

## *Capitolo quarto*

---

# *La strumentazione e i test pre e post intervento*



Come evidenziato nei capitoli precedenti, uno degli scopi principali della tesi è di verificare se attraverso prove di caratterizzazione dinamica è possibile evidenziare un danneggiamento della struttura. Agendo su una struttura già fortemente danneggiata si è pensato di seguire un percorso a ritroso, realizzando delle risarciture sulle lesioni già presenti, e in seguito verificare i cambiamenti delle forme modali e delle frequenze proprie della struttura riscontrabili attraverso prove dinamiche.

Le prove sperimentali condotte sulla facciata di Palazzo Geraci sono state numerose e varie, sia perché i mezzi a disposizione lo consentivano, sia per cercare di capire quale tipo di indagini dinamiche caratterizzavano meglio una struttura a comportamento fortemente non lineare. A tale fine è stato utilizzato un analizzatore a due canali, oppure un sistema di acquisizione in grado di registrare tutti i segnali contemporaneamente nel tempo provenienti dagli accelerometri.

Nel seguito quando si cita la “prima campagna” si intendono i test svolti prima della risarcitura, con “seconda campagna” quelli svolti dopo.

## *La strumentazione*

---

Nel seguito è riportata una breve rassegna della strumentazione utilizzata per i test, dando una semplice spiegazione delle principali caratteristiche che saranno utili alla comprensione di quanto descritto nella seconda parte del capitolo.

### *L'analizzatore*

---

L'analizzatore utilizzato consente di collegare due canali (solitamente un eccitatore e un accelerometro, oppure anche due accelerometri), di cui il primo può essere alimentato (ad es. il martello strumentato andrà sul primo canale in quanto necessita di una certa alimentazione). Oltre all'ingresso dei due canali l'analizzatore è caratterizzato da:

- un display, con cui visualizzare in tempo reale l'andamento del test;
- una serie di tasti che consentono di scegliere all'interno di un menù le scelte conformi ad ogni tipo di misura che si vuole realizzare, di salvare i risultati su floppy o anche stampare direttamente sulla stampante collegabile all'analizzatore.

Da osservare che con l'analizzatore è possibile richiedere direttamente l'output desiderato (segnale nel tempo, FFT, coerenza, ecc.) che viene automaticamente rappresentato a video.

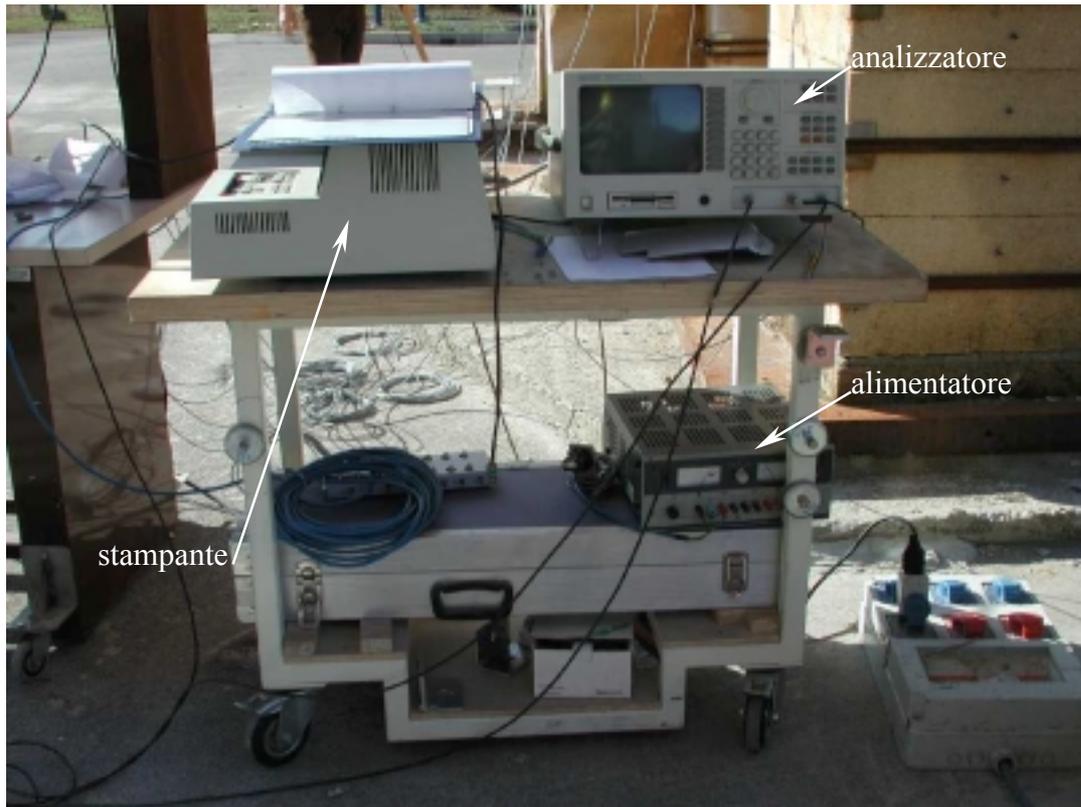


Figura 32 - Tavolo con la strumentazione per i test con l'analizzatore.

Oggi sono disponibili sul mercato altri tipi di analizzatori di spettro che dispongono fino a 36 canali, con cui è possibile studiare contemporaneamente in più punti la risposta ad un'eccitazione imposta alla struttura.

### *L'acquisizione*

Il sistema di acquisizione dati utilizzato è formato da un pc industriale<sup>17</sup> su cui vengono salvati i dati registrati dagli accelerometri e su cui viene eseguito il programma di acquisizione. Quest'ultimo, direttamente sviluppato presso il laboratorio del centro, consente di inserire tutti gli input necessari all'acquisizione (es. numero di canali, durata della prova, frequenza di campionamento, ecc.). Una volta cominciata l'acquisizione questa non registra i dati finché non viene azionato il trigger<sup>18</sup>. Durante l'esecuzione delle prove non è stato inserito nessun filtro passa-basso per l'eliminazione del fenomeno dell'aliasing.

<sup>17</sup> Il pc industriale è un personal computer caratterizzato da una maggiore resistenza agli urti, alla polvere e costruito con componenti di elevata qualità.

<sup>18</sup> Specie di interruttore che fornisce l'input per far partire l'acquisizione.

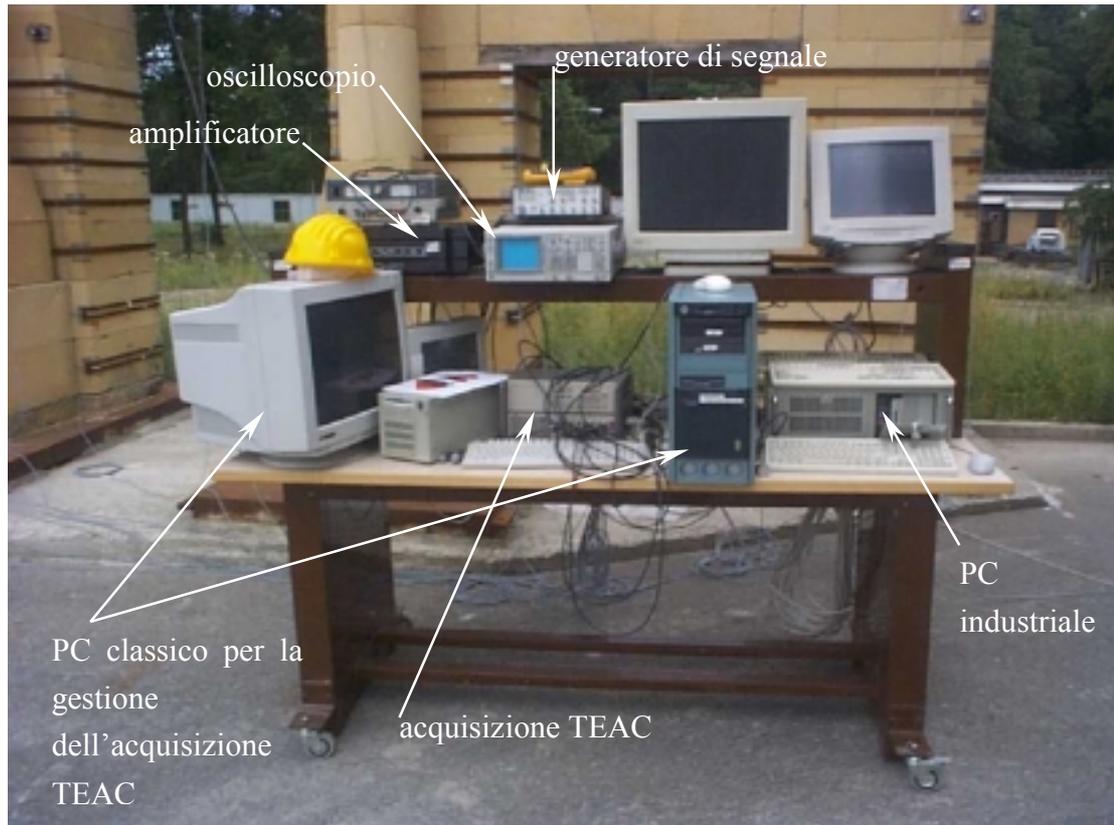


Figura 33 - Tavolo con il doppio sistema di acquisizione (laboratorio ELSA e TEAC).

Oltre a questo tipo di acquisizione, durante la prima campagna se ne è utilizzato un altro tipo di nuovissima concezione, realizzato dalla TEAC. Con questo sistema è possibile acquisire fino a 16 canali e inserire direttamente un filtro al segnale. Questo tipo di acquisizione necessita di un pc classico per la gestione del software.

### *Il martello strumentato*

I martelli strumentati possono essere di diversa grandezza a seconda della massa e del volume della struttura da studiare. Nel caso in esame l'energia da trasferire alla struttura deve essere sufficiente affinché non venga assorbita dalla struttura o coperta dal rumore ambientale. Si è utilizzata pertanto una massa da 5 kg con la parte battente in gomma. Quest'ultima fornisce un'eccitazione a bassa frequenza e quindi più appropriata per lo studio da svolgere.

I colpi devono essere calibrati con intensità dello stesso ordine, altrimenti la struttura viene eccitata in maniera scorretta: sebbene le frequenze proprie richiamate siano praticamente le stesse, gli smorzamenti sono fortemente condizionati dall'intensità dei colpi a causa dei vari meccanismi di movimento che possono entrare in gioco.



Figura 34 - Martello strumentato. Notare sulla testa la cella di carico con battente gommato.

Alla base del manico è presente un attacco per BNC a cui è possibile collegare l'alimentazione del martello. Il cavo d'alimentazione fornisce corrente elettrica alla cella di forza, posta a ridosso della parte battente in gomma, e invia all'analizzatore il segnale registrato dalla cella di forza. Come esposto in seguito il martello è stato utilizzato anche come semplice fonte di eccitazione senza essere alimentato.

### Lo shaker elettrodinamico

Lo shaker utilizzato è il modello 400 prodotto dalla APS Electro-Sais. È un generatore elettrodinamico di forzante, la cui uscita è direttamente proporzionale al valore istantaneo della corrente applicata ad esso, indipendente dalla risposta al carico e dalla frequenza. Può accettare segnali random, transitori o sinusoidali che tramuta in forze trasmesse alla struttura. Caratteristiche:



- Forza massima: 445 N
- Velocità massima 750 mm/s
- Colpo massimo, p-p 158 mm
- Peso totale 73 kg
- Dimensioni complessive:
  - Lunghezza: 526 mm
  - Spessore: 314 mm
  - Altezza: 178 mm
- Massa in movimento con due blocchi: 18 kg
- Massa in movimento con quattro blocchi: 30 kg

Figura 35 - Shaker elettrodinamico della APS Electro-Sais modello. 400.

## *Gli accelerometri*

Esistono diverse tipologie di accelerometri, a seconda del principio su cui basano il loro funzionamento. Nel caso in studio sono stati utilizzati degli accelerometri capacitivi, basati sul principio di funzionamento del condensatore: il dispositivo, vibrando, causa una variazione di distanza tra due piastrelle immerse in un liquido dielettrico e questo comporta una alterazione della capacità elettrica delle piastrelle, che viene tradotta in una variazione di corrente o di tensione.

Gli accelerometri utilizzati sono fabbricati dalla Lucas/Schaevitz, hanno una sensibilità di  $\pm 0.2$  g/volt e sono alimentati a 5 Vpk. Inoltre sulla massa movente dello shaker è stato incollato un ulteriore accelerometro con sensibilità  $\pm 0.8$  g/volt, ritenendo l'accelerazione di tale massa maggiore di quella della struttura.

## *La scatola di interconnessione*

Con questo termine si intende una struttura scatolare in grado di ricevere molti cavi, provenienti ognuno da un accelerometro, e convogliarli tutti su un'unica uscita che è acquisita dal pc industriale al fine di registrarne il segnale. Le scatole di interconnessione sono costruite direttamente dal laboratorio ELSA, come si può vedere in figura. Nel caso in esame è stata utilizzata una scatola in grado di ricevere 16 canali, alimentata a 15 V.



*Figura 36 - Scatola di interconnessione.*

## Disposizione e localizzazione dei sensori

Adottando come direzione principale di eccitazione della struttura quella parallela al piano della facciata, sono stati disposti i sensori in modo tale da favorire lo studio delle forme modali nel piano. Le regole di caratterizzazione dinamica (vedi paragrafo “Localizzazione della strumentazione” pag. 60) e le forme modali ottenute con un modello agli elementi finiti, realizzato con i dati disponibili, hanno permesso di individuare la migliore disposizione per gli accelerometri (riportata in figura 37), con particolare riguardo alla determinazione delle forme modali più basse.

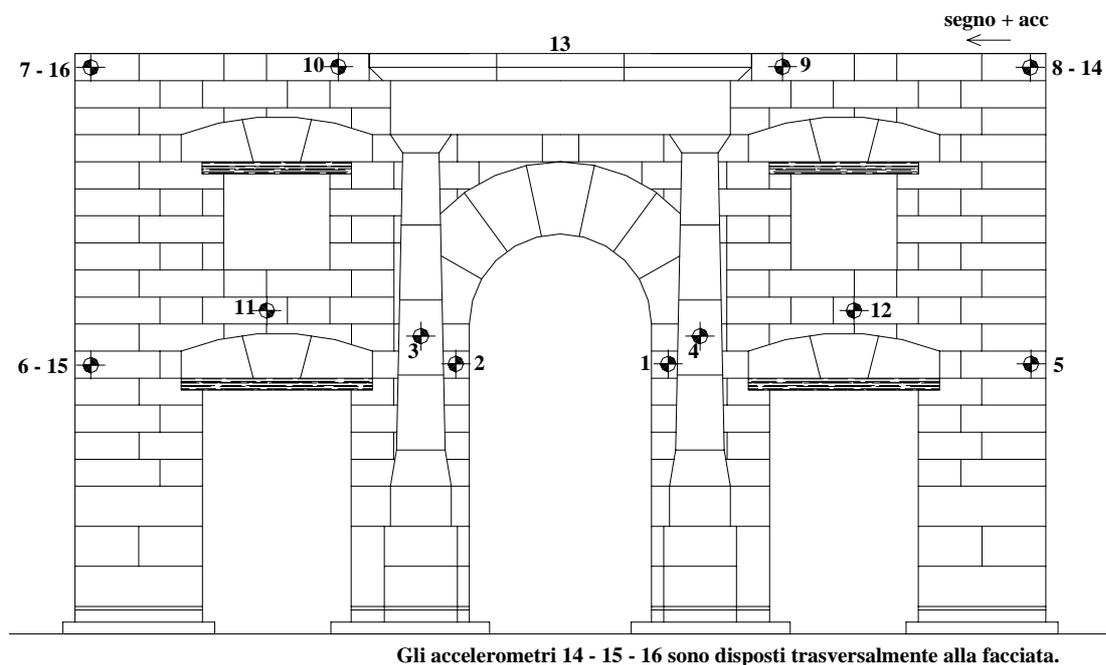


Figura 37 - Disposizione degli accelerometri.

Il numero degli accelerometri per una struttura di questo tipo può sembrare eccessivo, ma dovendo analizzare un caso di studio il cui comportamento è piuttosto incerto si è preferito abbondare. In seguito, dopo aver eseguito un certo numero di prove della prima campagna, si è constatato che il numero di accelerometri era necessario e non sovrabbondante. Inoltre si è ritenuto opportuno aggiungere alcuni accelerometri sui lati più corti, al fine di depurare le frequenze da quelle trasversali e torsionali.

Sulle colonne il numero di accelerometri è senz'altro inferiore a quello richiesto per una corretta individuazione delle caratteristiche modali: tale scelta è stata motivata dalla decisione di caratterizzare la facciata piuttosto che le colonne.

Gli accelerometri sono stati fissati alla struttura attraverso viti che li collegano a piastrine in alluminio preventivamente fissate alla struttura per mezzo di cemento o X60 (resina bicomponente). Nella fase di montaggio si è avuta l'accortezza di disporre tutti gli accelerometri con il verso positivo nella stessa direzione, per facilitare l'individuazione delle forme modali nelle prove con martello strumentato e analizzatore.



Figura 38 - a) Accelerometro su base in alluminio; b) Shaker disposto in posizione centrale.

Lo shaker è stato posto sopra la struttura in posizione centrale. Si è realizzato un dispositivo da collegare allo shaker, tale che permetta la connessione ad una piastra da porre sulla struttura; quindi, fissata la piastra alla struttura per mezzo di perni metallici annegati in appositi fori, viene fissato lo shaker a quest'ultima mediante bullonatura. Complessivamente sono state realizzate tre piastre di questo tipo, in modo di cambiare la posizione dello shaker sulla struttura, ai lati e al centro, così da evidenziare il comportamento delle lesioni in alcune posizioni piuttosto che in altre (purtroppo le piastre laterali non sono state utilizzate per motivi di tempo).

Una volta posizionata la strumentazione, è stata eseguita l'operazione di cablaggio, avendo l'accortezza di numerare, attraverso etichette adesive, i cavi e le rispettive prolunghie con lo stesso numero; facendo così si rendono più rapide le operazioni di cablaggio da un giorno all'altro, rese necessarie dal fatto che alla sera il banco di prova veniva riportato all'interno del laboratorio.

## *I test pre-intervento*

Come già evidenziato sono stati eseguiti molti test; in due serie di diversi giorni ciascuna. Durante la prima serie è stato previsto l'utilizzo dell'analizzatore abbinato

sia al martello strumentato che allo shaker. La seconda, invece, è stata eseguita con il sistema di acquisizione, utilizzando come forzanti il rumore ambientale, il martello e lo shaker. Dalla prima serie di test si sono evidenziati alcuni grossi problemi, come le difficoltà nell'interpretare dati che sembravano mutare in continuazione<sup>19</sup>. Si è pensato, allora, che il metodo più corretto fosse acquisire i segnali direttamente nel tempo per poterli poi trattare nella maniera ritenuta più opportuna<sup>20</sup>. Con la seconda trance quindi si è andati a eseguire test più mirati ed atti ad evidenziare alcune problematiche, quali:

- la variazione della posizione dei picchi con il variare dell'intensità;
- la variazione delle frequenze con le temperature;
- la ricerca di moti locali.

Dopo un'attenta pianificazione dei test (in particolare modo della seconda serie) e la fase di allestimento della strumentazione si procede alla prova vera e propria. Per ottimizzare l'esecuzione dei test è stata preparata un'apposita scheda da compilare all'inizio di ogni prova di cui se ne riporta un esempio in figura 39.

---

<sup>19</sup> In realtà, come si vedrà in seguito, da questi primi test si sono ottenuti risultati più a carattere generale, intendendo conclusioni valide per qualunque struttura, che dati veri e propri sulla struttura in esame.

<sup>20</sup> Tale metodologia è oggi giorno la più utilizzata.

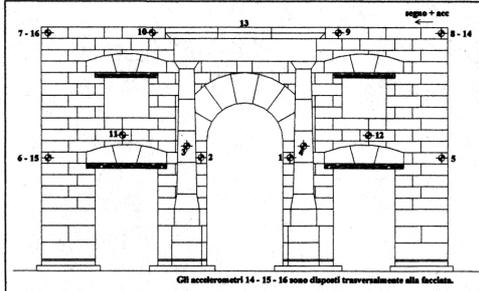
ELSA Laboratory <i>Palazzo GERACI Structural Monitoring</i>	ELSA Laboratory <i>Palazzo GERACI Structural Monitoring</i>
<b>Nome prova:</b> _____ <b>Descrizione:</b> _____ _____ <b>Data:</b> _____ <b>Ora:</b> _____ <b>Condizioni atmosferiche:</b> _____ <b>Operatori:</b> _____	<b>Strumentazione</b> <input type="checkbox"/> Accelerometri gruppo 1: _____ acc. n° _____ potenza _____ Vpk gruppo 2: _____ acc. n° _____ potenza _____ Vpk gruppo 3: _____ acc. n° _____ potenza _____ Vpk <input type="checkbox"/> Shaker: potenza _____ Vpk <input type="checkbox"/> Martello: potenza _____ Vpk  <b>Documentazione allegata:</b> _____ _____ <b>Commenti:</b> _____
<b>Caratteristiche fisiche</b> <b>Temperatura:</b> • facciata anteriore: _____ °C      • facciata posteriore: _____ °C • staffe anteriori: _____ °C      • staffe posteriori: _____ °C Shaker presente: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No	
<b>Acquisizione</b> Numero di canali registrati: _____ Durata dell'acquisizione: _____ sec Frequenza di acquisizione: _____ Hz Filtro antialiasing: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No (frequenza di taglio: _____ Hz)	
<b>Eccitazione</b> <input type="checkbox"/> Rumore ambientale <input type="checkbox"/> Sweep sine da _____ Hz a _____ Hz                      step di frequenza _____ n° di cicli _____                                      cicli di pausa _____ <input type="checkbox"/> Rumore in banda da _____ Hz a _____ Hz <input type="checkbox"/> Martellate numero di ripetizioni _____                      posizione martellata _____ <input type="checkbox"/> Altro _____	 <p style="font-size: small; text-align: center;">Gli accelerometri 14 - 15 - 16 sono disposti trasversalmente alla facciata.</p>
Prepared by Fabio BENI & Francesco MARAZZI	Prepared by Fabio BENI & Francesco MARAZZI

Figura 39 - Scheda da compilare prima di effettuare un test.

Di seguito, si riporta una tabella che riassume i test svolti durante la seconda serie e a cui si rifarà riferimento nel seguito.

Test	Canale 1 (martello o shaker)	Canale 2 (accelerom.)	Presenza shaker
s01: martello	1->8	9	No
s02: martello	1->8	9	No
s03: shaker sweep sine 5->30 Hz	13	1->8	Si
s04: martello 1-8	1->8	8	Si
s05: shaker sweep sine 5.2->6.2 Hz diversi livelli di intensità di forzante	13	1	Si
s06: shaker banda 0 -> 50 Hz	acquisizione		Si
s07: shaker sweep sine 5->30 Hz	13	1	Si
s08: rumore ambientale	/	1->8	Si
s09: martello	1->8	8	No
s10: martello	5	8	No
s11: shaker a diversi livelli di intensità	13	1	Si
s12: shaker (diverse temperature)	13	1	Si
s13: martello	1->6	8	Si
s14: martello	1->6	8	Si
s15: shaker	/	6-10, 6-7, 6-8, 6-1	Si

Tabella 1 – Elenco test prima campagna effettuati con l'analizzatore.

Test	Martello posizione	Campionamento [Hz]	Durata [sec]
a01: ambientali	X	100	300
a02: martello in 5	5	100	100
a03: martello in 6	6	100	100
a04: come a02	5	500	100
a05: come a03	6	500	100
a06: martello in 17	17	500	100
a07: martello in 15	15	500	100
a08: martello random	Random	500	100
a09: shaker chirp 0→40 Hz	X	100 – 500	360
a10: shaker banda	X	100 – 500	300
a11: martello in 8	8	100	100
a12: martello in 7	7	100	100
a13: ambientali	X	200	900
a14: martello in 7	7	100	100
a15: martelli in posizioni prefissate	Prefissate	100 – 500	200

Tabella 2 - Elenco test prima campagna effettuati con l'acquisizione.

## *L'intervento: iniezioni di malta*

Le iniezioni di malta sulla struttura sono state eseguite utilizzando come prodotto da iniettare, la malta Microlime Novecento, prodotta dalla Volteco (si veda scheda tecnica in appendice).

La metodologia utilizzata per l'esecuzione delle iniezioni di malta si articola nelle seguenti fasi:

- Esecuzione dei fori con il trapano (diametro punta 14 mm) in corrispondenza della lesione. Nel caso di lesione passante i fori sono praticati su entrambe le facce. I fori hanno una profondità di circa 20 cm e sono posti ad un interasse di 15-20 cm, in quanto spesso la lesione taglia un blocco in due parti e poi prosegue sfalsata su un altro blocco.
- Posizionamento di cannule di lunghezza 15 cm in ciascun foro per una profondità di circa 5 cm.
- Stuccatura della lesione con lo stesso prodotto delle iniezioni impastato con poca acqua. Durante questa operazione occorre fare molta attenzione nel sigillare l'innesto tra le cannule e il foro, in maniera tale da non far fuoriuscire la malta da iniezione.
- Preparazione con trapano e frusta della miscela liquida per iniezione, miscelando per circa 5 minuti. La miscela deve essere utilizzata entro mezz'ora.

- Iniezione nella muratura per mezzo di pistola e cartuccia per silicone. Si riempie quest'ultima di volta in volta attraverso il tappo posto sul retro, che, per tale operazione, è rimosso e poi riposizionato. La modalità di esecuzione richiede che si inizi ad iniettare dal basso; quando la malta arriva al foro soprastante si esegue la sigillatura del foro di entrata e si esegue l'iniezione da quello superiore.

Una volta eseguite le risarciture è necessario un periodo di maturazione di 28 giorni, durante i quali la malta solidifica e raggiunge le caratteristiche meccaniche indicate dal produttore. Nel caso in esame il periodo di maturazione è stato inferiore a quello indicato dal produttore; tra l'intervento e la seconda campagna di test sono passati circa venti giorni.

In appendice C sono riportate alcune immagini delle principali fasi di esecuzione dell'intervento.

### *I test post-intervento*

L'esperienza acquisita nei test pre-risarcitura è stata utile alla pianificazione della seconda campagna. In questa seconda fase sono stati eseguiti un minor numero test e non si è utilizzato, come mezzo di eccitazione, lo shaker. Si riporta, anche in questo caso, una tabella riassuntiva delle prove svolte.

Test	Martello posizione	Campionamento [Hz]	Durata [sec]
x01: rumore ambientale	X	500	600
x02: martello in 5	5	500	100
x03: martello in 6	6	500	100
x04: rumore ambientale	X	500	600
x05: martello in 5	5	500	100
x06: martello in 6	6	500	100

Tabella 3 - Elenco test seconda campagna.

