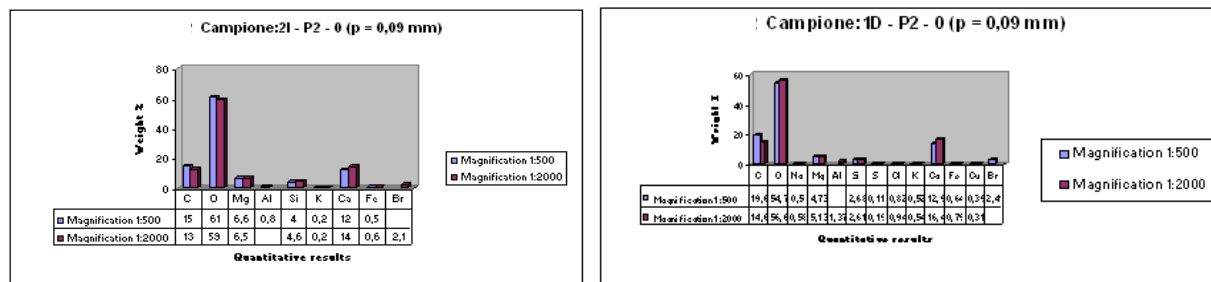


Fig.16,17 – Analisi EDAX su intonaci

3.4 Valutazione delle caratteristiche meccaniche delle murature mediante prove con martinetti piatti

La prova effettuata ha consentito di valutare, per l'immobile oggetto di indagine, le seguenti caratteristiche tensionali e meccaniche:

- 1) Stato di sollecitazione esistente nelle strutture murarie (prove con martinetto singolo): PROVA S1
- 2) Parametri meccanici delle murature (prove con martinetto doppio): PROVA D1

3.4.1 Prova con martinetto singolo

La determinazione della tensione di esercizio è stata effettuata sul prospetto Sud (Fig.18).

Nella tabella seguente sono riportate le tensioni di esercizio ottenute mediante la prova effettuata con martinetto singolo,

dove si è indicato con:

A_m = superficie del martinetto piatto;

A_c = superficie del piano di taglio;

p_m = pressione del manometro corrispondente al ripristino della lunghezza iniziale delle basi di riferimento poste a cavallo del taglio;

σ_e = tensione di ripristino.

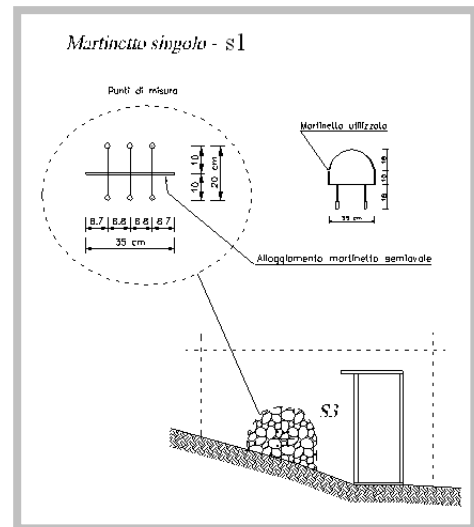


Fig.18-ubicazione altimetrica prova s1

Prova	H_p [m]	A_m [mm ²]	A_c [mm ²]	$K_a = A_m / A_c$	K_m	P_m [MPa]	σ_e [MPa]
S1	0.85	76150	79569	0.957	0.960	0.10	0.092

Tabella 2 - Stato tensionale esistente nella muratura Prova S1

3.4.2 Prove con martinetto doppio.

La prova per la valutazione dei parametri meccanici sulle murature è stata condotta all'esterno dell'edificio nella posizione riportata nella Fig.19.

La misura delle deformazioni è stata eseguita su basi pari a 400 mm, poste ortogonalmente ai tagli in posizione centrale.

Le pressioni lette al manometro e le pressioni corrette sono espresse in **Mpa**, mentre le letture delle basi di misura e degli spostamenti sono espresse in **millesimi di millimetro**.

Di seguito viene riportato il grafico tensione-deformazione ottenuto come media dei valori di deformazione delle tre basi (Fig.20).

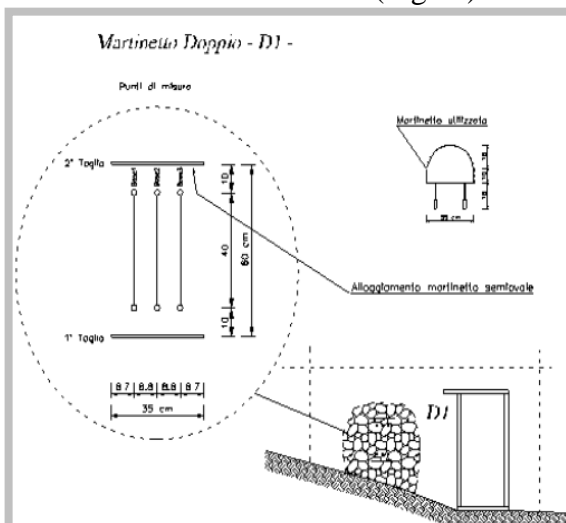


Fig.19-ubicazione altimetrica prova D1

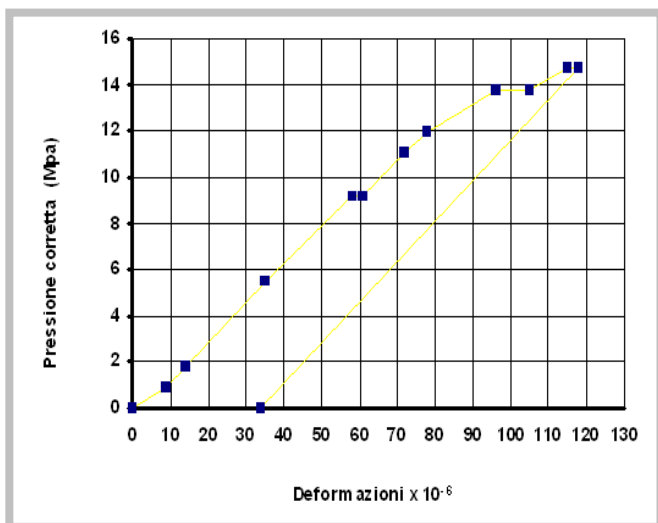


Fig.20 - diagramma pressione-deformazione

I dati ottenuti dalle due prove eseguite, consentono di giungere alle seguenti deduzioni tecniche:

- a) Dalla prova con martinetto singolo si potrà verificare, in base allo stato tensionale in situ, la rispondenza tra il modello di calcolo prescelto e lo stato reale.
- b) Dalla prova con martinetto doppio, saranno noti i moduli di rigidezza da utilizzare nel modello di calcolo, nonché la tensione di prima fessurazione ed ultima.

4.0 Conclusioni

Il protocollo di diagnosi proposto nel presente lavoro, può essere considerato come un utile riferimento per eseguire valutazioni sullo stato di degrado dei materiali e identificare lo stato di consistenza degli edifici in muratura.

Infatti, la disponibilità di valori di riferimento quali il modulo elastico o le tensioni di prima fessurazione ed ultime, rappresentano i dati di partenza per la valutazione del comportamento globale dell'immobile al fine di procedere successivamente ad interventi manutentivi ordinari, straordinari o di adeguamento sismico.

Inoltre, le procedure di tipo sperimentale organizzate sotto forma di protocollo procedurale per lo studio delle malte e delle murature in genere, forniranno ulteriori dati finalizzati alla identificazione delle malte compatibili da utilizzare per gli interventi di consolidamento.

Bibliografia

- [1] A. Broccolo
Malte, intonaci e paste nelle costruzioni e nel recupero
Carocci, Roma 2000
- [2] M. Collepari, L. Coppola
Materiali negli edifici storici: degrado e restauro
Enco, Spresiano (TV) 1991
- [3] UNI EN 1744 – 1
Prove per determinare le proprietà chimiche degli aggregati - UNI, Milano 1999
- [4] UNI EN 196 – 21
Metodi di prova dei cementi. Determinazione del contenuto di cloruri, anidride carbonica e alcali nel cemento - UNI, Milano 1996
- [5] D. A. Skoog, J. J. Leary
Chimica analitica strumentale
EdiSES, Napoli 2000
- [6] D. Romano, “*Analisi del degrado: Protocollo procedurale per la diagnosi degli edifici in muratura*”, Tesi di laurea, Università della Calabria, A.A.2000-2001.
- [7] F. Crea, G. Porco, D. Romano, “*Analisi sperimentale per lo studio dello stato di degrado degli edifici in muratura*”, Conferenza Nazionale sulle prove non distruttive: *Monitoraggio diagnostica*, Ravenna, 2 – 4 Aprile 2003.
- [8] P.P. Rossi
“*Analysis of mechanical characteristics of brick masonry tested by masonry tested by means of non-destructive in situ test*”
Quaderno ISMES, Bergamo.
- [9] P.P. Rossi
“*L’impiego dei martinetti piatti nello studio della muratura*”
Quaderno ISMES, Bergamo.