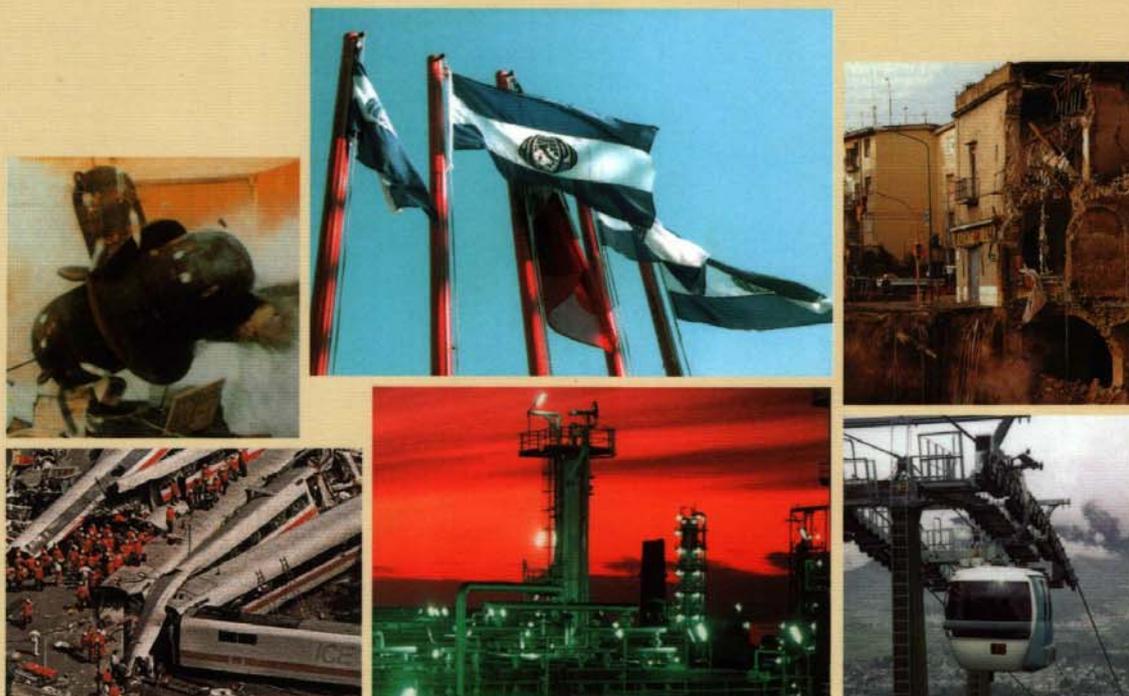




AIPnD

**Associazione Italiana Prove non Distruttive
Monitoraggio Diagnostica**



Ravenna '03 2-4 Aprile

**Conferenza Nazionale
sulle Prove non Distruttive
Monitoraggio Diagnostica**

10° Congresso Nazionale dell'AIPnD

Biennale PnD-MD

Exclusive sponsors



SEMAT

Major sponsor



Analisi sperimentale per lo studio dello stato di degrado degli edifici in muratura

F. Crea*, G. Porco**, D. Romano**

* *Dipartimento di Ingegneria Chimica e dei Materiali, Università della Calabria, Arcavacata di Rende (CS), Italy*

***Dipartimento di Strutture, Università della Calabria, Arcavacata di Rende (CS), Italy*

Sommario

Il crescente interesse per i centri storici, ed in particolare per le strutture a valenza storico – artistica, ha richiesto interventi su manufatti soggetti a stato di dissesto per cause di tipo strutturale e sui quali è altresì presente uno stato di degrado dovuto al tempo ed alle aggressività dell'ambiente circostante [1].

Sulle strutture sono presenti stati degenerativi dei materiali [2] che possono dar luogo a fenomeni diversificati: in alcuni casi inducono semplici alterazioni cromatiche, in altri provocano una riduzione delle caratteristiche di resistenza meccanica, disgregazione o completo disfacimento del materiale.

Appare chiaro che, prima di procedere operativamente al recupero, restauro o al consolidamento di manufatti soggetti ad evidenti stati di degrado, sia necessario eseguire una attenta diagnosi, per identificare le cause che hanno prodotto l'alterazione dei materiali in opera [3], [4], [5], [6].

La possibilità di eseguire un'accurata valutazione sullo stato dei materiali in situ, siano essi di finitura come intonaci o malte di rasatura, o materiali appartenenti alle murature portanti, è perseguibile attraverso indagini di tipo non distruttivo.

Le indagini diagnostiche disponibili sono diverse, tuttavia non è riscontrabile nella letteratura specializzata una metodologia standardizzabile di approccio al problema.

Con riferimento a quest'ultimo aspetto è stato sviluppato il presente lavoro in cui è presentato un protocollo procedurale per la diagnosi del degrado di edifici in muratura. Nella presente nota, illustrate le tecniche di indagine non distruttive finalizzate allo studio del degrado dei materiali, verrà applicato il protocollo proposto ad un caso reale di studio, dove, in particolari condizioni climatiche ed ambientali, si giungerà ad una valutazione dello stato di alterazione dei materiali.

Introduzione

La possibilità di poter eseguire una corretta valutazione sullo “stato di salute” di una struttura esistente è legata a diverse incognite, tali variabili sono naturalmente in misura crescente se l’immobile oggetto di studio, è un edificio di importanza storico – artistica.

Il manufatto perviene a noi portando con sé le trasformazioni subite nel tempo dovute a cause naturali come gli eventi sismici, variazioni di destinazione d’uso e non ultimi gli attacchi dell’ambiente circostante, che il più delle volte alterano completamente i materiali originari, modificandone in modo sostanziale la loro consistenza meccanica.

Lo studio del degrado dei materiali costituisce la base di conoscenza per poter avviare la procedura per la protezione del “bene” dagli attacchi di agenti esterni (ambientali, biologici, chimico – fisici, ecc.) e dall’aggressione di fattori interni al materiale stesso (endogeni del materiale).

La vetustà dei materiali, la loro sensibilità ad agenti inquinanti, la loro vulnerabilità in seguito ad azioni corrosive sono tra le cause più frequenti del degrado di un manufatto.

È necessario quindi, giungere ad una conoscenza profonda dell’edificio sul quale si deve intervenire attraverso una campagna accurata di indagini, rilievi e osservazioni preliminari, il tutto, volto a ricostruire il profilo storico della struttura, ad individuare le modifiche subite, la coerenza degli interventi eseguiti in passato e la loro omogeneità, in modo da poter prefigurare le tipologie dei materiali da impiegare negli interventi di recupero.

Restaurare significa anche usare i materiali più appropriati per ogni tipo di intervento, è fondamentale, quindi, comprendere le cause che possono aver portato al degrado le strutture e individuare, di conseguenza, i requisiti e le prestazioni del materiale da adottare per l’intervento.

Tuttavia l’approccio al problema è ancora oggi, in alcune circostanze, disatteso, per cui spesso vengono proposti materiali e tecnologie di intervento in modo avulso dallo stato di degrado presente e dalle cause che lo hanno generato.

È in questo ambito che si colloca la presente nota nella quale sono contenute alcune procedure di tipo sperimentale, organizzate all’interno di un protocollo di diagnosi e finalizzate ad identificare lo stato di degrado dei materiali strutturali e di finitura di edifici in muratura.

La validazione del protocollo di diagnosi proposto, è stata perseguita mediante una campagna sperimentale di indagini su un caso reale di studio.

1.0. Protocollo di diagnosi dello stato di degrado

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, le tecniche di ripristino ed i materiali preesistenti.

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 dei materiali storici, sul loro degrado, nonché sulla compatibilità tra questi, i materiali e le tecniche di restauro.

Il protocollo di diagnosi nasce da alcune esperienze effettuate dagli autori, e condotte su diverse tipologie di manufatti collocati in ambienti climatici differenti. Ciò ha consentito di proporre la procedura con una validità abbastanza estesa sia per quanto attiene allo stato di alterazione in cui versano i materiali dell’immobile, sia per quanto riguarda le condizioni ambientali circostanti.

La procedura di diagnosi è raccolta in un protocollo (Fig.1) costituita da tre fasi di

indagine:

- Analisi dello stato di fatto;
- Prelievo ed esecuzione di test sperimentali sui materiali degradati;
- Prelievo ed esecuzione di test sperimentali sui materiali integri.

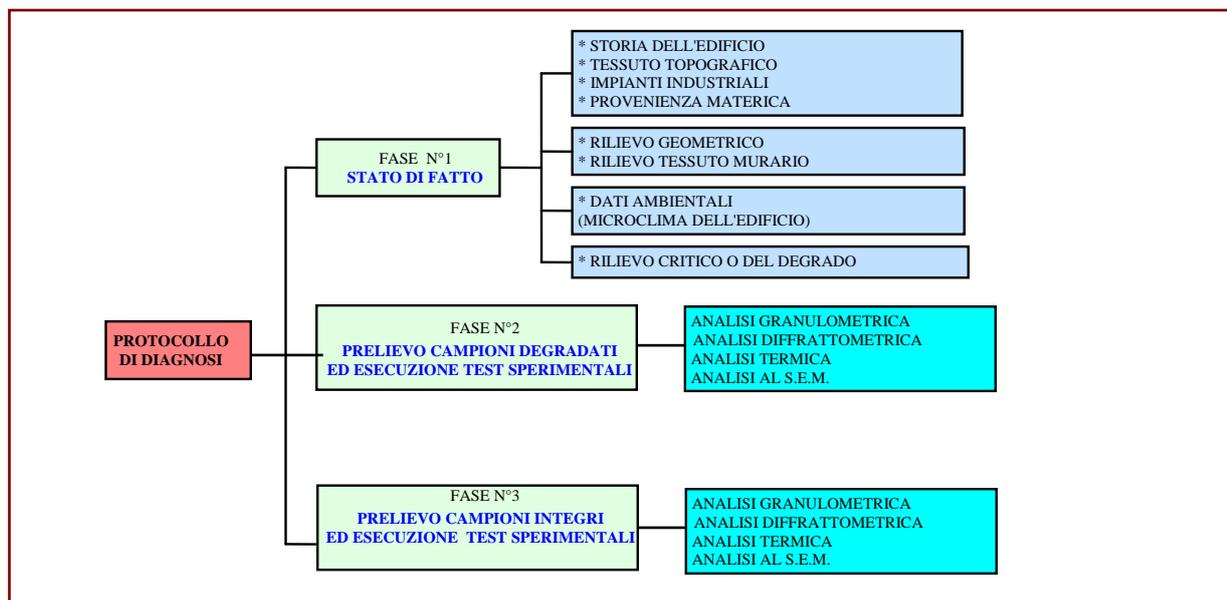


Fig.1 – Schematizzazione del Protocollo di diagnosi

Le informazioni raccolte e/o ottenute mediante indagini in situ e di tipo sperimentali, sono state poi collocate in alcune schede opportunamente predisposte.

La fase di analisi dello stato di fatto è finalizzata all'ottenimento di informazioni su:

- Tessuto topografico, contesto urbano, storia del manufatto ed eventuali interventi di restauro succedutisi nel tempo.
- Distribuzione piano – altimetrica del fabbricato e valutazione dimensionale delle singole membrature strutturali, nonché dei loro dispositivi di collegamento.
- Valutazione dello stato igrometrico della struttura, correlando il comportamento dei materiali e dell'intero organismo strutturale ai parametri ambientali e climatici al contorno (sistema ambiente – costruzione, individuazione zone microclimatiche). L'esposizione all'irraggiamento, alle correnti eoliche, la presenza di specie saline in relazione alla vicinanza alla costa del manufatto, le specie inquinanti in relazione alla vicinanza di impianti industriali individueranno il microclima in cui è collocato l'edificio.
- Diffusione ed entità delle alterazioni. La valutazione visiva delle manifestazioni di degrado potrà essere eseguita agevolmente utilizzando un abaco di riferimento contenente immagini dei degradi più comuni.

La seconda fase potrà essere attuata con riferimento alla zonazione del degrado eseguita sull'edificio con la fase 1. Infatti, identificate e catalogate le zone degradate, si passerà ad eseguire dei prelievi di materiali in numero rappresentativo per eseguire le indagini di laboratorio più idonee.

La terza fase è finalizzata a stabilire e caratterizzare la natura e la composizione dei materiali in opera allo stato integro. L'esecuzione di una comparazione tra le indagini eseguite in fase 2 e le indagini eseguite in fase 3, forniranno elementi oggettivi per stabilire le tipologie del degrado, valutare le cause ed inoltre le indagini della fase 3 costituiranno le basi di progettazione di miscele compatibili. Infatti, i test sui materiali

integri consentiranno di identificare le tipologie e le quantità delle fasi costituenti i materiali in opera.

2.0. Tecniche sperimentali non distruttive di diagnosi

Le indagini finalizzate all'acquisizione di dati certi relativi alle cause che hanno provocato le alterazioni ed alla caratterizzazione fisico – chimica sia dei singoli componenti della struttura muraria sia degli agenti di degrado, sono necessarie alla “costruzione” di un preciso progetto di diagnosi. Per una corretta formulazione di un protocollo diagnostico è indispensabile individuare la natura e la consistenza degli agenti degradanti il materiale eseguendo, come già specificato, molteplici e differenti analisi e prove standard volte alla misura di parametri chimico – fisici. Le indagini sono quindi, finalizzate all'acquisizione di dati sulla natura fisica dei materiali per ciò che concerne la composizione granulometrica (Analisi granulometrica) e alla determinazione qualitativa e semiquantitativa degli elementi costituenti il materiale o i prodotti del suo degrado (Analisi termica, Analisi diffrattometrica e Analisi al microscopio elettronico a scansione). A tal proposito verranno di seguito illustrate le principali procedure sperimentali utilizzate nel protocollo procedurale di diagnosi proposto.

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.

Questi, espressi percentualmente rispetto al peso di tutto il campione analizzato, consentono di calcolare il quantitativo di materiale passante ad ogni staccio. Riportando in un grafico il materiale passante in funzione dell'apertura del vaglio, si costruisce la cosiddetta “curva granulometrica”.

Perché la setacciatura dia risultati riproducibili e quindi comparabili, è necessario che l'operazione sia eseguita in condizioni normalizzate. Le modalità di esecuzione della prova di setacciatura e le caratteristiche delle attrezzature devono essere conformi a quanto riportato 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 (Fig.2) 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.



Fig.2 - Strumento per effettuare l'analisi termica

2.4. Microscopio elettronico a scansione (SEM)

L'analisi al microscopio elettronico a scansione (Fig.3) consente di valutare la morfologia fibrosa, lamellare, compatta, porosa e di eseguire l'analisi chimica puntuale degli elementi atomici mediante la microsonda 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.).

La combinazione dell'analisi chimica e dell'osservazione al microscopio, risulta un efficace mezzo per riconoscere la distribuzione dei vari componenti del campione, di enorme importanza per lo studio della microstruttura.

L'immagine riportata in Figura 4 mostra l'ingrandimento di una elaborazione al S.E.M.



Fig.3 - Microscopio elettronico a scansione

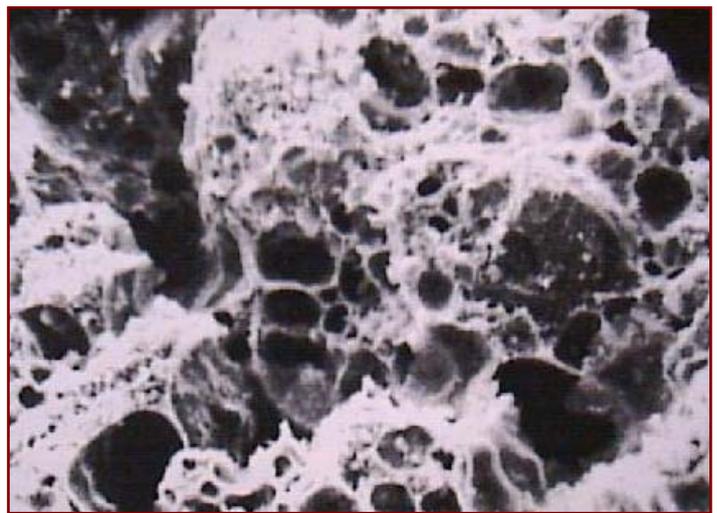


Fig.4 - Intonaco al S.E.M.

3.0. Un caso di studio

Al fine di convalidare l'efficacia del protocollo di diagnosi è stata condotta una campagna sperimentale su alcuni edifici siti nel vecchio Borgo di Laino Castello (CS). Tale centro, risalente al XVIII secolo, è situato su un colle a 400 m s.l.m. (Fig.5) ed attualmente disabitato a seguito di eventi naturali calamitosi eccezionali.



Fig. 5 - Il vecchio borgo di Laino Castello

Gli edifici a cui è stato applicato il protocollo di diagnosi sono stati scelti in base ad interni microclimatici differenti (esposizione ai venti, irraggiamento solare, altezza rispetto agli edifici antistanti, ecc.) in modo da individuare ed analizzare il maggior numero di degradi. Dal punto di vista della tessitura muraria, gli edifici sono realizzati con inerti naturali legati tra loro con malta, in più casi le superfici esterne presentano una protezione con intonaco.

La realtà costruttiva del luogo è stata caratterizzata dall'uso quasi esclusivo della pietra calcarea come materiale da costruzione. A questa apparente uniformità si contrappone l'elevata eterogeneità di questa roccia, la cui composizione mineralogica e quindi anche le caratteristiche fisico – meccaniche variano a seconda dell'ubicazione delle cave e dei siti di provenienza.

Questa eterogeneità si riflette anche sulla diversa risposta dei materiali agli agenti atmosferici, infatti i paramenti murari degli edifici presentano uno stato di degrado diversificato dovuto principalmente all'umidità di risalita e di infiltrazione e su alcune pareti sono presenti, invece, fenomeni di alveolizzazione e proliferazione biologica.

Per quanto attiene agli intonaci, il deterioramento dovuto a distacchi parziali ed erosione, appare particolarmente evidente nella fascia più bassa dei paramenti murari ed immediatamente al di sotto delle linee di gronda.

Una delle principali caratteristiche del luogo è la temperatura rigida che scende spesso al di sotto di 0 °C, per cui si verificano fenomeni di gelo – disgelo causando il distacco dell'intonaco e lo sgretolamento dei materiali sottostanti.

Della campagna sperimentale eseguita, verranno riportate per brevità le indagini effettuate sugli intonaci di un solo edificio (Fig.6).

L'applicazione del protocollo d'indagine ed in particolare della fase 1 ha fornito i dati ambientali e di esposizione delle tre pareti a vista dell'immobile, riportate nella Tabella 1.



Fig.6 – Edificio oggetto di indagine

Legenda dati ambientali								
Esposizione	N	NE	NO	S	SE	SO	E	O
Soleggiamento	ASSENTE (A)		SCARSO (S)		MEDIO (M)		COSTANTE (C)	
Spazio antistante	VICOLO (V)	STRADA STRETTA (SS)		STRADA (St)	PIAZZA (P)	CORTE (Co)	SLARGO (SL)	
Posizione rispetto al mare	PROSPICIENTE (PR)				INTERNA (I)			
Altezza edificio antistante	SIMILE (Sm)			SUPERIORE (Sup)		INFERIORE (Inf)		
Posizione rispetto ai venti	FRONTALE (F)			RADENTE (R)		PROTETTA (Pt)		
Traffico veicolare	ASSENTE (A)		LIMITATO (L)		MEDIO (M)		INTENSO (I)	

EDIFICIO	N° 10		
	P1	P2	P3
Dati ambientali/Parete	P1	P2	P3
Esposizione	E	N	O
Soleggiamento	C	A	S
Spazio antistante	St	V	V
Posizione rispetto al mare	A	A	A
Altezza edificio antistante	A	Sm	A
Posizione rispetto ai venti	F	Pt	Pt
Traffico veicolare	A	A	A
Altro			

Tab.1 – Dati ambientali

L'edificio analizzato presenta distacchi degli intonaci nelle zone umide e in prossimità delle intersezioni tra i muri perimetrali. L'analisi visiva delle zone interessate a fenomeni di alveolizzazione mostra, invece, un'accentuazione del degrado sulle superfici maggiormente esposte ai venti dominanti. Diffusa risulta, anche, l'erosione basamentale degli intonaci per effetto delle correnti eoliche e dell'umidità da risalita, quest'ultima incrementata dal sistema di convogliamento a terra delle acque ormai inesistente.

Le operazioni di rilievo hanno consentito di effettuare su tutte e tre le pareti una mappatura dello stato di degrado, differenziando le zone alterate da quelle potenzialmente integre. Successivamente sono stati eseguiti dei prelievi sia di malte che di intonaci allo stato

integro ed alterato. Con riferimento agli intonaci della parete P2, analizzeremo nel seguito i test sperimentali eseguiti su due campioni di cui uno integro (4I-P2-0) e uno degradato (3D-P2-0) (Fig.7).

Le indagini consistono in prove granulometriche, diffrattometriche, termiche e al microscopio elettronico a scansione.

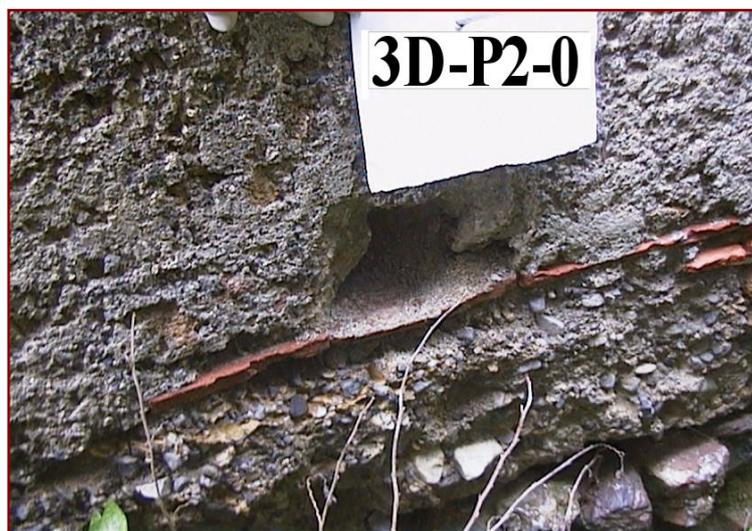


Fig.7 – Punto di prelievo del campione 3D-P2-0

E' necessario, prima di passare ad illustrare i risultati sperimentali, riportare alcune considerazioni effettuate sullo stato del campione degradato:

- L'azione dell'acqua ha provocato un indebolimento del materiale che si è lentamente scollato dal supporto, inoltre, evidenti segni di ruscellamento rilevati sulla parete fanno prevedere alterazioni dovute ad altre sostanze trasportate dall'acqua. Questo aspetto implica ancora un aumento di porosità del materiale, favorendo l'innesco di altre forme di degrado dovuto al

deposito di materiale estraneo (organico ed inorganico) all'interno dei pori provocando così altre patologie.

- Il degrado è altresì amplificato dai cicli di gelo e disgelo che hanno causato nell'intonaco una continua variazione volumetrica, innescando fortissime microtensioni interne, un processo questo, che nel tempo provoca la decoesione di parti superficiali del materiale.

3.1. Analisi granulometrica

Sui campioni prelevati dall'edificio oggetto di studio ed in particolare dalla parete P2, sono state eseguite, previa separazione delle parti, analisi granulometriche. Le analisi riportate nella figura 8, evidenziano una percentuale del 9% di passante a 0,09 mm per il campione degradato, mentre lo stesso passante sul campione integro è di circa il 16%. Tale evidenza, ottenuta per comparazione, mostra una riduzione delle parti fini sul campione degradato a causa dell'azione di dilavamento cui è stato sottoposto in opera.

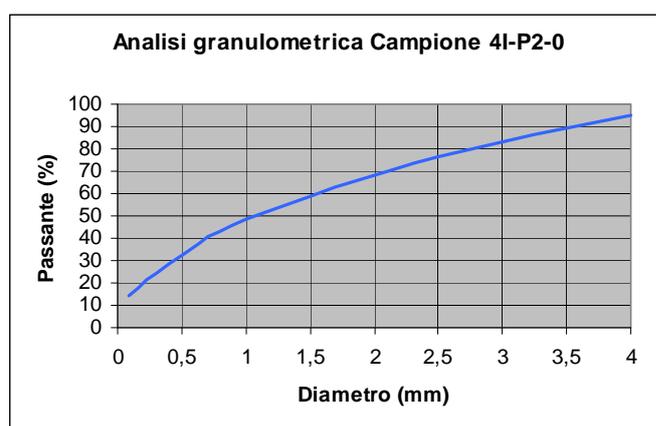
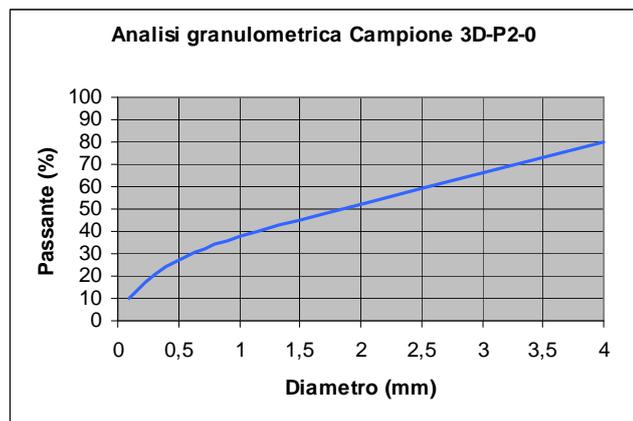


Fig.8 – Analisi granulometriche sugli intonaci

3.2. Analisi diffrattometrica

Dai raggi X effettuati sui due campioni prelevati, è stato possibile risalire ai costituenti base dell'intonaco. Sia l'aggregato che il legante sono di origine calcarea. In particolare il materiale è composto da dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ e da calcare CaCO_3 .

La comparazione degli spettri riportati in figura 9 evidenzia la differente quantità di calcare tra il campione integro e quello degradato. Sul campione degradato è presente una riduzione di carbonato di calcio dovuta all'azione dilavante esercitata dall'acqua. Infatti, i carbonati in presenza di acque piovane o naturali, contenenti CO_2 (acque acide), possono trasformarsi da CaCO_3 (poco solubile) in $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ (solubile) e quindi risultare estremamente dilavabili e facilmente asportabili.

Inoltre nello spettro del campione degradato 3D-P2-0, non è stata rilevata la presenza di composti salini quali solfati, cloruri, nitriti, che avrebbero potuto alterare o danneggiare il materiale.

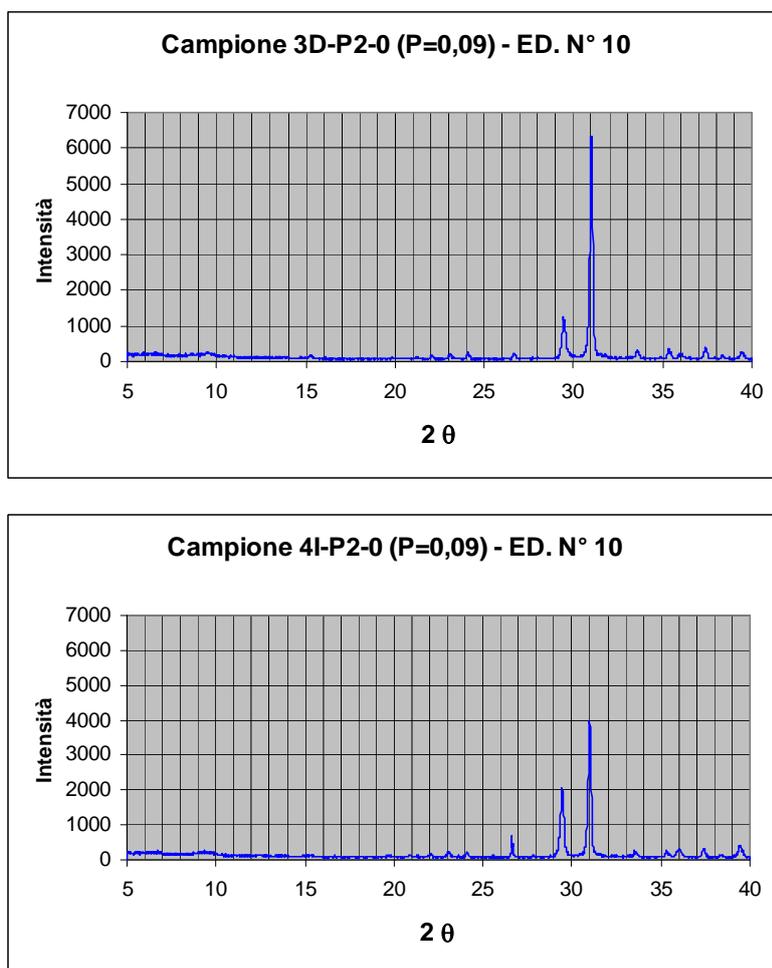


Fig.9 – Analisi diffrattometriche sugli intonaci

3.3. Analisi termica

Anche le analisi termiche effettuate hanno convalidato le risultanze emerse dalle indagini granulometriche e diffrattometriche. Nella figura 10, il termogramma relativo al campione degradato, mostra che la percentuale di calcare e di dolomite risulta di circa l'88%. Nelle altre indagini termiche condotte sul campione 4I-P2-0 e su altri prelievi di intonaco integro la percentuale di tali sostanze è superiore al 95%. Si può quindi affermare che anche in

questo caso tali variazioni percentuali tra i campioni integri e i campioni degradati sono quasi interamente ascrivibili al dilavamento delle acque.

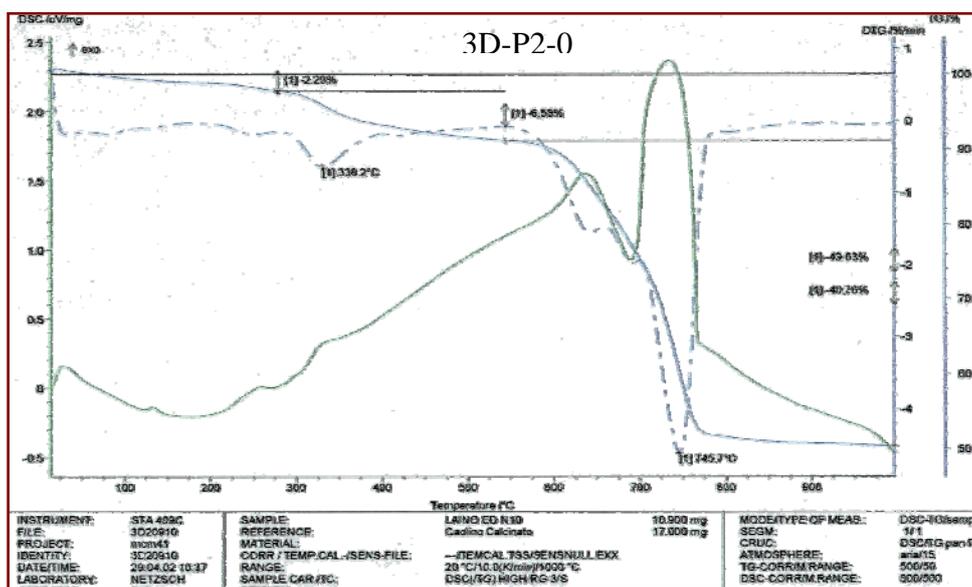


Fig.10 – Analisi termica sul campione degradato

3.4. Analisi al microscopio elettronico a scansione

L'esecuzione delle microanalisi consente di identificare la presenza di elementi chimici nei campioni e, mediante comparazione, stabilire le differenze tra i materiali integri e quelli degradati. Da quanto è risultato dalle indagini eseguite sugli intonaci e i cui risultati sono riportati nella figura 11, nel campione degradato è stata rilevata la presenza di Cloro, Sodio e Potassio in piccole percentuali.

Tali piccole difformità permettono di affermare che la causa del degrado non è ascrivibile alla presenza di sali o di sostanze tali da alterare il materiale, bensì alla sola azione dilavante dell'acqua.

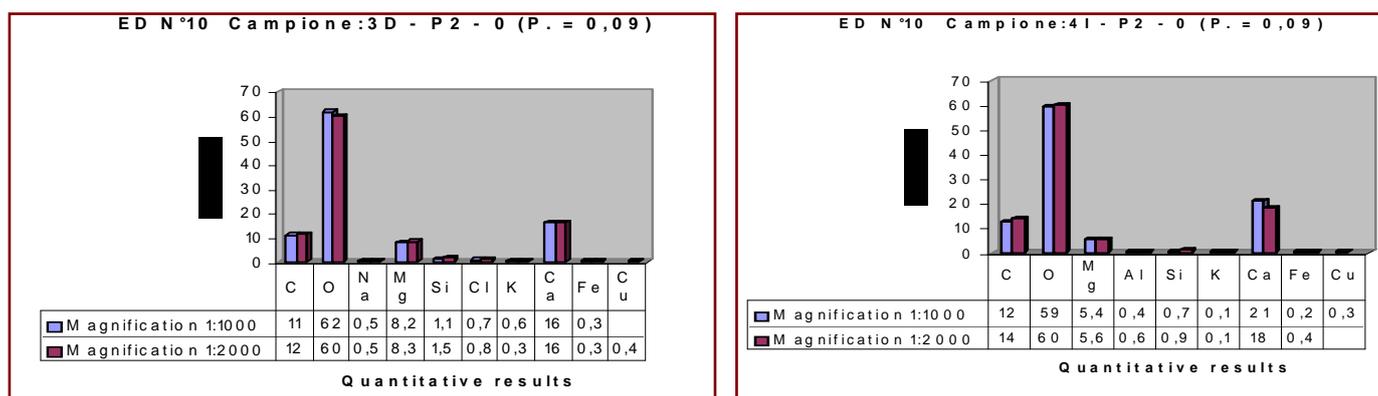


Fig.11 – Analisi EDAX su intonaci

4.0. Conclusioni

Il protocollo di diagnosi proposto nella presente nota, può essere considerato come un utile riferimento per eseguire valutazioni sullo stato di degrado degli edifici in muratura.

Il protocollo, per come riportato nelle pagine precedenti, è basato sull'uso di tecniche sperimentali di indagini non distruttive. I test sperimentali eseguiti sui materiali in opera, offrono elementi di comparazione per stabilire la presenza del degrado e danno utili indicazioni sulla sue potenziali cause. Inoltre, le indagini eseguite sui campioni integri consentono di identificare la composizione delle singole fasi presenti nelle malte in opera, permettendo di eseguire prime valutazioni sulle tipologie dei materiali da impiegare nelle operazioni di restauro.

La campagna sperimentale eseguita, di cui per brevità è stata mostrata solo una piccola parte, costituisce un buon punto di partenza per validare il protocollo proposto. Tuttavia sarà opportuno estendere lo studio ad altri edifici caratterizzati da microclimi, materiali e degradi differenti per procedere ad una taratura in contesti più ampi del metodo proposto.

Bibliografia

1. M. Collepari, L. Coppola, "Materiali negli edifici storici: degrado e restauro", Enco, Spresiano (TV) 1991
2. A. Broccolo, "Malte, intonaci e paste nelle costruzioni e nel recupero", Carocci, Roma 2000
3. S. Tinè, "Codice di pratica professionale per il restauro delle fronti esterne degli edifici, L'esperienza di Ortygia", Dario Flaccovio Editore s.r.l., Palermo 2001
4. C. Arcolao, "Le ricette del restauro", Marsilio Editore s.p.a., Venezia 1998
5. "Manuale del Recupero del Comune di Roma", Tipografia del Genio Civile, Roma 1997
6. "Manuale del Recupero del Comune di Città di Castello", Tipografia del Genio Civile, Roma 1998.