

**LA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DELLE MURATURE  
PARTE PRIMA: PROVE PENETROMETRICHE**

**Lorenzo Jurina**

**[www.jurina.it](http://www.jurina.it)**

**Politecnico di Milano  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale  
Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, Italy**

### **Premessa**

Negli interventi di restauro statico e di consolidamento è fondamentale il rispetto per l'oggetto esistente e perciò la proposta progettuale deve comportare il minimo disturbo e deve essere basata su una comprovata necessità. Ne discende che la soluzione adottata deve essere strettamente correlata alle conclusioni diagnostiche ottenute da una accurata analisi del manufatto. Tale analisi sfocia usualmente in un modello di calcolo (più o meno raffinato) in grado di fornire risposte sull'attuale grado di sicurezza dell'edificio e quindi sulla necessità o meno di intervenire con correttivi passivi o attivi.

La formulazione del modello interpretativo, come sempre nei problemi riguardanti le costruzioni, necessita di informazioni relative alla geometria della struttura, ai carichi cui è sottoposta ed alle caratteristiche dei materiali che la costituiscono.

Quest'ultimo aspetto, vale a dire la caratterizzazione meccanica dei materiali, risulta spesso di gravosa soluzione nel caso di edifici antichi e soprattutto nel caso di murature in laterizio o pietra, talora molto eterogenee.

Il prelievo di numerosi campioni da sottoporre a prove distruttive in laboratorio risolverebbe il problema ma l'approccio risulterebbe proibitivo in termini di costi, poco affidabile a causa dei disturbi arrecati al campione durante il prelievo ed il trasporto ed impossibile da effettuare quando la struttura abbia una rilevanza storica che ne vieti qualunque danneggiamento, anche a scopo diagnostico.

Va aggiunto inoltre che la eterogeneità intrinseca del materiale muratura impone l'esecuzione di prove su campioni di dimensioni ragguardevoli, il che rende ancora più improponibile la soluzione dei prelievi.

Vanno pertanto adottate tecniche alternative di indagine non distruttiva. Tra queste, le indagini soniche, ad esempio, forniscono una valutazione della densità delle murature e quindi, indirettamente, della loro resistenza ma, benché utili, rapide e poco costose, vanno utilizzate precipuamente per definire zone tra loro omogenee da sottoporre poi a metodi di indagine in grado di fornire in modo diretto i parametri che descrivono il comportamento meccanico delle murature.

Nella presente memoria, divisa in tre parti, verranno analizzate alcune tecniche di prova, (certo non esaustive delle possibilità oggi disponibili) utili a definire le caratteristiche meccaniche delle murature. Verranno analizzate diverse categorie di prove diagnostiche che si differenziano tra loro per il fatto di riferirsi a campioni caratterizzati da una diversa scala geometrica. Le prove penetrometriche si riferiscono alle componenti elementari della muratura, vale a dire il singolo mattone e il singolo strato di malta interposta tra i mattoni. Le prove con martinetti piatti e le prove soniche si riferiscono a campioni che contengono un numero statisticamente significativo di componenti elementari (diciamo da 10 a 50), le prove dinamiche si riferiscono a campioni che coincidono con tutta o con buona parte della la struttura muraria sotto indagine.

## A) -STRUMENTI “A PERCUSSIONE” PER LA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DELLE MALTE

Negli ultimi decenni sono stati proposti vari strumenti per la caratterizzazione meccanica delle murature che si basano su sollecitazioni puntuali di carattere statico o dinamico applicate alle malte o ai mattoni.

Ne illustriamo alcuni tra i più noti ed utilizzati.

### A)- Lo sclerometro a pendolo.

La prova consiste nel far cadere una massa contro la superficie muraria da analizzare, dopo di che o si analizza la traccia lasciata dalla massa sulla superficie oppure si osserva il rimbalzo della massa stessa dopo l'urto.

Lo sclerometro è formato da un supporto che viene posto sulla muratura e che mantiene in posizione il pendolo. L'altezza di caduta della testa di pendolo può essere variata, cambiando gli angoli di caduta:

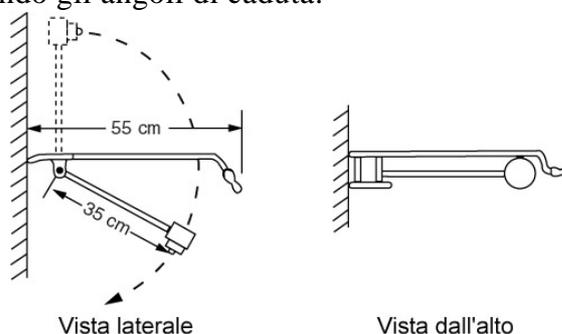


Figura 1: Schema di funzionamento dello sclerometro a pendolo.

La misura del diametro e della profondità della traccia permettono di risalire, tramite apposite tabelle alla resistenza alla penetrazione e di compressione del materiale esaminato.

Lo sclerometro a pendolo, nato per valutare elementi in calcestruzzo, è stato modificato da Van Der Klugt per essere utilizzato sui giunti di malta delle murature in mattoni. Il principio di funzionamento e di lettura dei dati si basa sul rimbalzo della massa battente dopo l'urto con la superficie da esaminare.



Figura 2: Sclerometro a pendolo con modifiche di Van Der Klugt.

### B)- La Sonda Windsor.

Il metodo di penetrazione con sonda Windsor consiste nella valutazione della resistenza del mattone in situ mediante la misurazione della profondità di penetrazione raggiunta da una speciale sonda. La profondità di penetrazione è inversamente proporzionale alla resistenza della muratura.

La strumentazione comprende una pistola con carica esplosiva opportunamente dosata che consente la penetrazione della sonda.



Figura 3: Strumentazione per la prova di penetrazione con sonda Windsor.

### C)- Penetrometro di Liberatore e Spera

La prova penetrometrica sui giunti di malta proposta da D. Liberatore e da G. Spera quantifica le caratteristiche meccaniche delle malte mediante microdistruzioni del materiale con un penetrometro costituito da una massa battente che, spinta da una molla tarata, agisce su un tamburo al quale è collegata la punta preposta alla perforazione. Il tutto è contenuto all'interno di un sistema di due cilindri cavi di acciaio; quello esterno è delimitato da una chiusura posteriore, nella quale è avvitata un'asta filettata che spinge il cilindro interno, e da una chiusura anteriore nella quale scorre il tamburo.

Al procedere della perforazione, l'intensità del colpo rimane costante grazie al sistema dei due cilindri coassiali che vengono traslati l'uno rispetto all'altro dopo ogni colpo, permettendo di riportare la massa battente a contatto con la testa del tamburo. L'intensità dell'energia cinetica fornita alla massa ad ogni colpo può essere regolata.

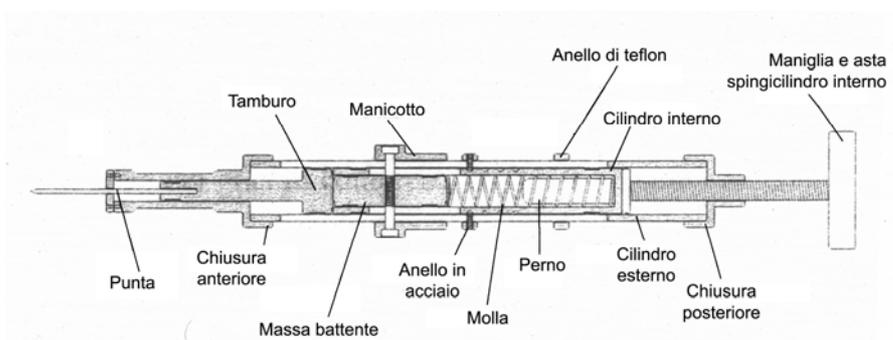


Figura 4: Schema dell'apparecchiatura.

La punta ha un diametro di 3 *mm* ed è dotata di estremità tronco-conica con angolo di 25° e diametro minore di 0,5 *mm*. Il contatto di tutte le parti destinate a scorrere tra loro è realizzato mediante anelli in teflon che hanno il duplice scopo di minimizzare l'attrito durante lo scorrimento e di mantenere gli elementi costituenti perfettamente in asse all'interno del cilindro.

Al crescere del carico verticale, e mantenendo invariate altezza del giunto e granulometria, il numero di colpi per millimetro di penetrazione (SPU) aumenta in maniera pressoché lineare.



Figura 5: Foto dell'apparecchiatura durante una prova in situ.

#### **D)- Penetrometro di Felicetti e Gattesco**

Lo strumento proposto da R. Felicetti e N. Gattesco è basato sulla profondità di penetrazione nella malta di una sonda di acciaio ad ogni colpo esercitato da uno sclerometro calibrato.

L'apparecchiatura consiste in un cilindro cavo in cui un secondo cilindro ha la possibilità di scorrere liberamente. Il cilindro interno appoggia ad un estremo contro la sonda che penetra nella malta. L'altro capo del cilindro interno viene colpito dalla battuta dello sclerometro, trasmettendo l'urto all'asta di penetrazione. All'asta, di diametro di 3 *mm*, viene applicata una punta di diametro leggermente maggiore (4 *mm*) per limitare al massimo l'attrito laterale. Al cilindro esterno sono applicati tre supporti radiali con cui, tramite tre appoggi a vite, si garantisce la direzionalità della prova durante le battute.

La registrazione dei dati avviene inserendo, in un'apposita scanalatura una striscia di carta millimetrata su cui, tramite un ago azionato a molla ad ogni battuta viene marcato l'incremento di profondità.

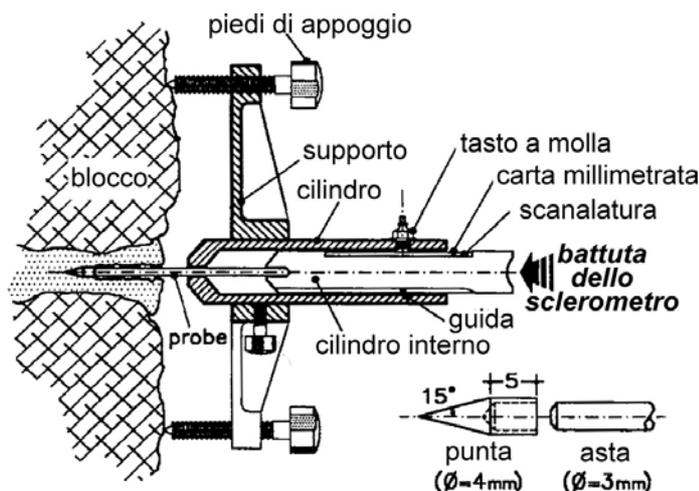


Figura 6: Schema dell'apparecchiatura.

### E)- Un nuovo penetrometro (R.Felicetti - 2006)

E' stato predisposto recentemente da R.Felicetti un nuovo strumento per rilevare la resistenza della malta nelle murature attraverso una prova penetrometrica in situ. Ne sono precursori la prova penetrometrica dinamica (SPT, Standard Penetration Test) che è una prova discontinua, usata per trarre informazioni sullo stato di addensamento e sulla resistenza alla penetrazione dei terreni. L'indagine consiste nell'infissione, sul fondo di un foro predisposto a profondità prefissata, di una punta standardizzata conica.

Il principio su cui si basa la prova intuitivo: la punta, per penetrare nel terreno, deve crearsi dello spazio spingendo e comprimendo il materiale di lato .

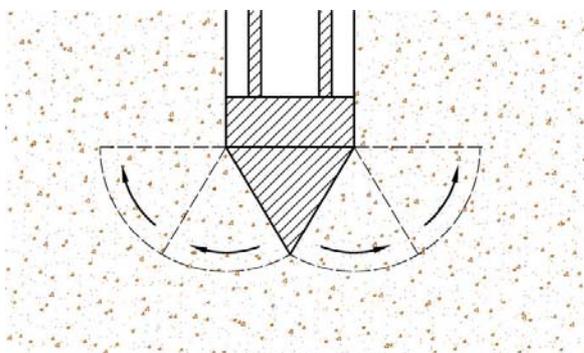


Figura 7: Schema del principio della SPT.

La resistenza alla penetrazione viene misurata attraverso la somma del numero di colpi necessari all'avanzamento nei vari tratti.

Su questa stessa idea si basa la tecnica diagnostica proposta da E. Giuliani e A. Gubana per la valutazione di resistenza del legno. Un precursore è costituito dal Pilodyn, uno strumento a massa battente che misura la durezza superficiale.

Il test consiste nel far penetrare nel legno un'asta graduata d'acciaio tramite un martello a molla. Si potranno così avere informazioni dello stato del legno al suo interno. Particolare attenzione è dedicata al problema dell'attrito laterale durante gli

spostamenti tra legno e acciaio dell'asta. Infatti questo attrito può avere un valore elevato falsando i risultati ottenuti all'aumentare della profondità di penetrazione.

Il metodo proposto si basa sulla penetrazione di aste graduate di 3 mm di diametro azionata da colpi da 2.2 J. L'energia dissipata nel colpo si è rilevata particolarmente appropriata in quanto su un legno duro l'asta avanza di circa 1 mm a colpo, rendendo possibile investigare fino ad una profondità di circa 10 cm.

Sono state effettuate numerose prove utilizzando aste di forma diversa su uno stesso blocco di legno:

- asta (a) di diametro 4 mm dal profilo normale;
- asta (b) di diametro 4 mm con un estremo appuntito;
- asta (c) di diametro 3 mm con un estremo di diametro di 5 mm
- asta (d) di diametro 3 mm con applicato ad un estremo una punta di diametro maggiore (4 mm).

La punta che rende praticamente nullo l'attrito laterale è l'ultima descritta.

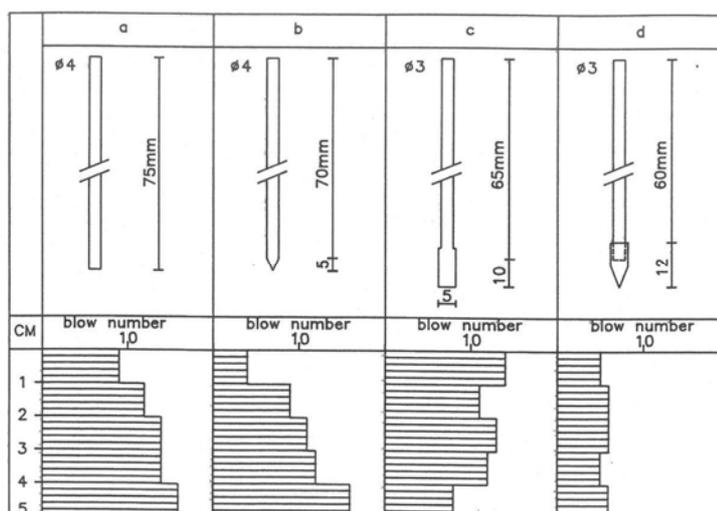


Figura 8: Risultati delle prove e punte provate.

La punta è solo appoggiata all'asta. Mentre la punta talora si perde, l'aste viene recuperata facilmente al termine di ogni prova. Per risolvere il problema di instabilità dell'asta durante la battuta è stato utilizzato un acciaio armonico ad alte caratteristiche meccaniche. E' stato previsto un apposito connettore per collegare l'asta all'estremità di un normale sclerometro battente, ampiamente diffuso tra i tecnici che si occupano di calcestruzzi.

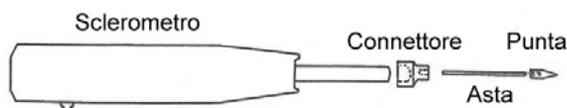


Figura 9: Schema dell'attrezzatura.

Il nuovo strumento proposto per eseguire prove penetrometriche nei giunti di malta in situ si basa sul conteggio dei colpi, applicati ad energia costante, necessari per far penetrare la sonda di una profondità assegnata.

Una caratteristica ricercata durante tutta la progettazione è stata la semplicità di esecuzione della prova, per questo è stato scelto, come erogatore di colpi, lo sclerometro. Questo apparecchio permette di trasmettere colpi di energia costante e nota in tutte le direzioni, è maneggevole e poco ingombrante. Sono state predisposte aste di lunghezze differenti (6, 8 e 10 *cm*) per eseguire indagini a profondità diverse. Ogni asta è graduata in centimetri partendo con la misurazione dalla fine della parte inclinata della punta. L'asta e la punta vengono bloccati insieme tramite l'utilizzo di una colla cianoacrilica, in modo che finita la prova, durante l'estrazione della sonda la punta venga recuperata.

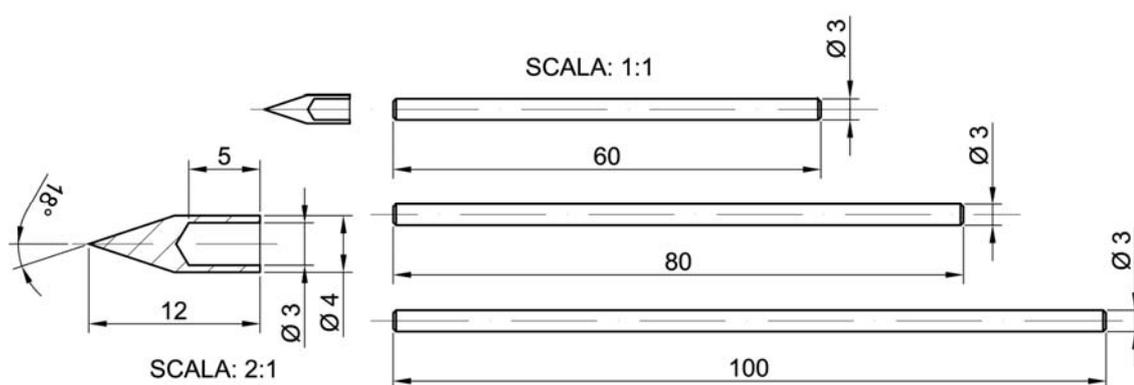


Figura 10: Schema delle sonde progettate.

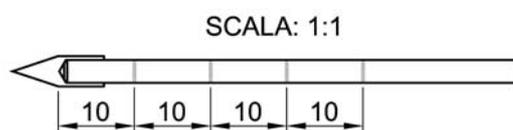


Figura 11: Schema della graduazione della sonda.

Per connettere lo sclerometro alla sonda, si è deciso di modificare direttamente l'asta di percussione, che è una parte dello sclerometro velocemente intercambiabile in quanto collegata a pressione all'asta di scorrimento. Le modifiche consistono in un allungamento della stessa, mediante saldatura di un cilindro di diametro leggermente inferiore, con un foro assiale passante di diametro di 3 *mm* in cui si inserirà l'asta della sonda. Il foro è stato pensato passante in modo che l'astina durante il colpo appoggi sulla superficie dell'asta di percussione, che è costituita da acciaio appositamente trattato per resistere agli impatti ripetuti.

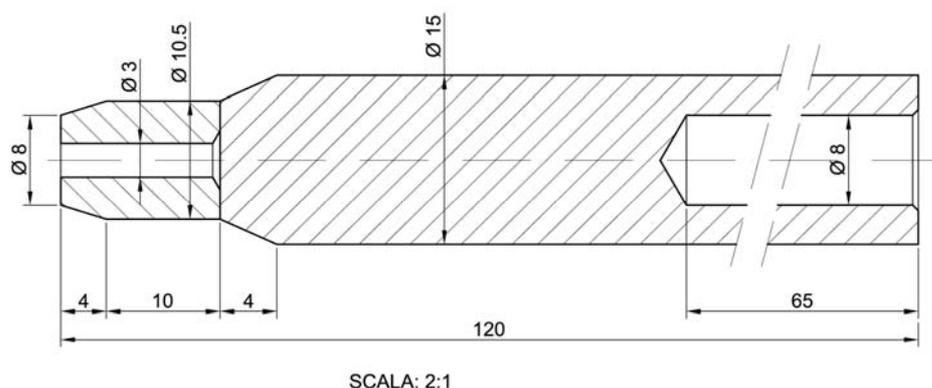


Figura 12: L'asta di percussione dopo le modifiche.



Figura 13: L'asta di percussione con la sonda.

Per registrare i risultati della prova vengono annotati i colpi necessari per ottenere una penetrazione di 1 centimetro.

I risultati vengono poi riportati mediante istogrammi in cui sull'asse delle ascisse viene riportata la profondità di riferimento di ciascun dato, e sull'ordinata il numero di colpi necessario per superare la stessa profondità.

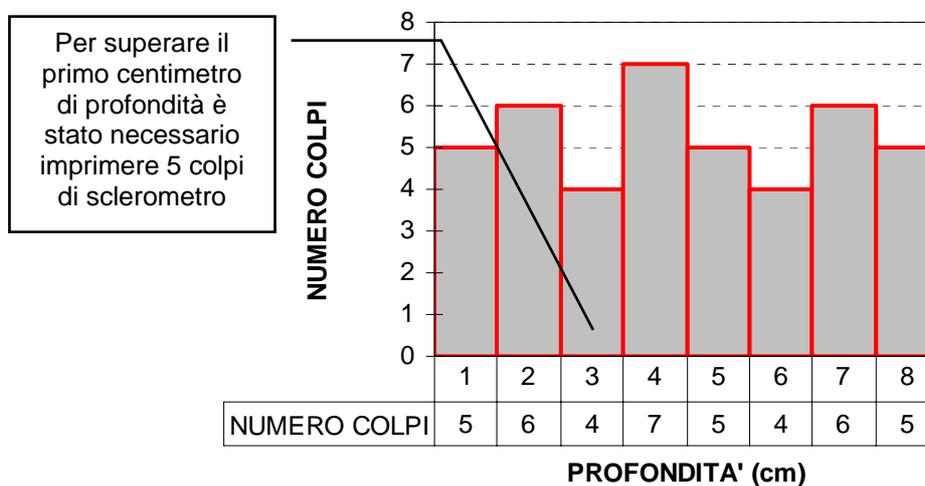


Figura 14: Istogramma utilizzato per descrivere i risultati.

Un altro modo per riportare i risultati è un diagramma in cui l'ordinata riporta il numero totale dei colpi durante la penetrazione del giunto e in ascissa la profondità raggiunta, così che la pendenza della linea indica la resistenza a penetrazione in quel tratto.

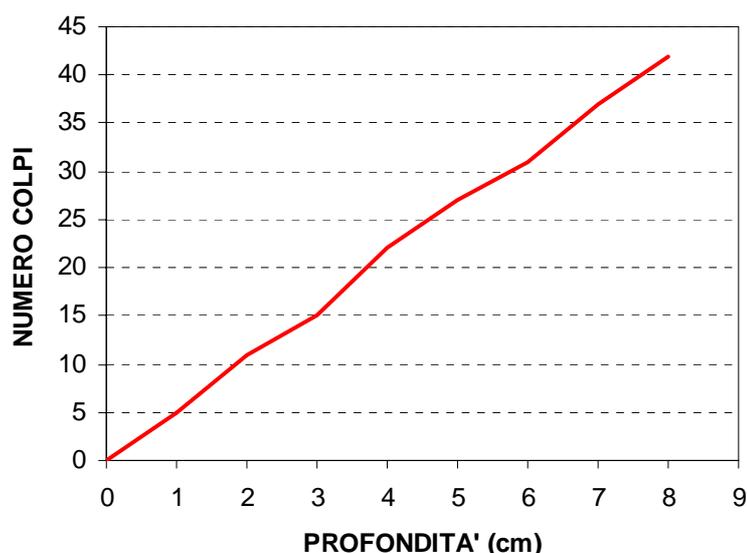


Figura 15: Diagramma utilizzato per riportare i risultati.

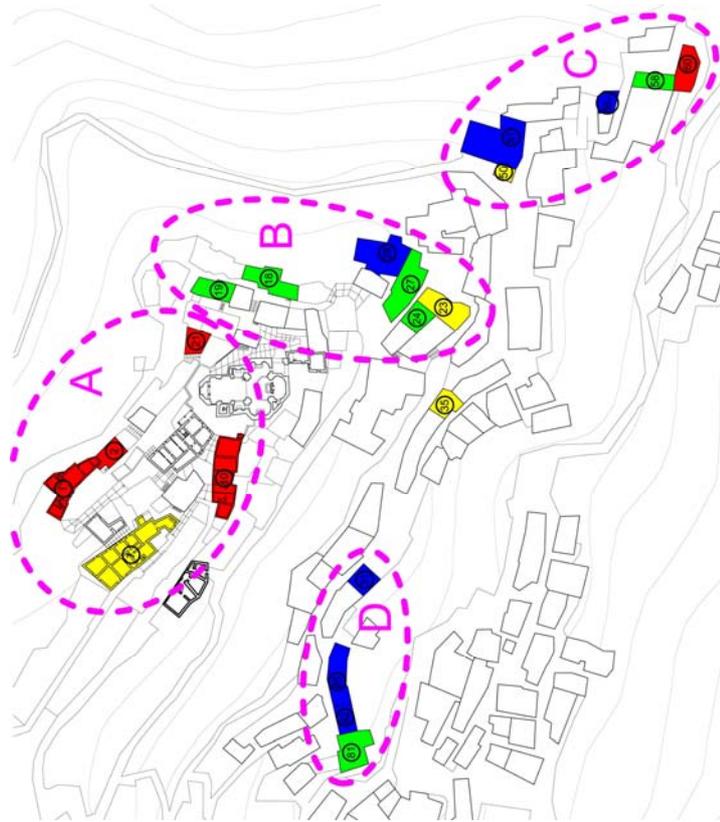
La strumentazione è stata recentemente adottata durante una campagna diagnostica particolarmente estesa, condotta sotto la direzione dell'autore (nell'ambito di un progetto PRIN) sulle murature del paese di Laino Castello (Cosenza). Le prove hanno fornito i risultati riportati in figura che hanno consentito di caratterizzare quattro zone del paese stesso, diverse per caratteristiche della malta, evidentemente costruite in periodi successivi e pertanto con materiali o tecnologie diverse.

Malgrado i molti vantaggi, lo strumento presenta alcuni difetti tra cui:

- la lettura non sempre agevole dei risultati della prova;
- la necessità di due operatori, uno che aziona lo sclerometro e uno che annota i risultati;
- la scala dei risultati troppo poco sensibile;
- la restituzione grafica dei risultati.

Queste considerazioni hanno condotto a recenti modifiche sempre nell'ipotesi di consentire la semplicità di esecuzione della prova e acquisizione dati, la maneggevolezza dello strumento, il tutto con un costo limitato.

Si è optato per aggiungere allo strumento un semplice sistema di lettura e acquisizione dati costituito da una lama flessibile in acciaio armonico sagomata a V. Le parti terminali della lama sono state forate per accogliere l'asta di penetrazione e sagomate per un contatto ottimale col percussore dello sclerometro e la superficie del muro. Le deformazioni del riduttore vengono misurate con quattro estensimetri applicati in vicinanza della piega (due sul lato esterno; due sul lato interno). Una semplice operazione di taratura ha consentito di ottenere una misura automatica della penetrazione della sonda.



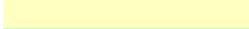
LEGENDA	< 3 colpi/cm	
	3 ÷ 4 colpi/cm	
	4 ÷ 5 colpi/cm	
	> 5 colpi/cm	

Figura 16: La mappatura degli edifici su cui sono state effettuate le prova



Figura 17: Immagine dello strumento modificato, vista generale.

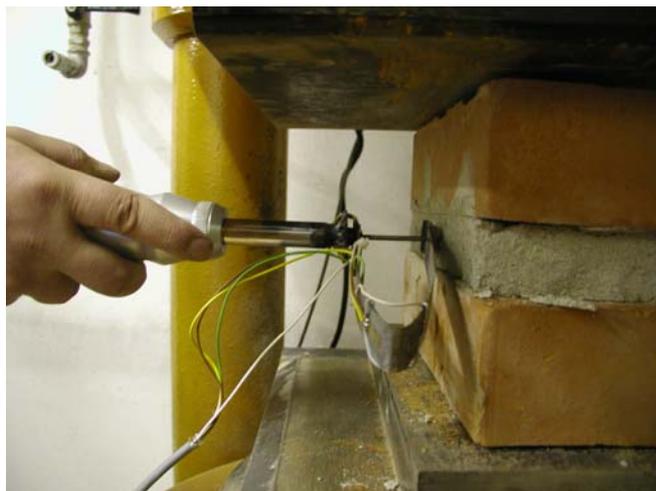


Figura 18: L'esecuzione della prova penetrometrica

## **B)- STRUMENTI “A ROTAZIONE” PER LA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DELLE MALTE**

Uno strumento a cui va riconosciuto un ruolo di precursore per la caratterizzazione delle malte mediante strumento a rotazione, con misura dell'energia necessaria per la penetrazione della punta, è costituito dal Resistograph, utilizzato da alcuni anni per le misure su elementi lignei.

Il Resistograph è uno strumento di indagine non distruttivo ideato e sviluppato in Germania da F. Rinn, originariamente messo a punto per la prova dei legni dolci in Europa. La prova si basa sul principio della resistenza alla perforazione opposta dal legno indagato. Tale resistenza viene valutata attraverso la misura dell'energia impiegata dallo strumento per consentire l'avanzamento di una sottile punta di acciaio dello spessore di circa 3 mm a velocità costante. Lo strumento ha una particolare punta che fa sì che la resistenza alla perforazione sia concentrata sull'estremità dell'ago, dal momento che quest'ultima ha uno spessore doppio rispetto allo stelo. Il motore dello strumento garantisce una velocità costante di penetrazione dell'ago; è possibile adattare tale velocità alle specifiche caratteristiche di densità del legno da esaminare. La prova con il Resistograph viene eseguita sul legno con un particolare trapano registratore che, mentre imprime la rotazione di una punta a tagliente di diametro assai contenuto (3mm), produce un lento avanzamento della punta stessa all'interno del legno. Su un apposito diagramma viene visualizzata la resistenza che l'utensile necessita per effettuare il foro cilindrico. In questo modo si ottengono diagrammi che forniscono, in funzione della profondità man mano raggiunta della punta dello strumento, le differenti qualità del legno attraversato. Il Resistograph con un avanzamento a velocità costante può attraversare interamente sezioni di apprezzabile spessore (fino a 40 cm), senza lasciare apprezzabili segni visibili esternamente. Per questo motivo il sistema è conveniente ad indagare anche elementi di particolare qualità per lavorazione o decorazioni presenti.



Figura 19: Resistograph.

La resistenza alla perforazione è concentrata sulla punta dell'ago in quanto realizzata con uno spessore doppio rispetto allo stelo. La regolazione elettronica del motore garantisce una velocità costante dell'ago. La velocità di penetrazione deve essere selezionata in relazione alle specifiche caratteristiche di densità del legno da esaminare: si adotteranno così velocità basse per legni ad elevata densità e velocità alte per legni di caratteristiche fisico-meccaniche più limitate. Le prove vanno precedute da un esame visuale dell'elemento da studiare, poi da una misurazione della temperatura ambientale e dell'umidità relativa del legno. Dopo le misurazioni di carattere ambientale, vengono eseguite le indagini resistografiche.

I risultati della perforazione sono presentati in grafici dove in ascissa è riportata la profondità progressiva della punta all'interno della sezione, mentre in ordinata si ha un *indice della resistenza* (in forma di parametro adimensionale) riscontrata durante l'ingresso della punta. Come detto, poiché la resistenza alla perforazione è correlata alla densità del legno indagato, lo strumento consente, indirettamente, di misurare le variazioni di densità nella sezione dell'elemento. Queste variazioni forniscono importanti indicazioni sulle caratteristiche del legno come difetti, anomalie ed alterazioni (per esempio presenza di attacchi fungini o da insetti, nodi, spaccature, slittamento di fibre, cipollature anulari, ecc.) in punti specifici della struttura lignea. Spesso le zone meno accessibili delle strutture, come le zone in prossimità degli appoggi, in genere inserite nelle murature, sono quelle più vulnerabili agli agenti degradanti. In particolare queste necessitano di una attenta indagine conoscitiva capace di fornire chiare indicazioni sulla qualità e stato del legno.

I risultati ottenuti dal Resistograph sono solo di tipo comparativo, in quanto lo strumento non restituisce il valore assoluto di un parametro dimensionale. La loro interpretazione non può, quindi, essere eseguita se non confrontando fra loro molti profili che presentano l'indice di resistenza in funzione della sezione interna dell'elemento ligneo.

Ogni profilo ottenuto dallo strumento fornisce un andamento densometrico del materiale analizzato. Nella figura seguente viene presentato un "profilo tipo" ottenuto con la prova di Resistograph: la successione ravvicinata di picchi massimi e minimi è

legata alla densità degli anelli che costituiscono la struttura indagata. Il picco più alto è dovuto alla resistenza che la punta incontra nell'attraversare la parte di accrescimento autunnale dell'anello, mentre il picco più basso indica la penetrazione nella zona dell'anello formatasi in primavera.

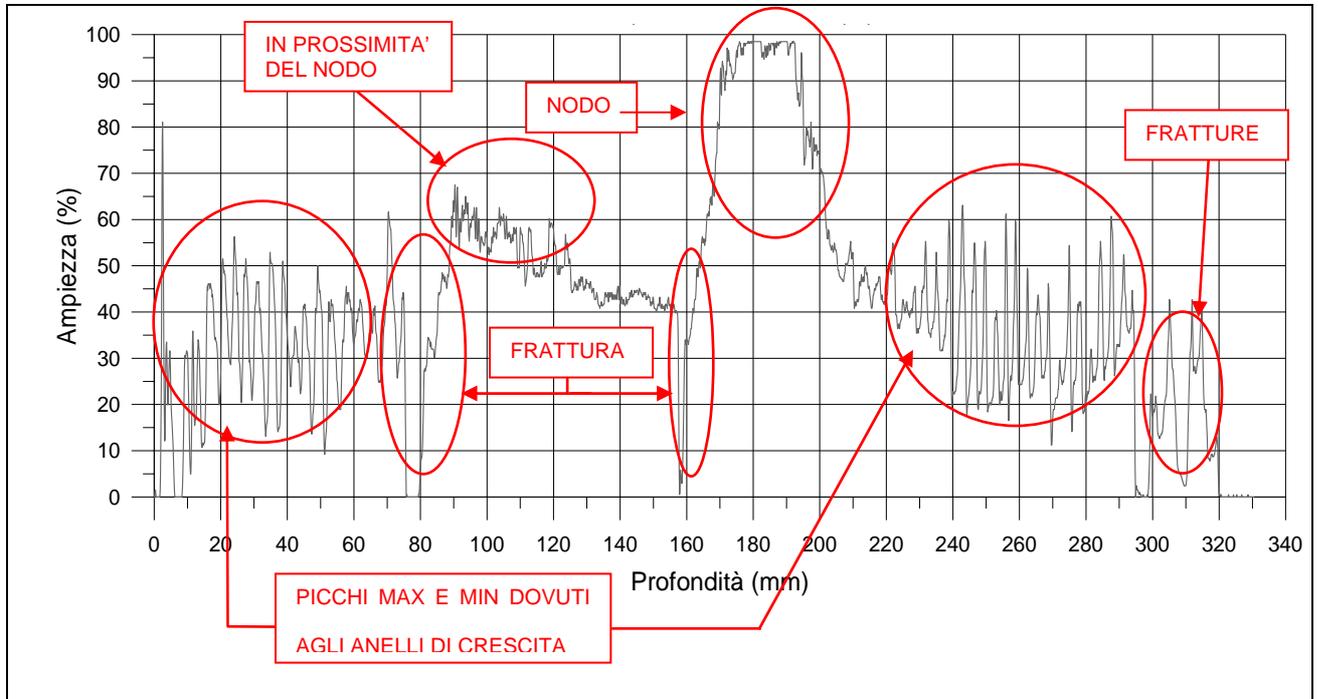


Figura 20: Profilo ottenuto da una prova su struttura con discontinuità interne.

Prove con utilizzo di trapani a rotopercolazione sono stati adottati anche per la caratterizzazione dei calcestruzzi in cui la resistenza a compressione è legata alla resistenza alla perforazione.

Il prototipo dell'apparecchio di misura è costituito da un trapano a batterie collegato con il dispositivo di misura. Le punte impiegate sono generalmente con diametri da 6 a 14 *mm*.

Il trapano è dotato di canotto coassiale con la punta al quale è stato applicato un trasduttore di avanzamento che permette di registrare l'incremento della profondità della cava.

Grazie ad apposite modifiche è possibile collegare il trapano ad un acquirente dati che ne misura in tempo reale i parametri di funzionamento (potenza consumata, velocità di rotazione, profondità del foro). I parametri utili a verificare le caratteristiche del materiale sono:

- il numero di giri del mandrino necessari per una penetrazione unitaria della punta;
- l'energia netta spesa dal motore per una penetrazione unitaria della punta, ottenuto dal prodotto tra il valore della coppia per l'angolo in radianti, cioè il numero di giri moltiplicato per  $2\pi$ ;

- la coppia esercitata dal mandrino al crescere della profondità di penetrazione, che identifica quanta resistenza il materiale offre alla rotazione della punta.

I valori riferiti ad una penetrazione unitaria sono identificabili come derivata delle curve:

- numero di giri del mandrino - profondità della punta
- energia netta spesa dal motore - profondità della punta.

Data la notevole sensibilità della derivata ai rumori ed alle imprecisioni delle misure, si preferisce memorizzare da ogni prova i dati cumulativi per poi svolgere il calcolo delle derivate in fase di elaborazione dei risultati.

Dalle curve così ottenute è possibile ottenere un dato significativo, mediante il quale confrontare le successive prove. Per quanto concerne numero di giri e lavoro si estrae il valore della pendenza della curva, mentre per la coppia è significativo il valore medio.

Gli effetti degli aggregati presenti nel calcestruzzo si palesano nella rugosità della curva della coppia, mentre l'effetto dell'attrito laterale sulla punta aumenta con l'aumentare del diametro ed è evidenziato da un leggero aumento della coppia con la profondità del foro.

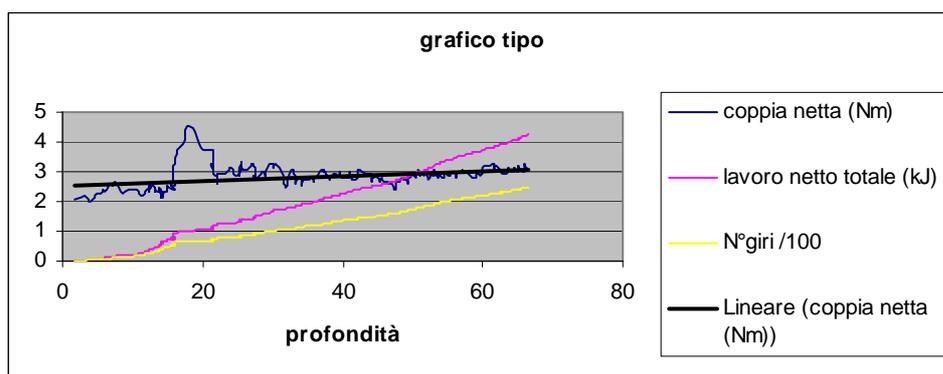


Figura 21: Esempi di grafico di una prova eseguita con il trapano

La strumentazione adattata alla caratterizzazione delle malte, recentemente predisposta da R.Felicetti presso il Politecnico di Milano, in occasione della campagna di prove a Laino Castello ha introdotto alcune modifiche alla strumentazione ed alle modalità di esecuzione e in particolare:

- formazione di un blocco al pulsante di avviamento, permettendo di impostare un ridotto numero di giri del trapano che rimane costante nelle varie prove;
- adattamento del programma di acquisizione dati;
- scelta di punte di piccolo diametro;
- esclusione del dispositivo elettrico pneumatico di percussione.

Il dispositivo si basa sulla misura dell'energia elettrica dissipata dal trapano per formare un foro cieco in un letto di malta. Mediante un dispositivo elettronico,

durante l'operazione di foratura viene misurata automaticamente l'energia elettrica dissipata. Il valore dell'energia spesa, depurata ogni volta dall'assorbimento a vuoto, si può leggere su un apposito visualizzatore.

Essendo la malta di calce costituita da grani di sabbia tra loro coesi, si può dedurre che la resistenza meccanica della malta sia correlata all'intensità dei legami che la costituiscono, quindi che la resistenza della malta di calce sia riconducibile all'energia necessaria per ridurla nuovamente in sabbia. La rotazione della punta ha per effetto il ridurre la malta nuovamente in sabbia rompendo tutti i legami tra i grani di sabbia. Le dimensioni del foro cieco devono essere molto ridotte, infatti utilizzando un punta di diametro di 4 mm per una profondità di 4 ÷ 6 cm si riesce ad evitare che la componente dell'attrito, delle pareti laterali della punta elicoidale, aumenti in maniera sensibile alterando i risultati delle prove.



Figura 22: Il trapano modificato.

La pressione con cui si aziona il trapano non è un parametro significativo dell'energia totale dissipata. Infatti, con pressioni diverse cambia il tempo di penetrazione e l'energia dissipata nell'unità di tempo, ma queste due grandezze sono inversamente proporzionali e quindi l'energia totale non cambia.

### **Conclusioni**

Dall'esame e dalla discussione della letteratura tecnico-scientifica in materia di malte è stato possibile analizzare i vari tipi di tecniche diagnostiche attualmente esistenti che consentono una caratterizzazione in situ dei materiali costituenti la muratura (ossia i mattoni e le malte) mettendone in evidenza l'affidabilità, la praticità di impiego e la maggiore o minore invasività per la struttura esaminata. È questo il primo passo per la caratterizzazione delle malte antiche sotto l'aspetto chimico, fisico e meccanico e quindi per una corretta valutazione dei metodi conservativi più idonei.

Ci si è poi soffermati sulle tecniche basate sulla resistenza alla penetrazione, che hanno mostrato di fornire risultati incoraggianti nello studio di materiali diversi dalle malte quali suoli, legnami e materiali cementizi. Questi metodi sono di particolare interesse perché permettono di ricostruire in maniera puntuale la

stratigrafia del materiale, mediante strumenti semplici e poco invasivi. Ci si è soffermati sulla discussione dei vantaggi e dei difetti delle varie tecniche.

In particolare ci si è soffermati sulla proposta per un nuovo strumento per effettuare prove penetrometriche sui giunti di malta caratterizzato da semplicità e velocità di esecuzione della prova e dall'economicità dello strumento, che sfrutta, con opportune modifiche, un comune sclerometro per calcestruzzi.

Nell'ambito del "Progetto di rilevante interesse Nazionale - PRIN 2003" dal titolo "Sicurezza strutturale dell'edilizia muraria tradizionale e strategie di intervento. Un caso di studio in Calabria: sistema informativo per il recupero del borgo storico di Laino Castello" (di cui l'autore è uno dei responsabili) si è effettuata un'ampia campagna di prove in situ con tale nuovo strumento. Le analisi sono state affiancate da prove di perforazione eseguite con un trapano strumentato che consente di registrare l'energia spesa per forare il materiale. I risultati ottenuti tramite le due diverse metodologie hanno confermato la validità dello strumento proposto. L'ampia campionatura resa possibile dall'analisi sul patrimonio edilizio di Laino Castello ha permesso di generare una mappatura per zone molto significativa.

La campagna di prove in situ di Laino Castello ha evidenziato carenze riguardanti la sensibilità e la registrazione dei risultati. Si è superato questo limite mediante la progettazione di un rilevatore di spostamenti per misurare automaticamente l'incremento di profondità della sonda e trasferire i risultati ad un elaboratore.

Nell'ipotesi che l'energia fornita dallo sclerometro ad ogni colpo sia costante (2.1 J), si può determinare la resistenza media all'avanzamento della punta imponendo l'uguaglianza col lavoro dissipato (forza media per incremento dell'avanzamento della sonda).

Da valutazioni sperimentali, qui non riportate, si è riscontrata un'influenza non trascurabile sui risultati legata alla porosità del materiale, al livello di carbonatazione della malta ed al carico di confinamento. Lo spessore del giunto di malta influenza i risultati solo per valori inferiori a 15 mm. Tali fattori non sono tuttavia tali da inficiare la validità dei risultati ottenuti mediante i metodi illustrati.

In sintesi, le prove di tipo penetrometrico e le prove a rotazione sono strumenti diagnostici facili ed economici da usare in situ, che consentono una possibilità di caratterizzazione meccanica non distruttiva delle malte e dei mattoni, agendo per confronto tra le varie porzioni esaminate e per successiva verifica con metodi distruttivi su un numero limitato di campioni, successivamente ad un prelievo.

Al fine di un loro utilizzo per la verifica dell'edificio e quindi a fini progettuali, le prove illustrate, che sono locali e non distruttive, devono essere successivamente integrate con metodi di prova che analizzino il comportamento meccanico di porzioni più ampie di muratura, temi dei quali si tratta nelle parti successive di questa nota.

## **Ringraziamenti**

Desidero sottolineare che buona parte del materiale qui illustrato proviene da ricerche condotte dal prof.R.Felicetti del Politecnico di Milano, che ringrazio.

Un contributo rilevante proviene dalla tesi di G.Sepriano e C. Teodori: *Le prove non distruttive per la caratterizzazione delle malte storiche*; Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura e Società, AA 2005-06, 291p., i cui relatori sono R.Felicetti e C.

Tedeschi e dalla tesi di S.Barbò dal titolo “*Strutture lignee dell’antico borgo di Laino Castello (CS)*”, Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura e Società, AA 2006-07 di cui è relatore il sottoscritto.

Un ringraziamento al prof L.Biolzi ed al prof C.Chesi per il materiale fornito.

Di particolare utilità è stato il lavoro di ricerca condotto negli ultimi due anni sul paese di Laino Castello da un nutrito gruppo di miei collaboratori, che qui ringrazio, durante lo svolgimento del PRIN (Keoma Ambrogio, Stefano Barbò, Annalisa Conforti, Cinzia Cordiè, Annalisa Marra, Flora Peluchetti, Silvia Petrucci, Consuelo Spinella).

## **Bibliografia**

- [1] Giuriani E., Gattesco N., Del Piccolo M.: Experimental Tests on the Shear Behaviour of Dowels Connecting Concrete Slabs to Stone Masonry Walls; *Mat. and Structures*, Vol. 26, pp.293-301 (1993).
- [2] Felicetti R., Gattesco N., Giuriani E.: Local Phenomena Around a Steel Dowel Embedded in a Stone Masonry Wall; *Materials and Structures*, Vol.30, pp.238-246 (1996).
- [3] Van Der Klugt L.J.A.R.: The Pointing Hardness Tester - An Instrument to Meet a Need; *Materials and Structures*, Vol.24, pp.471-476 (1991).
- [4] Chagneau F., Levasseur M.: Contrôle des matériaux de construction par dynamostratigraphie; *Materials and Structures*, Vol.22, pp. 231-236 (1989).
- [5] Tiano P., Viggiano A.: A new diagnostic tool for the evaluation of the hardness of natural and artificial stones; *Int. J. for Restoration of Buildings and Monuments*, Vol.6, N.5, pp.555-566 (2000).
- [6] Delgado Rodrigues J., Ferreira Pinto A., Rodrigues da Costa D.: Tracing of decay and evaluation of stone treatments by means of microdrilling techniques; *J.of Cultural Heritage*, Vol.3, pp.117-125 (2002).
- [7] Gucci N., Barsotti R.: A non-destructive technique for the determination of mortar load capacity in situ; *Materials and Structures*, Vol.28, pp.276-283 (1995).
- [8] TC 177-MDT: Rilem Recommendation MDT.D.1 - Indirect determination of the surface strength of unweathered hydraulic cement mortar by the drill energy method; *Mat and Struct*, Vol.37, pp.485-487 (2004).
- [9] Felicetti R.: The Drilling Resistance Test for the Assessment of Fire Damaged Concrete; *Journal of Cement and Concrete Composites*, Vol.28, pp.321-329 (2006).
- [10] Felicetti R., Gattesco N.: A penetration test to study the mechanical response of mortar in ancient masonry building; *Materials and Structures*, Vol.31, pp.350-356 (1998).
- [11] Liberatore D., Spera G., Racina V.: Calibrazione sperimentale della prova penetrometrica sui giunti di malta; *Atti del workshop “Dalla conoscenza e dalla caratterizzazione dei materiali e degli elementi dell’edilizia storica in muratura ai provvedimenti compatibili di consolidamento”*, DIS Politecnico di Milano, pp.189-197 (2004).
- [12] Giuriani E., Gubana A.: A Penetration Test to Evaluate Wood Decay and its Application to Loggia Monument; *Materials and Structures*, Vol.26, pp.8-14 (1993).