

Tecniche sperimentali per la caratterizzazione meccanica delle murature in situ.

G. Porco*, D. Romano*

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

Sommario

Le tecniche di controllo sperimentale, per lo studio dei costituenti di base e per la valutazione dei parametri meccanici delle strutture murarie, si inseriscono in un ambito di ricerca estremamente attuale.

Il recupero di un immobile passa attraverso diverse fasi quali, la diagnosi, la valutazione della consistenza strutturale, cioè la stima dei coefficienti di sicurezza nello stato reale di conservazione, e naturalmente, attraverso la verifica della efficacia degli interventi di consolidamento, mediante la determinazione dei nuovi coefficienti di sicurezza in funzione delle condizioni di carico imposte dalla normativa vigente. In questo iter procedurale, la identificazione dei parametri meccanici delle murature esistenti, mediante tecniche sperimentali, rappresenta un passaggio obbligato, per poter attuare e finalizzare al meglio tutto il processo di progettazione e di recupero strutturale. È in questo contesto che si inserisce la presente nota, con la quale, illustrate alcune metodologie sperimentali, basate sull'uso dei martinetti piatti, utili alla valutazione delle tensioni ultime e di prima fessurazione, verranno presentati alcuni casi reali di studio di caratterizzazione meccanica in situ.

Introduzione

Oggi è evidente la necessità, da parte degli operatori del settore, di disporre sia, di dati oggettivi per la valutazione dei livelli di affidabilità delle strutture murarie nel loro stato di esercizio, sia di idonee procedure di analisi e di controllo, al fine di procedere alla progettazione del restauro e successivamente al recupero di organismi in muratura [1], [2]. I processi di diagnosi, di progettazione e di recupero, necessitano di informazioni sullo stato di degrado dei materiali, e principalmente sulle caratteristiche meccaniche delle murature.

La procedura di diagnosi, per la valutazione del livello di degrado di un edificio e dei suoi materiali costituenti, è basata principalmente sulla raccolta di dati sperimentali che, unitamente alle informazioni al contorno, di carattere ambientale, climatico, storico, strutturale, consentono di stabilire le cause del dissesto e del deterioramento [6]. 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 e alla caratterizzazione dei costituenti base dei materiali in opera, mentre le seconde da effettuare in situ, individuano i limiti ultimi e i parametri di rigidità delle strutture portanti.

Per quanto attiene invece, alla fase di progettazione finalizzata al recupero strutturale, è necessario procedere ad una prima valutazione della risposta dell'organismo resistente in funzione delle condizioni di carico, previste dalla normativa vigente, eseguendo verifiche locali e globali. La centralità di questa azione è evidente, in quanto solo attraverso una valutazione oggettiva, della esposizione degli elementi strutturali alle sollecitazioni prodotte dalle diverse condizioni di carico, sarà possibile stabilire il tipo di intervento per garantire la fruizione dell'immobile in piena sicurezza. La congruenza del calcolo allo stato reale sarà maggiore se saranno disponibili i valori di rigidità della muratura e i valori della tensione di prima fessurazione e della tensione ultima [8].

Più specificatamente, per ciò che concerne le indagini di tipo meccanico, l'orientamento oggi è quello di procedere con metodologie poco invasive che consentano di valutare tensioni di prima fessurazione ed ultime, nonché moduli di rigidità secanti e tangenti [9], [10]. Le tecniche che consentono questo tipo di investigazioni sono basate sull'uso dei martinetti piatti.

L'accoppiamento di queste indagini con quelle di carattere chimico – fisico, è premessa necessaria per emettere una diagnosi, in quanto, il degrado dei materiali e la valutazione delle potenziali cause è sintomatico del decadimento meccanico di una struttura, ossia esiste una corrispondenza biunivoca tra il degrado dei materiali e il dissesto della muratura di un edificio.

L'intera articolazione del processo di indagini sperimentali, comprensiva delle tecniche NDT utili alla emissione di una diagnosi e propedeutiche alle fasi di intervento, è riportata in un protocollo procedurale proposto dagli autori in [8].

In tale protocollo sono riportate tutte le fasi di tipo sperimentale e di analisi da attuare per poi giungere alla valutazione dello stato di consistenza di un edificio in muratura. Inoltre, viene naturale individuare l'importanza della tecnica dei martinetti piatti, come metodologia base per identificare i limiti meccanici e i parametri di rigidità delle murature.

Pertanto nelle successive sezioni, richiamato brevemente il contenuto del protocollo procedurale, si orienterà l'interesse alle sole tecniche sperimentali di controllo con martinetti piatti, evidenziandone l'efficacia, con una diretta validazione su un caso reale di studio, e rimandando ad eventuali approfondimenti sulla procedura generale di approccio ai riferimenti [7] [8] [9].

Quindi, il presente lavoro è da intendersi come un ulteriore contributo alla identificazione di tecniche sperimentali NDT, idonee alla caratterizzazione meccanica di elementi murari.

1.0. 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, le tecniche di ripristino ed i materiali preesistenti.

In questa ottica è utile disporre di una “procedura di diagnosi che conduca, attraverso metodologie sperimentali, alla valutazione del degrado materico, alla caratterizzazione chimico – fisica dei materiali ed alla determinazione dei parametri meccanici. Ciò al fine di giungere, in modo oggettivo, alla valutazione dello stato di consistenza di un immobile in muratura. In letteratura sono disponibili delle procedure di approccio, ma il più delle volte la metodologia proposta è esclusivamente impostata sulla valenza materica o di contro esclusivamente sulla risposta strutturale, lasciando

l'intersezione delle due fasi alla capacità del progettista. Al fine di disporre di una metodologia che riporti le caratteristiche, necessarie, dei due approcci “materiale” e “strutturale”, gli autori hanno proposto in [8], un protocollo procedurale, attraverso il quale è possibile giungere ad una valutazione di consistenza di una struttura muraria e quindi procedere, con dei riscontri oggettivi, alla progettazione del recupero.

L'articolazione del protocollo procedurale (Fig.1) prevede quattro fasi di indagine:

1. Analisi dello stato di fatto;
2. Prelievo di campioni di materiale visivamente degradato ed integro;
3. Esecuzione di test sperimentali sui campioni prelevati;
4. Caratterizzazione meccanica delle murature in opera.

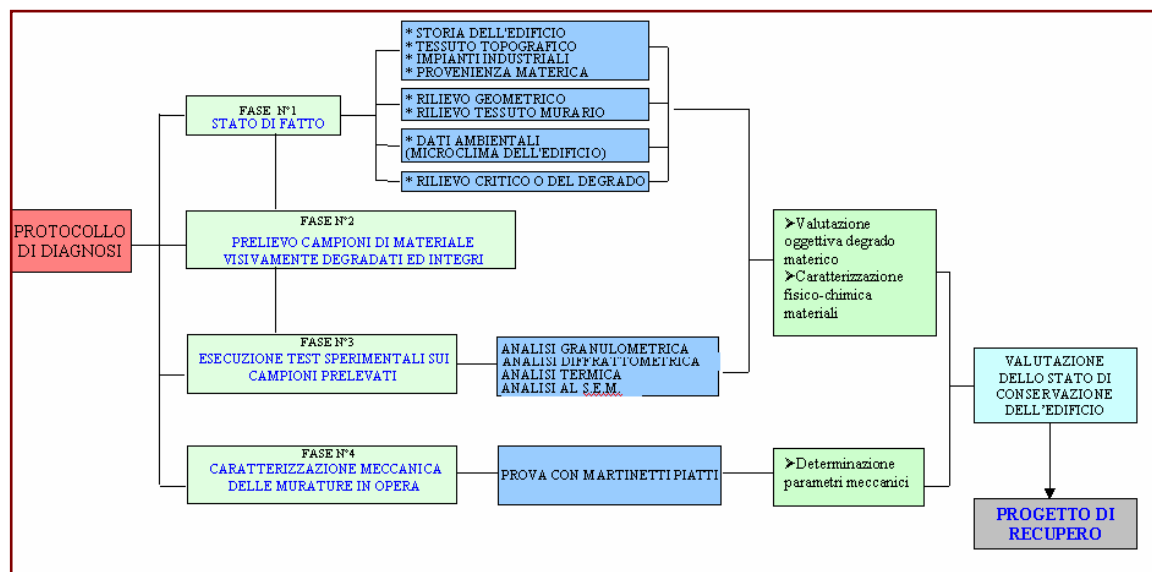


Figura 1- Schema del Protocollo di diagnosi e di valutazione dello stato di consistenza

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

- a) la conoscenza storica del manufatto, ossia la individuazione di quei parametri che vanno acquisiti per conoscere le caratteristiche costruttive in relazione alla data di costruzione, alla tessitura muraria, alla provenienza dei materiali, ai possibili interventi di recupero succedutisi nel tempo e alle forme di degrado di cui è affetto.
- b) la distribuzione piano – altimetrica del fabbricato (rilievo geometrico) e valutazione dimensionale delle singole membrature strutturali, nonché dei loro dispositivi di collegamento (rilievo strutturale).
- c) la valutazione dello stato igometrico 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).
- d) la diffusione ed entità delle alterazioni. La valutazione visiva delle manifestazioni di degrado potrà essere esplicitata mediante una mappatura del degrado.

La seconda fase è attuata con riferimento alla zonazione del degrado eseguita sull'edificio con la fase 1. Infatti, identificate e catalogate le zone alterate, si passerà ad eseguire il campionamento, ossia il prelievo di materiale visivamente integro e degradato in numero rappresentativo per eseguire, successivamente, le indagini di laboratorio.

La campagna di prelievi deve essere accurata, il numero di campioni da prelevare deve essere sufficiente a rappresentare non solo il degrado esaminato, ma anche a caratterizzare fisicamente e chimicamente il materiale costituente la malta e/o l'intonaco. I prelievi da analizzare saranno effettuati non solo sulle zone sulle quali l'alterazione si manifesta con diversa morfologia, ma anche a quote e a livelli diversi, in modo da avere informazioni sull'estensione delle aree da trattare successivamente.

La *terza fase* è finalizzata a stabilire, mediante indagini di laboratorio, la natura del degrado, nonché la sua potenziale causa e a caratterizzare la composizione dei materiali in opera allo stato integro.

Le indagini sono quindi, indirizzate 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).

L'esecuzione di una comparazione tra le indagini eseguite sui materiali degradati e su quelli integri, forniranno elementi oggettivi per stabilire le tipologie del degrado, valutare le cause ed inoltre le analisi eseguite sui campioni integri, costituiranno le basi di progettazione di miscele compatibili. Infatti, tali test consentiranno di identificare le tipologie e le quantità delle fasi costituenti i materiali in opera, permettendo di eseguire prime valutazioni sulle tipologie dei materiali da impiegare nelle operazioni di restauro.

La *quarta e ultima fase*, riguarda la caratterizzazione meccanica delle murature mediante prove con martinetti piatti, ciò al fine di poter controllare il margine di sicurezza tra le tensioni ultime e quelle che si possono generare sulle parti resistenti, per un sisma di progetto, in relazione alla destinazione d'uso dell'immobile. I valori sperimentali ricavati in questa fase, potranno essere utilmente inseriti in un codice di calcolo per valutare la risposta strutturale dell'immobile sotto le diverse condizioni di carico.

Per come già riportato nelle precedenti sezioni, la presente nota è orientata alla valutazione in situ dei parametri meccanici delle murature.

Pertanto, introdotta la tecnica a martinetto piatto, che costituisce una parte del protocollo procedurale, verranno presentati alcuni risultati sperimentali ottenuti in situ, al fine di mostrare l'affidabilità e le qualità di tale tecnica in un processo di recupero di strutture in muratura.

2.0. Caratterizzazione meccanica delle murature in opera: Martinetti piatti

Tra le diverse procedure di indagine finalizzate allo studio dei costituenti e dei parametri di rigidezza delle murature, certamente una posizione di rilievo è occupata dalla tecnica dei martinetti piatti. La tecnica può essere realizzata con martinetto singolo o doppio (Fig.2,3).

Tale metodologia consente di riprodurre in opera una prova a compressione attraverso la quale si possono ottenere moduli di rigidezza e tensioni ultime e di prima fessurazione. Inoltre, consente di misurare sempre in situ l'impegno statico del singolo pannello murario.

In particolare, la prova con martinetto semplice fornirà i valori delle tensioni presenti nel singolo maschio murario, pertanto consentirà al tecnico di verificare l'affidabilità del modello di calcolo adottato per l'analisi strutturale. Per quanto attiene invece, ai valori di tensione di prima fessurazione ed ultima, ottenuti dalla prova con martinetto doppio, con

essi sarà possibile identificare i livelli di sicurezza dell'intera struttura sia nei riguardi dei carichi verticali sia del sisma di progetto.

L'analisi strutturale così condotta evidenzierà i punti di debolezza dell'intero complesso e permetterà di orientare meglio gli interventi di consolidamento.

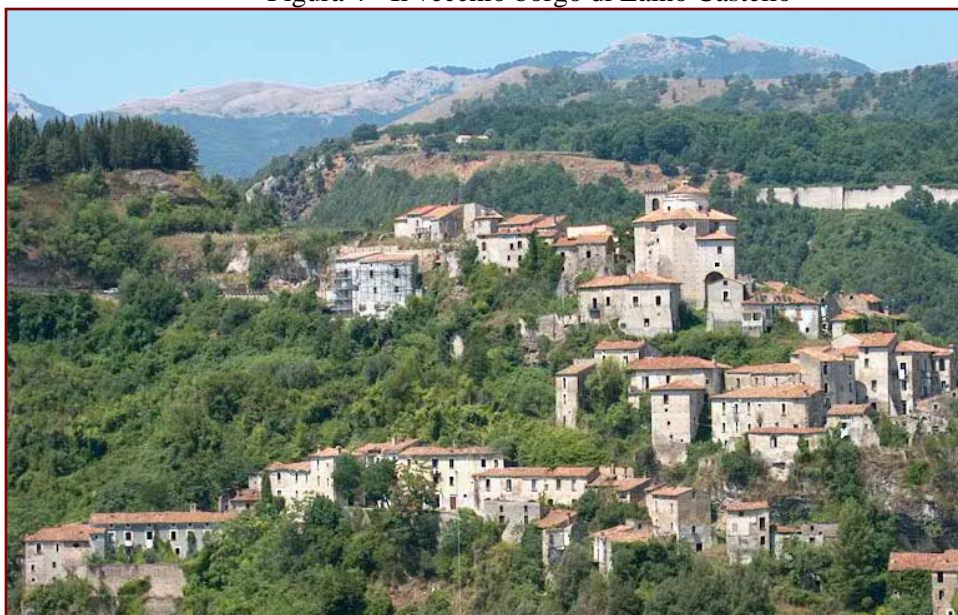


Figura 2.3 – Prova con martinetto singolo e doppio

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

La caratterizzazione meccanica di alcuni edifici in muratura, attraverso la tecnica dei martinetti piatti, è stata effettuata nell'antico Borgo di Laino Castello (CS). Il Borgo, 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. 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.

Figura 4 - Il vecchio borgo di Laino Castello



La disponibilità dell'intero sito ha consentito di studiare diverse tipologie murarie e di caratterizzarle meccanicamente, al fine di disporre di una consistente mole di risultati che, inseriti in una banca dati, serviranno da guida per l'esecuzione degli interventi di recupero sui diversi edifici.

In questo contesto, e relativamente ai soli martinetti piatti, per brevità di esposizione si mostreranno i risultati sperimentali di una campagna di indagine condotta su un solo edificio (Fig.5), mostrando i punti sottoposti a controllo ed i risultati conseguiti.



Figura 5 - Viste dell'edificio

3.1. Campagna sperimentale

L'edificio esaminato è costituito da due corpi con fondazioni disposte su piani sfalsati (Fig.6,7).

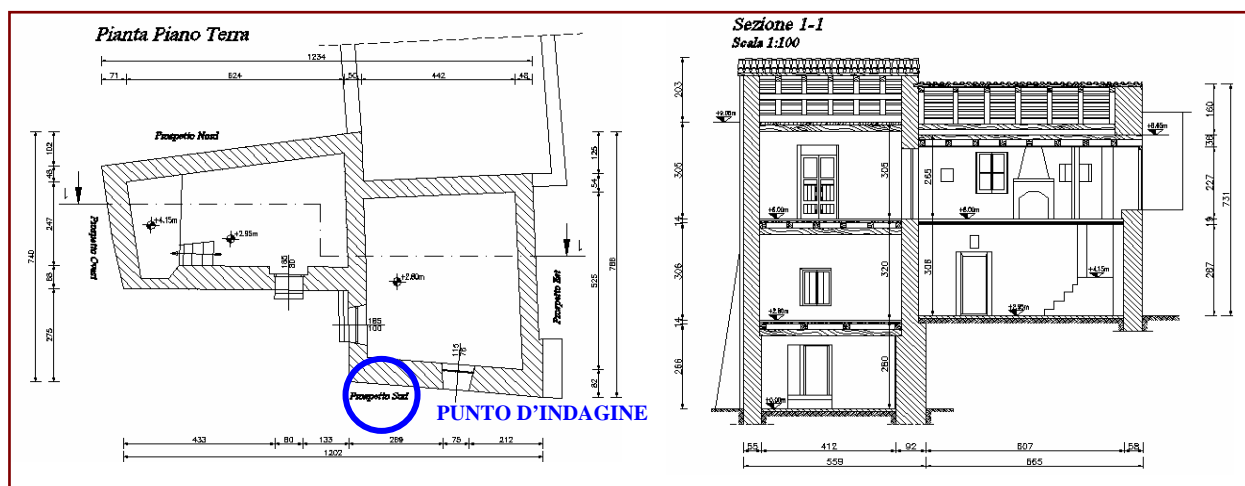


Figura 6.7 – Pianta e sezione dell'edificio

I solai di interpiano sono in legno, realizzati da un orditura composta da travi principali disposte parallelamente al lato minore e travi secondarie disposte ortogonalmente e aventi le testate poggiate sulle travi maestre. Al di sopra delle travi secondarie, parallelamente al lato minore dell'ambiente, sono poggiate una accanto all'altra, le tavole di assito che hanno uno spessore di circa 4 cm.

La muratura è realizzata con elementi di pietra sbozzati, di provenienza locale, legati tra loro con malta. In alcune zone, sono visibili elementi in laterizio o pezzi di coppi, utilizzati per la regolarizzazione della tessitura muraria.

L'edificio risulta intonacato, anche se in alcune zone, lo stato avanzato di degrado ha causato l'inconsistenza e la perdita di adesione del supporto, mettendo a nudo la

muratura sottostante. L'intonaco, infatti, ha perso la sua funzione di protezione divenendo umido e friabile al tatto.

La campagna sperimentale è stata orientata alla valutazione delle seguenti caratteristiche tensionali e meccaniche:

- 1) Misura dell'impegno statico esistente nelle strutture murarie (prove con martinetto singolo)
- 2) Misura dei parametri meccanici delle murature (prove con martinetto doppio)

3.1.1. Prova con martinetto singolo

La determinazione della tensione di esercizio è stata effettuata sul prospetto Sud (Fig.8), in corrispondenza di un paramento murario esterno e ad un metro circa dal piano di fondazione.

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

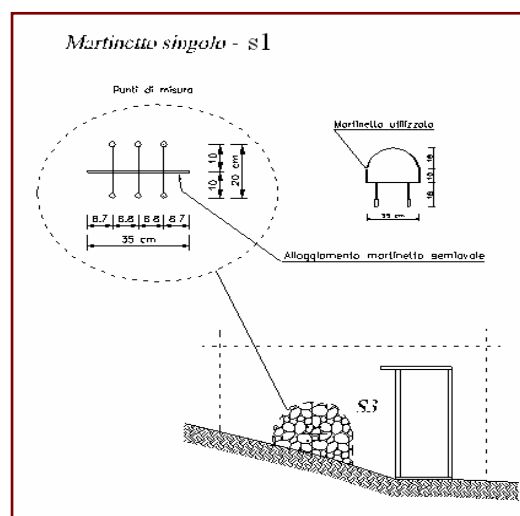


Figura 8-Ubicazione altimetrica prova s1

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 1 - Stato tensionale esistente nella muratura Prova S1

Il valore ricavato sperimentalmente è da ritenersi attendibile, in quanto, il punto di misura è ubicato, rispetto alla sommità della copertura, ad una distanza di circa 8m e lo spessore medio della muratura è pari a circa 60cm.

3.1.2. Prove con martinetto doppio

La prova per la valutazione dei parametri meccanici sulle murature è stata effettuata nello stesso punto prescelto per la prova con martinetto singolo. I dati geometrici sono riportati nella figura 9.

La misura delle deformazioni è stata eseguita su basi di misura 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 relative agli 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.10).

Dalla prova eseguita, è possibile ricavare i moduli all'origine secanti e tangenti per diversi livelli di carico. Inoltre, il diagramma attesta la buona qualità a compressione della muratura che evidenzia limiti di tensione al di sopra dei 1.2Mpa.

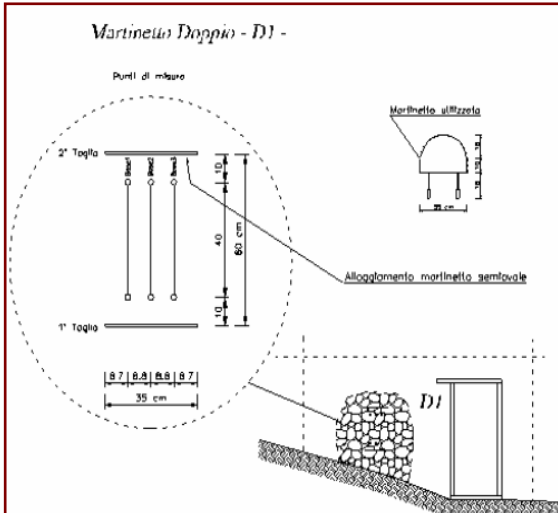


Figura 9-ubicazione altimetrica prova D1

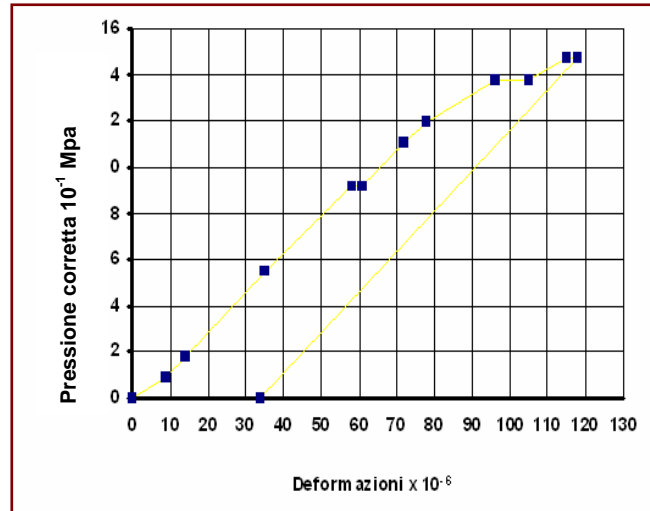


Figura 10 – diagramma tensione-deformazione

4.0. Conclusioni

Da quanto esposto nelle sezioni precedenti, è possibile concludere che, la tecnica dei martinetti piatti costituisce una metodologia sperimentale in situ utile per rilevare dati sulle murature, indispensabili in una procedura di analisi e progettazione di un intervento di recupero.

I valori ottenuti da misure a martinetto singolo sono utili elementi di validazione per i modelli di discretizzazione adottati, e permettono ai tecnici di verificare l'aderenza del modello alla situazione reale. Per quanto attiene invece, alla tecnica con martinetto doppio, da tale indagine è possibile ricavare informazioni circa i legami costitutivi e i limiti tensionali a fessurazione ed ultimi della muratura. Tali dati consentono a loro volta di eseguire delle verifiche di tipo locale e globale mostrando i reali coefficienti di sicurezza dell'intero organismo resistente.

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. G. Porco, D. Romano: “Tecniche NDT per l’analisi dei materiali e la caratterizzazione meccanica di strutture murarie.”, La stadia, (rassegna di informazione tecnica dei geometri di Calabria). (*in corso di pubblicazione*)
9. 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.
10. P.P. Rossi, “L’impiego dei martinetti piatti nello studio della muratura” Quaderno ISMES, Bergamo.