

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Edile

Dipartimento di Costruzioni e Trasporti

Tesi di Laurea

**STUDIO SPERIMENTALE
DEL COMPORTAMENTO DINAMICO
DI MURATURE MULTISTRATO IN PIETRA
RINFORZATE MEDIANTE INIEZIONI E TIRANTI**

**Experimental Study on the Dynamic Behaviour
of Multi-Leaf Stone Masonry Walls Reinforced
through Injections and Transversal Steel Ties**

Relatrice: **Prof.ssa Maria Rosa Valluzzi**
Correlatore: **Chiar.mo Prof. Claudio Modena**
Dott. Nicola Mazzon

Laureanda: **Marta Giaretton**

Anno Accademico 2010 – 2011

Premessa

Il territorio italiano, e più in generale quello europeo, sono caratterizzati dalla presenza di un vasto patrimonio edilizio nei centri storici minori, formato in gran parte da costruzioni in muratura. A causa degli eventi sismici, degli interventi antropici e del naturale invecchiamento, questi manufatti sono soggetti ad elevata vulnerabilità e necessitano, perciò, di adottare soluzioni efficaci ai fini della conservazione e del recupero di questa immensa ricchezza culturale a volte poco considerata.

In risposta a questa esigenza, negli ultimi decenni sono state sviluppate nuove metodologie d'intervento, che fanno uso sia di materiali tradizionali che innovativi, e richiedono perciò di adeguati studi in merito alla loro efficacia e compatibilità con i supporti esistenti.

In questo ambito si inserisce la presente Tesi, prendendo in considerazione le murature multistrato in pietra, costituite da due paramenti esterni portanti ed un nucleo interno caratterizzato da un'alta percentuale di vuoti. Tra le tecniche di intervento, si considera l'impiego di iniezioni di miscela a base di calce idraulica naturale e di tirantini antiespulsivi applicati nella sezione. La ricerca si è sviluppata in due fasi, una sperimentale ed una analitica, allo scopo di indagare l'influenza degli interventi adottati sul comportamento fuori-piano.

La fase sperimentale prevede una serie di prove dinamiche fuori-piano su otto pannelli in scala reale, due nelle condizioni originali e sei diversamente rinforzati. L'esecuzione di tali prove su tavola vibrante ha permesso di conoscere lo sviluppo del danno e dei meccanismi di collasso, nonché l'incremento della resistenza, i fattori di amplificazione delle accelerazioni e gli spostamenti che determinano la separazione dei paramenti.

La fase di analisi riguarda invece l'identificazione dinamica svolta sugli stessi modelli, a partire dai dati forniti dalle prove ambientali su tavola vibrante. Tale studio ha dato informazioni in termini di frequenze proprie, forma modali e rapporti di smorzamento, per una comprensione più approfondita del comportamento fuori-piano.

Indice

Introduzione	VII
Ringraziamenti	XIV
1. Documentazione Bibliografica	17
1.1. Vulnerabilità sismica del patrimonio edilizio storico e tecniche di intervento	17
1.1.1. La tipologia muraria	19
1.1.2. Le modalità di rottura	20
1.1.3. Le tecniche di intervento	22
1.2. Sperimentazioni dinamiche su pannelli	27
1.2.1. Shaking Table tests	28
1.2.2. Comportamento fuori-piano in altri casi di studio	35
1.3. Identificazione dinamica	38
1.3.1. Trasduzione e acquisizione del segnale	40
1.3.2. Tecniche di identificazione modale	42
1.3.3. Metodi di estrazione modale	44
2. Programma sperimentale	49
2.1. Pannelli murari	50
2.1.1. Costruzione ed interventi di rinforzo	50
2.1.2. Caratterizzazione dei materiali	53
2.1.3. Caratteristiche dei pannelli	56
2.2. Shaking Table tests	67
2.2.1. Input sismico: Montenegro 1979	67
2.2.2. Programma di prova	69
2.2.3. Allestimento del banco di prova e strumentazione	69
3. Risultati sperimentali	77
3.1. Pannelli non rinforzati	79
3.1.1. Wall 1-URM	79
3.1.2. Wall 2-URM	86
3.1.3. Osservazioni	92
3.2. Pannelli rinforzati con tiranti	93
3.2.1. Wall 3T	93

3.2.2. Wall 4T	105
3.2.3. Osservazioni	114
3.3. Pannelli rinforzati con iniezione	115
3.3.1. Wall 5I	115
3.3.2. Wall 6I	124
3.3.3. Osservazioni	134
3.4. Pannelli rinforzati con tiranti e iniezione	135
3.4.1. Wall 7IT	135
3.4.2. Wall 8IT	148
3.4.3. Osservazioni	159
3.5. Confronti tra i modelli sperimentali	160
4. Identificazione Dinamica	169
4.1. Pannelli non rinforzati	173
4.1.1. Wall 1-URM	173
4.1.2. Wall 2-URM	179
4.1.3. Osservazioni	185
4.2. Pannelli rinforzati con tiranti	186
4.2.1. Wall 3T	186
4.2.2. Wall 4T	191
4.2.3. Osservazioni	196
4.3. Pannelli rinforzati con iniezione	197
4.3.1. Wall 5I	197
4.3.2. Wall 6I	202
4.3.3. Osservazioni	207
4.4. Pannelli rinforzati con tiranti e iniezione	208
4.4.1. Wall 7IT	208
4.4.2. Wall 8IT	213
4.4.3. Osservazioni	217
4.5. Confronto tra le caratteristiche dinamiche	218
4.5.1. Pannelli non iniettati	222
4.5.2. Pannelli iniettati	231
4.5.3. Osservazioni	238
Conclusioni	239
Allegato A. Forme Modali	247
Bibliografia	271
Indice delle Tabelle	279
Indice delle Figure	283

Introduzione

Il patrimonio storico nazionale ed europeo, comprendente sia l'edilizia monumentale che quella locale abitativa dei piccoli e medi centri urbani presenti in aree a rischio sismico, è largamente costituito da costruzioni in muratura di pietra o mattoni. Indagini diagnostiche sugli edifici esistenti rivelano frequenti situazioni di degrado fisico e meccanico dei materiali, oltre ad una degradazione strutturale dei manufatti nel loro complesso. Le cause possono essere imputate a diversi fattori fra i quali risultano maggiormente gravosi gli effetti di eventi sismici, aggressioni ambientali ed azioni antropiche, richiamando così la forte necessità d'interventi mirati di tutela che ne permettano la fruibilità e la sicurezza. Tale situazione diviene particolarmente complessa nel caso di strutture realizzate in muratura, caratterizzate da varietà tipologiche e costruttive estremamente diversificate, sia storicamente (epoche costruttive) che geograficamente sul territorio. Per queste ragioni, negli ultimi anni, si è fatto sempre più pressante il problema del recupero edilizio e del restauro a livello strutturale.

In ambito normativo, in Italia, sono state perciò formulate specifiche linee guida per gli edifici Beni Culturali [DPCM 09/02/2011, 2011], che propongono un approccio multidisciplinare per la valutazione e riduzione della vulnerabilità sismica di tali manufatti, preceduto da un'adeguata conoscenza e modellazione dello stesso. Inoltre sono state redatte norme per la progettazione e la verifica antisismica degli edifici [D.M. 14/01/08, 2008], con un campo di applicazione più generico.

La scelta dell'intervento "più appropriato", ossia della giusta combinazione tecnica-materiali è strettamente legata alle caratteristiche proprie della muratura oggetto del consolidamento [Valluzzi, 2000]. E' necessario raggiungere un'approfondita conoscenza non solo del supporto (morfologia, tipologia, materiali) e del suo comportamento meccanico (problema strutturale specifico) ma anche dei materiali impiegati negli interventi, nonché la compatibilità chimico-fisica degli stessi con il supporto originario, al fine di migliorare le condizioni e la resistenza del manufatto e di assicurarne sufficiente durabilità. Uno studio progettuale poco approfondito può diventare la causa di un intervento inefficace o addirittura dannoso, che potrà rivelarsi catastrofico nel caso di un evento sismico importante, come si è purtroppo osservato recentemente (Lunigiana–Garfagnana, 1995; Reggio Emilia, 1996; Umbria e Marche, 1997; Piemonte, 2000; Molise, 2002; Piemonte, 2003, Salò, 2004; Abruzzo, 2009).

In tale ambito, il Governo Italiano e il Dipartimento Nazionale della Protezione Civile hanno finanziato l'istituzione del consorzio nazionale ReLUIS (Rete Laboratori Università di Ingegneria Sismica) al fine di approfondire la conoscenza della valutazione e riduzione della vulnerabilità e del rischio sismico, sulla base degli effetti causati dai recenti eventi sismici. Uno

degli obiettivi principali del consorzio ReLUIIS è quello di migliorare le attuali linee guida e normative per i Beni Culturali. Fra le numerose attività di ricerca avviate a questo proposito, molteplici sono state anche le campagne sperimentali sviluppate per lo studio dell'efficacia delle tecniche di rinforzo, innovative e tradizionali, sia dal punto di vista teorico che applicativo.

L'oggetto della presente Tesi rientra fra tali attività ed è il frutto di una collaborazione tra l'Università di Padova e Tassullo SpA, che ha portato a realizzare prove dinamiche su tavola vibrante presso il Centro Ricerche ENEA di Roma ("La Casaccia") per lo studio dell'influenza di alcune tecniche d'intervento: l'iniezione di miscela legante a base di calce idraulica naturale e l'inserimento di tirantini in acciaio nello spessore sul comportamento dinamico di elementi in muratura multistrato in pietra.

La scelta di indagare le murature in pietra è dovuta alla loro larga diffusione nel territorio nazionale, nonché alla loro complessità strutturale a causa della forte irregolarità (in sezione e in facciata) e disomogeneità che le contraddistingue, nonostante la varietà tipologica esistente [Mannoni e Cicirello, 1997; Binda et al., 1999]. In genere si tratta di muri multistrato, con paramenti esterni di conci di pietra e un nucleo incoerente, che può costituire anche la maggior parte dello spessore ed è contraddistinto dalla forte presenza di vuoti. Il collegamento trasversale, spesso affidato esclusivamente alla malta presente tra gli inerti ed i vuoti dello strato interno, è carente o addirittura mancante. Gli inerti possono essere di varia natura (pietra di cava, ghiaia di fiume, laterizio) e di diverse forme e dimensioni (elementi ricavati da operazioni di taglio, ciottoli, zeppe), e può esservi presenza di terra, argilla e sostanze organiche. Le malte sono generalmente di scarsa qualità e spesso non fluiscono completamente attorno agli elementi resistenti [Binda et al, 1999]. Questi aspetti rendono le murature in pietra particolarmente inclini a meccanismi di dissesto di tipo fragile, come il distacco degli strati esterni ed il ribaltamento fuori-piano [Giuffrè et al.,1993]. Tali cinematismi sono principalmente causati dall'azione sismica e, in particolare, dalle sollecitazioni di compressione dovute al peso proprio (carichi nel piano) e alle azioni orizzontali (carichi fuori-piano). Le indagini e la conoscenza del comportamento globale della muratura multistrato in pietra necessita tutt'oggi di ulteriori studi.

Fra i numerosi progetti di ricerca a livello europeo che hanno come obiettivo la protezione del patrimonio artistico ed architettonico va menzionato il progetto NIKER (New Integrated Knowledge based approaches to the protection of cultural heritage from Earthquake-induced Risk), all'interno del quale l'Università di Padova è coinvolta in qualità di leader ed organizzatore. In tale ambito sono attualmente in fase di sviluppo molteplici attività sperimentali inerenti a tecniche d'intervento applicabili su tipologie murarie analoghe a quelle studiate in questa Tesi [Pappas, 2011; Pigouni, 2011].

Le fasi di analisi e di elaborazione dei dati raccolti durante le prove dinamiche descritte nel presente lavoro rientrano all'interno delle attività di un progetto di accordo di Collaborazione Bilaterale tra Italia e Giappone, coordinato dalle Università di Padova e di Nagoya City e finanziato dal Ministero degli Affari Esteri Italiano. Tale progetto comprende lo sviluppo di diversi ambiti di ricerca inerenti alla conservazione del patrimonio storico-architettonico dal rischio sismico. Oltre alla campagna sperimentale suddetta, altre attività di rilievo e monitoraggio strutturale presso L'Aquila (terremoto del 6 Aprile 2009) hanno permesso di

approfondire il comportamento dinamico di strutture storiche, quali chiese, torri e palazzi, e in futuro di verificare l'efficacia degli interventi.

Progetto di collaborazione UNIPD – Tassullo SpA – ENEA C.R.

Il progetto di collaborazione UNIPD – Tassullo SpA – ENEA C.R. ha come obiettivo principale quello di contribuire alla conoscenza degli effetti indotti dagli interventi di iniezione di miscela a base di calce idraulica naturale sul comportamento meccanico e dinamico, oltre che sui meccanismi di collasso di strutture in muratura in pietra. Questa tecnica, ampiamente applicata da tecnici professionisti e da imprese, necessita di ulteriori studi e approfondimenti, data la carenza di pubblicazioni a riguardo. La miscela adottata fu sviluppata attraverso studi precedenti [Valluzzi, 2000] al fine di garantire una maggiore compatibilità con i materiali da costruzione storica, in particolare nel caso di muratura multistrato in pietra.

Al fine di limitare i meccanismi di collasso precedentemente descritti e rinforzare la muratura, durante il progetto di ricerca sono state indagate tre tecniche di intervento: la ristilatura dei giunti di malta, l'inserimento di tirantini trasversali in acciaio e l'iniezione di malte a base di calce idraulica. L'intera campagna è suddivisibile in due parti, in relazione ai diversi modelli utilizzati, alle condizioni ed alle metodologie di prova adottate (Tab 1).

Tab 1: Programma sperimentale del progetto di ricerca e collaborazione tra l'Università di Padova, Tassullo SpA ed il Centro Ricerche ENEA di Roma ("La Casaccia"), nell'ambito del consorzio nazionale ReLUIS (Rete Laboratori Università di Ingegneria Sismica).

	MODELS	TESTS	PLACE DATE	STRENGTHENING TECHNIQUE	REFERENCES
PARTE PRIMA	n.17 Panels	Compression	UNIPD 2004	3 Injection 1	Valluzzi, 2000
				3 Injection 2	Da Porto, 2000
				3 Repointing	
				3 Steel Ties	
				1 I+R	
				1 I+T	
				1 R+T	
1 I+R+T					
PARTE SECONDA	n. 3 Building models	Shaking Table	ENEA 2008	1 URM	Pasin, 2008
				1 SM Injection	Bresolato, 2008
				1 RM Injection	Dal Pont, 2009 Mazzon, 2010
	n. 7 Panels	Quasi-Static Shaking Table	UNIPD 2008 ENEA 2010	2 URM	Mazzon, 2010
				2 SM Steel Ties	
				2 SM Injections 2 SM I+T	
n. 22 Panels	Compression	UNIPD 2011	21 URM	Pigouni, 2011	
n. 16 Panels	Shear-Compression		17 SM Injections	Pappas, 2011	

PARTE PRIMA. Iniziata nel 1999 e conclusasi nel 2004, si è basata sull'analisi del comportamento meccanico di elementi murari a tre paramenti, con lo scopo di proporre e verificare sperimentalmente possibili soluzioni per il consolidamento delle murature multistrato in pietra [Valluzzi et al., 2004].

Diciassette pannelli in muratura, in scala 1:1 e dimensioni mt (1.40 x 0.80 x 0.50), sono stati sottoposti a prove di compressione monoassiale a seguito di diversi interventi di consolidamento, in modo da fronteggiare le svariate richieste di miglioramento strutturale riscontrabili in sito. Le tecniche adottate, singolarmente o in combinazione, erano:

- Iniezioni di miscele a base di calce idraulica naturale, per consolidare il nucleo interno ed incrementare la sua connessione con i paramenti esterni;
- Ristilatura profonda dei giunti, per il ripristino della malta deteriorata e per migliorare le proprietà di aderenza tra materiali;
- Inserimento di tirantini metallici nello spessore murario, per creare un collegamento tra strati di muratura indipendenti.

Si sono approfondite le modalità di realizzazione degli interventi, per definire procedure di controllo e valutazione dell'efficacia del lavoro in fase esecutiva, mediante applicazione di procedimenti d'indagine a basso grado d'invasività (prove soniche e prove con i martinetti piatti). Mediante le prove meccaniche condotte, è stata confermata la maggiore influenza e validità delle miscele consolidanti rispetto agli altri metodi di rinforzo, ed è stato inoltre possibile calibrare un modello analitico per la valutazione dell'incremento di resistenza a compressione ottenibile mediante iniezione di miscele su murature in pietra a più paramenti.

Particolare attenzione è stata inoltre rivolta ai materiali adottati per il consolidamento: malte a base di calce idraulica naturale. Si è quindi sviluppata una procedura per orientare il professionista nella scelta delle miscele d'iniezione, tra le molte disponibili in commercio, sia di tipo inorganico (cementi e calci) che organico (resine polimeriche). Sottolineando così, l'importanza di valutare i requisiti reologici di fluidità, stabilità e capacità di penetrazione, e le caratteristiche di compatibilità, in termini chimici, fisici, meccanici e termici, col supporto al fine di rendere massima l'efficacia del consolidamento [Valluzzi, 2000].

PARTE SECONDA. Iniziata nel 2007, prevede una serie di prove meccaniche e dinamiche su modelli di edifici in scala 2:3 e su pannelli in scala 1:1. Permane la tipologia di muratura in pietra a tre paramenti con e senza la presenza di tecniche di rinforzo. Le sperimentazioni sono state effettuate per la parte dinamica presso le tavole vibranti del Centro Ricerche ENEA ("La Casaccia") a Roma, mentre per l'analisi quasi-statica nel Laboratorio di Materiali e Strutture del Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Trasporti dell'Università di Padova. La ricerca si può quindi scomporre ulteriormente:

- Una prima fase riguarda le prove dinamiche di tre modelli di edificio in scala 2:3 [Mazzon, 2010]. La serie di simulazioni è stata condotta su tavola vibrante con la finalità di valutare il comportamento nel piano e fuori piano della tipologia muraria, sotto diverse azioni sismiche. I modelli realizzati a due piani, hanno una pianta regolare di mt (2.40 x 2.80), ed un'altezza complessiva di mt 3.60. Il solaio ligneo è costituito da un doppio tavolato, chiodato alle travi in legno, in modo tale da simulare un diaframma non rigido, più comunemente usato nella realtà. I campioni testati erano così distinti: uno non rinforzato

(UnReinforced Model, URM), come riferimento per la valutazione dell'efficacia degli interventi, e due iniettati con malta a base di calce idraulica naturale rispettivamente prima (Strengthened Model, SM) e dopo l'evento sismico (Repaired Model, RM). Questa distinzione ha riprodotto la situazione di rinforzo nel caso di struttura storica integra e danneggiata, rispettivamente. Infine si sono inseriti tiranti metallici su entrambi i livelli, nelle due direzioni ortogonali, per evitare indesiderate rotture fuori-piano della muratura e valutare, così, l'influenza delle iniezioni nel piano. Questa ricerca ha permesso di studiare le variazioni nei meccanismi di collasso e delle caratteristiche dinamiche (frequenze naturali, modi di vibrazione, i fattori di smorzamento e rigidezza) nelle tre strutture suddette, nonché l'incremento della resistenza a seguito dell'intervento di iniezione.

- La seconda fase tratta i maschi murari, coinvolgendo singoli elementi verticali di dimensioni mt (2.60 x 1.30 x 0.50) per lo studio dell'efficacia dei diversi metodi di rinforzo sull'ammorsamento tra gli strati. Due pannelli, considerati di riferimento, sono rimasti nelle condizioni iniziali, mentre gli altri sei erano distinti, a coppie, in relazione alla tecnica di rinforzo adottata: iniezioni di miscela a base di calce idraulica naturale, tirantini antiespulsivi applicati nella sezione e la combinazione dei due metodi. Inizialmente sono stati sottoposti a prove quasi-statiche [Mazzon, 2010] e successivamente a carico sismico fuori-piano previo tavola vibrante. La parte di sperimentazione dinamica interessa direttamente questa Tesi.

Le prove cicliche quasi-statiche, utili per un'indagine più approfondita, hanno compreso esperimenti di compressione monoassiale e di compressione e taglio combinate, per poi esser completate con prove semi-distruttive (martinetti piatti). Le informazioni così ottenute riguardano la resistenza e il comportamento a taglio e flessione della muratura, e le proprietà elastiche (Modulo di Young e Coefficiente di Poisson) e meccaniche dei materiali costitutivi [Mazzon, 2009].

La sperimentazione dinamica, qui studiata, permetterà invece di conseguire indicazioni in merito al quadro fessurativo, ai meccanismi di collasso e alla separazione dei paramenti osservabili a seguito di un evento sismico (input Montenegro, 1970) amplificando via via l'accelerazione al suolo (Peak Ground Acceleration, PGA). Infine, grazie ad un'attenta analisi modale, sarà possibile conoscere le caratteristiche dinamiche (frequenze naturali, modi di vibrazione, i fattori di smorzamento e rigidezza) dei pannelli ad ogni passo della prova, e confrontare i risultati ottenuti con metodi di rinforzo diversi.

- La terza fase riguardava prove cicliche quasi-statiche, di compressione monoassiale e di compressione e taglio combinate, su elementi murari a tre paramenti in pietra [Pappas, 2011; Pigouni, 2011]. I campioni utilizzati erano di diverse dimensioni e in scala 1:1 e 2:3, in modo tale da indagare l'effetto del fattore di riduzione sulla risposta meccanica degli stessi. I parametri indagati sono la resistenza e il comportamento a taglio e flessione della muratura e le proprietà elastiche e meccaniche dei materiali costitutivi. Ulteriori sviluppi sono attualmente in corso per completare tali sperimentazioni con prove semi-distruttive (martinetti piatti).

Thesis Layout

Il lavoro si articola in cinque capitoli, partendo da un'introduzione generale per la contestualizzazione e l'individuazione di obiettivi e procedure che s'intendono perseguire all'interno della Tesi.

Il primo capitolo è dedicato allo stato dell'arte riguardante argomenti affini a quelli trattati in questa Tesi. Un breve excursus tratta il problema della vulnerabilità sismica del patrimonio edilizio nei centri storici minori e la diffusa presenza di strutture storiche in muratura multistrato in pietra. Vengono perciò illustrate le modalità di collasso e le tecniche d'intervento tipiche di questa tipologia. In seguito si considerano le campagne sperimentali effettuate con prove dinamiche fuori-piano su pannelli in muratura di pietra o mattoni. Tale parte è stata sviluppata per studiare risultati derivanti da sperimentazioni affini o semplicemente per approfondire metodologie di prova e di analisi dei risultati nel caso di sperimentazioni su materiali differenti. L'attenzione si focalizza sui metodi e sulle configurazioni di prova, sugli interventi di rinforzo, sugli obiettivi perseguiti e sui risultati ottenuti. Infine, si propone una breve introduzione alle tecniche di identificazione dinamica con riferimento ad alcuni casi di studio. Il paragrafo approfondisce gli strumenti impiegati oltre alle tecniche e ai metodi di estrazione modale, in particolare quelli utilizzati nel presente lavoro.

Il secondo capitolo presenta il programma sperimentale. Vengono definite le caratteristiche di ciascun pannello, soffermandosi sulle proprietà dei materiali, sulle fasi di costruzione, sulle tecniche di rinforzo (iniezioni di malta a base di calce idraulica naturale e applicazione di tirantini trasversali antiespulsivi) e sul quadro fessurativo pre-prova. In seguito si illustra l'allestimento del banco di prova adoperato presso il Centro Ricerche ENEA di Roma ("La Casaccia"). Si illustra la strumentazione utilizzata, il posizionamento dei trasduttori e l'input sismico applicato alla tavola vibrante (Montenegro, 14 aprile 1970 – PGA 0.22g).

Il terzo capitolo tratta la presentazione dei risultati sperimentali suddivisa per coppie di pannelli affini, concludendo poi con un paragrafo di confronto generale. Per ciascun modello si individua il picco reale di accelerazione al suolo (PGA) ed il valore della forza in gioco. Si espone l'analisi del quadro fessurativo e dei fattori di amplificazione delle accelerazioni registrate. Si presentano poi ulteriori analisi per la valutazione della separazione dei paramenti esterni in mezzeria e l'abbassamento della parte superiore della parete. Infine, nei casi di applicazione dei tirantini trasversali, si studiano le deformazioni e le tensioni presenti in essi. Ogni dato suddetto si osserva in ciascun pannello e ad ogni passo di prova.

Nel quarto capitolo si espone l'analisi relativa all'identificazione dinamica degli elementi murari. Come nella sezione precedente, l'esposizione e l'osservazione dei dati si organizza per coppie di pannelli nei quali sia stata adottata la medesima tecnica d'intervento, per poi comparare i risultati mantenendo distinti i campioni non iniettati da quelli iniettati, e terminare con un confronto generale. Per ciascun muro, si presenta il diagramma di stabilizzazione, le frequenze proprie, i rapporti di smorzamento e le principali forme modali individuate. Nella parte conclusiva si accostano i modi di vibrare simili, riscontrati nei diversi pannelli.

Infine, una valutazione complessiva dei risultati ottenuti dalle analisi sperimentali ed analitiche induce a conclusioni riguardo l'efficacia e i limiti delle tecniche di rinforzo studiate, confrontandone le risposte. Vengono inoltre considerati altri possibili sviluppi a partire dai dati rilevati durante le prove di laboratorio.

Ringraziamenti

Un sincero ringraziamento alla Prof.ssa Valluzzi e al Prof. Modena per la professionalità, la disponibilità e la passione che dimostrano ogni giorno nell'insegnamento e nelle attività di ricerca svolte. Il loro contributo è stato essenziale per accrescere in me la sensibilità verso temi purtroppo così attuali, quali la vulnerabilità sismica dei manufatti e il comportamento dinamico fuori-piano delle strutture, spingendomi così ad approfondirli e svilupparli in questo elaborato.

Al Dott. Mazzon vorrei esprimere una gratitudine particolare per la dedizione con cui ha supervisionato ogni fase del mio lavoro di Tesi, contribuendo molto con conoscenze ed esperienze personali, nonché con la sua grande passione per l'argomento.

La campagna di ricerca ha inoltre fatto tesoro del contributo di numerose altre persone all'interno del Centro Ricerche ENEA di Roma ("La Casaccia"), di Tassullo SpA e del Dipartimento di Costruzioni e Trasporti dell'Università di Padova.

Si ringraziano inoltre i membri della Commissione di Laurea per l'attenzione prestatami.

Un sentito grazie va ai miei genitori e a Diego che mi hanno sempre saputo motivare e mi sono vicini in ogni momento, dimostrando tutti i giorni il loro orgoglio.

Al prof. Fanton che per primo ha creduto in me consigliandomi l'iscrizione a Ingegneria. Ai miei compagni di studio per le fatiche di esami fatti assieme, le conoscenze condivise e tutti i momenti trascorsi in questi anni. Ai ragazzi della "SAHC room" che ho avuto la gioia di conoscere durante lo sviluppo di questa Tesi: Evina, Athanasio, Sergio, Matthew, Jiyun, Mira.

E infine, ma non meno importante, un grazie a tutti i miei amici, speciali in quanto tali: Giuseppe, Michele, Andrea, Alessia e Marco, Elisa, Maria, Eleonora, Chiara, Marta, Alessio, Michela e Marta, Antonio, Ferdinando, Flavio, Antonio.

*Dedicato a Gino, Lucia e Maria,
all'Irpinia e a L'Aquila, che sempre porto nel cuore.*

*«Ad un tratto la verità brutale
ristabilisce il rapporto tra me e la realtà.
Quei nidi di vespe sfondati sono case,
abitazioni, o meglio lo erano.»*

[A.Moravia, “Ho visto morire il Sud”,
tratto da Terretremule, 2000]

1. Documentazione Bibliografica

A seguito di una breve introduzione in merito alla vulnerabilità sismica del patrimonio edilizio storico e, in particolare, alla diffusione e caratterizzazione delle murature multistrato in pietra, si analizzano le modalità di collasso delle stesse e le tecniche di intervento più comuni. Inoltre, sulla base di ricerche effettuate in altre sedi, si illustrano le esperienze di indagine dinamica su campioni affini a quelli studiati in questa Tesi, al fine di una conoscenza globale delle modalità di studio e dei risultati ottenuti in sperimentazioni simili. Si conclude con un paragrafo dedicato all'identificazione dinamica, per meglio comprendere il metodo di analisi utilizzato.

1.1. Vulnerabilità sismica del patrimonio edilizio storico e tecniche di intervento

L'osservazione degli effetti dei terremoti in Italia ha più volte evidenziato che il fattore determinante delle conseguenze prodotte in termini di danni e di vittime è la rilevante vulnerabilità di gran parte del patrimonio edilizio: la debolezza delle strutture sia nei centri storici che nelle recenti urbanizzazioni, realizzate tra il periodo di ricostruzione post-bellica e il cosiddetto boom edilizio (1945-'65).

L'elevata sismicità della Penisola Italiana è legata alla sua particolare posizione geografica, tra la zolla africana e quella euroasiatica (Fig 1.1), che la sottopone costantemente a forti spinte compressive e quindi ad eventi sismici di diversa intensità. Tale aspetto raffigura la maggiore fonte di rischio per la valorizzazione e la conservazione del costruito storico minore, già messo a dura prova dalla carenza di manutenzione e di interventi appropriati. Questi temi rappresentano un valido incentivo allo studio di tecniche di indagine dello stato di danno dei manufatti e di consolidamento, miglioramento e adeguamento sismico degli stessi.

Nella normativa tecnica italiana, il susseguirsi degli aggiornamenti avvenuti nel corso di un secolo (la prima fu emanata dopo il terremoto di Messina del 1908 e le successive nel 1939,1962,1974), non è stato corrisposto dall'adeguamento delle strutture pre-esistenti. I primi documenti ufficiali, che definiscono le istruzioni per intervenire nelle strutture storiche, risalgono alla Circolare 30/07/1981 [1981]. Il passo seguente è stato l'introduzione, con il DM

24/01/1986 [1986], di un nuovo approccio che dà forma al concetto di “miglioramento” accanto a quello di “adeguamento”, ponendo particolare riguardo alla salvaguardia dell’identità del manufatto, al fine di alterare il meno possibile il suo comportamento originario pur garantendo maggior stabilità e resistenza. Ribadito nel DM 16/01/1996 [1996], questo concetto è stato poi applicato nella valutazione degli edifici Beni Culturali.



Fig 1.1: Quadro schematico delle principali linee di faglia che attraversano il Mediterraneo e che delimitano la placca africana e quella euroasiatica.

In seguito, importanti eventi sismici particolarmente distruttivi (Irpinia, 1980; Lunigiana e Garfagnana, 1995; Umbria e Marche, 1997; Abruzzo, 2009), hanno indotto le autorità competenti a redigere nuove norme nell’ambito della progettazione e della verifica antisismica degli edifici. In questo modo, attraverso l’OPCM 3274 [2003] e OPCM 3431 [2005], si è giunti al D.M. 14/01/08 [2008], tutt’ora in vigore.

Sono state inoltre formulate specifiche linee guida per gli edifici Beni Culturali [DPCM 09/02/2011, 2011], che propongono un approccio multidisciplinare per la valutazione e riduzione della vulnerabilità sismica di tali manufatti, preceduto da un’adeguata conoscenza e modellazione dello stesso. In tal senso, ogni intervento deve essere considerato come un corretto compromesso tra la protezione dal rischio sismico e il rispetto del valore culturale ed artistico, secondo i criteri di conservazione affermati nelle diverse Carte del restauro di monumenti storici: la Carta di Atene (1931) e la Carta di Venezia (1964). Il documento è riferito alle sole costruzioni in muratura, e nel corso degli anni è stato preceduto dal D.I. 23/05/2005 [2006] e dal DPCM 12/10/2007 [2007].

1.1.1. La tipologia muraria

Concentrando l'attenzione sul patrimonio edilizio dei centri storici minori, inestimabile valore culturale, ambientale ed economico per il paese, si nota la diffusa presenza di edifici in muratura a più paramenti. Il materiale utilizzato è spesso la pietra, per la sua facilità di posa in opera e di reperibilità nel territorio. Il sistema costruttivo si sviluppa a strati con tre elementi più o meno distinti: un nucleo interno e due paramenti esterni.

Questa tipologia era presente nell'antichità già all'epoca dei romani, con il cosiddetto muro a sacco. I paramenti avevano dimensione ridotta rispetto al nucleo centrale (sacco), che era realizzato in conglomerato di ottime caratteristiche meccaniche (*opus cementicium* con calce pozzolanica). La funzione degli strati esterni era quindi quella di una "cassaforma a perdere", necessaria per fornire stabilità ai paramenti in fase realizzativa del getto, e confinamento al nucleo in esercizio, questi erano inoltre collegati da elementi trasversali a tutto spessore denominati diatoni.

A partire dal medioevo e fino al secolo scorso, il funzionamento del muro in pietra è differente: i paramenti diventano l'elemento portante in quanto di spessore prevalente rispetto al nucleo interno, che è realizzato con pietre ed altri materiali di piccola pezzatura (mattoni; scaglie di risulta dallo spacco e dalla lavorazione delle pietre usate nella costruzione), debolmente coesi. Alcune ricerche hanno portato ad una conoscenza delle varietà tipologiche di murature in pietra nel territorio italiano (Fig 1.2) [Mannoni e Cicirello, 1997; Binda et al., 1999].

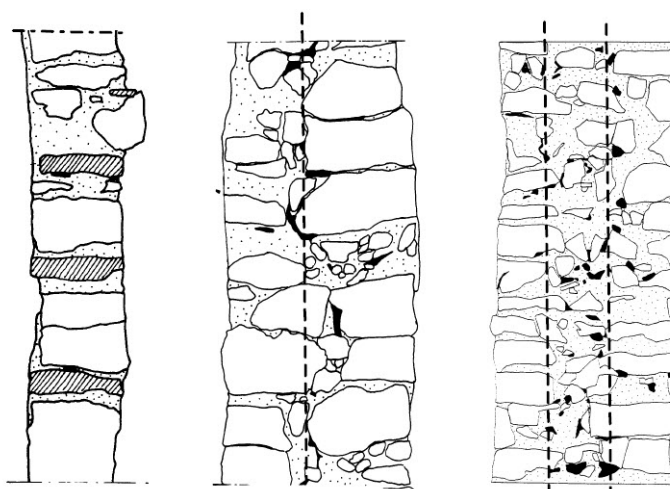


Fig 1.2: Morfologia di murature in pietra in sezione: singole e multistrato. [Binda et al., 1999]

1.1.2. Le modalità di rottura

La crescente attenzione verso i problemi legati alla conservazione di complessi ed agglomerati storici, ha spinto la ricerca ad approfondire l'analisi del comportamento strutturale delle murature multistrato in pietra, allo scopo di classificare le tipologie di danno ed i meccanismi di collasso in esse ricorrenti e di "adeguare" la modellazione meccanica alle reali configurazioni riscontrabili in sito. Dall'esperienza in loco, si è potuto rilevare come effetti dovuti all'incuria, al tempo o ad eventi eccezionali quali un sisma, uniti a carenze costruttive proprie dei fabbricati ed errori nella progettazione e nell'esecuzione degli interventi (soprattutto in relazione al funzionamento scatolare della struttura), abbiano condotto al verificarsi di condizioni di dissesto legate sia a cinematismi nel piano (Fig 1.3) che ai, più sfavorevoli e diversificati, meccanismi fuori-piano (Fig 1.4).

I meccanismi nel piano, detti anche di secondo modo [Giuffrè et al., 1993], interessano le pareti parallele alla direzione del sisma con lesioni più o meno importanti, tali comunque da non indurre il collasso, in quanto vengono maggiormente sfruttate le caratteristiche di resistenza e rigidità della muratura.



Fig 1.3: Alcuni dei meccanismi nel piano osservati nel centro storico de L'Aquila a seguito del sisma del 6 Aprile 2009. [Munari, 2010]

I meccanismi fuori-piano, detti anche di primo modo [Giuffrè et al., 1993], coinvolgono bensì le pareti investite dal sisma nella loro direzione ortogonale, portandole a collasso. Questi sono, come ben descritto e rappresentato da Giuffrè et al. [1993] in Fig 1.5, i cinematismi più comuni nelle murature multistrato in pietra, e perciò saranno maggiormente approfonditi in questa sede. L'azione prevalente a livello globale è quella del ribaltamento – dovuta alla bassa resistenza a trazione che la rende incapace di contrapporsi alla flessione fuori-piano determinata dal peso proprio della muratura in oscillazione – alla quale si oppone l'eventuale azione di elementi di connessione (tiranti, cordoli) o gli effetti resistenti intrinseci (es. funzionamento ad arco della parete). Tuttavia possono manifestarsi anche a livello locale con la separazione o

l'espulsione dei paramenti esterni. La classificazione dei modelli prevede, infine, il raggruppamento dei meccanismi che coinvolgono strisce verticali od orizzontali di muratura; per informazioni maggiori si rimanda a Valluzzi et al. [2001].



Fig 1.4: Alcuni dei meccanismi fuori-piano di murature multistrato in pietra, osservati nel centro storico di Castelnuovo (AQ) a seguito del sisma del 6 Aprile 2009. [Mazzon, 2010]

In conclusione, ai fini dell'assorbimento delle forze orizzontali, diventa essenziale la qualità dei collegamenti tra elementi verticali contigui e tra pareti e solai (cordoli, catene con funzione di cordoli). Nel caso di connessioni non adeguate, i pannelli murari verrebbero impegnati con sollecitazioni flessionali fuori del piano in grado di indurre l'immediato collasso; mentre un ammorsamento efficace, unito alla presenza di orizzontamenti di rigidità adeguata, consente il comportamento scatolare dell'edificio e la trasmissione delle forze orizzontali alle pareti, in modo che ciascuna di esse possa reagire nella direzione parallela al proprio piano.

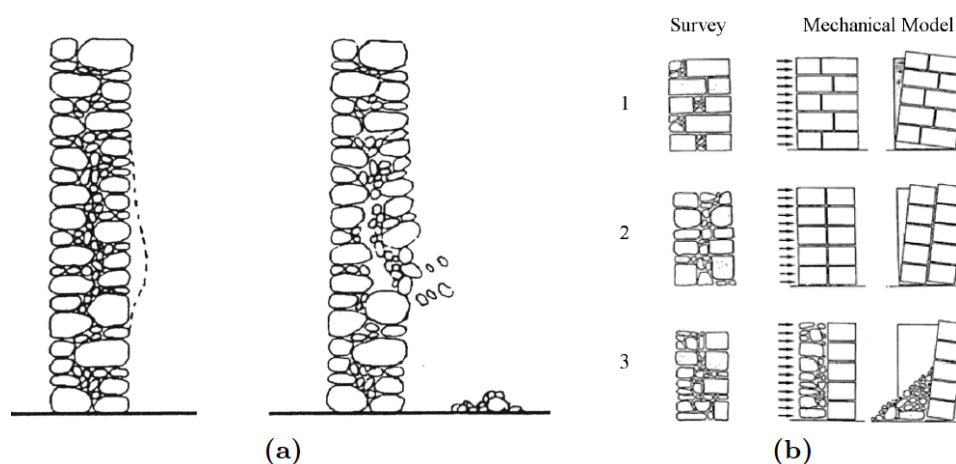


Fig 1.5: Collasso fuori-piano (a sinistra) e modelli semplificati (a destra) per murature in pietra multistrato. [Giuffrè et al., 1993]

1.1.3. Le tecniche di intervento

Le tecniche maggiormente impiegate negli interventi di recupero e conservazione delle murature, riguardano gli intonaci armati, le iniezioni, le cuciture armate, i tirantini antiespulsivi, le fasce in composito (FRP) e la stilatura dei giunti. Questi provvedimenti sono necessari al fine di aumentare la resistenza a trazione e creare legami di coesione più forti nell'interfaccia tra gli strati. Di seguito vengono prese in considerazione nel dettaglio solamente le tecniche utilizzate in questa sperimentazione: le iniezioni e i tirantini; per le rimanenti si rimanda ad altri testi (Modena et al., 2000; Valluzzi, 2000).

Iniezione con miscele consolidanti

L'adozione di iniezione di miscele leganti mira al miglioramento delle caratteristiche meccaniche della muratura da consolidare, pertanto non può essere utilizzata per realizzare efficaci ammorsature tra i muri e quindi migliorare, se applicata da sola, il comportamento globale della costruzione.

La corretta assunzione di questa tecnica si ha nei casi di lesioni diffuse e di murature in pietra aventi percentuali elevate di vuoti interni. L'obiettivo è quello di far penetrare la miscela legante, lentamente e a bassa pressione, in tutte le fessure, cavità e vuoti del muro danneggiato, così da migliorare i legami fra i vari componenti della muratura stessa eliminando le fragilità costituite dai vuoti. Le miscele sono costituite da acqua e leganti inorganici (calci aeree ed idrauliche, cementi) o organici (resine sintetiche), scelti in base alla loro compatibilità con il supporto originario. La qualità dell'esecuzione e della scelta dei materiali conferisce un diverso comportamento in termini di rigidità e resistenza. [Modena et al., 2000; Vintzileou, 2002]

La principale caratteristica richiesta per il muro è l'iniettabilità, ossia presentare una tessitura interna con sufficiente continuità tra i vuoti. Mentre per le miscele sono necessarie:

- Penetrabilità. Garantire un'adeguata fluidità in relazione ai tempi di esecuzione richiesti, quindi adeguata granulometria degli inerti e scarsa viscosità allo stato fluido.
- Caratteristiche meccaniche. Resistenza meccanica e parametri di deformabilità (modulo elastico e coefficiente di Poisson) simili a quelli della muratura originaria;
- Presa ed indurimento adeguati e con assenza di ritiro;
- Proprietà chimiche stabili nel tempo;
- Caratteristiche igroscopiche. Mantenere inalterato il proprio volume con l'umidità, non essere solubile in acqua e non creare una barriera alla libera circolazione del vapore.

Particolare attenzione va posta nella scelta della pressione di immissione della miscela, per evitare l'insorgere di dilatazioni trasversali prodotte dal fluido in pressione. Molto importante è anche il dosaggio dell'acqua d'impasto, il quale deve permettere l'idratazione del legante e, soprattutto, conferire alla miscela la necessaria fluidità richiesta sia per il pompaggio che per la diffusione all'interno della massa muraria. I principali problemi dovuti ad un dosaggio errato

comportano l'eccessivo ritiro della parte iniettata (causa di limitato contatto della miscela con le pareti delle cavità) oppure l'evaporazione (motivo di elevata porosità).

In base alle esigenze dettate dallo specifico intervento (grado di assorbimento del supporto), si possono utilizzare cariche o additivi per conferire alle miscele diverse qualità o ridurre certi difetti. I principali additivi utilizzati sono di tipo espansivo, accelerante o ritardante, fluidificante e aerante. Mentre come cariche si utilizzano argille, sabbie, polveri di roccia, coccio pesto, ceneri volanti e pozzolana.

Le miscele a base di materiali inorganici più usate si possono dividere in due categorie:

- Miscela a base di cemento. Utilizzate nei casi in cui sia richiesta un'elevata resistenza meccanica e non ci siano incompatibilità con altri materiali. Si utilizza il cemento Portland, il cemento pozzolanico o d'alto forno, con rapporto a/c variabile tra 0.8÷1.2. Per evitare che una granulometria eccessiva limiti l'adesione al substrato esistente, si può adoperare, come aggregato, la polvere di marmo per una quantità pari al 10% del peso del cemento. La resistenza a compressione raggiungibile da queste miscele può arrivare fino a 40 MPa.
- Miscela a base di calce. Utilizzate in tutti gli altri casi, in quanto presentano maggiore affinità con le caratteristiche fisiche e meccaniche delle murature esistenti. La calce viene impiegata sotto forma di grassello, con buona propagazione all'interno della massa muraria. Per contro, presenta elevato ritiro e la possibilità che i finissimi grani occludano i fori, provocando ristagni d'acqua pericolosi in caso di gelo e disgelo; problematiche superabili con opportuna additivazione. [Valluzzi, 2000]

Per quanto riguarda l'applicazione, si fa' riferimento alle regole ed alle indicazioni fornite dalle normative tecniche, in particolare alle circolari n.21745 del 30/07/1981 [1981], e n.617 del 02/02/2009 (Paragrafo C8A.5) [2009], e si riassume nelle seguenti fasi di lavoro:

- Preparazione della parete: rimozione dell'intonaco, pulitura della compagine muraria, stilatura dei giunti e sigillatura delle fessure;
- Scelta dei punti in cui praticare i fori, in funzione alla diffusione delle fessure e alla porosità del muro. In genere sono sufficienti 2-3 fori per m², distribuiti su vertici di triangoli equilateri di lato uguale il doppio, in modo da interessare un'area maggiore, come schematizzato in Fig 1.6;

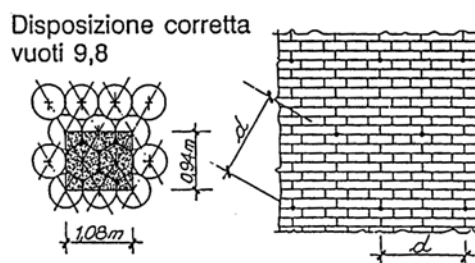


Fig 1.6: Disposizione dei fori per l'iniezione di miscele. [Modena et al., 2000]

- Esecuzione dei fori con perforazioni di diametro fino a 40 mm, eseguite con sonde rotative (in particolare carotiere) per non trasmettere alla struttura vibrazione e scuotimenti dannosi;

- Posizionamento degli ugelli di immissione e di rabbocco costituiti da rame, alluminio o resine sintetiche, e successiva sigillatura con malta a presa rapida;
- Immissione preliminare di acqua a leggera pressione, allo scopo di effettuare il lavaggio delle sezioni filtranti e di saturare la massa muraria;
- Iniezione della miscela dai fori muniti di iniettori, in genere iniziata in zone perimetrali più basse, per poi proseguire verso il centro. La diffusione è favorita dall'uso di una pompa idraulica o di aria compressa che spingono il fluido ad una pressione adeguata. Durante l'iniezione si chiudono i fori da cui man mano esce la miscela finché il processo si interrompe (Fig 1.7).

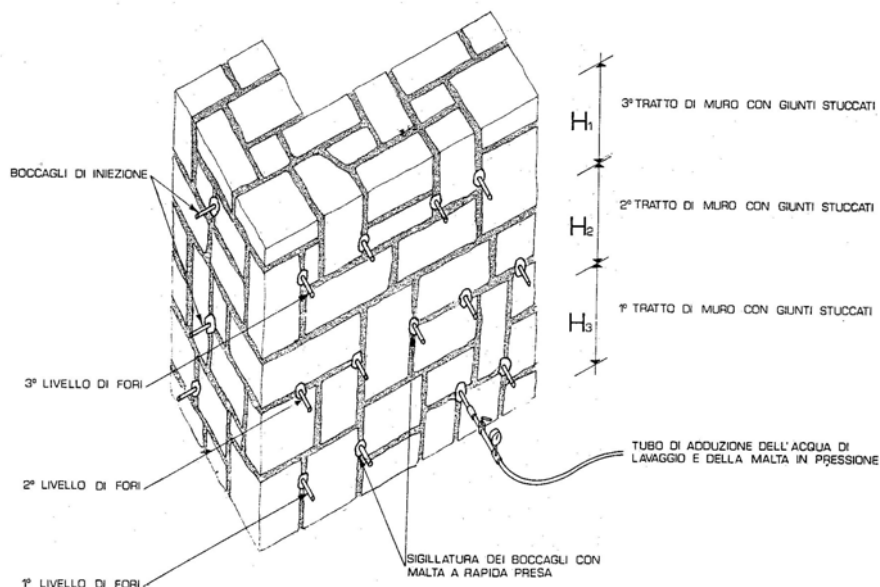


Fig 1.7: Schema di iniezione per pressione. [Modena et al., 2000]

Tirantini antiespulsivi per il rinforzo della sezione

I tirantini antiespulsivi sono sottili barre trasversali zincate passanti e poste in tensione attraverso bulloni e piccole piastrine di ancoraggio, al fine di riconnettere le due facce dei paramenti opposti (Fig 1.8). Tale tecnica può essere applicata nel caso di murature a tessitura regolare o in pietra squadrata, in mattoni o blocchi, e si ritiene particolarmente idonea quando la porzione che necessita di intervento è limitata e si voglia ridurre le deformazioni della muratura e migliorarne il comportamento a taglio. Solitamente si utilizzano gli acciai inossidabili delle varie classi, sulla base delle loro caratteristiche di resistenza e di deformabilità, di lavorabilità e compatibilità con altri tipi di materiali.

Quando si usufruisce di barre filettate si può procedere, al momento dell'inserimento, ad un riscaldamento dell'acciaio e ad un leggero serraggio; in questo modo la contrazione che si ha con il raffreddamento mette subito in tensione la barra, che esplica quindi immediatamente la sua azione antiespulsiva nei confronti dei paramenti della muratura. Se si adoperano semplici tiranti d'acciaio, invece, essi vengono fissati all'interno della muratura tramite piegatura o successiva iniezione. In questo modo l'azione di consolidamento si esplica solo quando la

deformazione della muratura subisce un aggravio, in conseguenza del quale la barra metallica entra in azione. In questo secondo caso, è possibile inserire i tirantini anche per battitura, sfruttando le lesioni presenti nella muratura. Altrimenti la tecnica di esecuzione è la seguente:

- Esecuzione dei fori passanti, secondo la maglia stabilita, utilizzando carotiere a rotazione e provvedendo a successiva asportazione di eventuali detriti;
- Inserimento delle barre metalliche filettate o ad aderenza migliorata, di diametro variabile tra i 4 e gli 8 mm, lasciando fuoriuscire le estremità dalla muratura (circa cm 4-5) per consentire il bloccaggio;
- Eventuale innesto, in testa alle barre, di piatti di contrasto di limitate dimensioni;
- Serraggio delle barre con bullonatura in acciaio, attribuendo una modesta pre-sollecitazione al tirantino;
- Sigillatura dei fori con l'uso di miscele compatibili con i supporti ed a stabilità volumetrica.

E' consigliabile, inoltre, fornire un monitoraggio periodico dello stato di tensione dei tiranti e, in particolari ambienti, provvedere ad una protezione degli elementi metallici contro l'azione di agenti esterni corrosivi.

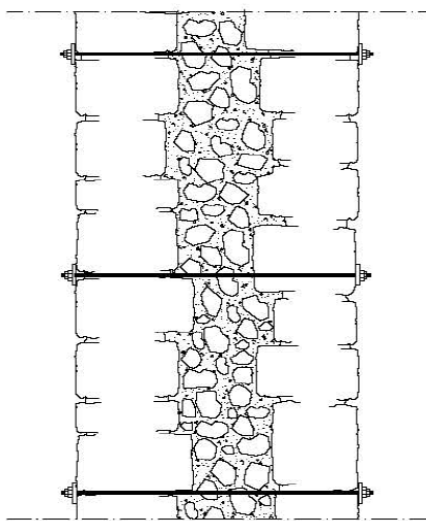


Fig 1.8: Impiego di tirantini antiespulsivi in muratura a più paramenti. [Rocchi, 2008]

Il metodo può essere efficace per contrastare fenomeni di spancimento, a condizione che la pre-tensione non sia né troppo elevata (effetti di punzonamento), né troppo bassa (tirante non efficace). Per fenomeni flessionali, invece, l'efficacia è di molto ridotta in quanto la rigidità a taglio della barre è trascurabile, in questo caso si può solo contare su un improbabile attrito tra i paramenti, realizzato grazie alla compressione orizzontale fornita dal tirante. L'intervento è sostanzialmente reversibile (i tirantini non sono iniettati) ed economico, ma piuttosto invasivo.

Comportamento a compressione a seguito di intervento

Un ampio studio sperimentale sul comportamento di murature a tre paramenti in pietra è stato svolto da Valluzzi et al. [2004] presso l'Università di Padova. Diciassette muri sono stati sottoposti in laboratorio a prove di compressione monoassiale in condizioni di rinforzo diverse: iniezione con due tipi di calce idraulica additivata, stilatura dei giunti di malta e tirantini trasversali in acciaio. Tali tecniche sono state applicate sia singolarmente che nelle loro possibili combinazioni, in conformità con le diverse problematiche riscontrabili in loco.

L'iniezione di miscele meccanicamente compatibili con i materiali originali, ha dimostrato di essere l'intervento più efficace per l'omogeneizzazione degli strati e la consolidazione del nucleo interno, migliorandone il legame e la modalità di collasso ed aumentando la capacità massima di carico anche oltre al 50%. Essa è in grado di sopperire alle principali carenze di questa tipologia di murature senza modificarne in modo significativo la rigidità, perciò si ritiene un intervento ammissibile anche in zona sismica.

La tecnica di ristilatura dei giunti, ha rivelato la sua efficacia soprattutto in termini di riduzione delle deformazioni orizzontali e di un ulteriore miglioramento del comportamento in combinazione con le iniezioni. La sua applicazione è utile ai fini del ripristino della malta deteriorata e del miglioramento delle proprietà di aderenza tra materiali. Tuttavia, necessita di particolare attenzione nella progettazione dell'intervento e nelle procedure di esecuzione.

L'uso dei tirantini metallici trasversali, sia singolarmente che in combinazione con la stilatura dei giunti, non ha mostrato alcun aumento significativo di resistenza a compressione e di rigidità rispetto alle condizioni originarie, salvo quando sono stati abbinati alle iniezioni. L'applicazione è utilizzata per creare un collegamento tra strati di muratura indipendenti.

Infine si sono approfondite le modalità di realizzazione degli interventi per definire procedure di controllo e valutazione dell'efficacia in fase esecutiva, mediante applicazione di tecniche d'indagine a basso grado d'invasività (prove soniche e prove con i martinetti piatti). Ed è stato calibrato un modello analitico per la valutazione dell'incremento di resistenza a compressione ottenibile mediante iniezione di miscele su murature in pietra a più paramenti.

Si è poi sviluppata una procedura per orientare il professionista nella scelta delle miscele d'iniezione, tra le molte disponibili in commercio, sia di tipo inorganico (cementi e calci) che organico (resine polimeriche). Sottolineando così, l'importanza di valutare i requisiti reologici di fluidità, stabilità e capacità di penetrazione, e le caratteristiche di compatibilità, in termini chimici, fisici, meccanici e termici, col supporto al fine di rendere massima l'efficacia dell'intervento [Valluzzi, 2000].

1.2. Sperimentazioni dinamiche su pannelli

Le campagne di sperimentazione dinamica permettono di approfondire la conoscenza del comportamento sismico dei campioni analizzati: singoli elementi strutturali o modelli completi di edificio. Su questa base, vengono impiegate, sin dagli anni ottanta, per studiare l'influenza delle tecniche di consolidamento e di rinforzo sul comportamento dinamico globale delle strutture in muratura, per poi valutarne l'efficacia e la fattibilità in sito. Questo tipo di indagini sono raggruppabili in:

- prove quasi-statiche, che forniscono risultati in merito alle caratteristiche meccaniche e alla resistenza sismica, utilizzate in particolare per le azioni nel piano;
- prove su tavola vibrante, le quali portano ad una maggiore conoscenza sia del comportamento dinamico globale, che degli aspetti specifici delle strutture testate, adoperate per le azioni fuori-piano.

L'analisi dei singoli pannelli, piuttosto che del modello completo di edificio, permette un'indagine e una conoscenza più approfondita dell'elemento collaudato e delle tecniche di rinforzo adottate. Consentendo non solo il confronto tra più soluzioni applicate allo stesso tipo di campione, ma anche l'analisi di elementi in scala reale, evitando così i problemi legati ai fattori di scala e dunque facilitando la realizzazione dei campioni di prova e l'interpretazione dei risultati.

Come già evidenziato nelle sezioni precedenti, le modalità di rottura più frequenti nelle murature multistrato in pietra sono dovute a meccanismi di collasso fuori-piano [Giuffrè, 1990; Giuffrè et al., 1993], studiati in laboratorio mediante l'uso della tavola vibrante.

Nel seguente paragrafo vengono presentate le campagne di sperimentazione dinamica effettuate in altre sedi, e di maggiore interesse per la tipologia trattata in questa Tesi: le prove su tavola vibrante di pannelli multistrato in muratura non armata (UnReinforced Masonry, URM) o rinforzata (Strengthened Masonry, SM). Tuttavia, dalla ricerca bibliografica effettuata, si è potuto constatare che, in genere, le campagne di prova su tavola vibrante interessano maggiormente modelli di edificio in scala, piuttosto che singoli elementi verticali. Inoltre le opere esaminate, riguardanti i pannelli in pietra, offrivano una panoramica incompleta ed è stato necessario approfondire la documentazione con pubblicazioni relative ad elementi in muratura multistrato in mattoni, considerate più simili al nostro caso di studio.

1.2.1. Shaking Table tests

Diverse sperimentazioni sono state effettuate considerando le semplici murature allo stato originario, senza alcun intervento di consolidamento, al fine di studiarne il comportamento fuori-piano, la resistenza, l'influenza della snellezza, della malta e delle condizioni al contorno. La documentazione disponibile tratta solamente pannelli in muratura di mattoni.

Una di queste campagne sperimentali è stata svolta dal gruppo ABK [1981] (Agbabian & Associates, S.B. Barnes & Associates, Kariotis & Associates) nei primi anni ottanta su elementi non rinforzati, coinvolgendo diverse tipologie murarie, tra cui quella multistrato in mattoni. L'indagine era volta a definire la snellezza limite e le condizioni ultime dei singoli pannelli, per determinarne la resistenza ed, eventualmente, l'efficacia degli interventi di rinforzo.

Venti pannelli in muratura sono stati sottoposti a circa duecento inputs sismici (Fig 1.9) con picchi di accelerazione (Effective Peak Acceleration, EPA) compresi tra 0.10g e 0.40g, scelti per coprire l'intera scala di sismicità degli Stati Uniti. Sono stati quindi raccolti valori di spostamento, accelerazione e forza, ed un data-base utile a ricavare altri dati, come la deformazione relativa dei pannelli. I risultati ottenuti da queste prove sono stati impiegati per lo sviluppo di un modello matematico di previsione del collasso e di linee guida per il consolidamento. Da questa ricerca, risulta che il meccanismo di collasso dipende maggiormente dal picco di accelerazione raggiunto in sommità e alla base, piuttosto che alla deformazione relativa e allo spostamento relativo indotti rispettivamente nella parte superiore ed inferiore del pannello.

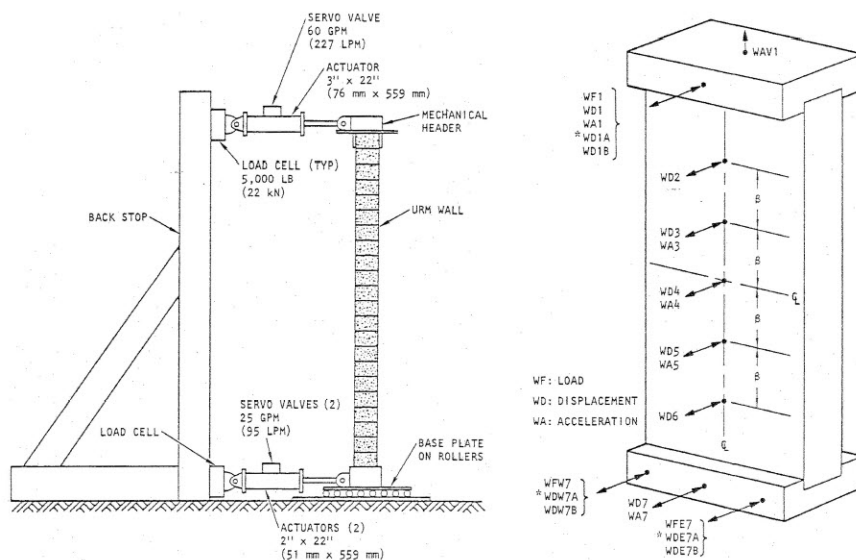


Fig 1.9: Allestimento sperimentale (a sinistra) e localizzazione dei sensori (a destra). [ABK, 1981]

Più recentemente, Griffith et al. [2004] hanno sviluppato studi sperimentali e numerici sulla stabilità delle pareti in muratura non rinforzata. La campagna dinamica, eseguita su quattordici pannelli di altezza mt 1.50 e spessore di mm 110 o 50 (snellezza, rapporto h/t, di 13.60 e 30 rispettivamente), sottolinea come gli spostamenti di grandi dimensioni sono la causa principale del crollo dei muri, piuttosto che l'ampiezza della forza di inerzia.

Il programma sperimentale (Fig 1.10) prevedeva l'uso di cinque accelerometri e quattro sensori di spostamento. I primi posizionati per registrare le accelerazioni orizzontali del pannello (e quindi la distribuzione delle forze d'inerzia agenti sul muro), della tavola vibrante e della sommità del telaio di supporto; mentre i secondi situati sulla tavola vibrante, sulla base di appoggio, sul telaio e sulla mezzeria del muro per calcolare le deformazioni della parete rispetto al sostegno. Le prove si sono sviluppate in tre fasi:

- Prove statiche push-over e dinamiche ad input armonico (frequenza 2.7 Hz o 10 Hz, utilizzate per il confronto della resistenza statica e dinamica e della rigidità) per determinare il comportamento non lineare forza-spostamento;
- Prove a libera vibrazione per definire le caratteristiche dinamiche iniziali (frequenza naturale e smorzamento);
- Prove su tavola vibrante: input ad una frequenza compresa tra 0.5-3.0 Hz, e tre input sismici diversi (Nahanni-1985, El Centro-1940 e Northridge-Pacoima Dam-1994).

I risultati hanno portato ad individuare un rapporto empirico forza-spostamento per la previsione del crollo della parete, sviluppo di un precedente studio di Griffith et al. [2003] nel quale era stata individuata una procedura analitica per valutare la risposta di pareti in muratura non armata (URM) sottoposte ad eccitazione sismica fuori-piano.

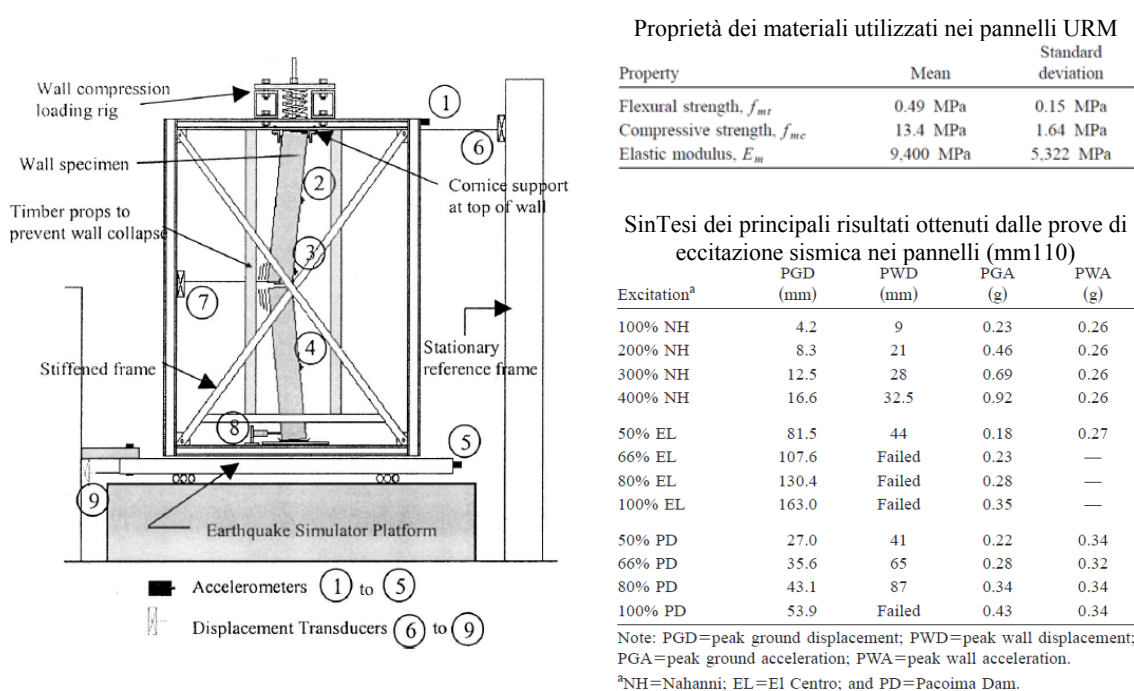


Fig 1.10: Configurazione sperimentale (sinistra) e alcuni risultati (destra). [Griffith et al., 2004]

Griffith et al. [2003] utilizzarono il meccanismo più semplice, ad un solo grado di libertà (Single Degree-of-Freedom, SDOF) per affermare che la rigidità iniziale - e quindi il periodo iniziale - non è cruciale nel determinare il verificarsi del collasso, ma esso dipende principalmente dalla resistenza massima e dalla capacità di spostamento ultimo: parametri legati alle caratteristiche meccaniche del materiale (il modulo elastico E e la resistenza a compressione della muratura). I principali vantaggi del metodo individuato sono la semplicità nella sua

applicazione e la non sensibilità a parametri iniziali che potrebbero essere soggetti ad elevata incertezza.

Meisl et al. [2006] hanno testato quattro pannelli multistrato URM, come nel caso di ABK [1981], due realizzati con malta di buona qualità e due di scarsa qualità. Lo studio ha analizzato l'influenza dell'accelerazione alla base e della qualità della malta di costruzione nel comportamento fuori-piano del muro. I risultati ottenuti hanno dimostrato come le pareti URM presentano maggiori danni nel fuori-piano se poggiano su terreni soffici, rispetto a quelle situate sul substrato solido. Inoltre, la qualità della malta sembra avere un'influenza limitata sul comportamento globale e sui meccanismi di collasso dei campioni testati.

Wilhelm et al. [2007] hanno effettuato una serie di prove su tavola vibrante all'Istituto IBK di Zurigo (ETH), utilizzando sei pannelli in muratura di mattoni. I campioni, realizzati in scala reale (mt 2.40x1.20), avevano diversi spessori compresi tra mm 125 e mm 200. L'obiettivo principale del programma sperimentale è stato la valutazione degli effetti indotti dalle condizioni al contorno sul comportamento globale fuori-piano delle murature. Per questo motivo sono stati progettati due diversi allestimenti di prova, con l'utilizzo di un telaio in acciaio (Fig 1.11). La prima configurazione riproduce un vincolo alla base, mentre la parte superiore rimane libera di ruotare e traslare verticalmente, ossia il caso che si manifesta all'ultimo piano di un edificio. Nella seconda condizione, invece, è stata bloccata anche la sommità del pannello, un doppio incastro, per simulare un tipico muro soggetto alle azioni degli orizzontamenti. Lo studio ha portato a concludere che, se è previsto un corretto collegamento tra le strutture verticali e orizzontali, i danni sono concentrati a due terzi dell'altezza del pannello. Inoltre, durante le prove, potrebbero verificarsi tre fasi successive: elastica, oscillazione stabile e oscillazione con presenza di fessurazioni.

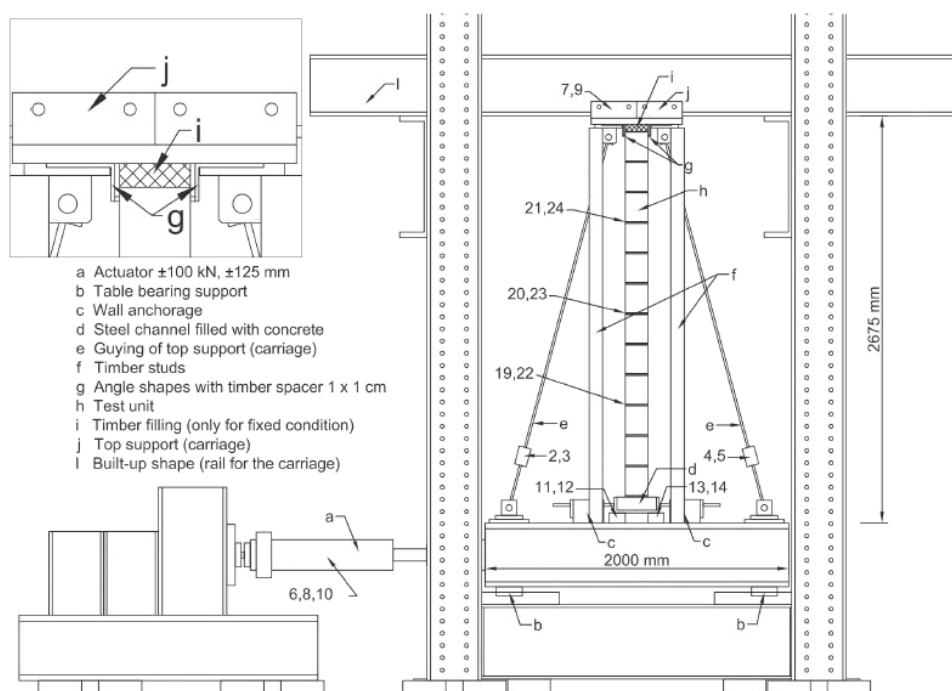


Fig 1.11: Allestimento di prova e dettaglio del supporto in sommità. [Wilhelm et al., 2007]

Ulteriori sperimentazioni trattano il confronto tra le condizioni iniziali (URM) della muratura e quelle successive ad interventi di rinforzo, interessando anche campioni in pietra. Questi studi sono volti principalmente a definire l'efficacia delle soluzioni applicate sul comportamento dinamico e sulle caratteristiche della struttura.

Per studiare il comportamento dinamico delle murature in pietra del Parlamento canadese (Ottawa), Elmenshawi et al. [2010; 2011] hanno costruito otto pannelli multistrato (mt2.75x2.00x0.54) - due nelle condizioni iniziali e sei rinforzati con diverse tecniche (ancoraggi metallici trasversali e tradizionali in pietra ad incastro, Fig 1.12) - composti da due strati esterni, uno in pietra arenaria ed uno in pietra calcarea, uniti da uno strato interno di pietrisco e malta. Il programma sperimentale (Fig 1.13) prevedeva prove nel piano, fuori-piano e a libere vibrazioni, nessuna delle quali ha indotto al collasso dei pannelli.

Per quanto riguarda le prove nel piano, ogni muro è stato sottoposto ad un carico medio assiale di 0.3 MPa (0.6 MPa per la parete W2), e successivamente, ad un carico laterale sinusoidale a frequenza di 5.0 Hz con ampiezza variabile da 1 a 10 kN, ognuno applicato per 10 cicli. Da questi studi, l'autore ha osservato che i sistemi di rinforzo utilizzati non hanno influenzato le caratteristiche sismiche delle pareti (resistenza, rigidità laterale, duttilità e smorzamento isteretico).

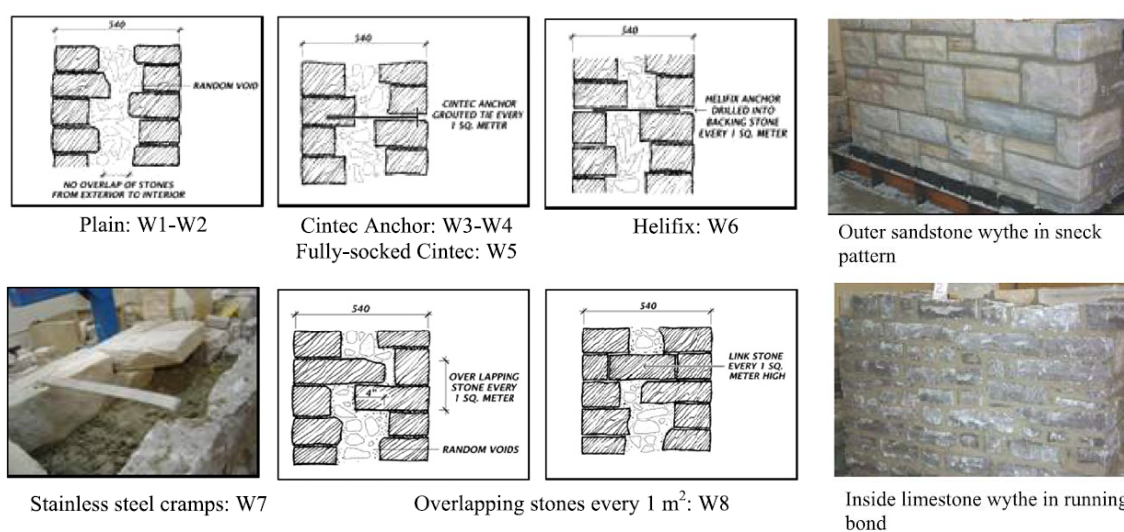


Fig 1.12: Campioni di prova e schemi delle sezioni con individuazione dei sistemi di rinforzo utilizzati per collegare i paramenti. [Elmenshawi et al., 2010]

Per le prove fuori-piano, i pannelli sono stati vincolati alla base e in sommità, e sono state simulate due scosse di terremoto su tavola vibrante monoassiale, ognuna applicata al 60%, 100% e 110%, per un totale di sei inputs. Il primo sisma applicato è stato registrato in loco nel 2002 e amplificato con un fattore di scala 183, con un picco di accelerazione al suolo (Peak Ground Acceleration, PGA) finale di 0.353 g. Il secondo è stato sviluppato in laboratorio per valutare la validità delle condizioni dettate dalla normativa per Ottawa (magnitudo M6 a distanza di 30 km, con probabilità di superamento in 50 anni del 2%).

- Infine, nelle prove a libera vibrazione è stato imposto uno spostamento iniziale sulle pareti con l'uso di un cavo in tensione (9,0 kN), tale da non causarne fessurazioni o rigidità.

Tagliando il cavo, il muro ha iniziato le libere vibrazioni producendo nel piano accelerazioni e spostamenti monitorati con accelerometri e sensori di spostamento (Linear Variable Differential Transformer, LVDT) posizionati come in Fig 1.13.

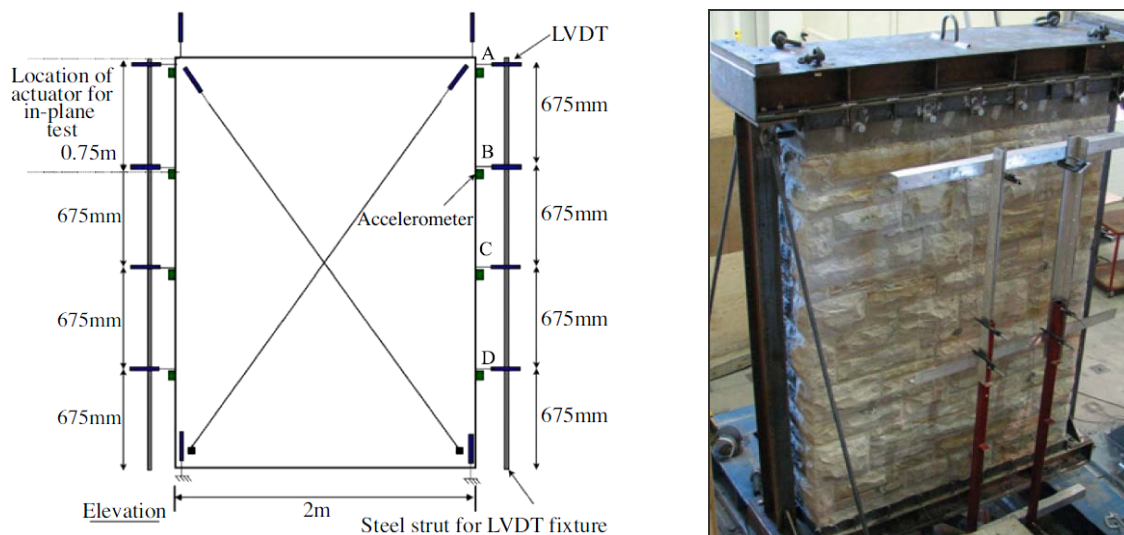


Fig 1.13: Configurazioni delle prove nel piano e fuori-piano. Posizionamento dei sensori (sinistra) e del pannello (destra) su tavola vibrante, vincolato alla base e in sommità. [Elmenshawi et al., 2010]

Queste prove sono state condotte a tre livelli di danno, con pannello fissato solamente alla base:

- Fase I: senza danno della muratura (fase elastica);
- Fase II: dopo i danni nel piano;
- Fase III: dopo i danni nel piano e fuori-piano.

Successivamente sono state valutate le caratteristiche dinamiche, i meccanismi di smorzamento, i rapporti di smorzamento (stimato valutando il decadimento delle ampiezze di spostamento nel tempo) e il periodo naturale di vibrazione, per poi osservare che nessuna delle tecniche di rinforzo prese in esame ha influenzato tali valori. Si sono però rilevati altri risultati interessanti:

- Lo smorzamento viscoso. E' l'attrito dominante e più semplice da determinare. Il suo incremento (a partire da un rapporto iniziale di 0.03) è proporzionale all'aumentare del danno, e quindi alla riduzione del modulo elastico, infatti, rispetto allo stato iniziale, è maggiore del 33% nel piano e del 67% fuori-piano. Diversamente dai risultati osservati da Mazzon [2009] per il quale all'aumentare dei coefficienti di smorzamento aumentava la resistenza dei provini in pietra analizzati. Non si nota alcuna relazione con la frequenza, ma si osserva che, come per lo smorzamento, anche il periodo naturale di vibrazione aumenta con i danni, quindi al degradare della rigidità. Perciò relazionando il rapporto di smorzamento viscoso e il periodo naturale di vibrazione allo spostamento laterale è possibile anticipare le proprietà dinamiche di una struttura storica già danneggiata. Infine, la maggior dispersione nelle fasi II e III, indica un'influenza minore dello smorzamento viscoso e quindi la presenza di altre tipologie di attrito.
- Lo smorzamento di Coulomb. E' dovuto alla presenza di frizione a secco sia tra gli elementi rigidi di pietra che tra i paramenti. L'attrito presente nel nucleo ha quindi

un'influenza significativa sul muro in vibrazione, in particolare nelle murature non rinforzate o danneggiate, nonostante ciò, lo smorzamento viscoso può dare stime ragionevoli sul comportamento effettivo.

- Lo smorzamento isteretico. E' la perdita di energia per ciclo di carico ed è rilevante nei sistemi con comportamento non lineare, perciò spesso viene valutato con un sistema viscoso lineare equivalente. Pur essendo qui trascurabile, esso inciderebbe sui meccanismi di smorzamento quando sono presenti fessurazioni e, nelle strutture reali, quando i carichi sono più elevati.
- I modi di vibrare. Considerando i valori medi degli LVDT si nota che le pareti vibravano in fase, e quindi era dominante il primo (fondamentale) modo di vibrare. Modi superiori, solitamente non presenti nelle libere vibrazioni, non si sono effettivamente presentati.
- La frequenza naturale del pannello. Passando da uno step di prova all'altro, diminuisce leggermente con l'incremento dell'amplificazione delle accelerazioni alla base.
- Caratteristiche meccaniche. Si è constatato che a causa delle irregolarità, rigidità ed eterogeneità della muratura in pietra, il rapporto tra i moduli elastici (di Young E e di taglio G) non dipende dal coefficiente di Poisson ed è variabile in relazione allo stato fessurativo. Inoltre, in contrasto con il rapporto G/E di 0.4 adottato dalla normativa vigente [Eurocodice 6, 2005] e di 0.1 suggerito recentemente da Tomažević [2009], i risultati hanno rivelato che nelle murature in pietra non fessurate, può esser considerato un rapporto G/E fino a 0.03. In conclusione, nello studio di Elmenhawi et al. [2011], nemmeno questi parametri (modulo di taglio, modulo di Young e il loro rapporto) sono stati influenzati dai sistemi di rinforzo adottati.

Diverse sono le tecniche adottate da Ismail et al. [2009] per effettuare prove a flessione fuori-piano su tre pannelli in muratura non armata (URM) di dimensioni reali, due dei quali rinforzati sismicamente con post-tensionamento. L'indagine era volta a definire la variazione di tensione delle barre, i modelli di danno, il comportamento forza-spostamento, la rigidità iniziale e la capacità di spostamento. Dagli studi effettuati si osserva che la resistenza a flessione fuori-piano delle pareti rinforzate è superiore di 2,9 e 7,1 volte quella della muratura semplice, e dipende dalla forza di precompressione iniziale, dal tipo di barra, dalle condizioni al contorno e dal confinamento. Mentre la rigidità media iniziale deriva dalla dimensione della parete e dalle proprietà elastiche del materiale che la costituisce.

I campioni (mt 3.90x1.17x0.22) imitano il patrimonio edilizio tradizionale della Nuova Zelanda, e sono composti da mattoni riciclati posizionati con un corso di testa ogni tre corsi longitudinali, rinforzati mediante l'inserimento successivo di una barra filettata in acciaio dolce, con tensione controllata meccanicamente, posizionata verticalmente nell'asse del pannello.

Il post-tensionamento (Fig 1.14) può essere applicato sia quando le barre sono completamente bloccate dal legante, sia quando sono libere. In questo secondo caso, l'intervento è considerato reversibile, in quanto non risulta invasivo per il tessuto architettonico dell'edificio, ed è perciò un'auspicabile soluzione per strutture URM di elevato interesse comune [Goodwin et al., 2011]. Il decremento della tensione nella barra avviene solo a seguito

del raggiungimento del suo limite elastico, con l'insorgere di fessurazioni localizzate in mezzzeria e senza indurre la muratura al collasso.

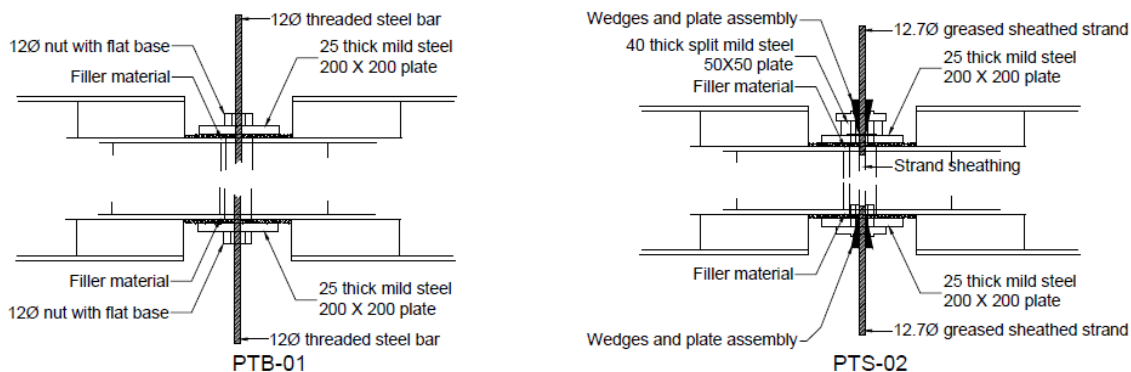


Fig 1.14: Dettagli dell'ancoraggio finale della barra di post-tensionamento. [Ismail et al., 2009]

Nella configurazione di prova (Fig 1.15) è stato utilizzato un air-bag per applicare un carico distribuito, omogeneo e pseudo-statico, emulando le forze sismiche laterali generate nella direzione fuori-piano. Il telaio è stato posto su due piastre in acciaio con attrito trascurabile, affinché il peso proprio non comprometta i risultati, e sono state posizionate delle bielle in sommità per simulare il collegamento con gli orizzontamenti. Infine, sono stati utilizzati: un trasduttore di spostamento lineare variabile (LVDT) posizionato a metà altezza del muro, per determinarne i movimenti, e quattro celle di carico per misurare la forza applicata dagli airbag, più un'ulteriore cella installata nella barra per misurarne la tensione.

I risultati sperimentali sono stati infine confrontati con modelli analitici sviluppati in studi precedenti, ed è stato dedotto che le attuali tecniche predittive sono in grado di dare valori significativi di resistenza a flessione fuori-piano per livelli elevati di pre-compressione.

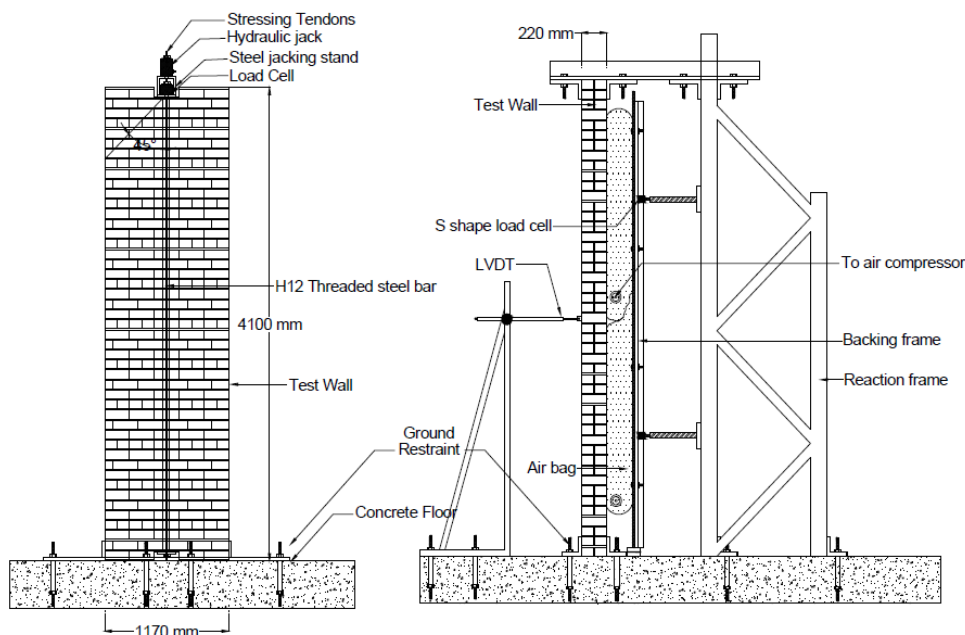


Fig 1.15: Configurazione di prova. [Ismail et al., 2009]

1.2.2. Comportamento fuori-piano in altri casi di studio

Si conclude questo paragrafo dedicato alle campagne di sperimentazione dinamica, con un veloce excursus sulle esperienze effettuate nel campo delle murature confinate [Tu et al., 2010; Varela-Rivera et al., 2011] e di altri materiali, testati con configurazioni di prova particolari in grado di studiare simultaneamente i comportamenti nel piano e fuori-piano [Simsir et al., 2004].

Tu et al. [2010] hanno condotto prove su tavola vibrante con quattro pannelli in muratura non armata (URM) confinati mediante l'uso di un telaio in cemento armato (Fig 1.18). I campioni includevano: un telaio puro (senza tamponamento), due telai con pannelli in muratura confinati di diverso spessore e uno con pannelli di tamponamento (Fig 1.16).

Ogni campione è stato sottoposto ad input sismico unidirezionale, con incremento di accelerazione al suolo ad ogni ciclo fino alla comparsa di gravi danni sulla struttura. La strumentazione utilizzata prevedeva l'impiego di accelerometri e sensori di spostamento applicati agli angoli del telaio e sulla superficie del campione.

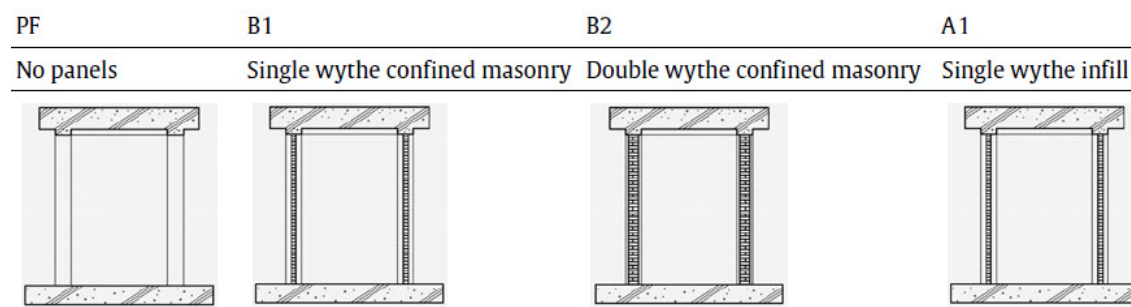


Fig 1.16: Sezione trasversale delle tipologie di campioni utilizzati nello studio di Tu et al. [2010].

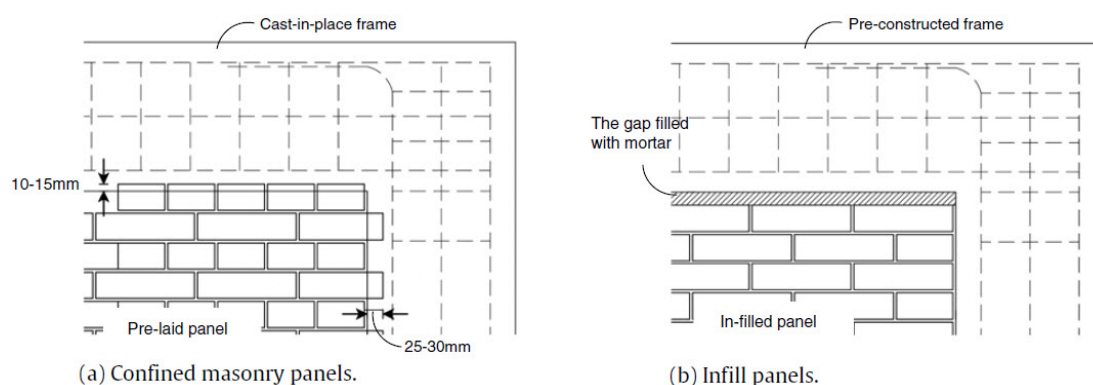


Fig 1.17 Dettaglio della connessione tra i pannelli e il telaio in c.a. [Tu et al., 2010]

Si è osservato che, nelle pareti confinate, la snellezza e le condizioni al contorno hanno assunto notevole importanza per la resistenza e per la rigidità dei campioni, i quali sono perciò in grado di sostenere notevoli carichi sismici fuori-piano. Mentre nei pannelli di tamponamento si è riscontrato un comportamento diverso in relazione all'accelerazione al suolo: per bassi valori di PGA c'è buona resistenza a curvatura, bensì ad intensità maggiori si è verificata la separazione delle pareti dal telaio e il crollo delle murature, sotto la forza d'inerzia causata dal loro stesso peso. Se ne deduce che un ammorsamento tra pannello e telaio ben eseguito (Fig

1.17) e un maggior spessore del muro, sono parametri proporzionali ad una migliore resistenza fuori-piano e quindi alla capacità di deformazione delle pareti. Tuttavia vanno svolti ulteriori studi per capire l'effetto delle colonne del telaio e della tipologia di pannello.

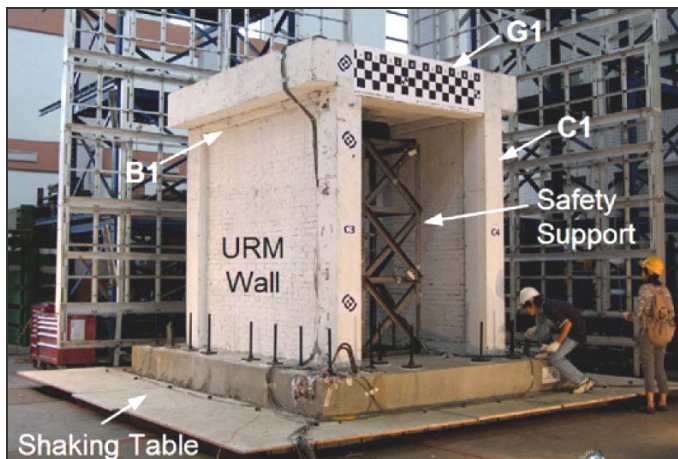


Fig 1.18: Campione B1, allestimento della prova su tavola vibrante. [Tu et al., 2010]

Anche Varela-Rivera et al. [2011] presentano uno studio sul comportamento di pareti in muratura confinate, soggette però a pressioni uniformi (attraverso un air-bag) fuori-piano. In laboratorio hanno testato sei pannelli, in scala reale mt (1.76x3.60), confinati con elementi di c.a. di sezione mt (0.15x0.15) e supportati su tre e su quattro lati da profili in acciaio (Fig 1.19).

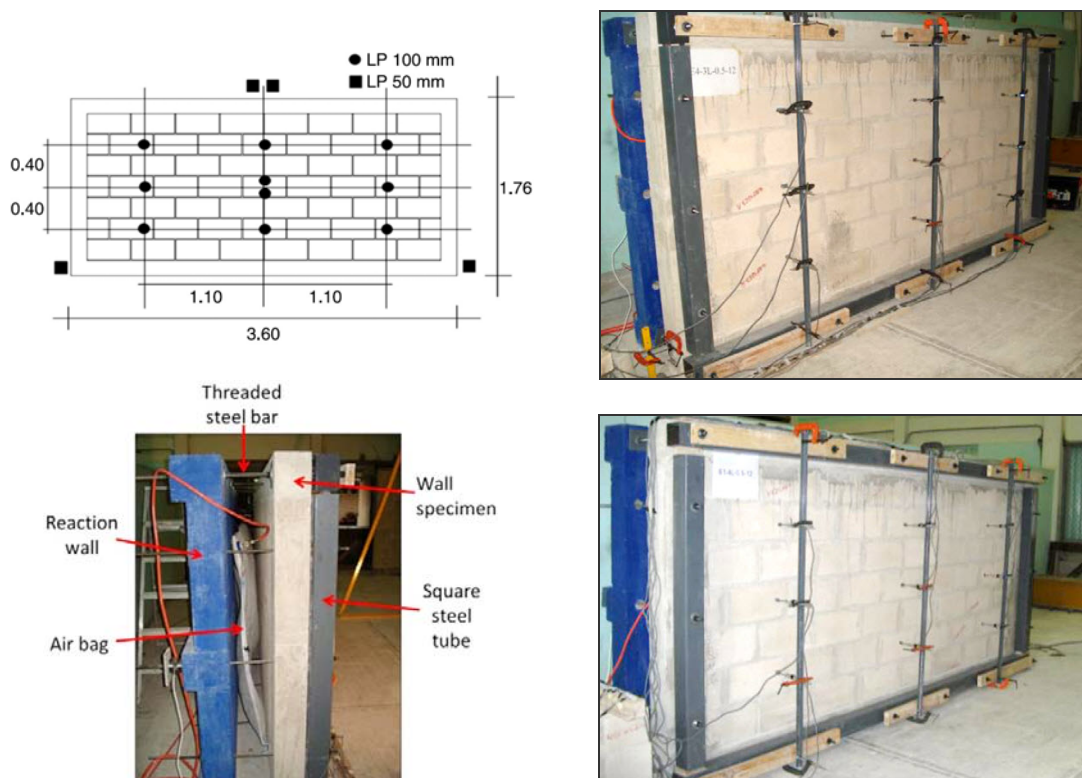


Fig 1.19: Allestimento di prova. In alto a sinistra la disposizione dei sensori di spostamento; a destra il campione con tre (in alto) e con quattro (in basso) supporti. [Varela-Rivera et al., 2011]

Successivamente hanno sviluppato due modelli analitici semplificati per la previsione delle modalità di collasso e della massima resistenza dei campioni. Si è osservato che il comportamento fuori-piano delle murature è influenzato principalmente dalle condizioni del supporto, dal rapporto di forma e di snellezza, dalla rigidità del telaio di confinamento in cemento armato e dal carico assiale esercitato. I due casi in analisi, pannelli con tre e quattro supporti laterali, hanno presentato meccanismi di rottura e valori di resistenza affini, ciò sta a significare che l'elemento in cemento armato non supportato, ha risposto con forza e rigidità tali da agire come quarto appoggio e che, quindi, deve essere progettato in modo adeguato.

Diversa è la campagna dinamica compiuta da Simsir et al. [2004], la quale prevedeva l'analisi di quattro pannelli in scala 1:2 costituiti in blocchi leggeri di calcestruzzo. L'allestimento sperimentale (Fig 1.20), ha permesso di testare contemporaneamente tutte le pareti: due nel piano e due nella direzione fuori-piano.

Di elevato interesse sono state le indagini circa l'influenza delle condizioni al contorno, rappresentate nella realtà dagli orizzontamenti in sommità e dai vincoli alla base. A differenza di altri test simili, i campioni non hanno presentato fessurazioni in mezzeria in grado di provocare il collasso, tranne quando il carico assiale è stato ridotto ed è stata aggiunta una massa alla parete. Si è perciò osservato che la flessibilità dei diaframmi può significativamente migliorare gli spostamenti fuori-piano.

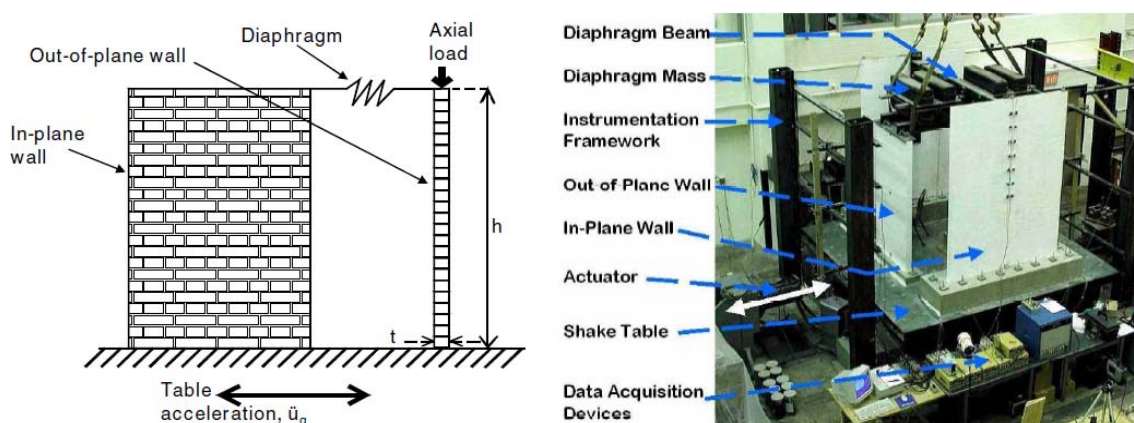


Fig 1.20: Configurazione di prova: schema e modello reale su tavola vibrante. [Simsir et al., 2004]

1.3. Identificazione dinamica

L'analisi modale può essere definita come una metodologia d'indagine sulle caratteristiche dinamiche della struttura, con l'obiettivo principale di ottenere una descrizione matematica dei parametri modali [Ewins, 1984]. I dati che possono essere estrapolati sono caratteristiche intrinseche della struttura e sono direttamente correlati alle sue proprietà fisiche (massa, smorzamento e rigidezza) e alle condizioni al contorno. Di conseguenza è considerata tra le più importanti tecniche non distruttive per approfondire la conoscenza del comportamento sismico delle strutture e si è diffusa, negli ultimi decenni, in particolare nello studio di edifici storici.

Sviluppata inizialmente nei campi aeronautico e aerospaziale, l'identificazione dinamica viene adottata, a partire dagli anni ottanta, nella caratterizzazione di opere civili. Hanno inizio così numerose campagne sperimentali che portano ad indagare frequenze fondamentali (f_n), forme modali (φ_n), rapporti di smorzamento (ζ_n) e la correlazione con lo sviluppo delle fessurazioni e dei meccanismi di collasso. L'applicazione di diversi metodi di identificazione modale a campioni sottoposti a prove di laboratorio permette infatti di rilevare i loro danni strutturali, oltre che di fornire informazioni circa l'influenza degli interventi di consolidamento e di rinforzo sul comportamento dinamico degli elementi considerati.

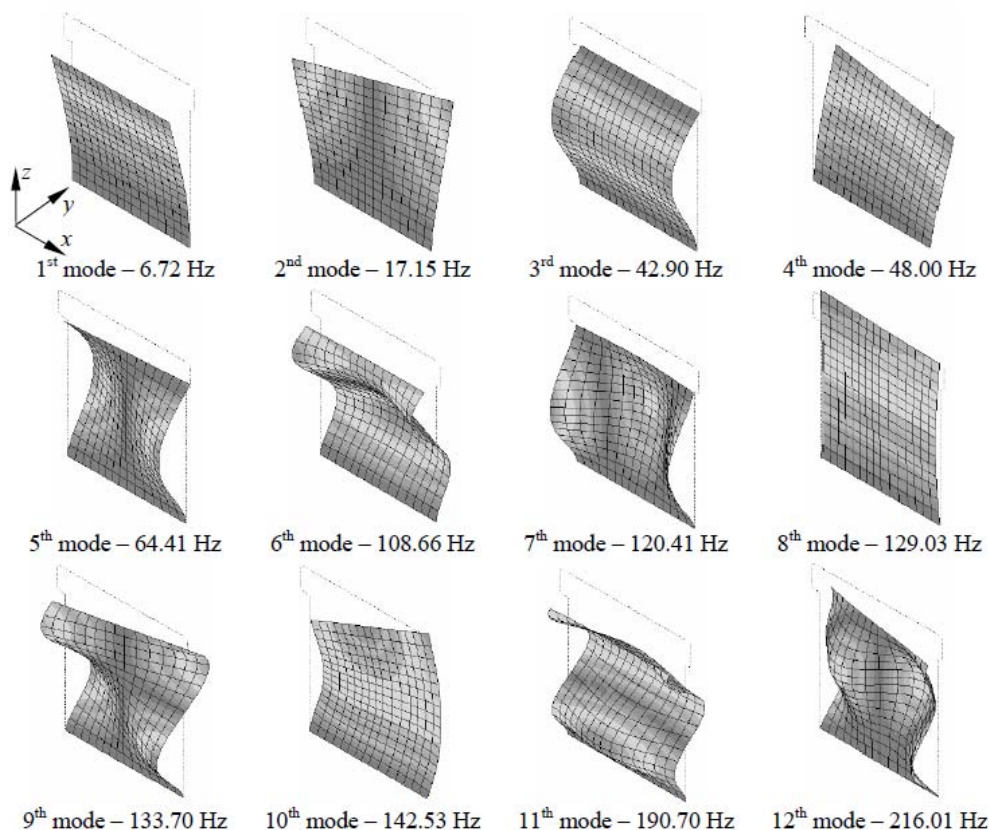


Fig 1.21: Risultati in termini di frequenza e di forme modali dei pannelli murari - serie A. [Ramos, 2007]

Tuttavia, i sistemi di identificazione modale e il calcolo dei parametri dinamici sono argomenti ancora in fase di sviluppo attraverso campagne di ricerca, le quali procedono concentrandosi sia su metodi, modelli e tipologie d'eccitazione della struttura da utilizzare in sede di laboratorio, sia su software che permettono l'elaborazione dei dati sperimentali o addirittura l'analisi attraverso schemi esclusivamente analitici.

Ramos [2007] avvia una campagna sperimentale per approfondire e sviluppare una metodologia d'identificazione del danno da applicare in particolare su strutture in muratura. In laboratorio sono state condotte prove sperimentali su archi e pannelli in muratura (Fig 1.21) per lo studio, attraverso le vibrazioni, della propagazione delle fessurazioni a bassi livelli d'intensità con l'obiettivo di eseguire analisi di incremento del danno. Questo metodo, sulla base delle osservazioni effettuate, è stato applicato anche a casi di studio reali: la Torre dell'Orologio di Mogadouro e la Chiesa del Monastero dos Jerónimos, a Lisbona.

Un altro interessante studio eseguito da Ramos et al. [2005], riguarda l'analisi modale operativa su un modello di edificio ad un piano in muratura, sottoposto a prove su tavola vibrante. Oltre all'individuazione e alla localizzazione dei danni strutturali, uno degli obiettivi principali di questo studio era il confronto tra l'analisi modale classica con quella ambientale, permettendo così la validazione dell'utilizzo di questa tecnica per il rilevamento delle fessurazioni già durante le prime fasi di sviluppo.

Numerosi sono i casi di studio reali che coinvolgono strutture storiche, anche già danneggiate, o grandi infrastrutture soggette costantemente a moti vibrazionali. Nella prima circostanza, un esempio è dato dalla campagna di analisi, statiche e dinamiche, compiuta da Modena et al. [2001] nel Castello Maniace a Siracusa, per la caratterizzazione dello stato locale di stress e delle proprietà dei materiali utilizzati. Con la realizzazione e la calibrazione di un modello numerico sono state effettuate indagini dinamiche più precise, permettendo così di determinare la potenziale pericolosità strutturale del complesso edilizio.

Reynders et al. [2009] confrontano, invece, diversi metodi ed attrezzature per l'eccitazione strutturale operativa su due passerelle pedonali: una a Wetteren, in Belgio, con un arco in acciaio di mt 75.2 ed uno sporto di mt 30.3, e l'altra presso l'Università di Porto con due campate in cemento armato di mt 30 e 28. E' un dato di fatto che, per questioni economiche, si aumenta sempre più la luce tra i pilasti di sostegno, questa ricerca propone quindi l'uso dell'identificazione modale per conoscere il comportamento dinamico globale del ponte, ai fini del collaudo e di una maggiore efficienza dei materiali e della struttura progettata. Vengono quindi confrontate le classiche prove a vibrazione in situ con quelle di analisi modale, che prevedono l'uso di dispositivi ad impulso più piccoli e pratici.

1.3.1. Trasduzione e acquisizione del segnale

Le grandezze fisiche che definiscono la risposta del sistema (come spostamenti, velocità, accelerazioni, tensioni, forze, ecc.) possono essere misurate per mezzo di sensori (trasduttori) in grado di rilevarne la variazione durante l'evento sperimentale, e di quantificarla in termini di differenza di potenziale elettrico proporzionale. Successivamente, attraverso un dispositivo convertitore ADC (Analog-to-Digital Converter), il segnale elettrico viene trasformato in dati digitali, così che possano essere elaborati dal sistema di acquisizione. La misura della risposta dinamica può essere raggiunta da una qualsiasi delle quantità fisiche suddette, tuttavia, per i casi a bassa frequenza (opere di ingegneria civile) è più utile rilevare gli spostamenti, mentre per quelli ad alta frequenza (macchinari) son più adatte le accelerazioni [Ramos, 2007].

Le attrezzature attualmente più in uso sono di tipo piezoelettrico, piezoresistivo, capacitivo o a forza bilanciata. Esistono anche sensori più recenti di tipo wireless, i quali permettono di ottenere un set completo e continuo di dati con un costo minimo, ma necessitano di una buona calibrazione e possono incorrere in problemi di rumore nei segnali acquisiti. Informazioni più dettagliate a riguardo possono essere reperite in Ramos [2007] e De Stefano e Clemente [2006].

L'ACCELEROMETRO PIEZOELETTRICO (Fig 1.22) è un sistema massa-molla-ammortizzatore che sfrutta, come principio per la rilevazione dello spostamento della massa, il segnale elettrico generato da un cristallo piezoelettrico quando è sottoposto alla compressione indotta dal movimento della massa stessa.

- Vantaggi: è un accelerometro attivo (non utilizza un alimentatore esterno), è stabile, ha un buon rapporto segnale-rumore e può rilevare accelerazioni elevatissime senza danneggiarsi.
- Svantaggi: poco sensibili, perciò non è possibile misurare le componenti DC (0 Hz), come l'accelerazione di gravità permanente g (caso di strutture molto flessibili).

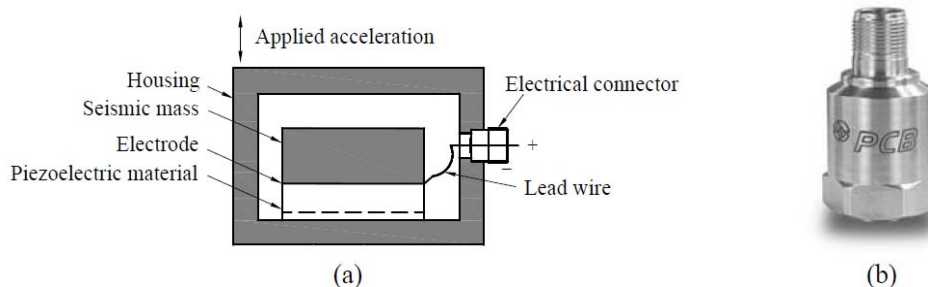


Fig 1.22: Accelerometro Piezoelettrico: (a) sezione trasversale; (b) PCB Model 393B12. [Ramos, 2007]

L'ACCELEROMETRO PIEZORESISTIVO è formato da una massa sospesa su un elemento a sbalzo, il quale ha dei misuratori di tensione incollati sulla parte superiore e inferiore. Lo spostamento della massa determina l'allungamento dei sensori, mentre la tensione di sbilanciamento, proporzionale all'accelerazione, viene letta da un voltmetro.

L'ACCELEROMETRO CAPACITIVO (Fig 1.23) sfrutta, come principio per la rilevazione dello spostamento della massa, la variazione della capacità elettrica di un condensatore al variare della distanza tra le sue armature. Le due armature son costituite dalla struttura fissa del

dispositivo e dalla massa (realizzata con materiale conduttivo), la quale è sospesa su una membrana elastica relativamente rigida. Un apposito circuito rileva la capacità del condensatore e genera un segnale elettrico proporzionale alla posizione della massa.

- Vantaggi: misurano i segnali di accelerazione uniforme e sono in grado di rispondere a eventi di accelerazione variabile (fino a max 1000 Hz).
- Svantaggi: sono accelerometri passivi (richiedono la fornitura di energia) e sono costosi.

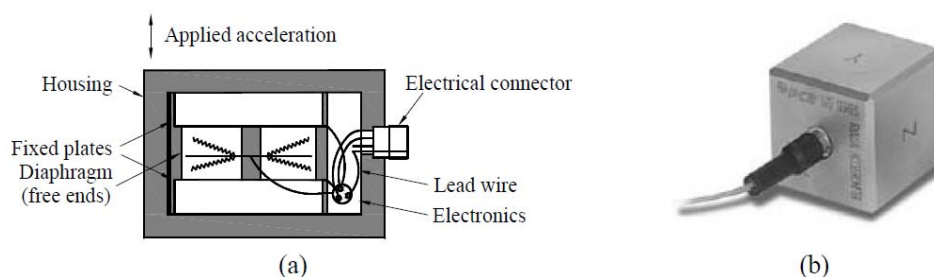


Fig 1.23: Accelerometro Capacitivo: (a) sezione trasversale; (b) PCB Model 3703. [Ramos, 2007]

L'ACCELEROMETRO A FORZA BILANCIATA (

Fig 1.24) è un sistema massa-molla che sfrutta il segnale differenziale elettrico, proporzionale all'accelerazione, necessario a riportare la massa nella sua posizione d'equilibrio, per rilevarne lo spostamento. La massa (piastra centrale) è ancorata alla struttura attraverso quattro elementi che la tengono sospesa senza impedirne il movimento. A seguito dello spostamento, le due placche capacitive nella unit-cell riportano la massa nella posizione iniziale.

- Vantaggi: sono robusti e molto sensibili, quindi ideali per i test di vibrazione ambientale e su strutture flessibili.
- Svantaggi: sono trasduttori passivi (richiedono la fornitura di energia), sono più costosi dei precedenti.

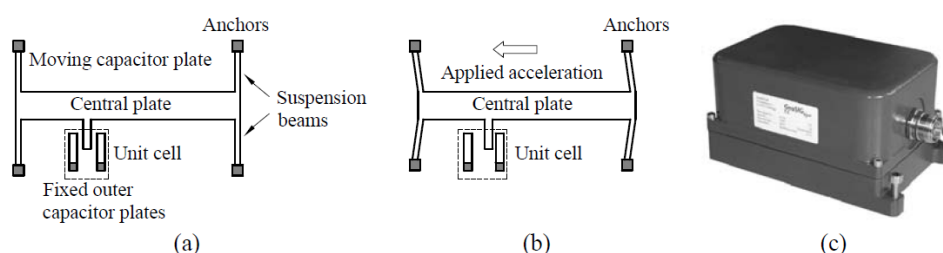


Fig 1.24: Force-balance accelerometer: (a) mass-spring system in its equilibrium position; (b) deformation due to an applied acceleration; and (c) GEOSIG model AC-63. [Ramos, 2007]

Gli accelerometri solitamente forniscono segnali a bassa intensità, quindi necessitano di condizioni di amplificazione prima di essere collegati ad apparecchiature di lettura, registrazione o analisi.

L'affidabilità dei risultati di identificazione dinamica dipende dalla quantità e qualità delle informazioni dinamiche sulla struttura; naturalmente la qualità aumenta con il numero dei trasduttori utilizzati. Altri aspetti che influenzano la sperimentazione, sono legati a fattori economici, allo scopo dei dati e alla periodicità delle misurazioni.

Queste considerazioni portano alla scelta di tipologia, quantità e posizione dei sensori da impiegare, del sistema di montaggio, della durata delle registrazioni del segnale e del software di acquisizione e memorizzazione dei dati.

Altro aspetto importante per l'attendibilità dei risultati è il sistema di acquisizione dati, e in particolare la scelta della frequenza di campionamento. Si tratta della misura, espressa in Hertz, del numero di volte al secondo in cui un segnale analogico viene misurato e memorizzato in forma digitale.

Durante la conversione analogico-digitale il segnale viene sottoposto a due distinte discretizzazioni: quella dei tempi (detta campionamento) e quella delle ampiezze (detta quantizzazione). In tal senso risulta dunque di imprescindibile importanza rispettare il teorema del campionamento di Nyquist-Shannon nel quale si afferma che, per campionare un segnale senza perdita di informazione, è necessario utilizzare una frequenza almeno doppia rispetto a quella della massima componente spettrale del segnale informativo (detta anche frequenza di Nyquist). Se non viene rispettato tale teorema, si ha una distorsione del segnale originario che diventa non più veritiero, e ci si può imbattere nel fenomeno dell'aliasing, per il quale due segnali analogici diversi possono diventare indistinguibili una volta campionati, comportando quindi ulteriori errori nella risposta [Ewins, 1984].

1.3.2. Tecniche di identificazione modale

Le campagne di sperimentazione hanno portato a sviluppare, e successivamente raffinare, diversi metodi di identificazione modale. Tra questi, possono essere definiti due gruppi principali, a seconda del tipo di eccitazione di input:

- le tecniche di input-output, chiamate anche di Identificazione Strutturale Classica;
- le tecniche di output-only, note anche come Analisi Modale Operativa (OMA).

La differenza sostanziale è determinata dalla conoscenza o meno dei dati di input, necessaria nel primo caso e ininfluente nel secondo. Per tale ragione è più corretto servirsi del metodo output-only per l'applicazione in-situ, soprattutto se sono coinvolte costruzioni storiche, e della prima tecnica per le esperienze in laboratorio. Di seguito vengono analizzate più nel dettaglio le metodiche e le apparecchiature necessarie.

Tecniche di input-output

Si basano sul controllo dell'eccitazione d'ingresso nella struttura e della misura di risposta dinamica (Fig 1.25). I parametri modali vengono calcolati attraverso la stima di una serie di funzioni, in termini di frequenza (Frequency Response Functions, FRF) o di impulso (Impulse Response Functions, IRF), che forniscono informazioni sulla risposta del sistema sottoposto all'input d'eccitazione [Ewins, 1984]. La costruzione della FRF richiede l'uso di una catena di strumentazioni per: l'eccitazione strutturale (martello ad impulso, dispositivi ad impulso speciale per ponti, scuotitori elettrodinamici, tavole vibranti, Fig 1.26), la misura delle vibrazioni, l'acquisizione dati e l'elaborazione del segnale. Si tratta dei primi metodi sviluppati sul campo

d'identificazione dinamica, oggi meno impiegati a causa dello sviluppo di algoritmi basati sulla FFT (Fast Fourier Transform), che permettono un'elaborazione più veloce e un passaggio facilitato dal dominio del tempo a quello della frequenza e viceversa.

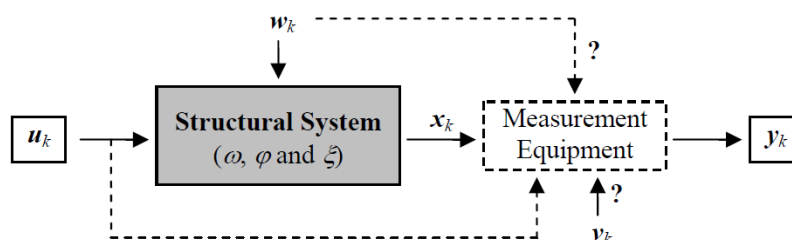


Fig 1.25: Schema della tecnica di identificazione di input-output. [Ramos, 2007]

L'analisi nel dominio delle frequenze fornisce una certa precisione e una stima modale rapida e quasi diretta. L'operazione può essere eseguita semplicemente individuando i picchi delle funzioni FRF, purché l'input d'ingresso non sia soggetto a rumore e la struttura da analizzare sia caratterizzata da frequenze naturali ben definite e separate.

Le modalità operative nel dominio del tempo sono normalmente più complesse nell'elaborazione dei dati e nell'interpretazione dei risultati, pur essendo più accurate quando sono presenti numerosi modi e una vasta gamma di frequenze da analizzare. Il loro sviluppo è dovuto alla necessità di superare gli errori e le limitazioni dei metodi precedenti. [Cunha et al., 2006].

Un particolare tipo di prova, appartenente a questo gruppo di tecniche e spesso applicata a strutture d'ingegneria civile, prevede l'uso della tavola vibrante per l'applicazione di un input sinusoidale a frequenza naturale vicina al valore di risonanza strutturale, sono i Tuned-Sinusoidal Forced Tests.



Fig 1.26: Dispositivi per la messa in vibrazione delle strutture. [Cunha et al., 2006]

Tecnica di output-only

Sono metodi che recentemente hanno avuto notevoli progressi nel campo delle attrezzature utilizzate, garantendo così maggior precisione e affidabilità dei risultati. Si basano sulla misura della risposta dinamica di un sistema virtuale nelle condizioni naturali (ambientali oppure operative) e sull'ipotesi che le eccitazioni sono casuali nel tempo e nello spazio fisico della

struttura (Fig 1.27). L'analisi nelle condizioni ambientali può, inoltre, essere considerata come un processo stocastico stazionario di un rumore bianco in una gamma di frequenza d'interesse. Questo particolare impulso permette l'eccitazione di una diffusa banda di frequenze, rendendo più semplice l'individuazione dei parametri modali. In alcuni casi, però, i modi fondamentali della struttura possono essere sovrapposti da componenti armoniche causate da fattori esterni, le quali devono essere accuratamente identificate e rimosse dall'analisi modale [Ramos, 2007]. E' questo il problema principale nella fase di estrazione del segnale, in quanto i metodi disponibili sono ampiamente sensibili.

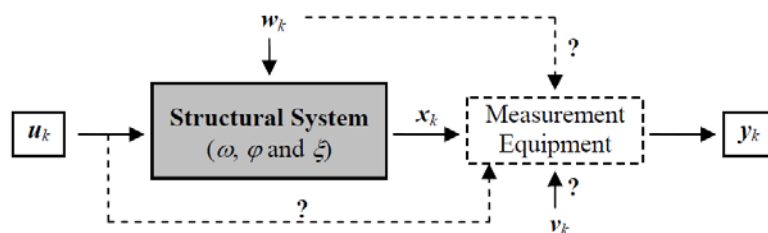


Fig 1.27: Schema della tecnica di identificazione di output-only. [Ramos, 2007]

1.3.3. Metodi di estrazione modale

Numerosi sono i sistemi di estrazione modale sviluppati negli anni, tuttavia ognuno ha le sue particolarità ed applicabilità, la scelta avviene perciò a seconda delle esigenze (del segnale d'ingresso, della tipologia di struttura, dai parametri modali che si vuol ottenere, ecc.). Per tale ragione, questa sezione fornisce una breve panoramica generale, per poi approfondire la metodologia utilizzata in questa sperimentazione, servendosi del software commerciale MACEC 3.2.

I metodi di estrazione sono distinguibili in due gruppi principali: modelli parametrici e non parametrici. La differenza sostanziale è data dal dominio in cui vengono eseguite le analisi, cioè quello del tempo o quello delle frequenze.

Nel caso delle tecniche di input-output, i metodi sviluppati nel dominio delle frequenze possono assumere formulazioni più semplici SDOF o più sofisticate MDOF.

Nel primo caso si trascura il contributo di risonanza e si valuta un rapporto tra la misura e la FRF teorica (ad es. Peak Amplitude, Circle-Fit, Inverse methods), mentre nel secondo il rapporto viene calcolato a livello globale, su una vasta gamma di frequenze (ad es. Rational Fraction Polynomial (RFP), Complex Exponential Frequency Domain (CEFD), Polyreference Frequency Domain (PRFD)).

Nel dominio del tempo, invece, i metodi più conosciuti possono essere di tipo indiretto (ad es. Complex Exponential (CE), Least-Squares Complex Exponential (LSCE), Polyreference Complex Exponential (PRCE), Ibrahim Time Domain (ITD), Eigensystem Realization Algorithm (ERA)) o diretto (ad es. Autoregressive Moving-Average (ARMA)). [Cunha et al., 2006]

Osservando invece le tecniche di output-only, tra i primi metodi sviluppati nel dominio delle frequenze, è il Peak-Picking (PP) che si basa sulla costruzione di una funzione PSD (Power Spectral Densities) media normalizzata, successivamente migliorato in modo da ottenere la funzione di un'insieme di sistemi SDOF (Frequency Domain Decomposition (FDD), Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD)).

I metodi parametrici, invece, implicano la scelta di un appropriato modello matematico per idealizzare il comportamento dinamico strutturale e l'identificazione dei parametri modali in modo da adattare il più possibile il modello ai dati sperimentali (ad es. ITD, Multiple Reference Ibrahim Time Domain (MRITD), LSCE, PRCE, Covariance-Driven Stochastic Subspace Identification (SSI-COV), Data-Driven Stochastic Subspace Identification (SSI-DATA)). Come si può notare, un aspetto peculiare di questi metodi è la possibilità di utilizzare quelli che derivano dal classico input-output nel dominio del tempo. [Cunha et al., 2006]

Stochastic Subspace Identification

Tra i metodi di estrazione modale parametrici utilizzati con le tecniche di output-only vi è il Stochastic Subspace Identification (SSI). Il nome "metodo a sottospazi" riflette il fatto che le matrici contenenti il segnale misurato possono essere interpretate come uno spazio vettoriale dove le colonne di tale matrice rappresentano una base di vettori, mentre le righe permettono di ottenere una sequenza di stime valutate mediante una batteria di filtri di Kalman. Tali matrici possono essere determinate direttamente dalla sola acquisizione dei segnali di uscita, senza conoscere a priori le matrici che caratterizzano il modello. [Van Overschee e De Moor, 1998; Peeters e De Roeck, 1999]

Queste metodologie non necessitano di un'esplicita parametrizzazione del modello, in quanto l'unico parametro da determinare è l'ordine della matrice, ottenendo così maggiore efficienza computazionale e semplicità dell'algoritmo dal punto di vista operativo. Le caratteristiche fondamentali sono conseguite mediante operazioni di algebra lineare, inoltre, non essendo metodi iterativi, non risentono di problemi di convergenza, risultando pertanto più affidabili.

La complessità del modello dipende quindi dall'ordine n , che rappresenta il numero delle variabili ausiliarie utilizzate nel vettore $x(t)$. Attribuito un ordine, si otterranno n autovettori della matrice A , non tutti i quali corrispondono a modi propri della struttura.

Dato che i modi propri sono funzioni delle caratteristiche della struttura, indipendenti dal processo numerico, essi non dovranno mutare al variare dell'ordine del modello. Per questo motivo è possibile distinguere i modi strutturali da quelli puramente numerici, basti aumentare via via l'ordine del modello e controllare la stabilità dei risultati ottenuti. Questa procedura è ottenuta mediante il diagramma di stabilizzazione (Fig 1.28).

La stabilità di un modo al variare dell'ordine del problema è così definita [Vincenzi, 2007]:

- La stima della frequenza propria è considerata stabile se essa ha una variazione minore o uguale dell'1%;
- L'indice di smorzamento, calcolato con modelli aventi due ordini diversi, non deve variare più del 15%;

- La forma modale con un certo ordine viene confrontata con la stessa ottenuta con un ordine minore tramite il Modal Assurance Criterion, (MAC), che deve essere almeno pari al 90% .

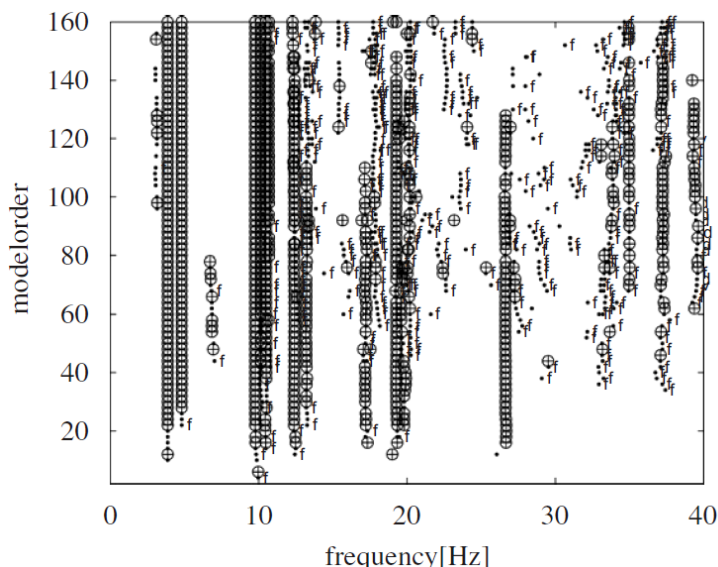


Fig 1.28: Esempio di diagramma di stabilizzazione. [Reynders e De Roeck, 2008]

Accanto al criterio di stabilità dei parametri dinamici, nell'individuazione dei modi strutturali possono essere fatte alcune valutazioni di tipo fisico. Per quanto riguarda i rapporti di smorzamento modale, valori superiori al 5% non saranno presi in considerazione tra i modi fisici. Inoltre, le strutture civili sono di regola strutture sottosmorzate, perciò le frequenze che ne regolano il comportamento si dovranno presentare a coppie coniugate, altrimenti saranno sicuramente relative a modi puramente numerici. I criteri utilizzati per individuare i modi strutturali sono riassunti in Tab 1.1.

Tab 1.1: Criteri di stabilità per l'individuazione dei modi strutturali. [Vincenzi, 2007]

Criterio		
1	Frequenze	A coppie coniugate
2	Frequenze	Stabilità: 1%
3	Smorzamenti	Valore < 5%
4	Forme modali	MAC > 0.9
5	Smorzamenti	Stabilità: 15%

Nelle sperimentazioni di analisi modale, spesso vengono utilizzati molti sensori, con una specifica distribuzione spaziale sulla struttura. Al fine di ridurre notevolmente le dimensioni del problema e quindi anche il tempo di calcolo, è possibile considerare, anziché tutti i canali, solamente quelli di riferimento. La scelta dei sensori di riferimento è di elevata importanza, in quanto, i dati di “qualità inferiore” vengono parzialmente omessi per garantire una risposta più accurata. Questo nuovo algoritmo viene indicato con SSI/ref (Reference-based Stochastic Subspace Identification). [Peeters e De Roeck, 1999]

Tra i metodi SSI si distinguono:

- Driven Stochastic Subspace Identification (SSI-DATA);
- Covariance-Driven Stochastic Subspace Identification (SSI-COV).

Confrontando i due metodi si nota che entrambi iniziano con una fase di riduzione dei dati e procedono con la scomposizione a singoli valori. A livello di tempo di calcolo, l'utilizzo delle trasformate di Fourier rendono SSI-COV più veloce rispetto alla lenta fattorizzazione utilizzata nel SSI-DATA. A vantaggio del SSI-DATA è invece l'implementazione su un algoritmo di radice quadrata numericamente robusto, e quindi affidabile, che evita il calcolo delle covarianze tra le uscite pur assicurando la cancellazione dei file legati al rumore.

Per maggiori precisazioni in merito al metodo di estrazione modale SSI e alle relative varianti (SSI-DATA e SSI-CONV), nonché ai metodi qui non approfonditi, si rimanda ad altri testi già citati, quali Van Overschee e De Moor [1998], Peeters e De Roeck [1999], Reynders e De Roeck [2008], Ramos [2007], Vincenzi [2007] e numerose altre pubblicazioni dovute al gruppo di ricerca della Katholieke Universiteit Leuven, Belgio.

2. Programma sperimentale

La sperimentazione qui presentata è parte conclusiva di un progetto di ricerca e collaborazione tra l'Università di Padova, Tassullo SpA ed il Centro Ricerche ENEA di Roma ("La Casaccia"), nell'ambito del Consorzio Nazionale ReLUIIS e del progetto europeo NIKER. Il programma vuole contribuire alla conoscenza degli effetti indotti dagli interventi di iniezione di malta a base di calce idraulica naturale sul comportamento statico e dinamico delle strutture di muratura in pietra. L'ambito di ricerca è definito alla luce delle osservazioni presentate nel paragrafo § 1.1. in merito alla diffusione e vulnerabilità sismica di queste costruzioni. Le fasi precedenti della campagna sperimentale sono brevemente presentate nell'Introduzione alla presente Tesi, mentre informazioni più dettagliate possono essere reperite in Mazzon [2010].

La tipologia costruttiva indagata è quindi la muratura multistrato in pietra, con paramenti esterni portanti di conci e nucleo pressoché incoerente. Lo strato di riempimento è caratterizzato da un'alta percentuale di vuoti tra la malta e gli inerti di varia natura (pietra di cava, ghiaia di fiume, laterizio, materiali di scarto) e dimensione che lo compongono. La vulnerabilità è perciò dovuta alla forte disomogeneità e irregolarità sia nello spessore murario sia nel piano principale della muratura, alla scarsa resistenza meccanica (dovuta principalmente alla ridotta resistenza della malta e all'elevata presenza di vuoti) e alla frequente mancanza di connessione trasversale tra gli opposti paramenti esterni. Quest'ultimi tendono infatti a sviluppare meccanismi di collasso "anticipati" (fuori-piano per instabilità o per espulsione localizzata) rispetto alla rottura per compressione del materiale [Giuffrè et al, 1993; Binda et al, 1999].

In tal senso, le tecniche d'intervento adottate in questa sperimentazione sono rivolte al consolidamento del nucleo interno (iniezioni di malta a base di calce idraulica naturale) ed al rafforzamento della connessione tra i gli strati portanti esterni (iniezioni di malta a base di calce idraulica naturale e tirantini antiespulsivi trasversali) [Modena et al., 2000].

Al fine di studiare gli effetti di tali metodi di rinforzo sui maschi murari, otto pannelli in condizioni diverse sono stati sottoposti a prove dinamiche fuori-piano sulla tavola vibrante del Centro Ricerche ENEA di Roma ("La Casaccia"). I dati raccolti sono stati analizzati ottenendo risultati in termini di accelerazione, spostamento, deformazione e tensione. I dati raccolti sono stati inoltre utilizzati per l'identificazione dinamica con MACEC 3.2. A tal scopo è stato definito un dettagliato programma di prova in seguito illustrato.

2.1. Pannelli murari

I modelli utilizzati nella campagna sperimentale per la simulazione dei maschi murari, erano composti da tre strati: due esterni portanti e un nucleo centrale con materiale di risulta. Le dimensioni ed il peso non eccessivi han permesso di realizzare degli elementi strutturali mantenendo la scala reale, evitando così la possibilità di ottenere un comportamento non realistico e limitando errori legati a fattori di riduzione in fase di analisi. Lo studio tipologico delle murature multistrato (cfr. § 1.1.) ha indotto a scegliere una sezione di circa cm 50 (rispettivamente cm 18 per gli strati esterni e cm 14 per quello interno), un'altezza di mt 2.60 (coincidente all'altezza d'interpiano) ed una larghezza di mt 1.30 per ottenere un rapporto di snellezza pari a 2. I campioni erano così distinti (Fig 2.1):

- n°2 non rinforzati (URM) – 1-URM e 2-URM
- n°2 rinforzati con tirantini trasversali (SM-T) – 3T e 4T
- n°2 consolidati con iniezione di malta a base di calce idraulica naturale (SM-I) – 5I e 6I
- n°2 rinforzati con l'uso combinato di tirantini e iniezione di malta (SM-IT) – 7IT e 8IT

I pannelli non rinforzati fungono perciò da riferimento per valutare l'efficacia degli interventi precedentemente descritti.

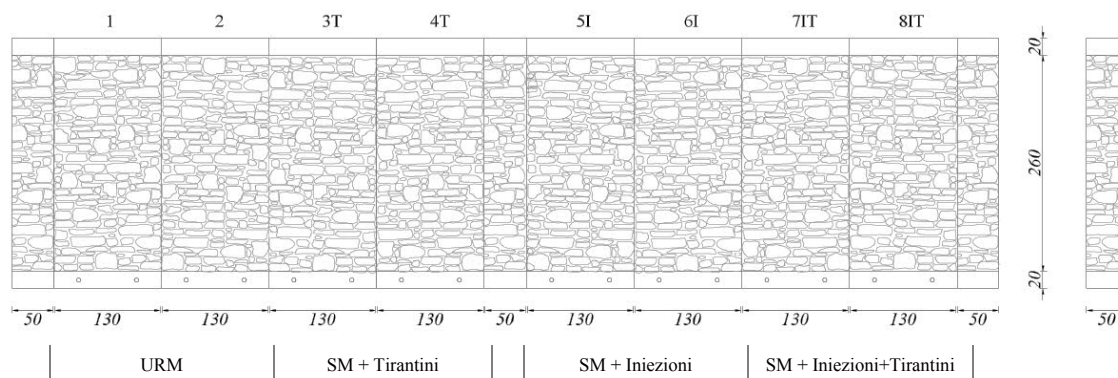


Fig 2.1: Schema geometrico dei pannelli con relativi acronimi e dimensioni. [Mazzon, 2010]

2.1.1. Costruzione ed interventi di rinforzo

Per la realizzazione dei pannelli è stato eretto un unico muro continuo di lunghezza mt 12 circa, su un getto di magrone. In seguito al dovuto tempo di posa e all'esecuzione degli interventi di consolidazione e rinforzo, è stato tagliato in otto porzioni di mt 1.30 e di massa complessiva non iniettata di circa kg 4000 ciascuna (Fig 2.1).

La posa delle pietre è avvenuta su letti di malta di spessore variabile, previa sbazzatura manuale con mazzetta dei blocchi stessi (Fig 2.2). Ai muratori sono state date indicazioni sulla realizzazione del nucleo: ovvero sulla quantità di pietre e di malta da immettere, sulla

dimensione delle scaglie da utilizzare e sulla percentuale di vuoti da lasciare (quantità non misurabili in corso d'opera, se non in modo approssimativo). Da progetto, la presenza di vuoti stimata era del 10-15% sull'intera sezione trasversale, corrispondente a valori massimi rilevati su murature reali, in modo tale da definire una sottocategoria di muri facilmente iniettabili [Binda et al., 1999]. Gli interventi di iniezione (Fig 2.4) e di applicazione dei tirantini sono avvenuti in seguito ad opportuno periodo di stagionatura della muratura.

Entrambe le estremità del muro sono state costruite per creare l'ammorsamento tra i paramenti durante la realizzazione. Tali parti sono state eliminate in seguito al taglio dei pannelli in modo tale che in essi non siano presenti connessioni trasversali, permettendo così di studiare in modo migliore l'efficacia degli interventi realizzati. E' stata rimossa anche una porzione centrale, di separazione tra parte non iniettata ed iniettata, per evitare permeazioni indesiderate. Sono stati inoltre costruiti adeguati cordoli in c.a. di altezza cm 20, uno inferiore e l'altro superiore (Fig 2.5), per il trasporto dei pannelli murari e per permettere il collegamento del campione sia alla tavola vibrante che al telaio di prova.



Fig 2.2: Stato di avanzamento con dettaglio della sezione trasversale del muro durante la costruzione.



Fig 2.3: Taglio e movimentazione dei pannelli.

Il taglio dei pannelli è avvenuto in loco mediante lama rotante, mentre il trasporto all'interno del Laboratorio ENEA è stato compiuto con l'uso di un telaio su ruote (Fig 2.3). Nonostante siano state prestate le opportune attenzioni, durante la movimentazione si sono verificate delle prime fessurazioni che in seguito indicheremo come stato "pre-prova".

I muri così realizzati sono stati sottoposti, nel Luglio 2007, ad una prima fase di prove non distruttive (prove soniche dirette e tomografiche), per valutarne le caratteristiche allo stato naturale non consolidato. Successivamente, nel Giugno 2008, una seconda serie di test prove soniche è stata effettuata sui muri 5I e 7IT, allo scopo di valutare l'efficacia dell'intervento di iniezione a base di calce idraulica naturale [Valluzzi et al., 2009].



Fig 2.4: A sinistra esecuzione dei fori e dell'iniezione di malta a base di calce idraulica naturale; a destra dettaglio della sezione post-iniezione, durante il taglio dei pannelli.



Fig 2.5: Prospetto anteriore del muro completo, a seguito del taglio dei pannelli.

2.1.2. Caratterizzazione dei materiali

Per un'analisi approfondita della tipologia muraria in esame e per una corretta interpretazione dei risultati, è importante conoscere i materiali costitutivi: le caratteristiche fisiche e meccaniche delle pietre, la composizione delle malte di allettamento e di iniezione, il tipo di tirantini. Questi parametri possono essere rilevati in laboratorio tramite prove statiche.

Tuttavia le caratteristiche meccaniche dei componenti non possono essere facilmente correlabili con quelle globali della muratura, data la grande disomogeneità e irregolarità d'insieme. Pertanto è utile caratterizzare l'oggetto d'indagine direttamente in situ mediante prove non distruttive (prove soniche dirette e tomografiche, ecc.). [Mazzon, 2010]

Malta di allettamento T30V

Comunemente, le malte rilevabili negli edifici storici sono di scarsa qualità. Per tale ragione, la miscela di allettamento utilizzata è stata progettata appositamente per avere parametri meccanici poco elevati (Tab 2.1). Sono stati adottati specifici additivi in grado di ridurre i valori delle caratteristiche. Le prove a flessione e a compressione (Fig 2.6) sono state effettuate seguendo le prescrizioni fornite dalla norma UNI EN 1015-11 [2007] sui metodi di prova per malte per opere murarie.

Tab 2.1: Caratteristiche meccaniche della malta di allettamento. [Mazzon, 2010]

Test		
Compression Strength	(28days)	3.7N/mm ²
Flexural Strength	(28days)	1.3N/mm ²
Young's Modulus	(28days)	6130N/mm ²



Fig 2.6: Prove a flessione e a compressione sui provini di malta T30V. [Mazzon, 2010]

Pietre calcaree di Cugnano

Nella realizzazione dei pannelli è stata impiegata pietra calcarea locale, prelevata dalla cava di Cugnano in provincia di Belluno. Per i paramenti esterni sono stati scelti blocchi di dimensioni medio-grandi, mentre per il nucleo frammenti di granulometria mista ottenuti dalla sbozzatura dei conci.

Nonostante la provenienza sia la stessa, si possono identificare due tipi di pietra, differenti per colore e per composizione chimica. Tale diversità si riflette anche nelle loro caratteristiche meccaniche, come confermato dai valori medi riportati in Tab 2.2. Tuttavia, va considerato che il comportamento globale della muratura è maggiormente influenzato dalle proprietà del materiale più debole, ossia la malta di allettamento. Le sperimentazioni effettuate (Fig 2.7) seguono le prescrizioni fornite dalla normativa europea (UNI EN 14580 [2005]; UNI EN 1926 [2007]; UNI EN 1936 [2007]; UNI EN 12372 [2007]) sui metodi di prova per pietre naturali.

Tab 2.2: Caratteristiche meccaniche delle pietre. [Mazzon, 2010]

Test	Typology 1	Typology 2
Compressive Strength	265N/mm ²	159N/mm ²
Flexural Strength	31.6N/mm ²	25.2N/mm ²
Young's Modulus	72300N/mm ²	56380N/mm ²
Real Volumic Mass	2659kg/m ³	2669kg/m ³
Apparent Volumic Mass	2654kg/m ³	2654kg/m ³
Open Porosity	0.84%	1.68%
Total Porosity	0.19%	0.56%



Fig 2.7. Determinazione del Modulo Elastico e della Resistenza a flessione e a compressione nei provini di pietra calcarea di Cugnano (BL). [Mazzon, 2010]

Miscela di iniezione FEN-X/b

L'iniezione è una delle tecniche più idonee per il consolidamento dei vuoti e il miglioramento delle caratteristiche meccaniche e di resistenza, limitando così la possibilità di rottura durante un evento sismico [Modena et al., 2000; Valluzzi, 2000; Vintzileou, 2002].

La miscela FEN-X/b, utilizzata in questa campagna, è stata sviluppata da Tassullo SpA e Università di Padova [Valluzzi, 2000]. Si tratta di malta a base di calce idraulica naturale ad alta fluidità, progettata per garantire una maggiore compatibilità con i materiali edilizi impiegati nei manufatti storici, in particolare nelle murature multistrato in pietra. La compatibilità insieme all'iniettabilità, sono caratteristiche fondamentali per l'efficacia dell'intervento (cfr. § 1.1.3.). Esse permettono di ottenere il ripristino della resistenza meccanica e dell'omogeneità strutturale della muratura senza generare disomogeneità locali, gradienti termici in fase di maturazione o alterarne le proprietà.

Le peculiarità che rendono la FEN-X/b adatta al consolidamento di strutture murarie in pietra, misto pietra o mattone pieno sono:

- Basso contenuto di sali idrosolubili;
- Resistenza ai solfati:
- Capacità di riprodurre dal punto di vista fisico, chimico e mineralogico le malte di allestimento originarie, ottenute dalla cottura a bassa temperature di calcari argillosi.

Tab 2.3: Caratteristiche meccaniche della malta di iniezione a sinistra, e del composto malta d'iniezione e frammenti di pietra a destra. [Mazzon, 2010]

Test			Test	
Compressive Strength	(28days)	12.8N/mm ²	Compressive Strength	2.12N/mm ²
Flexural Strength	(28days)	3.8N/mm ²	Indirect Tensile Strength	0.20N/mm ²
Young's Modulus	(28days)	6580N/mm ²	Young's Modulus	11094N/mm ²



Fig 2.8: Determinazione del Modulo Elastico e della Resistenza a flessione e a compressione nei provini di malta per iniezione FEN-X/b. [Mazzon, 2010]

La normativa seguita per le prove a flessione e a compressione sui campioni di materiale (Fig 2.8) è la stessa delle malte per opere murarie, la UNI EN 1015-11 [2007]. La caratterizzazione meccanica è stata effettuata anche su elementi compositi cilindrici (Fig 2.9), in riferimento alla norma UNI EN 12390 [2002], per simulare il comportamento del nucleo iniettato. L'incoerenza data dai frammenti di pietra, riduce notevolmente la resistenza a compressione (Tab 2.3). L'iniezione è stata eseguita a seguito di idonea stagionatura del muro continuo, seguendo la procedura descritta nel paragrafo § 1.1.3: dal basso verso l'altro monitorando la pressione e la quantità della malta iniettata. Sono stati realizzati circa 60 fori per ogni parete, seguendo una maglia triangolare di cm 30 per lato.



Fig 2.9: Preparazione del provino e prove a trazione indiretta e a compressione. [Mazzon, 2010]

Tirantini metallici

Sei barre d'acciaio filettate sono state inserite, a 1/4, 1/2 e 3/4 dell'altezza del pannello, ed imbullonate all'estremità. Il montaggio è stato effettuato con pre-tensionamento, in modo che siano soggetti a sola tensione assiale costante lungo l'asse.



Fig 2.10: Posizionamento dei tiranti nella muratura: a sinistra vista esterna, a destra vista in sezione a seguito del collasso.

2.1.3. Caratteristiche dei pannelli

In questo paragrafo sono illustrate le caratteristiche di ogni singolo pannello, con rilievi fotografici pre-prova, dimensioni, peso e date delle prove dinamiche. Inoltre vengono fornite informazioni in merito alla percentuale di pietre (parte solida), vuoti ed area iniettata calcolate sulla base del rilievo visivo delle sezioni trasversali d'estremità dei pannelli. Tali dati sono approssimativi e sono utili per stabilire se il campione rispetta le condizioni stabilite nella fase progettuale della sperimentazione. Viene perciò stimato un valor medio di riferimento per ogni muro, con una valutazione della dispersione calcolata con la deviazione standard.

Da questo momento, le superfici di ciascun modello saranno definite: fronte, retro, sezione destra (A-A') e sinistra (B-B'). La nomenclatura delle sezioni è definita in riferimento al fronte, il quale è il lato maggiore con applicati cinque accelerometri (cfr § 2.2.3, Fig 2.32 e Fig 2.33).

Wall 1-URM

Il primo pannello sottoposto a prova, rispecchia le condizioni del maschio murario senza alcun metodo di rafforzamento. I risultati dell'analisi della situazione iniziale sono essenziali per capire l'efficacia degli interventi in seguito adottati, in quanto fungono da riferimento.

Osservando le sezioni (Fig 2.11) sono chiaramente evidenti i tre strati che le compongono, e la forte disomogeneità e irregolarità che caratterizza il nucleo. Le percentuali in Tab 2.4 evidenziano l'elevata presenza di vuoti (circa 12%) e la totale assenza di miscela d'iniezione, così come previsto dal programma sperimentale.

Tab 2.4: Caratteristiche del pannello 1-URM.

WALL 1 - URM		Masonry stone wall in original conditions (URM)			
Test n° 1	Dates	27-28 May 2010			
Geometry:	Dimensions [cm]	130	50	260	
	Weight [ton]	4.08			
Composition:		Solid	Voids	Injection	
	sez A-A' dx [%]	87.8	12.2	-	
	sez B-B' sx [%]	89.0	11.0	-	
	average [%]	88.4 ± 0.9	11.6 ± 0.9	-	

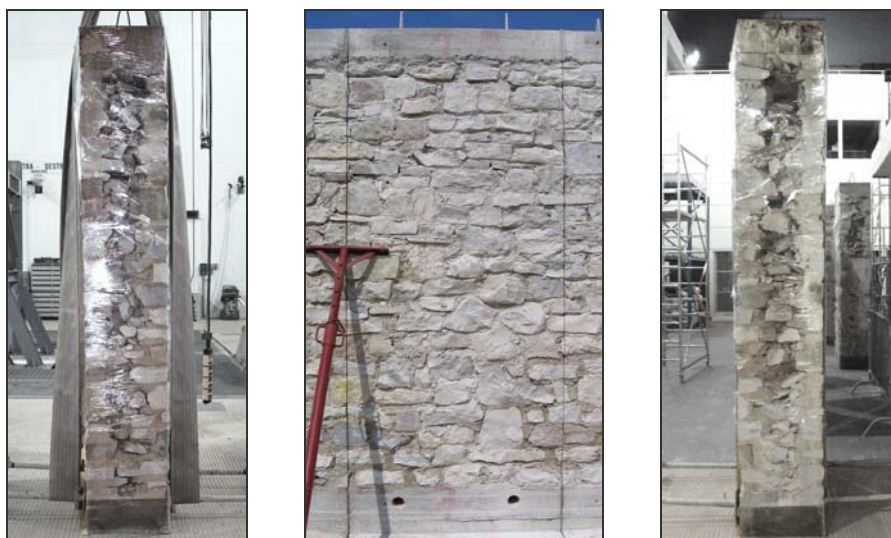


Fig 2.11: Pannello 1-URM. Rilievo pre-prova: sezione B-B' sx, prospetto frontale, sezione A-A' dx.

Wall 2-URM

Il secondo pannello assume le stesse caratteristiche del primo: muratura storica non rinforzata a tre paramenti in pietra. Anche in questo caso i risultati dell'analisi saranno di riferimento per determinare l'efficacia degli interventi.

Diversamente da quanto previsto dal programma sperimentale, nella sezione destra (Fig 2.12 e Tab 2.5) si rileva la presenza di miscela d'iniezione permeata alla base. Per la parte restante invece si osserva chiaramente la fragilità del composto del nucleo, causa dell'elevata vulnerabilità della parete.

Tab 2.5: Caratteristiche del pannello 2-URM.

WALL 2 - URM		Masonry stone wall in original conditions (URM)			
Test n° 2	Dates	07-08 June 2010			
Geometry:	Dimensions [cm]	130	50	260	
	Weight [ton]	3.99			
Composition:		Solid	Voids	Injection	
	sez A-A' dx [%]	85.0	11.4	3.6	
	sez B-B' sx [%]	93.0	7.0	-	
	average [%]	89.0 ± 5.7	9.2 ± 3.1	-	

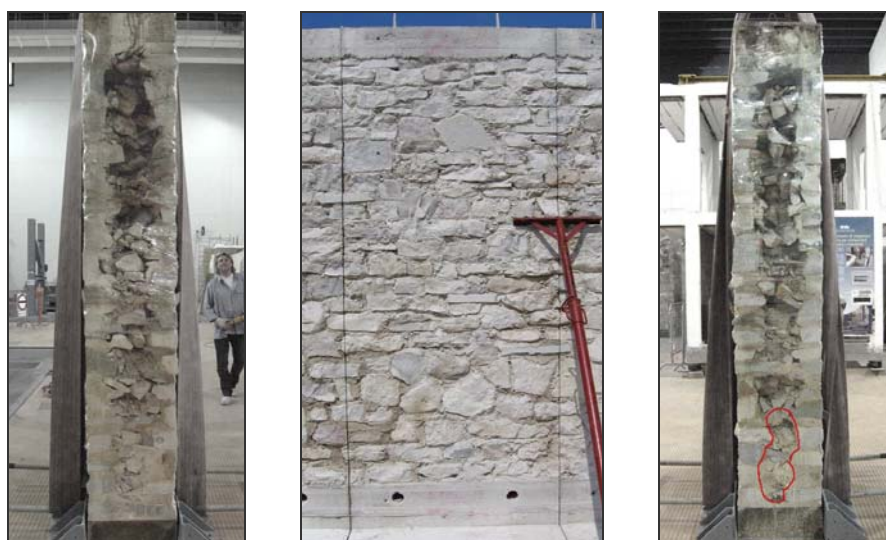


Fig 2.12: Pannello 2-URM. Rilievo pre-prova: sezione B-B' sx, prospetto frontale, sezione A-A' dx. L'area iniettata è indicata con una polilinea rossa.

Wall 3T

Il terzo campione testato, è stato rinforzato con l'uso di tirantini antiespulsivi trasversali. Sei barre d'acciaio sono state applicate, a coppie, a 1/4, 1/2 e 3/4 dell'altezza del pannello, allo scopo di mantenere uniti i paramenti esterni, ed evitarne quindi il collasso per separazione degli strati. Con questo tipo di intervento, la composizione e la disomogeneità caratteristica della muratura multistrato in pietra rimane invariata. Tuttavia, nel caso in esame, si è verificata la permeazione di miscela d'iniezione, visibile in particolare nella sezione A-A' dx (Fig 2.13), nella quale raggiunge la mezzeria. Dalle percentuali medie in Tab 2.6 risulta che più del 5% della sezione (corrispondente a circa il 30% dei vuoti) è iniettato, diversamente dai presupposti stabiliti in fase di progetto. Ciò implica un irrigidimento della parte inferiore del pannello, e di conseguenza un diverso comportamento.

Tab 2.6: Caratteristiche del pannello 3T.

WALL 3T		Strengthened panel through transversal steel tie-rods.			
Test n° 3	Dates	10-11 June 2010			
Geometry:	Dimensions [cm]	130	50	260	
	Weight [ton]	4.18			
Composition:		Solid	Voids	Injection	
	sez A-A' dx [%]	81.5	12.3	6.2	
	sez B-B' sx [%]	85.4	10.0	4.6	
	average [%]	83.5 ± 2.8	11.1 ± 1.6	5.4 ± 1.1	



Fig 2.13: Pannello 3T. Rilievo pre-prova: sezione B-B' sx, prospetto frontale, sezione A-A' dx. L'area iniettata è indicata con una polilinea rossa.

Wall 4T

Come nel caso precedente, il pannello 4T è in stato rinforzato mediante l'uso di tirantini trasversali in acciaio, per la connessione dei paramenti esterni portanti.

Nel muro continuo iniziale, questa porzione era situata vicino della parte iniettata, separata solamente da un elemento di base cm 50, poi eliminato. Nonostante questa accortezza, una buona parte di miscela è permeata nel nucleo dei campioni non iniettati. Nel caso in esame, ha occupato quasi completamente la porzione inferiore, ossia il 50% dell'area destinata ai vuoti (Tab 2.7 e Fig 2.14). L'aumento di resistenza, limitato a metà pannello, è notevole. Ne consegue un incremento della vulnerabilità dell'elemento murario, dovuto all'alterazione localizzata delle caratteristiche meccaniche.

Tab 2.7: Caratteristiche del pannello 4T.

WALL 4T		Strengthened panel through transversal steel tie-rods.			
Test n° 6	Dates	21-22 July 2010			
Geometry:	Dimensions [cm]	130	50	260	
	Weight [ton]	4.27			
Composition:		Solid	Voids	Injection	
	sez A-A' dx [%]	73.0	10.0	17.0	
	sez B-B' sx [%]	79.2	13.0	7.8	
	average [%]	76.1 ± 4.4	11.5 ± 2.1	12.4 ± 6.5	



Fig 2.14: Pannello 4T. Rilievo pre-prova: sezione B-B' sx, prospetto frontale, sezione A-A' dx. L'area iniettata è indicata con una polilinea rossa.

Wall 5I

Il pannello 5I è stato consolidato mediante iniezione di malta a base di calce idraulica naturale. Nei rilievi fotografici delle sezioni (Fig 2.15), è ben visibile la differenza con i campioni precedenti. Il nucleo risulta compatto ed omogeneo, incrementando così la resistenza globale della muratura. Nel caso in esame, si presentano ancora dei vuoti nella parte superiore del pannello, corrispondenti a circa il 20% dell'area destinata all'iniezione (Tab 2.8). Questa porzione è da considerarsi l'elemento debole della parete.

Da notare l'aumento notevole della massa a causa della miscela d'iniezione, pari a kg 370, circa il 10% dei kg 4000 iniziali.

Tab 2.8: Caratteristiche del pannello 5I.

WALL 5I		Consolidated panel through injections of hydraulic lime-based grout.			
Test n° 7	Dates	27 July 2010			
Geometry:	Dimensions [cm]	130	50	260	
	Weight [ton]	4.37			
Composition:		Solid	Voids	Injection	
	sez A-A' dx [%]	76.2	3.0	20.8	
	sez B-B' sx [%]	79.2	6.2	14.6	
	average [%]	77.7 ± 2.1	4.6 ± 2.3	17.7 ± 4.4	



Fig 2.15: Pannello 5I. Rilievo pre-prova: sezione B-B' sx, prospetto frontale, sezione A-A' dx. L'area iniettata è indicata con una polilinea rossa.

Wall 6I

Come il muro precedente, anche 6I è stato consolidato previo iniezione di miscela a base di calce idraulica naturale. In questo caso però, l'iniezione risulta maggiormente completa, com'è visibile in Fig 2.16, pur presentando un piccola porzione non omogenea in sommità. La massa aumenta del 12% rispetto al caso non rinforzato.

Tab 2.9: Caratteristiche del pannello 6I.

WALL 6I		Consolidated panel through injections of hydraulic lime-based grout.			
Test n° 4	Dates	06-07 July 2010 and 12-13 July 2010			
Geometry:	Dimensions [cm]	130	50	260	
	Weight [ton]	4.48			
Composition:		Solid	Voids	Injection	
	sez A-A' dx [%]	81.5	-	18.5	
	sez B-B' sx [%]	85.4	-	14.6	
	average [%]	83.5 ± 2.8	-	16.5 ± 2.8	



Fig 2.16: Pannello 6I. Rilievo pre-prova: sezione B-B' sx, prospetto frontale, sezione A-A' dx. L'area iniettata è indicata con una polilinea rossa.

Wall 7IT

Il pannello 7IT presenta la combinazione delle due tecniche di rinforzo usate precedentemente: i tirantini antiespulsivi trasversali e l'iniezione di malta a base di calce idraulica naturale.

Le sezioni sono completamente iniettate (Fig 2.17), e le percentuali in Tab 2.10 sono conformi a quanto previsto nel programma sperimentale (10-15% destinato a vuoti o miscela). Come per i campioni 5I e 6I, l'incremento della massa è notevole (14%).

Tab 2.10: Caratteristiche del pannello 7IT.

WALL 7IT		Consolidated panel through the combination of tie-rods and lime grout.			
Test n° 8	Dates	29-30 July 2010			
Geometry:	Dimensions [cm]	130	50	260	
	Weight [ton]	4.56			
Composition:		Solid	Voids	Injection	
	sez A-A' dx [%]	90.5	-	9.5	
	sez B-B' sx [%]	81.5	-	18.5	
	average [%]	86.0 ± 6.4	-	14.0 ± 6.4	



Fig 2.17: Pannello 7IT. Rilievo pre-prova: sezione B-B' sx, prospetto frontale, sezione A-A' dx. L'area iniettata è indicata con una polilinea rossa.

Wall 8IT

L'ultima porzione del muro continuo iniziale, è il pannello 8IT, consolidato mediante l'applicazione combinata di tirantini trasversali in acciaio e di miscela iniettata nel nucleo.

Dai rilievi fotografici si può valutare la qualità dell'iniezione (Fig 2.18). Gli strati risultano ben ammassati ed omogenei. Come nel caso affine – wall 7IT – le percentuali (Tab 2.11) di composizione delle sezioni rispettano l'intervallo di valori progettuali, e la massa subisce un incremento del 14%.

Tab 2.11: Caratteristiche del pannello 8IT.

WALL 8IT		Consolidated panel through the combination of tie-rods and lime grout.			
Test n° 5	Dates	16 July 2010 and 19-20 July 2010			
Geometry:	Dimensions [cm]	130	50	260	
	Weight [ton]	4.53			
Composition:		Solid	Voids	Injection	
	sez A-A' dx [%]	87.5	-	12.5	
	sez B-B' sx [%]	90.5	-	9.5	
	average [%]	89.0 ± 2.1	-	11.0 ± 2.1	

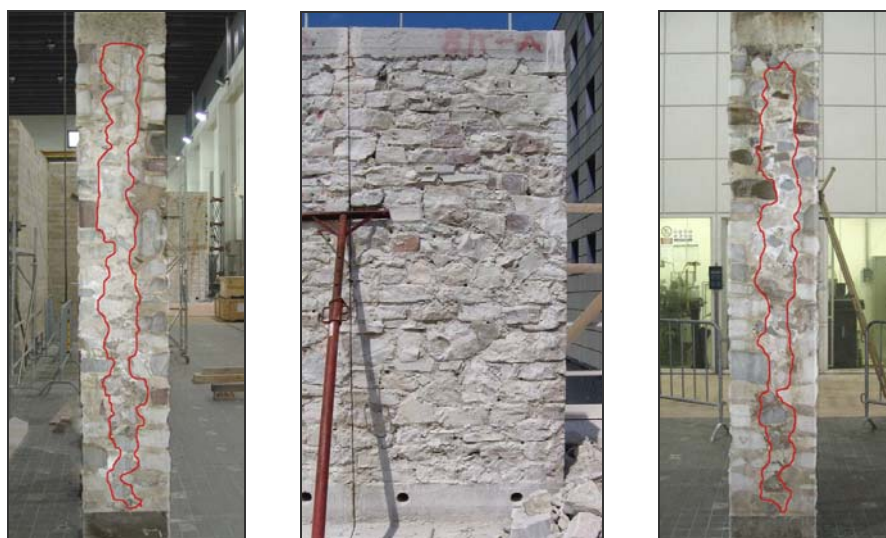


Fig 2.18: Pannello 8IT. Rilievo pre-prova: sezione B-B' sx, prospetto frontale, sezione A-A' dx. L'area iniettata è indicata con una polilinea rossa.

Valutazioni sulla qualità dell'intervento d'iniezione

A seguito della movimentazione dei campioni, si sono potute osservare le sezioni trasversali di ciascun elemento murario e verificare la qualità degli interventi di iniezione eseguiti. Si è quindi notato come la miscela sia ben penetrata legando i frammenti del nucleo interno e collegando i paramenti esterni, ad eccezione di qualche vuoto in sommità di 5I. Si rilevano tuttavia permeazioni indesiderate di miscela anche sul fondo dei pannelli da sottoporre a prova senza interventi di iniezione (2-URM, 3T e 4T). Questa considerazione è di notevole importanza ai fini dei risultati, in quanto comporta una modifica nel comportamento dinamico alla base.

Valutando quindi le percentuali medie, si ritiene più ragionevole considerare valide solamente quelle dei modelli posizionati all'inizio (1-URM e 2-URM) e alla fine (7IT e 8IT) del muro continuo (in Tab 2.12 indicate nel loro valor medio), in quanto più fedeli con la configurazione voluta per l'analisi. Per coerenza viene comunque stimata la percentuale complessiva di vuoti e d'iniezione presenti nei modelli intermedi (3T, 4T, 5I e 6I). Si ricorda che i valori stabiliti da programma sperimentale (indicati con un tratteggio rosso in Fig 2.19) erano: 10-15% per i vuoti (o di miscela per i pannelli iniettati) e 85-90% per la parte solida.

Tab 2.12: Percentuali medie di parte solida, vuota e iniettata, per ciascun campione.

	% Solid	% Voids	% Injection	% Voids+Injection
1-URM	88.40 ± 0.90	11.60 ± 0.90	-	-
2-URM	89.00 ± 5.70	9.20 ± 3.10	1.80 ± 2.60	-
URM Average	88.70 ± 3.30	10.40 ± 2.00	0.90 ± 1.30	-
3T	83.50 ± 2.80	11.10 ± 1.60	5.40 ± 1.10	16.50 ± 1.35
4T	76.10 ± 4.40	11.50 ± 2.10	12.40 ± 6.50	23.90 ± 4.30
5I	77.70 ± 2.10	4.60 ± 2.30	17.70 ± 4.40	22.30 ± 3.35
6I	83.50 ± 2.80	-	16.50 ± 2.80	16.50 ± 2.80
7IT	86.00 ± 6.40	-	14.00 ± 6.40	-
8IT	89.00 ± 2.10	-	11.00 ± 2.10	-
SM-IT Average	87.50 ± 4.20	-	12.50 ± 4.20	-

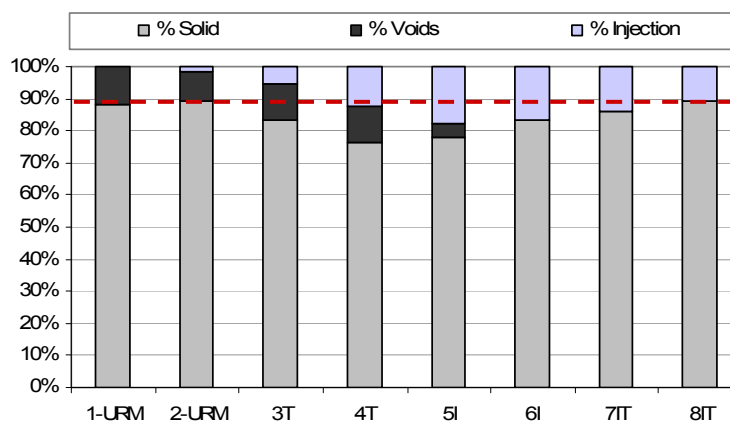


Fig 2.19: Percentuali medie di parte solida, vuota e iniettata, per ciascun campione, con indicazione in rosso del livello stabilito di parte solida (90%) da programma sperimentale.

I valori riportati in Tab 2.12 sono stati determinati calcolando le medie sulle percentuali (di parte solida, vuota e iniettata) stimate sulle sezioni dei campioni sottoposti ad analisi. Viene inoltre fornita una valutazione della dispersione delle misure, definita come lo scarto quadratico medio tra i valori utilizzati nel calcolo precedente.

Un ulteriore stima della percentuale di volume iniettato viene computata in Tab 2.13. Il calcolo è stato effettuato a partire dall'incremento di peso osservabile in ciascun campione, rispetto al valor medio della massa misurata sui campioni non rinforzati (kg 4035). Conoscendo, e assumendo costanti, la densità ρ della miscela a base di calce idraulica naturale e il volume dei modelli, è possibile determinare il volume dell'iniezione. Tali valori vengono confrontati con quelli approssimati precedentemente (Tab 2.12) nell'istogramma in Fig 2.20.

Tab 2.13: Stima della percentuale di volume iniettata sulla base dell'incremento di massa.

	Panels' Properties		Injection's Properties			
	Weight tot Kg	Volume mc	Weight Kg	Density Kg/mc	Volume mc	% Injection %
1-URM	4080	1.69	-	-	-	-
2-URM	3990	1.69	-	-	-	-
URM Average	4035	-	-	-	-	-
3T	4180	1.69	145	1640	0.09	5.23%
4T	4270	1.69	235	1640	0.14	8.48%
5I	4370	1.69	335	1640	0.20	12.09%
6I	4480	1.69	445	1640	0.27	16.06%
7IT	4560	1.69	525	1640	0.32	18.94%
8IT	4530	1.69	495	1640	0.30	17.86%

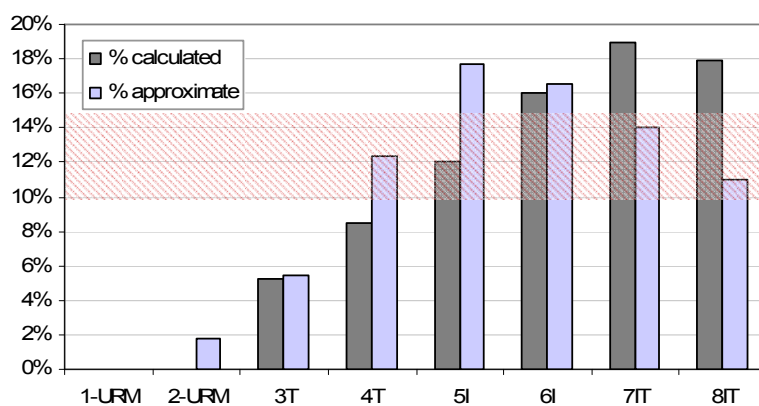


Fig 2.20: Confronto tra i valori calcolati in Tab 2.13 e quelli approssimati in Tab 2.12 relativi alla percentuale di parte iniettata in ciascun campione. L'area tratteggiata indica l'intervallo di valori previsti da programma sperimentale corrispondenti a 10-15%.

2.2. Shaking Table tests

Le prove su tavola vibrante hanno una fondamentale importanza ai fini della comprensione del comportamento dinamico delle strutture reali sotto l'azione dei carichi sismici, consentendo la validazione dei modelli numerici poiché forniscono valori di smorzamento, di frequenze critiche e dei principali modi di vibrare. I pannelli sono stati perciò sottoposti ad azioni fuori-piano, presso il Laboratorio di Dinamica Strutturale e Controllo delle Vibrazioni del Centro Ricerche ENEA ("La Casaccia", Roma).

L'input sismico scelto come riferimento è il terremoto del 15 Aprile 1979 in Montenegro, con PGA (Peak Ground Acceleration) di 0.22g nell'intervallo compreso tra 0.1s e 0.5s (cfr § 2.2.1). Durante le prove è stata impiegata solamente la componente in direzione Y (Fig 2.21), mentre la componente verticale è stata trascurata al fine di non rendere eccessivamente complessa l'interpretazione dei risultati.

Oltre alla tecnologia fornita dal laboratorio, l'allestimento del banco di prova prevede l'utilizzo di un telaio per simulare le condizioni reali e di diversi trasduttori in grado di registrare i dati di risposta. Tutta la strumentazione è spiegata nel sottoparagrafo § 2.2.3.

2.2.1. Input sismico: Montenegro 1979

La scelta dell'impulso idoneo in questo programma sperimentale è avvenuta presso l'Università di Pavia, dove le ricerche in corso indagano il comportamento dinamico di murature storiche, per studiare ulteriori aspetti strutturali e tecniche di intervento. Le principali caratteristiche e motivazioni che hanno portato alla scelta, sono state presentate da Penna et al. [2007] e sono riassunte come segue.

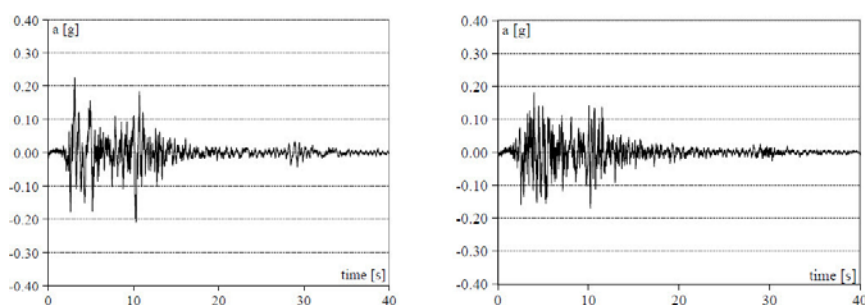


Fig 2.21: Accelerogramma registrato durante il sisma del Montenegro nelle direzioni X (sx) e Y (dx).

Prediligere a priori una sollecitazione sismica registrata durante un evento naturale, permette di ottenere un andamento realistico dell'input anche nel dominio del tempo. In questo caso specifico, si intende raggiungere i valori più elevati di PGA definiti dalla normativa italiana [D.M. 14/01/2008, 2008] per la progettazione di nuove strutture in zone a rischio sismico. Da queste considerazioni sono state selezionate nei database accelerometrici sette

registrazioni, presentate in Fig 2.22. Le condizioni imposte riguardavano il terreno (suolo A, roccioso) per la stazione di registrazione e vincoli di Magnitudo, distanza e meccanismo focale, compatibili con il territorio italiano per la zona sismica 1. [Penna et al., 2007]

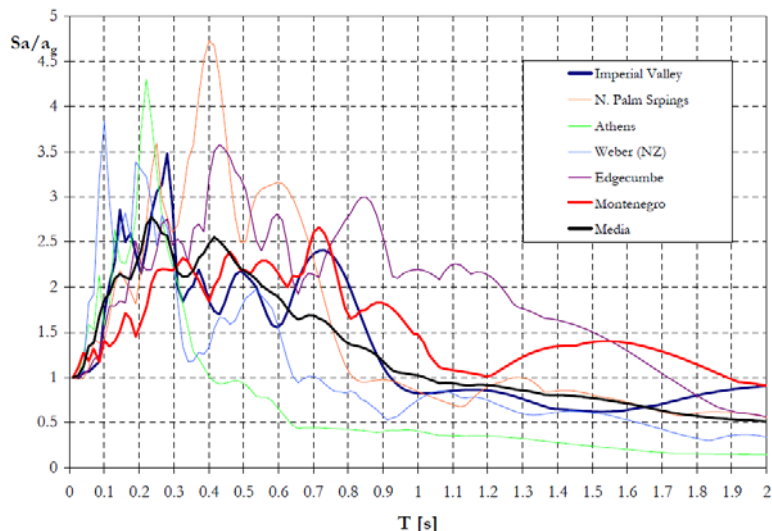


Fig 2.22: Spettri di risposta normalizzati per il set di registrazioni selezionato. [Penna et al., 2007]

L'esperimento sarà effettuato a livelli crescenti di accelerazione al suolo (PGA). Di conseguenza, il progressivo danneggiamento delle strutture causa un aumento del periodo fondamentale dei campioni. Si limita perciò il segnale d'ingresso, prendendo in esame solamente l'intervallo compreso tra 0.1 s e 0.5 s, in armonia con la gamma di frequenze tipiche per la tipologia muraria. Sono stati così estratti i due segnali le cui ordinate spettrali in accelerazione presentano il minore coefficiente di variazione:

- Imperial Valley – 15/10/1979. Ms 6.9; Mw 6.5; PGA = 0.3 g; c.o.v. = 0.21
- Montenegro – 15/4/1979. Ms 7.0; PGA = 0.22 g; c.o.v. = 0.17.

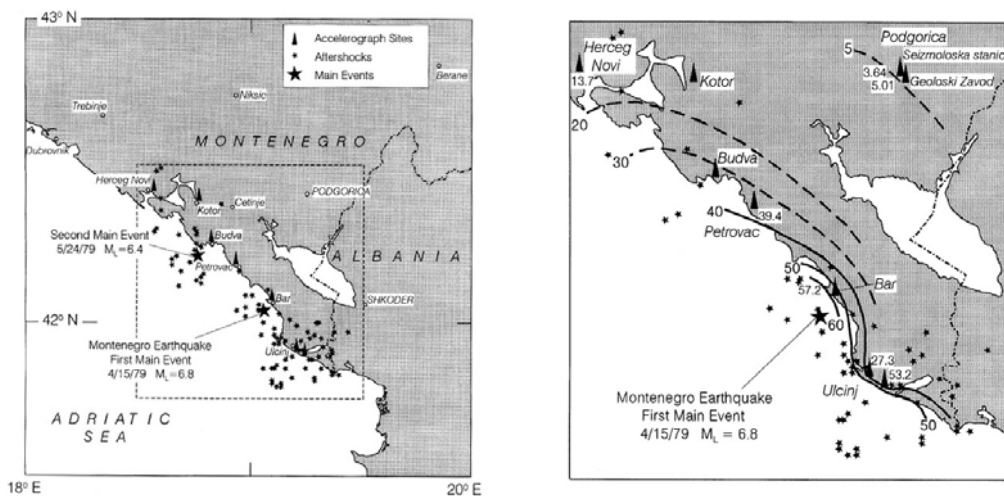


Fig 2.23: A sinistra: localizzazione dei due principali eventi sismici avvenuti nel 1979 in Montenegro (15 Aprile con $M_L=6.8$; e 24 Maggio con $M_L=6.4$) e delle scosse di assestamento. A destra: approssimazione del picco di velocità al suolo durante l'evento principale, con indicazione della velocità massima registrata a terra in cm/s, nella rispettiva stazione. [Trifunac e Ivanović, 2003]

In conclusione, si è ritenuto preferibile l'impulso registrato in Montenegro (Fig 2.23) a km 21 dall'epicentro rispetto a quello dell'Imperial Valley stimato a km 3, per evitare condizionamenti nella forma dovuti a effetti near-field. L'ampiezza delle vibrazioni decresce infatti con la distanza dall'ipocentro, spostando la composizione del segnale verso le frequenze inferiori. Nel caso near-field (vicino all'epicentro), tale decremento non avviene in modo regolare.

2.2.2. Programma di prova

L'input registrato durante l'evento sismico in Montenegro (15/04/1979) viene implementato con un picco di accelerazione alla base incrementato di 0.05g ad ogni passo successivo di prova. La procedura di analisi si sviluppa perciò in tre diverse fasi:

- Sismica: esecuzione di input sismico al picco di ampiezza maggiore;
- Sinusoidale (sweep): caratterizzazione dinamica tramite impulso di rumore bianco;
- Ambientale: caratterizzazione dinamica attraverso le vibrazioni ambientali.

Ognuna di esse viene effettuata, ad ogni passo di prova, seguendo quest'ordine. In tal modo, le rilevazioni sinusoidali e ambientali sono riferite alla situazione post-sisma, quindi a fessurazione avvenuta, osservabile nell'elemento murario. Ciascuna misurazione viene effettuata una sola volta, salvo problemi nell'apparecchiatura o nella registrazione, ad eccezione delle misure ambientali che vengono ripetute almeno due volte.

2.2.3. Allestimento del banco di prova e strumentazione

Nello studio si è voluta simulare l'azione del sisma agente su di una porzione di muratura portante, situata all'ultimo piano di un edificio storico. Si tratta della situazione più gravosa in termini di stabilità – e quindi più interessante da studiare – a causa dell'incremento delle accelerazioni sismiche in relazione alla quota in elevazione dell'elemento d'interesse.

Al fine di riprodurre il comportamento reale di questa parte di edificio, si è considerato che, di norma, nelle costruzioni storiche sono presenti tetti e solai in legno, incapaci di vincolare completamente l'interpiano in muratura e perciò di impedirne la rotazione e trasmettono inoltre un limitato carico verticale.

In termini di condizioni vincolari, si può quindi idealizzare la condizione reale attraverso uno schema a doppia cerniera, alla base ed in sommità dell'elemento murario (Fig 2.24). Le sollecitazioni agenti sui campioni sono: bassa compressione verticale, dovuta esclusivamente al peso proprio della copertura leggera, combinata ad elevati carichi sismici orizzontali. Queste condizioni sono state riprodotte mediante la progettazione di un apposito telaio in acciaio.

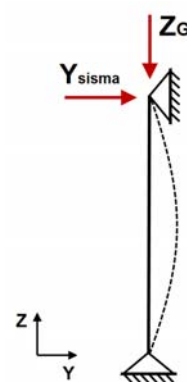


Fig 2.24: Schema statico di progetto

Telaio in acciaio

Un telaio in acciaio è stato espressamente progettato per riprodurre le condizioni al contorno reali e consentire la formazione di due cerniere nella parte superiore e inferiore del pannello (Fig 2.25). I campioni realizzati come descritto nel paragrafo § 2.1.1., sono stati spostati sul banco di prova utilizzando un carroponete. Qui, il cordolo in cemento alla base è stato fissato alla tavola vibrante.

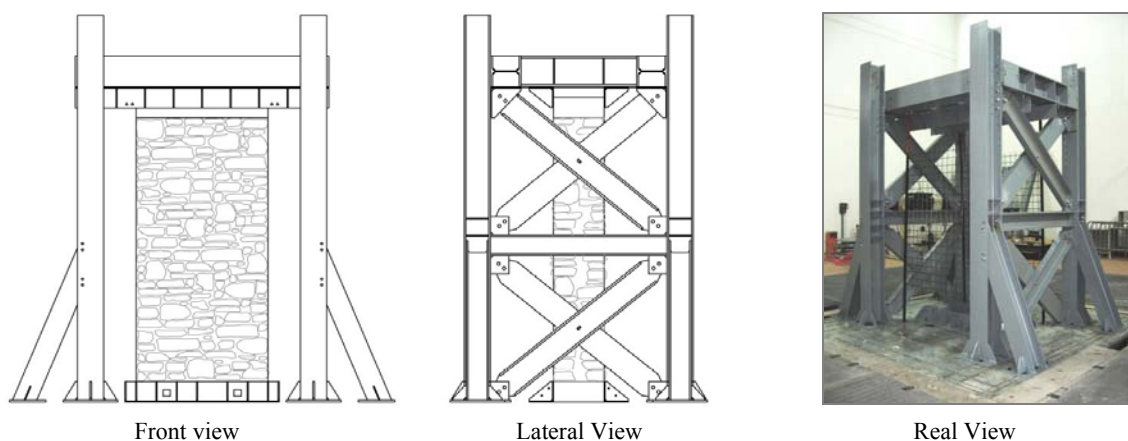


Fig 2.25: Geometria del telaio di acciaio utilizzato nelle prove dinamiche.

Alla base di ciascun pannello sono state installate due piastre in acciaio ad “L”, fissate alla superficie della tavola vibrante, in modo tale da inibire qualsiasi movimento orizzontale. Gli spostamenti verticali sono stati invece impediti da due barre in acciaio precompresso, passanti attraverso i fori del cordolo in cemento e vincolate al basamento in acciaio. In sommità i movimenti del pannello sono lasciati liberi in verticale e bloccati in orizzontale. Il sistema di fissaggio è mostrato in Fig 2.26.



Tavola vibrante

Il Laboratorio di Dinamica Strutturale e Controllo delle Vibrazioni del Centro Ricerche ENEA "La Casaccia", a Roma, è dotato di due tavole vibranti a 6 gradi di libertà (6GDL), tra le più grandi d'Europa (Fig 2.27), che consentono di effettuare prove per:

- Qualifica sismica di sistemi e apparecchiature per impianti nucleari;
- Qualificazione di componenti e sistemi per applicazioni industriali, il trasporto ferroviario, l'industria aerospaziale, l'ingegneria civile e la protezione del patrimonio artistico;
- Caratterizzazione dinamica e verifica dell'efficacia delle tecnologie innovative di protezione sismica e sistemi di controllo di infrastrutture strategiche in fase postsismica.

Nella sperimentazione è stata usata la tavola vibrante più grande, di dimensione mt. (4.00 x 4.00), le cui caratteristiche sono rappresentate in Tab 2.14.

Tab 2.14: Caratteristiche della tavola vibrante. [Mazzon, 2010]

Geometrical dimensions	[m]	4 x 4
Degree of freedom	-	6
Frequency range	[Hz]	0 - 50
Peak acceleration	[g]	3
Peak velocity	[m/s]	0.5
Maximum displacement	[m]	0.25
Reaction Mass	[ton]	2000
Mass and gravity center for hard structures	[ton] [m]	10 1

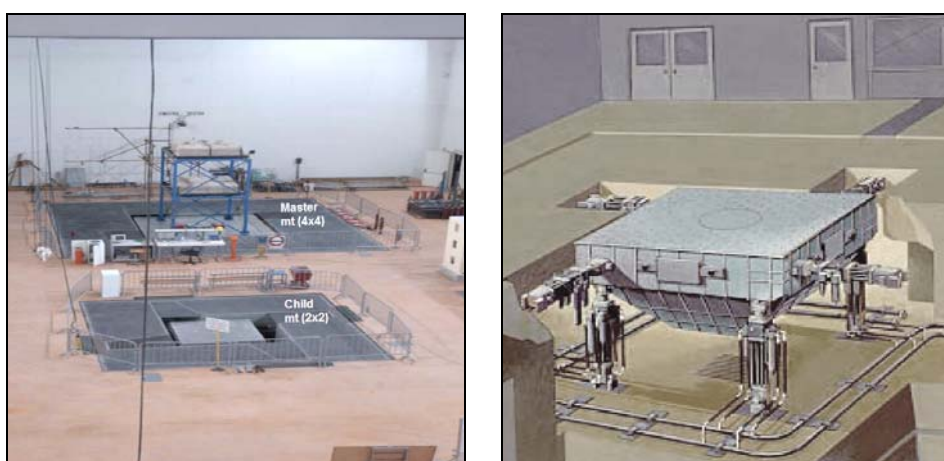


Fig 2.27: A sinistra Laboratorio di Dinamica Strutturale e Controllo delle Vibrazioni del Centro Ricerche ENEA "La Casaccia", Roma. A destra schema funzionale della tavola vibrante.

Sensori

Diversi sensori sono stati posizionati sulla superficie dei campioni, allo scopo di conoscere il comportamento dello stesso durante un evento sismico. Vengono perciò indagate le distribuzioni delle accelerazioni, degli spostamenti e le possibili deformazioni e tensioni dei tirantini.

Ogni sensore, nel periodo di sperimentazione, rileva la variazione della grandezza misurata e la quantifica in termini di differenza di potenziale elettrico (cfr § 1.3.1.). Successivamente un convertitore ADC (Analog-to-Digital Converter) trasforma il segnale elettrico in dati digitali pronti per essere elaborati dal sistema di acquisizione [Ramos, 2007].

Ad ogni passo di prova effettuato per ciascun pannello, le grandezze indagate vengono definite mediante quattro tipi di trasduttori:

- n°11 Accelerometri di tipo piezoelettrico;
- n°05 Sensori di spostamento (analogici);
- n°02 Estensimetri FBG;
- n°14 Marker (n°34 in 1-URM).

Otto accelerometri piezoelettrici (cfr § 1.3.1.) sono distribuiti sulla superficie del fronte e del retro del modello, due ad ogni livello. Oltre a questi, uno (A9) viene inserito all'interno di un elemento di protezione in acciaio, al centro della superficie muraria (Fig 2.28). I due rimanenti (A10-A11) vengono installati al basamento del telaio in acciaio, per poter confrontare i valori misurati sulla tavola vibrante e quelli ai piedi della parete in analisi. Essendo questa vincolata alla base, i dati dovrebbero risultare analoghi.

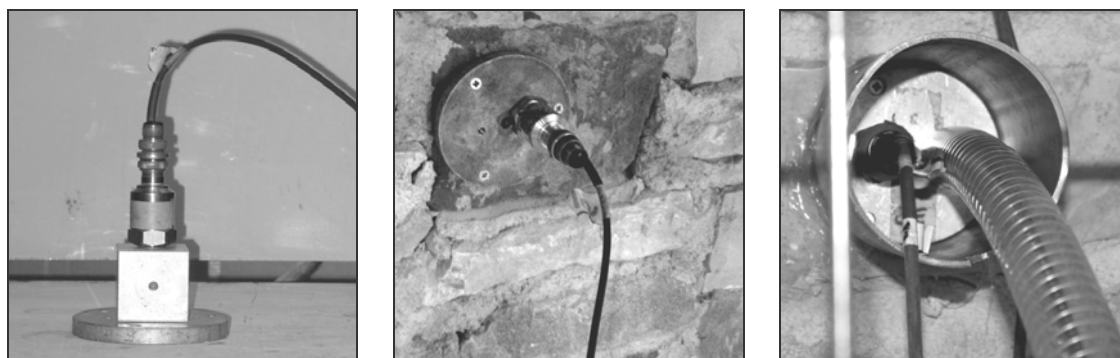


Fig 2.28: Trasduttori di accelerazione utilizzati nella sperimentazione.

I sensori analogici sono estensimetri collocati nella sezione del pannello (due per lato), per rilevare la separazione relativa dei paramenti esterni in mezzeria, dovuta all'insorgenza di fessure e danneggiamenti. Ulteriori sensori sono stati posti alla base di ciascun pannello per controllare eventuale spostamenti relativi fra tavola vibrante e struttura, dovuti ad una non perfetta connessione fra gli stessi (Fig 2.29). Un quinto trasduttore viene invece posizionato sulla sommità per monitorare gli spostamenti verticali e quindi l'abbassamento della struttura all'aumentare del danno.

I marker permettono invece di rilevare gli spostamenti mediante apparecchiature laser fisse, installate a distanza. Sono di piccole dimensioni e di forma sferica (Fig 2.29).



Fig 2.29: Trasduttori di spostamento (in alto) e marker (in basso).

Su entrambi i tiranti inseriti nella mezzeria del pannello è stato invece installato un sensore a fibra ottica a reticolo di Bragg (Fibre Bragg Grating, FBG) in grado di misurare la deformazione in modo puntuale. Il montaggio del tirante è stato effettuato con pre-tensionamento, assumendo che la barra sia soggetta a sola tensione assiale costante lungo l'asse (in assenza di flessione dunque). Il pre-tensionamento, operazione normalmente eseguita anche nel caso di reale installazione di tiranti di contenimento, consente di valutare la deformazione indotta sia da aumento (strain positivo) che da una riduzione di tensione (strain negativo).

Questi trasduttori presentano diversi vantaggi rispetto ai sensori tradizionali. Infatti essendo di vetro sono elettricamente e chimicamente passivi e sono immuni da interferenze elettromagnetiche, inoltre sono di ridotte dimensioni e trasparenti. Essi possono essere sia inglobati all'interno del materiale da monitorare che incollati sulla sua superficie. Su di una singola fibra possono essere inseriti più sensori ("multiplexati"), questo consente di avere a disposizione più trasduttori con minor ingombro utilizzando un solo strumento di interrogazione (Fig 2.30).

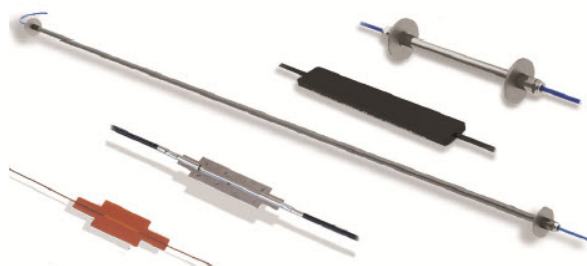


Fig 2.30: Esempi di sensori in fibra ottica a reticolo di Bragg (Fibre Bragg Grating, FBG).

Il sensore FBG (Fibre Bragg Grating) è praticamente uno strain gauge ottico ottenuto fotoincidendo nella fibra un reticolo di materiale caratterizzato da un indice di rifrazione differente. Tale fotoincisione viene realizzata illuminando la fibra ottica attraverso una opportuna maschera di fase, con un fascio coerente di luce UV. Il risultato di questo processo è quello di ottenere una periodica variazione dell'indice di rifrazione nella direzione longitudinale [Paolozzi e Gasbarri, 2006]. La conseguenza finale è che a seguito del passaggio di una fascio luminoso a banda larga lungo la fibra, il reticolo viene fotoinciso e riflette una specifica

lunghezza d'onda chiamata "lunghezza d'onda di Bragg" (λ_B). La deformazione assiale (strain) della fibra causa uno shift della lunghezza d'onda, che viene misurato ed è proporzionale alla deformazione del materiale:

$$\Delta\varepsilon = \Delta L / L \quad \text{con } L \text{ dimensione lineare}$$

Si possono così misurare accuratamente deformazioni inferiori di 1 (1 μm ogni metro). La relazione tra la misura spettroscopica della lunghezza d'onda e il dato d'interesse per l'elaborazione dei risultati della sperimentazione è lineare, e viene così definita:

$$c = 1.2 \mu\text{strain} / \mu\text{m}$$

Per quanto riguarda il posizionamento dei trasduttori, la maglia è diversa nei primi pannelli testati (URM) rispetto ai successivi. In seguito si propongono i due rilievi (Fig 2.32 e Fig 2.33) con indicata posizione, direzione e nomenclatura di:

- Accelerometri, in rosso;
- Sensori di spostamento, in verde;
- Estensimetri FBG, con un cerchio vuoto attorno al tirante;
- Marker, in nero;
- Tiranti, in grigio scuro (forma quadrata).

Gli accelerometri sono installati in direzione Y (come i trasduttori di spostamento), perciò non è stato possibile segnalarne il verso. Esso è da considerarsi positivo quando è concorde all'andamento positivo della tavola vibrante, ossia nel senso che va dal fronte del pannello al retro (Fig 2.31). Mentre A10 e A11, situati alla base del telaio in acciaio, sono collocati uno a destra e l'altro a sinistra del campione, con la stessa direzione degli altri.

Altre considerazioni da farsi riguardano il verso dei sensori di spostamento, che non è uguale in tutti i pannelli. I marker rilevati in Fig 2.32 sono così posizionati solamente nel muro 1-URM. Infine i tiranti e i rispettivi estensimetri FBG sono presenti solo laddove richiesto da programma sperimentale: 3T, 4T, 7IT, 8IT.

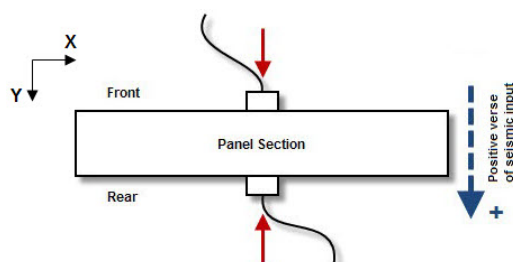


Fig 2.31: Definizione del sistema di riferimento cartesiano, per l'individuazione del verso e della direzione dei trasduttori e dell'input sismico.

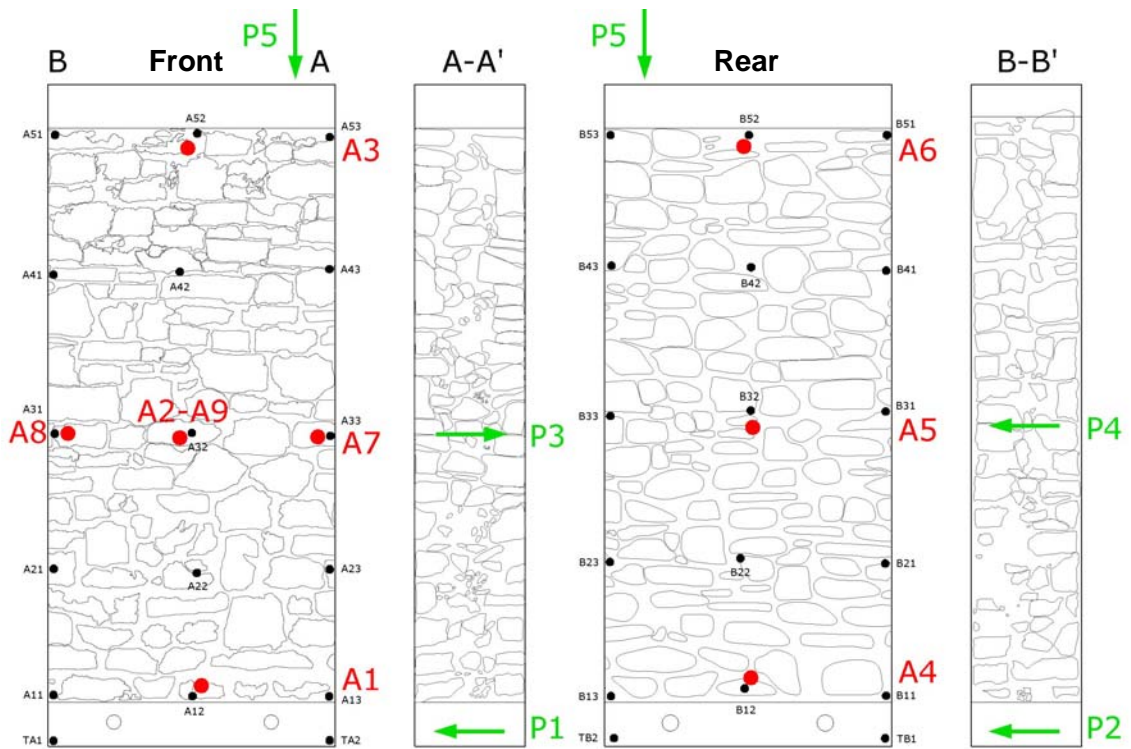


Fig 2.32: Disposizione dei sensori nei pannelli URM (1 e 2).

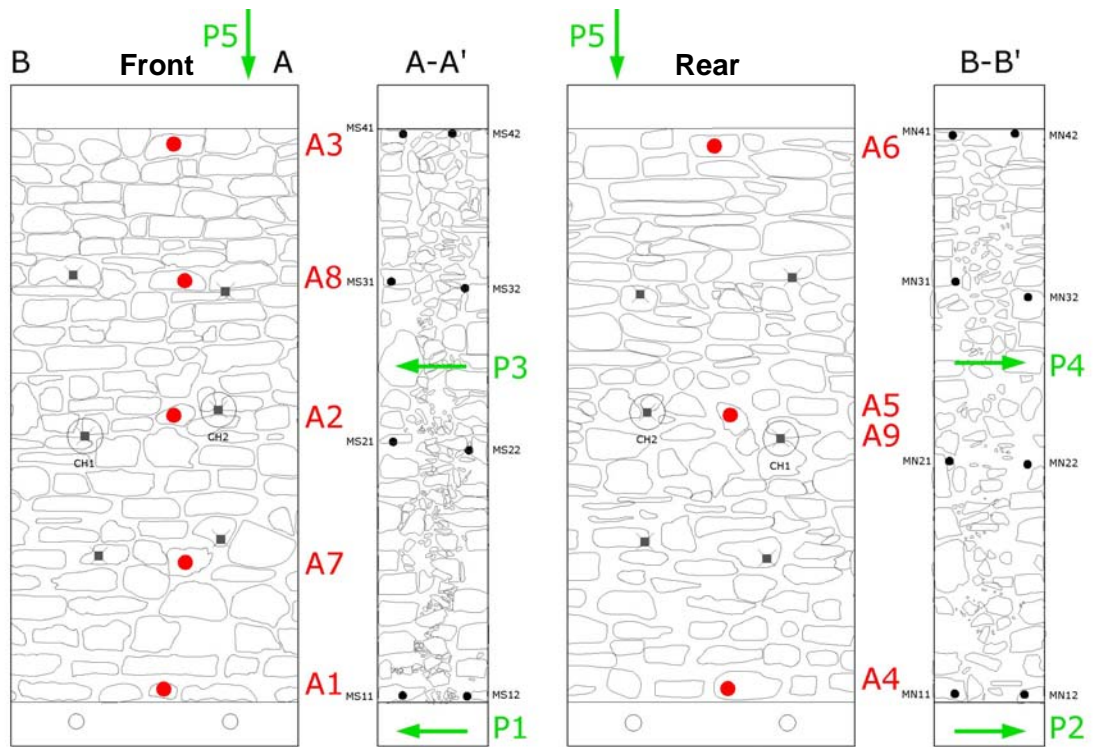


Fig 2.33: Disposizione dei sensori nei pannelli SM (3T, 4T, 5I, 6I, 7IT e 8IT)

3. Risultati sperimentali

In questo capitolo vengono esposti i risultati ottenuti dall'elaborazione dei primi dati sperimentali, conseguiti secondo programma illustrato nel capitolo § 2. Le misure a cui si fa riferimento sono quelle rilevate in Laboratorio ENEA durante l'input sismico. L'analisi viene approfondita dettagliatamente con grafici e rilievi all'interno della presente sezione. Le modalità di studio adottate sono riassunte nel seguito.

Metodi di analisi

Lo studio inizia esaminando il quadro fessurativo osservato durante le prove dinamiche su tavola vibrante in Laboratorio ENEA all'aumentare delle sollecitazioni sismiche. I rilievi delle lesioni vengono in seguito messi in relazione con i fattori di amplificazione delle accelerazioni. Tale correlazione è interessante in quanto il PGA di input subisce un'amplificazione direttamente proporzionale all'altezza (asse *Z*) del punto misurato, inducendo maggiori fessurazioni sulla muratura. Quest'analisi preliminare, effettuata ad ogni passo di prova, permette perciò di definire lo sviluppo del danno in relazione all'eccitazione sismica e alle tecniche d'intervento adottate. Si ottengono così informazioni preliminari sul comportamento globale dei campioni sottoposti a prova e sulle relative modalità di collasso.

Dalla risposta di ciascun accelerometro sono stati sviluppati, ed in seguito esaminati, gli accelerogrammi al fine di individuare eventuali disturbi del segnale o mal-funzionamenti del sensore stesso. Si sono quindi identificati i valori di picco, positivo e negativo, per entrambi i lati del pannello.

Osservando il verso del segnale definito al paragrafo § 2.2.3 (Fig 2.31), è chiaro che il massimo del fronte corrisponde al minimo del retro – dove per fronte si intende la superficie del pannello nella quale sono installati cinque accelerometri, mentre per retro quella con tre. Con questa precisazione è stata calcolata la media normalizzata, in riferimento ai sensori situati ai piedi del campione, determinando così i fattori di amplificazione delle accelerazioni, sia per il picco positivo che negativo. Inoltre, considerando i soli dati medi normalizzati dei trasduttori alla base (A1 e A4), è stato possibile indicare il valore massimo come PGA effettivo del passo di prova, calcolarne la deviazione standard (σ) ed il coefficiente di variazione (CV), in modo da valutare la precisione della grandezza. Il PGA (Peak Ground Acceleration) è la misura della massima accelerazione del suolo indotta dal terremoto e registrata dagli accelerometri. Diversamente dalla scala Richter, che misura l'ampiezza globale di un terremoto, il PGA misura

l'intensità, in termini di accelerazione al suolo, di un terremoto in una singola area geografica ed è perciò un dato di riferimento per la classificazione e il rischio sismico [OPCM 3274, 2003].

Successivamente, moltiplicando la massa di ciascun muro con il PGA reale, è stata quantificata la forza agente ad ogni passo di prova. Nei casi di rimozione o errore nei segnali dei sensori alla base del pannello, si sono utilizzati quelli installati sul basamento del telaio in acciaio (A10 e A11).

I trasduttori analogici forniscono informazioni in merito all'apertura dei paramenti e all'abbassamento complessivo. Le misure rilevate sono in Volt, perciò è stato necessario trasformarle in mm per valutarle in termini di spostamento.

Una prima analisi per il controllo del buon funzionamento dei trasduttori ha portato ad individuare massimi e minimi, sia relativi che assoluti. Il termine relativo dà un'idea riguardo alla progressione generale del passo di prova in esame, mentre quello assoluto si riferisce all'andamento globale del pannello durante l'intera sperimentazione. Questo secondo dato si ottiene considerando come punto di partenza lo spostamento ultimo misurato, al passo di prova precedente, come media delle ultime venti misure. Questa precisazione è necessaria in quanto il rilevamento veniva avviato e terminato manualmente. L'elaborazione dei dati si è poi concentrata ai soli sensori di mezzeria e a quello in sommità, tralasciando quelli alla base installati unicamente per verificare che i pannelli fossero correttamente fissati al piede, impedendo qualsiasi spostamento alla base. Essi infatti misurano lo spostamento tra un punto fisso sul basamento del telaio ed uno mobile sul modello: il verso, tra loro concorde o discorde, può essere interessante per capire se c'è rispettivamente traslazione o rotazione.

Utilizzando le misure assolute degli spostamenti ultimi si sono sviluppati dei grafici, che permettono di osservare l'apertura dei paramenti in mezzeria e l'abbassamento verticale stimato con il sensore P5. Infine calcolando una media dei movimenti della parte centrale (P3 e P4), è possibile fare un confronto tra i diversi muri.

Nei casi di rinforzo con i tiranti, è stata misurata la deformazione, e in seguito calcolata la tensione, delle barre durante l'evento sismico. Tali valori sono stati ricavati seguendo un metodo di analisi affine a quello utilizzato per i sensori analogici, ma partendo dai rilevamenti in μ Strain degli estensimetri FBG (cfr. § 2.2.3). Considerando che la fibra è stata inserita nella barra prima di essere posta in tensione, si tratta di dati relativi, in quanto non si conosce la lunghezza d'onda di Bragg iniziale (quella di pre-tensionamento). Per ottenere il dato effettivo sarebbe stato necessario avere effettuato delle letture prima di avviare il programma sperimentale, in modo tale da determinare la tensione iniziale sulle barre. Si utilizzano quindi valori assoluti, determinati facendo la differenza con la media valutata nei primi 20 s a 0.05g, corrispondente all'inizio della sperimentazione.

Per quanto riguarda la deformazione ultima, invece, è stata stimata facendo la media nei 10 s conclusivi (2500 valori) di ogni passo di prova. Mentre la tensione $\Delta\sigma$ [MPa] è stata calcolata come prodotto tra la deformazione $\Delta\varepsilon$ e il modulo elastico dell'acciaio ($E_{\text{steel}} = 210000 \text{ N/mm}^2$). Infine, utilizzando il valor medio assoluto, tra i due sensori, si sono sviluppati dei grafici per confrontare le deformazioni e le tensioni in ciascun pannello esaminato.

3.1. Pannelli non rinforzati

Lo studio dei pannelli non rinforzati (UnReinforced Masonry, URM) permette di comprendere il comportamento della muratura multistrato in pietra allo stato originario. Le caratteristiche fisiche di ciascun campione, sono già state esaminate al paragrafo § 2.1.3.

Le prime sperimentazioni effettuate su tavola vibrante riguardano questi muri, i quali assumono una configurazione di prova diversa, perché perfezionata nelle fasi successive. Le differenze sono riscontrabili nel posizionamento degli accelerometri e, solo nel caso 1-URM, dei marker.

3.1.1. Wall 1-URM

Il rilievo geometrico del pannello è rappresentato in Fig 3.1, con indicata la posizione, la direzione ed il verso dei trasduttori: accelerometri in rosso, sensori di spostamento in verde e marker in nero. Nella parte superiore sono visibili inoltre le fessurazioni pre-prova, che si sono manifestate durante la movimentazione del muro (Fig 3.2).

Ai fini della corretta interpretazione della risposta in seguito illustrata, vanno fatte alcune osservazioni riguardo lo svolgimento della prova. Innanzitutto, al passo 0.20g è avvenuto lo shut down (blocco della tavola vibrante durante o tra le prove), ed è stato perciò necessario ripetere l'esperimento (0.20g II), in modo tale da avere delle misure valide per essere esaminate.

Tab 3.1: Pannello 1-URM. Accelerazione al suolo nominale e reale, frequenza di acquisizione, deviazione standard e coefficiente di variazione, forza agente.

Peak Ground Acceleration Nominal	Acceleration Real [g]	Frequency [Hz]	Standard Deviation [g]	Coeff. of Variation	Force [kN]
0.05g	0.033	200	0.004	12.61 %	1.30
0.10g	0.064	200	0.002	2.63 %	2.55
0.15g	0.084	200	-	-	3.34
0.20g II	0.165	200	0.059	35.68 %	6.58
0.25g	0.175	200	-	-	6.99
0.30g	0.211	200	-	-	8.46
0.35g	Collapse	200	-	-	-

Gli accelerometri situati sul pannello erano stati preventivamente rimossi. Per tale ragione non è stato possibile determinare i fattori di amplificazione delle accelerazioni e i grafici in Fig 3.3 sono rimasti incompleti. Nonostante ciò, la Tab 3.1 è stata completata utilizzando i dati misurati dai trasduttori installati sul basamento del telaio (A10 e A11). Tali sensori avevano entrambi verso positivo nel sistema di riferimento adottato. Durante le prove effettuate a 0.15g, 0.25g e 0.30g, si assiste ad un mal-funzionamento di A10: il PGA reale e la forza agente sono

stati comunque calcolati con le sole misure di A11. Il picco reale di accelerazione al suolo (Tab 3.1) è in media inferiore del 30% rispetto quello nominale, ma con una dispersione percentuale piuttosto elevata. Il collasso è avvenuto a 0.35g, perciò le misurazioni sono state alterate dalla caduta dei conci. Oltre alle differenze già considerate, nel primo campione si riscontra l'assenza del sensore analogico in sommità (P5). Non è perciò possibile fare valutazioni in merito all'abbassamento globale durante l'input dinamico.

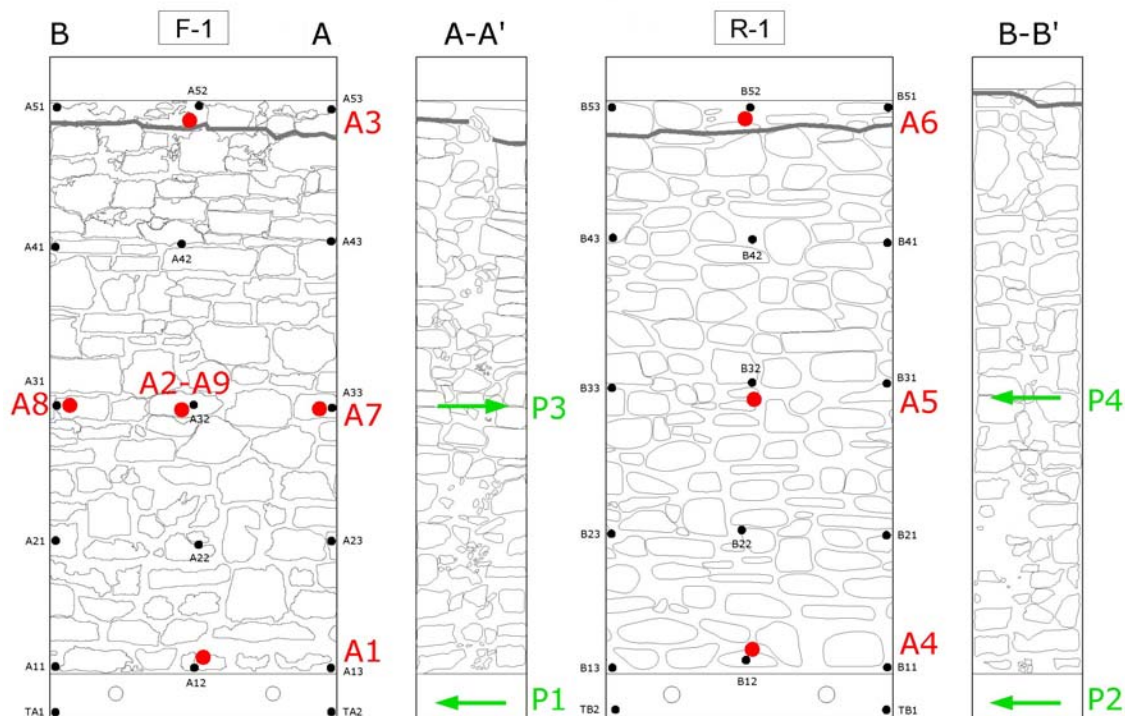


Fig 3.1: Pannello 1-URM. Rilievo geometrico con indicazione della posizione e della nomenclatura dei sensori e del quadro fessurativo pre-prova.

Analisi del Quadro Fessurativo e dei Fattori di Amplificazione

Questo primo studio viene approfondito in Fig 3.3 con i rilievi del quadro fessurativo. Ad ogni passo di prova, viene evidenziato in rosso il danno relativo al PGA in corso di analisi, e in nero quello manifestatosi fino a quel momento. In questo pannello, come già spiegato, non è stato possibile calcolare i fattori di amplificazione delle accelerazioni, a causa della mancanza dei sensori, perciò i grafici risultano incompleti.

Nel corso della prova, dal quadro fessurativo si nota un danneggiamento esteso all'intera superficie della muratura. Nonostante ciò, il collasso (area grigia in Fig 3.3) si è verificato per un'accelerazione di 0.35g ed interessa solamente il retro del pannello, limitatamente ai 2/3 superiori (Fig 3.4). L'incrinatura dovuta ai movimenti del muro, prima della prova, risulta essere determinante per la rottura del paramento posteriore.

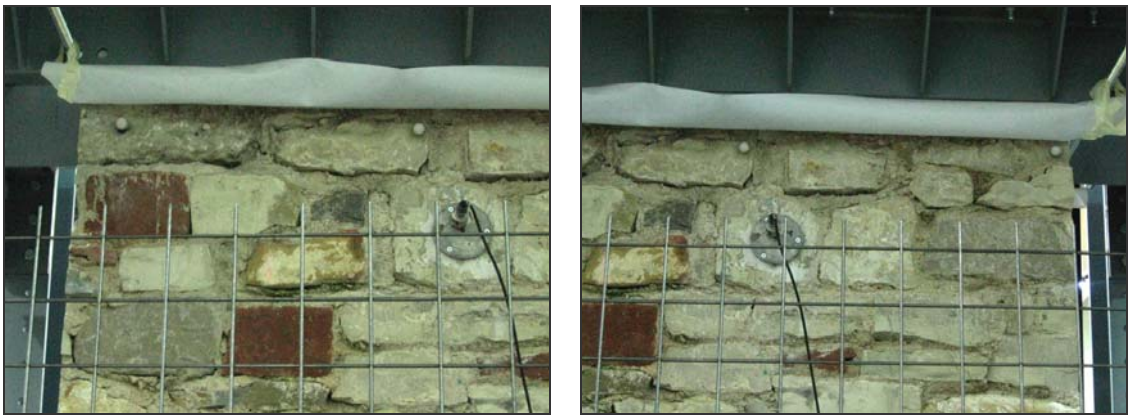
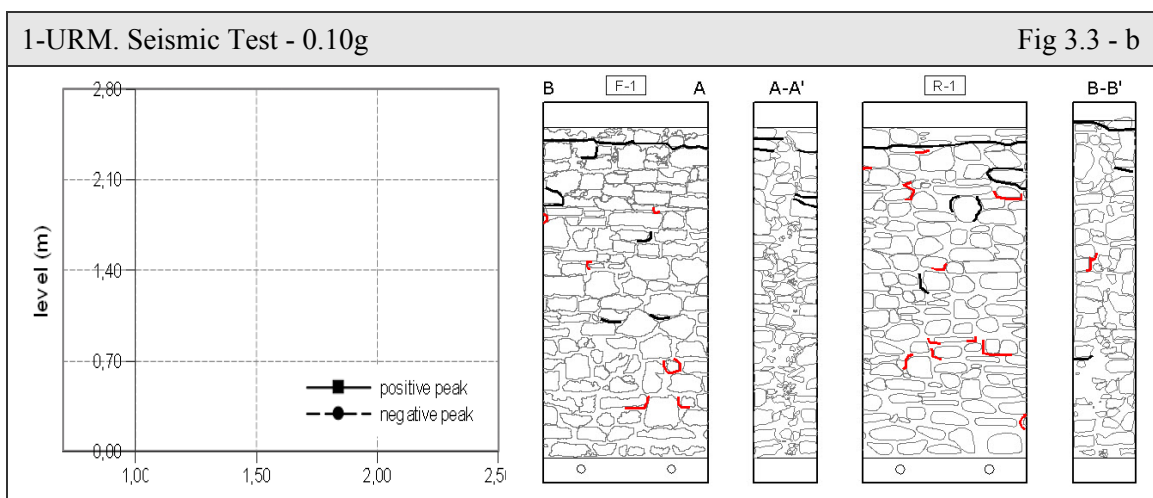
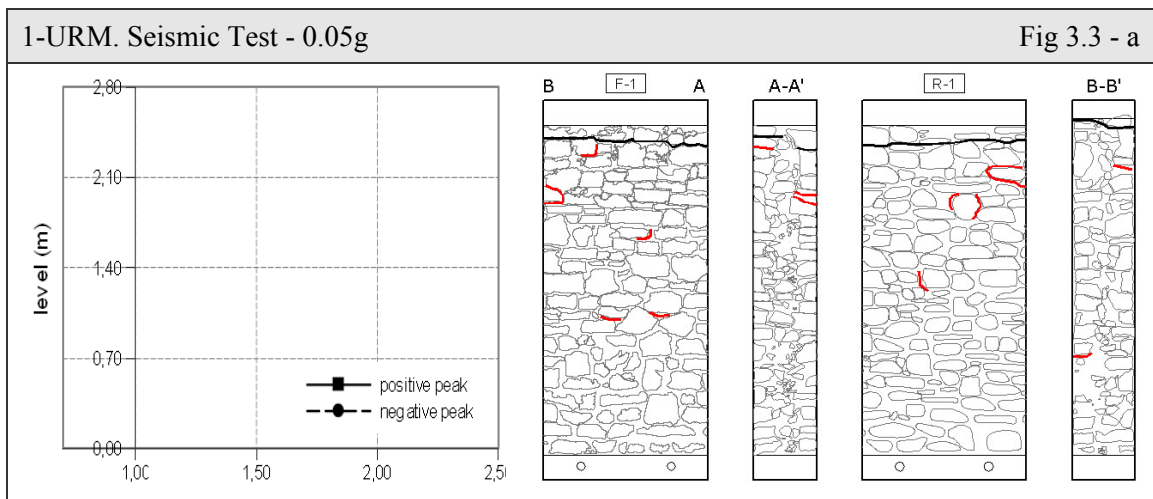
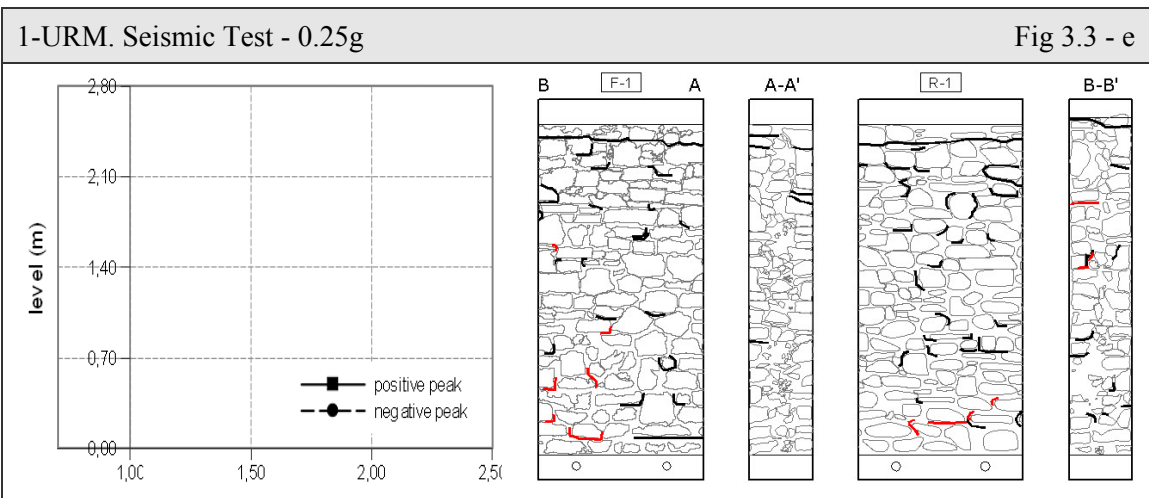
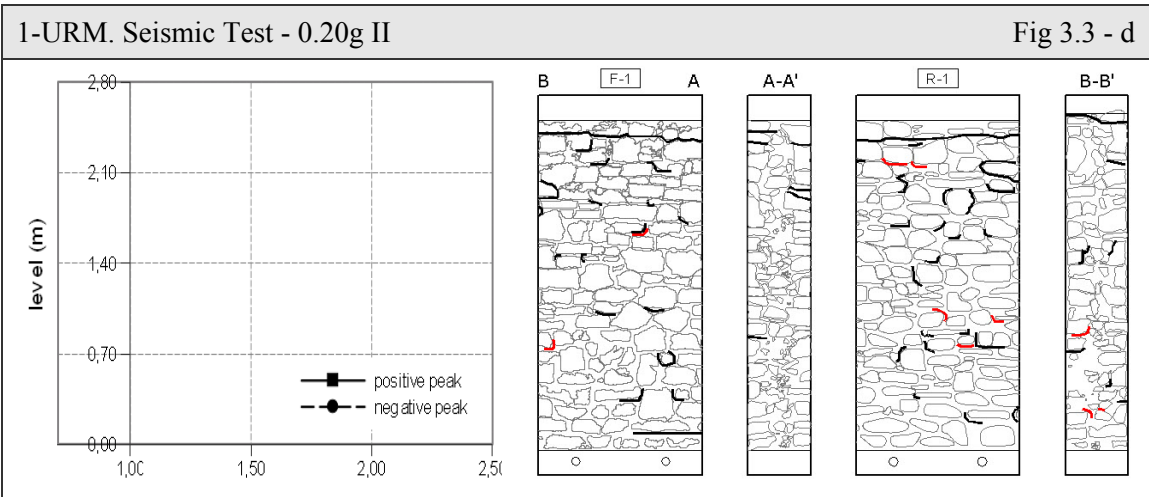
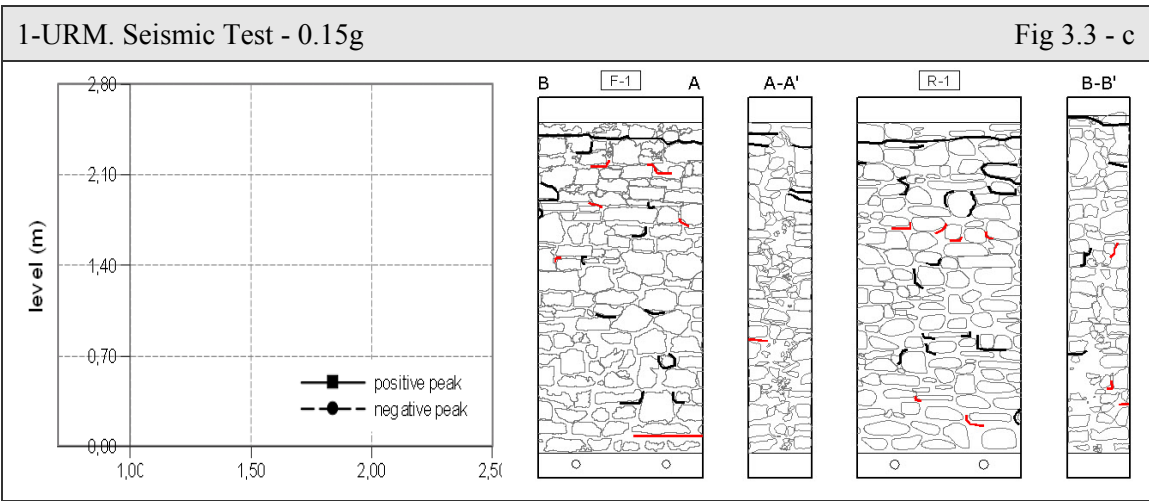


Fig 3.2: Pannello 1-URM. Rilievo fotografico del fronte e del quadro fessurativo pre-prova.





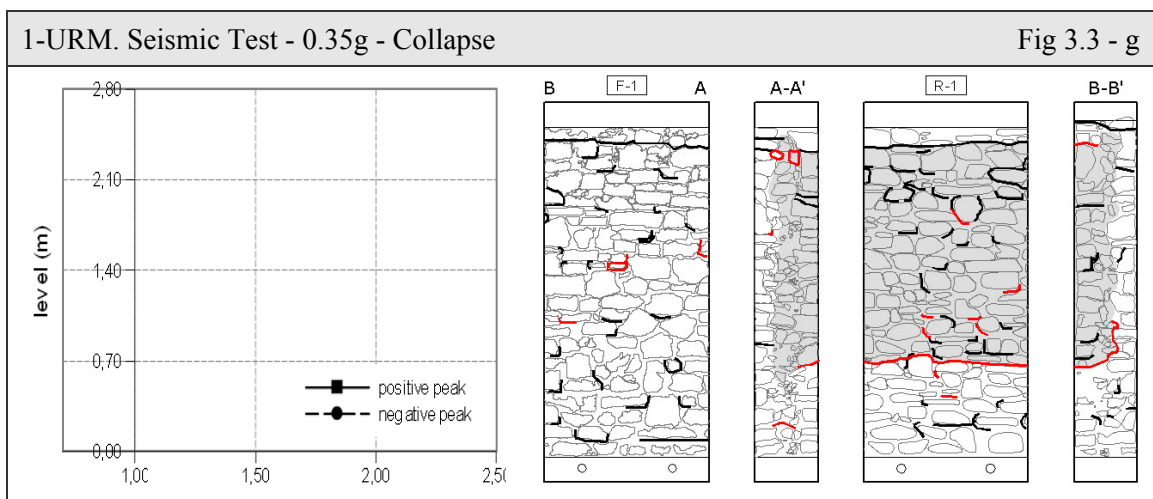
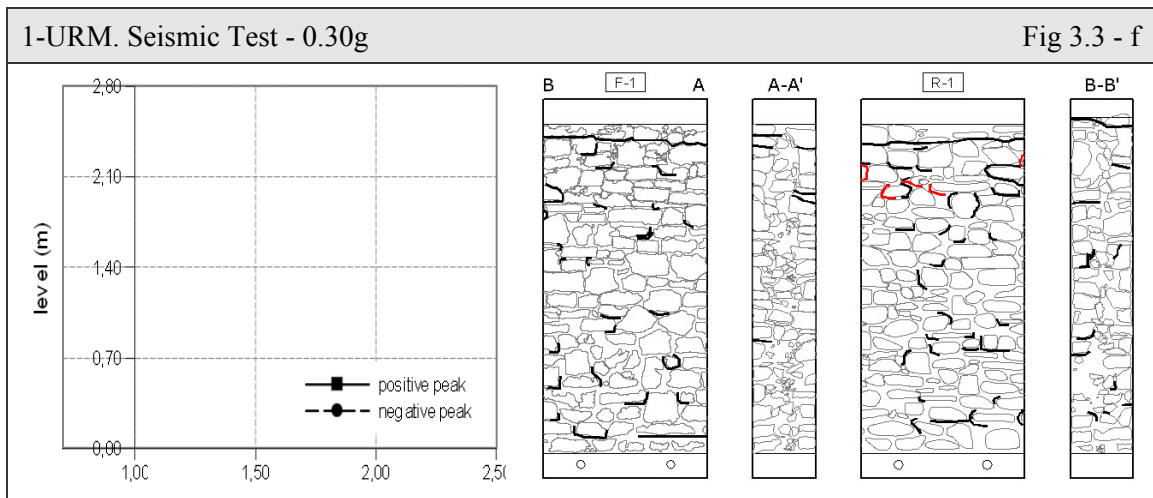


Fig 3.3: Pannello 1-URM. Analisi del quadro fessurativo e dell'azione sismica per ogni prova effettuata in laboratorio ENEA. A sinistra: grafico dei fattori di amplificazione.



Fig 3.4: Pannello 1-URM. Rilievo fotografico del collasso, 0.35g (fronte-sezione B-B'-retro).

Analisi degli spostamenti locali

La seconda fase di studio, riguarda i dati dei sensori analogici. In questo pannello, il trasduttore verticale P5 che rileva l'abbassamento non era stato installato. In Tab 3.2 sono indicati gli spostamenti in mm rilevati dai trasduttori in mezzzeria, sia assoluti che relativi. La media, calcolata sui valori assoluti, è utile al fine del confronto generale al paragrafo § 3.5. I dati mancanti sono dovuti a mancata installazione dell'estensimetro P5 e segnali al limite dell'escursione massima dello strumento, perciò legati alla rimozione dello stesso in previsione del collasso. In Fig 3.5, Fig 3.6 e Fig 3.7 vengono rappresentate le misurazioni suddette.

Tab 3.2: Pannello 1-URM. Spostamenti ultimi, assoluti e relativi, registrati dai sensori analogici in mezzzeria e in sommità durante ogni singola prova. Valori in mm.

Wall 1	Absolute Data			Average	Relative Data		
	P3 middle dx	P4 middle sx	P5 top	middle sensors	P3 middle dx	P4 middle sx	P5 top
0.05g	0.02	-0.02	-	0.00	0.02	-0.02	-
0.10g	-0.04	-0.09	-	-0.07	-0.06	-0.07	-
0.15g	0.16	0.13	-	0.14	0.20	0.22	-
0.20g	3.16	3.89	-	3.52	3.30	3.76	-
0,20g II	4.23	4.98	-	4.61	1.07	1.10	-
0.25g	-	7.84	-	7.84	-	2.86	-
0.30g	-	-	-	-	-	-	-
0.35g	-	-	-	-	-	-	-

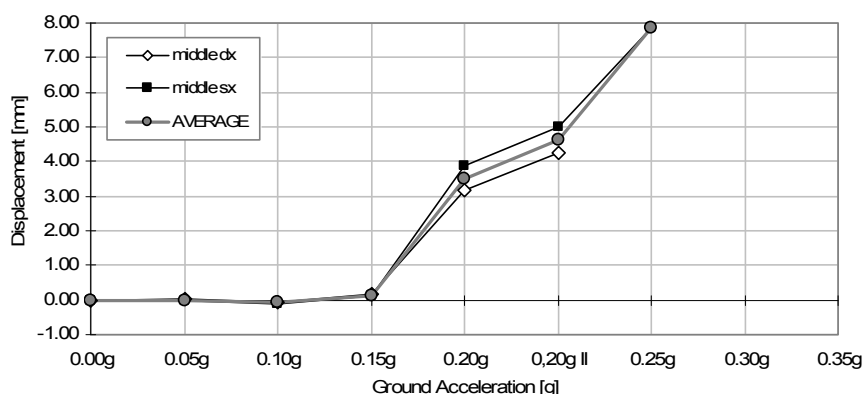


Fig 3.5: Pannello 1-URM. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzzeria e relazionati con il PGA, ad ogni prova di laboratorio.

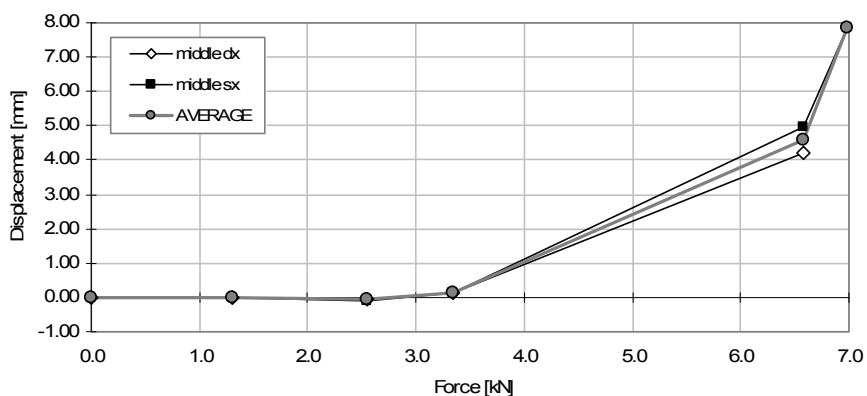


Fig 3.6: Pannello 1-URM. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con la forza agente, ad ogni prova di laboratorio.

Lo spostamento assoluto si relaziona in Fig 3.5 con il PGA, e in Fig 3.6 con la forza agente durante il sisma. Il netto incremento a partire da 0.20g indica l'avvio della separazione tra i paramenti, i quali mantengono un comportamento uniforme tra le due sezioni, dato lo sviluppo parallelo dei grafici dei due sensori. Il valore di apertura delle fessure si amplifica seguendo un andamento pressoché lineare per le prove successive e raggiungendo un valore ultimo pari a 7.84 mm. Un ulteriore approfondimento viene fatto in Fig 3.7, dove i trasduttori P4 e P5 vengono presi in esame separatamente e si relaziona il comportamento dei dati assoluti con quello dei relativi (grafico a colonne). Al netto incremento visibile a 0.20g corrisponde un aumento dello spostamento e quindi l'inizio di fessurazioni notevoli in grado di indurre gradualmente al collasso.

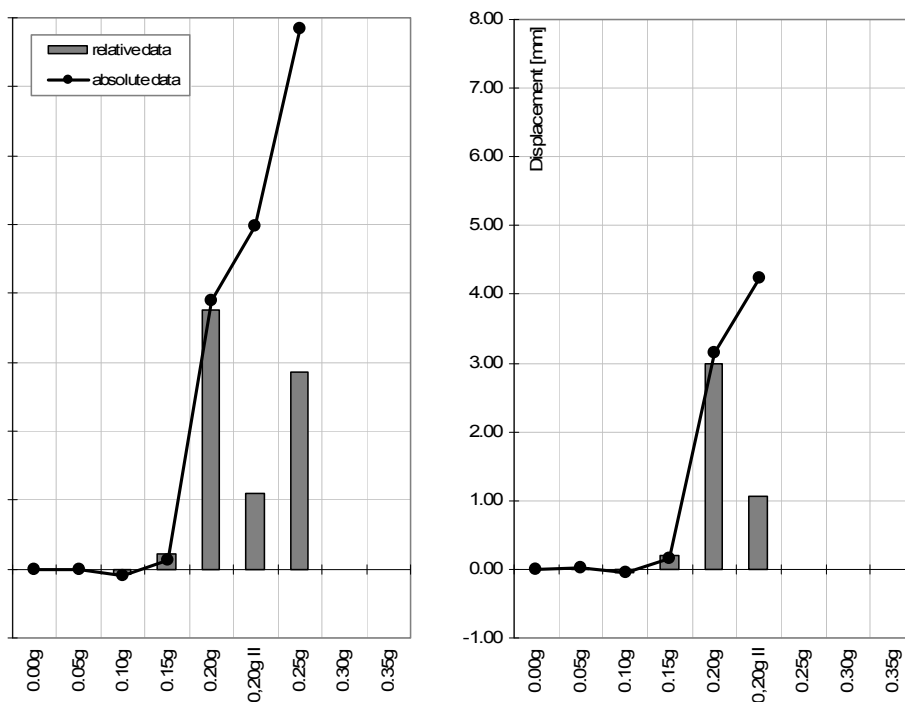


Fig 3.7: Pannello 1-URM. Confronto tra gli spostamenti ultimi assoluti e relativi, registrati in mezzeria dai sensori analogici. Da sinistra: spostamenti del sensore P4 (di sinistra) e del sensore P3 (di destra).

3.1.2. Wall 2-URM

Il rilievo geometrico del pannello è rappresentato in Fig 3.8, con indicata la posizione, la direzione e il verso dei trasduttori: accelerometri in rosso, sensori di spostamento in verde e marker in nero.

Di notevole rilevanza sono le fessurazioni pre-prova sul fronte, dovute alla movimentazione del muro. Nonostante ciò, dallo studio degli accelerogrammi si è osservato un comportamento simile nei due paramenti ed il crollo ha interessato solamente il retro. Il collasso avviene in modo fragile (Fig 3.11) a 0.25g, preceduto solamente dalla caduta di materiale del nucleo da entrambe le sezioni sin dal passo di prova a 0.15g. Non si manifesta un chiaro e graduale sviluppo del danno nel corso della sperimentazione (Fig 3.9).

Tab 3.3: Pannello 2-URM. Accelerazione al suolo nominale e reale, frequenza di acquisizione, deviazione standard e coefficiente di variazione, forza agente.

Peak Ground Acceleration Nominal	Real [g]	Frequency [Hz]	Standard Deviation [g]	Coeff. of Variation	Force [kN]
0.05g	0.031	200	0.004	11.22 %	1.22
0.10g	0.056	200	0.005	9.24 %	2.19
0.15g	0.099	200	0.010	9.96 %	3.87
0.20g	0.168	200	0.030	18.05 %	6.60
0.25g	Collapse	200	-	-	-

Da considerare, nell'interpretazione dei risultati, la permeazione indesiderata di miscela avvenuta in seguito all'iniezione dei pannelli consolidati. Com'è visibile in Fig 3.8 (tratteggio grigio), l'area riguarda la parte inferiore del campione, con maggior interesse per la sezione A-A' di contatto con il muro 3T.

Gli accelerometri, posizionati come nel campione 1-URM, erano operativi ed è quindi stato possibile calcolare il PGA reale e i fattori di amplificazione delle accelerazioni (Tab 3.3) basandosi sulle rilevazioni ai piedi del muro (A1 e A4). I dispositivi sul basamento del telaio fungono da controllo, il loro verso era positivo per A11 e negativo per A10 nel sistema di riferimento adottato. Il picco reale di accelerazione al suolo è in media inferiore del 30% rispetto a quello nominale. La precisione della misura (CV) è in media intorno il 10%, con una dispersione sul PGA reale calcolato inferiore o uguale di 10^{-2} .

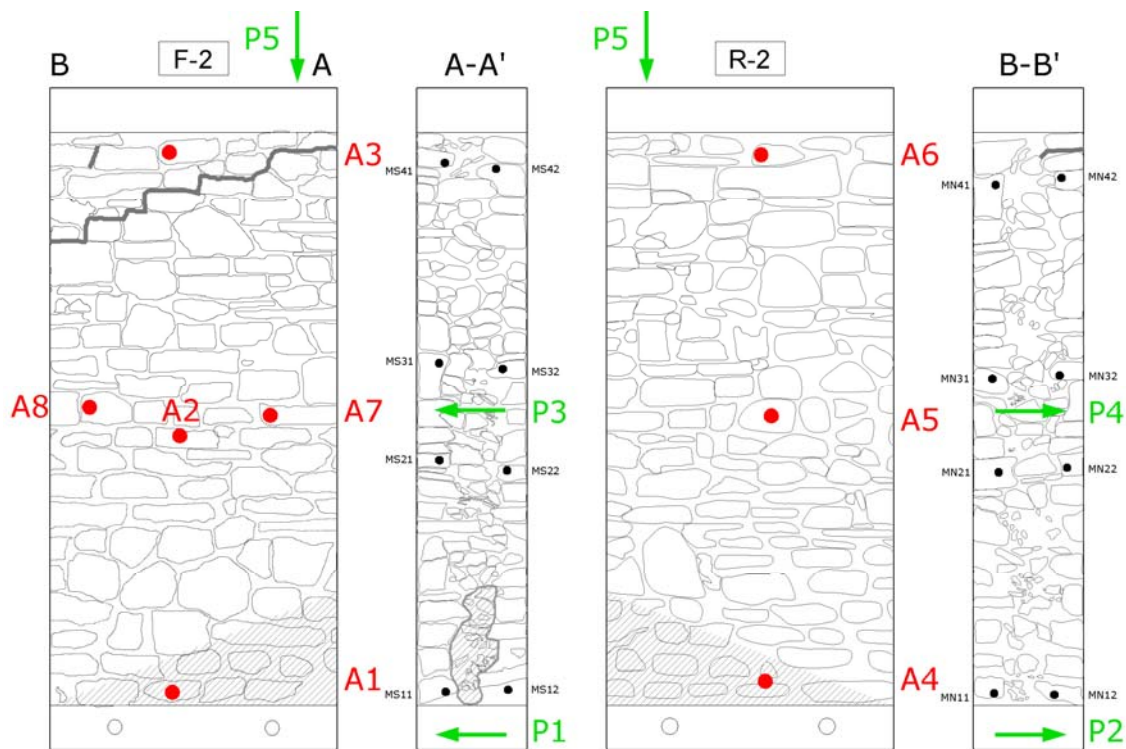
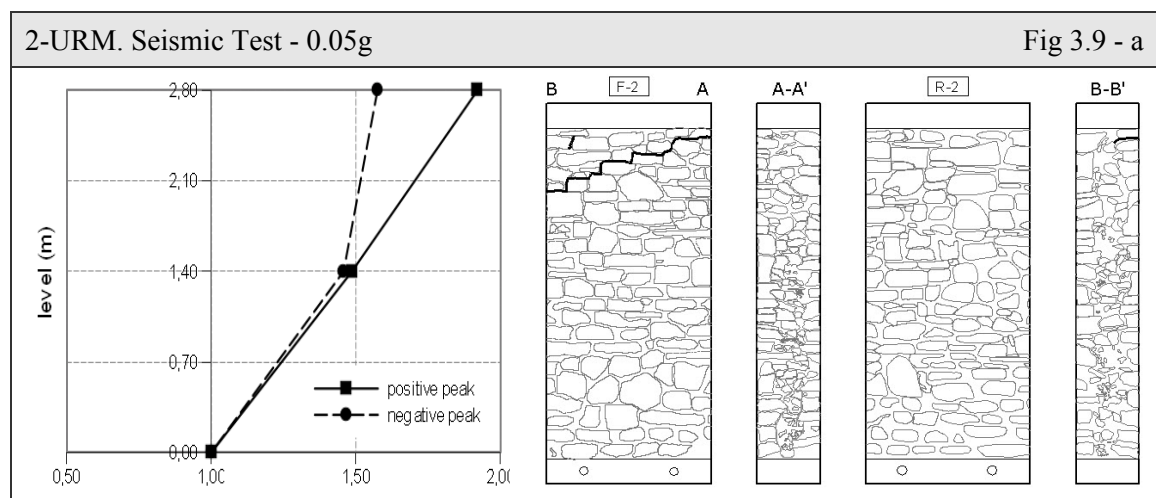
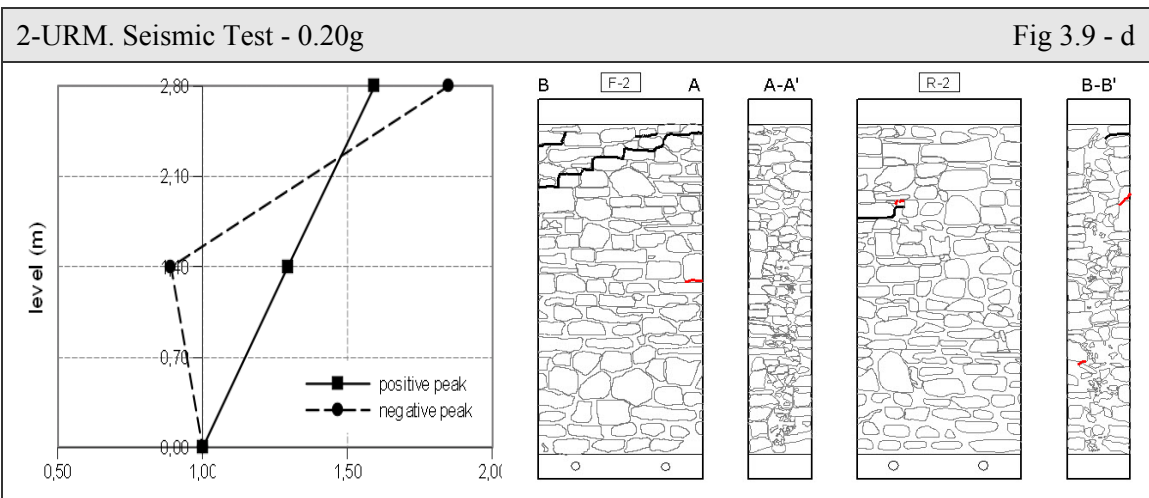
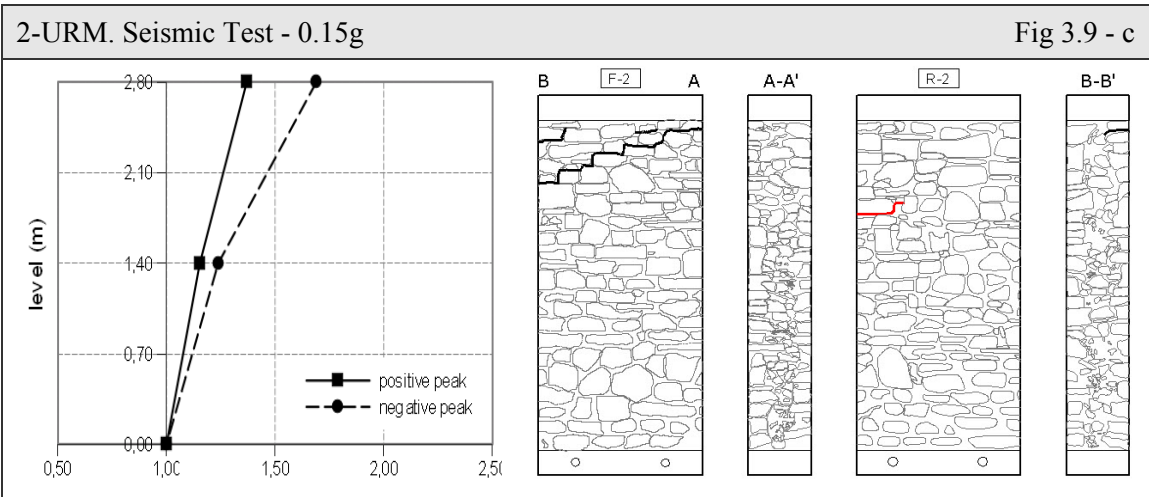
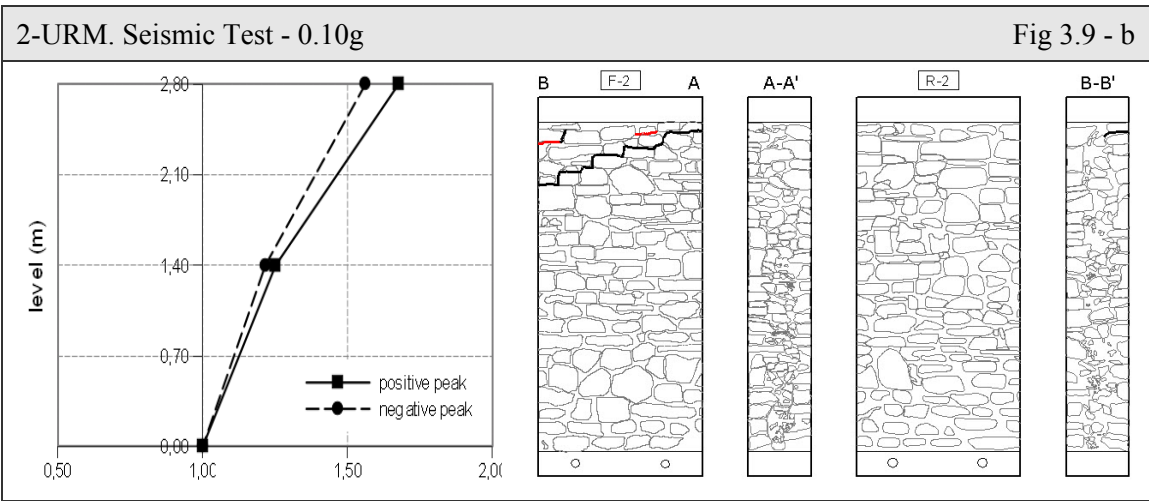


Fig 3.8: Pannello 2-URM. Rilievo geometrico con indicazione della posizione e della nomenclatura dei sensori e del quadro fessurativo pre-prova.

Analisi del Quadro Fessurativo e dei Fattori di Amplificazione

Ad ogni passo di prova, viene analizzato il quadro fessurativo in relazione ai fattori di amplificazione (Fig 3.9). In rosso si evidenzia il danno relativo al PGA in analisi e in nero quello manifestatosi fino a quel momento. L'accelerazione normalizzata si amplifica in modo direttamente proporzionale all'altezza del pannello, con incremento compreso tra 1.0 e 1.5 in mezzaria e tra 1.5 e 2.0 in sommità.





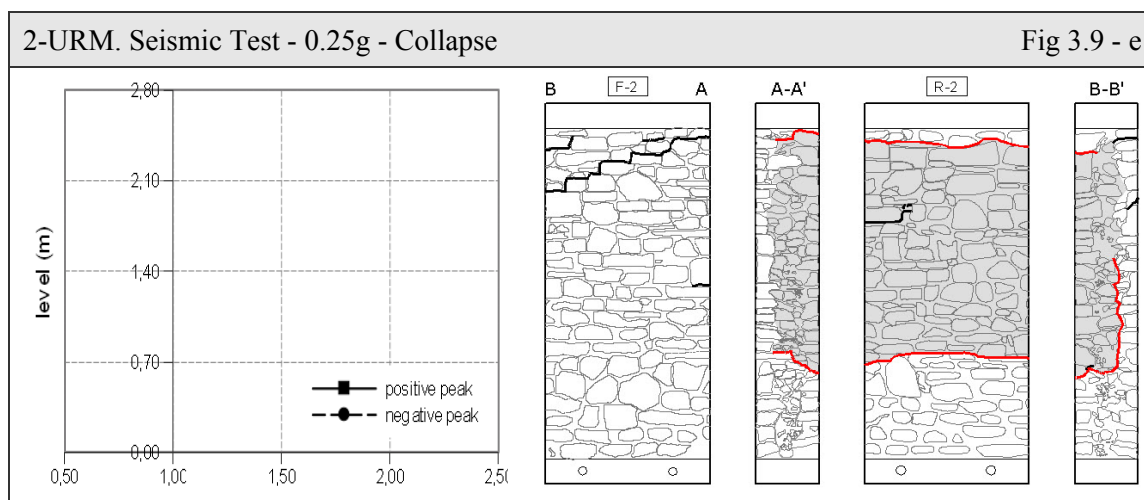


Fig 3.9: Pannello 2-URM. Analisi del quadro fessurativo e dell'azione sismica per ogni prova effettuata in laboratorio ENEA. A sinistra: grafico dei fattori di amplificazione.

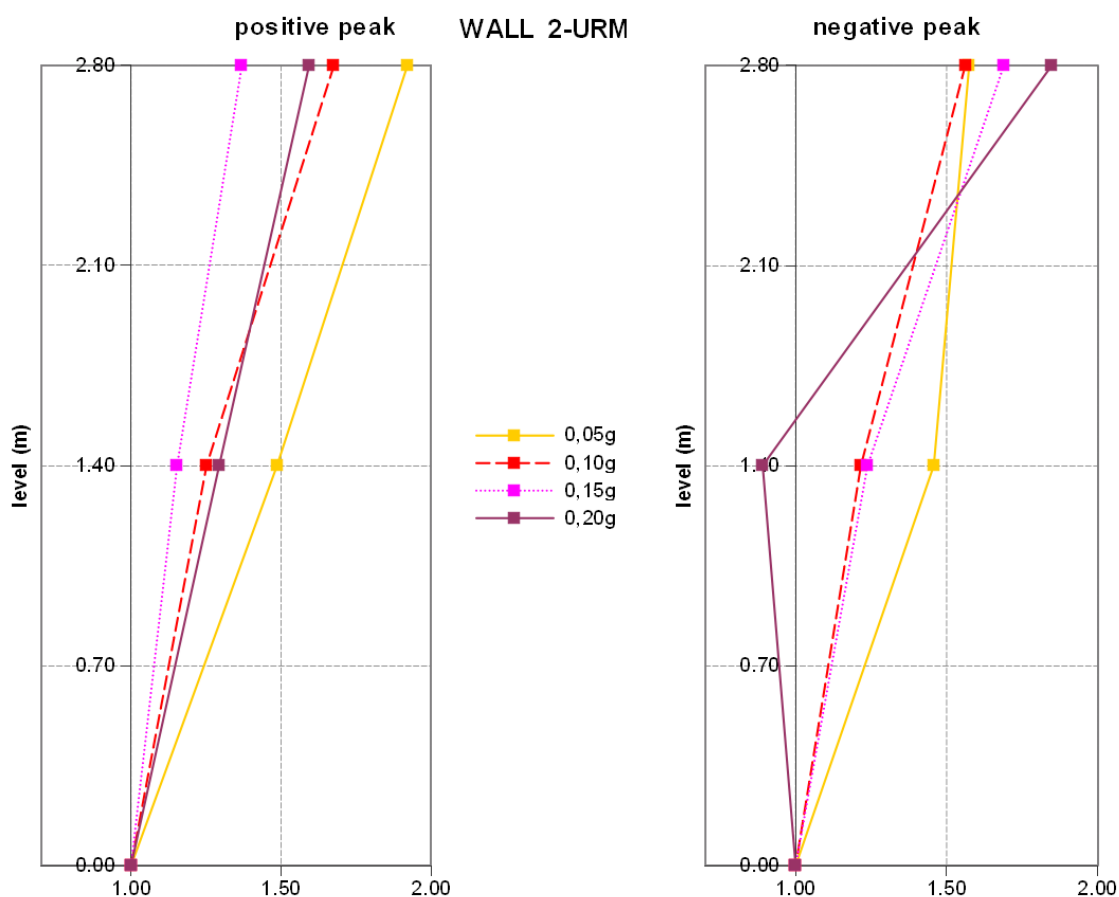


Fig 3.10: Pannello 2-URM. Fattori di amplificazione delle accelerazioni calcolati sulla base dei dati registrati dai sensori accelerometrici in laboratorio ENEA.

Dall'andamento globale dei fattori di amplificazione delle accelerazioni (Fig 3.10) è possibile fare delle osservazioni riguardo al comportamento del pannello durante la prova. I grafici vengono distinti in base al verso del picco. Secondo il sistema di riferimento adottato, il picco positivo è quello che induce il retro al collasso fuori-piano.

All'aumentare del PGA, il fattore di amplificazione diminuisce sia in mezzeria che in sommità. I due paramenti assumono un comportamento molto simile durante la prova, diversificandosi poco prima del collasso (0.20g). Inoltre l'incrinatura che si è creata in fase pre-prova, causa una certa stabilità del valore di accelerazione in sommità del fronte (picco negativo).



Fig 3.11: Pannello 2-URM. Rilievo fotografico del collasso, 0.25g (fronte-retro).

Analisi degli spostamenti locali

Per quanto riguarda gli spostamenti, in Tab 3.4 sono indicati i valori in mezzeria e in sommità, sia assoluti che relativi. Al passo 0.10g tali misure non sono state effettuate. Il sensore P3, situato in sezione A-A', rileva spostamenti quasi nulli a causa di un mal-funzionamento probabilmente dovuto all'installazione del trasduttore stesso, per tale ragione la media coincide con i dati di P4. Inoltre agli ultimi passi di prova è stato rimosso.

Nonostante siano presenti le letture di un solo sensore analogico (P4), dai grafici PGA vs Spostamento (Fig 3.12) e Forza vs Spostamento (Fig 3.13) si nota un netto incremento a 0.20g, passo che precede il collasso, che indica una forte separazione localizzata in mezzeria pari a 3.23 mm che rimane costante. Durante la stessa prova, corrispondente ad una forza agente di 6.60 kN, avviene anche un chiaro movimento verticale del pannello (P5-top) verso l'alto di 0.68 mm e, al passo seguente verso il basso di 2.72 mm a causa del collasso.

Il medesimo comportamento è evidente in Fig 3.14 dove i sensori P4 e P5 vengono presi in esame separatamente, relazionando i dati assoluti con quelli relativi (grafico a colonne).

Tab 3.4: Pannello 2-URM. Spostamenti ultimi, assoluti e relativi, registrati dai sensori analogici in mezzeria e in sommità durante ogni singola prova. Valori in mm.

Wall 2	Absolute Data			Average	Relative Data		
Step [g]	P3 middle dx	P4 middle sx	P5 top	middle sensors	P3 middle dx	P4 middle sx	P5 top
0.05g	0.00	0.05	-0.01	0.05	0.00	0.05	-0.01
0.10g	-	-	-	-	-	-	-
0.15g	0.00	0.14	-0.01	0.14	0.00	0.10	0.00
0.20g	-	3.23	-0.68	3.23	-	3.08	-0.66
0.25g	-	3.23	2.72	3.23	-	0.00	3.40

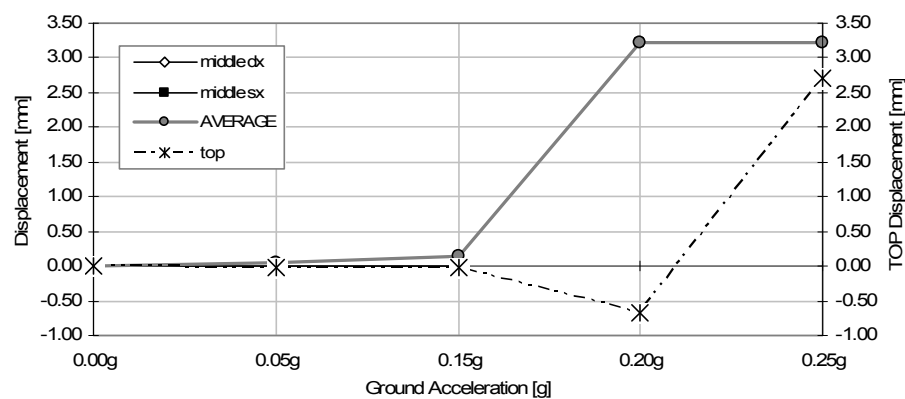


Fig 3.12: Pannello 2-URM. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con il PGA, ad ogni prova di laboratorio.

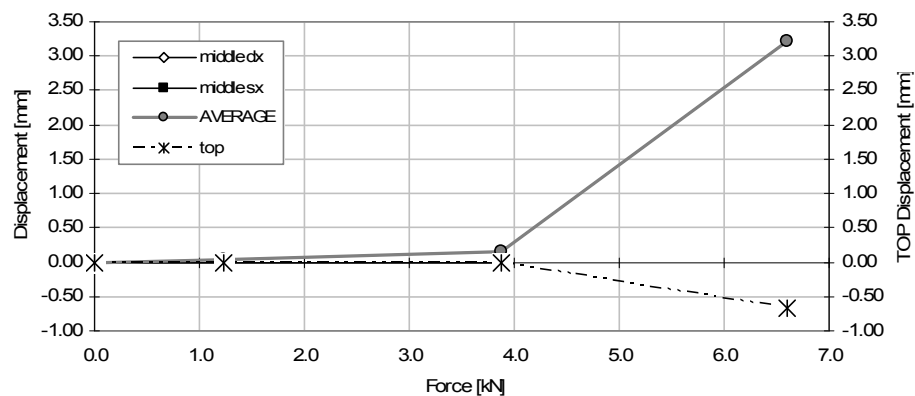


Fig 3.13: Pannello 2-URM. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con la forza agente, ad ogni prova di laboratorio.

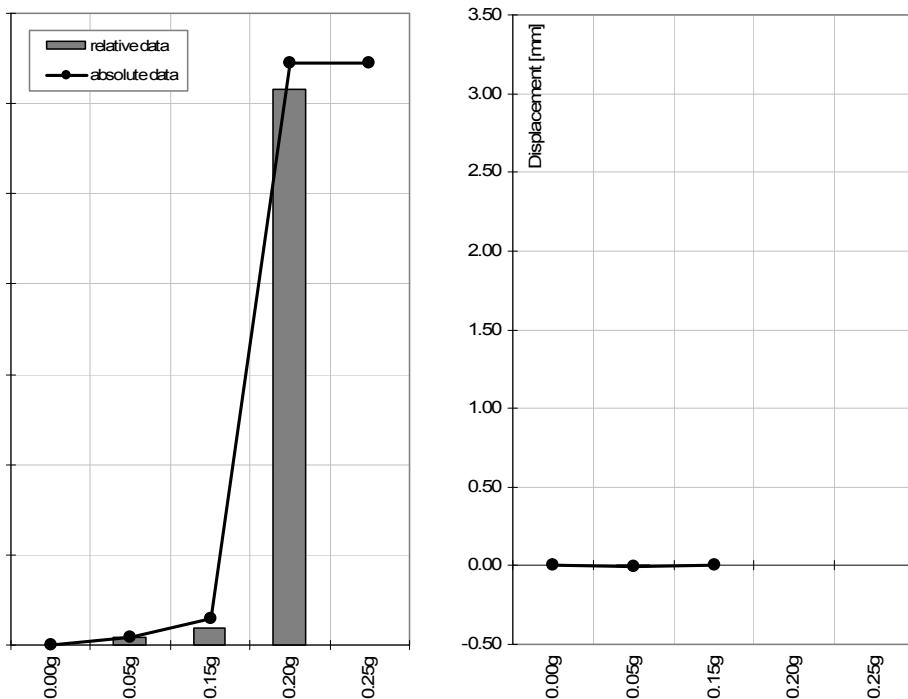


Fig 3.14: Pannello 2-URM. Confronto tra gli spostamenti ultimi assoluti e relativi, registrati in mezzeria dai sensori analogici. Da sinistra: spostamenti del sensore P4 (di sinistra) e del sensore P3 (di destra).

3.1.3. Osservazioni

Le modalità di collasso dei due pannelli non rinforzati sono tra loro molto simili. In entrambi i casi la rottura interessa i 2/3 superiori del retro ed avviene per due diversi livelli di PGA: 0.35g nel muro 1-URM e 0.25g nel 2-URM. I valori effettivi di accelerazione al suolo sono inferiori del 30% rispetto a quelli nominali, perciò il crollo della parte posteriore si verifica, nella realtà, ad intensità minori pari a circa 0.25g e 0.18g rispettivamente.

L'analisi degli spostamenti effettuati su entrambi i campioni, evidenzia la separazione tra i paramenti a partire da un'intensità sismica di 0.20g (corrispondente in 2-URM ad una forza agente di 6.6 kN). L'ultima misurazione disponibile indica un'apertura di 7.84 mm nel primo pannello e di 3.23 mm nel secondo. L'abbassamento è stato valutato solamente in 2-URM e si manifesta, al momento del collasso, con un abbassamento di 2.72 mm.

3.2. Pannelli rinforzati con tiranti

Le prime tecniche di rinforzo studiate in questa campagna sperimentale, riguardano la sola applicazione nella sezione di tirantini metallici antiespulsivi. Perciò si parlerà di muratura rinforzata (Strengthened Masonry, SM). Le caratteristiche di ogni campione sottoposto a prova sono già state illustrate al paragrafo § 2.1.3. I sensori accelerometrici sono tutti posizionati lungo l'asse verticale, come da Fig 3.15. La deformazione delle barre metalliche inserite nella sezione muraria è stata monitorata impiegando sensori in fibra ottica.

3.2.1. Wall 3T

Il rilievo geometrico (Fig 3.15) indica chiaramente la posizione dei sensori (accelerometri in rosso, analogici in verde, marker in nero e FBG cerchiati) e dei tiranti (quadrati grigi), nonché il quadro fessurativo presente prima delle prove. L'area indicata sommariamente con un tratteggio grigio, riguarda invece la permeazione di miscela legante. Tale iniezione è avvenuta durante l'intervento nei pannelli successive, diversamente da come era stato previsto in fase progettuale.

Tab 3.5: Pannello 3T. Accelerazione al suolo nominale e reale, frequenza di acquisizione, deviazione standard e coefficiente di variazione, forza agente.

Peak Ground Acceleration Nominal	Real [g]	Frequency [Hz]	Standard Deviation [g]	Coeff. of Variation	Force [kN]
0.05g	0.035	200	0.004	10.75 %	1.42
0.10g	0.057	200	0.005	9.52 %	2.32
0.15g	0.094	200	0.012	12.36 %	3.85
0.20g	0.150	200	0.019	12.38 %	6.14
0.25g	0.188	200	0.020	10.42 %	7.71
0.30g	0.230	200	0.026	11.48 %	9.41
0.35g	0.248	200	0.028	11.27 %	10.18
0.40g	0.288	200	0.034	11.83 %	11.82
0.45g	0.367	200	0.017	4.51 %	15.03
0.50g	0.346	200	0.043	12.41 %	14.20
0.55g	0.389	200	0.052	13.29 %	15.95
0.60g	Collapse	200	-	-	-

I dati riportati in Tab 3.5 utilizzano come riferimento gli accelerometri alla base (A1 e A4) del pannello, quelli sul basamento in acciaio (A10 e A11) erano stati comunque installati, entrambi con verso negativo. Il collasso è avvenuto a 0.60g nella zona sovrastante i tiranti sul retro, le misurazioni sono state alterate dalla caduta dei conci e quindi non erano affidabili. In

seguito è stata ripetuta un'ulteriore prova a 0.60g che ha indotto il crollo anche della parte anteriore del pannello, ma non sono state effettuate le letture dei segnali, perciò non si conoscono i dati.

L'accelerazione reale al suolo risulta, in media, inferiore del 30% rispetto la nominale, raggiungendo perciò il collasso a 0.42g effettivi. La precisione della misura (CV) è in media intorno l'11%, con una dispersione sul PGA reale calcolato dell'ordine di 10^{-2} .

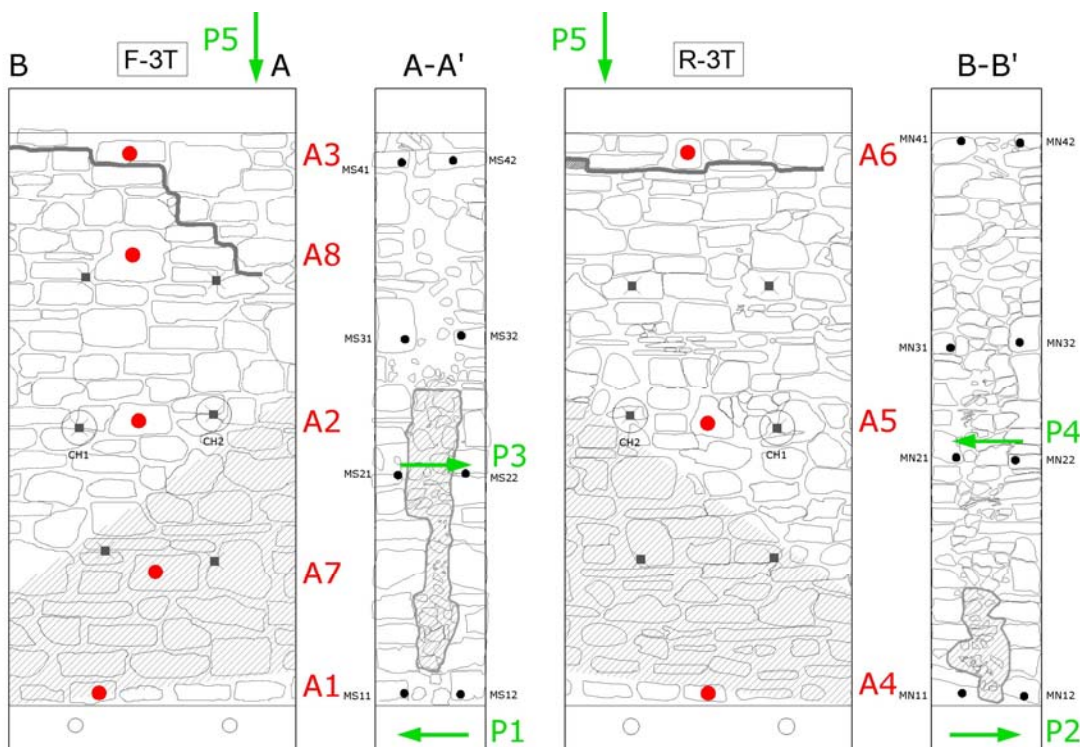


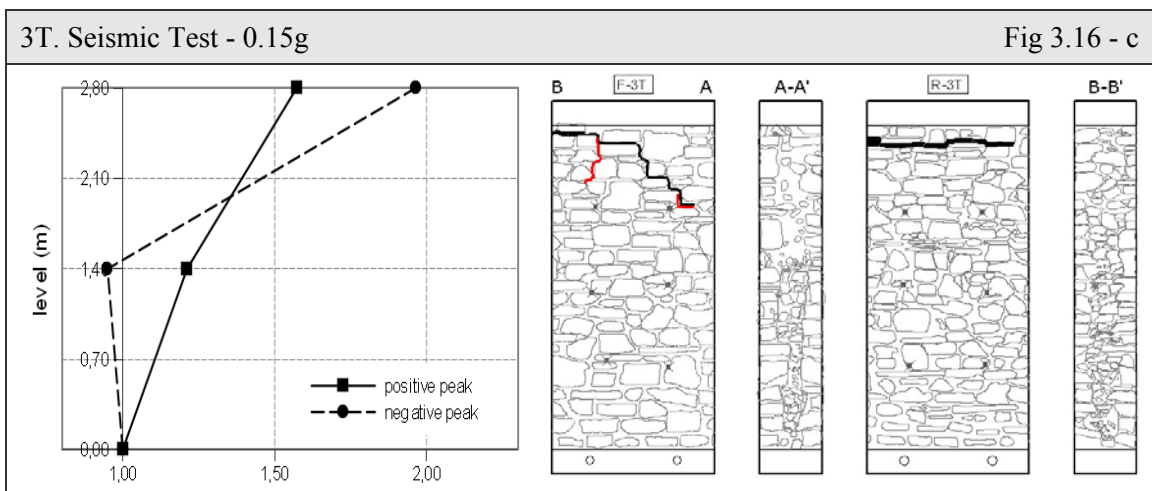
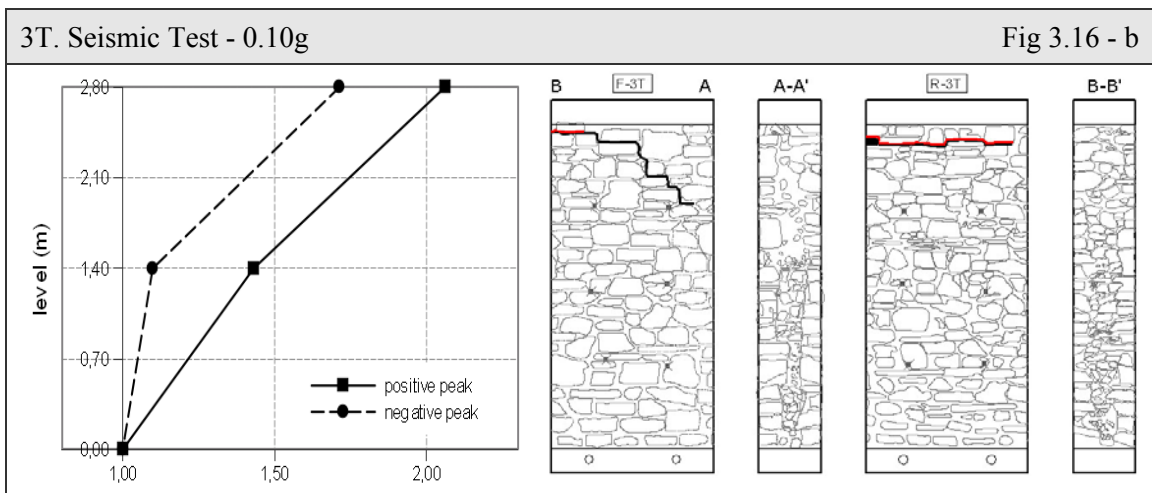
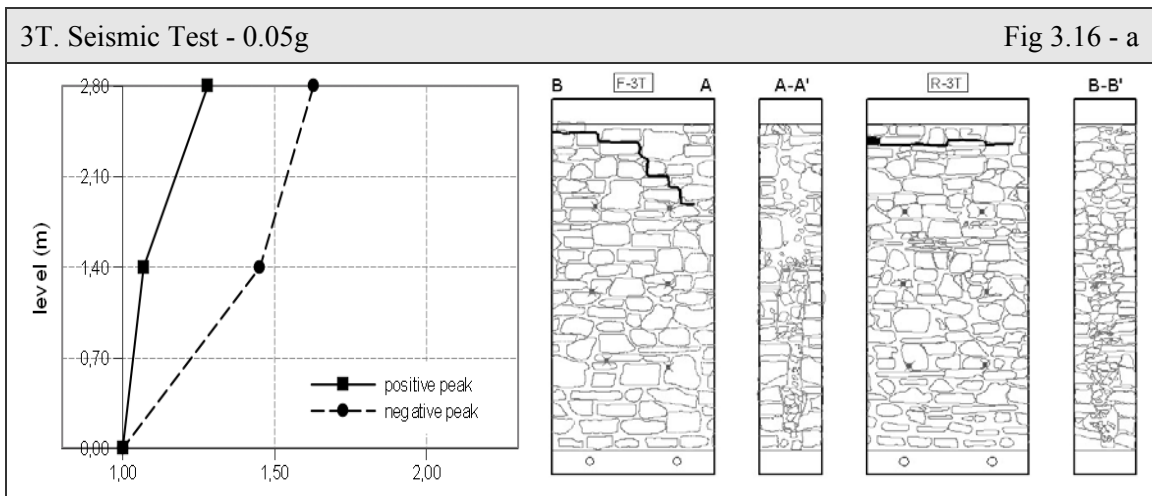
Fig 3.15: Pannello 3T. Rilievo geometrico con indicazione della posizione e della nomenclatura dei sensori e del quadro fessurativo pre-prova.

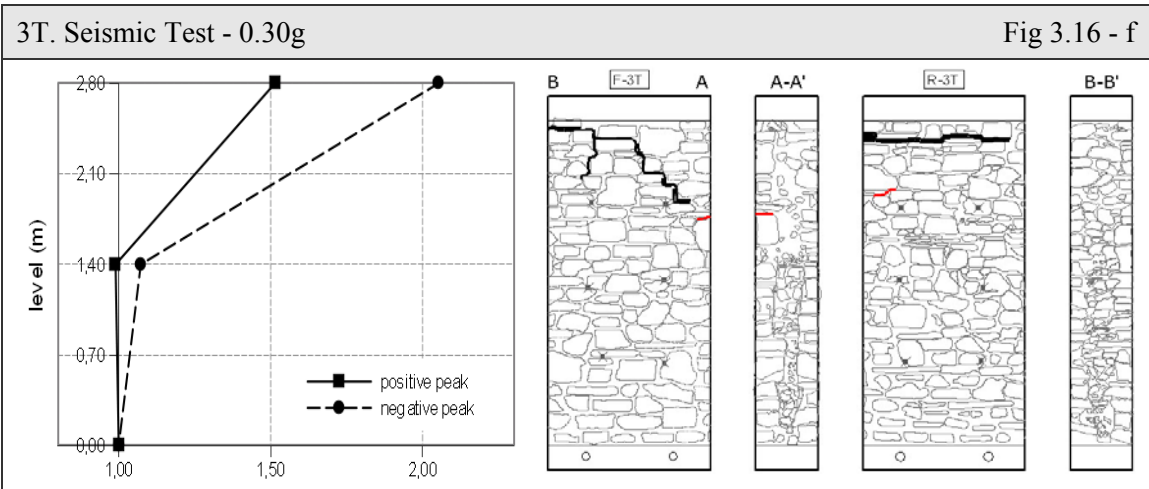
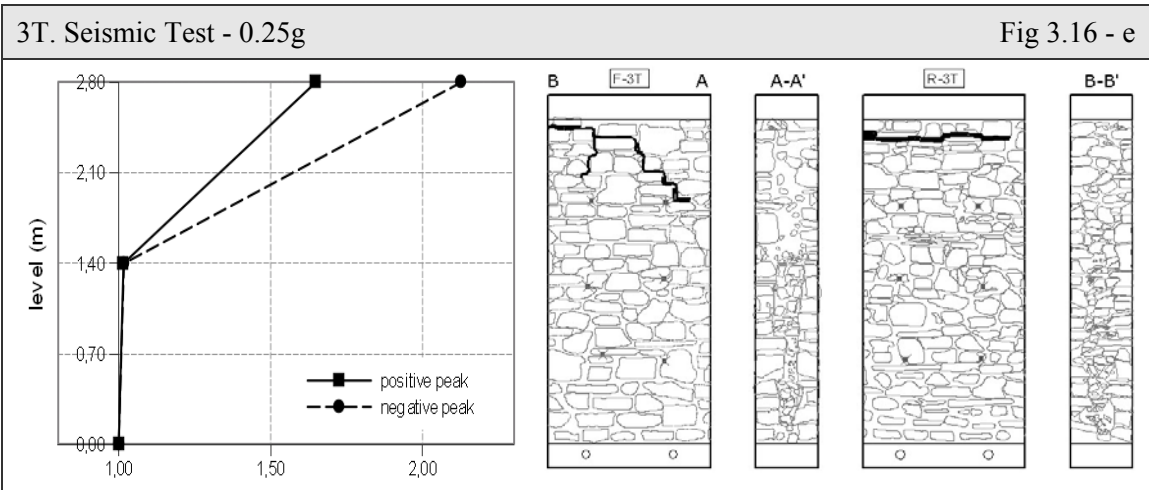
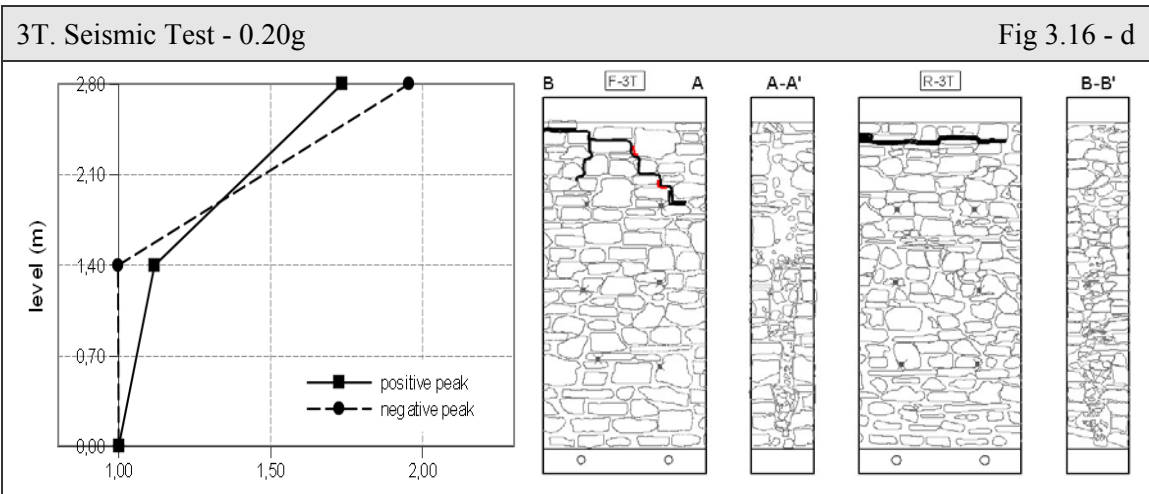
Analisi del Quadro Fessurativo e dei Fattori di Amplificazione

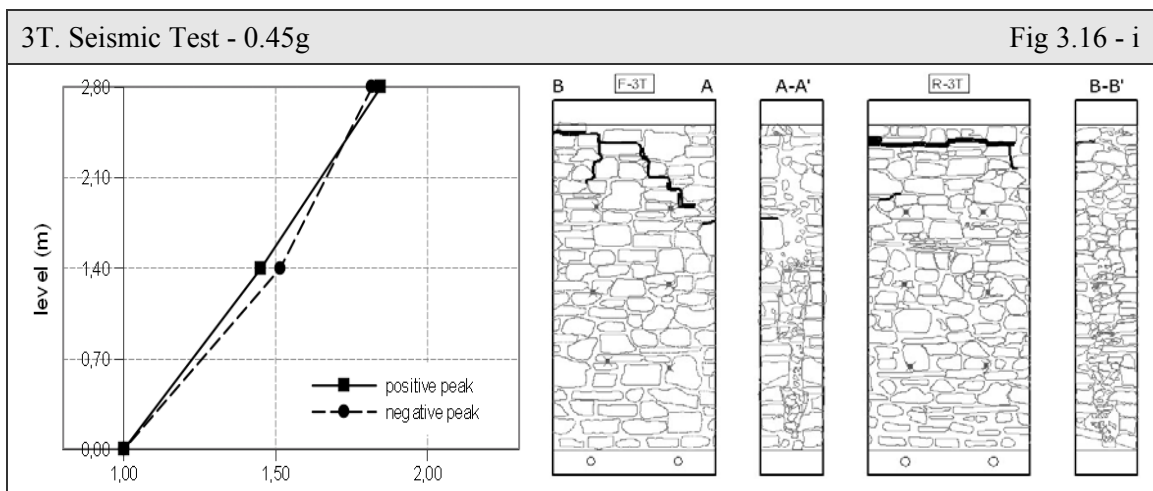
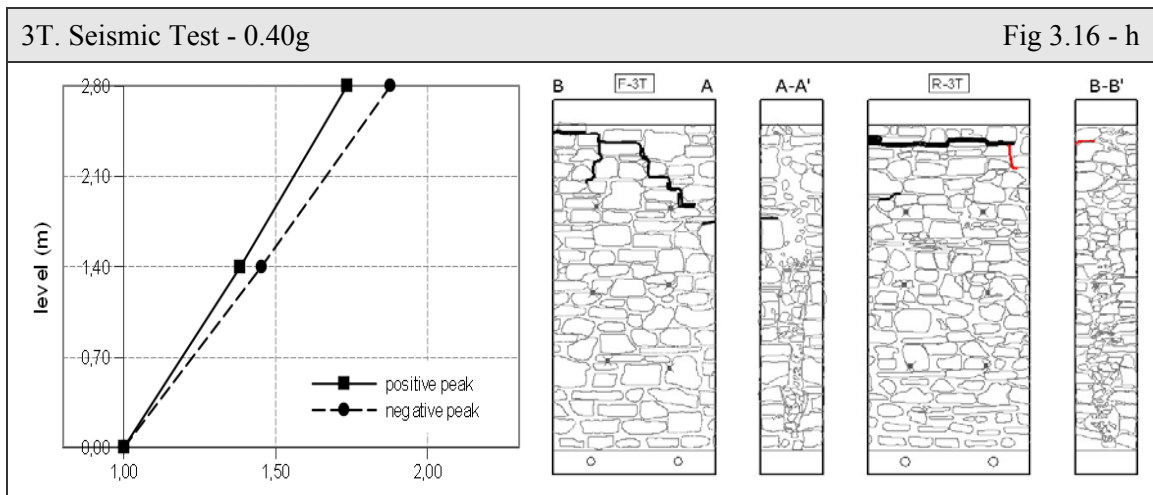
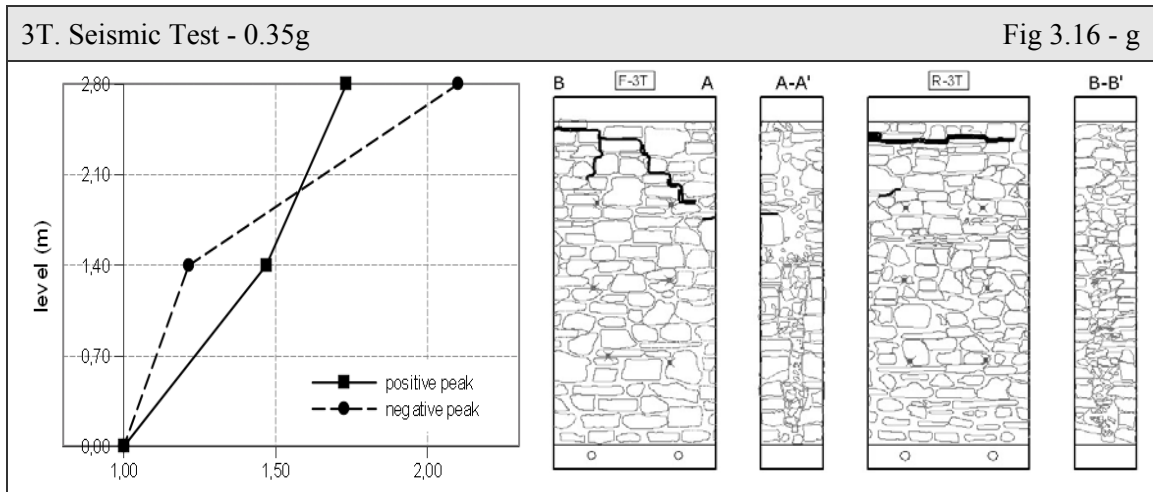
La prima fase di studio si concentra sul quadro fessurativo e sugli accelerometri. Quest'ultimi mostrano accelerazioni maggiori sul fronte, in particolare al raggiungimento di PGA superiori.

In Fig 3.16 si riporta lo sviluppo del danno evidenziando, ad ogni passo di prova: in rosso le fessure dovute a quel specifico PGA, e in nero quelle causate dai precedenti. Si affianca inoltre il grafico dei fattori di amplificazione delle accelerazioni. L'incremento è in genere positivo e crescente in relazione all'altezza della misura, fatta eccezione per alcuni casi. Ci si riferisce a quei passi di prova in cui si nota chiaramente il comportamento rigido ed uniforme della parte inferiore del pannello, interessata dall'iniezione di miscela (circa fino a 0.30g). La crescita è comunque inferiore al 1.6 in mezzeria e compresa tra 1.5 e 2.1 circa in sommità dei campioni.

All'incrementare dell'accelerazione al suolo, si osserva un chiaro sviluppo delle fessurazioni pre-prova, con aumento dell'apertura e propagazione delle stesse. Tutte le crepe sono perciò legate ai danni iniziali, i quali risultano essere la principale causa che ha indotto il collasso della parte sovrastante i tiranti (Fig 3.18, Fig 3.19 e Fig 3.20).







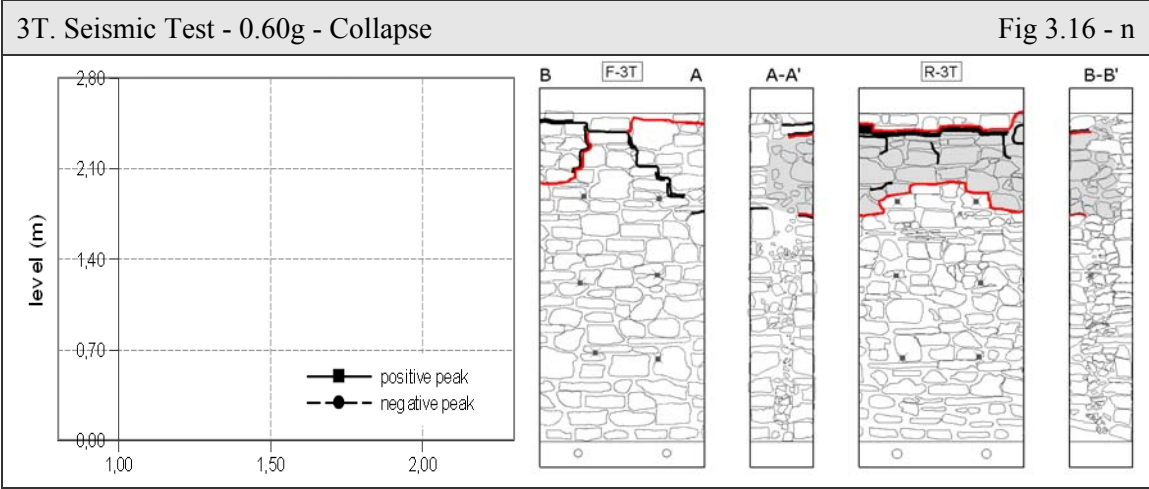
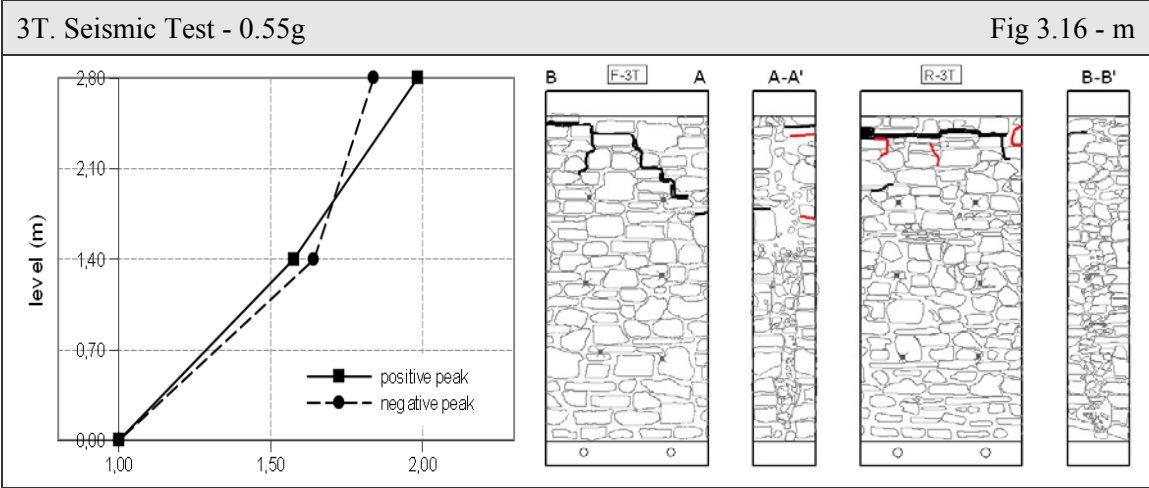
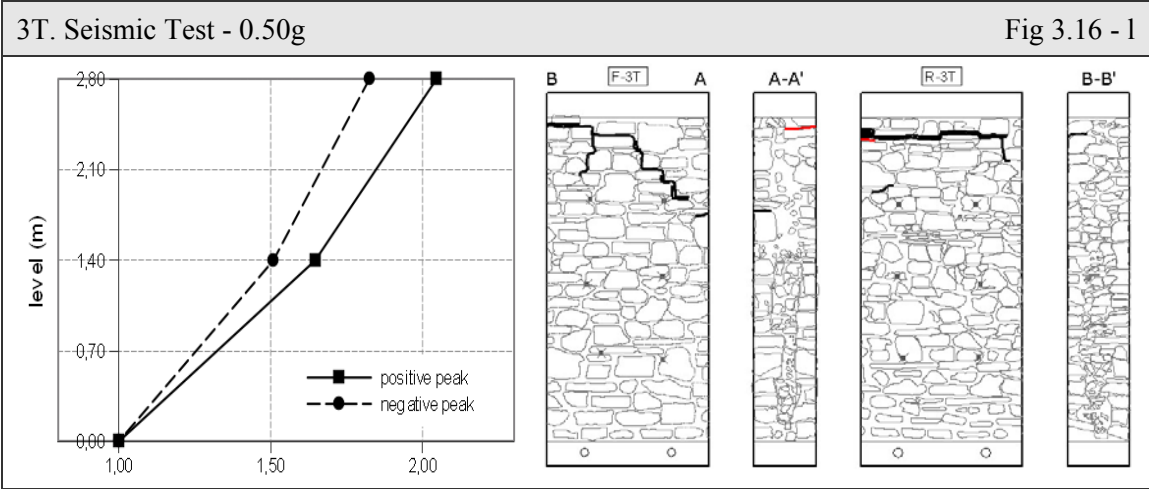


Fig 3.16: Pannello 3T. Analisi del quadro fessurativo e dell'azione sismica per ogni prova effettuata in laboratorio ENEA. A sinistra: grafico dei fattori di amplificazione.

In Fig 3.17 si riporta l'andamento dei fattori di amplificazione delle accelerazioni, durante l'intera prova, in modo da fare delle osservazioni riguardo al comportamento globale del pannello. Secondo il sistema di riferimento adottato, il picco positivo è quello che induce il retro al collasso fuori-piano.

In generale il comportamento dei due paramenti è simile. Durante l'intera prova, l'andamento dei fattori di amplificazione si differenzia solamente a metà altezza.. Fino a circa 0.30g, la parte sottostante (iniettata) si muove rigidamente insieme alla base, in seguito cresce fino a circa 1.5, avvicinandosi così all'amplificazione osservabile in sommità. L'accelerazione sempre elevata della parte sovrastante, è dovuta sia alle fessurazioni importanti presenti sin dall'inizio, che all'assenza di miscela e al naturale aumento dovuto all'altezza.

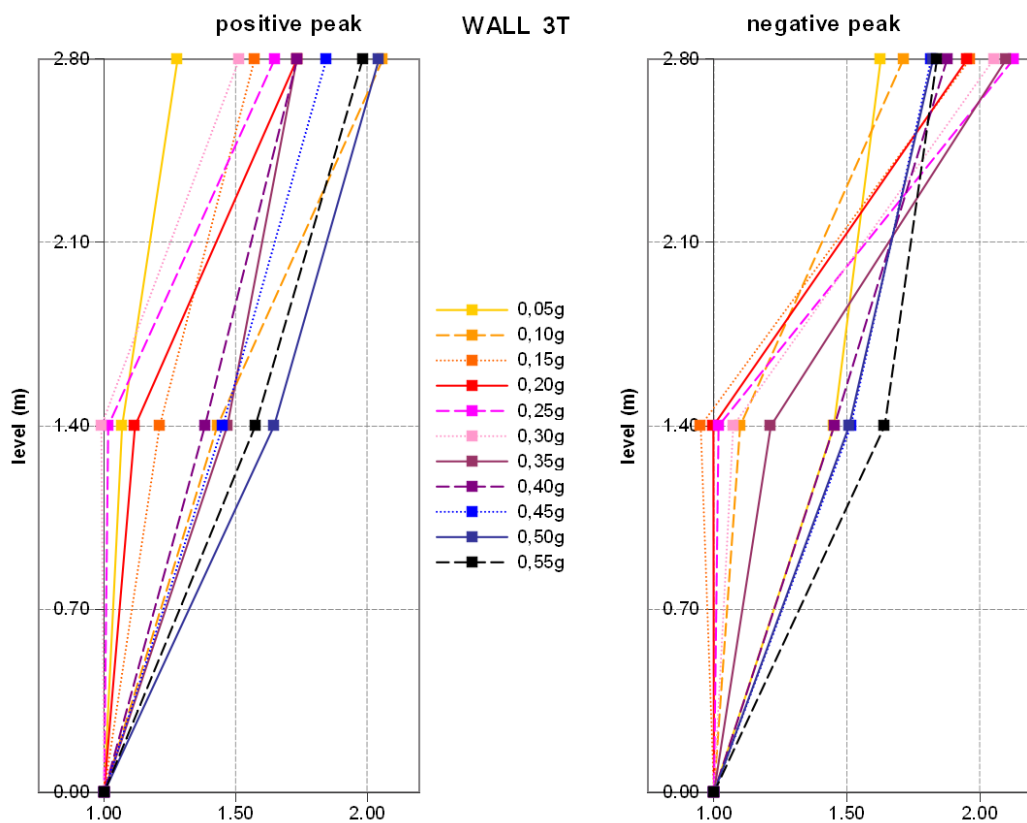


Fig 3.17: Pannello 3T. Fattori di amplificazione delle accelerazioni calcolati sulla base dei dati registrati dai sensori accelerometrici in laboratorio ENEA.



Fig 3.18: Pannello 3T. Rilievo fotografico del collasso, particolari del tirantino e del basamento.



Fig 3.19: Pannello 3T. Rilievo fotografico del collasso, 0.60g (fronte-sezione B-B'-retro).



Fig 3.20: Pannello 3T. Rilievo fotografico effettuato in seguito alla seconda prova a 0.60g.

Analisi degli spostamenti locali

Lo studio procede con l'analisi degli spostamenti riportati in Tab 3.6. In previsione del collasso i sensori in mezzeria erano stati rimossi, per tale ragione non si è a conoscenza dei dati effettivi riguardanti l'apertura finale. Con l'aiuto dei grafici in Fig 3.21 e Fig 3.22, è possibile fare delle osservazioni riguardo al comportamento globale.

Tab 3.6: Pannello 3T. Spostamenti ultimi, assoluti e relativi, registrati dai sensori analogici in mezzeria e in sommità durante ogni singola prova. Valori in mm.

Wall 3T	Absolute Data			Average	Relative Data		
Step [g]	P3 middle dx	P4 middle sx	P5 top	middle sensors	P3 middle dx	P4 middle sx	P5 top
0.05g	0.02	-0.02	-0.01	0.00	0.02	-0.02	-0.01
0.10g	0.05	-0.03	0.02	0.01	0.04	-0.01	0.03
0.15g	0.06	0.01	0.02	0.03	0.01	0.04	0.00
0.20g	0.07	0.01	0.12	0.04	0.01	0.01	0.10
0.25g	0.08	0.01	0.39	0.04	0.01	-0.01	0.26
0.30g	0.09	-0.02	0.59	0.03	0.01	-0.03	0.20
0.35g	0.05	0.00	0.79	0.02	-0.04	0.02	0.20
0.40g	0.03	-0.01	0.99	0.01	-0.02	-0.01	0.20
0.45g	0.08	0.01	1.36	0.04	0.05	0.02	0.37
0.50g	0.07	0.02	1.71	0.04	-0.01	0.01	0.35
0.55g	0.07	0.01	1.68	0.04	0.01	0.00	-0.03
0.60g	-	-	1.92	-	-	-	0.24

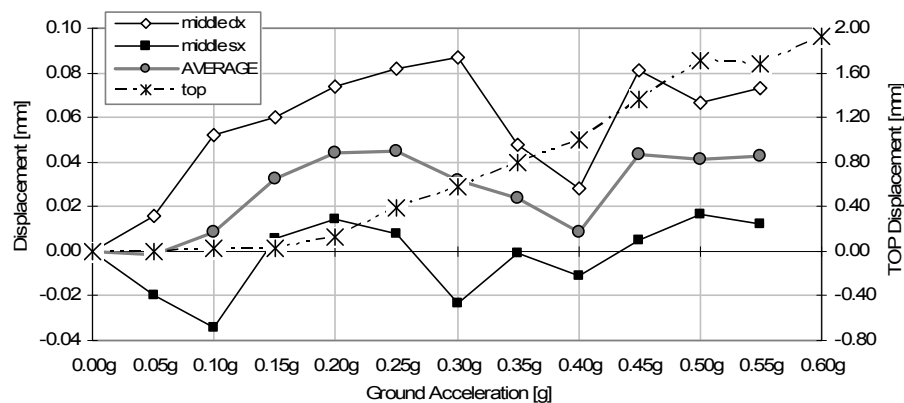


Fig 3.21: Pannello 3T. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e correlati con il PGA, ad ogni prova di laboratorio.

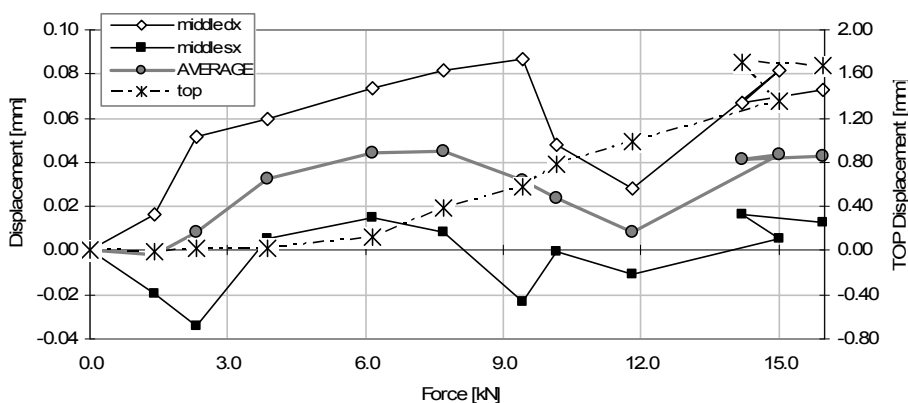


Fig 3.22: Pannello 3T. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con la forza agente, ad ogni prova di laboratorio.

Dai grafici in Fig 3.21 e Fig 3.22 si osserva un incremento graduale dello spostamento in sommità nel verso positivo. Si presenta quindi un abbassamento progressivo del pannello avvenuto nel corso della prova fino ad un massimo, al momento del collasso, di 1.92 mm, preceduto da un tratto stabile a circa 1.70 mm.

Esaminando invece l'andamento rilevato in mezzeria, in Fig 3.23, si nota che la compagine muraria si muove in modo uniforme con movimenti dell'ordine di 10^{-2} mm. In media si osserva un aumento dello spostamento, che indica la tendenza alla separazione tra i paramenti, con un picco a 0.25g di mm 0.04. In seguito l'andamento è negativo, di compressione (trend decrescente), fino ad un minimo di 0.01 mm a 0.40g, corrispondente ad una forza agente di circa 12 kN. L'apertura ultima, di collasso, tra i paramenti risulta in media di mm 0.04.

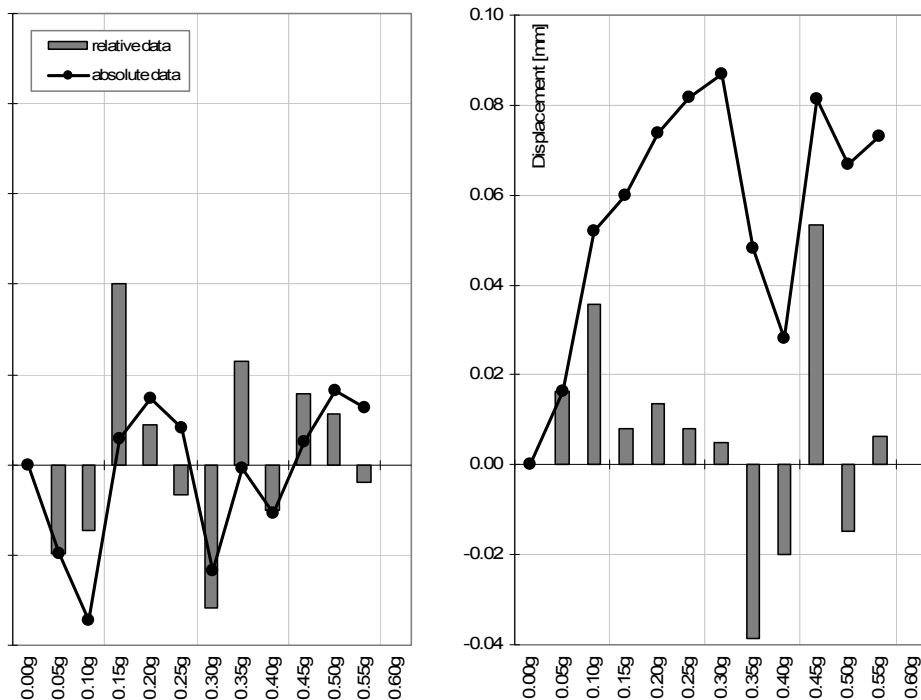


Fig 3.23: Pannello 3T. Confronto tra gli spostamenti ultimi assoluti e relativi, registrati in mezzeria dai sensori analogici. Da sinistra: spostamenti del sensore P4 (di sinistra) e del sensore P3 (di destra).

Analisi delle deformazioni nei tirantini

I sensori in fibra ottica (Fiber Bragg Grating, FBG) rilevano le deformazioni presenti sui tirantini antiespulsivi posizionati in mezzzeria durante l'input sismico. Questi dati sono raccolti in Tab 3.7, nella quale viene fornita anche una media dei valori assoluti e una stima di quelli relativi.

L'andamento (Fig 3.24) mostra una risposta dei sensori proporzionale al livello di eccitazione, con incremento significativo e graduale della deformazione sul tirante destro Ch2. Ne consegue che le barre effettivamente entrano in azione, seppur poco. L'altro sensore invece rileva misure molto inferiori ma, essendo un dato puntuale, possono essere dovute a flessione del tirantino o ad adattamento sulla superficie esterna.

Tab 3.7: Pannello 3T. Deformazioni assolute e relative, registrate dai sensori FBG nei tiranti, durante ogni singola prova. Il valor medio è calcolato tra i dati assoluti.

Wall 3T	Strain $\Delta\epsilon$ [μ Strain]				
	Absolute Data		Average	Relative Data	
Step [g]	Ch1 sx	Ch2 dx		Ch1 sx	Ch2 dx
0.05g	0.060	0.002	0.031	0.060	0.002
0.10g	0.089	1.151	0.620	0.029	1.149
0.15g	0.681	2.640	1.661	0.593	1.489
0.20g	2.460	5.268	3.864	1.779	2.628
0.25g	4.383	9.723	7.053	1.923	4.455
0.30g	4.797	16.745	10.771	0.414	7.022
0.35g	3.922	30.769	17.346	-0.875	14.024
0.40g	3.177	32.958	18.068	-0.745	2.189
0.45g	5.845	43.896	24.871	2.668	10.938
0.50g	5.477	62.884	34.180	-0.369	18.988
0.55g	-9.657	88.526	39.434	-15.134	25.642
0.60g	-7.116	80.135	36.510	2.542	-8.390

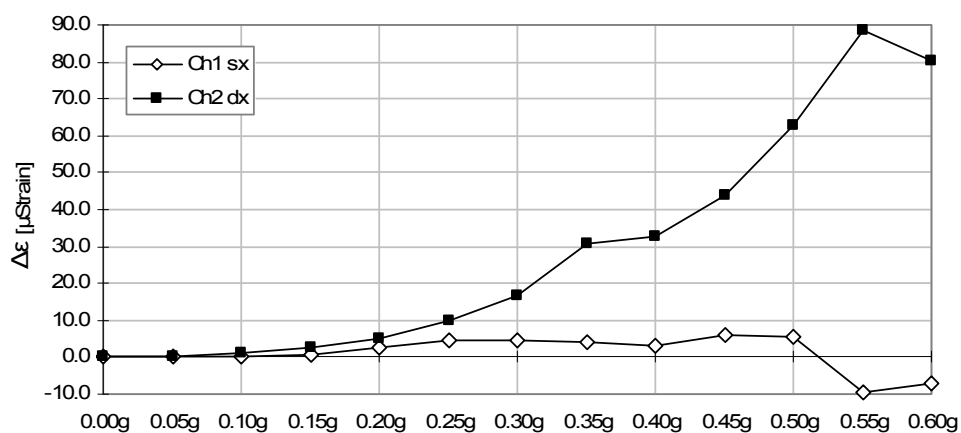


Fig 3.24: Pannello 3T. Deformazioni assolute registrate nei tirantini antiespulsivi in mezzzeria dai sensori FBG, ad ogni prova di laboratorio.

Relazionando $\Delta\varepsilon$ con il modulo elastico E dell'acciaio, è stato possibile calcolare la tensione agente (Tab 3.8Tab 3.28). La tendenza è affine a quella presentata per le deformazioni. In entrambi i casi il picco è a 0.55g, raggiungendo una deformazione massima di circa 88 μ Strain corrispondente ad una tensione di circa 18 MPa, per poi rilassarsi a seguito del collasso a 0.60g.

Tab 3.8: Pannello 3T. Tensioni assolute e relative, registrate dai sensori FBG nei tiranti, durante ogni singola prova. Il valor medio è calcolato tra i dati assoluti.

Wall 3T	Stress $\Delta\sigma$ [MPa]				
	Absolute Data		Average	Relative Data	
Step [g]	Ch1 sx	Ch2 dx		Ch1 sx	Ch2 dx
0.05g	0.013	0.001	0.007	0.013	0.001
0.10g	0.019	0.242	0.130	0.006	0.241
0.15g	0.143	0.554	0.349	0.124	0.313
0.20g	0.517	1.106	0.811	0.374	0.552
0.25g	0.920	2.042	1.481	0.404	0.936
0.30g	1.007	3.516	2.262	0.087	1.475
0.35g	0.824	6.462	3.643	-0.184	2.945
0.40g	0.667	6.921	3.794	-0.156	0.460
0.45g	1.228	9.218	5.223	0.560	2.297
0.50g	1.150	13.206	7.178	-0.077	3.987
0.55g	-2.028	18.590	8.281	-3.178	5.385
0.60g	-1.494	16.828	7.667	0.534	-1.762

3.2.2. Wall 4T

Come è avvenuto nel pannello 3T, anche in 4T si sono verificate permeazioni di miscela durante le iniezioni. L'area interessata occupa completamente la porzione inferiore del campione, com'è chiaramente segnalato in Fig 3.26 con l'uso di un retino a tratteggio grigio. Sul rilievo geometrico è stato inoltre indicato: la posizione dei sensori (accelerometri in rosso, analogici in verde, marker in nero e FBG cerchiati) e dei tiranti (quadrati grigi). Si evidenzia anche il quadro fessurativo presente prima delle prove, il quale interessa principalmente il retro.

In Tab 3.9 si nota che l'accelerazione reale al suolo è inferiore del 25% rispetto la nominale e si riferisce ai valori del picco positivo, calcolati con le misure dei sensori alla base (A1 e A4). Tali trasduttori erano però stati rimossi prima della prova a 0.40g in previsione del collasso avvenuto a 0.45g (0.34g effettivi). Per tale ragione, i dati a 0.40g sono stati stimati con i dispositivi sul basamento (A10 e A11), i quali avevano entrambi verso negativo.

Osservando gli indici di dispersione nel calcolo del PGA effettivo (la deviazione standard σ e il coefficiente di variazione CV) si accerta una buona precisione, in media corrispondente al 10% della stima effettuata.

Tab 3.9: Pannello 4T. Accelerazione al suolo nominale e reale, frequenza di acquisizione, deviazione standard e coefficiente di variazione, forza agente.

Peak Ground Acceleration Nominal	Acceleration Real [g]	Frequency [Hz]	Standard Deviation [g]	Coeff. of Variation	Force [kN]
0.05g	0.036	200	0.004	9.87 %	1.49
0.10g	0.057	200	0.005	8.59 %	2.39
0.15g	0.096	200	0.009	9.15 %	4.00
0.20g	0.145	200	0.014	9.62 %	6.09
0.25g	0.212	200	0.021	9.99 %	8.87
0.30g	0.247	200	0.026	10.54 %	10.36
0.35g	0.304	200	0.037	12.23 %	12.73
0.40g	0.304	200	0.008	2.65 %	12.75
0.45g	Collapse	200	-	-	-



Fig 3.25: Pannello 4T. Rilievo fotografico dello spostamento relativo avvenuto sul retro a 0.40g.

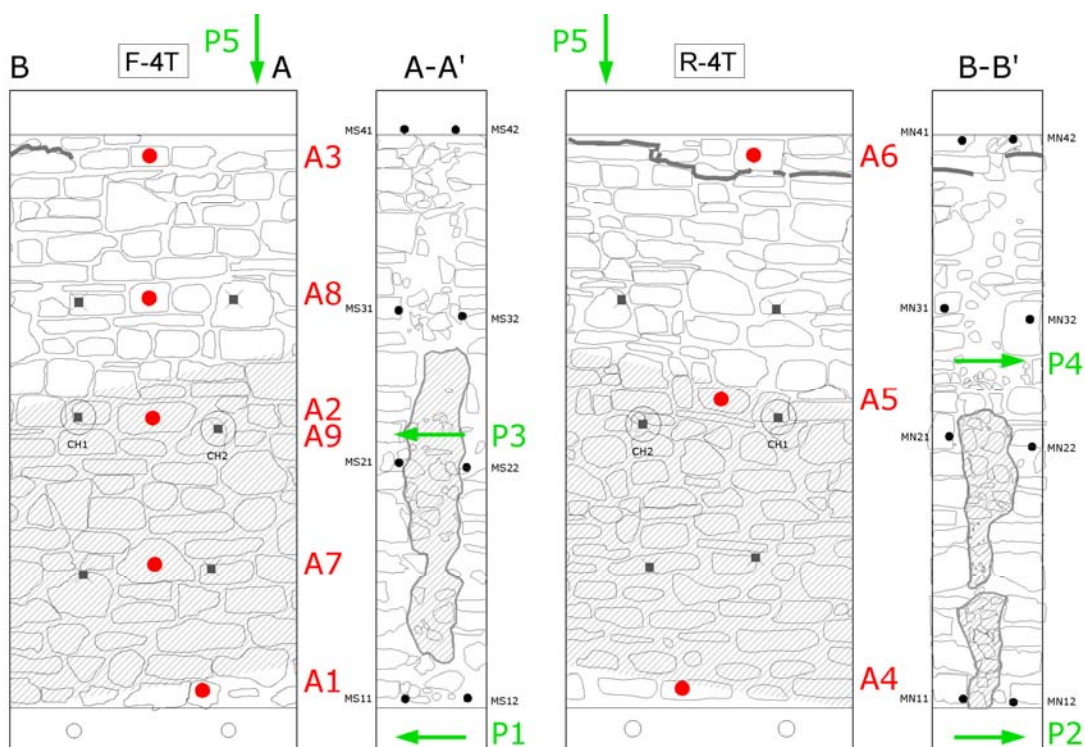


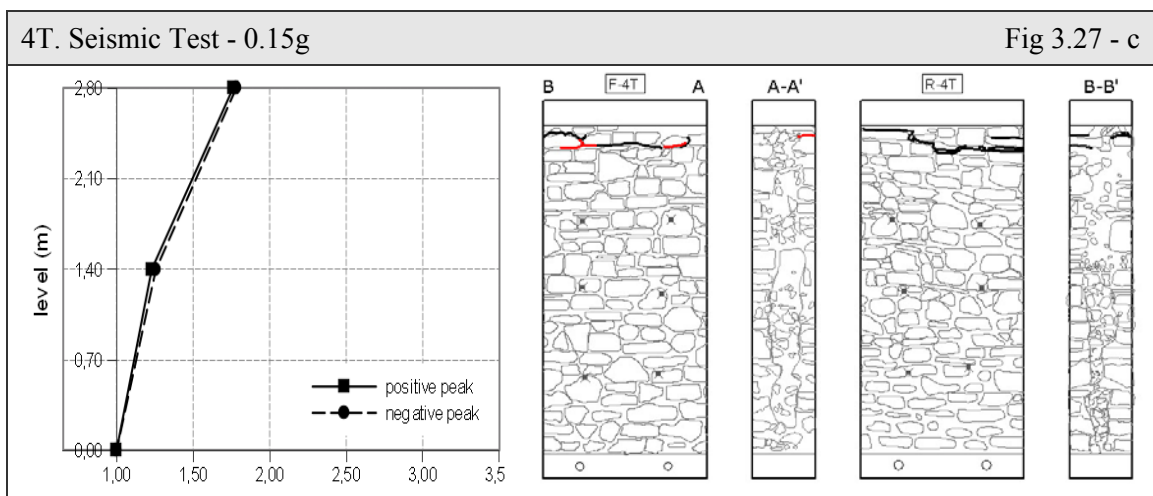
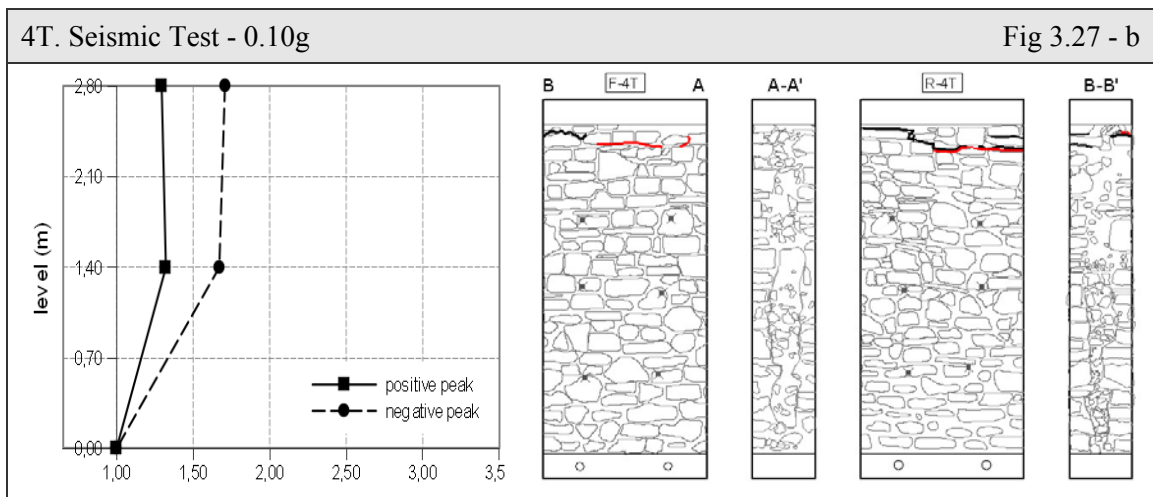
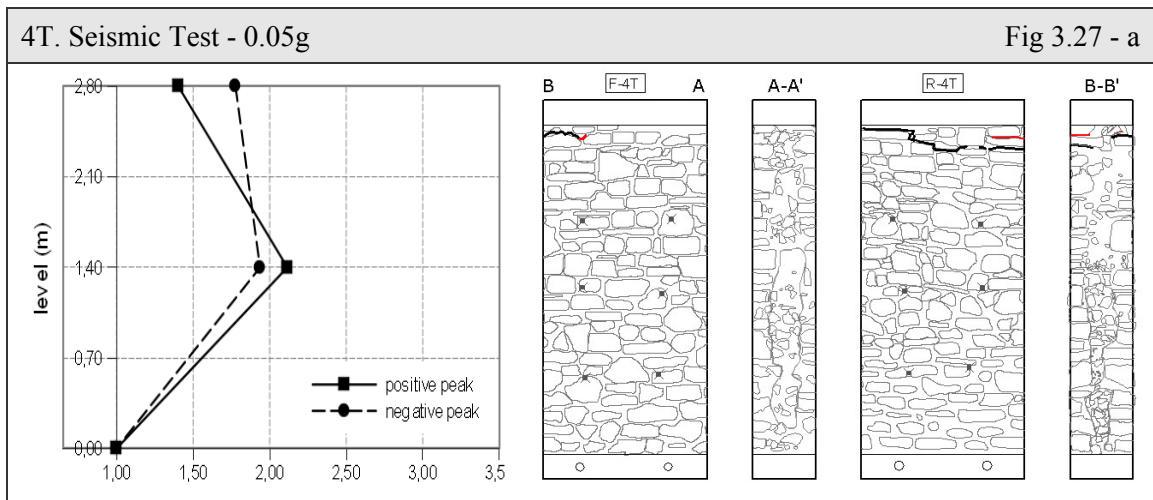
Fig 3.26: Pannello 4T. Rilievo geometrico con indicazione della posizione e della nomenclatura dei sensori e del quadro fessurativo pre-prova.

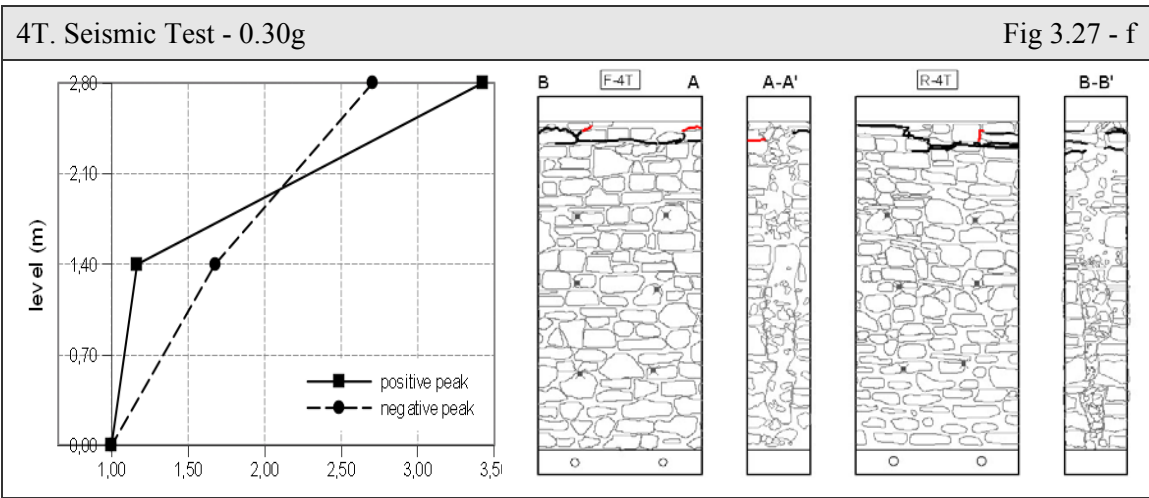
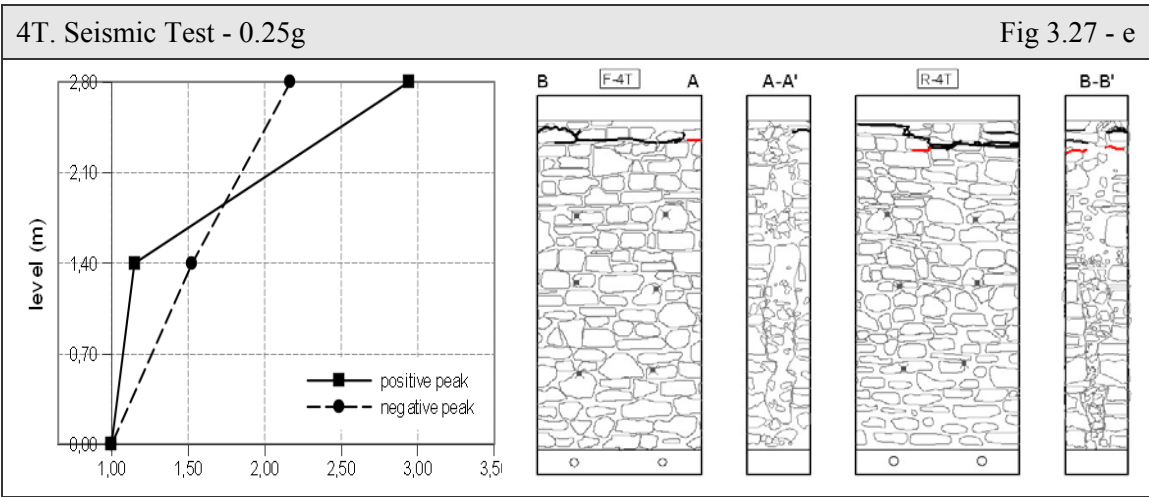
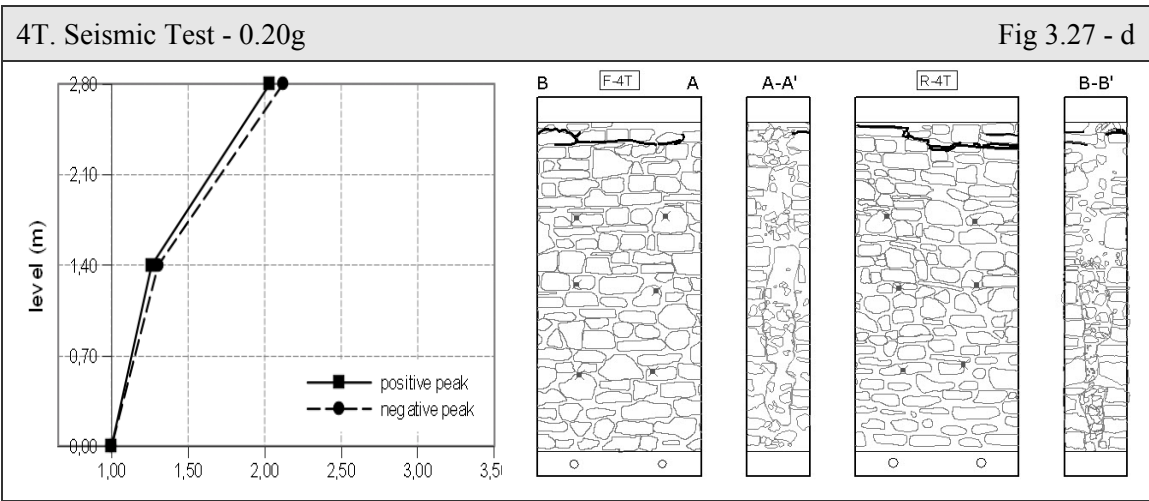
Analisi del Quadro Fessurativo e dei Fattori di Amplificazione

Dallo studio del quadro fessurativo (Fig 3.16) si evidenziano notevoli lesioni durante i passi di prova a 0.10g e 0.15g, con apertura e propagazione delle incrinature create durante la movimentazione del pannello. In tali occasioni, i sensori A3 e A6 registrano accelerazioni elevate su entrambi i paramenti in direzione positiva, rispetto al sistema di riferimento adottato. Ulteriori diramazioni delle crepe in sommità, avvengono a partire da 0.25g, con maggior rilevanza a 0.40g quando l'input sismico comporta lo spostamento relativo tra le due parti già disgiunte (Fig 3.25).

La diversa rigidità tra la metà inferiore iniettata e quella superiore (più fragile), ha portato ad uno sviluppo del danno concentrato nella parte superiore. Il collasso è infatti avvenuto su quest'area, interessando entrambi i paramenti nella zona sovrastante ai tiranti, come visibile in Fig 3.29.

In seguito si riportano i grafici dei fattori di amplificazione delle accelerazioni (Fig 3.16), affiancati al quadro fessurativo rilevato al passo di prova in corso. Come per i muri già analizzati, vengono indicate in rosso le fessurazioni presentate al PGA in esame, e in nero quelle riferite ai precedenti. I fattori di amplificazione delle accelerazioni risultano in generale crescenti in modo direttamente proporzionale all'altezza. L'incremento è compreso tra 1.0 e 2.0 in mezzeria e molto elevato, con un escursione compresa tra 1.5 e 3.5, in sommità dei pannelli. Il forte aumento dell'accelerazione nella parte superiore si manifesta a partire da 0.25g fino a collasso, in concomitanza con lo sviluppo del danno.





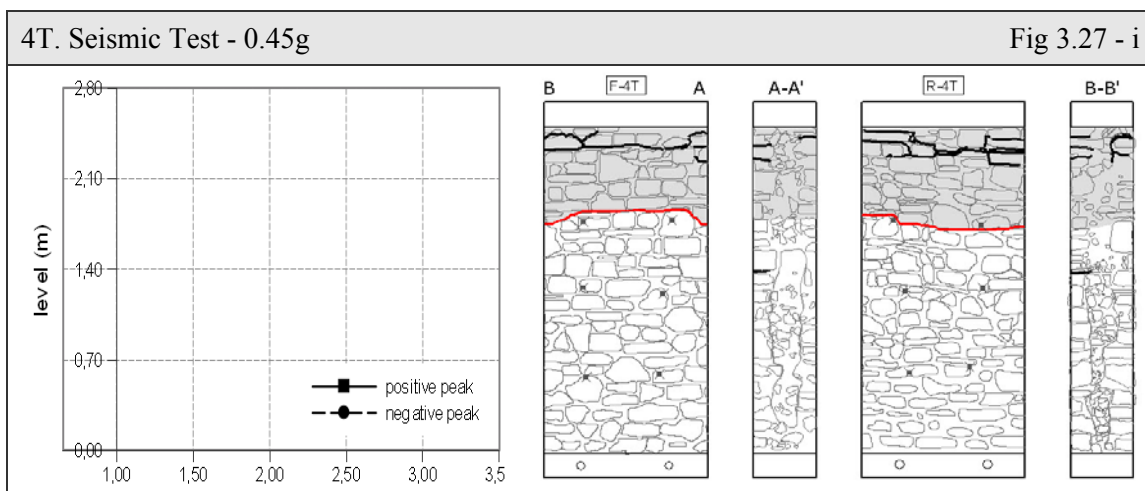
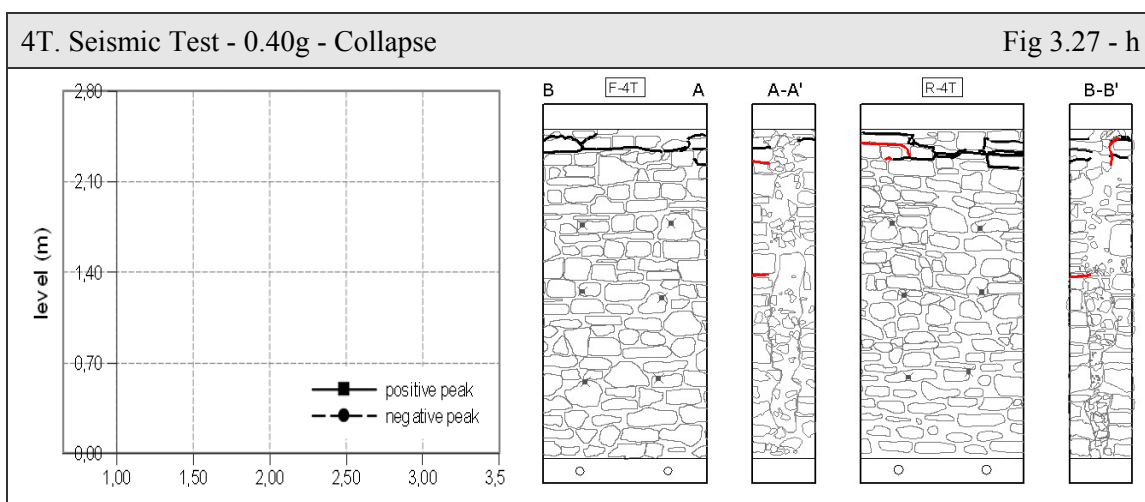
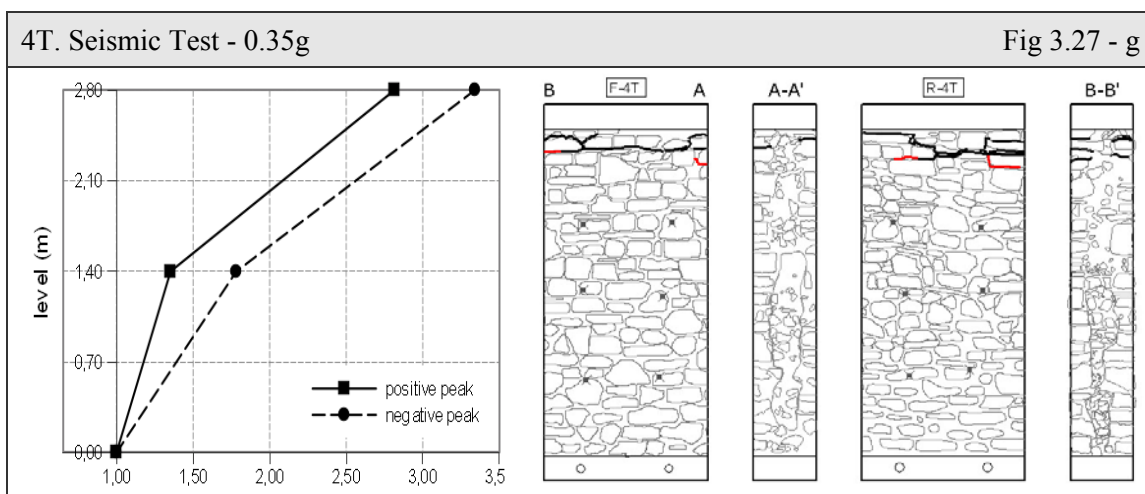


Fig 3.27: Pannello 4T. Analisi del quadro fessurativo e dell'azione sismica per ogni prova effettuata in laboratorio ENEA. A sinistra: grafico dei fattori di amplificazione.

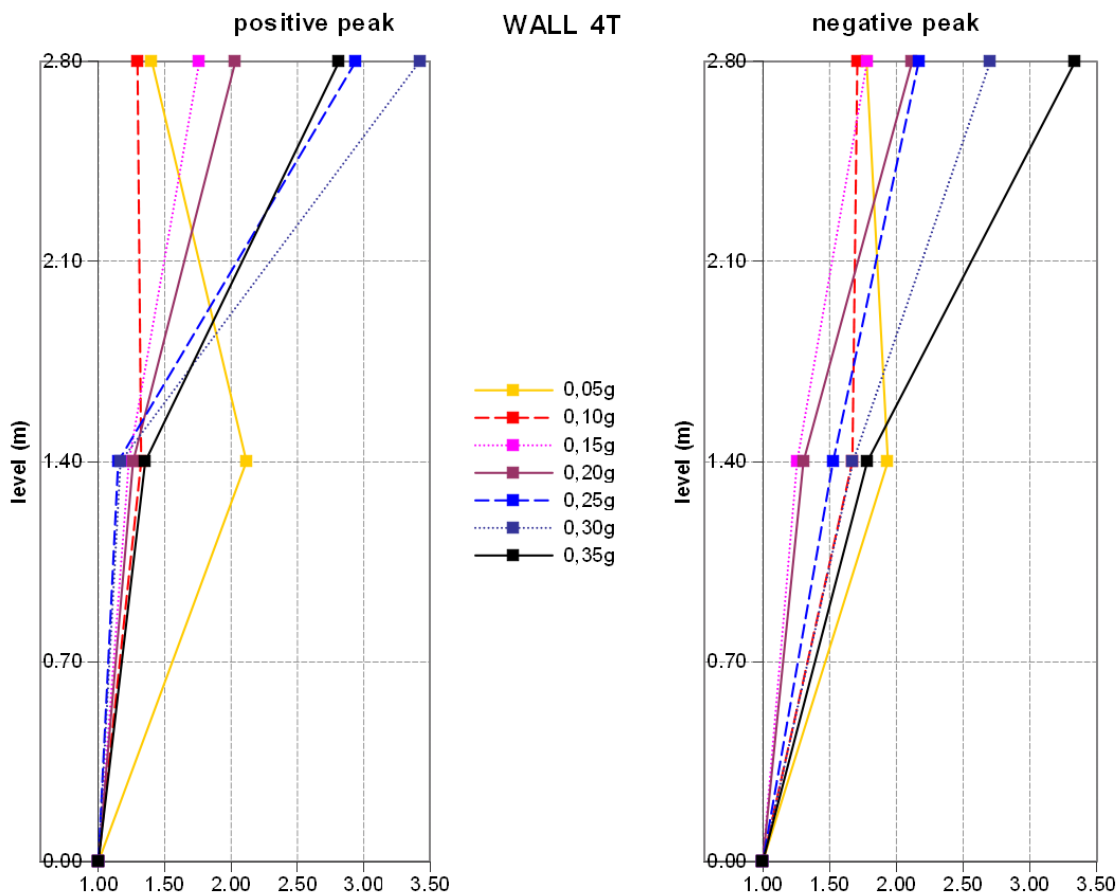


Fig 3.28: Pannello 4T. Fattori di amplificazione delle accelerazioni calcolati sulla base dei dati registrati dai sensori accelerometrici in laboratorio ENEA.



Fig 3.29: Pannello 4T. Rilievo fotografico del collasso, 0.45g (fronte e retro).

Confrontando l'andamento globale dei fattori di amplificazione delle accelerazioni in un unico grafico (Fig 3.28) si osserva che, durante l'eccitazione sismica, i due paramenti sono in fase. All'aumentare dell'intensità alla base, l'amplificazione interessa principalmente la sommità, soprattutto a valori maggiori di PGA. Un inversione del comportamento tra mezzeria e parte superiore si rileva a partire da 0.15g. La porzione iniettata, com'è visibile dalle misure in mezzeria, assume accelerazioni molto inferiori. Per una maggior chiarezza, si ricorda che, secondo il sistema di riferimento adottato, il picco positivo è quello che induce il retro al collasso fuori-piano.

Analisi degli spostamenti locali

Gli spostamenti rilevati dai sensori analogici sono riassunti in Tab 3.10, valutando sia i dati assoluti che relativi della parte mediana e superiore del campione. La modalità di collasso non ha permesso di ottenere letture significative nell'estensimetro in sommità (P5).

Tab 3.10: Pannello 4T. Spostamenti ultimi, assoluti e relativi, registrati dai sensori analogici in mezzeria e in sommità durante ogni singola prova. Valori in mm.

Wall 4T Step [g]	Absolute Data			Average	Relative Data		
	P3 middle dx	P4 middle sx	P5 top	middle sensors	P3 middle dx	P4 middle sx	P5 top
0.05g	-0.01	-0.09	-0.04	-0.05	-0.01	-0.09	-0.04
0.10g	0.10	-0.26	-0.07	-0.08	0.11	-0.17	-0.03
0.15g	0.09	-0.30	-0.08	-0.10	-0.01	-0.05	-0.01
0.20g	-0.03	-0.23	0.04	-0.13	-0.13	0.07	0.12
0.25g	0.01	-0.25	0.24	-0.12	0.05	-0.01	0.20
0.30g	-0.13	-0.20	0.64	-0.16	-0.14	0.05	0.40
0.35g	0.10	-0.05	1.35	0.02	0.23	0.14	0.70
0.40g	0.27	-0.03	-0.43	0.12	0.17	0.03	-1.77
0.45g	0.27	-0.03	-	0.12	0.00	0.00	-

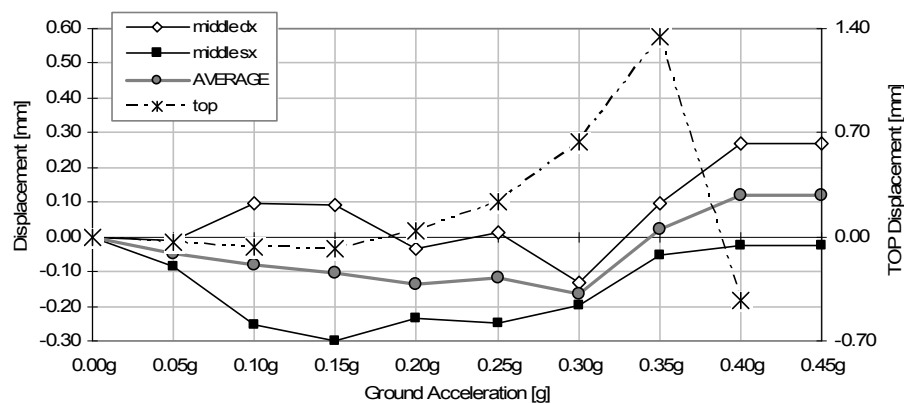


Fig 3.30: Pannello 4T. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con il PGA, ad ogni prova di laboratorio.

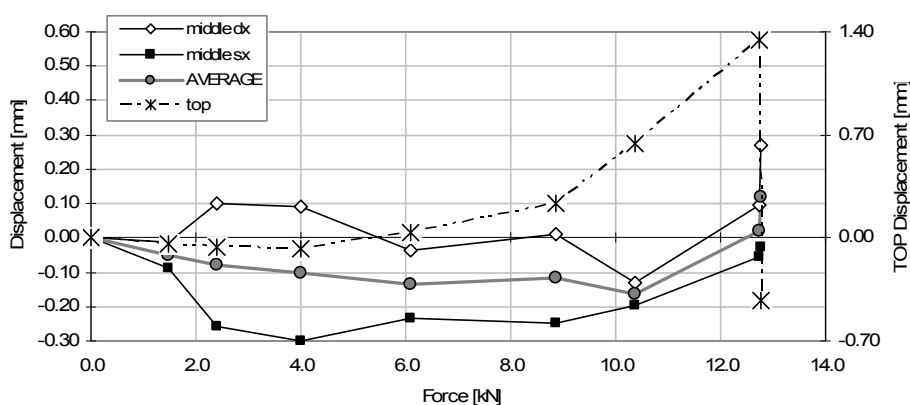


Fig 3.31: Pannello 4T. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con la forza agente, ad ogni prova di laboratorio.

Osservando l'andamento verticale del campione durante l'intera prova (Fig 3.30 e Fig 3.31) si nota che l'abbassamento inizia ad essere significativo in corrispondenza di un PGA di 0.25g, per poi aumentare sino al picco di 1.35 mm a 0.35g (12.73 kN). Riferendosi invece ai movimenti tra i paramenti (Fig 3.32) si osserva un andamento opposto tra sensore destro e sinistro, con un valor medio negativo che indica la tendenza alla compressione e quindi al buon ammassamento tra gli strati, particolarmente chiaro sulla sezione B-B' (P4). Gli spostamenti sono dell'ordine di 10^{-1} mm con un massimo (in media) a 0.12 mm, il quale si presenta costante sia a 0.40g che a 0.45g. L'omogeneità nel comportamento sembra essere causata dall'iniezione fluita in parte anche all'interno di questo pannello.

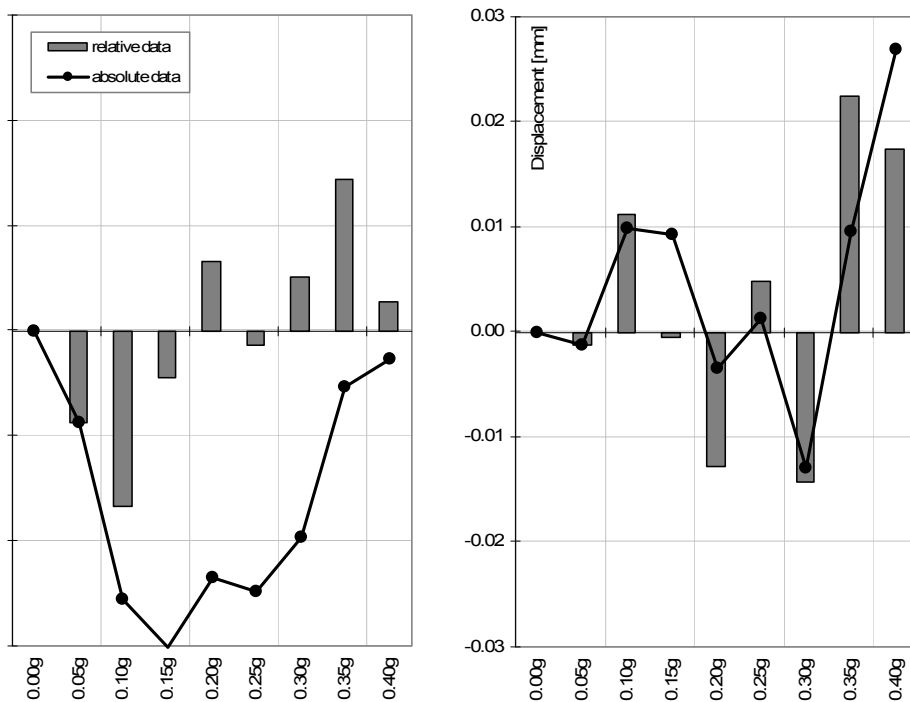


Fig 3.32: Pannello 4T. Confronto tra gli spostamenti ultimi assoluti e relativi, registrati in mezzeria dai sensori analogici. Da sinistra: spostamenti del sensore P4 (di sinistra) e del sensore P3 (di destra).

Analisi delle deformazioni nei tirantini

Le deformazioni agenti sui tirantini antiespulsivi durante le diverse prove sono riassunte in Tab 3.11. La risposta è stata pressoché nulla, dell'ordine di 10^{-1} μStrain , fatta eccezione per un ampio segnale nel corso dell'ultima prova a 0.45g. Nel grafico in Fig 3.33, tale dato è stato inserito fuori scala indicando numericamente il valore reale, questo ha permesso una visualizzazione migliore della risposta nella prima parte. Il leggero decremento iniziale può essere legato ad un assestamento del sistema dado-rondella sulla superficie esterna del muro caratterizzata da elevata scabrosità.

Relazionando $\Delta\epsilon$ con il modulo elastico E dell'acciaio, è stato possibile calcolare la tensione agente (Tab 3.12). L'andamento segue quello visto per le deformazioni, il picco negativo all'ultimo passo di prova in questo caso indica un forte rilassamento della barra.

Tab 3.11: Pannello 4T. Deformazioni assolute e relative, registrate dai sensori FBG nei tiranti, durante ogni singola prova. Il valor medio è calcolato tra i dati assoluti.

Wall 4T	Strain $\Delta\epsilon$ [μStrain]				
	Absolute Data		Average	Relative Data	
Step [g]	Ch1 sx	Ch2 dx		Ch1 sx	Ch2 dx
0.05g	0.016	0.026	0.021	0.016	0.026
0.10g	-0.390	-0.271	-0.330	-0.406	-0.297
0.15g	-0.634	-0.465	-0.549	-0.244	-0.194
0.20g	-0.693	-0.501	-0.597	-0.059	-0.036
0.25g	-0.744	-0.760	-0.752	-0.051	-0.259
0.30g	-0.750	-0.712	-0.731	-0.006	0.048
0.35g	-0.819	-0.725	-0.772	-0.069	-0.013
0.40g	-0.808	-0.926	-0.867	0.011	-0.201
0.45g	-154.827	-308.757	-231.792	-154.018	-307.830

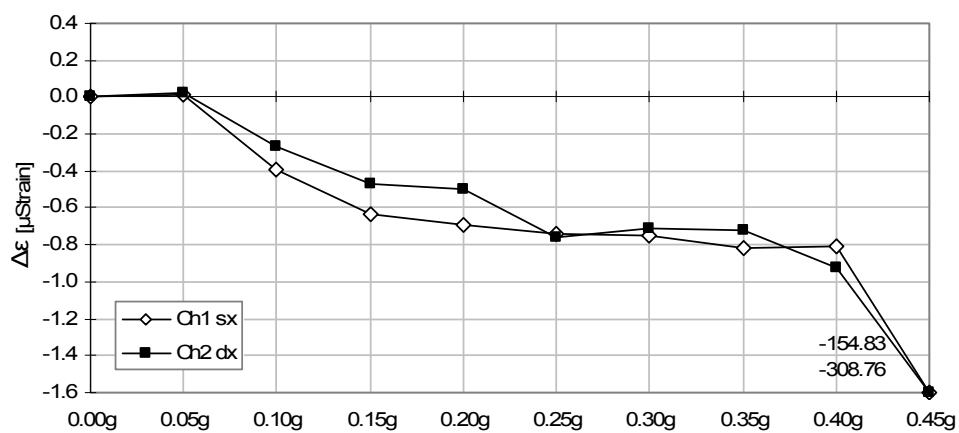


Fig 3.33: Pannello 4T. Deformazioni assolute registrate nei tirantini antiespulsivi in mezzeria dai sensori FBG, ad ogni prova di laboratorio.

Tab 3.12: Pannello 4T. Tensioni assolute e relative, registrate dai sensori FBG nei tiranti, durante ogni singola prova. Il valor medio è calcolato tra i dati assoluti.

Wall 4T	Stress $\Delta\sigma$ [MPa]				
	Absolute Data		Average	Relative Data	
Step [g]	Ch1 sx	Ch2 dx		Ch1 sx	Ch2 dx
0.05g	0.003	0.006	0.004	0.003	0.006
0.10g	-0.082	-0.057	-0.069	-0.085	-0.062
0.15g	-0.133	-0.098	-0.115	-0.051	-0.041
0.20g	-0.146	-0.105	-0.125	-0.012	-0.008
0.25g	-0.156	-0.160	-0.158	-0.011	-0.054
0.30g	-0.158	-0.149	-0.153	-0.001	0.010
0.35g	-0.172	-0.152	-0.162	-0.014	-0.003
0.40g	-0.170	-0.194	-0.182	0.002	-0.042
0.45g	-32.514	-64.839	-48.676	-32.344	-64.644

3.2.3. Osservazioni

I due modelli rinforzati con l'applicazione di tirantini antiespulsivi nella sezione, hanno subito la permeazione di miscela d'iniezione nella parte inferiore del nucleo. Il campione murario 4T risulta pertanto completamente iniettato nella metà inferiore del pannello. Il collasso avviene in entrambi i casi in sommità, nell'area sovrastante i tiranti, coinvolgendo entrambe i paramenti. Diverso è invece il PGA in cui avviene il crollo: 0.60g e 0.45g rispettivamente in 3T e 4T. L'input sismico effettivo viene stimato, con una precisione del 10% (CV), rispettivamente inferiore al 30% e al 25%. I fattori di amplificazione delle accelerazioni, considerati agli stessi passi di prova, hanno il medesimo comportamento, con incremento molto ridotto in mezzera ed elevato in sommità.

Lo spostamento orizzontale rilevato a metà altezza indica che il rinforzo mirato all'aumento di collegamento tra i paramenti è ben riuscito. In 3T l'apertura misurata non è significativa – dell'ordine di 10^{-2} mm con un massimo di 0.04 mm rilevato a collasso avvenuto – mentre in 4T assume valori negativi di compressione (10^{-1} mm) per concludere la sperimentazione con un apertura di 0.12 mm (a 0.40g e 12.75 kN).

Gli abbassamenti verticali invece sono più rilevanti. Il picco raggiunge 1.92 mm in 3T al momento del collasso e 1.35 mm in 4T (a 0.35g e 12.73 kN).

Le deformazioni nei tiranti sono osservabili particolarmente in un sensore del pannello 3T, gli altri dispositivi mostrano segnali molto limitati a causa di danneggiamento in fase di installazione o di rilassamento delle barre dovute ad adattamento sulla superficie esterna. L'incremento graduale in 3T raggiunge un massimo di circa 88.5 μ Strain a 0.55g, corrispondenti ad una tensione di circa 18.6 MPa.

3.3. Pannelli rinforzati con iniezione

Lo studio dei campioni rinforzati (Strengthened Masonry, SM) prosegue con l'analisi dell'intervento di iniezione di miscela a base di calce idraulica naturale. Le caratteristiche di ciascun pannello, sono già state esaminate al paragrafo § 2.1.3. Gli accelerometri sono posizionati lungo l'asse verticale, come in Fig 3.34. In questo caso però, non essendo previste le barre metalliche trasversali, non sono stati installati i trasduttori FBG.

3.3.1. Wall 5I

Sul rilievo geometrico in Fig 3.34, oltre al posizionamento dei sensori (accelerometri in rosso, analogici in verde e marker in nero), è chiaramente indicata l'area iniettata con un retino a tratteggio grigio. Da programma sperimentale, i vuoti presenti nel nucleo dovevano essere completamente riempiti con la miscela. Questo però non è avvenuto e si presentano ancora delle disomogeneità localizzate in sommità. In quest'area si concentrano le fessurazioni sin dalle movimentazioni pre-prova.

Tab 3.13: Pannello 5I. Accelerazione al suolo nominale e reale, frequenza di acquisizione, deviazione standard e coefficiente di variazione, forza agente.

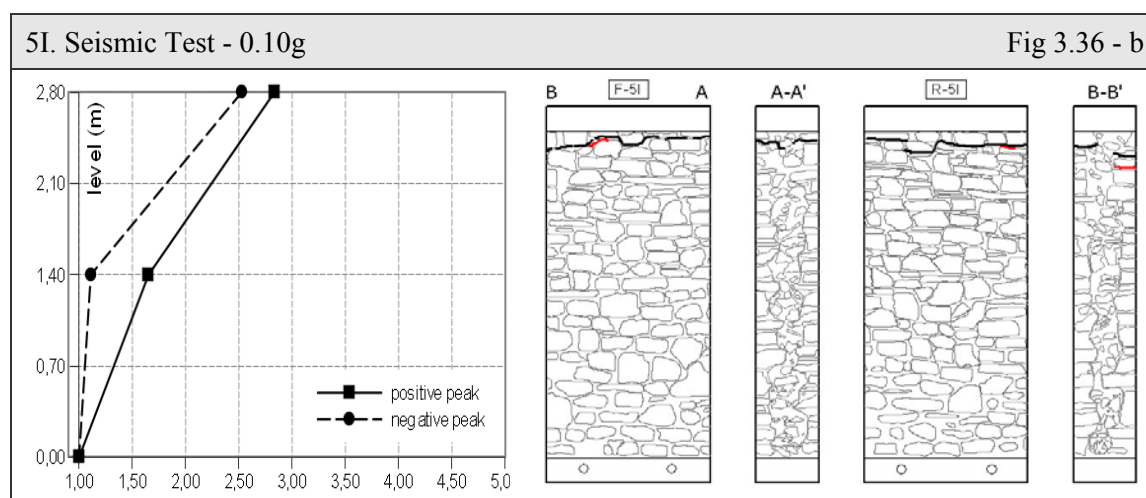
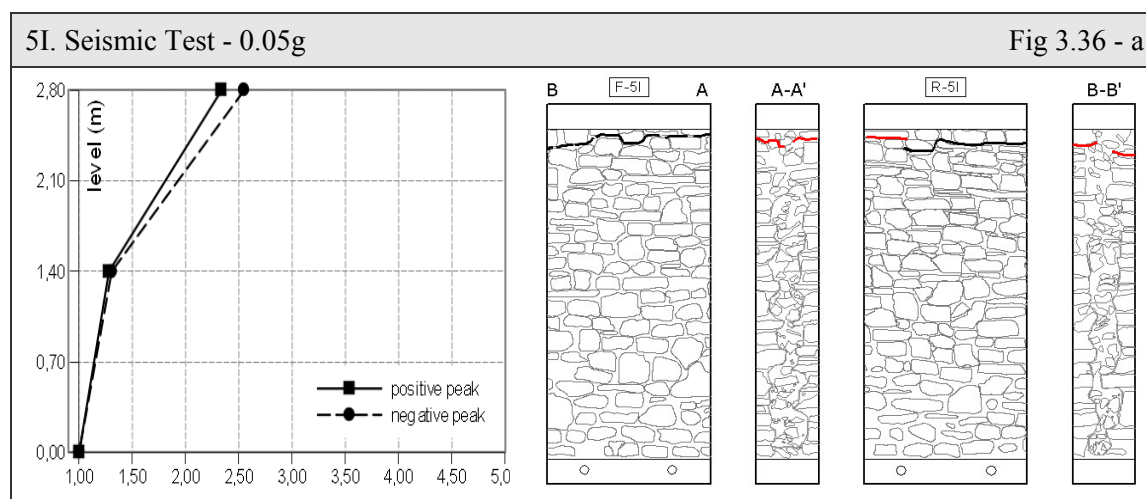
Peak Ground Acceleration Nominal	Acceleration Real [g]	Frequency [Hz]	Standard Deviation [g]	Coeff. of Variation	Force [kN]
0.05g	0.034	200	0.003	9.23 %	1.47
0.10g	0.061	200	0.008	13.84 %	2.62
0.15g	0.099	200	0.016	16.13 %	4.24
0.20g	0.167	200	0.014	8.15 %	7.16
0.25g	0.193	200	0.025	13.20 %	8.27
0.30g	0.259	200	0.047	18.25 %	11.11
0.35g	0.312	200	0.051	16.50 %	13.38
0.40g	0.280	200	0.028	10.10 %	12.00
0.45g	0.433	200	0.024	5.46 %	18.57
0.50g	0.389	200	0.001	0.36 %	16.68
0.55g	Collapse	200	-	-	-

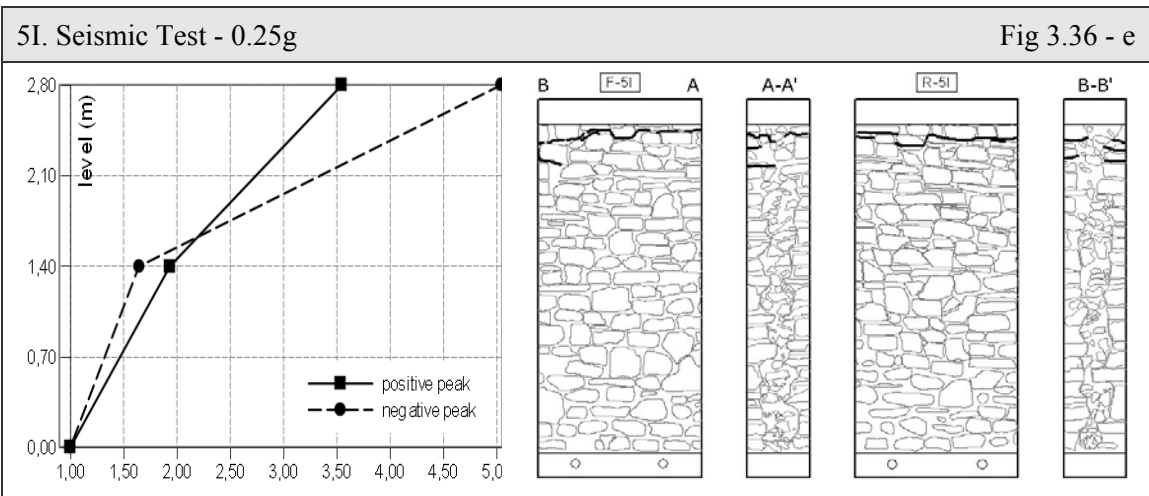
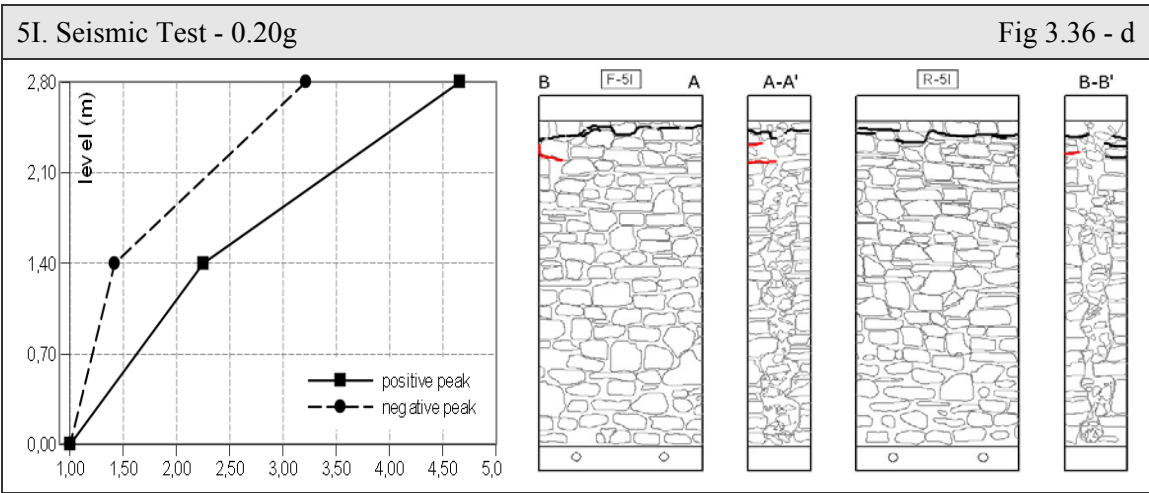
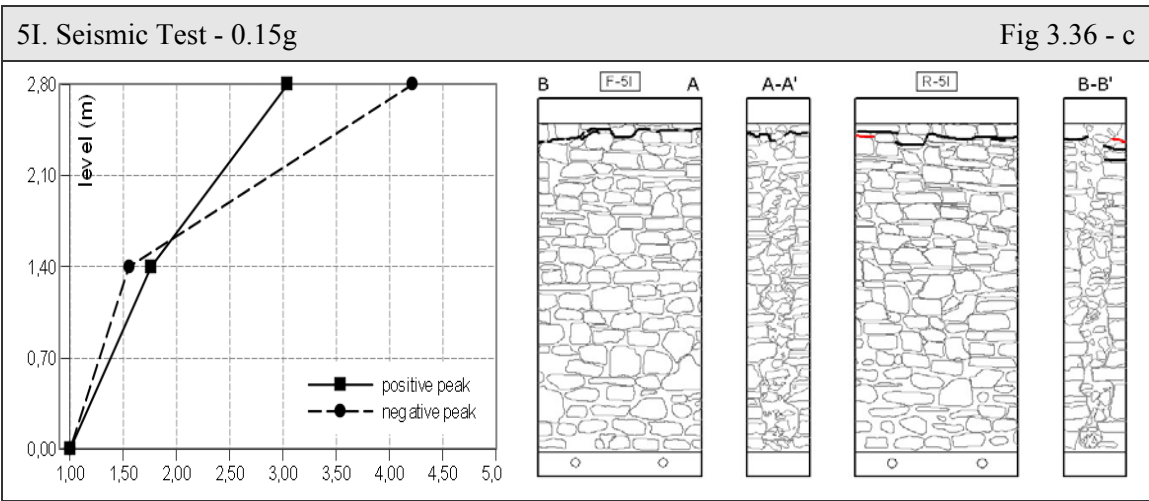
In Tab 3.13 viene stimato il PGA reale sulla base dei sensori inferiori (A1 e A4), esso risulta in media inferiore del 23% rispetto al valore nominale. La precisazione di questi dati viene fornita con il calcolo della deviazione standard e del coefficiente di variazione, e risulta in media del 12% (CV). I trasduttori erano stati rimossi in previsione del collasso già a 0.50g, perciò i dati suddetti sono stati computati, in questo caso, sulla risposta di A10 e A11, situati sul

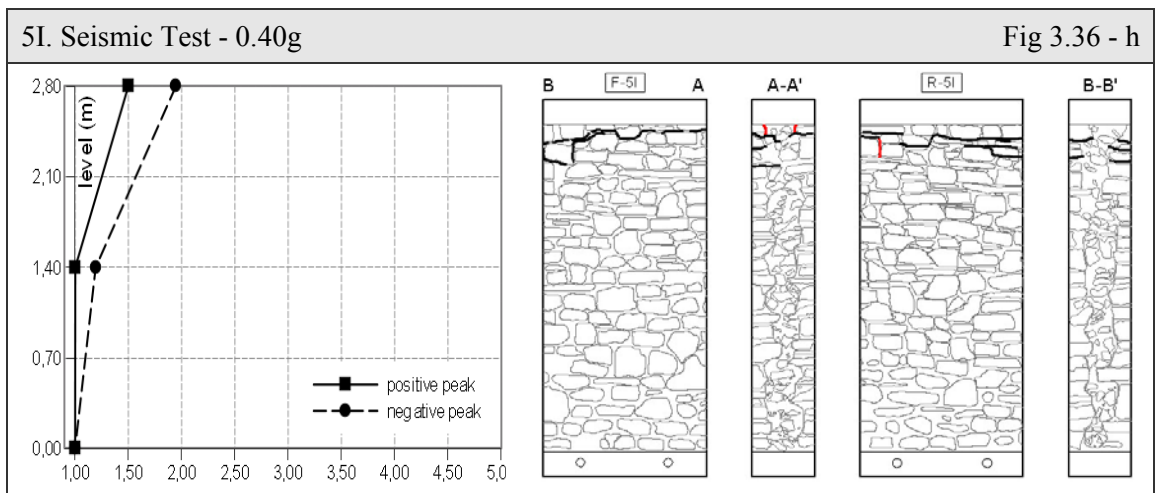
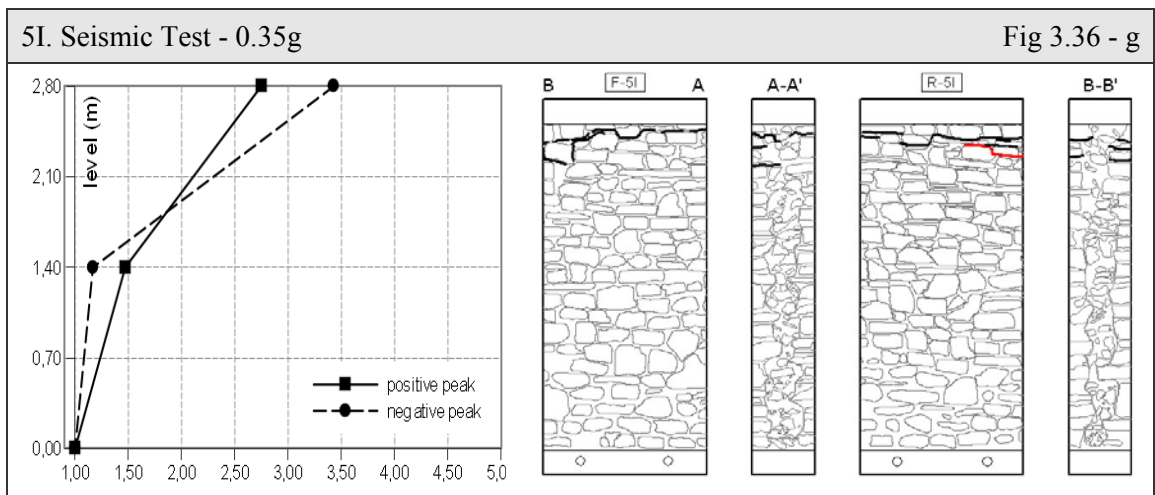
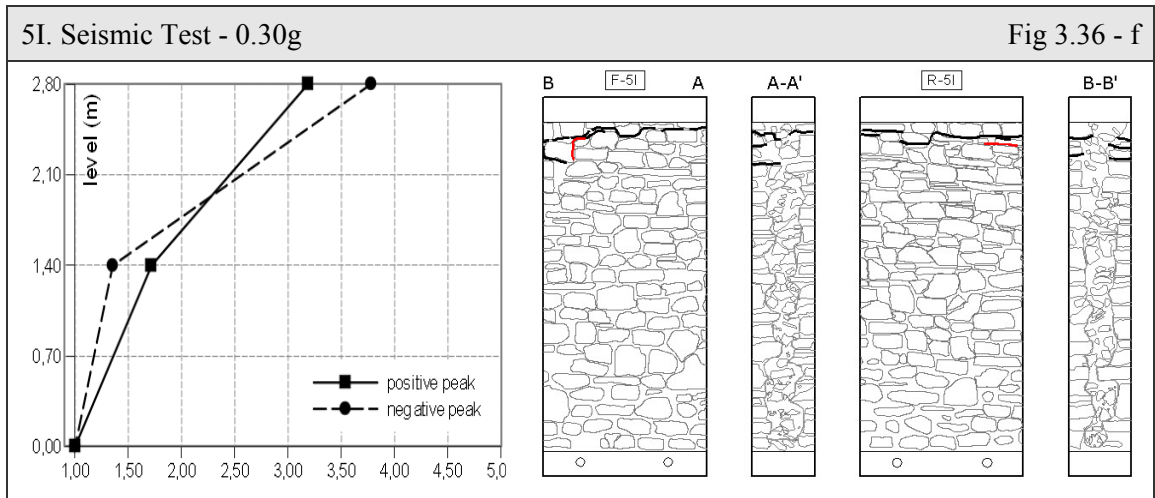
Analisi del Quadro Fessurativo e dei Fattori di Amplificazione

Dallo studio degli accelerogrammi di ciascun trasduttore, si sono notati numerosi picchi elevati di accelerazione, in particolare tra 0.25g e 0.45g, durante i quali si propagano le fessurazioni nella parte superiore del muro (Fig 3.35). I grafici dei fattori di amplificazione delle accelerazioni (Fig 3.36) risultano esser sempre crescenti, con un notevole incremento tra mezzeria (compresa tra 1.0 e 2.0) e sommità (compresa tra 2.0 e 4.0). La ridotta rigidezza e la diffusione del danno nella parte superiore, amplifica l'eccitazione sismica sino a 4 volte quella fornita dalla tavola vibrante.

Il rilievo del quadro fessurativo in Fig 3.36, viene effettuato ad ogni passo di prova indicando in rosso le lesioni avvenute a quella precisa PGA e in nero quelle precedenti. Con un retino grigio viene indicata l'area soggetta a collasso. Si tratta chiaramente della porzione non interessata da iniezione, nonché quella di concentrazione del danno durante l'intera sperimentazione.







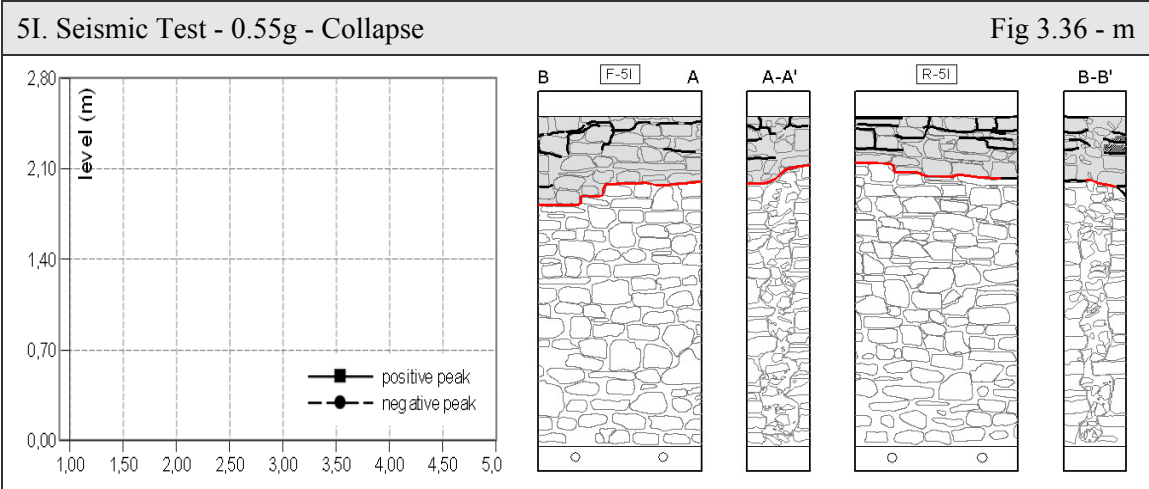
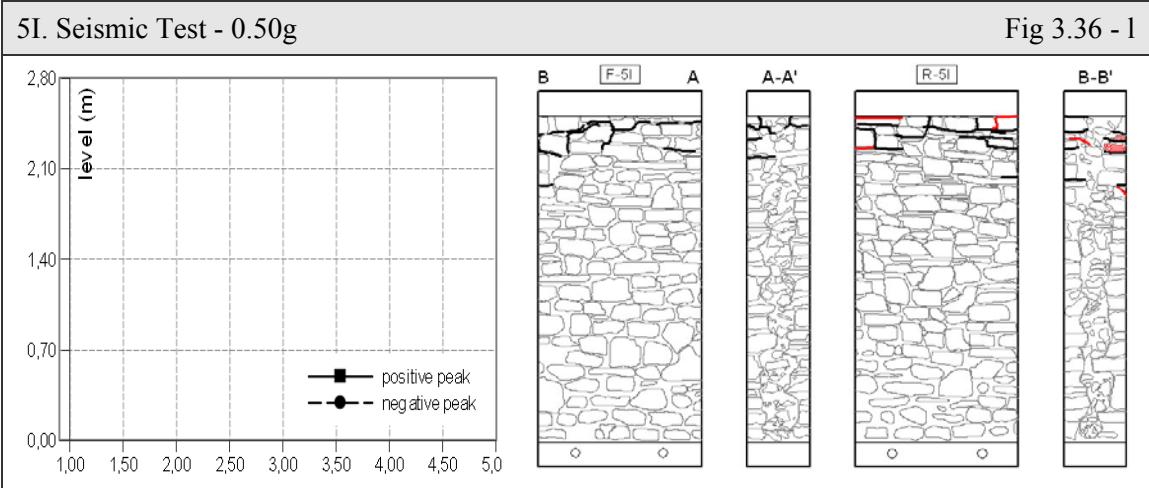
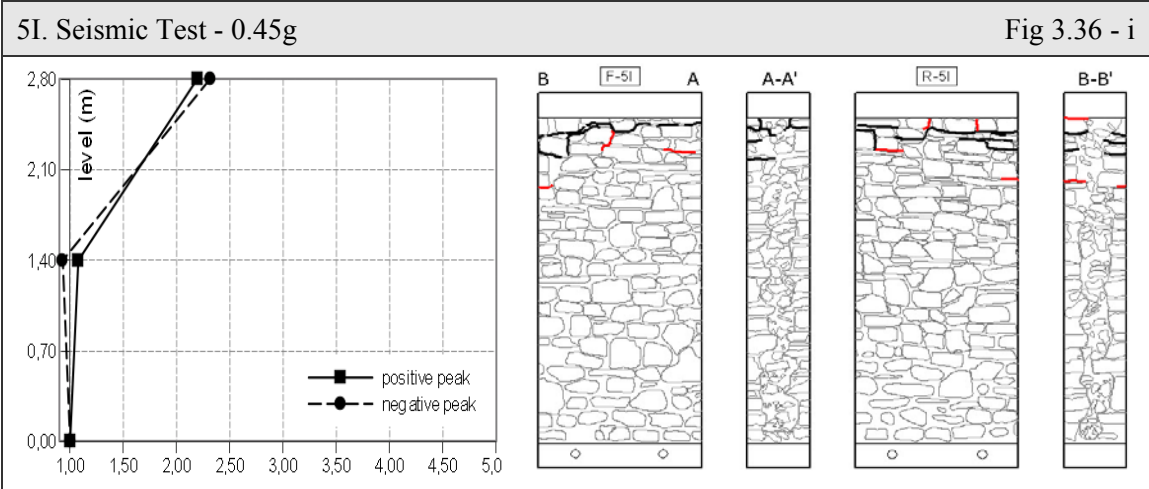


Fig 3.36: Pannello 5I. Analisi del quadro fessurativo e dell'azione sismica per ogni prova effettuata in laboratorio ENEA. A sinistra: grafico dei fattori di amplificazione.

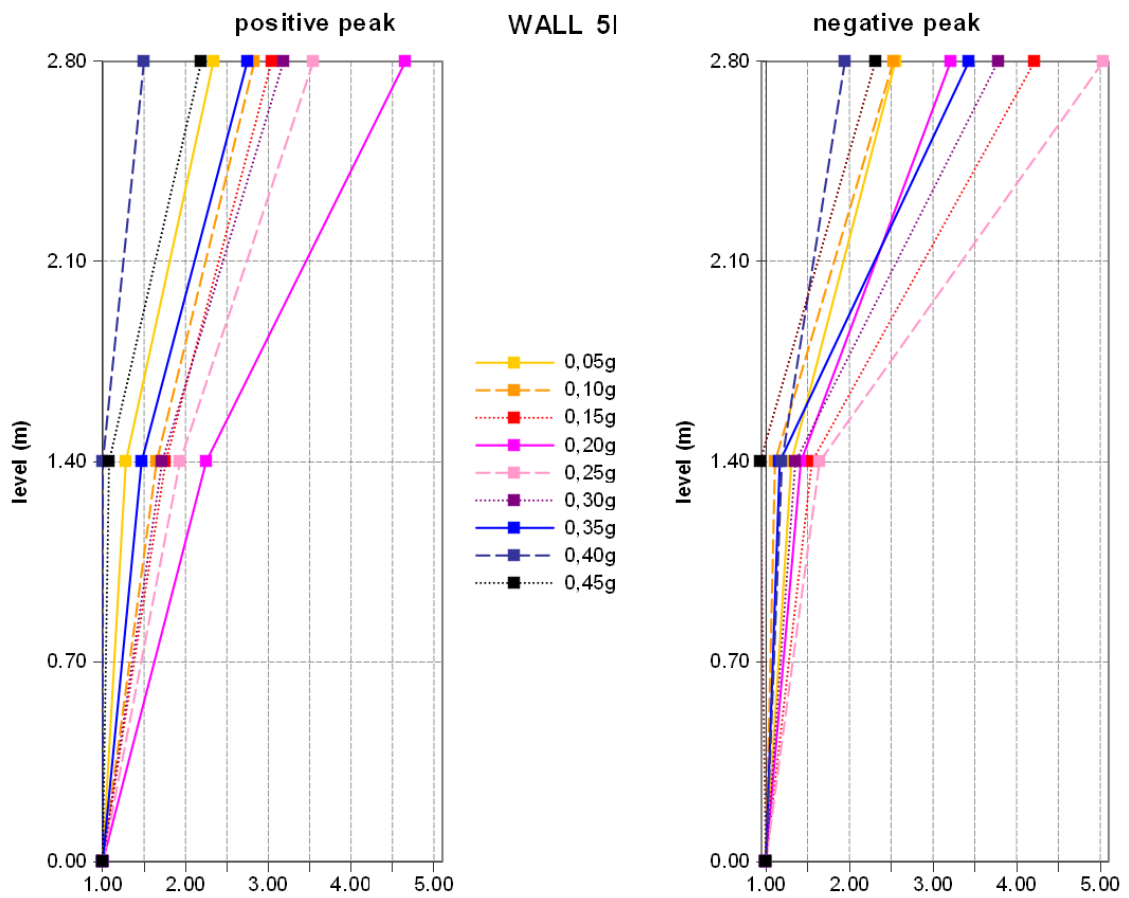


Fig 3.37: Pannello 5I. Fattori di amplificazione delle accelerazioni calcolati sulla base dei dati registrati dai sensori accelerometrici in laboratorio ENEA.



Fig 3.38: Pannello 5I. Rilievo fotografico del collasso, 0.55g (fronte-sezione B-B'-retro).

Unificando le risposte in termini di fattori di amplificazione delle accelerazioni in un unico grafico, si osserva che i paramenti sono tra loro in fase. La prima metà del pannello ha un

comportamento rigido, ed in mezzeria si rilevano accelerazioni poco superiori rispetto alla PGA di prova. Ciò è particolarmente evidente negli ultimi passi. La sommità invece risulta molto amplificata soprattutto ad intensità al suolo minori. La differenziazione tra picco positivo e negativo è, secondo il sistema di riferimento adottato, rispettivamente nel verso del retro e del fronte.

Analisi degli spostamenti locali

L'input sismico determina movimenti fuori piano del elemento murario, inducendo la separazione graduale dei paramenti esterni del pannello rilevati da estensimetri analogici. Tali misure sono riportate in Tab 3.14, insieme a quelle dello spostamento verticale (P5). Il meccanismo di collasso avvenuto (Fig 3.38) ha determinato la perdita delle rispettive misurazioni verticali.

Tab 3.14: Pannello 5I. Spostamenti ultimi, assoluti e relativi, registrati dai sensori analogici in mezzeria e in sommità durante ogni singola prova. Valori in mm.

Wall 5I	Absolute Data			Average	Relative Data		
Step [g]	P3 middle dx	P4 middle sx	P5 top	middle sensors	P3 middle dx	P4 middle sx	P5 top
0.05g	0.13	0.00	-0.05	0.07	0.13	0.00	-0.05
0.10g	0.11	0.07	-0.02	0.09	-0.02	0.07	0.03
0.15g	0.34	0.13	0.00	0.24	0.22	0.06	0.02
0.20g	0.33	-0.02	0.28	0.16	-0.01	-0.15	0.28
0.25g	0.42	0.03	0.28	0.22	0.09	0.05	0.00
0.30g	0.19	-0.12	0.36	0.04	-0.22	-0.14	0.08
0.35g	0.11	-0.06	0.41	0.03	-0.09	0.06	0.05
0.40g	-0.01	-0.20	0.31	-0.11	-0.12	-0.14	-0.10
0.45g	-0.16	-0.14	-0.13	-0.15	-0.15	0.06	-0.44
0.50g	-0.16	-0.14	-1.37	-0.15	0.00	0.00	-1.24
0.55g	-0.16	-0.14	-	-0.15	0.00	0.00	-

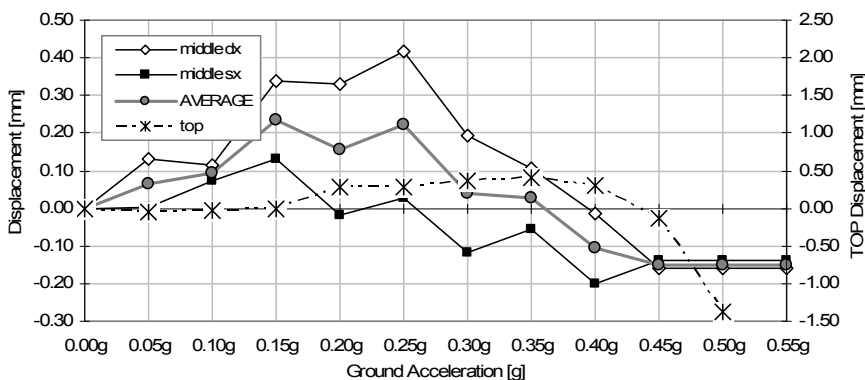


Fig 3.39: Pannello 5I. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e correlati con il PGA, ad ogni prova di laboratorio.

I grafici in Fig 3.39 e Fig 3.41 aiutano a comprendere l'andamento degli spostamenti riassunti in Tab 3.14. In verticale l'abbassamento inizia ad essere rilevato a 0.20g (circa 7.2 kN) di mm 0.28, che via via aumenta sino ad un picco di mm 0.41 a 0.35g (circa 13.4 kN). Nelle prove successive si manifesta un decremento che porta ad un innalzamento del cordolo di 1.37 mm che anticipa il collasso. Diversamente in mezzeria si osserva un comportamento in fase tra le due sezioni, con spostamenti maggiori in sezione A-A' (P3). L'apertura media misurata tra i paramenti esterni ha un andamento crescente fino ad un massimo di mm 0.22 a 0.25g (circa 8.3 kN) per poi comprimersi, fino ad un dato conclusivo di 0.15 mm.

Le forze agenti relazionate con gli spostamenti nel grafico in Fig 3.40, assumono una tendenza simile a quella suddetta, evidenziando un chiaro decadimento di circa 1.5 kN a 0.45g, per poi subire un incremento notevole di circa 7 kN al passo successivo.

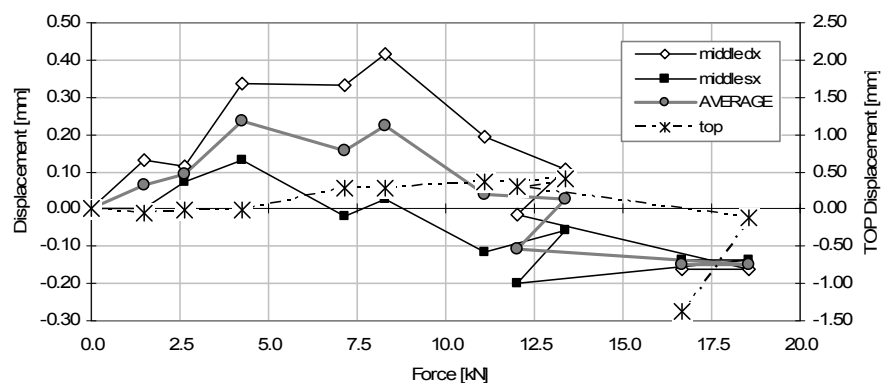


Fig 3.40: Pannello 5I. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con la forza agente, ad ogni prova di laboratorio.

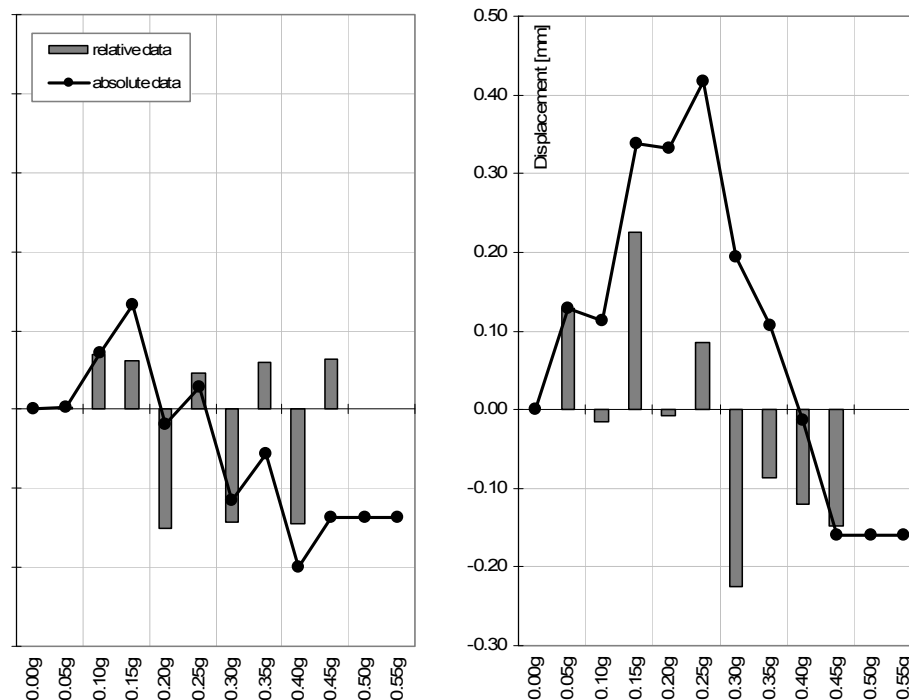


Fig 3.41: Pannello 5I. Confronto tra gli spostamenti ultimi assoluti e relativi, registrati in mezzeria dai sensori analogici. Da sinistra: spostamenti del sensore P4 (di sinistra) e del sensore P3 (di destra).

3.3.2. Wall 6I

Il rilievo geometrico in Fig 3.42 mostra che anche in questo caso, la miscela di iniezione non si è diffusa in tutto il nucleo. L'area iniettata è indicata con un tratteggio grigio, perciò la porzione in sommità (circa 1/5 dell'altezza totale) rimane non consolidata. Proprio in questa parte si sono create delle fessurazioni sul fronte, con caduta di materiale dalle sezioni, durante le procedure di movimentazione del pannello.

Altre informazioni reperibili in figura riguardano la posizione, la direzione e il verso dei trasduttori: accelerometri in rosso, sensori di spostamento in verde e marker in nero.

Come indicato in Tab 3.15 il collasso avviene a 0.75g. I dati qui riportati sono stati calcolati in relazione alle misure dai sensori alla base (A1 e A4). Si può quindi constatare che il PGA reale è in media inferiore del 30% rispetto la nominale, con una dispersione media della misura del 12% (CV).

Qualche nota da segnalare al fine dell'interpretazione dei risultati riguarda i trasduttori. L'accelerometro A6 inizia a rilevare correttamente i dati solo a partire dal passo di prova a 0.25g, mentre A4 e A5 vengono sostituiti a 0.65g, creando dei problemi di taratura che sono stati superati moltiplicando per un fattore 2.3. Infine quelli sul basamento del telaio (A10 e A11), installati a scopo di controllo, assumono entrambi verso positivo rispetto al sistema di riferimento adottato. Nel corso della sperimentazione si presentano, inoltre, diversi shut down durante gli sweep tests a 0.20g e 0.40g, e la prova ambientale a 0.60g.

Tab 3.15: Pannello 6I. Accelerazione al suolo nominale e reale, frequenza di acquisizione, deviazione standard e coefficiente di variazione, forza agente.

Peak Ground Acceleration Nominal	Real [g]	Frequency [Hz]	Standard Deviation [g]	Coeff. of Variation	Force [kN]
0.05g	0.034	200	0.004	11.27 %	1.50
0.10g	0.065	200	0.007	10.72 %	2.88
0.15g	0.097	200	0.009	9.72 %	4.25
0.20g	0.144	200	0.019	13.41 %	6.32
0.25g	0.196	200	0.023	11.65 %	8.59
0.30g	0.232	200	0.023	10.10 %	10.22
0.35g	0.269	200	0.032	11.77 %	11.84
0.40g	0.275	200	0.033	12.00 %	12.10
0.45g	0.304	200	0.041	13.44 %	13.36
0.50g	0.336	200	0.050	14.75 %	14.75
0.55g	0.384	200	0.067	17.48 %	16.87
0.60g	0.429	200	0.080	18.64 %	18.86
0.65g	0.472	200	0.045	9.44 %	20.73
0.70g	0.563	200	0.070	12.45 %	24.72
0.75g	Collapse	200	-	-	-

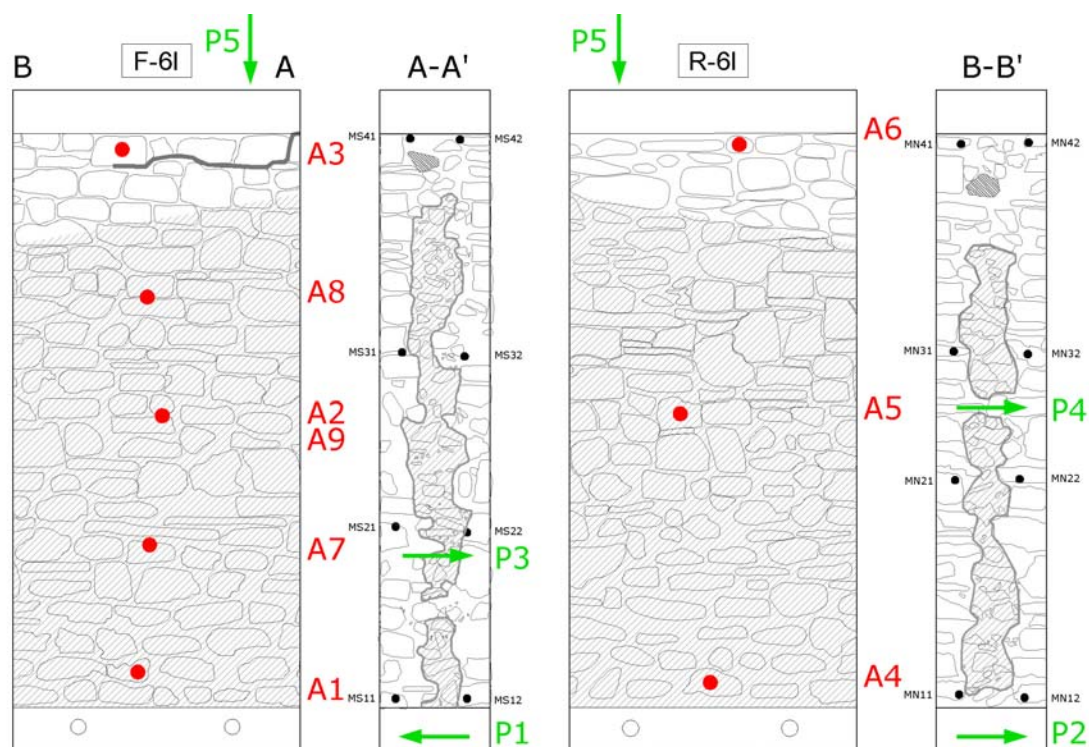


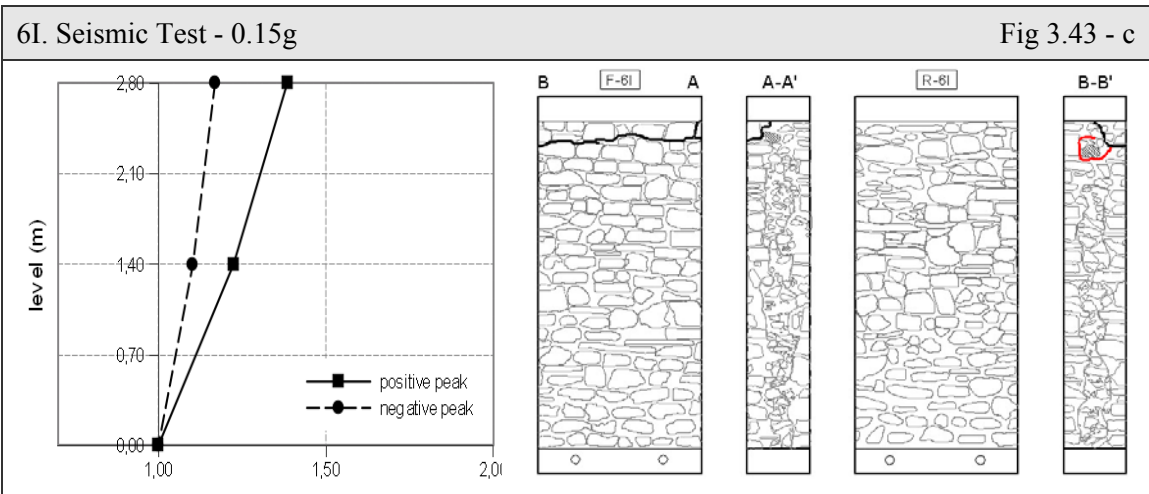
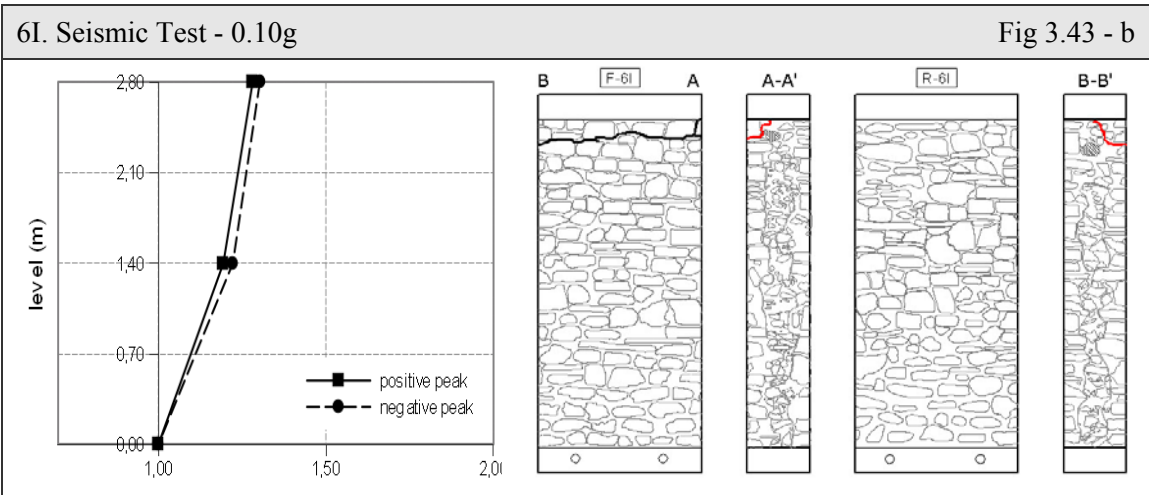
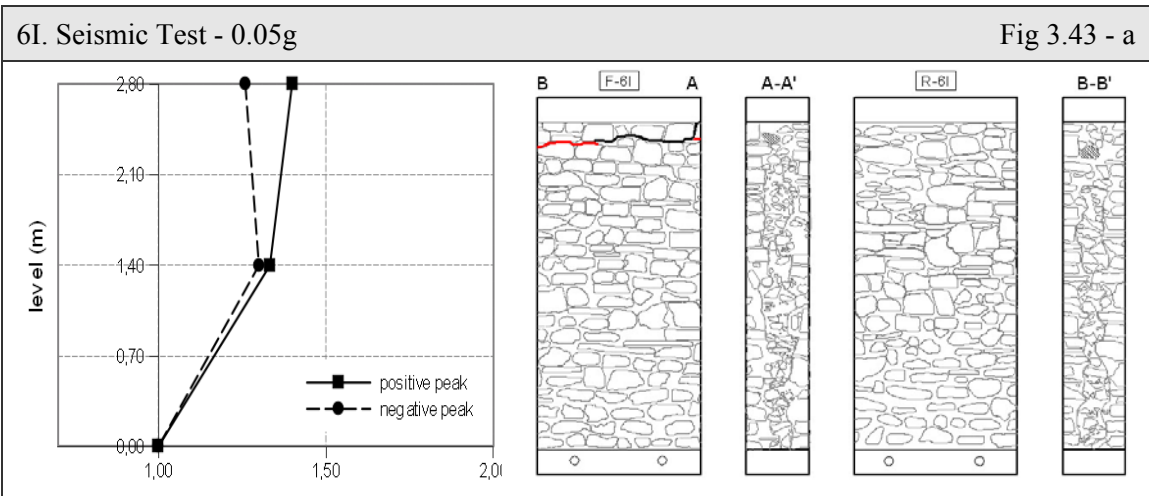
Fig 3.42: Pannello 6I. Rilievo geometrico con indicazione della posizione e della nomenclatura dei sensori e del quadro fessurativo pre-prova.

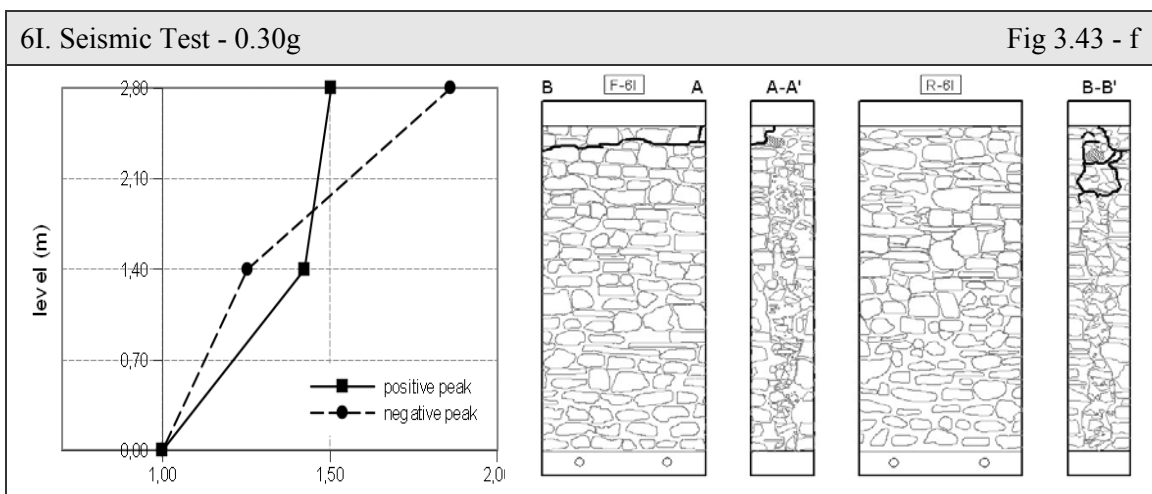
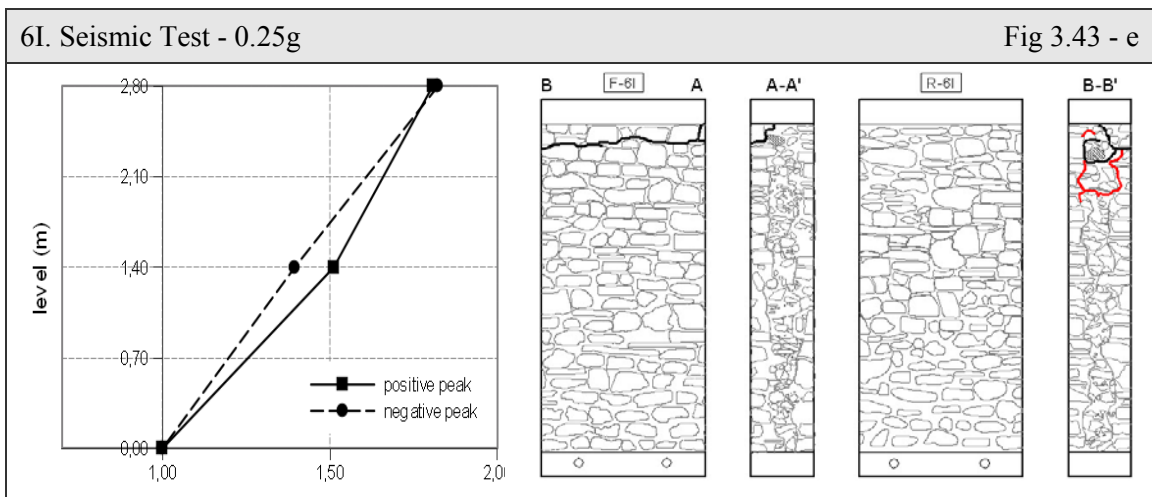
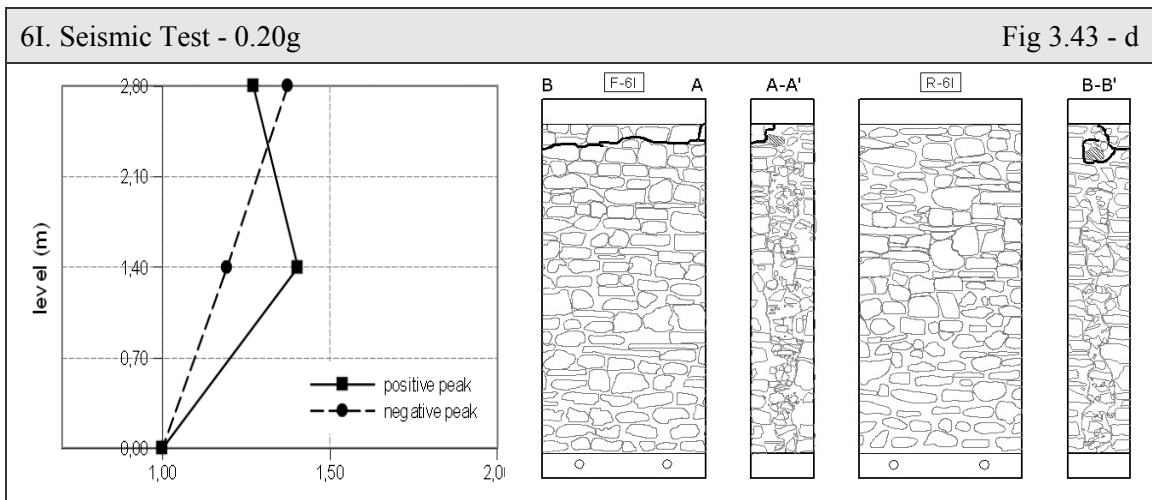
Analisi del Quadro Fessurativo e dei Fattori di Amplificazione

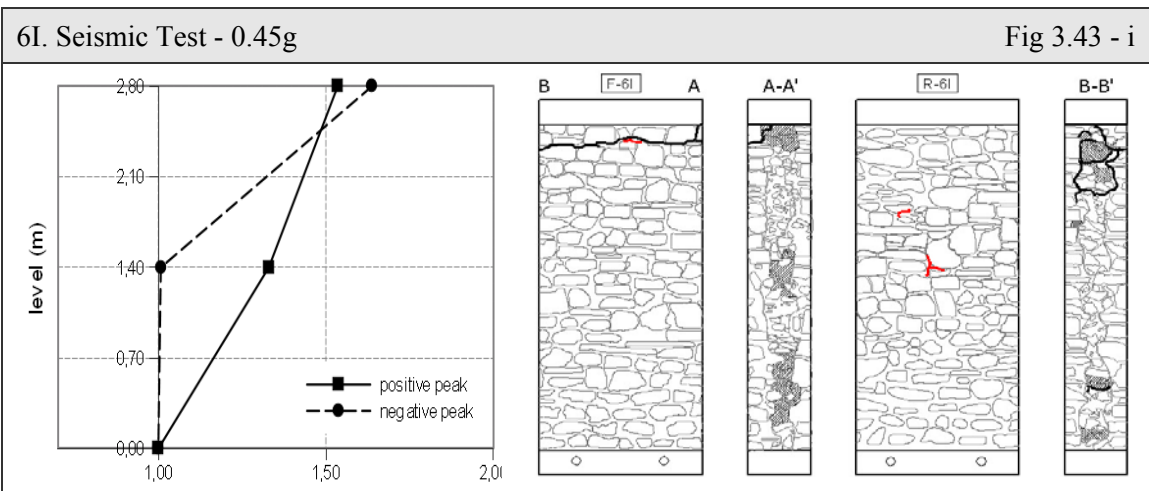
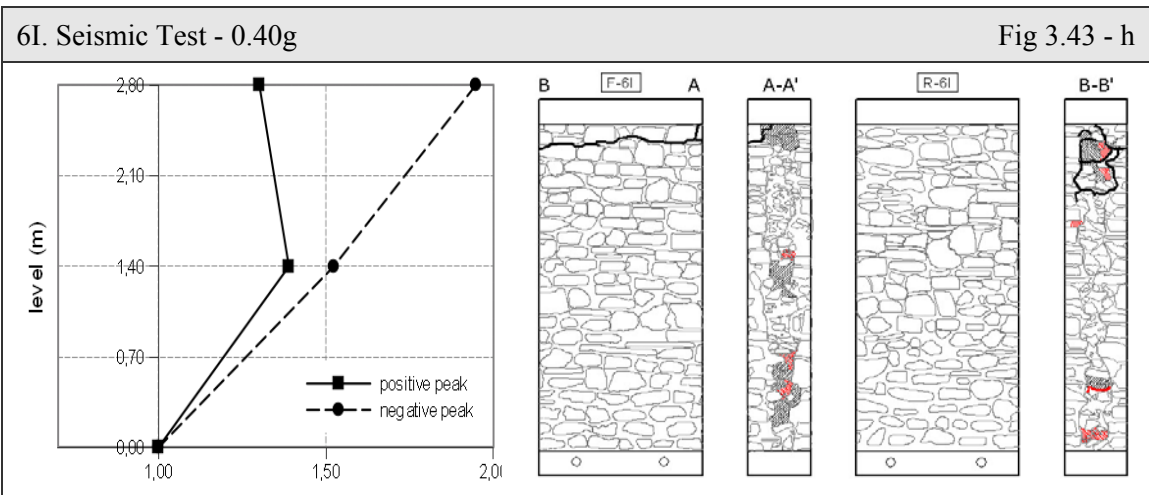
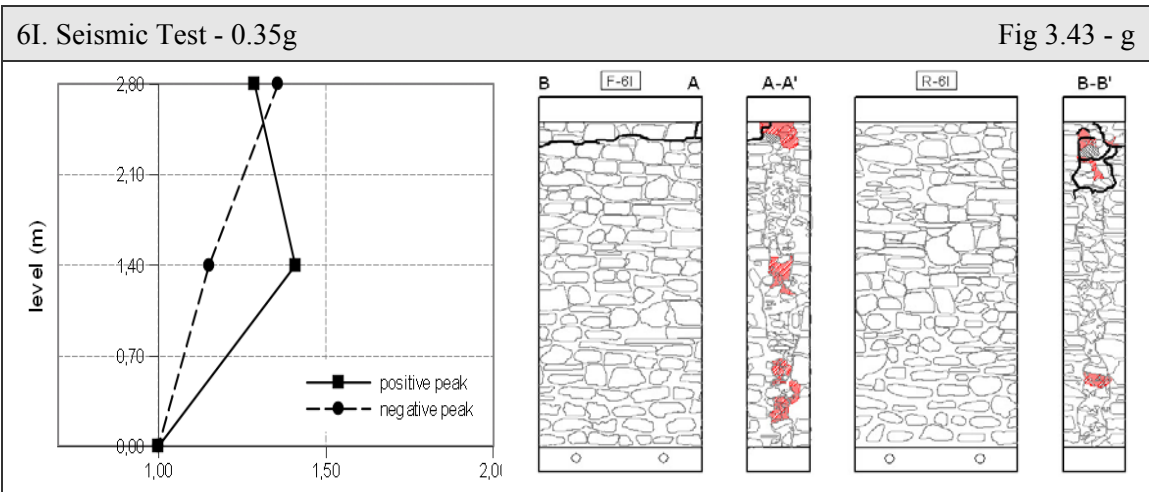
Ad ogni passo di prova viene esaminato il quadro fessurativo in relazione all'andamento dei fattori di amplificazione delle accelerazioni (Fig 3.43). In rosso si indicano le lesioni avvenute con quella specifica PGA e in nero quelle precedenti.

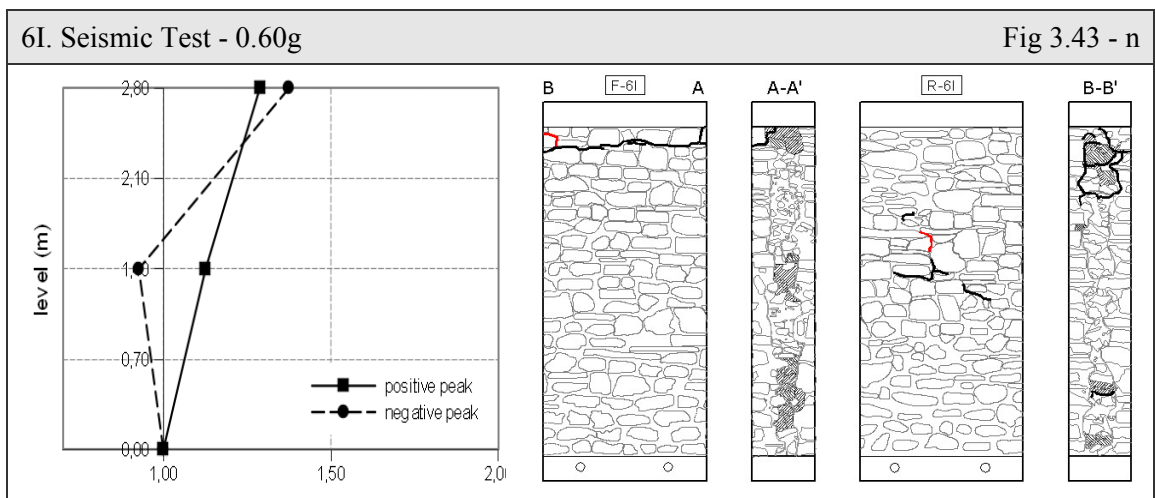
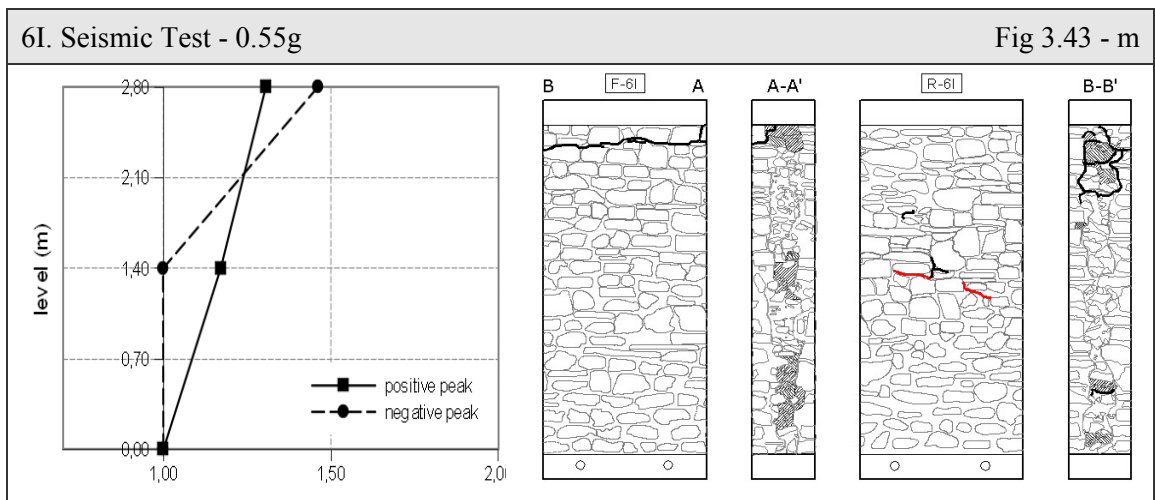
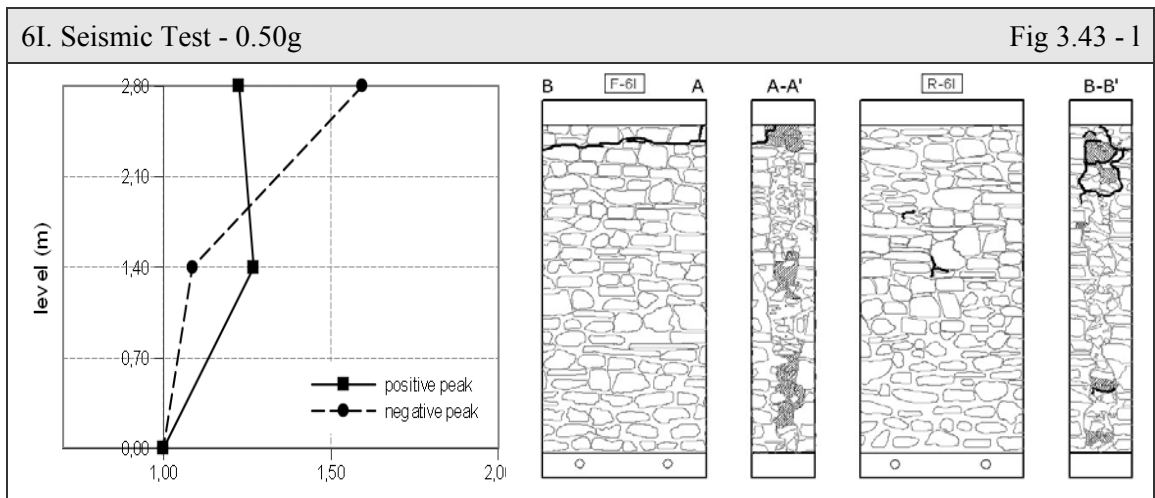
Dal quadro fessurativo si osserva che lo sviluppo del danno inizia con la propagazione delle lesioni create durante la movimentazione prima della prova. A 0.35g e 0.40g si manifesta una notevole caduta di materiale del nucleo dalle sezioni. Al passo successivo invece si presentano delle piccole crepe, che si diramano successivamente nel corso della prova, nella parte centrale del retro. Il collasso (Fig 3.45), evidenziato con un retino grigio, interessa solamente una piccola porzione in sommità, in corrispondenza dell'area non iniettata.

I grafici dei fattori di amplificazione delle accelerazioni distinguono picco positivo e negativo, nel sistema di riferimento adottato, intendendo rispettivamente verso il retro e verso il fronte, come da Fig 2.31 (cfr § 2.2.3). L'incremento rispetto al PGA è compreso tra 0.5 e 1.5 in mezzeria e tra 1.0 e 2.0 in sommità dei pannelli.









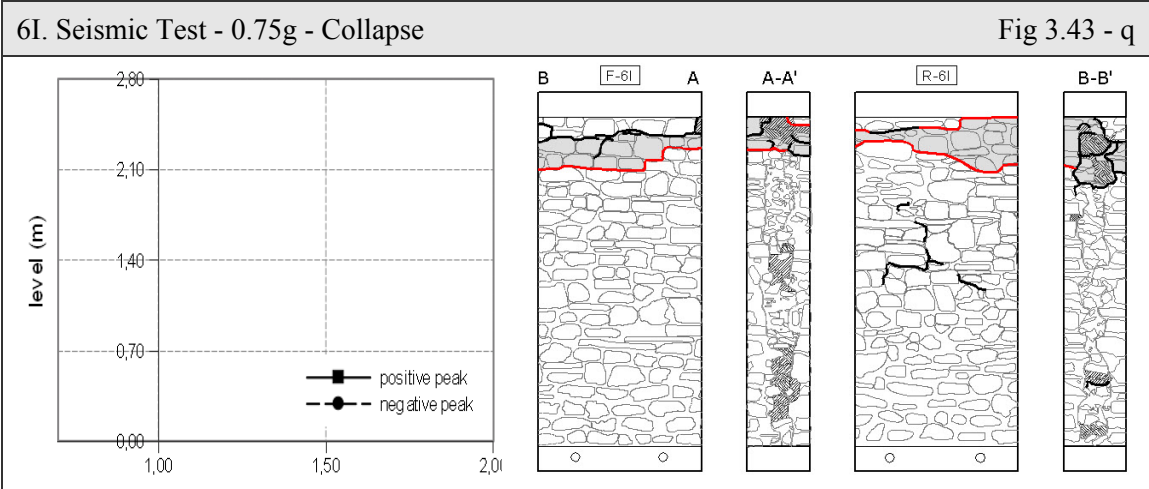
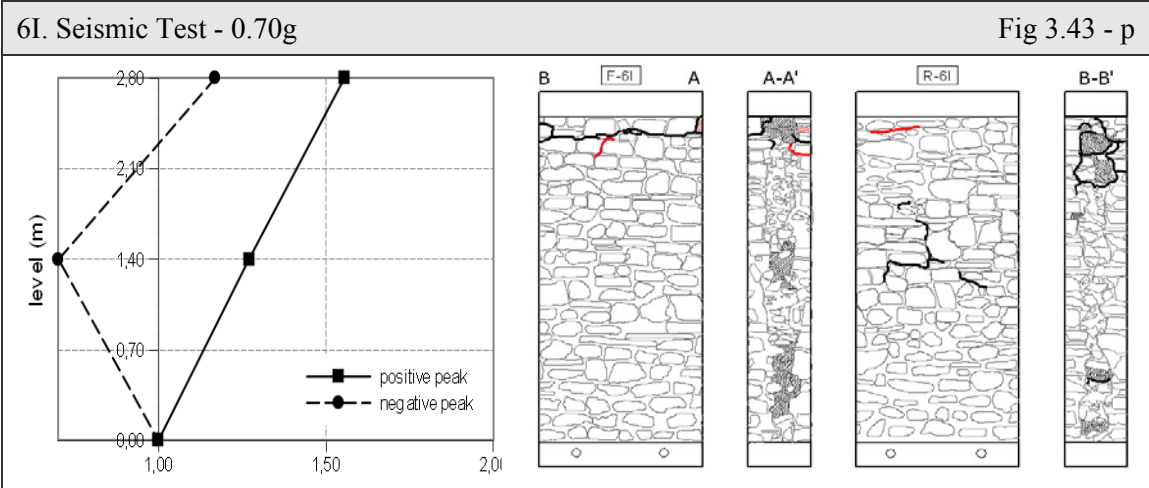
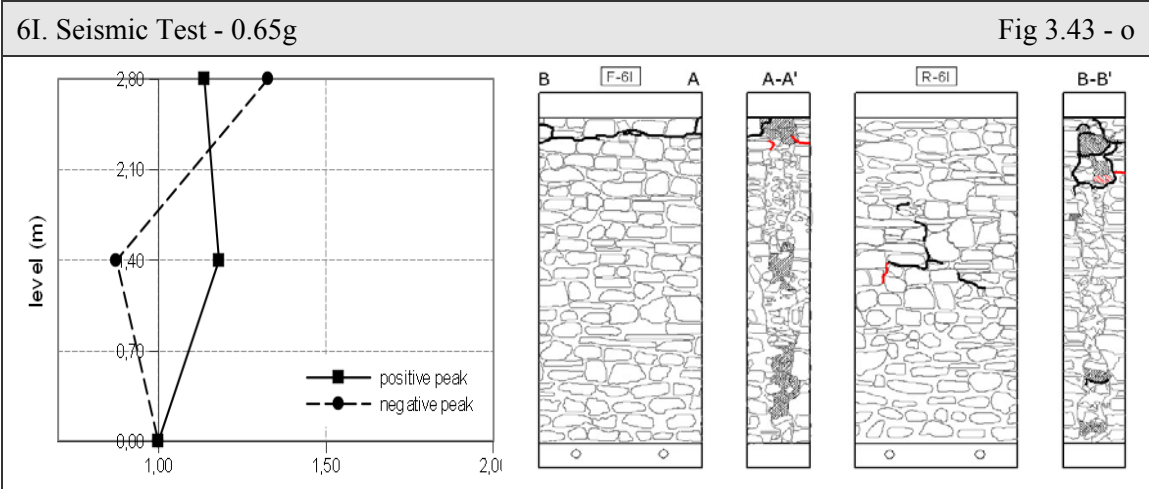


Fig 3.43: Pannello 6I. Analisi del quadro fessurativo e dell'azione sismica per ogni prova effettuata in laboratorio ENEA. A sinistra: grafico dei fattori di amplificazione.

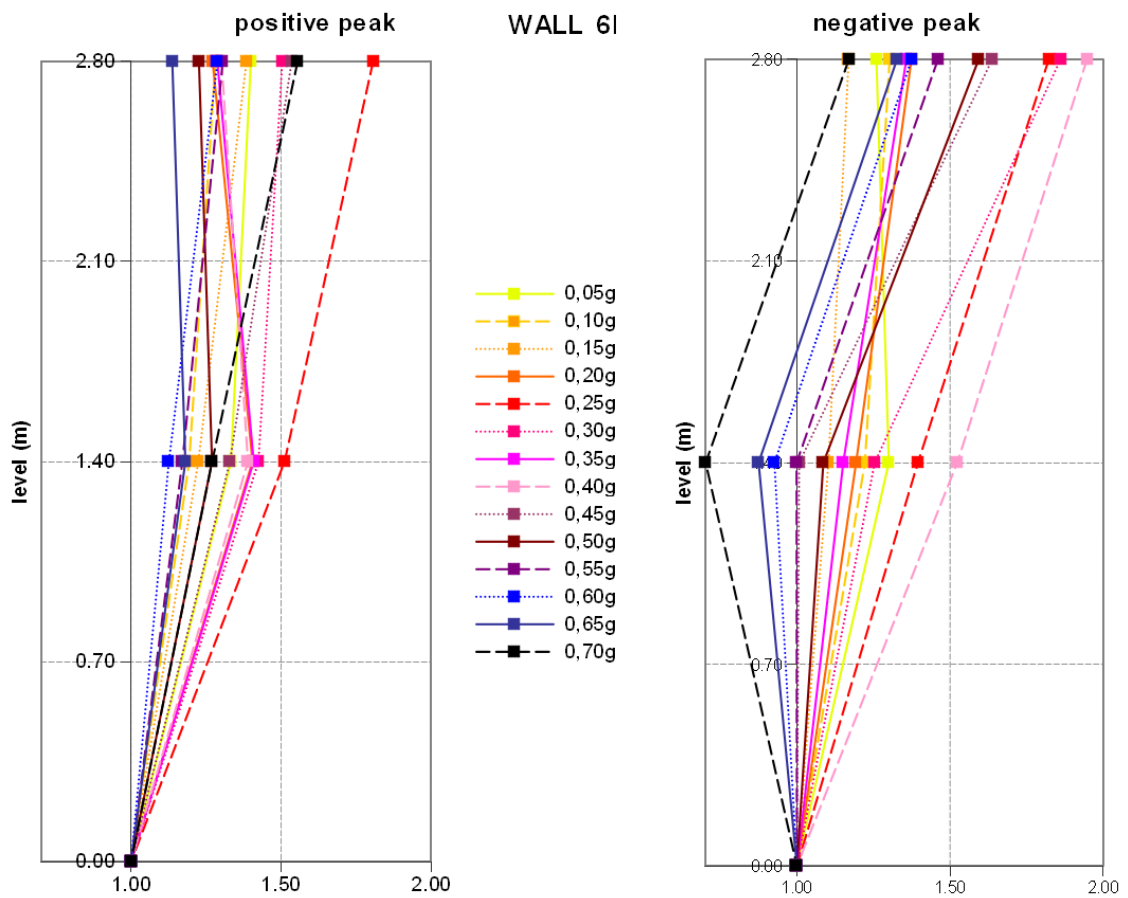


Fig 3.44: Pannello 6I. Fattori di amplificazione delle accelerazioni calcolati sulla base dei dati registrati dai sensori accelerometrici in laboratorio ENEA.



Fig 3.45: Pannello 6I. Rilievo fotografico del collasso, 0.75g (fronte-sezione B-B'-retro).

La Fig 3.44 fornisce la possibilità di fare delle osservazioni in merito al comportamento globale della muratura. Fino a 0.20g si nota un chiaro incremento dell'accelerazione in mezzeria che si mantiene piuttosto invariato in sommità. In seguito, fino a circa 0.45g, l'andamento è linearmente crescente raggiungendo fattori di circa 2 nella parte superiore. Da 0.50g fino a collasso, gli accelerometri a metà altezza misurano un picco negativo con amplificazione molto bassa o addirittura inferiore alla base. Si osserva inoltre che il massimo positivo (nel verso del retro) ha un comportamento più rigido e lineare rispetto al negativo, questo è dovuto al fatto che le prime fessurazioni sul paramento posteriore si manifestano nella parte centrale solamente a partire da 0.45g e in sommità a 0.70g.

Analisi degli spostamenti locali

Gli spostamenti rilevati in mezzeria e in sommità sono riassunti in Tab 3.16, con una stima sia del dato assoluto che relativo. I dati mancanti in P5 sono legati alla modalità di collasso che ha indotto lo scollegamento dell'estensimetro.

Le misure assolute riportate in tabella, sono illustrate nei grafici PGA-Spostamento (Fig 3.46 e Fig 3.48) e Forza-Spostamento (Fig 3.47). L'abbassamento verticale si verifica inizialmente a 0.15g, ossia con una forza agente di circa 4 kN, ed aumenta gradualmente sino ad un picco di mm 0.26, visibile a 0.65g (circa 21 kN), per poi calare. In orizzontale, invece, il comportamento non è sempre uniforme tra sezione destra e sinistra, probabilmente dovuto al fatto che il sensore P3 è posizionato ad 1/4 dell'altezza del pannello, mentre P4 a metà. A sinistra del fronte si osserva quindi un andamento più definito, caratterizzato dal progressivo incremento dell'apertura tra i paramenti fino ad un picco di 0.54 mm a 0.45g (13.4 kN). Diversamente, nell'altro lato si nota un alternarsi tra espansione e contrazione dei sensori, e quindi degli strati. In media, l'apertura massima avviene a 0.35g e 0.45g (corrispondenti a 11.8 kN e 13.4 kN) con uno spostamento di 0.26 mm.

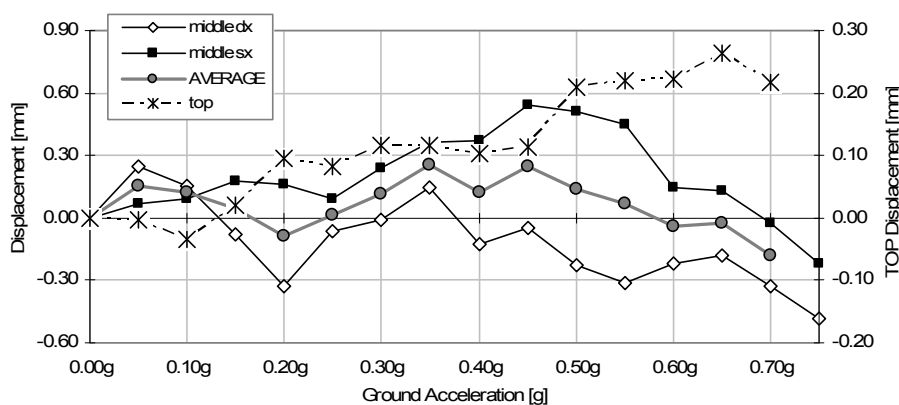


Fig 3.46: Pannello 6I. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con il PGA, ad ogni prova di laboratorio.

Tab 3.16: Pannello 6I. Spostamenti ultimi, assoluti e relativi, registrati dai sensori analogici in mezzzeria e in sommità durante ogni singola prova. Valori in mm.

Wall 6I	Absolute Data			Average	Relative Data		
Step [g]	P3 middle dx	P4 middle sx	P5 top	middle sensors	P3 middle dx	P4 middle sx	P5 top
0.05g	0.25	0.07	0.00	0.16	0.25	0.07	0.00
0.10g	0.15	0.09	-0.03	0.12	-0.09	0.03	-0.03
0.15g	-0.08	0.18	0.02	0.05	-0.23	0.08	0.05
0.20g	-0.33	0.16	0.09	-0.08	-0.25	-0.02	0.07
0.25g	-0.06	0.09	0.08	0.02	0.27	-0.07	-0.01
0.30g	-0.01	0.24	0.12	0.11	0.05	0.14	0.03
0.35g	0.15	0.36	0.12	0.26	0.16	0.13	0.00
0.40g	-0.13	0.37	0.10	0.12	-0.28	0.01	-0.01
0.45g	-0.05	0.54	0.11	0.25	0.08	0.17	0.01
0.50g	-0.23	0.51	0.21	0.14	-0.18	-0.04	0.10
0.55g	-0.31	0.45	0.22	0.07	-0.09	-0.06	0.01
0.60g	-0.22	0.14	0.22	-0.04	0.09	-0.31	0.00
0.65g	-0.18	0.13	0.26	-0.02	0.04	-0.01	0.04
0.70g	-0.33	-0.02	0.22	-0.18	-0.15	-0.15	-0.05
0.75g	-0.49	-0.22	-	-0.35	-0.16	-0.19	-

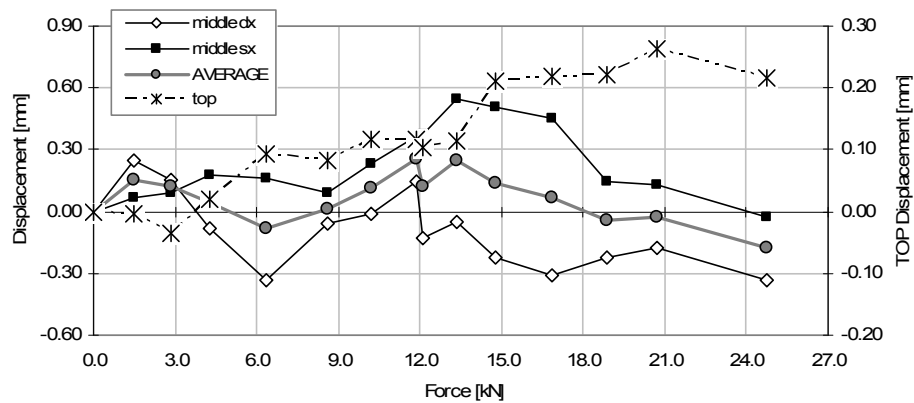


Fig 3.47: Pannello 6I. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzzeria e correlati con la forza agente, ad ogni prova di laboratorio.

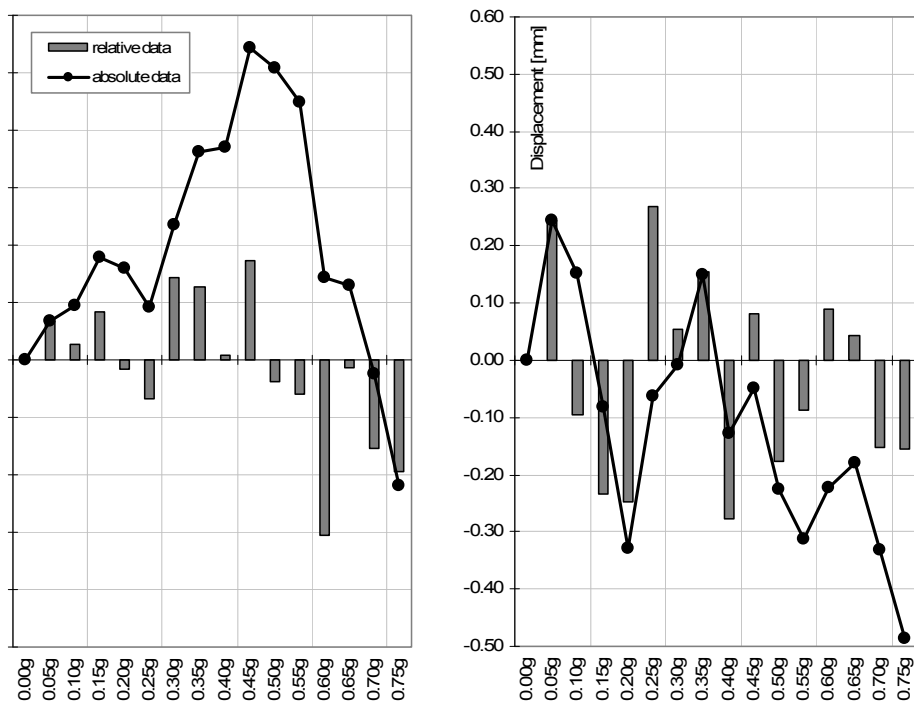


Fig 3.48: Pannello 6I. Confronto tra gli spostamenti ultimi assoluti e relativi, registrati in mezzeria dai sensori analogici. Da sinistra: spostamenti del sensore P4 (di sinistra) e del sensore P3 (di destra).

3.3.3. Osservazioni

In entrambi i casi iniettati, la miscela non si è diffusa completamente all'interno del nucleo, interessando solo i 4/5 inferiori del pannello. La porzione non consolidata è risultata la parte critica sin dall'inizio. In essa si sono concentrate le fessurazioni pre-prova e, successivamente, i danni più gravi fino al raggiungimento del collasso, avvenuto a 0.55g in 5I e a 0.75g in 6I. La stima del PGA effettivo, ha determinato valori inferiori rispettivamente del 23% e del 30% rispetto al dato nominale, con una precisione CV del 12%.

I fattori di amplificazione delle accelerazioni assumono valori molto diversi, pur manifestandosi, in entrambi i pannelli, molto elevati ad intensità di eccitazione sismica inferiori, e viceversa. Nel caso di 5I, si osserva un netto incremento delle accelerazioni in sommità, le quali raggiungono amplificazioni pari a 5 volte il PGA. In mezzeria invece il moto è molto ridotto e più simile alla base. Diversamente in 6I, la parte superiore arriva al massimo a raddoppiare l'intensità al suolo, con un comportamento globale più rigido.

L'andamento suddetto si manifesta anche nell'analisi degli spostamenti, con dati più elevati (circa il doppio) nel primo campione. L'apertura media orizzontale dei paramenti presenta un picco al passo di prova 0.15g (4.2 kN) nel muro 5I di 0.24 mm, mentre in 6I avviene a 0.35g (11.8 kN) ed è di 0.26 mm. Al momento del collasso si verifica una compressione in mezzeria pari a 0.15 mm e 0.35 mm, rispettivamente. In verticale invece si ha un massimo in 5I di 0.41 mm a 0.35g (13.4 kN) e in 6I di 0.26 mm a 0.65g (21 kN). Nel primo pannello si conclude con un innalzamento notevole che precede il collasso di 1.37 mm.

3.4. Pannelli rinforzati con tiranti e iniezione

La sperimentazione si conclude con le prove su murature multistrato rinforzate (Strengthened Masonry, SM) mediante l'applicazione combinata di tirantini antiespulsivi e iniezione di miscela di malta a base di calce idraulica naturale. In entrambi i pannelli, questa configurazione non ha indotto il collasso durante le prove dinamiche, le quali sono state concluse a 0.75g per raggiungimento del limite di esercizio della tavola vibrante. Le caratteristiche di ciascun campione, sono già state esaminate al paragrafo § 2.1.3.

3.4.1. Wall 7IT

L'elemento murario risulta essere ben iniettato (tratteggio grigio in Fig 3.49) e non si presentano particolari fessurazioni dovute agli spostamenti pre-prova. Utilizzando le misure degli accelerometri alla base (A1 e A4) è stato possibile determinare la forza agente e il PGA reale con una precisazione in media (CV) del 12% (Tab 3.17). Pur ripetendo la prova a 0.75g per cinque volte, ottenendo gli stessi risultati, il collasso non è stato raggiunto.

Tab 3.17: Pannello 7IT. Accelerazione al suolo nominale e reale, frequenza di acquisizione, deviazione standard e coefficiente di variazione, forza agente.

Peak Ground Acceleration Nominal	Real [g]	Frequency [Hz]	Standard Deviation [g]	Coeff. of Variation	Force [kN]
0.05g	0.038	200	0.004	9.55 %	1.72
0.10g	0.059	200	0.005	8.80 %	2.63
0.15g	0.092	200	0.008	9.09 %	4.11
0.20g	0.142	200	0.015	10.25 %	6.33
0.25g	0.189	200	0.018	9.63 %	8.44
0.30g	0.224	200	0.021	9.50 %	10.00
0.35g	0.294	200	0.033	11.13 %	13.14
0.40g	0.280	200	0.028	10.10 %	12.52
0.45g	0.336	200	0.036	10.63 %	15.02
0.50g	0.337	200	0.044	13.06 %	15.08
0.55g	0.373	200	0.052	13.94 %	16.68
0.60g	0.427	200	0.073	17.19 %	19.08
0.65g	0.449	200	0.086	19.17 %	20.11
0.70g	0.723	200	0.075	10.40 %	32.34
0.75g	0.845	200	0.163	19.35 %	37.79
0.75g II	0.831	200	0.182	21.91 %	37.19
0.75g III	0.827	200	0.188	22.69 %	37.02
0.75g IV	0.827	200	0.188	22.69 %	37.02
0.75g V	0.826	200	0.190	23.00 %	36.95

L'accelerazione reale calcolata è in media inferiore del 30% rispetto la nominale, superandola del 10% solamente durante le prove a 0.75g, corrispondenti a circa 0.83g reali.

Il rilievo geometrico in Fig 3.49 mostra inoltre la posizione dei tiranti (quadrato grigio) e dei trasduttori: accelerometri in rosso, sensori di spostamento in verde, marker in nero e FBG cerchiati. I dispositivi installati sul basamento del telaio, A10 e A11, non sono qui indicati, ma assumono rispettivamente verso negativo e positivo nel sistema di riferimento adottato.

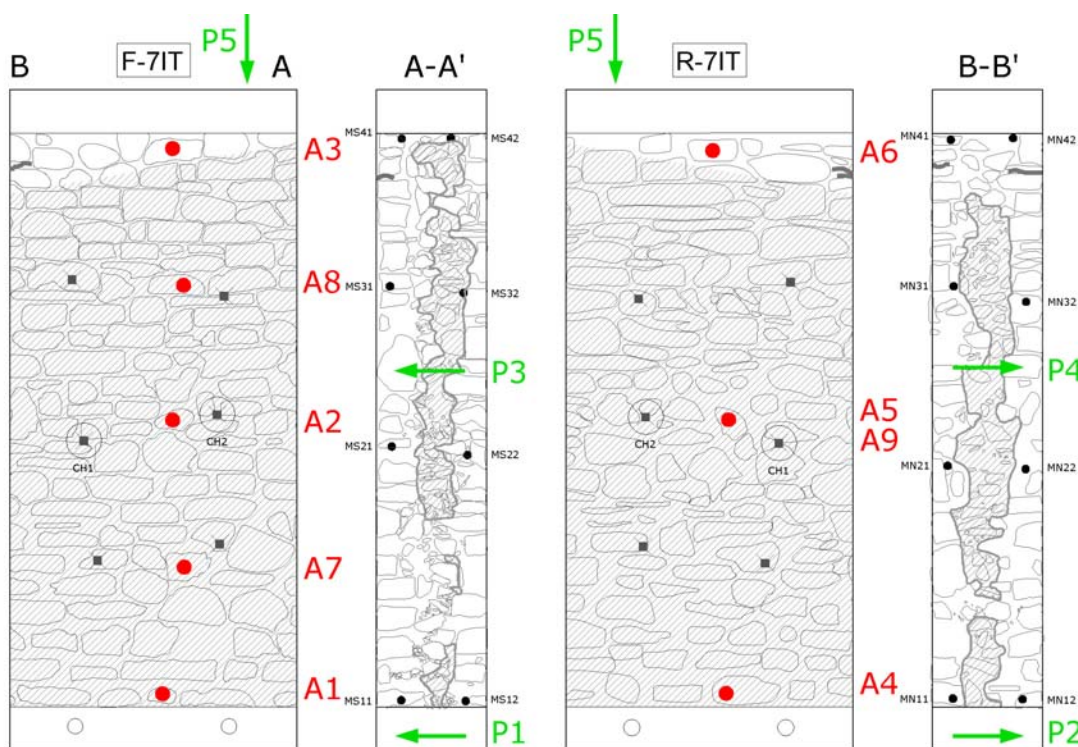
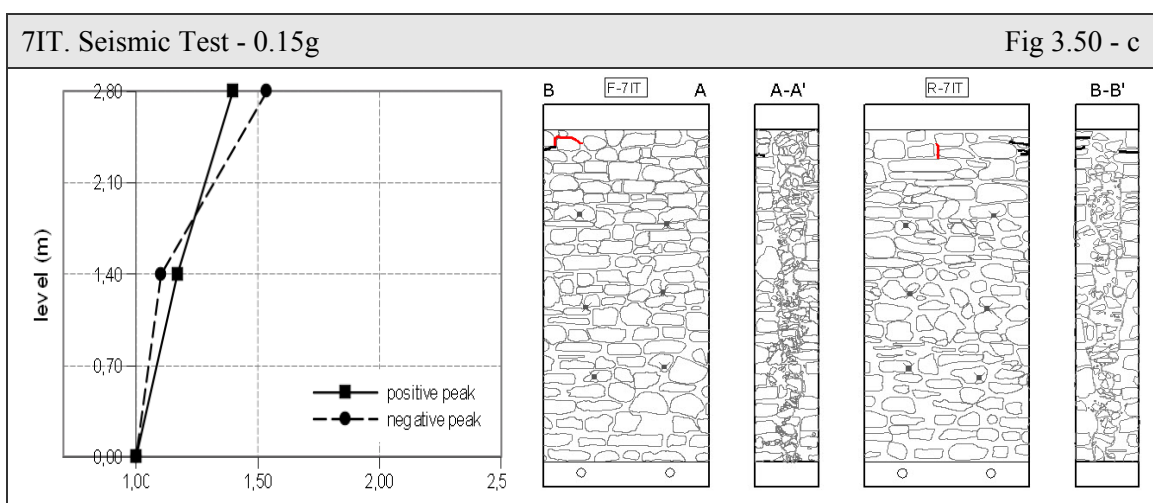
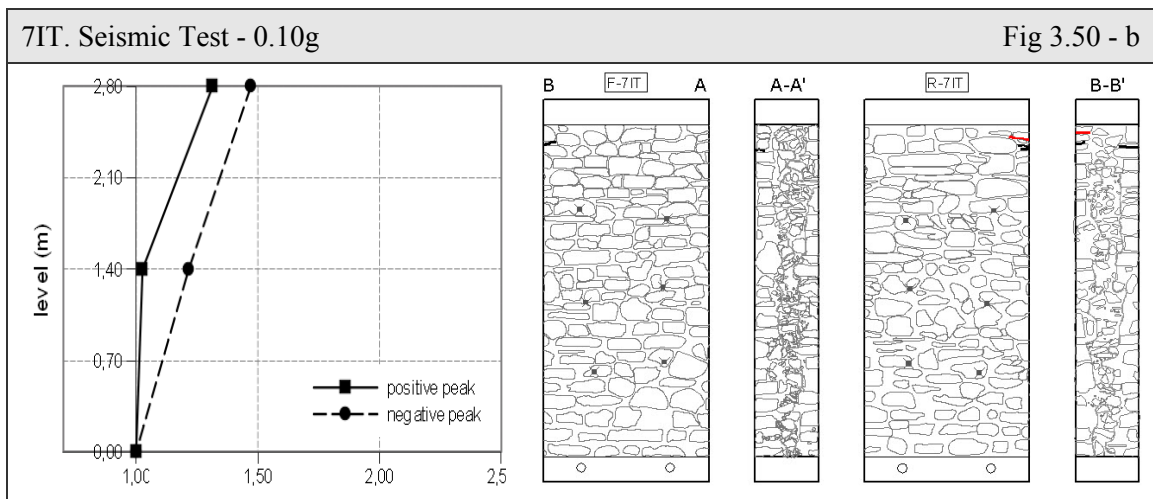
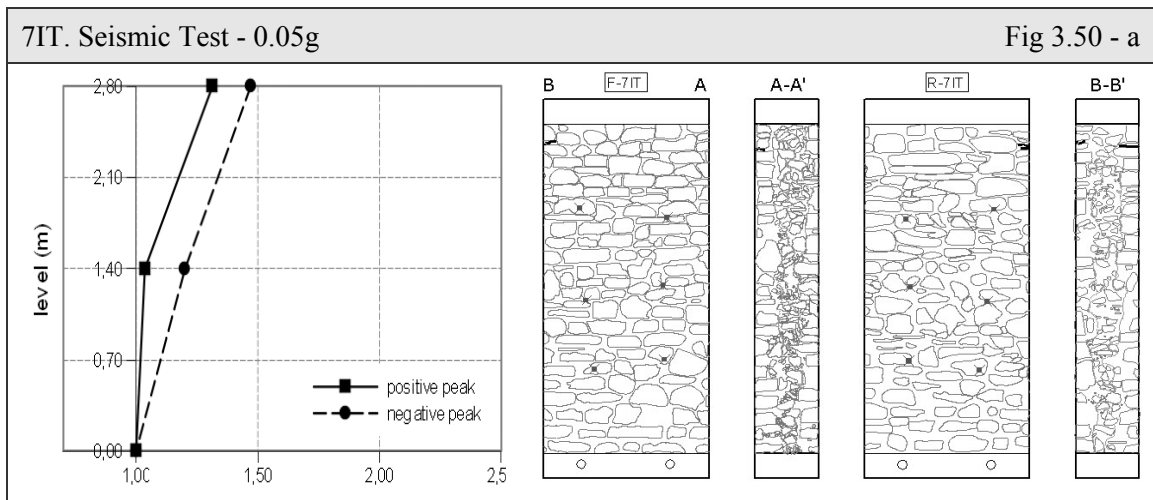


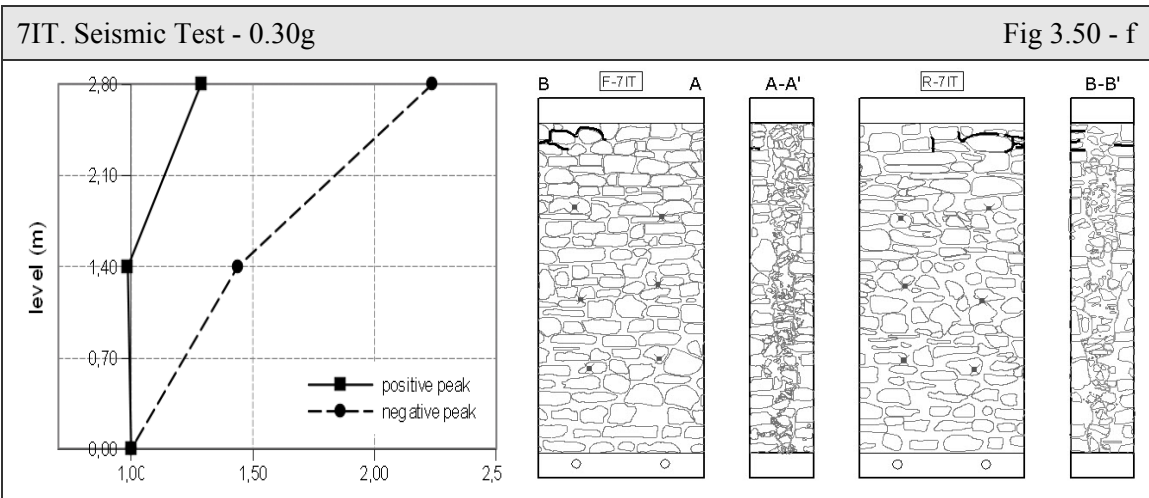
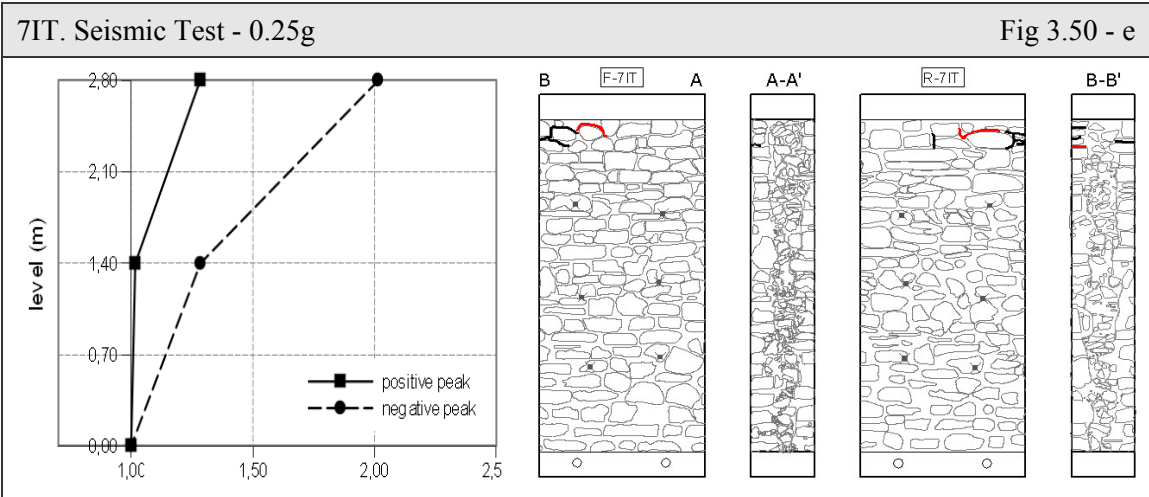
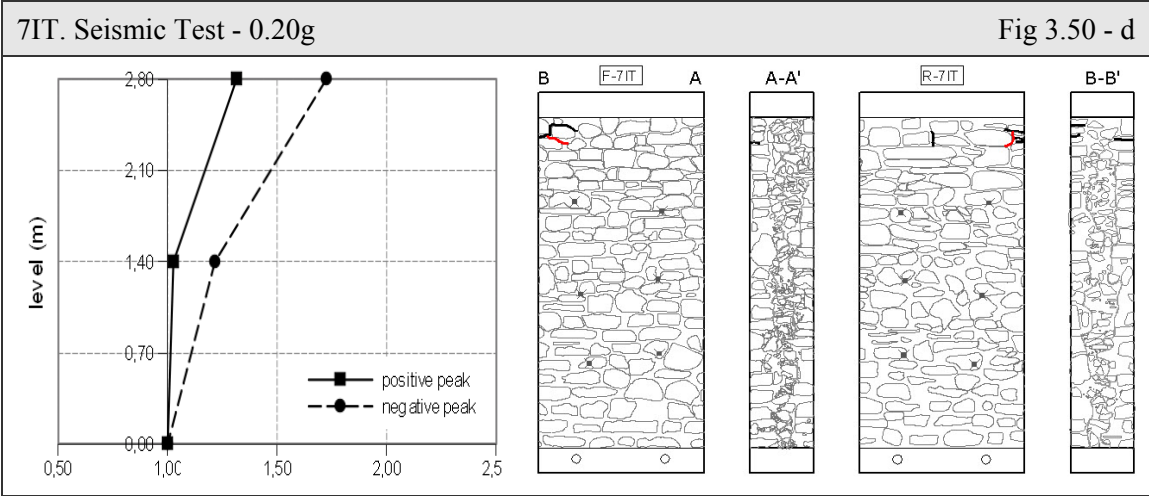
Fig 3.49: Pannello 7IT. Rilievo geometrico con indicazione della posizione e della nomenclatura dei sensori e del quadro fessurativo pre-prova.

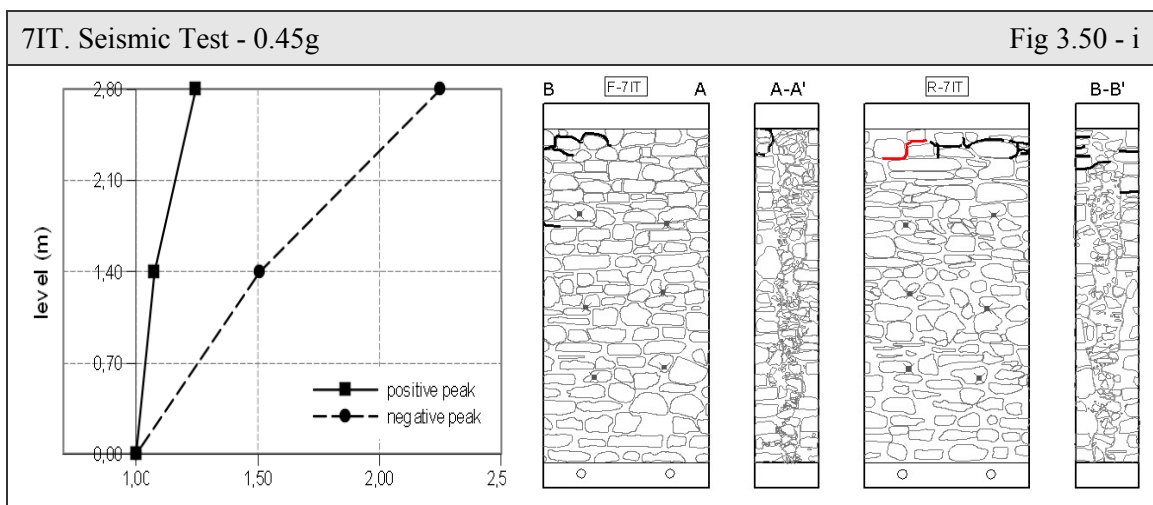
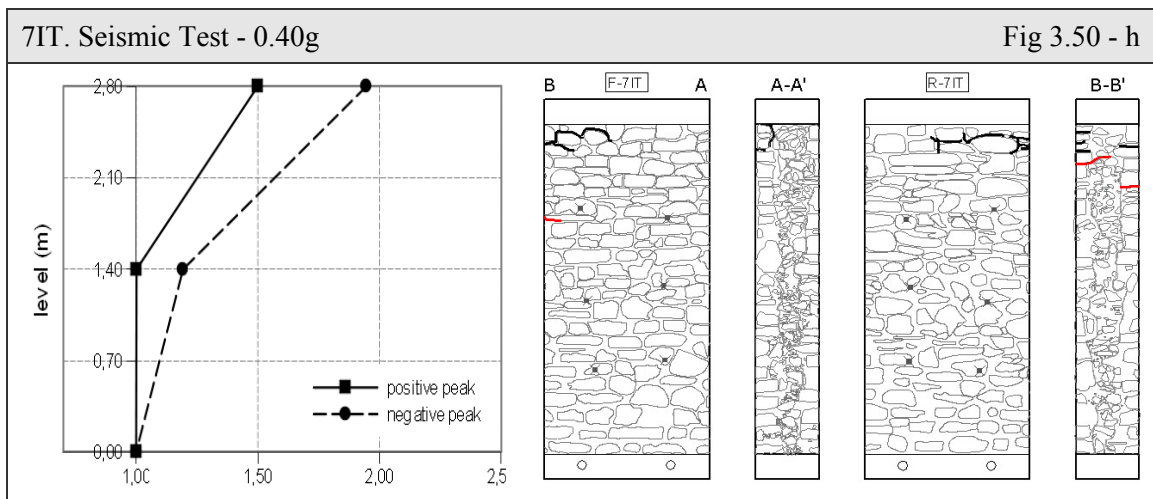
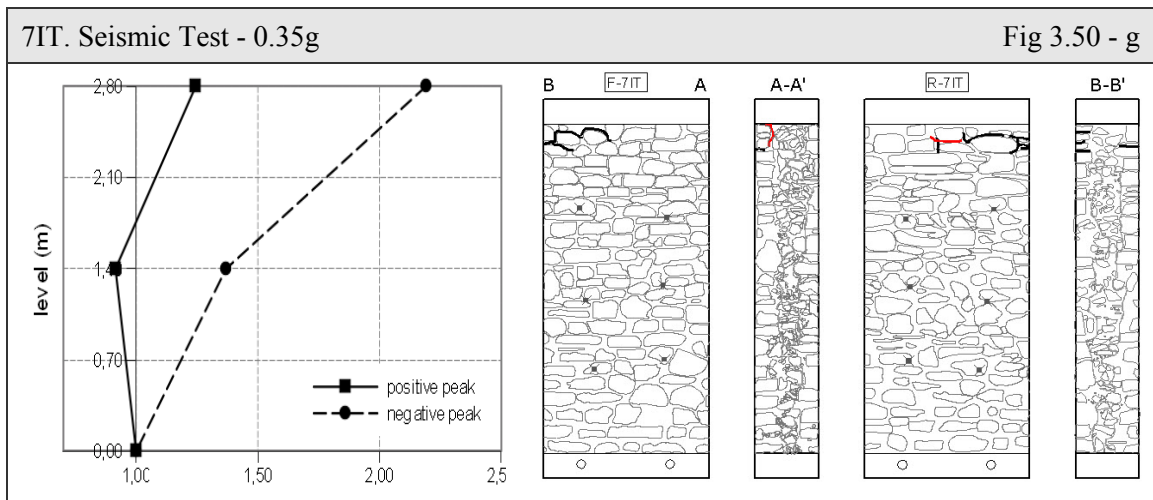
Analisi del Quadro Fessurativo e dei Fattori di Amplificazione

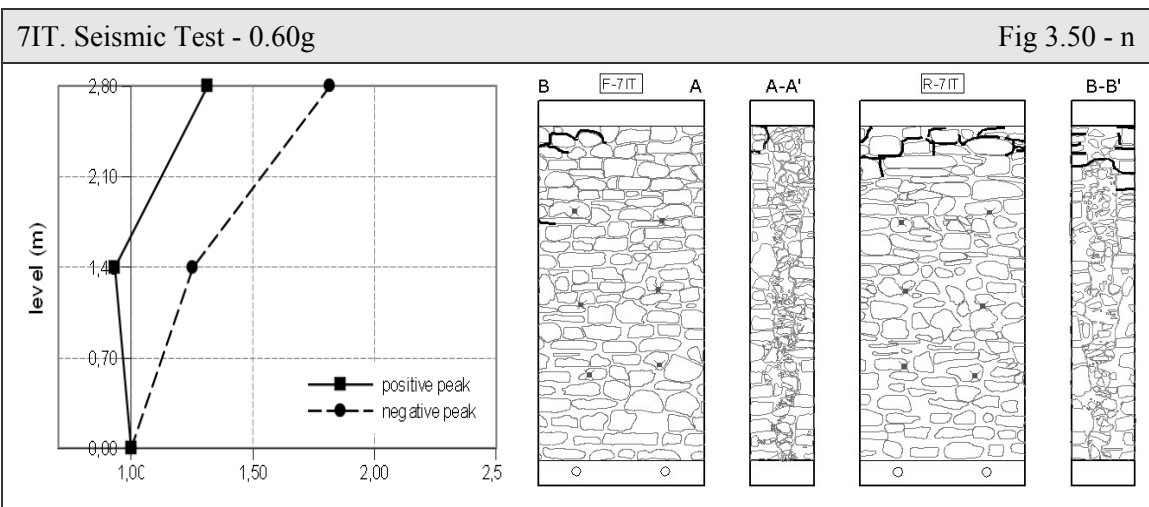
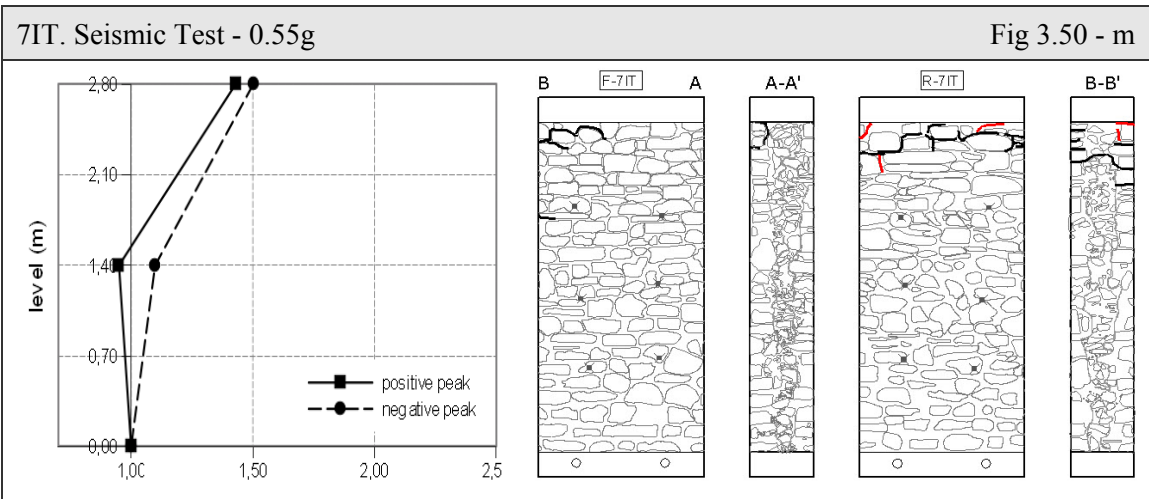
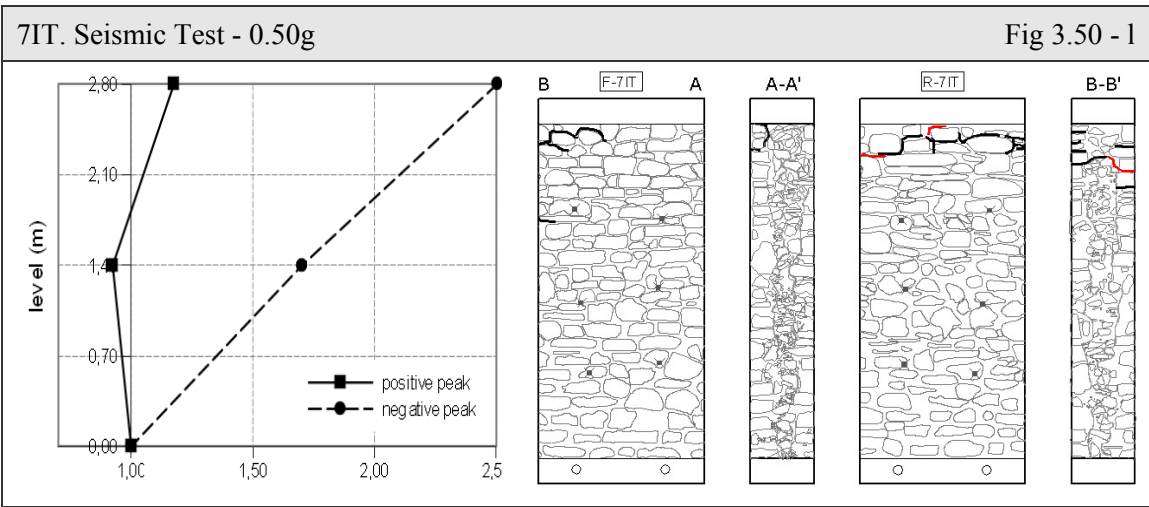
Le principali lesioni osservabili in Fig 3.50 sono dovute a passi di prova compresi tra 0.35g e 0.55g. Le fessurazioni che hanno preceduto la sperimentazione erano limitate, e manifestano le prime propagazioni a partire da 0.10g. Lo sviluppo è graduale ed arriva ad interessare l'intera sommità del retro e parte del fronte solamente a 0.45g, in corrispondenza dell'area meno omogenea per assenza di iniezione (in particolare in sezione B-B'). Come mostrato in Fig 3.52, il collasso non avviene e la muratura mantiene l'integrità globale pur manifestando incrinature localizzate: comportamento ideale per la salvaguardia della vita umana.

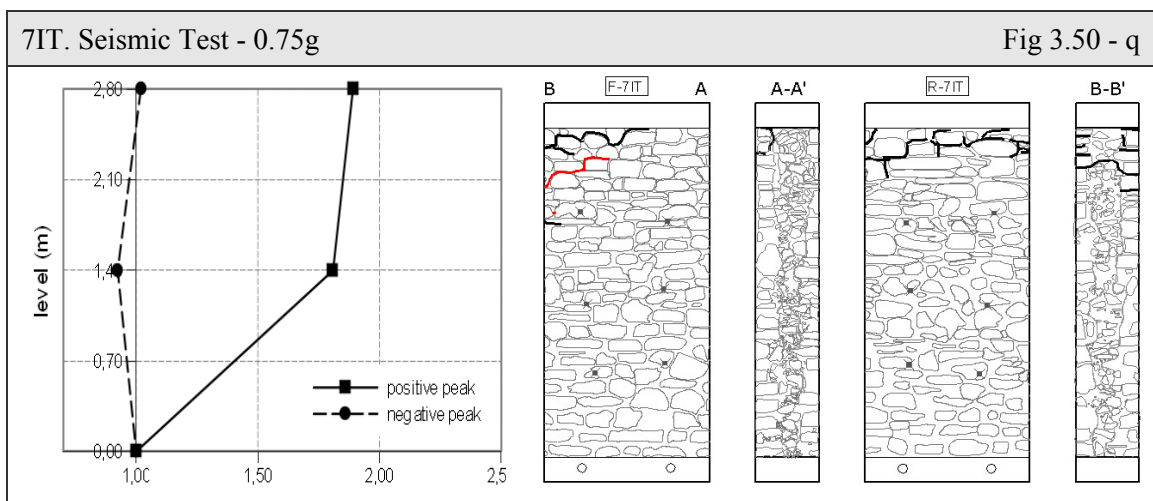
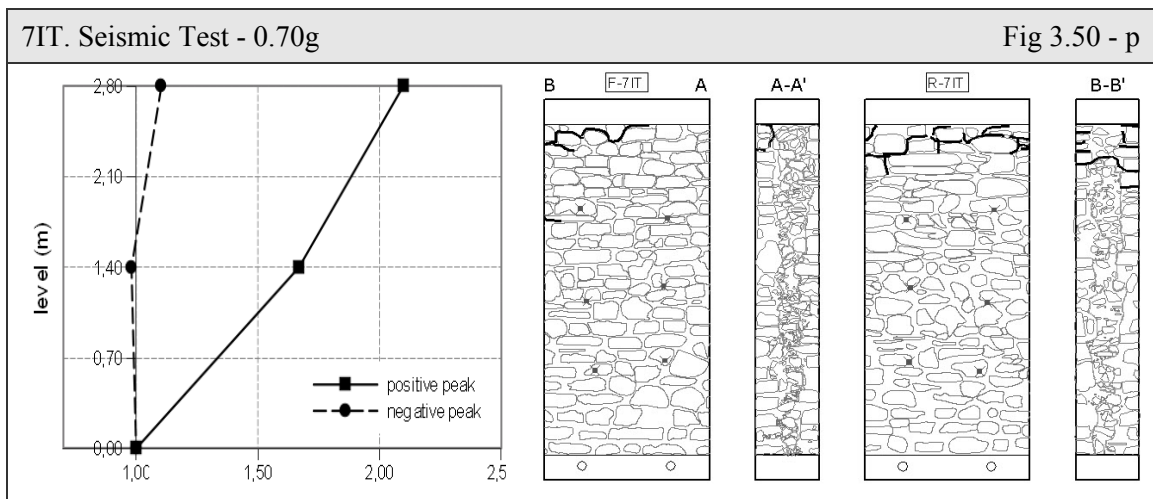
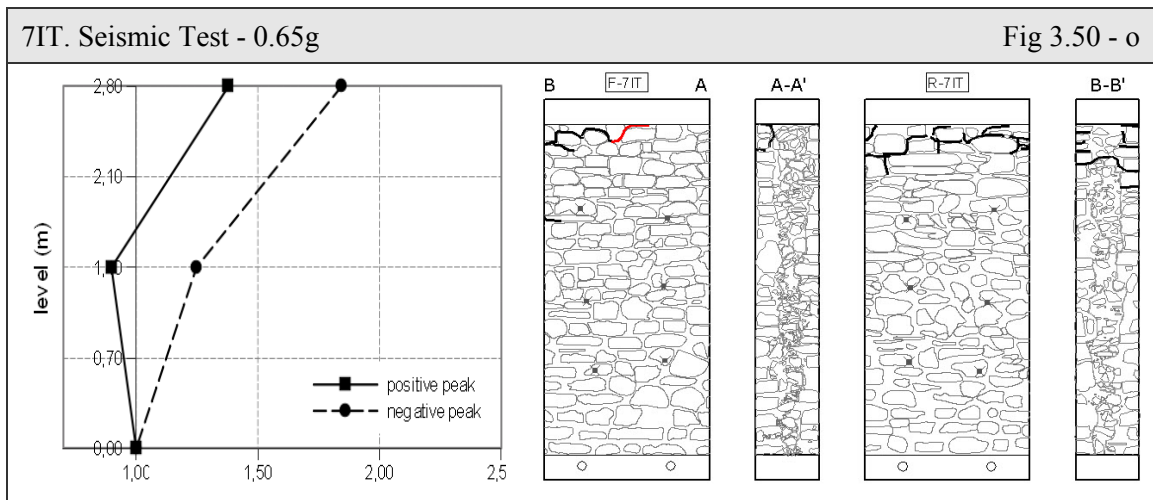
I grafici dei fattori di amplificazione delle accelerazioni (Fig 3.50) illustrano un andamento generalmente rigido sino a 0.20g, con incremento del PGA molto limitato. In seguito si nota una notevole amplificazione linearmente crescente sul verso negativo (il fronte), raggiungendo, a 0.50g, un fattore in sommità di 2.5. Nei passi di prova conclusivi (da 0.70g) si assiste ad un comportamento opposto, con PGA pressoché costante sul verso negativo ed aumento netto nella mezzeria positiva. Complessivamente la crescita è compresa tra 1.0 e 2.0 in metà pannello e tra 1.0 e 2.5 in sommità dei pannelli.

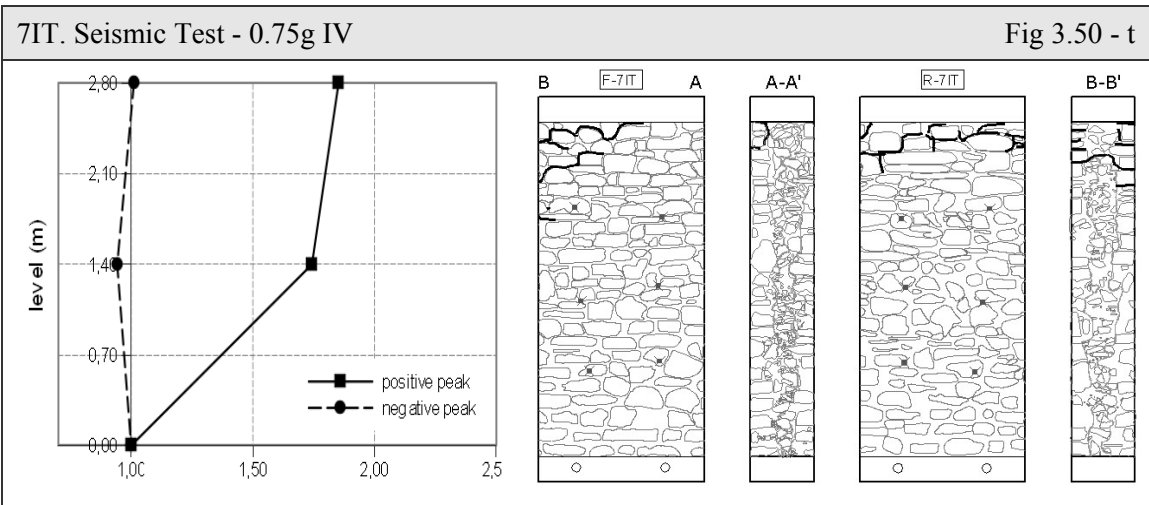
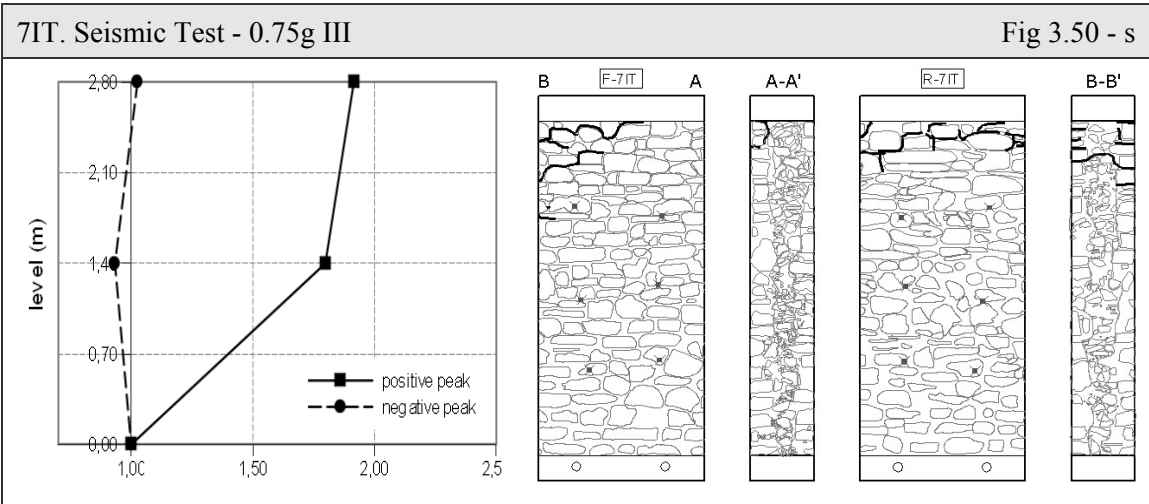
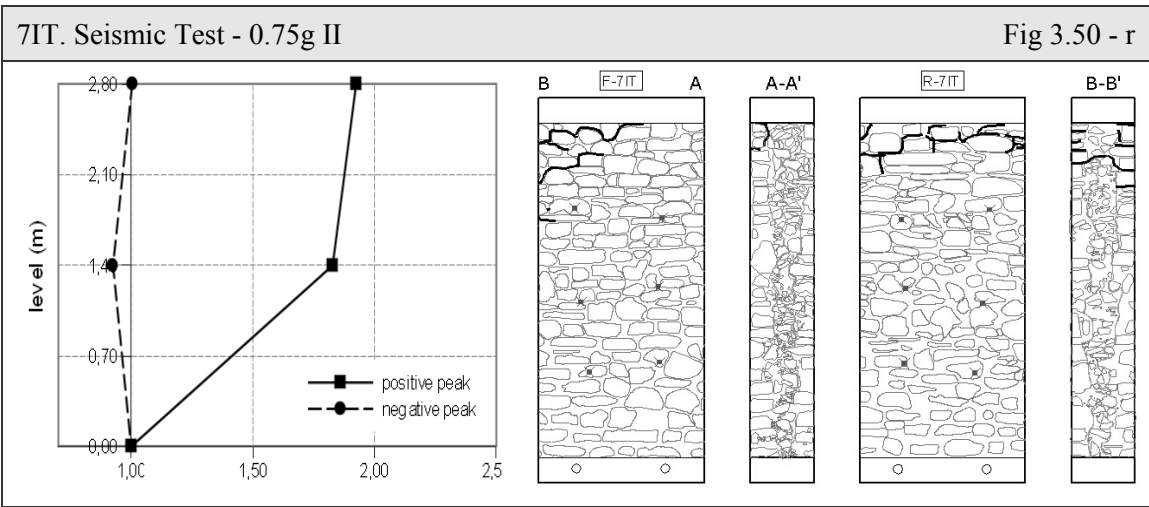












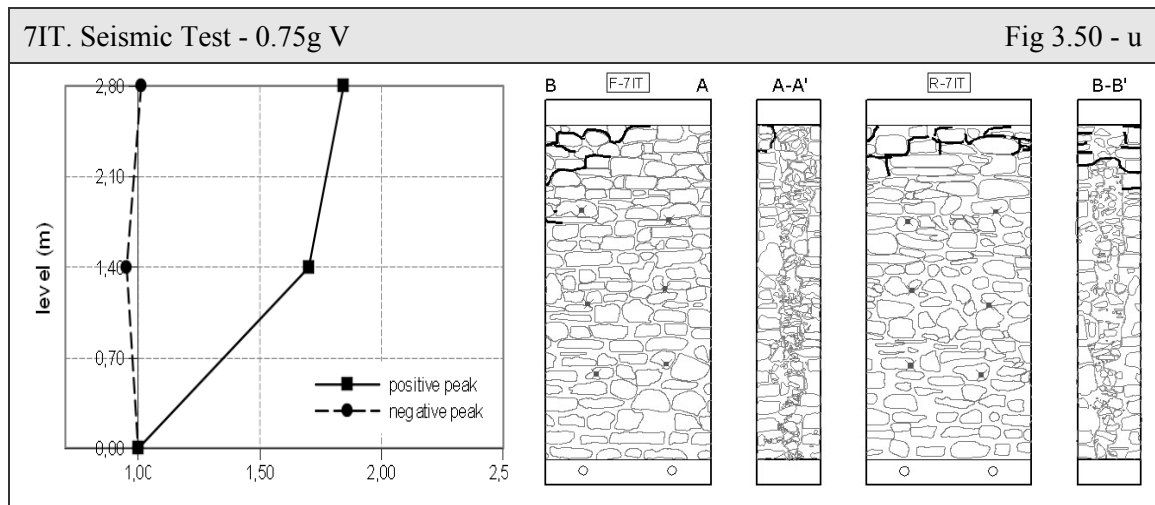


Fig 3.50: Pannello 7IT. Analisi del quadro fessurativo e dell'azione sismica per ogni prova effettuata in laboratorio ENEA. A sinistra: grafico dei fattori di amplificazione.

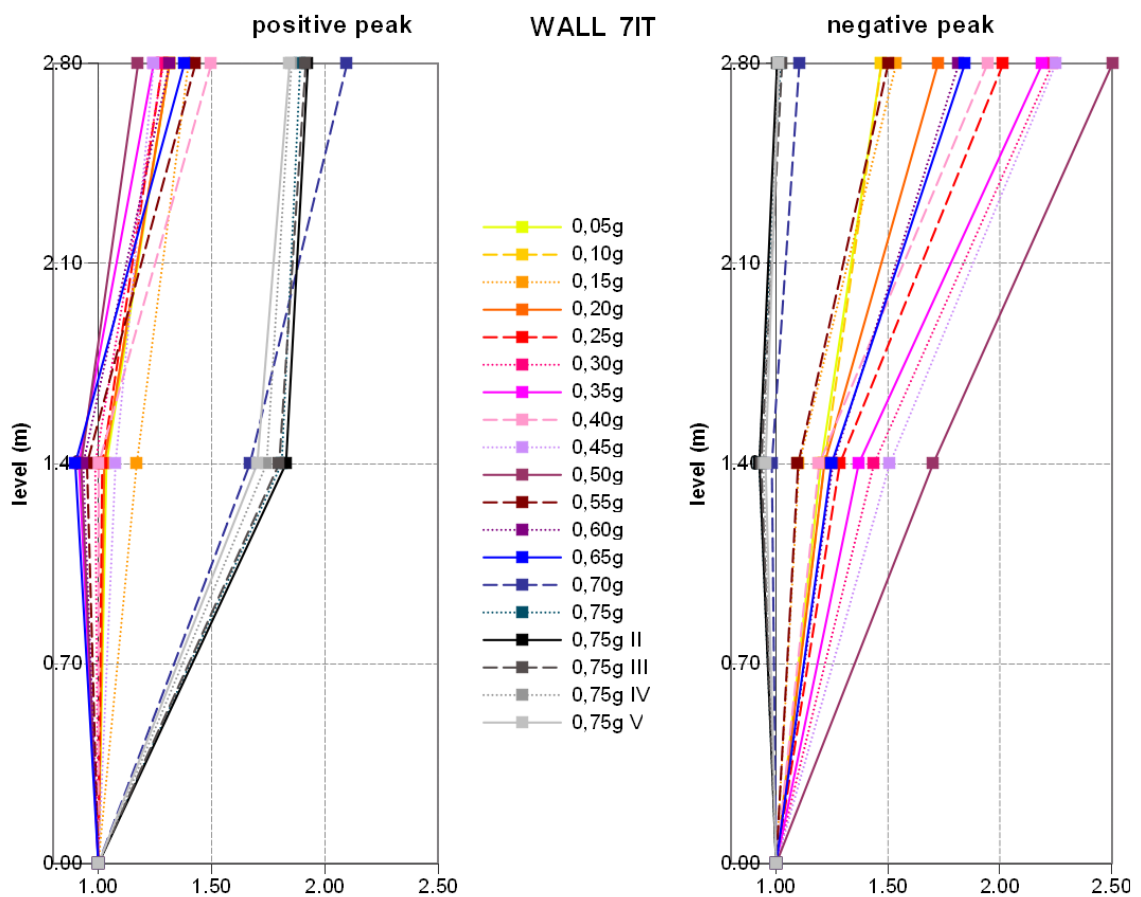


Fig 3.51: Pannello 7IT. Fattori di amplificazione delle accelerazioni calcolati sulla base dei dati registrati dai sensori accelerometrici in laboratorio ENEA.

Il comportamento già esaminato precedentemente ad ogni passo di prova, viene unificato in Fig 3.51. Risulta qui evidente, in particolare nel grafico del picco positivo, il diverso andamento

dei fattori di amplificazione stimati prima e dopo l'input a 0.65g. Nonché lo sviluppo contrapposto tra valori massimi e minimi.



Fig 3.52: Pannello 7IT. Rilievo fotografico a prova conclusa, 0.75g (fronte-sezione B-B'-retro).

Analisi degli spostamenti locali

In questo caso di studio si misurano abbassamenti considerevolmente limitati in sommità (valori dell'ordine di 10^{-2} mm). Diversamente, si osserva sia in Fig 3.53 e Fig 3.55 che gli spostamenti orizzontali assumono un incremento progressivo che interessa l'intero pannello in modo uniforme fino ad un apertura di 0.62 mm a 0.70g (32.34 kN). Al passo di prova successivo (0.75g) si osserva un aumento notevole sulla sezione sinistra (B-B') che procede costante a circa 2.20 mm (corrispondente ad un valor medio di 1.39 mm). Osservando invece lo sviluppo della forza agente in Fig 3.54 si ha un comportamento affine ma meno graduale: la forza rimane limitata tra 10 kN e 20 kN, con un successivo salto a 32 kN a 0.70g. Vengono considerati solamente i dati fino a 0.75g, successivamente la forza rimane costante a circa 37 kN.

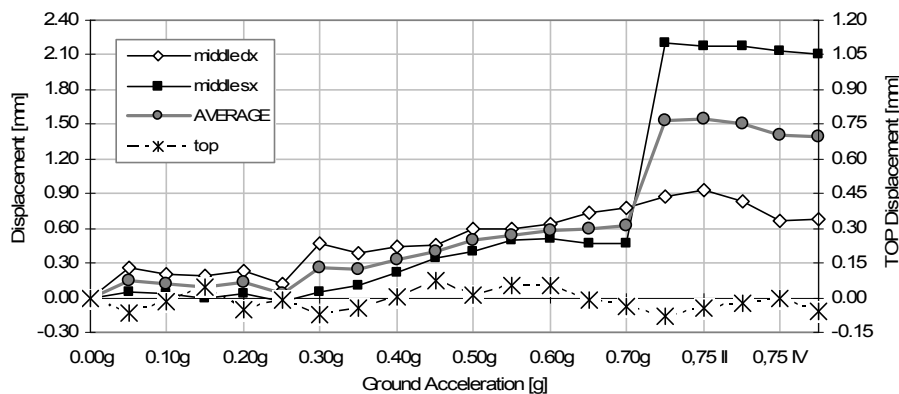


Fig 3.53: Pannello 7IT. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con il PGA, ad ogni prova di laboratorio.

In Tab 3.18 sono riportate le misurazioni dei sensori in mezzeria e in sommità, con stima del dato relativo a partire da quello assoluto rilevato. La media calcolata tra i trasduttori P3 e P4 è utile ai fini del confronto conclusivo al paragrafo § 3.5.

Tab 3.18: Pannello 7IT. Spostamenti ultimi, assoluti e relativi, registrati dai sensori analogici in mezzeria e in sommità durante ogni singola prova. Valori in mm.

Wall 7IT	Absolute Data			Average	Relative Data		
Step [g]	P3 middle dx	P4 middle sx	P5 top	middle sensors	P3 middle dx	P4 middle sx	P5 top
0.05g	0.25	0.06	-0.07	0.15	0.25	0.06	-0.07
0.10g	0.21	0.03	-0.02	0.12	-0.04	-0.02	0.05
0.15g	0.19	0.00	0.04	0.09	-0.02	-0.03	0.06
0.20g	0.23	0.04	-0.05	0.14	0.04	0.04	-0.09
0.25g	0.12	-0.04	-0.01	0.04	-0.11	-0.08	0.04
0.30g	0.47	0.05	-0.07	0.26	0.35	0.09	-0.07
0.35g	0.38	0.10	-0.05	0.24	-0.08	0.06	0.03
0.40g	0.44	0.22	0.00	0.33	0.06	0.11	0.05
0.45g	0.45	0.34	0.07	0.40	0.00	0.13	0.07
0.50g	0.60	0.41	0.01	0.50	0.15	0.06	-0.06
0.55g	0.59	0.50	0.05	0.55	-0.01	0.10	0.04
0.60g	0.63	0.52	0.05	0.57	0.05	0.01	0.00
0.65g	0.73	0.47	-0.01	0.60	0.10	-0.05	-0.07
0.70g	0.78	0.47	-0.03	0.62	0.05	0.00	-0.02
0.75g	0.87	2.20	-0.08	1.53	0.09	1.73	-0.04
0.75g II	0.93	2.17	-0.04	1.55	0.06	-0.03	0.03
0.75g III	0.83	2.17	-0.02	1.50	-0.10	0.00	0.02
0.75g IV	0.67	2.13	0.00	1.40	-0.16	-0.04	0.02
0.75g V	0.67	2.11	-0.06	1.39	0.00	-0.02	-0.06

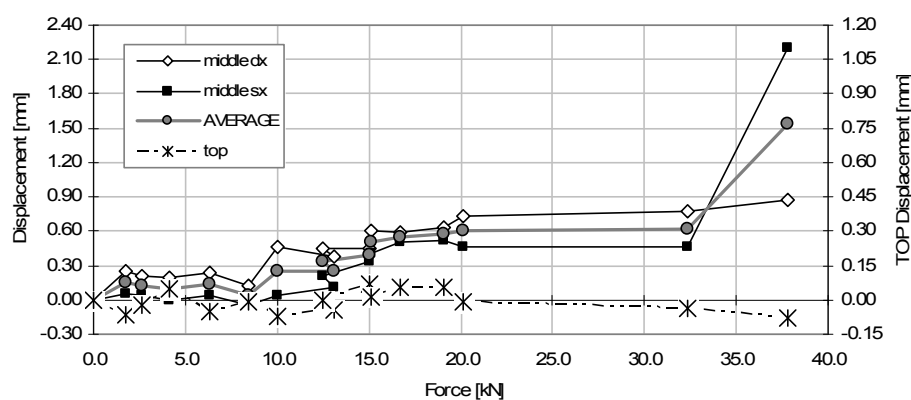


Fig 3.54: Pannello 7IT. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con la forza agente, ad ogni prova di laboratorio.

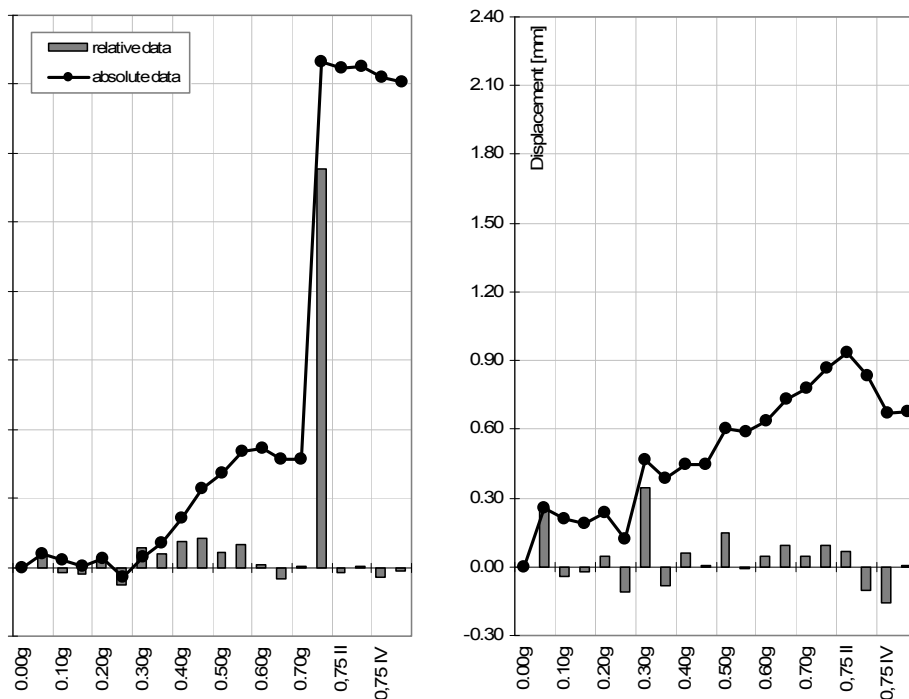


Fig 3.55: Pannello 7IT. Confronto tra gli spostamenti ultimi assoluti e relativi, registrati in mezzeria dai sensori analogici. Da sinistra: spostamenti del sensore P4 (di sinistra) e del sensore P3 (di destra).

Analisi delle deformazioni nei tirantini

Le misure effettuate con estensimetri FBG applicati sulle barre metalliche, sono fornite (Tab 3.19) in questo caso solamente dal sensore Ch2, in quanto l'altro è stato danneggiato durante l'installazione. Come illustrato in Fig 3.56 la risposta rilevata ha sviluppo negativo, indicando quindi una riduzione della deformazione del tirante, e conseguentemente anche della tensione, che corrisponde ad un rilassamento della barra. Tale comportamento è contrastante con l'apertura in mezzeria misurata dai sensori di spostamento (Fig 3.54). La spiegazione può essere quella di un assestamento del sistema dado-rondella sulla superficie esterna del muro (per elevata scabrosità o scheggiamento della pietra di appoggio). Si raggiungono così valori massimi di circa $-4.6 \mu\text{Strain}$ e -0.97 MPa .

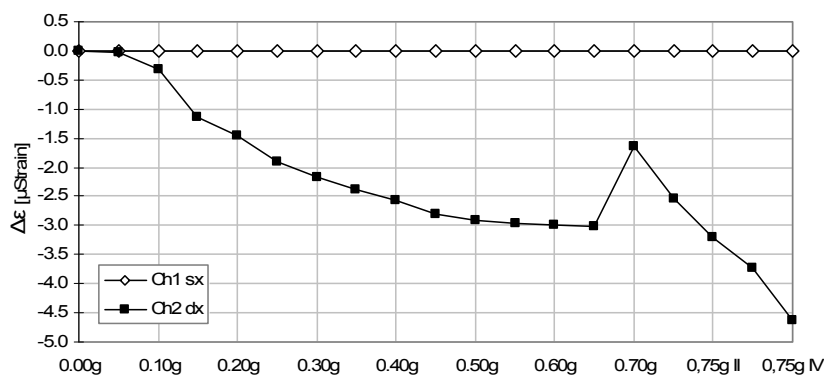


Fig 3.56: Pannello 7IT. Deformazioni assolute registrate nei tirantini antiespulsivi in mezzeria dai sensori FBG, ad ogni prova di laboratorio.

Tab 3.19: Pannello 7IT. Deformazioni assolute e relative, registrate dai sensori FBG nei tiranti, durante ogni singola prova. Il valor medio è calcolato tra i dati assoluti.

Wall 7IT	Strain $\Delta\epsilon$ [μ Strain]				
	Step [g]	Absolute Data		Average	Relative Data
	Ch1 sx	Ch2 dx		Ch1 sx	Ch2 dx
0.05g	0.000	-0.024	-0.024	0.000	-0.024
0.10g	0.000	-0.331	-0.331	0.000	-0.307
0.15g	0.000	-1.133	-1.133	0.000	-0.801
0.20g	0.000	-1.470	-1.470	0.000	-0.337
0.25g	0.000	-1.908	-1.908	0.000	-0.438
0.30g	0.000	-2.177	-2.177	0.000	-0.270
0.35g	0.000	-2.393	-2.393	0.000	-0.215
0.40g	0.000	-2.556	-2.556	0.000	-0.163
0.45g	0.000	-2.804	-2.804	0.000	-0.248
0.50g	0.000	-2.907	-2.907	0.000	-0.103
0.55g	0.000	-2.960	-2.960	0.000	-0.054
0.60g	0.000	-2.996	-2.996	0.000	-0.036
0.65g	0.000	-3.025	-3.025	0.000	-0.029
0.70g	0.000	-1.639	-1.639	0.000	1.386
0.75g	0.000	-2.548	-2.548	0.000	-0.908
0.75g II	0.000	-3.196	-3.196	0.000	-0.649
0.75g III	0.000	-3.732	-3.732	0.000	-0.535
0.75g IV	0.000	-4.626	-4.626	0.000	-0.894

Tab 3.20: Pannello 7IT. Tensioni assolute e relative, registrate dai sensori FBG nei tiranti, durante ogni singola prova. Il valor medio è calcolato tra i dati assoluti.

Wall 7IT	Stress $\Delta\sigma$ [MPa]				
	Step [g]	Absolute Data		Average	Relative Data
	Ch1 sx	Ch2 dx		Ch1 sx	Ch2 dx
0.05g	0.000	-0.005	-0.005	0.000	-0.005
0.10g	0.000	-0.070	-0.070	0.000	-0.064
0.15g	0.000	-0.238	-0.238	0.000	-0.168
0.20g	0.000	-0.309	-0.309	0.000	-0.071
0.25g	0.000	-0.401	-0.401	0.000	-0.092
0.30g	0.000	-0.457	-0.457	0.000	-0.057
0.35g	0.000	-0.502	-0.502	0.000	-0.045
0.40g	0.000	-0.537	-0.537	0.000	-0.034
0.45g	0.000	-0.589	-0.589	0.000	-0.052
0.50g	0.000	-0.610	-0.610	0.000	-0.022
0.55g	0.000	-0.622	-0.622	0.000	-0.011
0.60g	0.000	-0.629	-0.629	0.000	-0.008
0.65g	0.000	-0.635	-0.635	0.000	-0.006
0.70g	0.000	-0.344	-0.344	0.000	0.291
0.75g	0.000	-0.535	-0.535	0.000	-0.191
0.75g II	0.000	-0.671	-0.671	0.000	-0.136
0.75g III	0.000	-0.784	-0.784	0.000	-0.112
0.75g IV	0.000	-0.971	-0.971	0.000	-0.188

3.4.2. Wall 8IT

Rispetto agli altri pannelli iniettati, in questo caso la miscela è confluita completamente nei vuoti del nucleo. Prima di analizzare i risultati si riporta qualche nota riguardo la fase esecutiva delle sperimentazioni dinamiche. Al tentativo di realizzare una prova con accelerazione massima nominale pari a 0.80g è avvenuto il blocco della tavola vibrante per raggiungimento del suo limite d'esercizio. Per tale motivo si è ripetuto lo 0.75g, senza comunque giungere a collasso. Infine non è stata effettuata la prova a 0.35g, perciò mancano le rilevazioni di tutti i trasduttori per tale intensità sismica.

In Tab 3.21 si riportano le stime delle forze agenti ad ogni passo di prova, e l'effettivo PGA implementato dalla tavola vibrante, valutato con indice di dispersione medio pari all'8% (CV). L'accelerazione reale è in media inferiore del 25% rispetto la nominale. Questi dati sono stati calcolati con le misure degli accelerometri alla base fino all'intensità di 0.50g (A1 e A4). Successivamente i trasduttori di accelerazione erano stati rimossi, perciò i valori di PGA e forza reali sono stati determinati grazie ai sensori installati sul basamento in acciaio (A10 e A11), i quali avevano entrambi verso positivo.

Tab 3.21: Pannello 7IT. Accelerazione al suolo nominale e reale, frequenza di acquisizione, deviazione standard e coefficiente di variazione, forza agente.

Peak Ground Acceleration Nominal [g]	Real [g]	Frequency [Hz]	Standard Deviation [g]	Coeff. of Variation	Force [kN]
0.05	0,036	200	0,002	5,39 %	1,62
0.10	0,057	200	0,003	5,87 %	2,55
0.15	0,094	200	0,006	6,17 %	4,16
0.20	0,150	200	0,016	10,86 %	6,68
0.25	0,196	200	0,023	11,87 %	8,69
0.30	0,251	200	0,024	9,57 %	11,17
0.40	0,280	200	0,025	9,05 %	12,44
0.45	0,337	200	0,026	7,66 %	14,96
0.50	0,370	200	0,018	4,81 %	16,43
0.55	0,367	200	0,050	13,72 %	16,31
0.60	0,426	200	0,052	12,10 %	18,94
0.65	0,437	200	0,069	15,83 %	19,42
0.70	0,587	200	0,058	9,81 %	26,08
0.75	0,567	200	0,024	4,24 %	25,20
0.75 II	0.667	200	0.114	17.08 %	29.62

In Fig 3.57 è rappresentato il rilievo geometrico del pannello in esame. In esso sono indicati i tiranti (quadrato grigio) e la posizione, il verso e la nomenclatura dei sensori (accelerometri in rosso, analogici in verde, marker in nero ed FBG cerchiati). Infine si riporta il quadro fessurativo pre-prova e l'area soggetta ad iniezione, tratteggiata in grigio, la quale interessa completamente il nucleo.

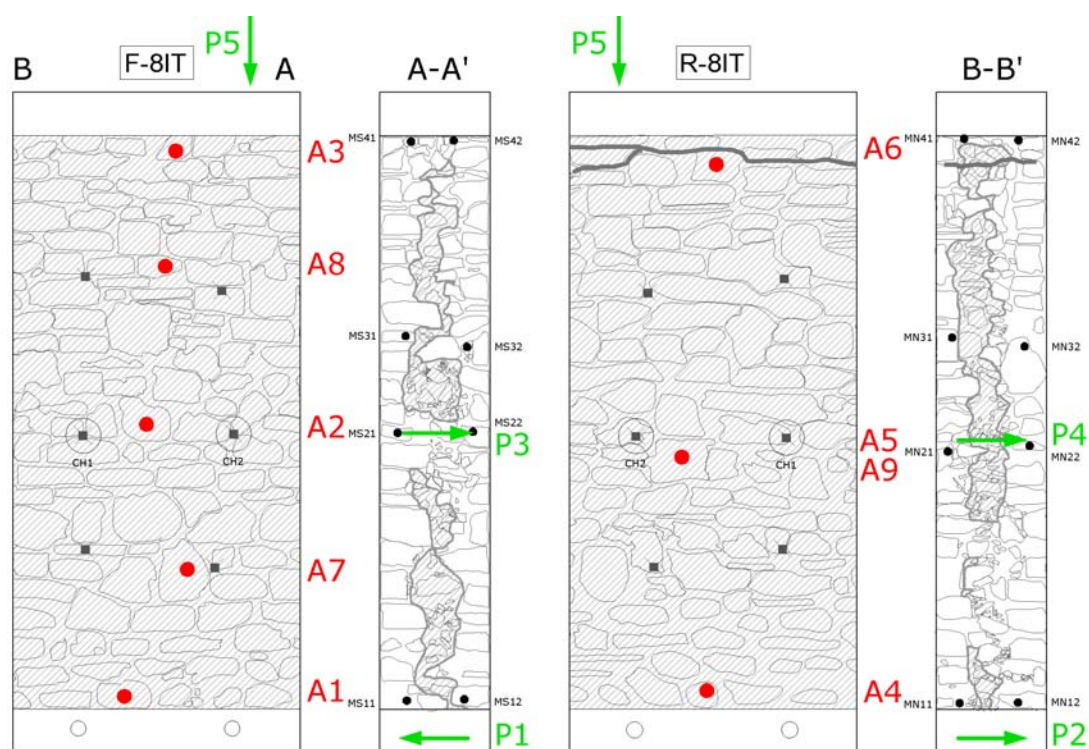


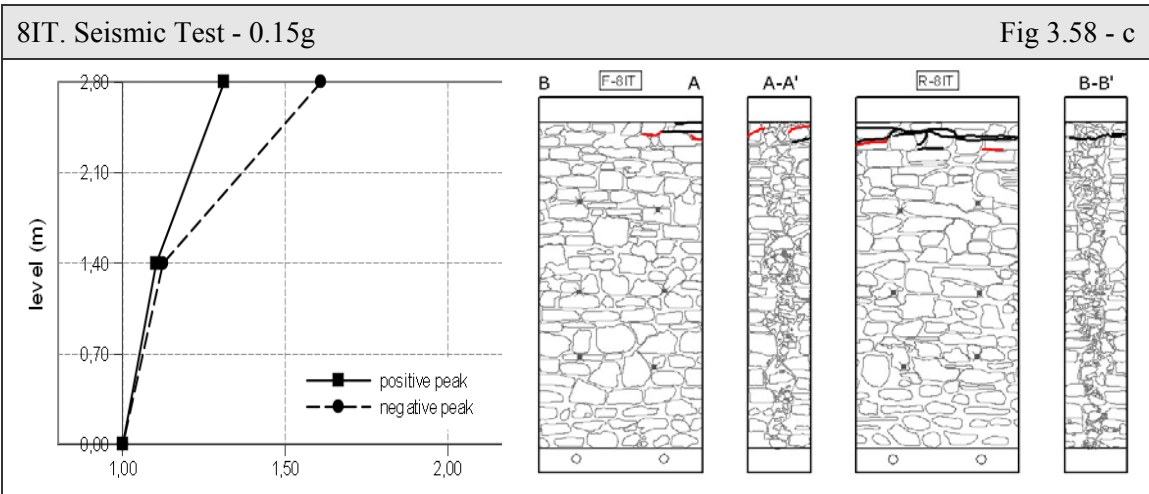
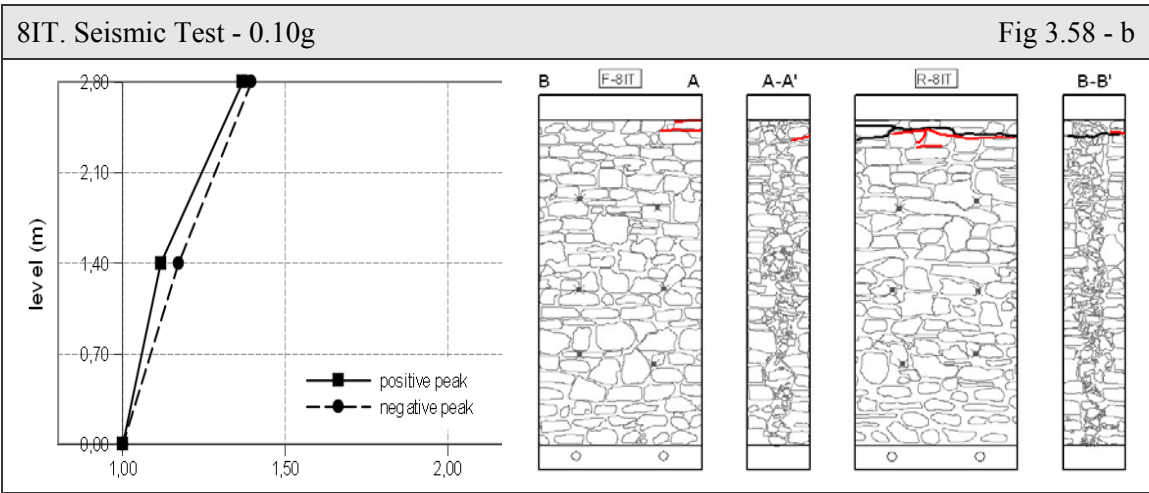
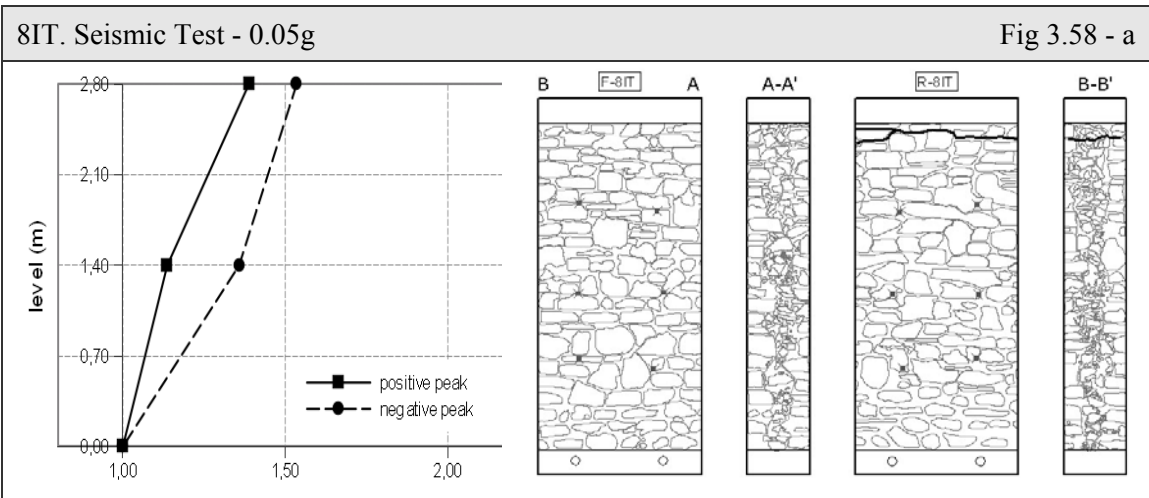
Fig 3.57: Pannello 8IT. Rilievo geometrico con indicazione della posizione e della nomenclatura dei sensori e del quadro fessurativo pre-prova.

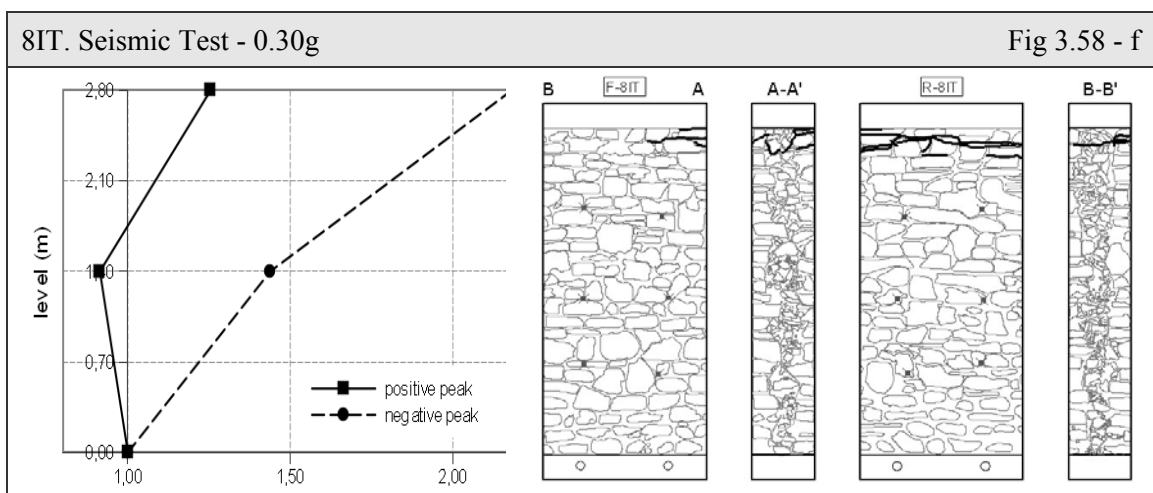
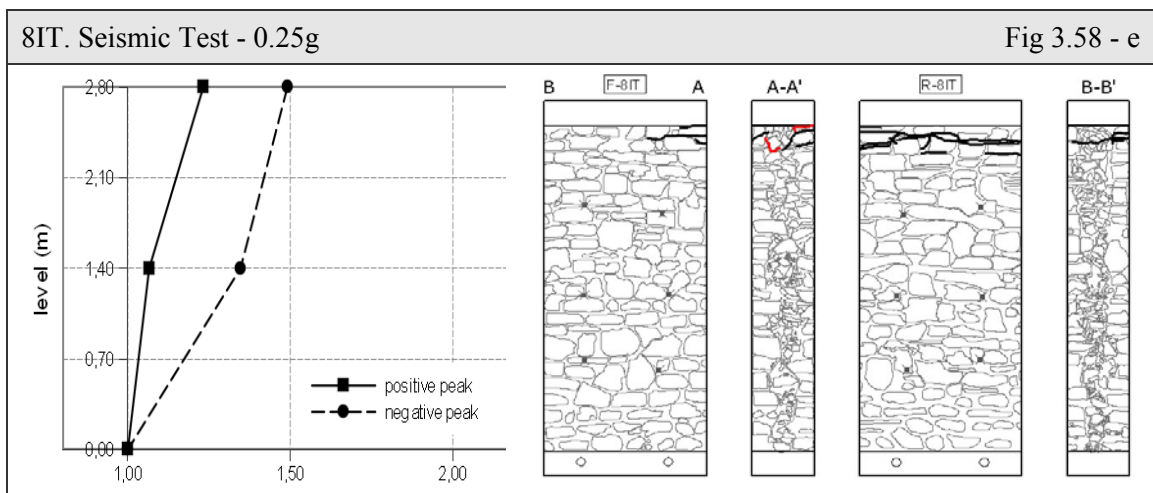
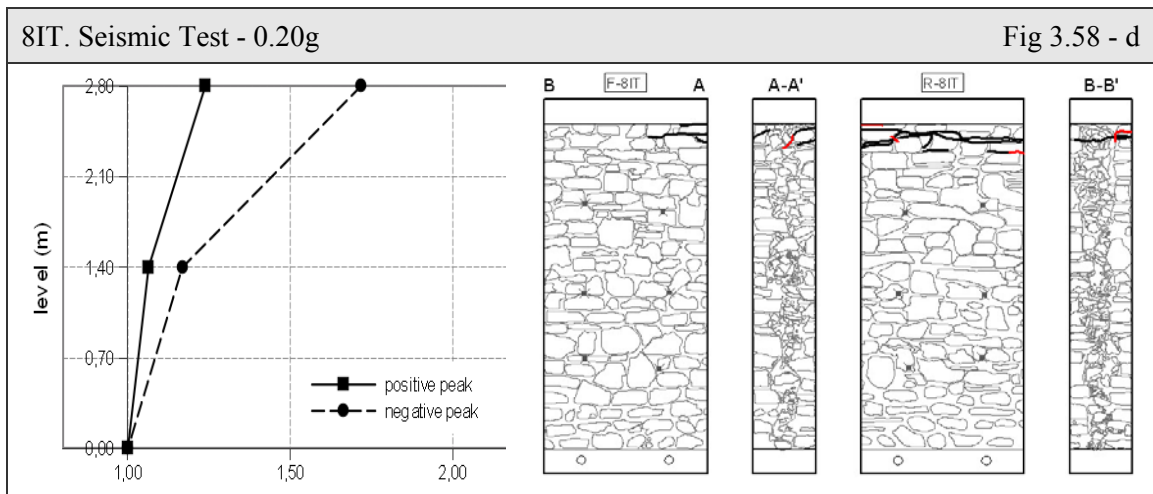
Analisi del Quadro Fessurativo e dei Fattori di Amplificazione

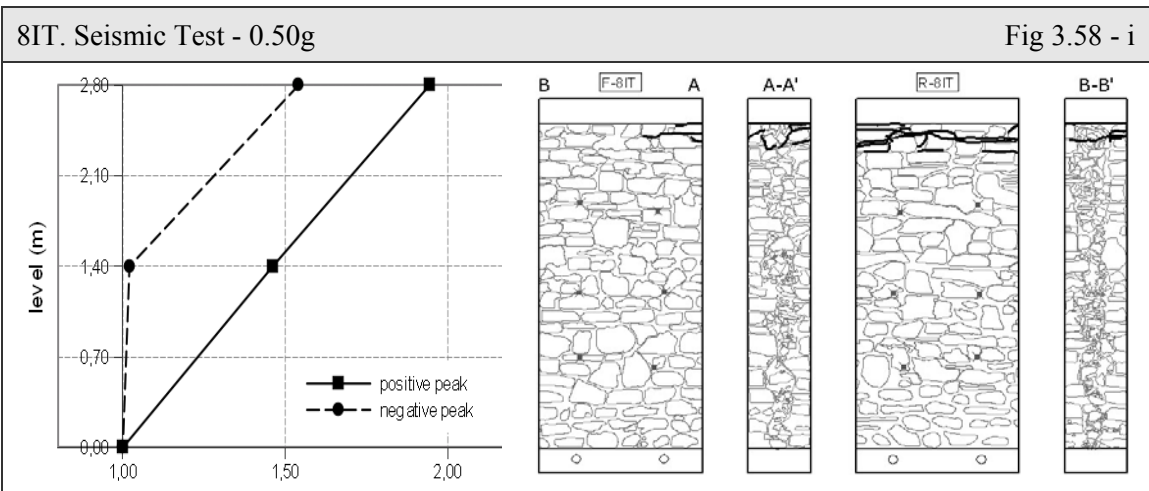
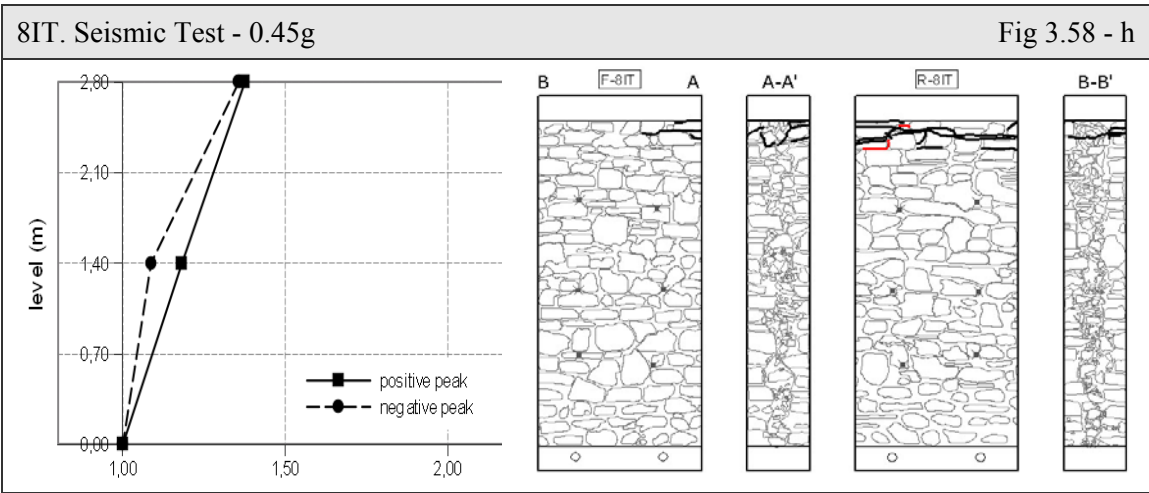
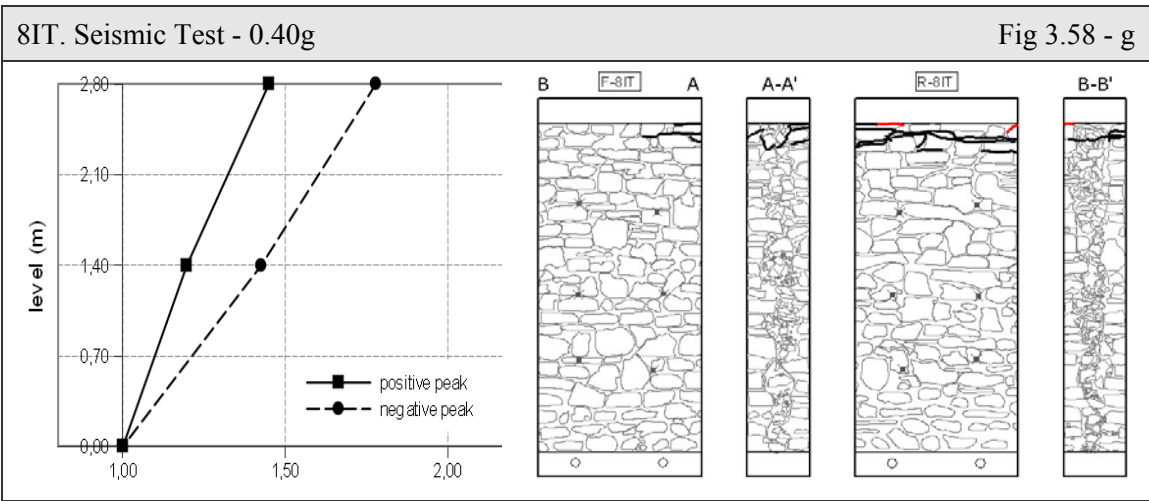
Dal quadro fessurativo pre-prova (Fig 3.57) si è osservato che il danno si è concentrato sul retro e sulla sezione B-B'. Lo sviluppo del successivo danneggiamento è rappresentato in Fig 3.58. Già dalla prova a 0.10g, le lesioni aumentano in modo rilevante sulla sommità posteriore e si propagano sulle sezioni e in parte sul fronte. Nonostante la situazione sembri critica (Fig 3.60), il collasso non avviene, e come nel pannello 7IT, l'elemento murario mantiene l'integrità globale.

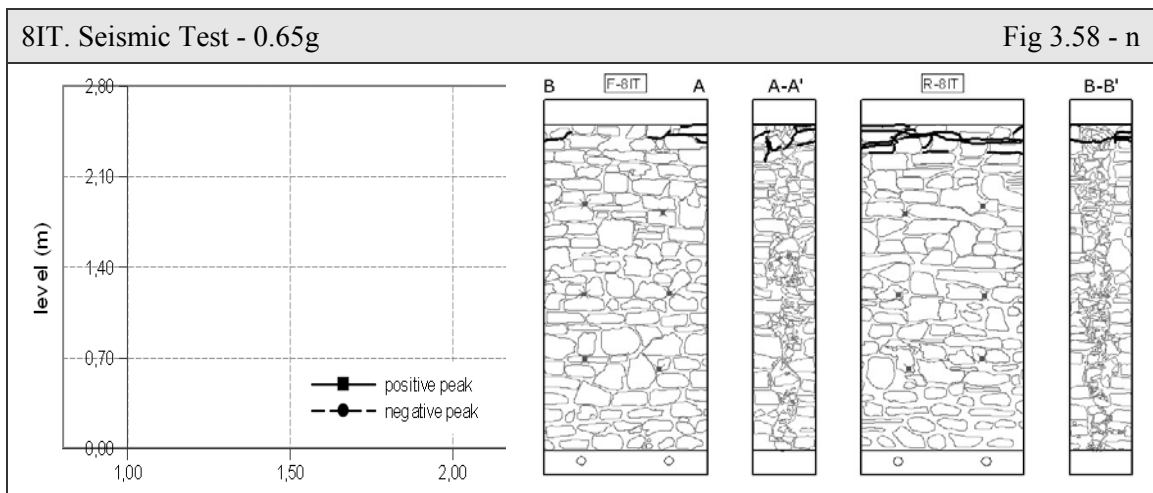
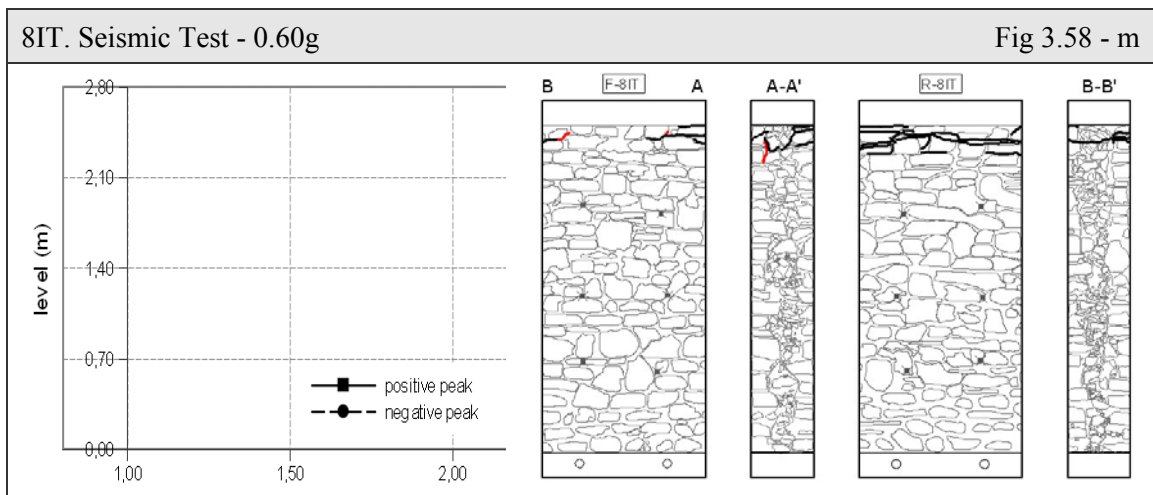
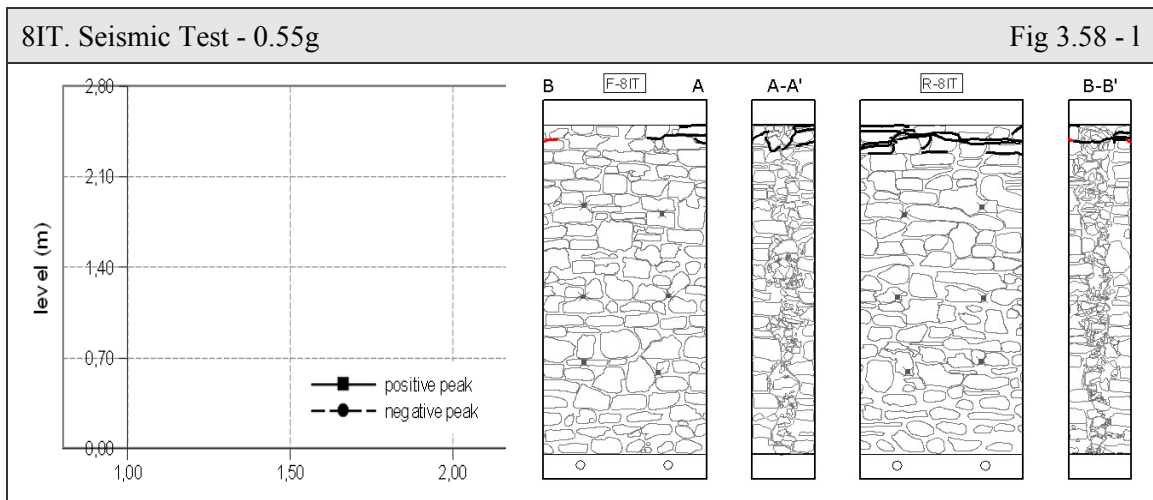
Il calcolo dei fattori di amplificazione delle accelerazioni è stato possibile solamente sino a 0.50g, passo in cui i relativi sensori sono stati rimossi. I grafici (Fig 3.58) risultano sempre crescenti, con valori compresi tra 1.0 e 1.5 in mezzeria e tra 1.2 e 2.0 in sommità dei pannelli. La differenziazione tra picco positivo e negativo è basata sul sistema di riferimento adottato: il picco positivo è quello che induce il retro al collasso fuori-piano.

Il comportamento globale, almeno per i 3/5 dell'intera sperimentazione (fino a 0.50g), è riassunto in Fig 3.59. In mezzeria non si osservano amplificazioni elevate salvo alcuni casi specifici, localizzati al solo picco negativo, nei quali raggiunge un fattore di 1.5. Le stesse modalità si riscontrano in sommità, raggiungendo valori intorno a 2. L'inversione del comportamento, avvenuta chiaramente nel muro 7IT, è probabile che qui avvenga a partire da 0.50g dove si osserva un andamento opposto.









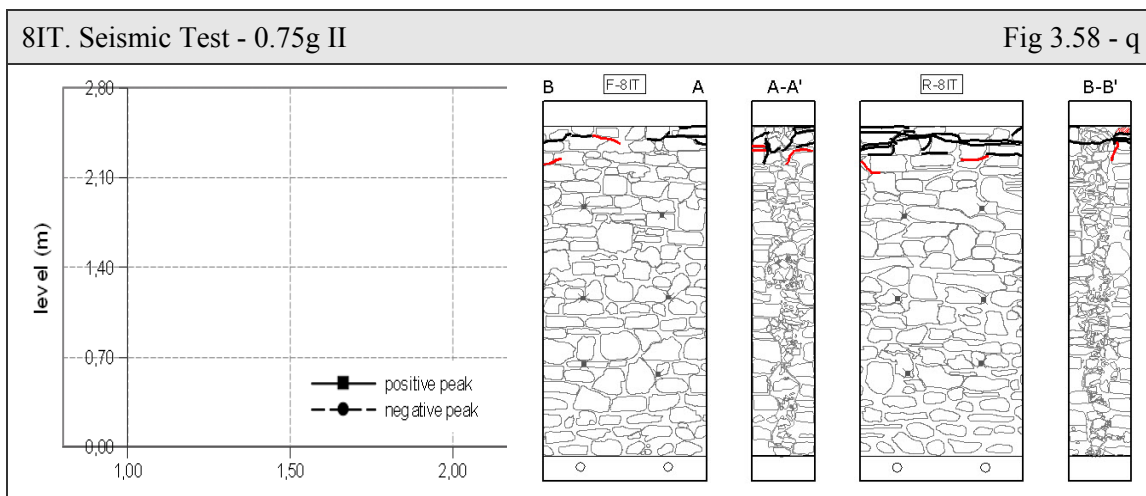
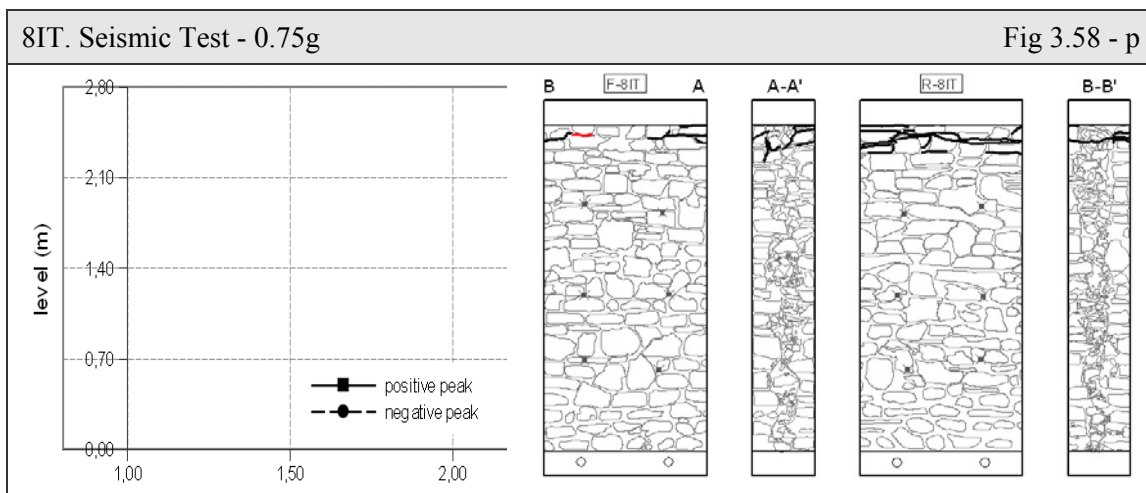
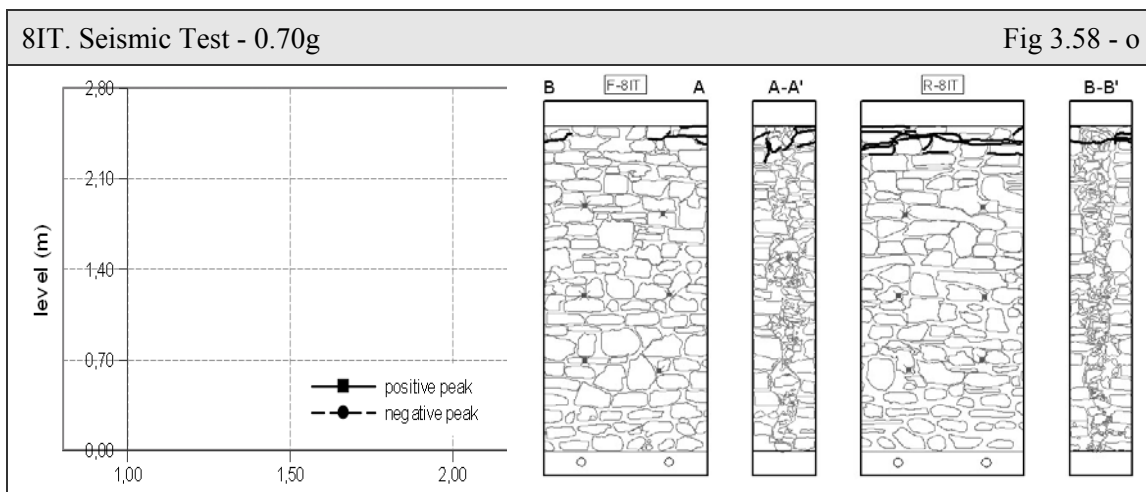


Fig 3.58: Pannello 8IT. Analisi del quadro fessurativo e dell'azione sismica per ogni prova effettuata in laboratorio ENEA. A sinistra: grafico dei fattori di amplificazione.

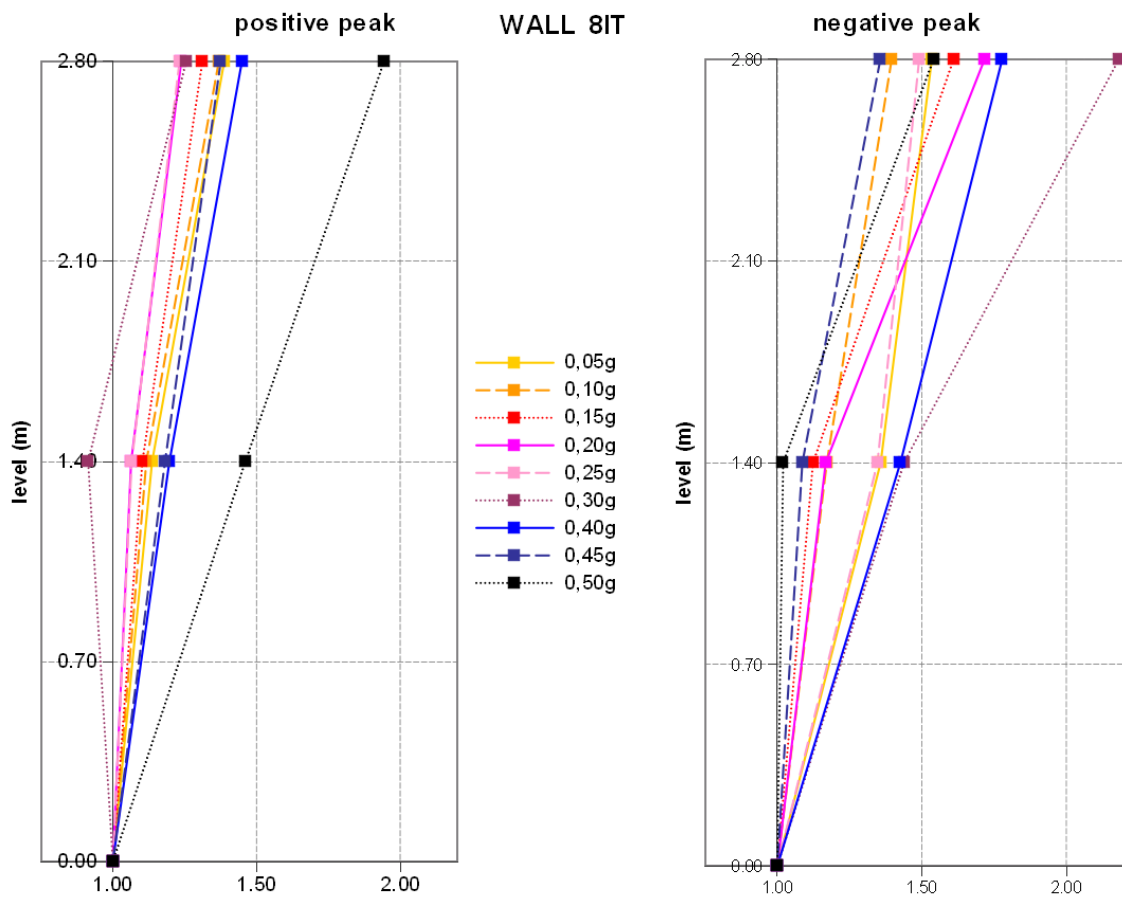


Fig 3.59: Pannello 8IT. Fattori di amplificazione delle accelerazioni calcolati sulla base dei dati registrati dai sensori accelerometrici in laboratorio ENEA.



Fig 3.60: Pannello 8IT. Rilievo fotografico a prova conclusa, 0.75g (fronte-sezione B-B'-retro).

Analisi degli spostamenti locali

Lo studio del comportamento del pannello 8IT procede con l'analisi delle misure dei sensori analogici. I dati sono riportati in Tab 3.22, con una stima del valore relativo a partire da quello assoluto. A partire da 0.50g si nota una stabilizzazione dei valori rilevati in mezzeria, legata alla rimozione dei sensori com'era avvenuto per gli accelerometri.

Tab 3.22: Pannello 8IT. Spostamenti ultimi, assoluti e relativi, registrati dai sensori analogici in mezzeria e in sommità durante ogni singola prova. Valori in mm.

Wall 8IT	Absolute Data			Average	Relative Data		
Step [g]	P3 middle dx	P4 middle sx	P5 top	middle sensors	P3 middle dx	P4 middle sx	P5 top
0.05g	0.31	-0.05	-0.03	0.13	0.31	-0.05	-0.03
0.10g	0.57	-0.24	-0.06	0.16	0.26	-0.18	-0.03
0.15g	0.63	-0.21	-0.08	0.21	0.06	0.03	-0.02
0.20g	0.59	-0.34	-0.15	0.12	-0.04	-0.13	-0.08
0.25g	0.63	-0.20	0.21	0.21	0.04	0.14	0.37
0.30g	0.43	0.11	0.17	0.27	-0.20	0.31	-0.05
0.40g	0.73	-0.59	0.11	0.07	0.30	-0.70	-0.06
0.45g	0.23	-0.68	-0.02	-0.23	-0.50	-0.10	-0.13
0.50g	0.53	-1.11	-0.15	-0.29	0.30	-0.42	-0.13
0.55g	0.53	-1.11	-0.67	-0.29	0.00	0.00	-0.52
0.60g	0.53	-1.11	-0.70	-0.29	0.00	0.00	-0.03
0.65g	0.53	-1.11	-0.63	-0.29	0.00	0.00	0.07
0.70g	0.53	-1.11	-0.45	-0.29	0.00	0.00	0.18
0.75g	0.53	-1.11	-0.09	-0.29	0.00	0.00	0.36
0.75g II	0.87	2.20	-0.08	1.53	0.34	3.31	0.01

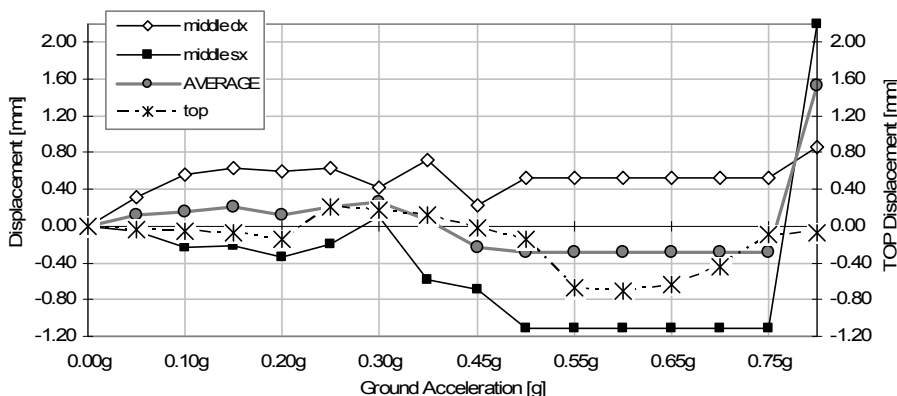


Fig 3.61: Pannello 8IT. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con la forza agente, ad ogni prova di laboratorio.

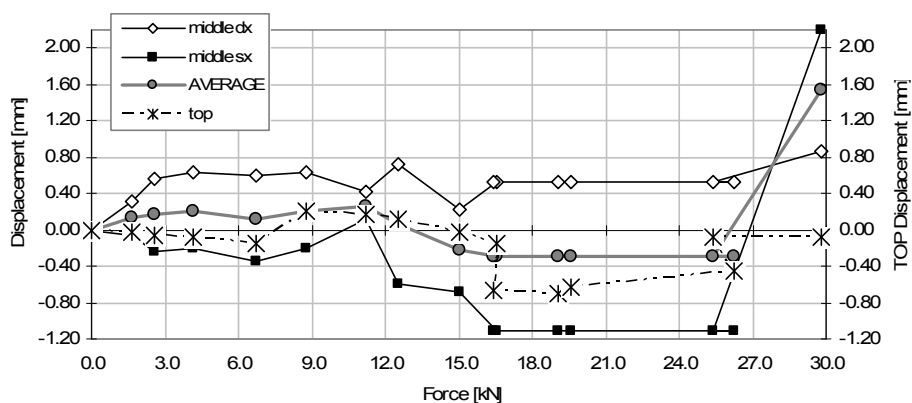


Fig 3.62: Pannello 8IT. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con la forza agente, ad ogni prova di laboratorio.

Gli spostamenti verticali rappresentati nei grafici in Fig 3.61 e Fig 3.62 mostrano come si sia verificato un massimo (abbassamento) di 0.21 mm a 0.25g, circa 8.7 kN, ed un minimo (innalzamento) di 0.70 mm a 0.60g (circa 19 kN). La sperimentazione termina con spostamento verticale non significativo. In orizzontali invece, Fig 3.63, si osserva in media una separazione non elevata con picco di 0.27 mm a 0.30g (corrispondente a circa 11.2 kN), in seguito al quale l'andamento decresce sino a valori negativi di circa 0.30 mm. L'apertura interessa maggiormente la sezione A-A' (P3).

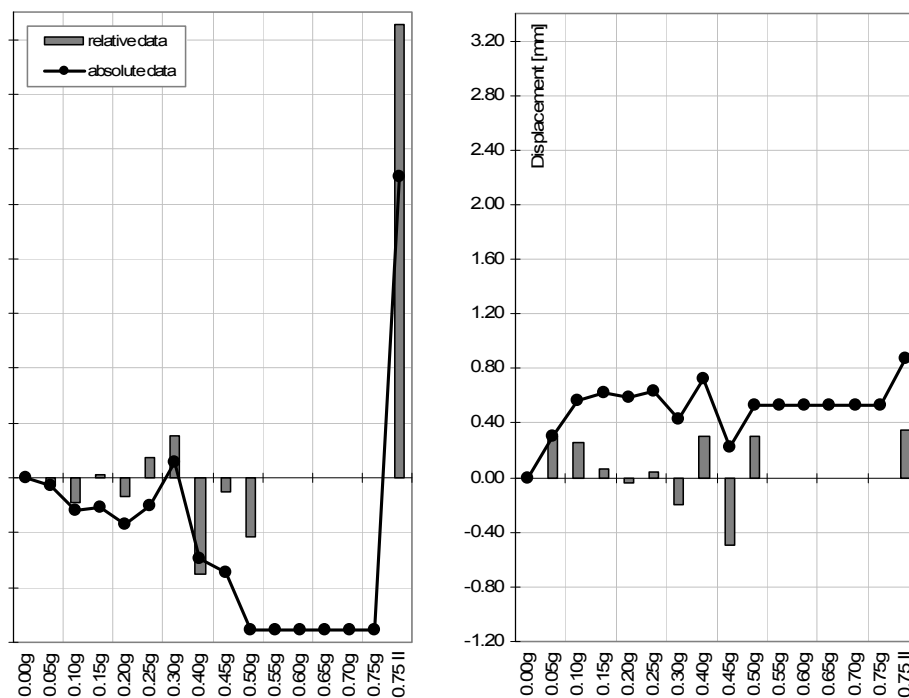


Fig 3.63: Pannello 8IT. Confronto tra gli spostamenti ultimi assoluti e relativi, registrati in mezzeria dai sensori analogici. Da sinistra: spostamenti del sensore P4 (di sinistra) e del sensore P3 (di destra).

Analisi delle deformazioni nei tirantini

Il segnale registrato dai sensori FBG, è proporzionale al livello di eccitazione e viene riportato in Tab 3.23. Le deformazioni assolute misurate, permettono di ottenere quelle relative e di valutarne una media utile ai fini del confronto con gli altri pannelli (cfr § 3.5). I dati, rappresentati sul grafico in Fig 3.64, a partire da 0.25g denotano un aumento graduale della deformazione che termina con un picco a 21 μ Strain, corrispondente ad una tensione di 4.4 MPa.

Tab 3.23: Pannello 8IT. Deformazioni assolute e relative, registrate dai sensori FBG nei tiranti, durante ogni singola prova. Il valor medio è calcolato tra i dati assoluti.

Wall 8IT	Strain $\Delta\epsilon$ [μ Strain]				
	Absolute Data		Average	Relative Data	
Step [g]	Ch1 sx	Ch2 dx		Ch1 sx	Ch2 dx
0.05g	-0.034	0.026	-0.004	-0.034	0.026
0.10g	-0.579	-0.463	-0.521	-0.545	-0.489
0.15g	-1.164	-1.071	-1.117	-0.584	-0.608
0.20g	-1.747	-1.455	-1.601	-0.583	-0.385
0.25g	11.190	9.405	10.298	12.937	10.860
0.30g	10.977	9.663	10.320	-0.213	0.258
0.40g	10.361	10.084	10.222	-0.616	0.421
0.45g	9.751	9.687	9.719	-0.610	-0.396
0.50g	9.337	9.924	9.631	-0.414	0.237
0.55g	10.499	11.956	11.227	1.161	2.032
0.60g	11.153	13.087	12.120	0.654	1.131
0.65g	11.805	13.894	12.850	0.652	0.808
0.70g	12.444	14.867	13.655	0.639	0.973
0.75g	12.840	15.675	14.258	0.396	0.808
0.75g II	18.487	23.597	21.042	5.647	7.922

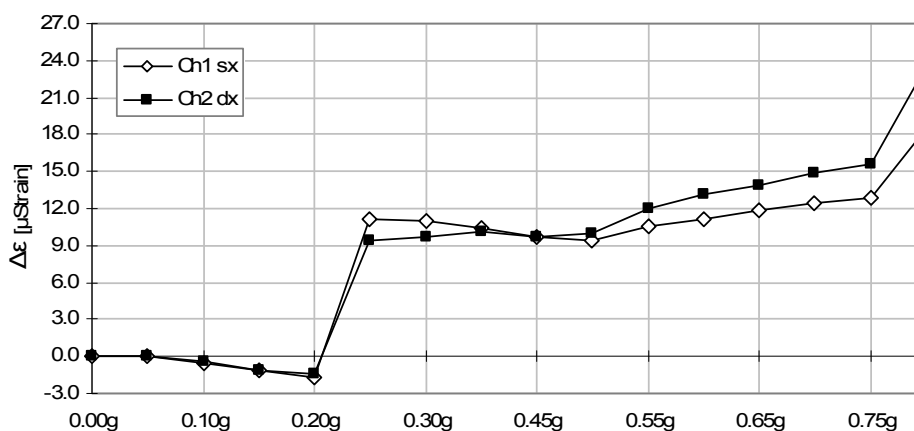


Fig 3.64: Pannello 8IT. Deformazioni assolute registrate nei tirantini antiespulsivi in mezzeria dai sensori FBG, ad ogni prova di laboratorio.

Dai valori delle deformazioni è possibile determinare le tensioni, come spiegato nella parte introduttiva al capitolo. I grafici non vengono esposti in quanto non sono valori sperimentali e potrebbero essere soggetti ad errore, in ogni caso l'andamento è coerente con le deformazioni.

Tab 3.24: Pannello 8IT. Tensioni assolute e relative, registrate dai sensori FBG nei tiranti, durante ogni singola prova. Il valor medio è calcolato tra i dati assoluti.

Wall 8IT	Stress $\Delta\sigma$ [MPa]				
	Absolute Data		Average	Relative Data	
Step [g]	Ch1 sx	Ch2 dx		Ch1 sx	Ch2 dx
0.05g	-0.007	0.006	-0.001	-0.007	0.006
0.10g	-0.122	-0.097	-0.109	-0.114	-0.103
0.15g	-0.244	-0.225	-0.235	-0.123	-0.128
0.20g	-0.367	-0.306	-0.336	-0.122	-0.081
0.25g	2.350	1.975	2.162	2.717	2.281
0.30g	2.305	2.029	2.167	-0.045	0.054
0.40g	2.176	2.118	2.147	-0.129	0.088
0.45g	2.048	2.034	2.041	-0.128	-0.083
0.50g	1.961	2.084	2.022	-0.087	0.050
0.55g	2.205	2.511	2.358	0.244	0.427
0.60g	2.342	2.748	2.545	0.137	0.237
0.65g	2.479	2.918	2.698	0.137	0.170
0.70g	2.613	3.122	2.868	0.134	0.204
0.75g	2.696	3.292	2.994	0.083	0.170
0.75g II	3.882	4.955	4.419	1.186	1.664

3.4.3. Osservazioni

Questi pannelli sono caratterizzati dalla buona riuscita della consolidazione, dalle ridotte fessurazioni dovute alla movimentazione e dal mancato collasso. La muratura mantiene l'integrità globale pur manifestando lesioni localizzate: comportamento ideale per la salvaguardia della vita umana. Il PGA reale è stato stimato inferiore del 30% (con CV 12%) in 7IT e del 25% (con CV 8%) in 8IT, calcolando quindi un'accelerazione al suolo finale di 0.85g e 0.57g, rispettivamente. Nel secondo campione, le misure si interrompono a 0.50g. L'amplificazione delle accelerazioni, considerando i dati disponibili in entrambi i casi di studio, avviene allo stesso modo: maggior rigidità nella parte inferiore e valori di 2.5 in sommità.

In entrambi i casi di studio, gli spostamenti verticali oscillano tra abbassamenti e innalzamenti molto limitati. Diversamente, quelli orizzontali hanno andamento crescente in 7IT fino a 0.62 mm a 0.70g (32.3 kN) per concludere con un salto costante, medio, a 1.39 mm. In 8IT invece il picco di 0.27 mm è concentrato a 0.30g (11.2 kN).

Le deformazioni sui tiranti si presentano sul pannello 8IT in modo crescente a partire da 0.25g, e terminando a 0.75g con 21 μ Strain (4.4 MPa). In 7IT invece si osserva un rilassamento della barra legato agli assestamenti.

3.5. Confronti tra i modelli sperimentali

Dalle analisi effettuate su ogni pannello utilizzando le risposte di ciascun sensore, si ricavano tabelle e grafici di riassunto utili ai fini del confronto tra i diversi modelli sottoposti a prova. In questo paragrafo vengono perciò riportati i valori più significativi e fatte delle osservazioni utili alla comprensione del comportamento globale delle murature e dell'influenza degli interventi di rinforzo adottati.

Analisi del quadro fessurativo e del meccanismo di rottura

Lo sviluppo delle fessurazioni, avvenuto durante le sperimentazioni su tavola vibrante, si è concentrato sulla sommità dei pannelli, spesso caratterizzata da assenza di iniezione anche nei casi in cui era prevista. Si ricorda che la miscela è permeata ai piedi di 2-URM e nella metà inferiore di 3T e 4T.

Nei campioni non rinforzati (1-URM e 2-URM) il collasso fuori-piano avviene per espulsione del paramento posteriore, mantenendo il fronte intatto ad eccezione di qualche lesione. Nei casi tirantati invece, il crollo avviene nella parte sovrastante alle barre trasversali soggetta a maggior carico sismico. In 3T interessa solamente il retro, mentre in 4T l'intera sezione.

Osservando invece i modelli iniettati 5I e 6I, la rottura interessa completamente l'area in sommità nella quale la miscela legante non è confluita. Mentre in 7IT e 8IT le prove sono state interrotte per raggiungimento del limite d'esercizio della tavola vibrante. In questi pannelli, grazie all'uso combinato di iniezione e tiranti, si è raggiunta una resistenza tale da evitare il collasso. I valori di PGA in cui si è manifestato il meccanismo fuori-piano appena descritto per ciascun campione, sono riassunti in Fig 3.65.

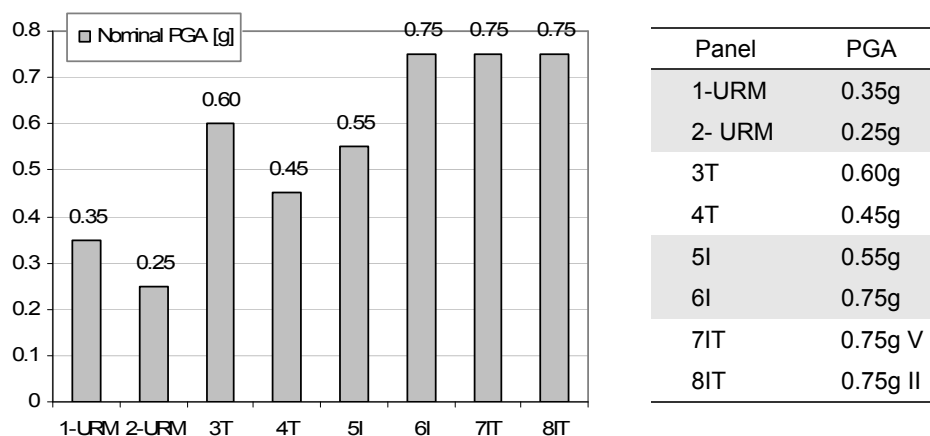


Fig 3.65: Massimi PGA (nominali) raggiunti da ciascun pannello. In tutti i casi è avvenuto il collasso, ad eccezione di 7IT e 8IT.

Analisi del PGA effettivo e delle forze agenti

Il primo confronto numerico riguarda l'effettivo picco di accelerazione al suolo sviluppato dalla tavola vibrante nel corso delle sperimentazioni dinamiche (Tab 3.25). I dati sono stati calcolati in relazione alle letture degli accelerometri alla base del pannello. Al passo corrispondente al collasso di ciascun campione, invece, sono stati stimati utilizzando la percentuale media di proporzione tra valore nominale e valore reale. Si osserva perciò che in media il PGA reale è in inferiore del 28% rispetto al dato nominale, con coefficiente di variazione del 9%. Il caso contrario (>10%) si verifica solamente agli ultimi passi di prova nel muro 7IT. La notevole escursione tra il valore effettivo e quello di progetto (Fig 3.66) rende questo dato particolarmente interessante per quanto riguarda i temi indagati in questa sperimentazione.

Tab 3.25: PGA effettivi sviluppati dalla tavola dinamica su ciascun pannello testato.

Step	Real Peak Ground Acceleration [g]							
	1-URM	2-URM	3T	4T	5I	6I	7IT	8IT
0.05g	0.033	0.031	0.035	0.036	0.034	0.034	0.038	0.036
0.10g	0.064	0.056	0.057	0.057	0.061	0.065	0.059	0.057
0.15g	0.084	0.099	0.094	0.096	0.099	0.097	0.092	0.094
0.20g	0.165	0.168	0.150	0.145	0.167	0.144	0.142	0.150
0.25g	0.175	0.180	0.188	0.212	0.193	0.196	0.189	0.196
0.30g	0.211		0.230	0.247	0.259	0.232	0.224	0.251
0.35g	0.250		0.248	0.304	0.312	0.269	0.294	-
0.40g			0.288	0.304	0.280	0.275	0.280	0.280
0.45g			0.367	0.340	0.433	0.304	0.336	0.337
0.50g			0.346		0.389	0.336	0.337	0.370
0.55g			0.389		0.420	0.384	0.373	0.367
0.60g			0.420			0.429	0.427	0.426
0.65g						0.472	0.449	0.437
0.70g						0.563	0.723	0.587
0.75g						0.530	0.845	0.567

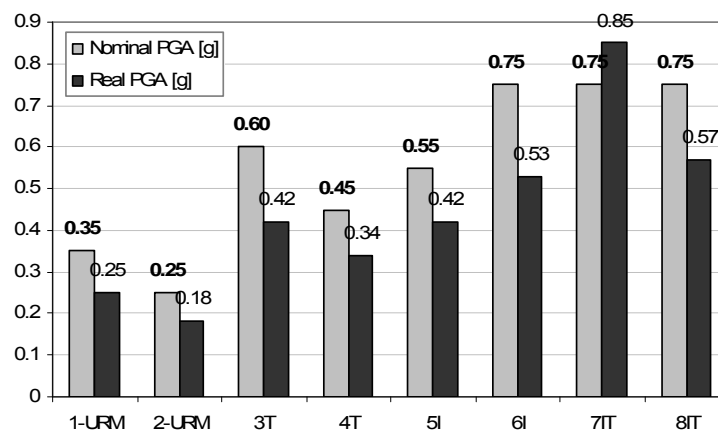


Fig 3.66: Relazione tra PGA nominali e PGA effettivi sviluppati dalla tavola vibrante su ciascun pannello durante della sperimentazione dinamica.

Il comportamento dinamico della muratura multistrato in pietra, rinforzata o meno, è infatti direttamente correlato all'effettivo carico sismico in essa agente. Si ricorda che l'OPCM 3274 [2003] suddivide il territorio italiano in quattro categorie in base al rischio sismico, calcolato sul PGA caratteristico e sulla frequenza ed intensità degli eventi. La classificazione è così definita:

- Zona 1: sismicità alta, $0.25g < PGA \leq 0.35g$;
- Zona 2: sismicità media, $0.15g < PGA \leq 0.25g$;
- Zona 3: sismicità bassa, $0.05g < PGA \leq 0.15g$;
- Zona 4: sismicità molto bassa, $PGA \leq 0.05g$.

Essendo il PGA un'accelerazione, è direttamente proporzionale al valore della forza agente sulle masse sottoposte ad evento sismico. Per fare un esempio, i 0.65g registrati durante il terremoto de L'Aquila (06 Aprile 2009) corrispondono ad una forza pari al 65% della massa colpita. Questa correlazione è illustrata in Fig 3.67 per i pannelli sottoposti a prova. Indicando anche le zone di sismicità suddette, si può notare come gli elementi murari studiati abbiano raggiunto accelerazioni molto elevate rispetto agli standard stabiliti da normativa. Questa particolarità è legata alle difficoltà di ricreare esattamente la situazione reale in sede di laboratorio. Ci si riferisce alle condizioni al contorno dettate dagli orizzontamenti, al sistema di masse murarie del quale fa parte il maschio murario in analisi, a carenze costruttive proprie dei fabbricati storici e ad eventuali altri apporti legati al degrado fisico-meccanico dei materiali che incrementano l'azione sismica e quindi la vulnerabilità della struttura.

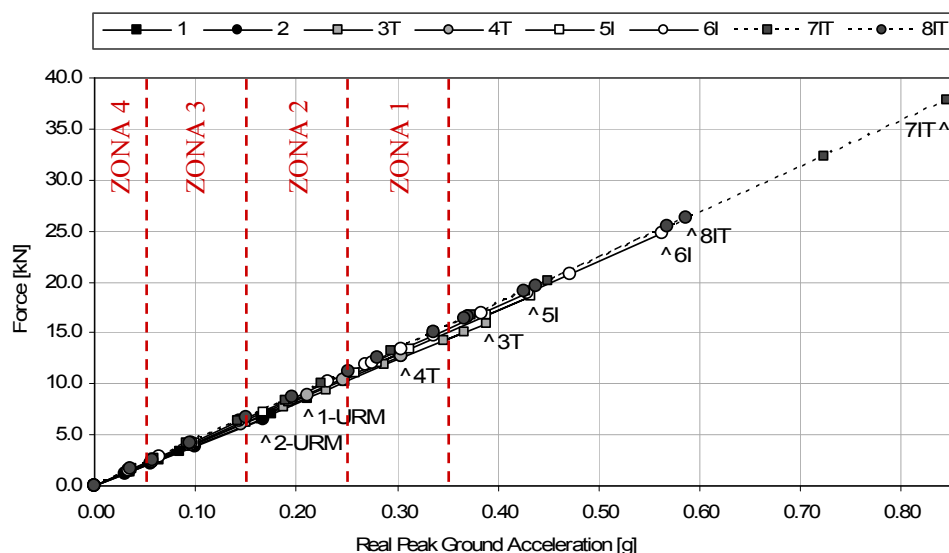


Fig 3.67: Relazione tra PGA effettivi sviluppati dalla tavola vibrante e la forza agente su ciascun pannello, durante la sperimentazione dinamica. Sono indicate anche le rispettive zona di sismicità secondo OPCM 3274 [2003].

Nella sperimentazione quindi, a parità di evento sismico, è stata indotta una sollecitazione maggiore dovuta all'incrementare della massa del muro a seguito d'iniezione di miscela consolidante (cfr § 2.1.3). I valori delle forze agenti ad ogni singolo passo di prova effettuato su ciascun pannello sono riportati in Tab 3.26.

Tab 3.26: Forze agenti su ciascun pannello durante l'evento sismico simulato in laboratorio ENEA.

Step	Forze [kN]							
	1-URM	2-URM	3T	4T	5I	6I	7IT	8IT
0.05g	1.30	1.22	1.42	1.49	1.47	1.50	1.72	1.63
0.10g	2.55	2.19	2.32	2.40	2.62	2.88	2.63	2.57
0.15g	3.34	3.87	3.85	4.01	4.24	4.25	4.11	4.19
0.20g	6.58	6.60	6.14	6.09	7.16	6.32	6.33	6.73
0.25g	6.99	7.05	7.71	8.87	8.27	8.59	8.44	8.75
0.30g	8.46		9.41	10.36	11.11	10.22	10.00	11.24
0.35g	10.00		10.18	12.73	13.38	11.84	13.14	-
0.40g			11.82	12.75	12.00	12.11	12.52	12.52
0.45g			15.03	14.24	18.57	13.36	15.02	15.06
0.50g			14.20		16.68	14.75	15.08	16.53
0.55g			15.95		18.00	16.87	16.68	16.42
0.60g			17.22			18.86	19.08	19.07
0.65g						20.73	20.11	19.55
0.70g						24.72	32.34	26.25
0.75g						23.29	37.79	25.36

Analisi degli spostamenti locali

Il secondo confronto riguarda l'analisi degli spostamenti sia orizzontali che verticali, avvenuti rispettivamente in mezzeria e in sommità dei campioni sui quali si sono eseguite le prove sismiche. L'esame di questi parametri permette di valutare l'ammorsamento tra i paramenti, ossia l'influenza dell'azione sismica fuori-piano sulla separazione degli strati esterni e sul conseguente abbassamento dei pannelli.

I valori medi tra le misure dei trasduttori posizionati a metà altezza sono riportati in Tab 3.27 e rappresentati in Fig 3.68. In generale l'andamento, misurato in mm, è dell'ordine di 10^{-1} , fatta eccezione per i dati rilevati nei primi tre pannelli. I campioni non rinforzati (1-URM e 2-URM) raggiungono spostamenti elevati, infatti per facilitare la leggibilità del grafico in Fig 3.68 sono stati inseriti fuori scala. Diversamente in 3T i valori registrati sono poco significativi in relazione agli altri pannelli (sono dell'ordine di 10^{-2}).

L'apertura dei paramenti nei modelli non rinforzati raggiunge termini dell'ordine dell'unità già a bassi livelli di PGA, con valori massimi di 7.84 mm e 3.23 mm rispettivamente per i muri 1-URM e 2-URM. Lo sviluppo gradualmente crescente dello spostamento orizzontale si nota solamente in questi primi muri e su 7IT, negli altri casi si manifesta un'alternanza di separazione e avvicinamento dei paramenti esterni. La tendenza a valori negativi (compressione) è particolarmente evidente in 4T.

I pannelli iniettati mostrano tutti un comportamento uniforme con apertura massima in mezzeria, misurata su 5I, 6I e 8IT, di circa 0.25 mm avvenuta rispettivamente a 0.15g, 0.35g e 0.30g. Si ricorda che nell'ultimo muro i sensori erano stati rimossi a seguito della prova a 0.50g.

perciò i dati successivi sono stabili a -0.29 mm. Il campione 7IT manifesta invece un costante incremento della dilatazione degli estensimetri, raggiungendo un valore finale di 1.53 mm.

Tab 3.27: Spostamenti ultimi assoluti rilevati, su ciascun pannello, dai sensori analogici di mezzeria. Si considera il valore medio tra i sensori P3 e P4, il dato positivo indica un'apertura dei paramenti.

Displacement of Panels [mm] - Average of middle sensors								
Step	1-URM	2-URM	3T	4T	5I	6I	7IT	8IT
0.05g	0.00	0.05	0.00	-0.05	0.07	0.16	0.15	0.13
0.10g	-0.07	-	0.01	-0.08	0.09	0.12	0.12	0.16
0.15g	0.14	0.14	0.03	-0.10	0.24	0.05	0.09	0.21
0.20g	4.61	3.23	0.04	-0.13	0.16	-0.08	0.14	0.12
0.25g	7.84	3.23	0.04	-0.12	0.22	0.02	0.04	0.21
0.30g	-	-	0.03	-0.16	0.04	0.11	0.26	0.27
0.35g	-	-	0.02	0.02	0.03	0.26	0.24	-
0.40g	-	-	0.01	0.12	-0.11	0.12	0.33	0.07
0.45g	-	-	0.04	0.12	-0.15	0.25	0.40	-0.23
0.50g	-	-	0.04	-	-0.15	0.14	0.50	-0.29
0.55g	-	-	0.04	-	-0.15	0.07	0.55	-0.29
0.60g	-	-	-	-	-	-0.04	0.57	-0.29
0.65g	-	-	-	-	-	-0.02	0.60	-0.29
0.70g	-	-	-	-	-	-0.18	0.62	-0.29
0.75g	-	-	-	-	-	-0.35	1.53	-0.29

In generale quindi, l'apertura tra i paramenti si presenta, con valori significativi, solamente nei modelli non rinforzati (URM), nei quali effettivamente avviene il collasso per espulsione del retro. Le tecniche d'intervento adottate negli altri elementi murari influiscono quindi positivamente sui meccanismi locali fuori-piano, limitando la separazione trasversale dei paramenti e permettendo così di raggiungere sollecitazioni più elevate, nonché di modificare le modalità di rottura.

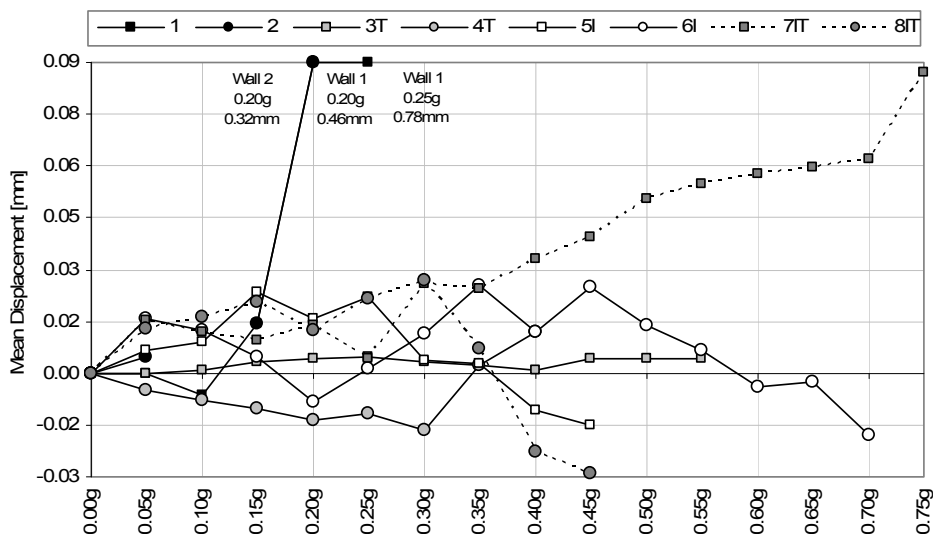


Fig 3.68: Relazione tra il PGA nominale e gli spostamenti ultimi assoluti rilevati, su ciascun pannello, dai sensori analogici di mezzeria. Si considera il valore medio tra i sensori P3 e P4.

Un'ulteriore analisi viene effettuata nel grafico in Fig 3.69 relazionando la forza agente e la corrispondente apertura dei paramenti in mezzeria. Alcuni dati sono stati inseriti fuori scala, corretti con il rispettivo termine numerico, per facilitare la leggibilità del diagramma. Osservandolo si deduce che non esiste una chiara relazione tra i due parametri.

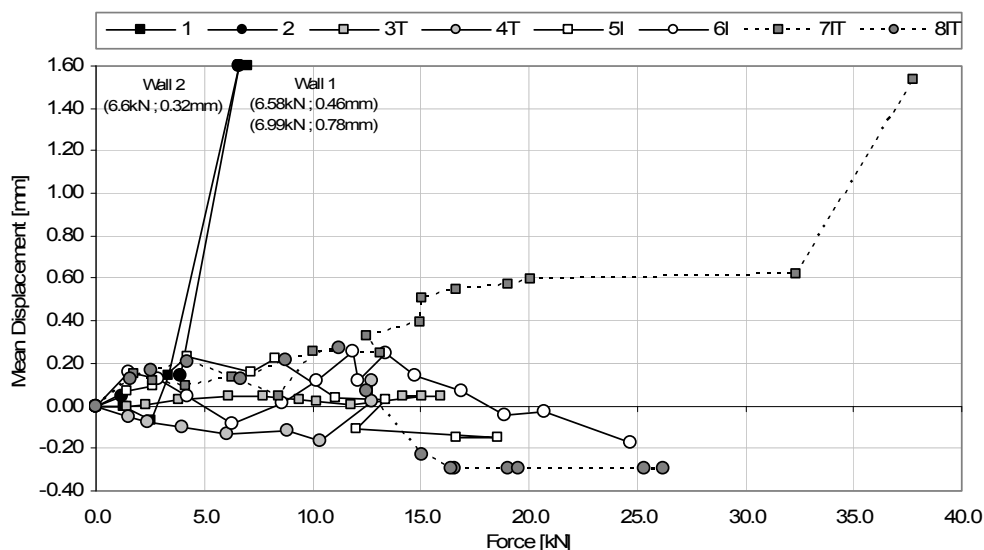


Fig 3.69: Relazione tra le forze agenti e gli spostamenti ultimi assoluti rilevati, su ciascun pannello, dai sensori analogici di mezzeria. Si considera il valore medio tra i sensori P3 e P4.

I dati rilevati dai sensori analogici in sommità, sono riassunti in Tab 3.28 e in Fig 3.70. I valori mancanti sono dovuti al fatto che nel pannello 1-URM il trasduttore P5 non era stato installato, e che in 8IT era stato rimosso preventivamente a 0.55g.

In 2-URM si nota un chiaro movimento verticale del pannello (P5-top) verso l'alto di 0.68 mm e, al passo seguente verso il basso di 2.72 mm a causa del collasso.

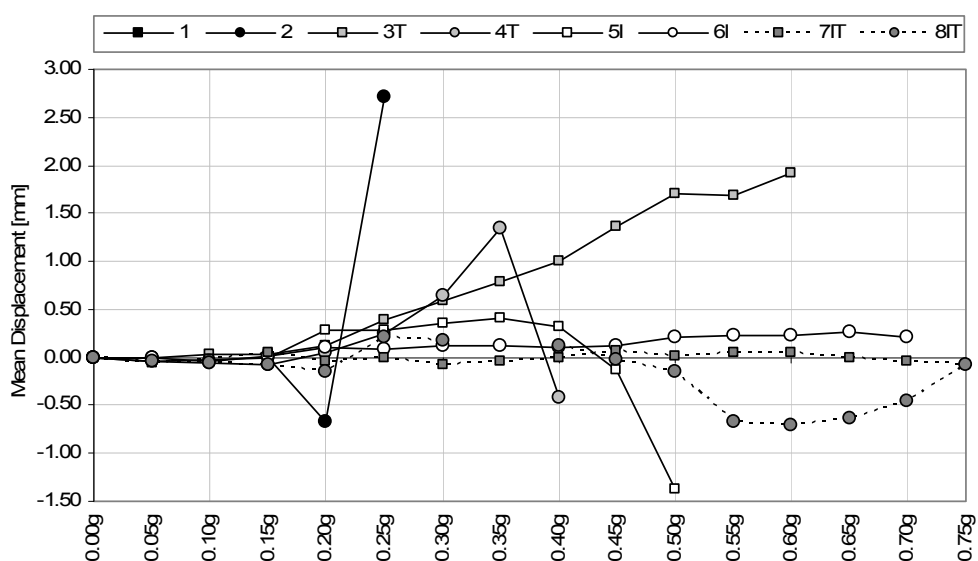


Fig 3.70: Relazione tra il PGA nominale e gli spostamenti ultimi assoluti rilevati, su ciascun pannello, dai sensori analogici in sommità.

L'abbassamento, rappresentato in Tab 3.28 dai termini positivi, è maggiore nei campioni rinforzati con i tiranti, 3T e 4T. L'incremento è graduale sino a raggiungere un massimo di circa 1.92 mm e 1.34 mm rispettivamente. Lo stesso andamento si presenta anche nei muri iniettati, 5I e 6I, ma termina con misure negative (ad indicare un innalzamento) nel primo caso (1.37 mm) e molto limitate nel secondo (0.22 mm). Tutti questi picchi si riscontrano a PGA elevati poco prima del collasso.

Osservando invece le rilevazioni sui pannelli 7IT e 8IT, si notano spostamenti poco significativi che oscillano attorno lo zero. Nel primo sono dell'ordine di 10^{-2} , mentre nel secondo arrivano ad un massimo di 0.21 mm a 0.25g ed un minimo di 0.70 mm a 0.60g.

Tab 3.28: Spostamenti ultimi assoluti rilevati, su ciascun pannello, dal sensore analogico in sommità. P5 è ortogonale al movimento della tavola vibrante, il verso positivo indica un abbassamento.

Displacement of Panels [mm] - Top sensors								
Step	1-URM	2-URM	3T	4T	5I	6I	7IT	8IT
0.05g	-	-0.01	-0.01	-0.04	-0.05	0.00	-0.07	-0.03
0.10g	-	-	0.02	-0.07	-0.02	-0.03	-0.02	-0.06
0.15g	-	-0.01	0.02	-0.08	0.00	0.02	0.04	-0.08
0.20g	-	-0.68	0.12	0.04	0.28	0.09	-0.05	-0.15
0.25g	-	2.72	0.39	0.24	0.28	0.08	-0.01	0.21
0.30g	-		0.59	0.64	0.36	0.12	-0.07	0.17
0.35g	-		0.79	1.35	0.41	0.12	-0.05	-
0.40g			0.99	-0.43	0.31	0.10	0.00	0.11
0.45g			1.36	-	-0.13	0.11	0.07	-0.02
0.50g			1.71		-1.37	0.21	0.01	-0.15
0.55g			1.68		-	0.22	0.05	-0.67
0.60g			1.92			0.22	0.05	-0.70
0.65g						0.26	-0.01	-0.63
0.70g						0.22	-0.03	-0.45
0.75g						-	-0.08	-0.09

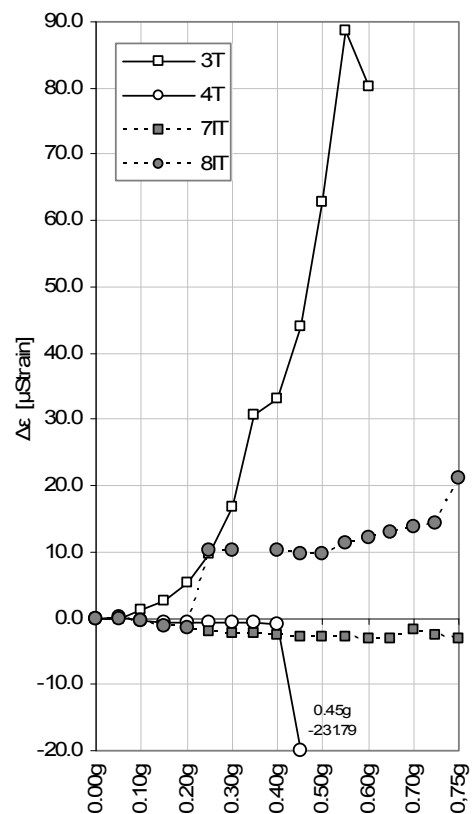
In conclusione, si può affermare che i tirantini antiespulsivi hanno maggior influenza in merito all'apertura tra i paramenti, mantenendola piuttosto costante e limitata all'incrementare dell'eccitazione sismica. La motivazione è legata al fatto che si tratta di un intervento puntuale che agisce esattamente in mezzera, dove rilevano gli estensimetri. Anche le iniezioni presentano buoni risultati, seppur più oscillanti tra valori medi compresi tra circa 0.20 mm e -0.20 mm, ad eccezione di 7IT che manifesta un aumento graduale dell'apertura sino a circa 0.60 mm. Dal punto di vista degli abbassamenti invece, le rilevazioni sono molto legate dal tipo di meccanismo di rottura che si instaura. I primi quattro campioni presentano valori importanti, dell'ordine dell'unità, 5I e 6I molto inferiori (10^{-1}), infine gli ultimi due pannelli quasi nulli salvo qualche innalzamento legato probabilmente a rotazioni locali o alle fessurazioni.

Analisi delle deformazioni nei tirantini

Si concludono i confronti con i dati relativi alle deformazioni rilevate, dai sensori FBG, sui tirantini trasversali durante l'intera sperimentazione. I valori sono riassunti e rappresentati in Tab 3.29 e in seguito (Tab 3.30) relazionati con il modulo elastico dell'acciaio ($E_{\text{steel}} = 210000 \text{ N/mm}^2$) così da stimare i valori corrispondenti delle tensioni.

Tab 3.29: Deformazioni medie assolute registrate sui tirantini dai sensori FBG.

Step	Strain $\Delta\varepsilon$ [μStrain] - Average			
	3T	4T	7IT	8IT
0.05g	0.00	0.02	-0.02	0.00
0.10g	1.15	-0.33	-0.33	-0.52
0.15g	2.64	-0.55	-1.13	-1.12
0.20g	5.27	-0.60	-1.47	-1.60
0.25g	9.72	-0.75	-1.91	10.30
0.30g	16.74	-0.73	-2.18	10.32
0.35g	30.77	-0.77	-2.39	-
0.40g	32.96	-0.87	-2.56	10.22
0.45g	43.90	-231.79	-2.80	9.72
0.50g	62.88		-2.91	9.63
0.55g	88.53		-2.96	11.23
0.60g	80.14		-3.00	12.12
0.65g			-3.03	12.85
0.70g			-1.64	13.66
0.75g			-2.55	14.26
0.75g II			-3.20	21.04
0.75g III			-3.73	
0.75g IV			-4.63	

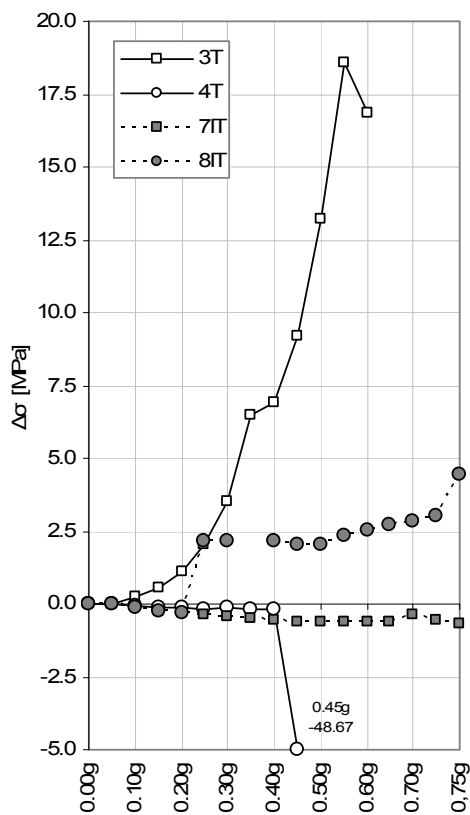


Queste campagne di misura, effettuate solamente nei campioni provvisti di tiranti trasversali, non sono andate a buon fine. Nel caso 4T, le rilevazioni sono pressoché nulle (dell'ordine di $10^{-1} \mu\text{Strain}$) fatta eccezione per un ampio segnale nel corso dell'ultima prova a 0.45g. Inoltre la risposta, come per 7IT, è negativa, indicando un rilassamento della barra dovuta ad un assestamento del sistema dado-rondella sulla superficie esterna del muro (per elevata scabrosità o scheggiamento della pietra di appoggio).

Nel muro 3T si osservano misurazioni molto limitate nel canale sinistro, rispetto al destro il quale presenta un forte incremento graduale positivo che raggiunge un massimo di circa 88.5 μStrain a 0.55g, corrispondenti ad una tensione di circa 18.6 MPa. In 8IT l'aumento è più limitato e termina a circa 21 μStrain , ossia 4.4 MPa. La differenza elevata è dovuta al fatto che nel primo caso i tiranti assorbono completamente l'azione sismica, mentre nel secondo l'iniezione vincola reciprocamente i paramenti quindi le barre metalliche non entrano in azione.

Tab 3.30: Tensioni medie assolute stimate sui tirantini relazionando la deformazione con il modulo elastico dell'acciaio.

Step	Stress $\Delta\sigma$ [MPa] - Average			
	3T	4T	7IT	8IT
0.05g	0.00	0.00	-0.01	0.00
0.10g	0.24	-0.07	-0.07	-0.11
0.15g	0.55	-0.12	-0.24	-0.23
0.20g	1.11	-0.13	-0.31	-0.34
0.25g	2.04	-0.16	-0.40	2.16
0.30g	3.52	-0.15	-0.46	2.17
0.35g	6.46	-0.16	-0.50	
0. 0g	6.92	-0.18	-0.54	2.15
0.45g	9.22	-48.68	-0.59	2.04
0.50g	13.21		-0.61	2.02
0.55g	18.59		-0.62	2.36
0.60g	16.83		-0.63	2.55
0.65g			-0.64	2.70
0.70g			-0.34	2.87
0.75g			-0.54	2.99
0.75g II			-0.67	4.42
0.75g III			-0.78	
0.75g IV			-0.97	



4. Identificazione Dinamica

La parte conclusiva di questa Tesi, tratta dell'identificazione dinamica dei pannelli murari soggetti ad azione sismica su tavola vibrante. I dati necessari sono stati rilevati dagli accelerometri durante le misure ambientali realizzate durante le prove dinamiche svolte presso il Laboratorio ENEA "LA casaccia" di Roma. Il processo di identificazione dinamica dei campioni è stato realizzato mediante l'uso di MACEC 3.2 [Reynders et al., 2011], una "toolbox" di MATLAB sviluppata presso l'Università Cattolica di Leuven (Belgio). L'applicazione consente l'estrapolazione dei parametri modali che descrivono il comportamento dinamico dell'oggetto di studio.

Come spiegato nel paragrafo § 1.3, l'analisi modale è una metodologia d'indagine sulle caratteristiche dinamiche della struttura, costituita essenzialmente da tre fasi distinte:

- raccolta dei dati in laboratorio;
- scelta del sistema di identificazione dinamica;
- determinazione dei parametri modali
(frequenze proprie, rapporti di smorzamento e forme modali).

Nella sperimentazione sono state effettuate più misurazioni ambientali allo stesso passo di prova, perciò è stato necessario distinguerle a livello di nomenclatura con una lettera ("A", "B", ecc) in successione. Questa abbondanza di rilevazioni ha permesso d'implementare solamente i risultati migliori in termini di risposta dei sensori, di rapporti di smorzamento, di frequenze e di rispettive forme modali individuate. Va inoltre sottolineato che per la parte ambientale non si parla di input ma di misurazioni in quanto non si tratta di un impulso trasmesso alla struttura, ma di misure valutate sulla base del rumore ambientale con tavola vibrante ferma.

Questo capitolo si propone di illustrare, per ogni muro, il diagramma di stabilizzazione, con curva PSD (Power Spectral Density), nel quale sono visibili le frequenze caratteristiche individuate e successivamente riportate in tabelle riassuntive con i rapporti di smorzamento corrispondenti. Viene poi analizzata ogni singola forma modale identificata, con figura rappresentativa e grafici di andamento dei parametri suddetti. Infine si propone un confronto generale tra le caratteristiche dinamiche dei pannelli, considerando la loro variazione al fine di valutare l'efficacia degli interventi di rinforzo e consolidazione.

Metodo di analisi

Il primo passo per l'analisi dei dati ambientali è stato individuare una maglia di nodi e superfici per l'elaborazione in Macec 3.2. La configurazione scelta è strettamente legata alla posizione degli accelerometri durante la prova. Per tale ragione i pannelli 1-URM e 2-URM avranno una maglia più complessa rispetto ai successivi, come rappresentato in Fig 4.1. Ne consegue anche una rappresentazione diversa dei modi di vibrare.

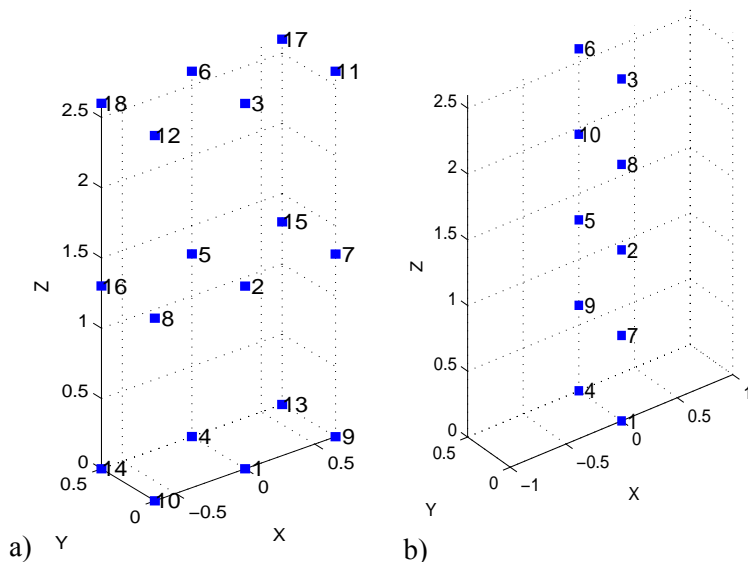


Fig 4.1: Configurazione geometrica dei nodi per l'implementazione dei dati ambientali in MACEC 3.2. a) si riferisce ai pannelli non rinforzati (URM) mentre b) a quelli rinforzati (SM).

E' stato inoltre necessario stabilire i collegamenti tra i nodi, con particolare attenzione per quelli "virtuali" impostati nel programma per una visualizzazione migliore. In Tab 4.1 sono indicate anche le superfici triangolari che definiscono il modello computazionale nel caso a) mentre in b) si utilizzano collegamenti lineari verticali in corrispondenza di ogni paramento. Per una migliore comprensione si riportano graficamente in Fig 4.2.

Tab 4.1: Collegamenti e superfici definiti tra i nodi della configurazione geometrica usata in MACEC 3.2.

Caso a) – Pannelli URM				
Collegamenti	01- 09	07- 15	03- 11	
	01- 10	08- 16	03- 12	
	04- 13		06- 17	
	04- 14		06- 18	
Superfici	01- 02- 07	03- 02- 07	04- 05- 15	06- 05- 15
	01- 09- 07	03- 11- 07	04- 13- 15	06- 17- 15
	01- 02- 08	03- 02- 08	04- 05- 16	06- 05- 16
	01- 10- 08	03- 12- 08	04- 14- 16	06- 18- 16
Caso b) – Pannelli SM				
Collegamenti	07- 09			
	08- 10			

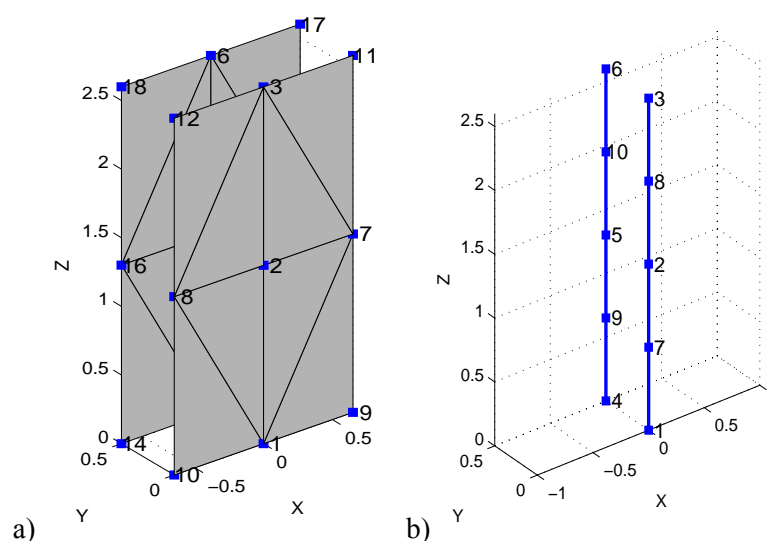


Fig 4.2: Configurazione geometrica delle superfici e dei collegamenti lineari per l'implementazione dei dati ambientali in MACEC 3.2. a) Si riferisce ai pannelli non rinforzati (URM) b) a quelli rinforzati (SM).

Il secondo passo è la scelta del metodo di estrazione modale (cfr § 1.3.3.). Trattandosi del caso d'identificazione modale output-only, si è scelto di utilizzare il Stochastic Subspace Identification (SSI), e più in particolare il Data-Driven (SSI-DATA). Si tratta di un algoritmo numericamente robusto, e quindi affidabile, che si basa sulla misura della risposta dinamica di un sistema virtuale nelle condizioni naturali (o ambientali). Inoltre, per ridurre il tempo di calcolo, sono stati definiti dei canali di riferimento secondo il metodo Reference-based (SSI-DATA/ref) [Peeters e De Roeck, 1999]. Gli accelerometri di riferimento scelti sono quelli in mezzera e sommità (A2, A3, A5, A6) in quanto sono i più sollecitati durante l'evento sismico e perciò di maggior rilevanza per l'identificazione del comportamento dinamico dei pannelli in muratura. In questo modo si è ottenuto il diagramma di stabilizzazione, nel quale vengono rappresentati tutti i modi identificati e così distinti:

- un cerchio per i modi stabili;
- $\cdot v$, $\cdot d$, $\cdot f$ per i modi che soddisfano tutti i criteri di stabilizzazione adottati, fatta eccezione rispettivamente per lo smorzamento, la forma modale, o entrambi i parametri.

La scelta del modo da esaminare viene effettuata manualmente tra gli ordini (asse Y) più alti, affinché sia certo che si tratti di una soluzione reale, corrispondente ad un effettivo modo di vibrare della struttura, e non di una soluzione puramente matematica del sistema. I modi propri sono legati alle caratteristiche del modello e sono indipendenti dal processo analitico, perciò rimangono immutati al variare dell'ordine della matrice [Vincenzi, 2007]. In genere si sono scelte le frequenze stabili ad ordini elevati, compresi tra 100 e 116 e comunque inferiori a 50 Hz.

Con questo procedimento si ottengono i parametri modali (dati di output) che vengono presentati di seguito. Infine valutandone le variazioni è possibile rilevare i danni strutturali e localizzarli attraverso uno studio comparativo, fornendo inoltre informazioni circa l'influenza delle tecniche di intervento sul comportamento dinamico degli elementi stessi.

Parametri modali

La FREQUENZA PROPRIA (f), o naturale, corrisponde alla frequenza di risonanza prevista nella struttura. Il fenomeno di risonanza provoca un aumento significativo dell'ampiezza delle oscillazioni, corrispondente ad un notevole accumulo di energia all'interno del sistema sollecitato. Il corpo comincia a vibrare quando viene investito da un'onda di frequenza uguale a quella propria. Individuarla permette di conoscere la situazione in cui effettuare le opportune verifiche ed interventi per prevenire l'insorgere di risonanze e quindi migliorare l'affidabilità e l'efficienza della struttura.

Il RAPPORTO DI SMORZAMENTO (ζ) è utilizzato in analisi dinamica per individuare la capacità intrinseca di una struttura di dissipare le forze dinamiche. Si tratta quindi di una misura della capacità di dissipazione dell'energia da parte di un sistema. Ci sono diversi tipi di meccanismi di smorzamento (cfr § 1.2.1.) ma per semplicità e per una migliore formulazione matematica, il rapporto di smorzamento è considerato solamente viscoso [Elmenshawi et al., 2010].

La FORMA MODALE mostra la deformazione relativa (spostamento) che si ottiene quanto il modello è sottoposto alla frequenza naturale di risonanza corrispondente. Conoscendola sarà possibile trarre delle conclusioni circa la natura dello spostamento, individuare i punti critici e progettare interventi idonei.

4.1. Pannelli non rinforzati

I primi due campioni sottoposti ad identificazione dinamica sono sprovvisti di ogni tipo di rinforzo. Si tratta di muratura a tre paramenti in pietra allo stato originario (UnReinforced Masonry, URM), le cui caratteristiche fisiche sono già state esaminate al paragrafo § 2.1.3.

Durante queste prime prove è stato utilizzato un diverso posizionamento degli accelerometri, e di conseguenza una differente configurazione di nodi da implementare nel software (Fig 4.1-a).

4.1.1. Wall 1-URM

Il pannello 1-URM è stato il primo ad essere sottoposto alle simulazioni su tavola vibrante, per tale ragione le condizioni di progetto sono state perfezionate in corso di sperimentazione. Le differenze, riscontrabili sia rispetto agli altri campioni che ai diversi passi di prova, riguardano:

- la collocazione degli accelerometri A7 e A8 (Fig 4.1);
- la posizione della shaking table durante le misure ambientali.

Tutte le rilevazioni ambientali, fatta eccezione per il primo e l'ultimo passo di prova, vengono effettuate con tavola "a parcheggio", vale a dire alta e ferma. Diversamente, la prova di identificazione preliminare è stata effettuata con tavola vibrante in posizione sollevata e con il sistema oleodinamico in bassa pressione. Dopo la sollecitazione sismica ad intensità 0.30g la tavola vibrante era spenta. Le differenze sono riscontrabili nell'andamento della curva PSD (Power Spectral Density) visualizzata nel grafico di stabilizzazione, ma non nei parametri modali.

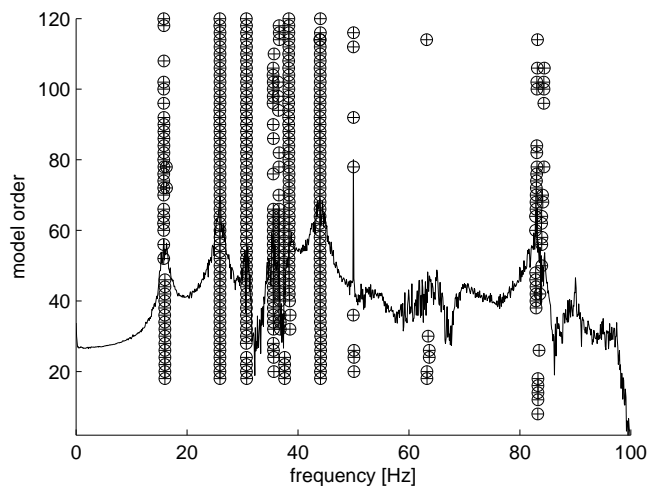


Fig 4.3: Pannello 1-URM. Esempio di diagramma di stabilizzazione rilevato con SSI-DATA/ref (prova 0.15g A).

Nonostante il blocco della tavola avvenuto durante la prova sismica a 0.20g, le misure ambientali sono andate a buon fine e sono da considerarsi attendibili, dato che i risultati sono del tutto congrui con le prove immediatamente precedenti e seguenti. L'implementazione con MACEC 3.2 riguarda perciò sia i dati rilevati a 0.20g che quelli a 0.20g II.

Dall'analisi del grafico di stabilizzazione (Fig 4.3) si sono potuti individuare cinque modi stabili, rappresentati dalle colonne di punti allineati verticalmente e coincidenti con i picchi della curva PSD. Le frequenze a cui si riferiscono sono specificate in Tab 4.2, e vanno da un minimo di circa 13 Hz ad un massimo di circa 40 Hz. I rispettivi rapporti di smorzamento sono presentati in Tab 4.3.

Tab 4.2: Pannello 1-URM. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori delle frequenze.

Step [g]		Wall 1 - Frequencies [Hz]				
0.00g	B	17.42	26.68	31.16	38.38	40.17
0.05g	A	17.67	27.08	31.65	39.70	41.06
0.10g	A	17.32	26.81	31.48	39.34	40.51
0.15g	A	15.85	25.95	30.73	35.42	36.63
0.20g	A	15.37	25.57	30.69	36.47	34.84
0.20g II	A	13.09	24.78	27.60	-	-
0.25g	B	15.50	24.98	30.82	36.98	35.86
0.30g	A	15.16	24.98	30.61	36.51	37.19
Δf tot [Hz]		2.27	1.70	0.55	1.88	2.98
Modes		1	3	4	5	6

Tab 4.3: Pannello 1-URM. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori dei rapporti di smorzamento.

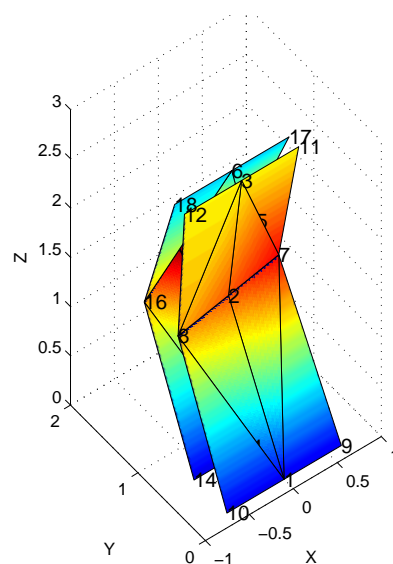
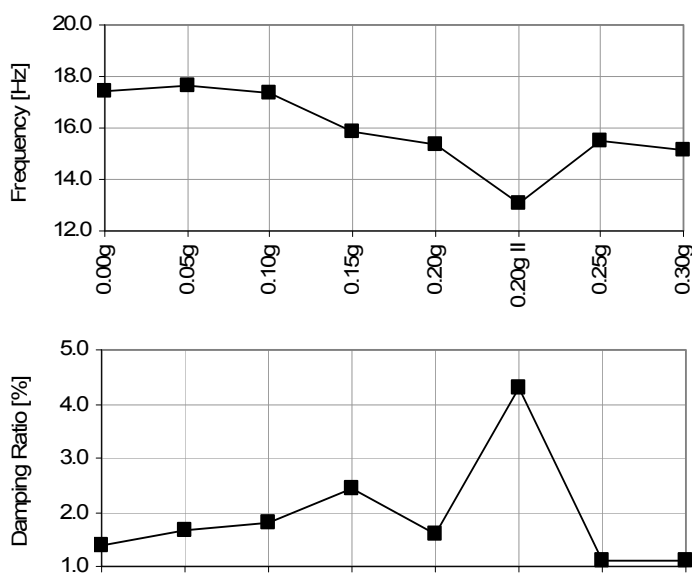
Step [g]		Wall 1 - Damping Ratios [%]				
0.00g	B	1.38	1.55	0.94	1.23	1.16
0.05g	A	1.68	2.03	1.16	0.69	1.59
0.10g	A	1.81	2.12	1.09	1.25	0.34
0.15g	A	2.45	2.08	1.40	2.21	1.78
0.20g	A	1.59	2.05	0.97	2.66	1.61
0.20g II	A	4.31	2.58	2.88	-	-
0.25g	B	1.10	0.15	0.94	0.90	0.63
0.30g	A	1.10	0.65	0.41	1.07	1.75
Modes		1	3	4	5	6

In Fig 4.4 si analizza ogni singolo modo individuato, visualizzando la rispettiva forma modale e l'andamento delle frequenze e dei rapporti di smorzamento all'incrementare del PGA di prova. Nella rappresentazione del modo si è utilizzata la vista tridimensionale riferita al risultato ottenuto a 0.05g, essendo le forme modali identificate per le intensità maggiori del tutto analoghe. I colori indicano lo spostamento Y dei punti della maglia monitorata in valore

assoluto,. La gamma va dal blu scuro, per gli spostamenti minimi (prossimi allo 0), al rosso, per quelli elevati (punti di massimo positivo o negativo). Vengono inoltre fatte delle considerazioni schematiche sul movimento durante l'eccitazione sismica.

1-URM. Mode 1

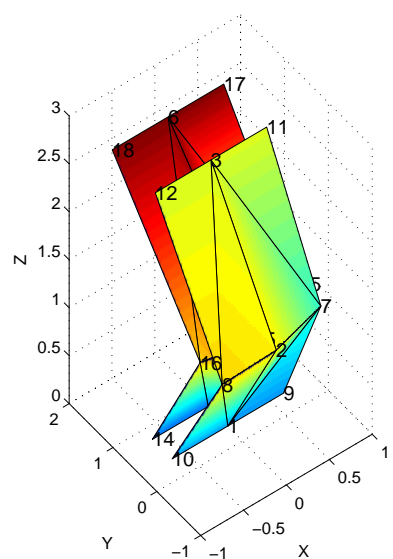
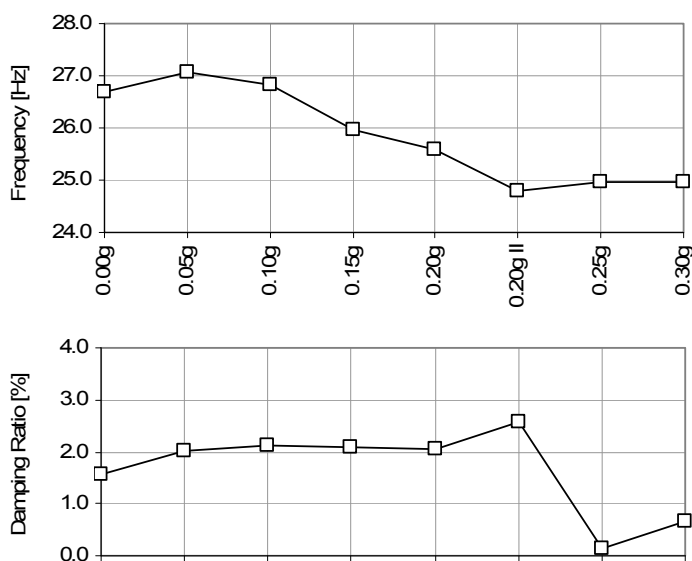
Fig 4.4 - a



- Base e mezzeria in fase, e in opposizione con la sommità;
- CH7 e CH8 (laterali) assumono lo stesso spostamento di CH2;
- Al raggiungimento dello spostamento massimo del pannello, la sommità non risulta essere "in linea" con la base (Fig 4.9-a1).

1-URM. Mode 3

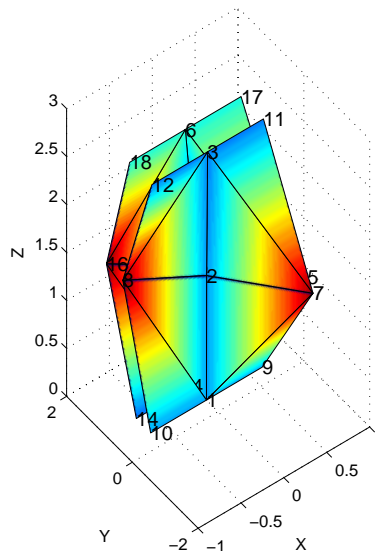
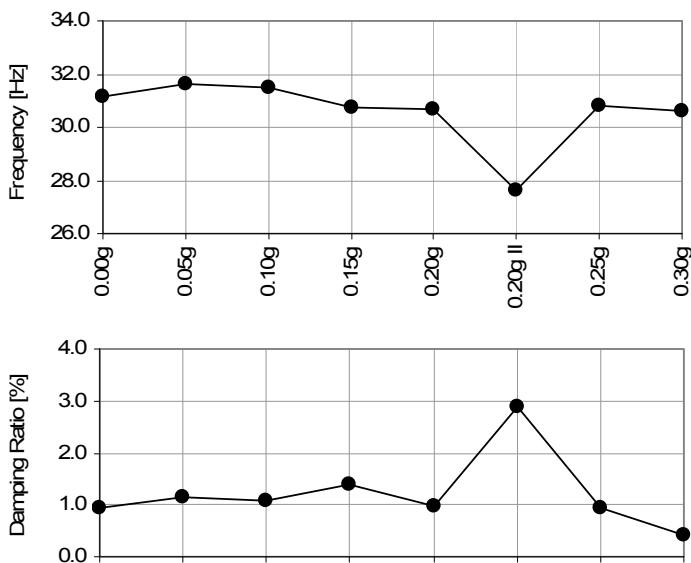
Fig 4.4 - b



- Base e sommità in fase, e in opposizione con la mezzeria;
- CH7 e CH8 (laterali) assumono lo stesso spostamento di CH2;
- I punti fissi sono identificati alla base e in un punto situato a 3/4 dell'altezza (Fig 4.9-b1).

1-URM. Mode 4

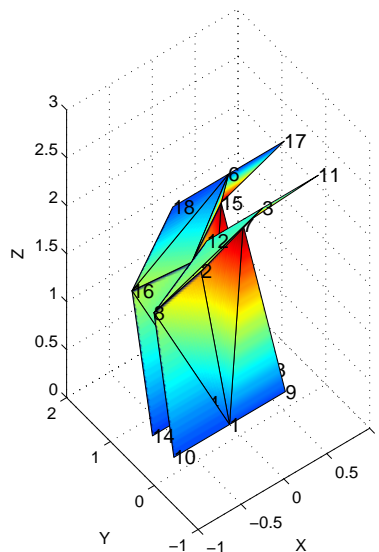
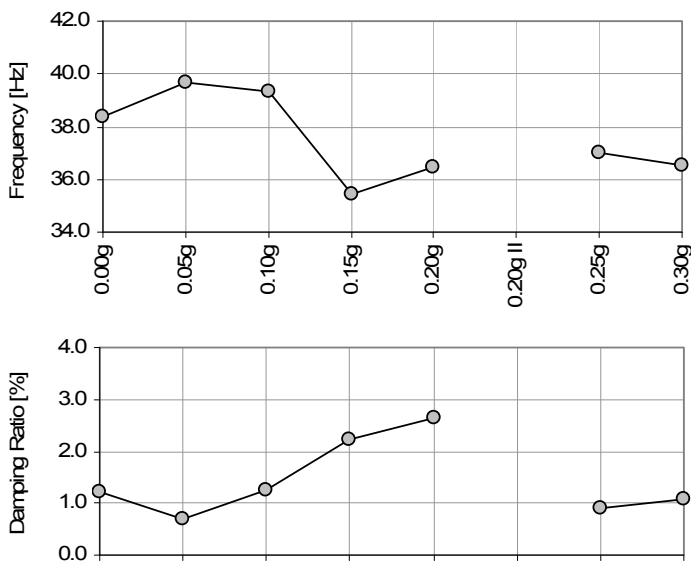
Fig 4.4 - c



- Base e sommità in fase, come per CH2;
- CH7 e CH8 (lateral) in opposizione di fase tra loro;
- Gli spostamenti del pannello avvengono attorno all'asse verticale centrale del pannello;
- Forma modale in fase e simile al modo 6.

1-URM. Mode 5

Fig 4.4 - d



- Base e mezzera in fase, e in opposizione con la sommità;
- CH7 e CH8 (lateral) assumono uno spostamento simile a CH2, con movimenti maggiori localizzati;
- I punti fissi sono identificati alla base e in un punto situato a 3/4 dell'altezza (Fig 4.9-d1).

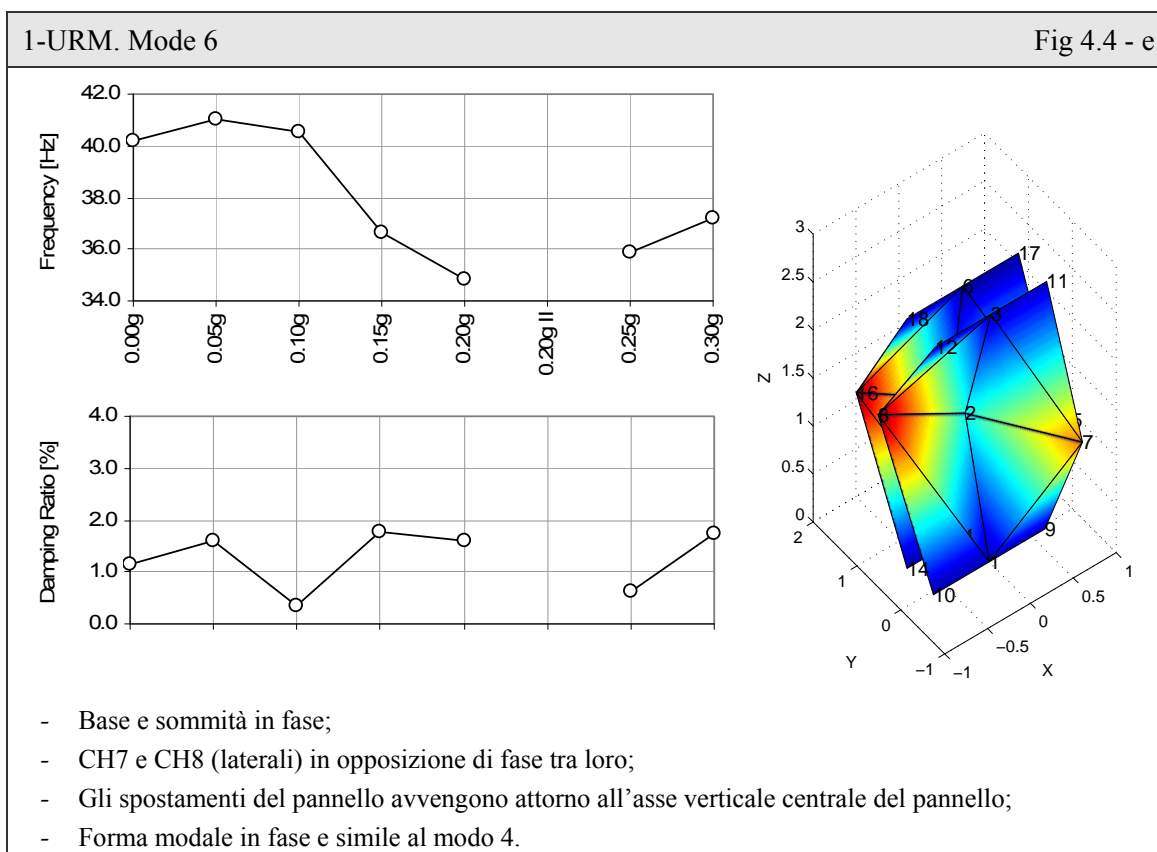


Fig 4.4: Pannello 1-URM. Andamento delle frequenze per ogni forma modale identificata. Le figure sulla destra riguardano la situazione iniziale (0.00g B)

In generale, mettendo in relazione i risultati ottenuti nei diversi passi di prova effettuati sul pannello 1-URM (Fig 4.5), l'andamento delle frequenze risulta decrescere all'aumentare dell'accelerazione alla base, mantenendo un rapporto di smorzamento inferiore al 3%.

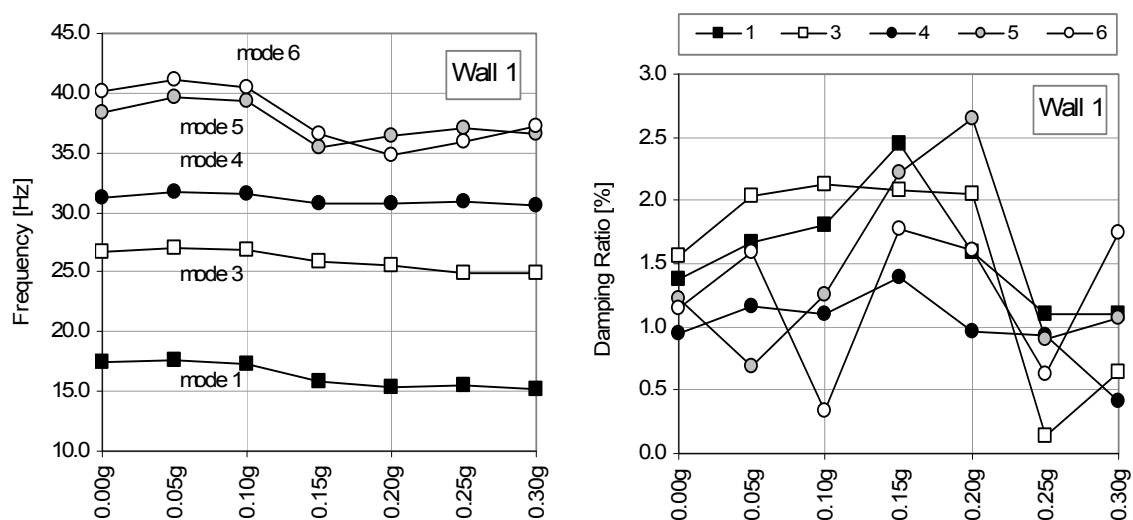


Fig 4.5: Pannello 1-URM. Confronto fra diversi modi identificati, in termini di frequenze e rapporti di smorzamento.

Lo sviluppo dei rapporti di smorzamento è crescente fino a circa 0.15g e 0.20g, fase in cui si crea il meccanismo di rottura che porta al decremento della dissipazione di energia e quindi di ζ (%). Considerando invece la variazione della frequenza Δf_{tot} (Tab 4.2) tra la situazione iniziale e quella precedente il collasso, si può notare come la differenza si attesti in media attorno ai 2.00 Hz. Essa raggiunge il massimo di 3.00 Hz per il “Mode 6”, relativo alle frequenze maggiori, ed il minimo di 0.50 Hz, per il “Mode 4”.

Osservando la duplice prova a 0.20g presente solo in questo pannello, si nota chiaramente la riduzione in termini di frequenza (con corrispondente aumento del rapporto di smorzamento) a 0.20gII rispetto agli altri passi di prova. Inoltre non è stato possibile identificare modi stabili oltre i 30 Hz (“Mode 5” e “Mode 6”). Tale comportamento può essere dovuto allo shut down avvenuto a tavola ferma, tra questa e la prova precedente, il quale può aver alterato i parametri della strumentazione, in seguito riequilibrati.

Per le ragioni suddette, ai fini del confronto generale al paragrafo § 4.5, si ritiene opportuno considerare solamente i risultati dello 0.20g.

4.1.2. Wall 2-URM

Le misurazioni ambientali effettuate sul secondo campione sottoposto a prova, erano caratterizzate dalla tavola vibrante in posizione alta e dalla bassa pressione del sistema oleodinamico. Anche in questo caso la distribuzione degli accelerometri e quindi la configurazione geometrica di analisi era del tipo in Fig 4.1-a.

Altro aspetto da sottolineare ai fini dell'interpretazione dei risultati è la permeazione indesiderata di miscela d'iniezione alla base del pannello. L'area interessa circa 1/5 dell'altezza complessiva e si concentra in particolare sul lato destro (sezione A-A'), a contatto con 3T (cfr § 3.1.2., Fig 3.8).

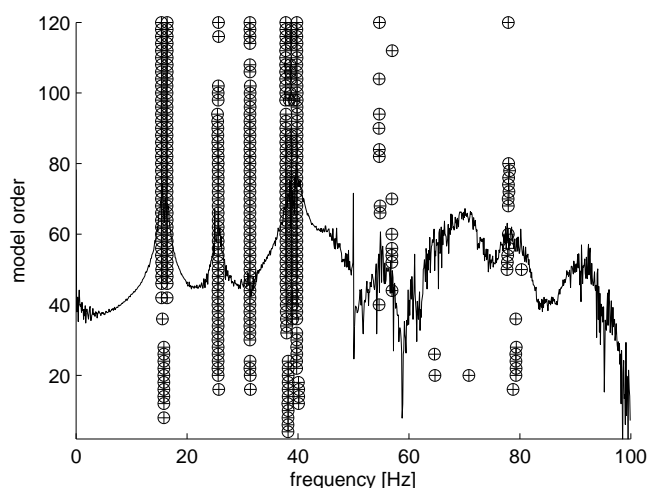


Fig 4.6: Pannello 2-URM. Esempio di diagramma di stabilizzazione rilevato con SSI-DATA/ref (prova 0.10g A).

Tab 4.4: Pannello 2-URM. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori delle frequenze.

Step [g]		Wall 2 - Frequencies [Hz]					
0.00g	A	15.95	16.67	26.54	31.53	39.45	40.50
0.05g	A	16.00	16.60	26.15	31.47	39.75	-
0.10g	A	15.40	16.42	25.78	31.36	37.80	39.83
0.15g	B	15.89	16.49	26.09	31.42	37.81	39.66
0.20g	A	14.53	15.93	25.44	31.25	38.07	-
Δf tot [Hz]		1.43	0.74	1.10	0.28	1.38	0.84
Modes		1	2	3	4	6	5

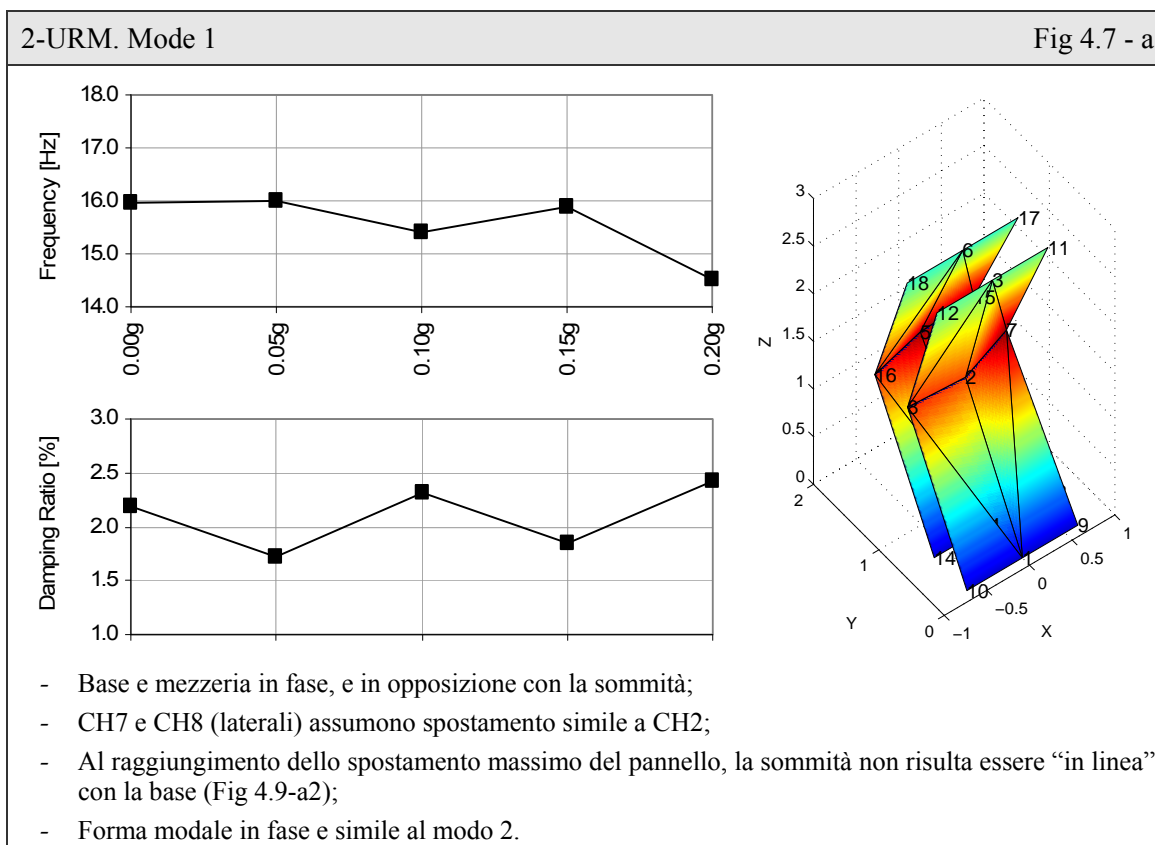
Nel grafico di stabilizzazione (Fig 4.6) si notano le sei frequenze stabili proposte dal programma, in corrispondenza dei picchi della curva PSD. La scelta è ricaduta su matrici di ordine 114, ottenendo valori compresi tra 14 Hz e 40 Hz. Le rilevazioni in termini di frequenza e di rapporti di smorzamento sono riportate in Tab 4.4 e in Tab 4.5. Le misurazioni mancanti,

per le intensità 0.05g e 0.20g, sono legate all'impossibilità di determinare, a quelle specifiche PGA, modi stabili attribuibili alla forma modale denominata "Mode 5".

Tab 4.5: Pannello 2-URM. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori dei rapporti di smorzamento.

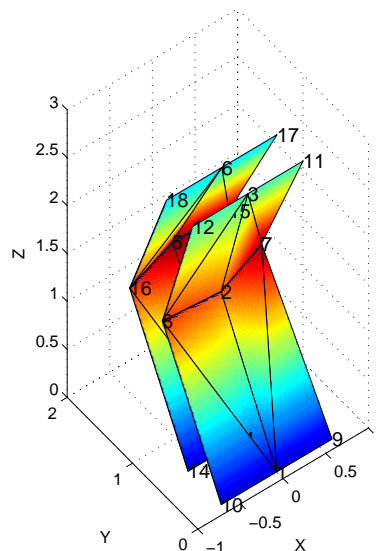
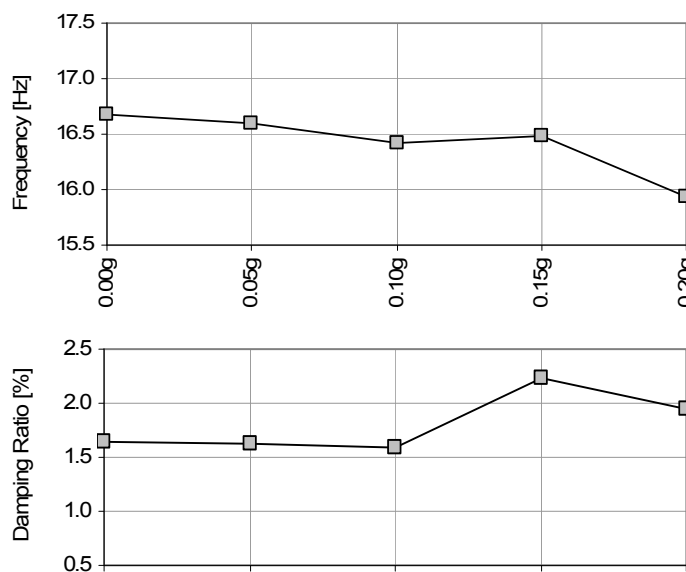
Step [g]		Wall 2 - Damping Ratios [%]					
0.00g	A	2.20	1.64	1.38	1.13	1.52	1.73
0.05g	A	1.72	1.63	1.32	0.47	1.59	-
0.10g	A	2.31	1.58	2.29	0.88	1.41	1.39
0.15g	B	1.85	2.23	2.70	1.26	1.26	1.79
0.20g	A	2.43	1.94	2.04	0.96	1.56	-
Modes		1	2	3	4	6	5

Lo studio procede esaminando ogni singolo modo individuato, l'andamento delle frequenze e dei rapporti di smorzamento, nonché nella rappresentazione di ciascuna forma modale (Fig 4.7). Tali figure, per una resa grafica migliore, sono riportate in assonometria e a colori. La scala policroma indica lo spostamento relativo Y in valore assoluto dei punti che compongono la maglia triangolare: la gamma va dal blu scuro, per gli spostamenti relativi minimi (intorno a 0), al rosso per quelli elevati (punti di massimo positivo o negativo). Vengono inoltre fatte delle considerazioni schematiche sul movimento durante l'eccitazione sismica.



2-URM. Mode 2

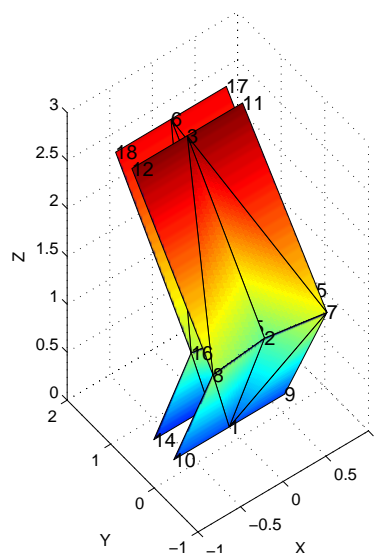
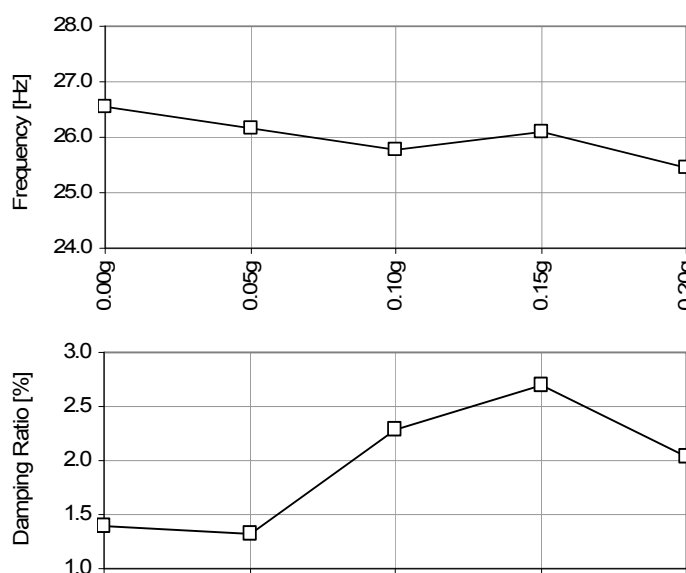
Fig 4.7 - b



- Base e mezzeria in fase, e in opposizione con la sommità;
- CH7 e CH8 (laterali) assumono spostamento simile a CH2;
- Al raggiungimento dello spostamento massimo del pannello, la sommità non risulta essere “in linea” con la base;
- Forma modale in fase e simile al modo 1.

2-URM. Mode 3

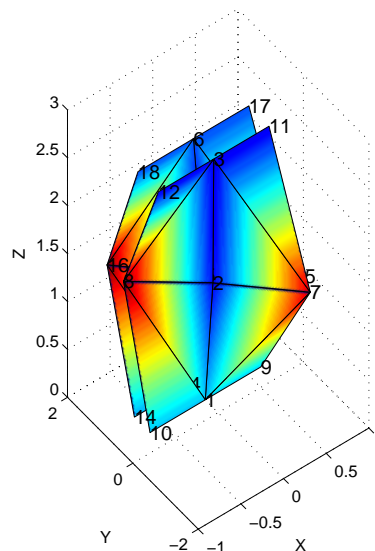
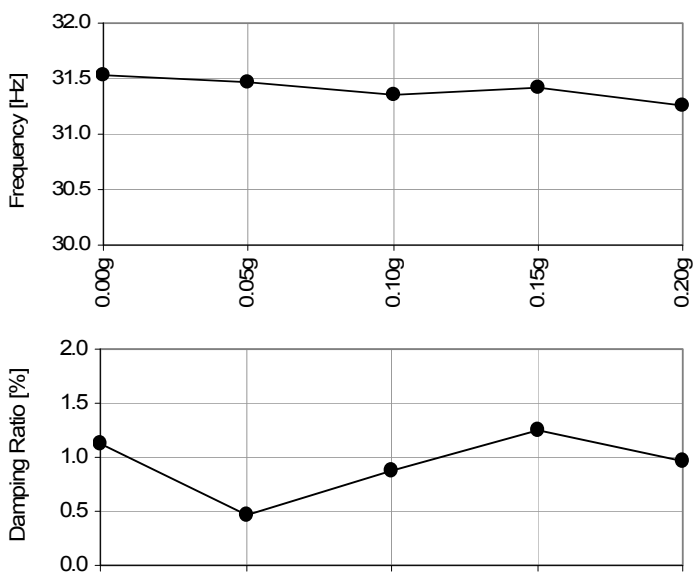
Fig 4.7 - c



- Base e sommità in fase, e in opposizione con la mezzeria;
- CH7 e CH8 (laterali) assumono lo stesso spostamento di CH2;
- I punti fissi sono identificati alla base e in un punto situato a 3/4 dell'altezza (Fig 4.9-b2).

2-URM. Mode 4

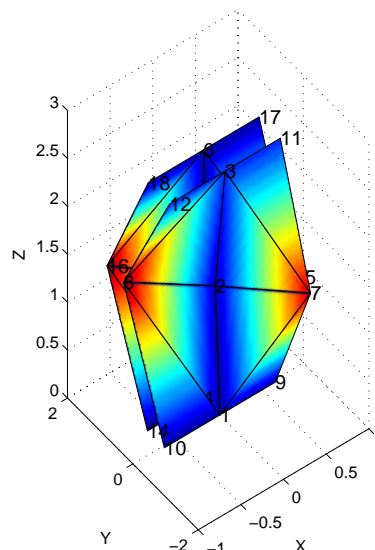
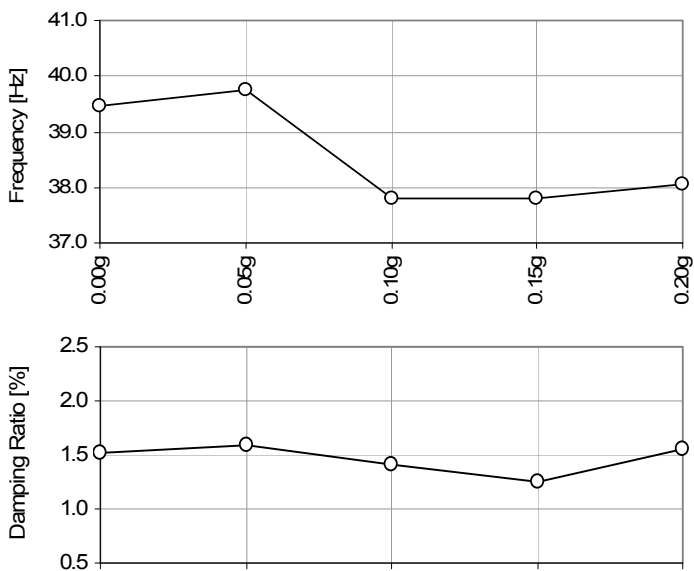
Fig 4.7 - d



- Base e sommità in fase, come per CH2;
- CH7 e CH8 (laterali) in opposizione di fase tra loro;
- Gli spostamenti del pannello avvengono attorno all'asse verticale centrale del pannello;
- Forma modale in fase e simile al modo 6.

2-URM. Mode 6

Fig 4.7 - e



- Base e sommità in fase, come per CH2;
- CH7 e CH8 (laterali) in opposizione di fase tra loro;
- Gli spostamenti del pannello avvengono attorno all'asse verticale centrale del pannello;
- Forma modale in fase e simile al modo 4.

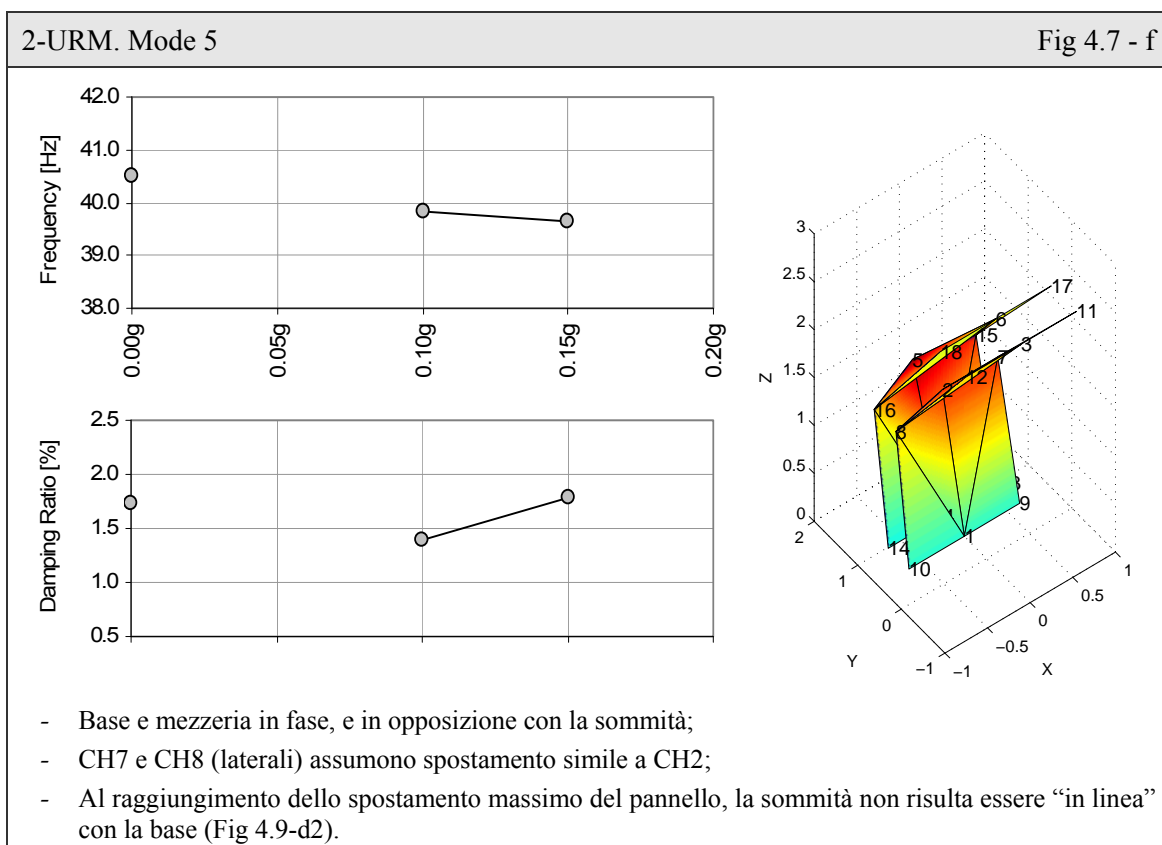


Fig 4.7: Pannello 2-URM. Andamento delle frequenze per ogni forma modale identificata. Le figure sulla destra riguardano la situazione iniziale (0.00g A)

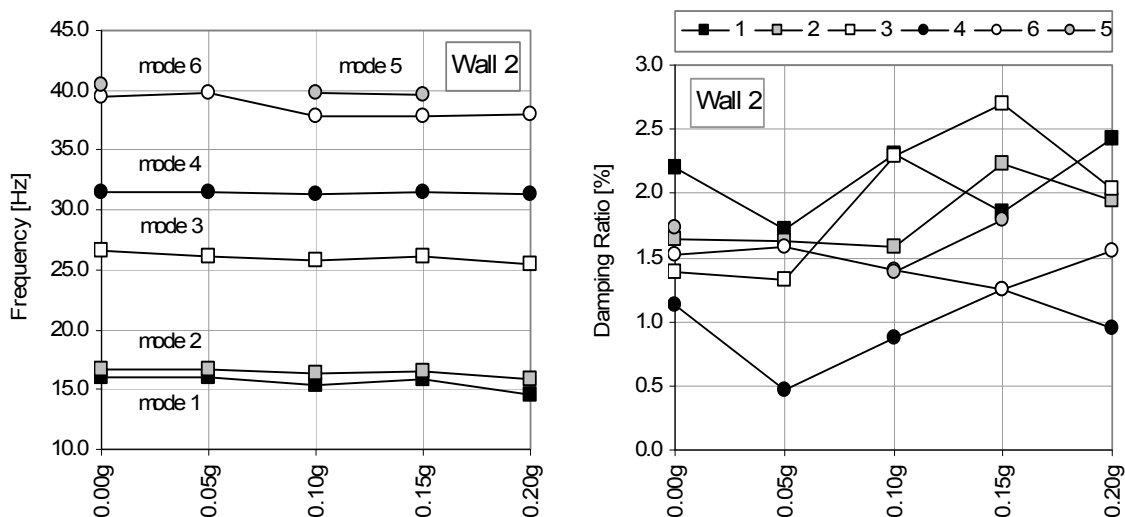


Fig 4.8: Pannello 2-URM. Confronto fra diversi modi identificati, in termini di frequenze e rapporti di smorzamento.

La variazione dei parametri dinamici all'aumentare della sollecitazione sismica è riassunta in Fig 4.8. A causa del precoce collasso, si dispone di un ridotto numero di prove che ha reso più complessa la visualizzazione grafica dell'andamento delle frequenze e dei rapporti di smorzamento, e quindi l'interpretazione dei risultati. In generale, ζ (%) non supera il 3%, con il

picco comune a circa 0.15g. Rapporti di smorzamento così bassi indicano, una bassa capacità di dissipazione di energia da parte della struttura. I valori evidenziano un leggero aumento sino alla formazione di un meccanismo di rottura (picco a 0.15g). L'andamento delle frequenze invece, è decrescente, seppur con pendenza molto ridotta. La differenza Δf_{tot} (Tab 4.4) è in media di 1 Hz, con maggior rilevanza in "Mode 1", "Mode 3" e "Mode 6". Gli altri modi manifestano un andamento pressoché costante.

4.1.3. Osservazioni

Confrontando i risultati ottenuti in termini di frequenza e di rapporto di smorzamento, in riferimento ai soli pannelli non rinforzati (1-URM e 2-URM), si osserva un comportamento in generale significativo. La presenza di un maggior numero di prove effettuate a PGA diverse – 1-URM è collassato a 0.35g mentre 2-URM a 0.25g – consente una compressione più completa delle caratteristiche modali dell'elemento analizzato.

I modi propri individuati nei due pannelli non rinforzati si presentano a frequenze analoghe, con comportamenti tra loro confrontabili e associabili alle stesse forme modali (Fig 4.9). In 2-URM è stato identificato un ulteriore modo stabile (Mode 2) a circa 16.5 Hz, frequenza di poco superiore a quella di “Mode 1”, non distinguibile in 1-URM.

Il decremento di frequenza Δf_{tot} , rilevato tra passo di prova iniziale e finale, è in media di 2 Hz nel primo caso e 1 Hz nel secondo. La variazione è maggiormente visibile, in entrambi i casi di studio, in “Mode 1” e “Mode 6”. Osservando invece l'andamento dei rapporti di smorzamento, si nota che la dissipazione di energia cresce in entrambi i casi sino a 0.15g, pur mantenendo valori inferiori al 3%.

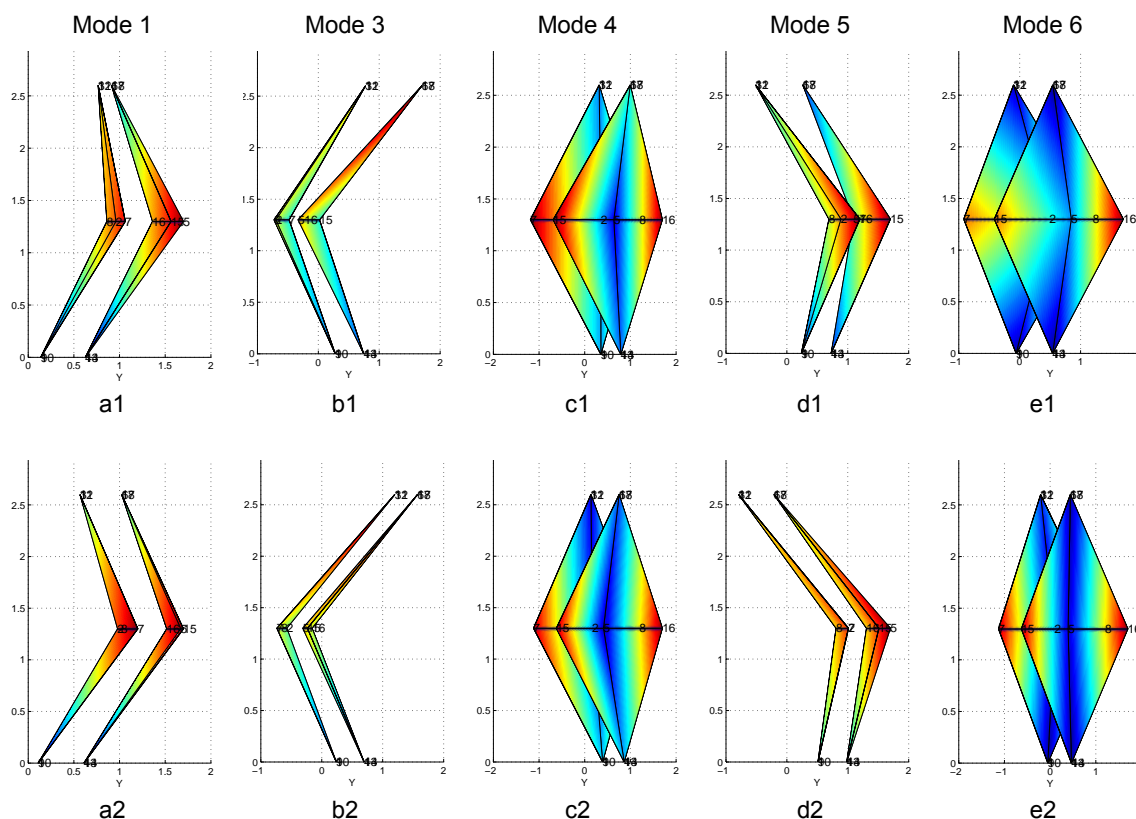


Fig 4.9: Confronto tra le forme modali individuate in 1-URM (sopra) e 2-URM (sotto).

4.2. Pannelli rinforzati con tiranti

Lo studio procede con i campioni rinforzati (Strengthened Masonry, SM). In questo paragrafo l'attenzione si concentra sui casi di applicazione di tirantini antiespulsivi trasversali. Le caratteristiche fisiche di ciascun pannello sono già state esaminate al paragrafo § 2.1.3, mentre la configurazione geometrica dei nodi è rappresentata in Fig 4.1-b.

Si ricorda che in ciascun muro sono stati inserite sei barre nello spessore murario, corrispondente alla direzione del sisma (Y). Si è inoltre verificata, in entrambi i campioni qui analizzati, la permeazione di miscela a seguito dell'iniezione dei pannelli contigui (cfr. § 2.1.1).

4.2.1. Wall 3T

Le rilevazioni ambientali sono state eseguite con la tavola vibrante in posizione alta e a bassa pressione. In questo caso tali misurazioni sono state effettuate anche a seguito del collasso, avvenuto durante l'input sismico a 0.60g. Come da quadro fessurativo analizzato nel paragrafo § 3.2.1, il crollo ha interessato il retro perciò sono stati ri-posizionati solamente gli accelerometri sul fronte (A1, A2, A3, A7 e A8). L'assenza di misure sulla parte posteriore del pannello ha alterato le forme modali identificate a 0.60g. Al paragrafo suddetto si nota, inoltre, che la permeazione di miscela durante l'iniezione ha interessato un'area considerevole nella parte inferiore.

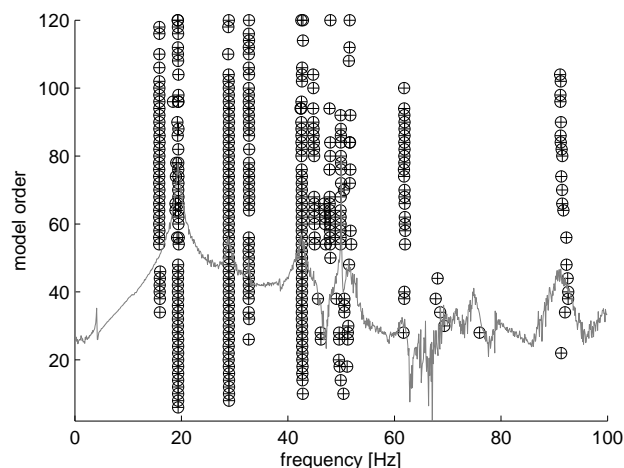


Fig 4.10: Pannello 3T. Esempio di diagramma di stabilizzazione rilevato con SSI-DATA/ref (0.05g A).

Con MACEC 3.2 sono stati individuati quattro modi stabili, visibili nel diagramma di stabilizzazione (Fig 4.10) a frequenze comprese tra 13 Hz e 32 Hz, le quali sono state specificate in Tab 4.6. Nel diagramma qui riportato, si nota un'ulteriore frequenza stabile a circa 42 Hz che non è stata presa in considerazione nell'elaborazione. La ragione di questa scelta è dovuta al fatto che si manifestava solamente in pochi passi di prova (0.05g, 0.45g e 0.60g). Inoltre, a 0.00g non sono stati indicati i dati relativi al modo identificato a 15.66 Hz, perché la forma modale non è coerente con quelle riscontrate nei passi di prova successivi. I rispettivi rapporti di smorzamento sono esaminati in

Tab 4.7.

Tab 4.6: Pannello 3T. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori delle frequenze.

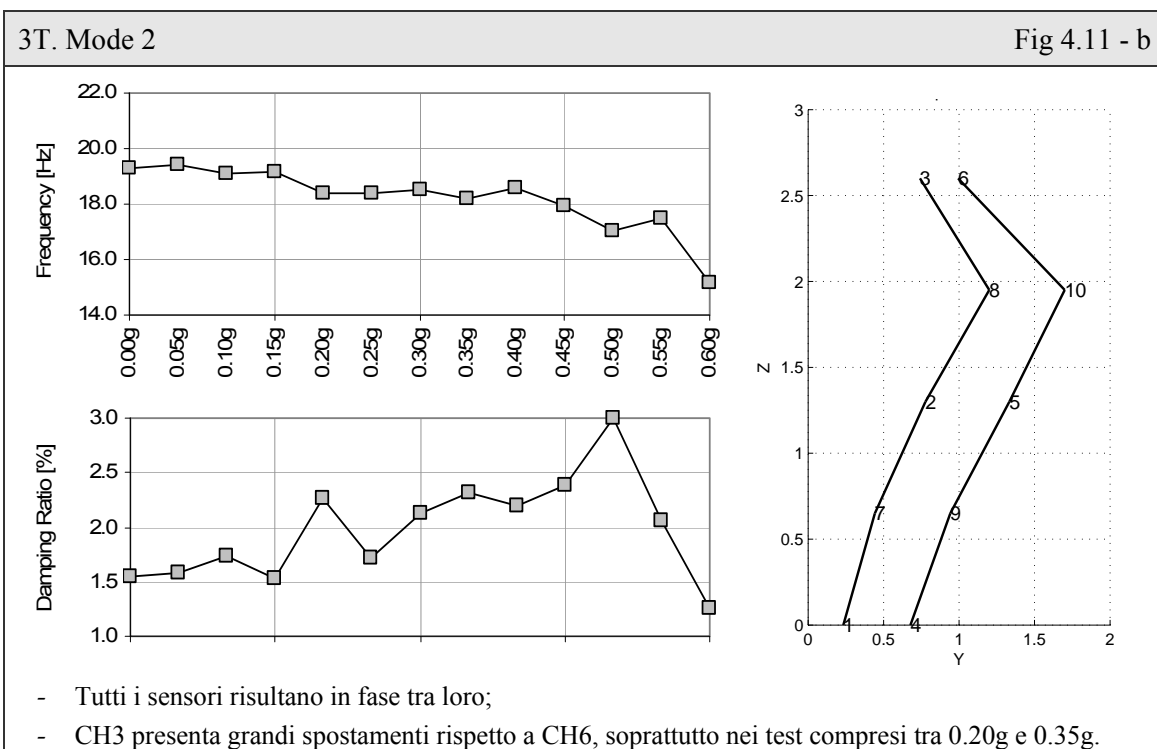
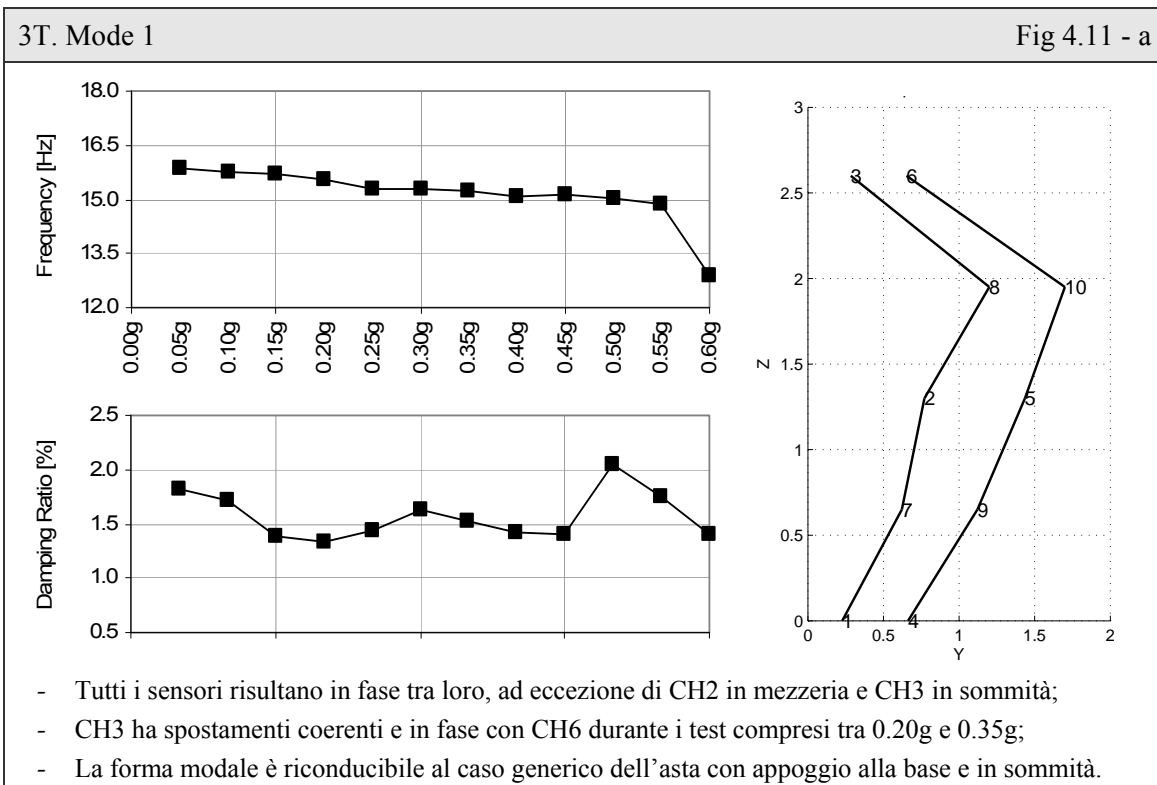
Step [g]		Wall 3T - Frequencies [Hz]			
0.00g	A	-	19.26	28.92	32.17
0.05g	A	15.86	19.45	28.89	32.66
0.10g	A	15.78	19.11	28.59	32.51
0.15g	B	15.72	19.16	28.71	32.46
0.20g	A	15.54	18.36	28.03	32.30
0.25g	A	15.27	18.36	27.62	32.20
0.30g	A	15.31	18.51	28.31	32.28
0.35g	A	15.21	18.20	27.67	32.23
0.40g	A	15.09	18.57	28.27	32.22
0.45g	A	15.14	17.93	27.63	32.11
0.50g	A	15.03	17.01	26.94	32.05
0.55g	B	14.88	17.51	27.21	31.96
0.60g	A	12.87	15.13	25.71	32.02
Δf tot [Hz]		2.99	4.13	3.21	0.14
Modes		1	2	3	nc

Tab 4.7: Pannello 3T. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori dei rapporti di smorzamento.

Step [g]		Wall 3T - Damping Ratios [%]			
0.00g	A	-	1.55	1.49	0.85
0.05g	A	1.82	1.58	1.68	0.80
0.10g	A	1.72	1.74	1.78	1.09
0.15g	B	1.39	1.54	1.40	0.87
0.20g	A	1.33	2.27	1.54	0.91
0.25g	A	1.43	1.72	2.18	0.78
0.30g	A	1.63	2.13	1.62	1.00
0.35g	A	1.53	2.32	1.30	0.91
0.40g	A	1.42	2.20	1.58	0.91
0.45g	A	1.41	2.39	1.67	0.86
0.50g	A	2.05	3.01	2.46	1.01
0.55g	B	1.76	2.07	1.92	0.85
0.60g	A	1.40	1.26	2.57	0.86
Modes		1	2	3	nc

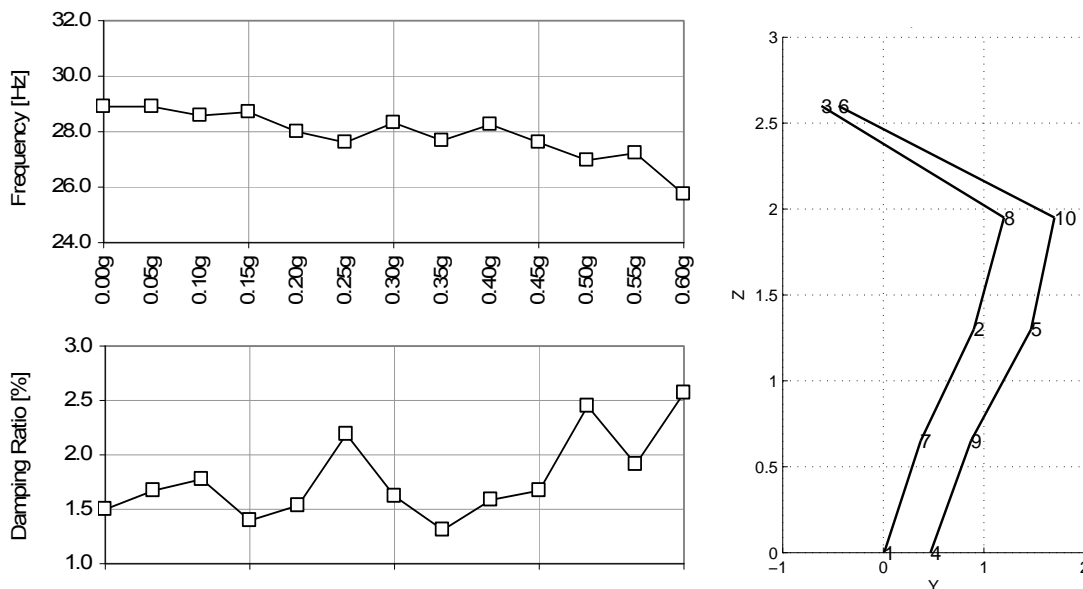
L'analisi si concentra su ogni singolo modo individuato (Fig 4.11) confrontando graficamente l'andamento delle frequenze e dei rapporti di smorzamento durante la

sperimentazione. Si riporta inoltre la vista laterale della forma modale di riferimento, che aiuta a comprendere il comportamento del pannello.



3T. Mode 3

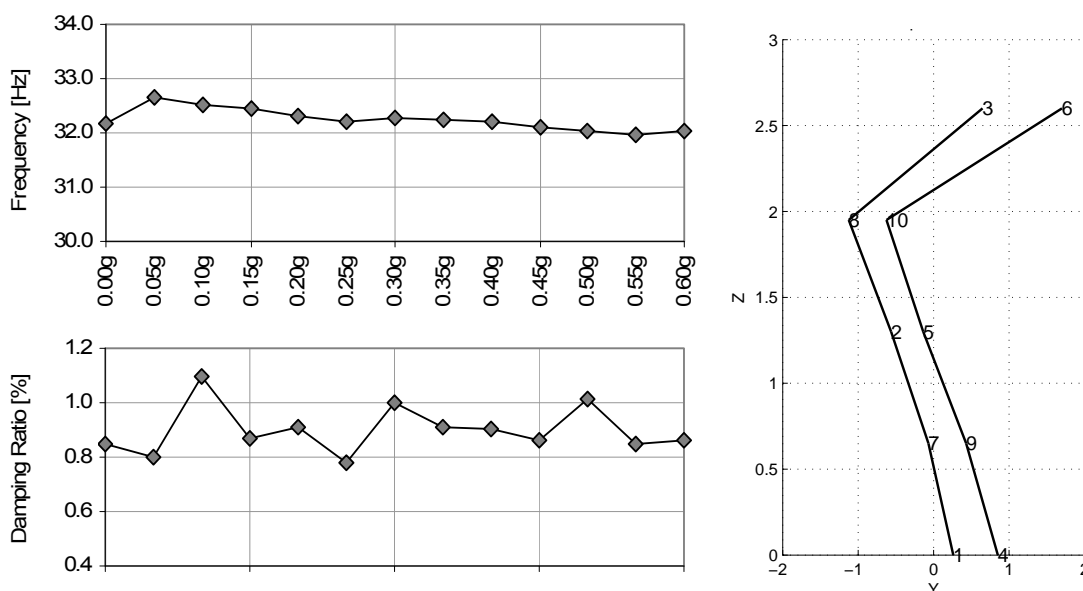
Fig 4.11 - c



- Sommità in opposizione di fase con mezzeria. Base ben incastrata;
- CH7 e CH8 in fase con la mezzeria;
- CH6 presenta spostamenti maggiori durante i test compresi tra 0.20g e 0.35g;
- I punti fissi sono identificati alla base e in un punto situato tra CH8 e CH3.

3T. Mode nc

Fig 4.11 - d



- Base e sommità in fase, e in opposizione con la mezzeria;
- CH7 in fase con la base e CH8 in fase con la mezzeria;
- CH6 presenta spostamenti maggiori durante i test compresi tra 0.20g e 0.35g;
- La forma modale, pur essendo stabile è dovuta a movimenti localizzati, non sempre coerenti.

Fig 4.11: Pannello 3T. Andamento delle frequenze per ogni forma modale identificata. Le figure sulla destra riguardano la situazione a 0.05g.

L'ultima forma modale individuata (circa 32 Hz) è stata presa in considerazione perché stabile e presente in tutte le prove. Osservando però l'andamento delle frequenze e dei rapporti di smorzamento (Fig 4.11-d), si può notare come il valore rimanga pressoché costante all'incrementare della sollecitazione sismica. Durante l'identificazione dinamica si sono riscontrate forme modali non sempre coerenti tra loro, in quanto legate a movimenti locali di alcuni punti del pannello. Per tali ragioni non viene considerato come modo fondamentale, e perciò non verrà trattato nel paragrafo § 4.5 con i confronti generali.

Per quel che riguarda gli altri modi individuati, l'andamento delle frequenze è decrescente all'incrementare dell'accelerazione alla base, con un valore Δf_{tot} in media di 3.40 Hz. Il chiaro decremento è indice di una buona risposta del paramento murario e dei rinforzi adottati (tiranti): durante l'evento sismico il danneggiamento avviene in modo graduale. A confermare quest'ipotesi, è il grafico dei rapporti di smorzamento con tendenza sempre crescente sino a 0.50g, prova in cui si presenta un meccanismo di rottura che determina la dissipazione dell'energia fino al collasso avvenuto a 0.60g. I valori di smorzamento sono tutti inferiori al 3%.

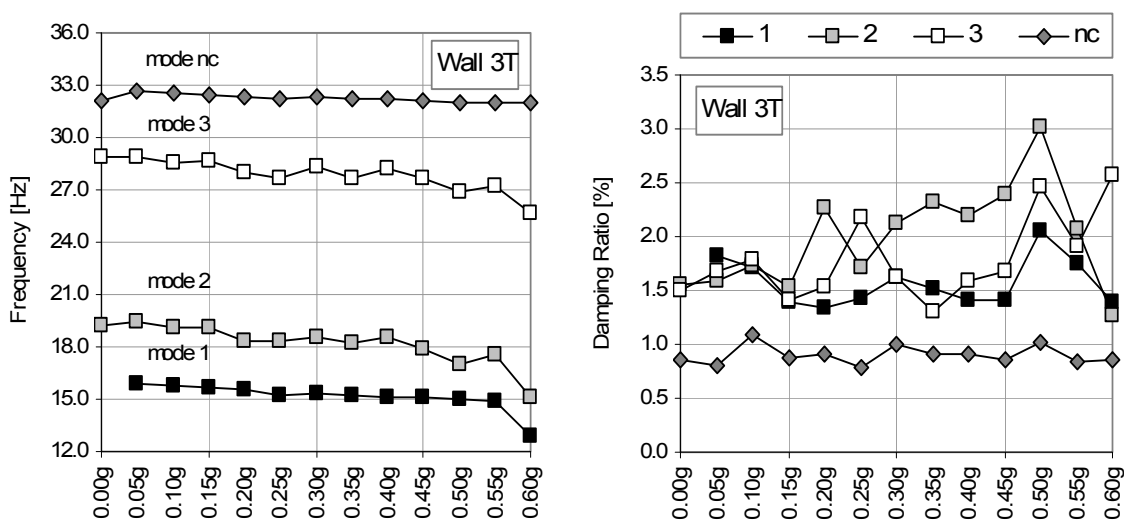


Fig 4.12: Pannello 3T. Confronto fra diversi modi identificati, in termini di frequenze e rapporti di smorzamento.

4.2.2. Wall 4T

Ancora una volta risulta importante individuare l'area soggetta a permeazione di miscela legante, caratterizzata da una rigidità superiore. Al paragrafo § 3.2.2, Fig. 3.26, si nota che l'iniezione ha interessato completamente la metà inferiore del pannello.

Ad ogni passo di prova, le misurazioni ambientali sono state effettuate a tavola vibrante in posizione alta e con bassa pressione del sistema oleodinamico. L'identificazione dinamica ha poi permesso di individuare cinque modi stabili (Tab 4.8), situati a frequenze comprese tra 10 Hz e 39 Hz. Essi sono facilmente distinguibili nel diagramma di stabilizzazione (Fig 4.13) in corrispondenza delle colonne di valori stabili proposti dal software.

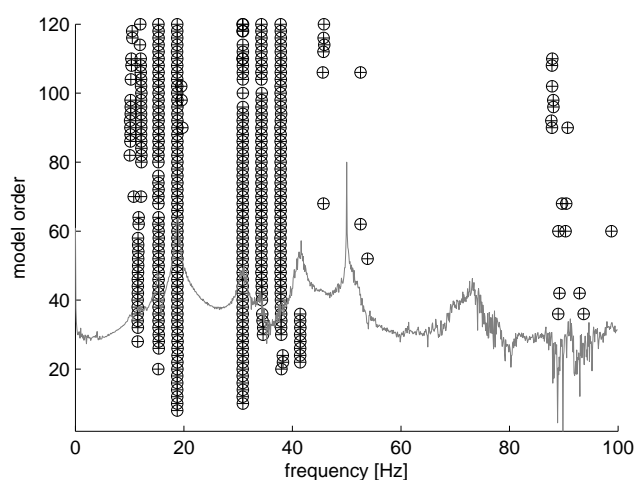


Fig 4.13: Pannello 4T. Esempio di diagramma di stabilizzazione rilevato con SSI-DATA/ref (0.10g A).

Tab 4.8: Pannello 4T. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori delle frequenze.

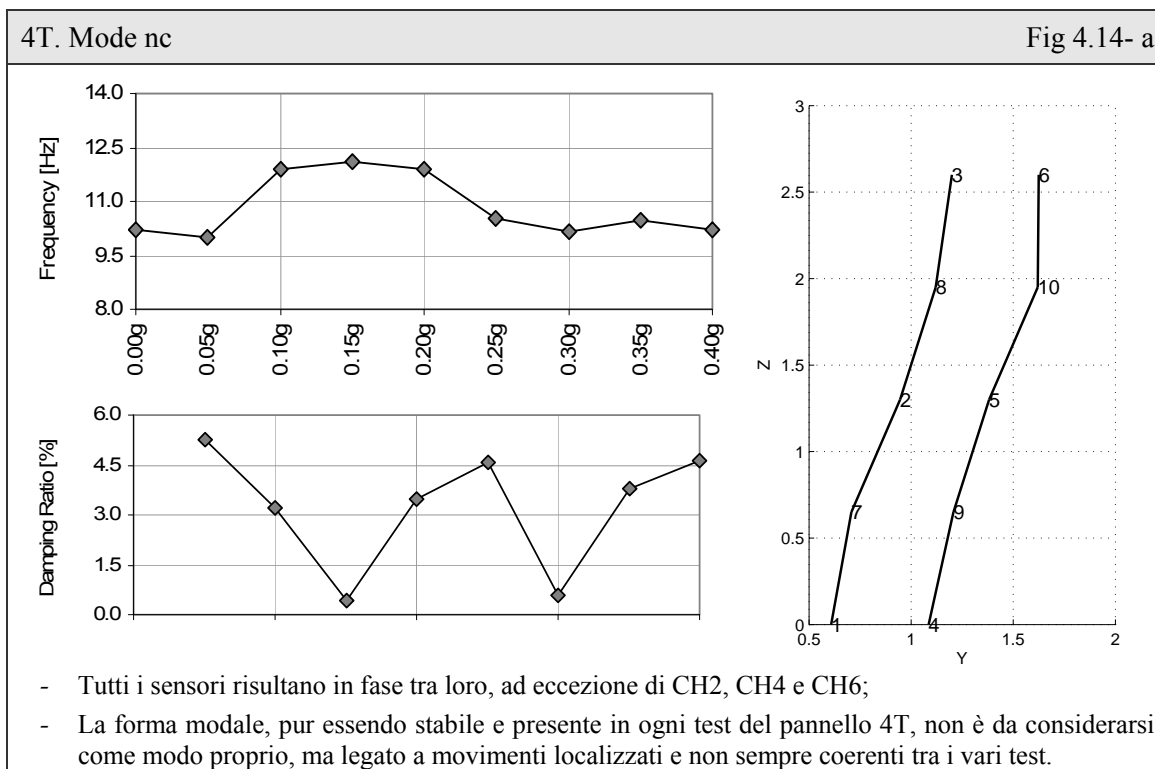
Step [g]		Wall 4T - Frequencies [Hz]				
0.00g	A	10.22	15.20	18.58	30.80	39.06
0.05g	A	10.00	15.44	18.90	30.85	38.52
0.10g	A	11.90	15.33	18.77	30.87	37.84
0.15g	A	12.12	15.17	18.75	30.61	37.61
0.20g	A	11.91	14.99	18.34	30.31	37.63
0.25g	A	10.51	13.80	18.89	33.29	35.92
0.30g	B	10.14	14.62	17.64	30.89	37.90
0.35g	A	10.46	13.43	15.69	30.94	35.42
0.40g	A	10.21	12.27	15.12	30.90	-
Δf tot [Hz]		0.01	2.93	3.46	-0.10	3.64
Modes		nc	1	2	3	5

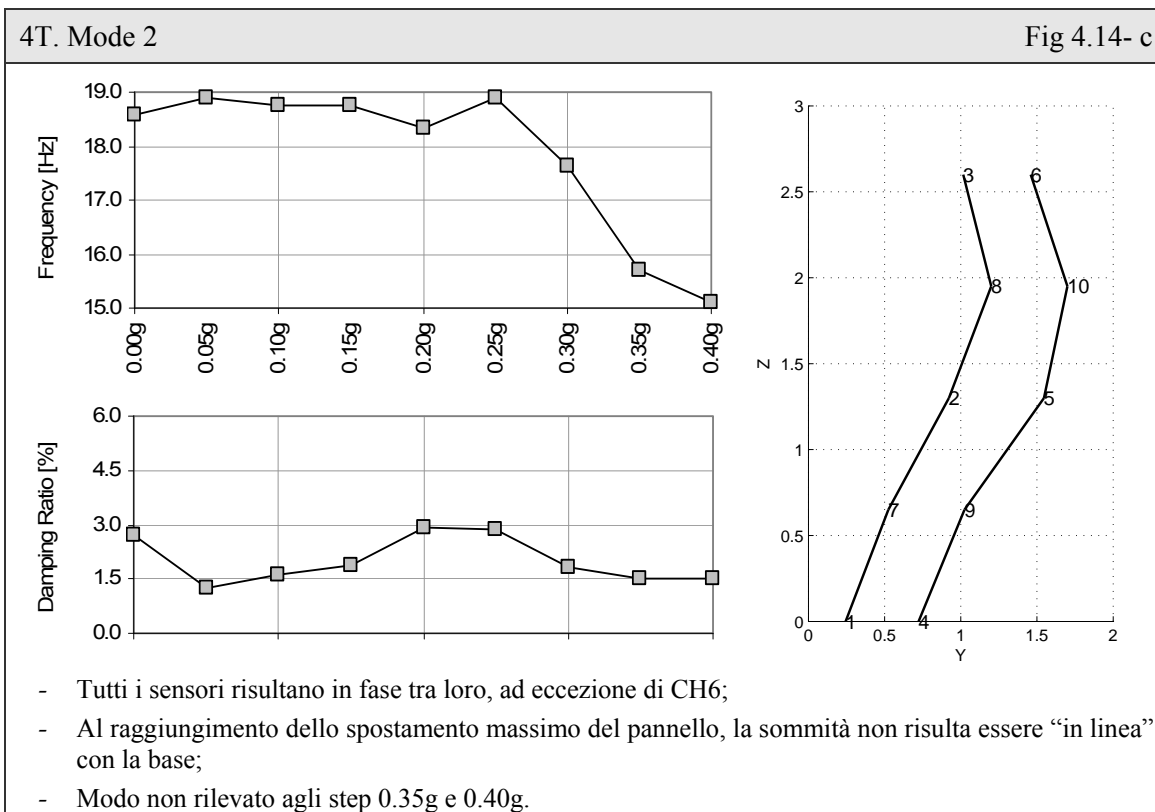
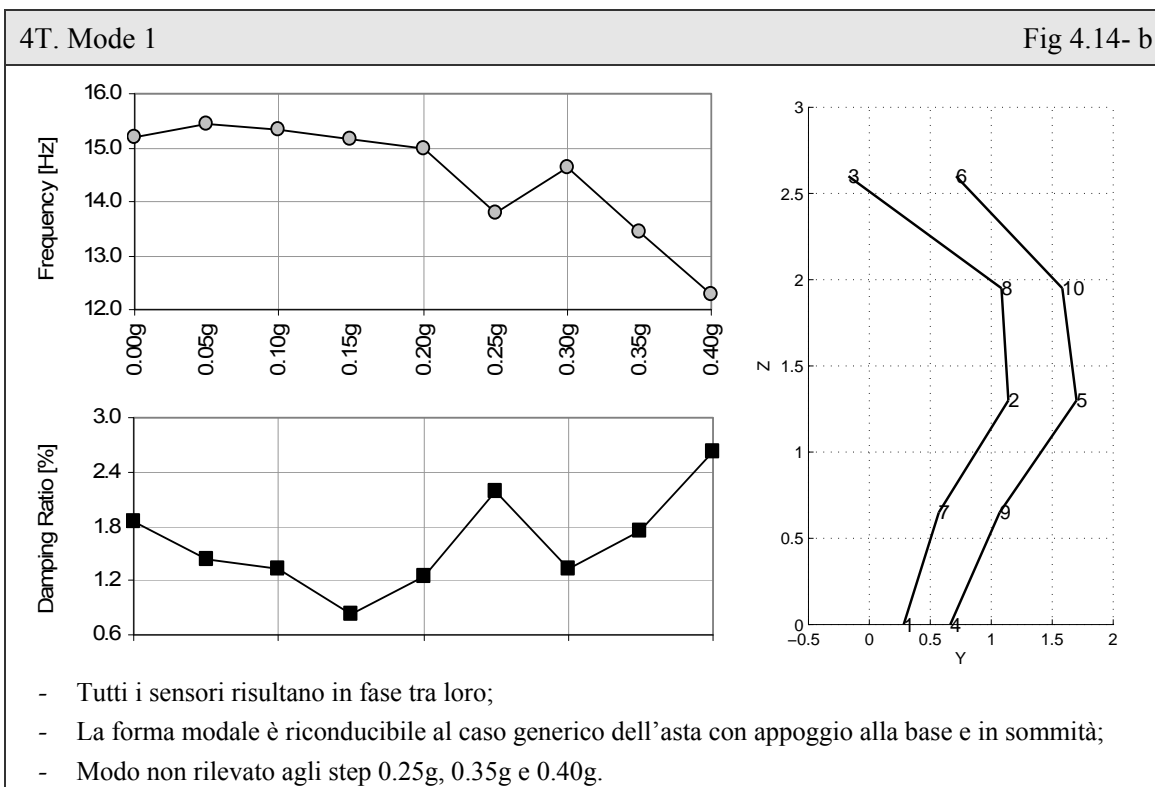
Durante l'identificazione a 0.25g, 0.35g e 0.40g (Fig 4.14) si manifestano forme modali e frequenze non sempre coerenti con gli altri passi di prova. Questo comportamento trova

spiegazione nel grafico riassuntivo dei fattori di amplificazione delle accelerazioni in Fig 3.28 (cfr § 3.2.2), nel quale si nota un'inversione dell'andamento globale a partire da 0.15g. Esaminando invece i rapporti di smorzamento (Tab 4.9), si nota un valore molto elevato (circa 11%) alla frequenza 10.22 Hz a 0.00g. Si tratta infatti di un modo caratterizzato, anche agli altri passi di prova, da frequenze poco stabili e valori di ζ (%) elevati, indipendentemente dall'ordine scelto sul diagramma di stabilizzazione.

Tab 4.9: Pannello 4T. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori dei rapporti di smorzamento.

Step [g]		Wall 4T - Damping Ratios [Hz]				
0.00g	A	10.97	1.85	2.72	1.92	1.62
0.05g	A	5.24	1.43	1.28	2.02	1.73
0.10g	A	3.22	1.33	1.64	1.63	1.31
0.15g	A	0.44	0.83	1.86	1.99	1.23
0.20g	A	3.50	1.25	2.93	1.99	1.63
0.25g	A	4.57	2.18	2.87	1.84	2.02
0.30g	B	0.57	1.33	1.85	1.52	1.64
0.35g	A	3.80	1.75	1.50	2.83	1.84
0.40g	A	4.61	2.62	1.49	1.92	1.53
Modes		nc	1	2	3	5





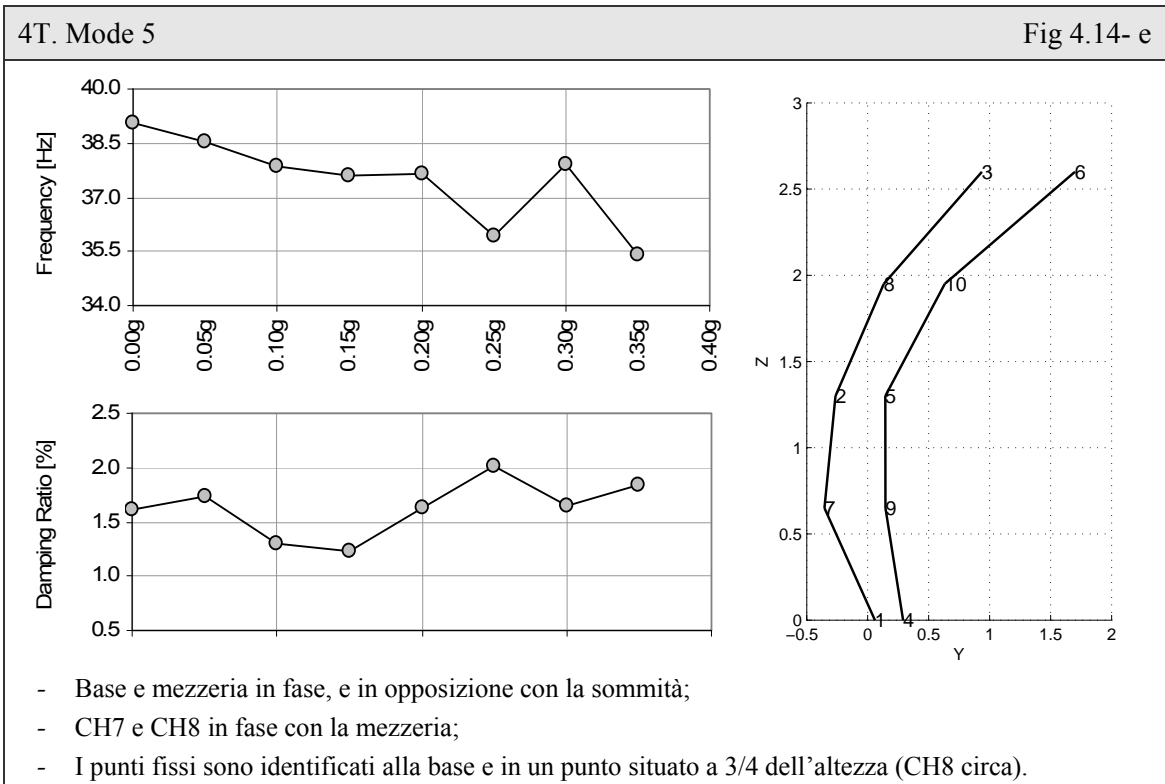
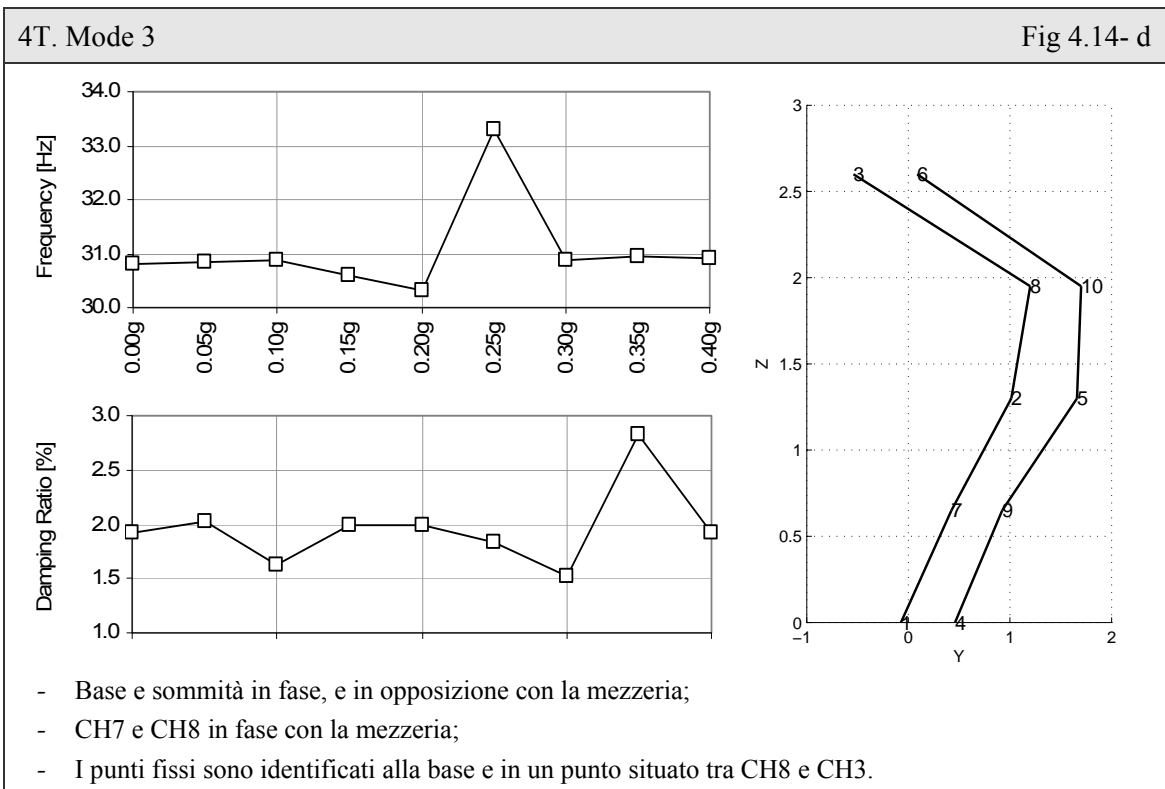


Fig 4.14: Pannello 4T. Andamento delle frequenze per ogni forma modale identificata. Le figure sulla destra riguardano la situazione a 0.05g.

Dall'analisi della prima forma modale individuata (Fig 4.14-a), si nota un comportamento delle frequenze in media costante, con un incremento di circa 2 Hz nelle prove a 0.10g, 0.15g e 0.20g. I rispettivi rapporti di smorzamento assumono un andamento in continua oscillazione all'interno di un ampio intervallo di valori che arriva a picchi di circa 11%.

Già nei diagrammi di stabilizzazione implementati ad ogni singolo passo di prova si è potuto osservare uno sviluppo poco stabile all'incrementare dell'ordine della matrice per le frequenze intorno ai 10 Hz. Inoltre, nelle forme modali si manifestano frequentemente movimenti localizzati rilevabili durante una singola prova. Per tutte le ragioni suddette non si ritiene effettivamente un modo proprio, pur essendo stabile e presente in tutte i passi di prova, e viene denominato "Mode nc" dove "nc" sta per "modo Non Considerato proprio" e perciò non confrontato nei confronti nel paragrafo § 4.5.

Prendendo in considerazione le altre frequenze, è evidente un andamento globale (Fig 4.15) piuttosto costante nei primi passi di prova, per poi manifestarsi un chiaro decremento. Diversamente, il quinto modo identificato assume un andamento più graduale, con una differenza Δf_{tot} pari a 3.64 Hz. Osservando il comportamento dei rispettivi rapporti di smorzamento, il picco di dissipazione non avviene sempre alla stessa PGA. Lo sviluppo è in media decrescente al primo e quinto modo e costante al terzo. Al secondo invece presenta una stabilità iniziale fino a 0.25g per poi manifestare una chiara riduzione. Escludendo "Mode nc", i valori sono inferiori al 3%.

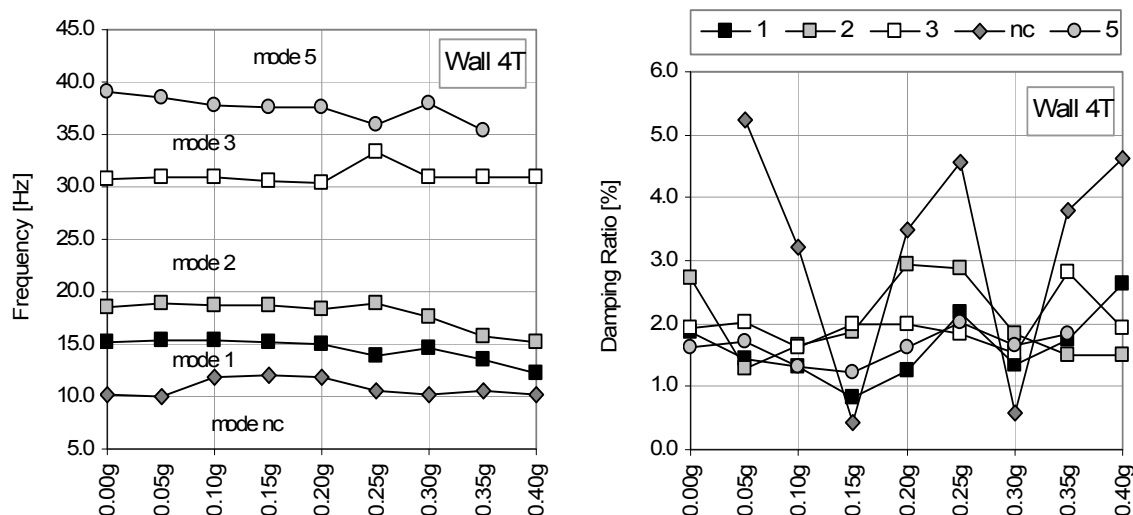


Fig 4.15: Pannello 4T. Confronto fra diversi modi identificati, in termini di frequenze e rapporti di smorzamento.

4.2.3. Osservazioni

Dal confronto delle risposte dei pannelli tirantati si riscontrano forme modali congruenti (Fig 4.16) che si manifestano a frequenze affini. Eventuali differenze sono localizzate e perciò dovute a caratteristiche fisiche dei campioni (nucleo, conci, iniezione, ecc.).

In termini di frequenza, l'intervallo di valori in gioco è il medesimo per i primi tre modi. Le forme considerate non-proprie ("Mode nc") ed il "Mode 5" sono presenti solamente in uno dei due muri: i 32 Hz circa in 3T e le rimanenti in 4T. In 3T si osserva un maggior decremento di frequenza nei primi tre modi. I rapporti di smorzamento assumono valori inferiori al 3%.

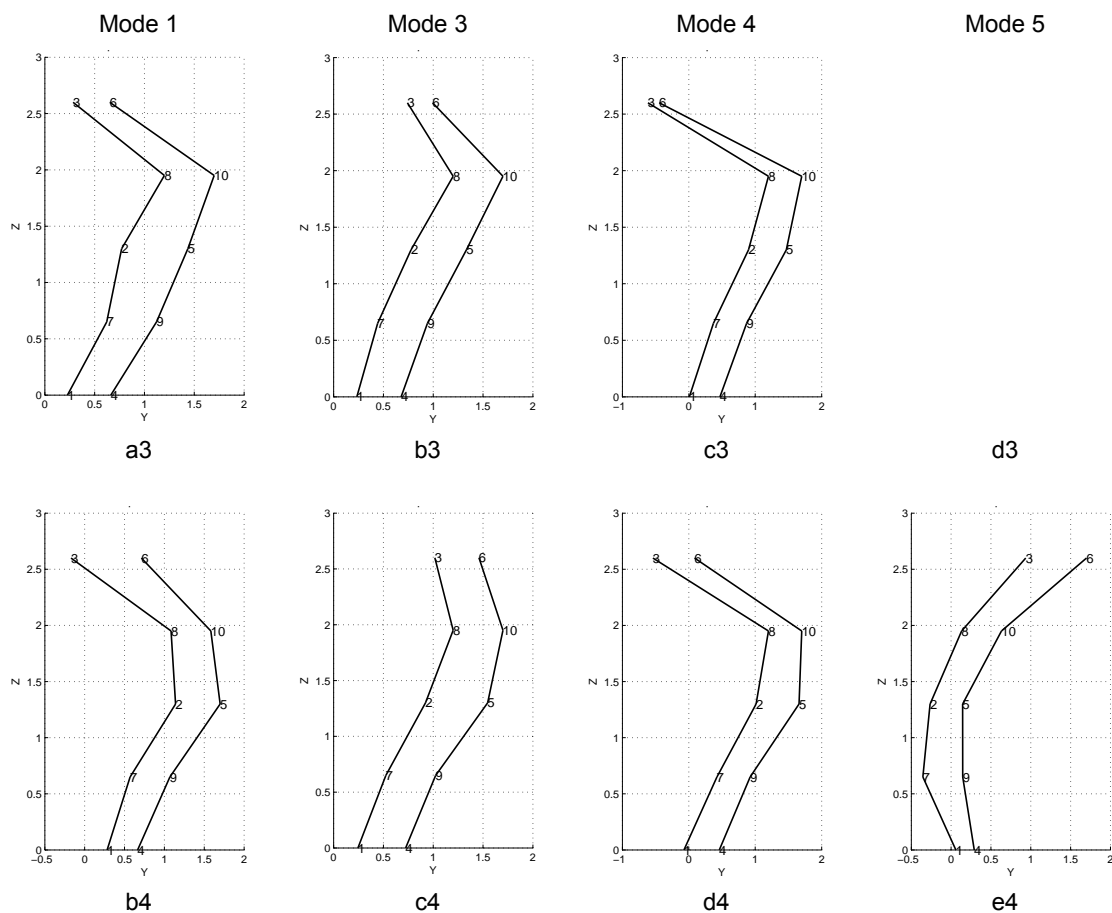


Fig 4.16: Confronto tra le forme modali individuate in 3T (sopra) e 4T (sotto).

4.3. Pannelli rinforzati con iniezione

La tecnica di rinforzo utilizzata nei pannelli 5I e 6I (Strengthened Masonry, SM) è l'iniezione di miscela a base di calce idraulica naturale. Al paragrafo § 2.1.3 sono state esaminate le caratteristiche fisiche di ciascun campione. La configurazione geometrica dei nodi adottata durante l'identificazione dinamica è illustrata in Fig 4.1-b.

4.3.1. Wall 5I

Le rilevazioni ambientali sono state qui effettuate con tavola vibrante in posizione alta e bassa pressione del sistema oleodinamico. Dall'elaborazione modale delle misure si riscontra un comportamento molto rigido alla base, che fa pensare ad un vincolo ben eseguito. Inoltre, dal rilievo geometrico già presentato al paragrafo § 3.3.1 (Fig. 3.34), si osserva che l'iniezione interessa solamente i 4/5 inferiori, lasciando una zona non consolidata in sommità.

Dal diagramma di stabilizzazione si individuano quattro frequenze stabili: due delle quali a 8 Hz e 15 Hz, mentre le rimanenti intorno i 38 Hz. Nel caso preso in esame in Fig 4.17 si nota un'ulteriore frequenza a circa 28/30 Hz, la quale non è stata considerata perché la forma modale fornita dal programma non aveva alcun significato, quindi non si tratta di un modo proprio.

La scelta di matrici di ordine 114 permette una maggior sicurezza che si tratti effettivamente di modi strutturali e non numerici. I dati rilevati ad ogni passo di prova sono riportati in Tab 4.10 e Tab 4.11, in termini di frequenze e rapporti di smorzamento rispettivamente. Da una prima analisi si nota la mancanza di alcuni valori dovuta all'impossibilità di rilevare quelle precise forme modali dalle misurazioni ambientali disponibili in quel specifico PGA.

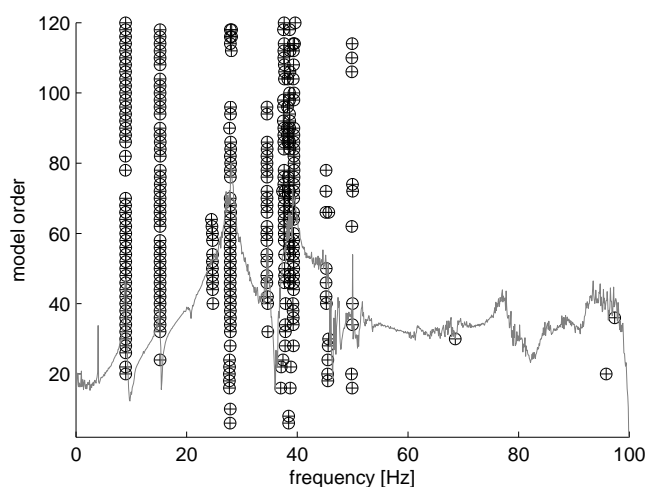


Fig 4.17: Pannello 5I. Esempio di diagramma di stabilizzazione rilevato con SSI-DATA/ref (0.05g A).

Tab 4.10: Pannello 5I. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori delle frequenze.

Step [g]		Wall 5I - Frequencies [Hz]			
0.00g	B	9.88	15.25	-	40.25
0.05g	A	9.43	15.30	38.61	40.49
0.10g	A	9.42	15.27	38.64	40.14
0.15g	A	9.09	15.14	-	39.49
0.20g	A	8.96	15.20	37.62	39.24
0.25g	A	9.12	15.24	37.10	39.69
0.30g	A	9.00	15.21	37.15	38.39
0.35g	A	9.00	15.23	-	38.82
0.40g	B	10.08	15.80	36.98	37.62
0.45g	A	8.55	15.18	-	36.65
0.50g	A	7.92	15.00	34.71	37.84
Δf tot [Hz]		1.95	0.25	3.90	2.41
Modes		1	2	3	5

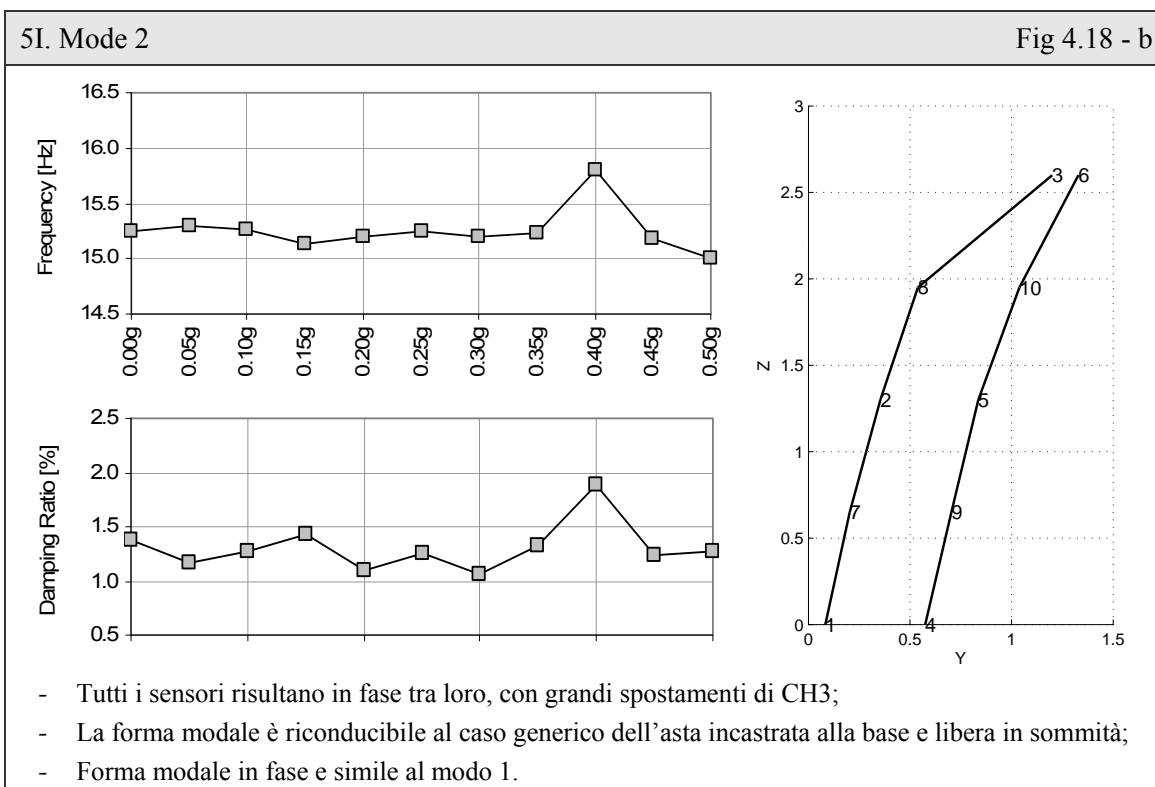
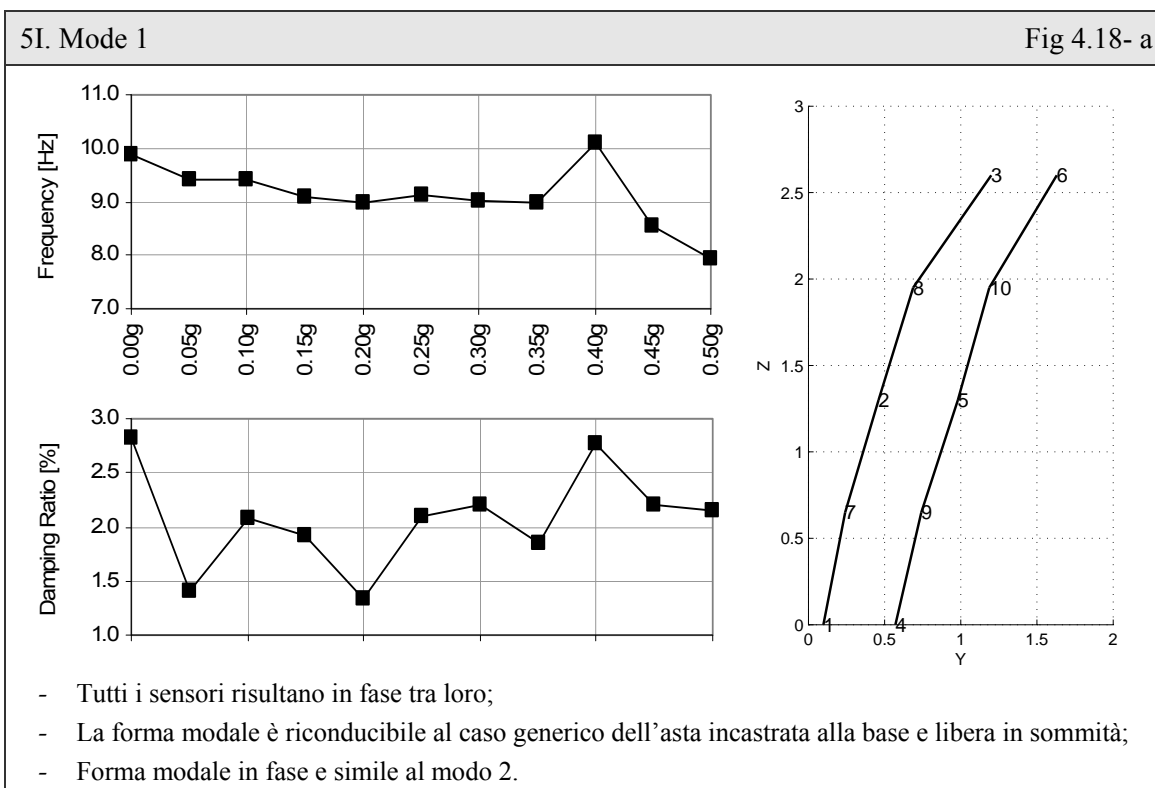
Tab 4.11: Pannello 5I. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori dei rapporti di smorzamento.

Step [g]		Wall 5I - Damping Ratios [Hz]			
0.00g	B	2.82	1.38	-	1.35
0.05g	A	1.41	1.17	1.10	1.14
0.10g	A	2.08	1.27	1.25	1.09
0.15g	A	1.92	1.43	-	0.89
0.20g	A	1.34	1.11	1.96	1.04
0.25g	A	2.10	1.26	1.79	1.41
0.30g	A	2.20	1.06	1.41	1.02
0.35g	A	1.84	1.32	-	1.27
0.40g	B	2.77	1.88	1.53	1.37
0.45g	A	2.20	1.24	-	1.53
0.50g	A	2.16	1.27	1.01	1.23
Modes		1	2	3	5

Il risultato del processo di identificazione dinamica viene analizzato in Fig 4.18. L'andamento dei parametri modali viene rappresentato in un grafico e affiancato dall'immagine di output fornita da MACEC 3.2. Dato che lo spostamento era in direzione Y, si è scelta la vista laterale che offre la possibilità di comprendere il comportamento globale del pannello.

Confrontando la forme "Mode 1" e "Mode 2" si nota una chiara somiglianza che si distingue solamente in sommità. Nel secondo caso, la tendenza dei parametri modali è piuttosto costante e il modo di vibrare nel corso della sperimentazione evidenzia il legame a movimenti localizzati. Ne consegue che, tra i due, il modo fondamentale è il primo. Le forme modali

rimanenti, così come “Mode 1”, son caratterizzate da un chiaro decremento delle frequenze all’incrementare del PGA.



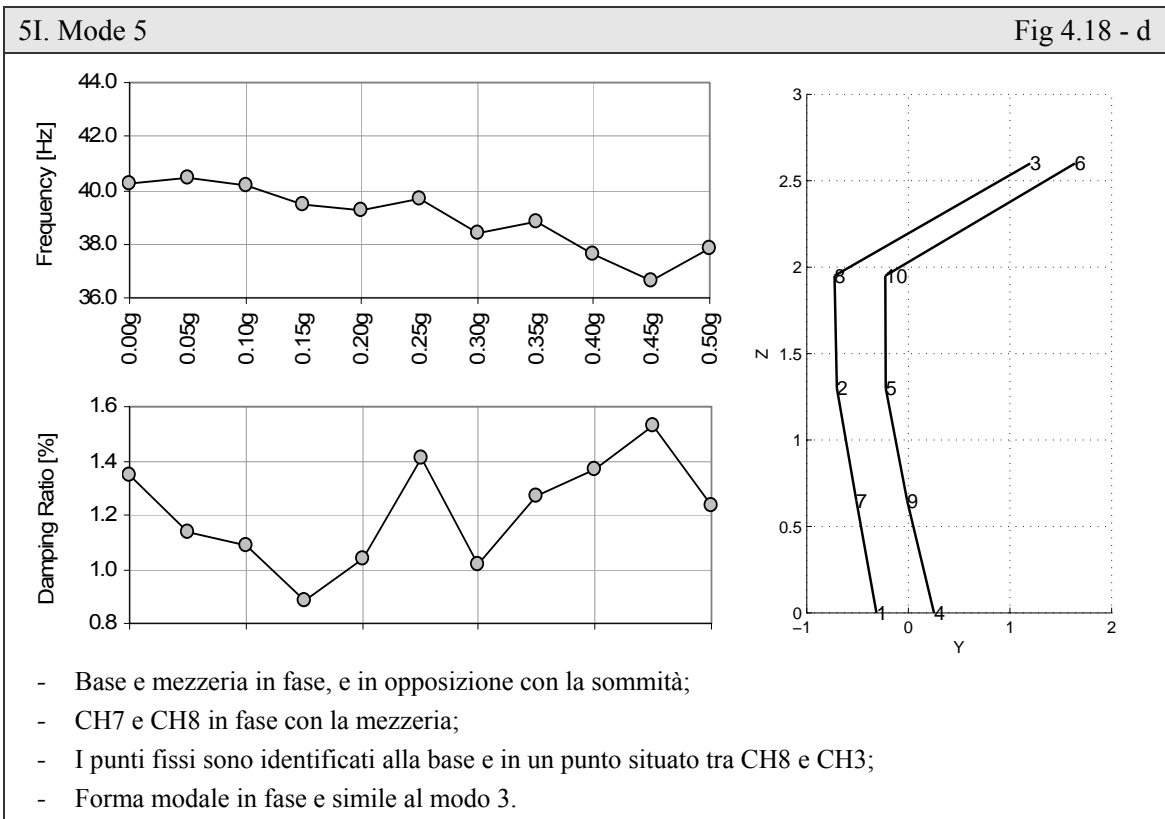
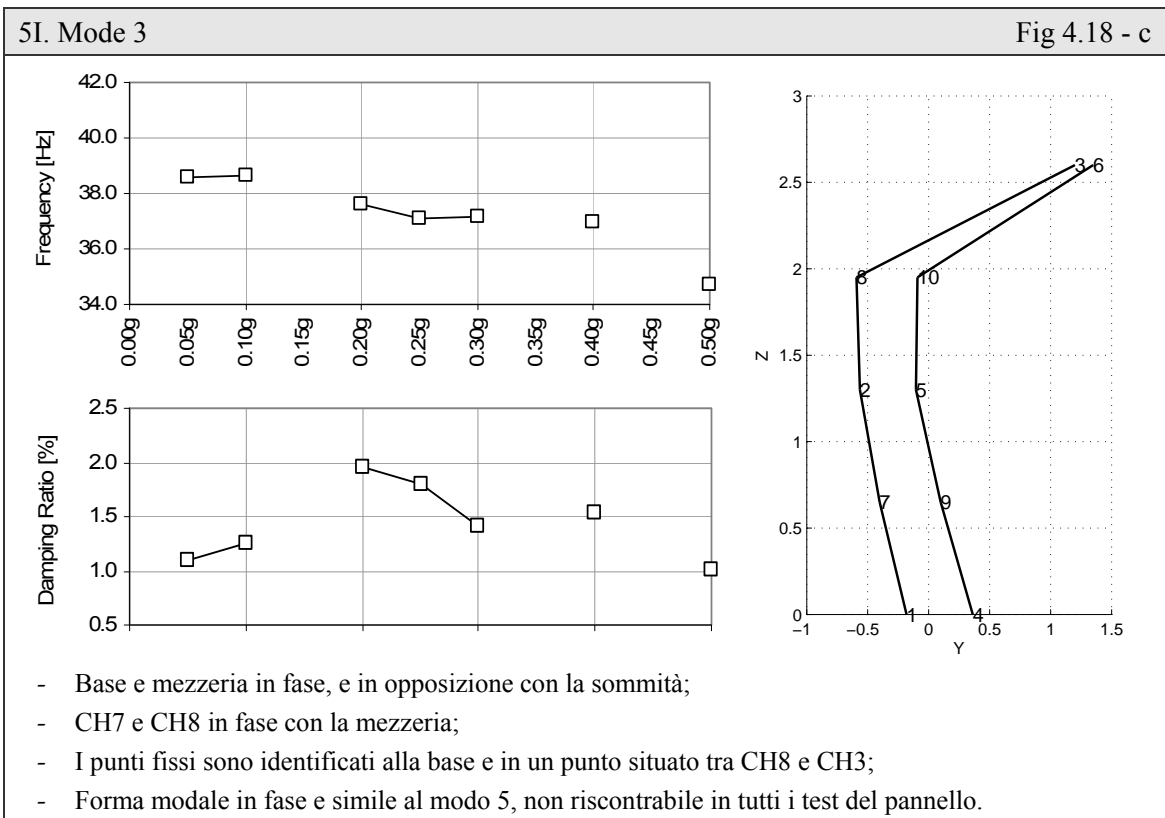


Fig 4.18: Pannello 5I. Andamento delle frequenze per ogni forma modale identificata. Le figure sulla destra riguardano la situazione a 0.05g.

Le tendenze dei parametri modali esaminati singolarmente in Fig 4.18, vengono riassunte e confrontate tra loro in Fig 4.19. L'andamento costante di "Mode 2" appare qui ulteriormente evidente. Osservando invece i soli rapporti di smorzamento si rilevano valori sempre inferiori del 3%. In generale, il picco può essere individuato a 0.40g per i diversi modi identificati. Per sollecitazioni superiori la struttura non è più in grado di dissipare energia, in quanto si è già creata una lesione che indurrà al collasso della parte sommitale.

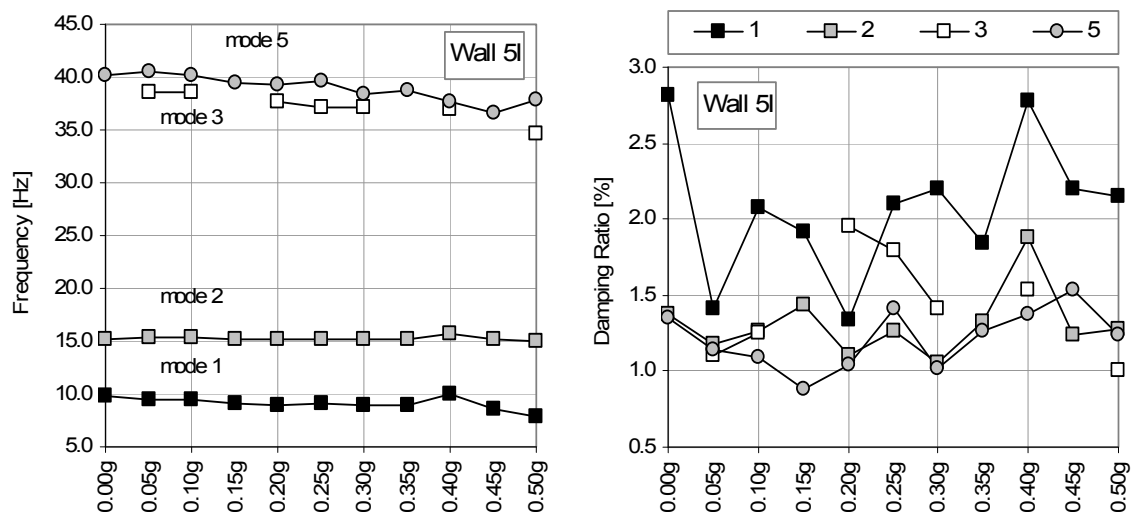


Fig 4.19: Pannello 5I. Confronto fra diversi modi identificati, in termini di frequenze e rapporti di smorzamento.

4.3.2. Wall 6I

Il rilievo geometrico in Fig. 3.42 (cfr § 3.3.2) denota la scarsa penetrazione di miscela legante nella porzione sommitale del pannello, corrispondente a circa 1/6 dell'altezza totale, così come accaduto per il pannello 5I. Tutte le misurazioni ambientali sul muro 6I sono state effettuate con tavola vibrante in posizione alta e bassa pressione del sistema oleodinamico. I quattro modi strutturalmente stabili sono stati rilevati con identificazione dinamica mediante diagramma di stabilizzazione (Fig 4.20). Essi si manifestano a frequenze comprese tra 10 Hz e 42 Hz (Tab 4.12) con un decremento all'aumentare della PGA.

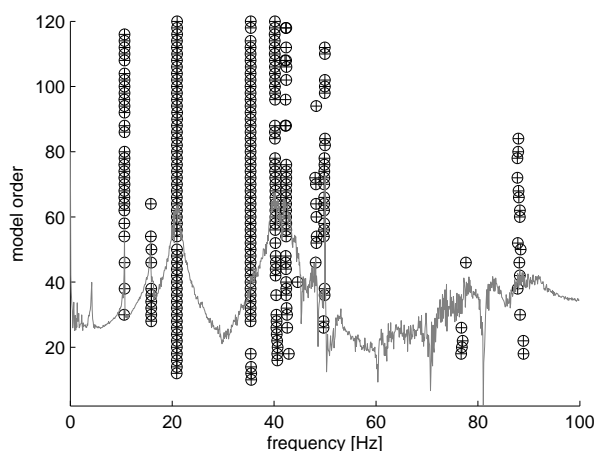


Fig 4.20: Pannello 6I. Esempio di diagramma di stabilizzazione rilevato con SSI-DATA/ref (0.00g A).

Tab 4.12: Pannello 6I. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori delle frequenze.

Step [g]		Wall 6I - Frequencies [Hz]			
0.00g	A	10.63	20.96	35.38	42.37
0.05g	A	10.66	21.35	34.98	42.05
0.10g	A	10.65	21.29	34.84	41.35
0.15g	A	10.80	21.01	34.72	40.51
0.20g	A	10.53	20.54	35.22	39.11
0.25g	B	10.60	20.65	34.70	39.35
0.30g	B	10.59	20.41	34.56	39.17
0.35g	A	10.65	20.26	34.50	36.63
0.40g	A	10.59	19.70	33.77	34.96
0.45g	A	10.62	19.52	33.67	35.03
0.50g	B	10.62	19.33	33.75	34.63
0.55g	A	10.48	18.71	32.28	34.22
0.60g	C	10.95	19.78	33.99	35.98
0.65g	B	-	18.39	31.71	-
0.70g	A	10.33	17.75	30.87	-
Δf tot [Hz]		0.30	3.21	4.51	6.38
Modes		1	2	3	5

Da una prima osservazione dei risultati si nota l'assenza di alcuni valori a PGA elevati. La ragione è da ricercarsi nel processo di identificazione dinamica, durante il quale non è stato possibile rilevare modi stabili in corrispondenza di quelle precise frequenze. Inoltre il primo modo è caratterizzato da un'invarianza della frequenze che assume un valore pressoché costante pari a circa 10.5 Hz.

Tab 4.13: Pannello 6I. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori dei rapporti di smorzamento.

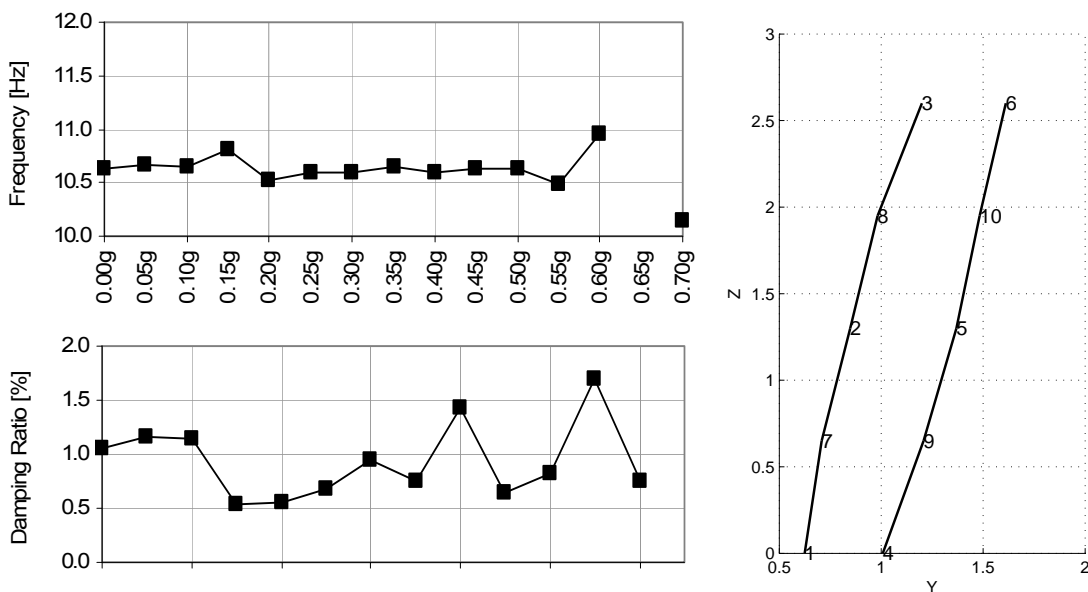
Step [g]		Wall 6I - Damping Ratios [Hz]			
0.00g	A	1.05	2.38	0.88	1.64
0.05g	A	1.15	2.07	1.09	1.38
0.10g	A	1.15	2.19	1.28	1.61
0.15g	A	0.54	2.42	1.43	2.40
0.20g	A	0.55	2.88	0.66	1.39
0.25g	B	0.68	1.60	0.94	1.03
0.30g	B	0.94	1.95	0.93	1.24
0.35g	A	0.76	3.67	1.04	1.68
0.40g	A	1.43	1.68	1.24	1.56
0.45g	A	0.65	1.99	1.44	1.20
0.50g	B	0.82	1.80	2.10	1.30
0.55g	A	1.70	2.22	2.23	3.31
0.60g	C	0.74	1.91	1.34	0.99
0.65g	B	-	2.17	1.82	-
0.70g	A	5.38	1.97	2.25	-
Modes		1	2	3	5

Nei casi rimanenti, la variazione delle frequenze assume un decremento medio netto di circa 4.5 Hz. I rapporti di smorzamento rappresentati in Tab 4.13 sono in generale inferiori del 4% ed assumono picchi di dissipazione durante le prove a 0.15g e 0.55g. Questo comportamento indica un incremento della capacità di dissipazione di energia che porta al formarsi di un meccanismo di collasso.

In seguito, Fig 4.21, si analizza ogni singolo modo individuato, rappresentandolo graficamente sia nella vista laterale (in direzione del movimento, Y) che in riferimento all'andamento dei parametri modali. Durante l'identificazione dinamica si è osservato, a partire dalla prova a 0.25g, un incremento degli spostamenti in "Mode 3".

6I. Mode 1

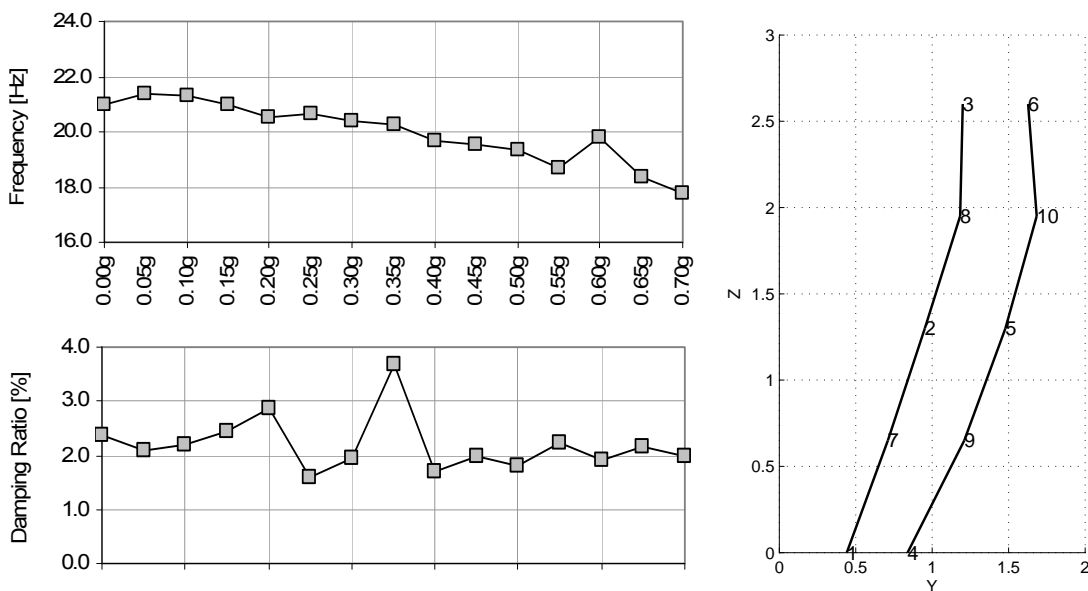
Fig 4.21 - a



- Tutti i sensori risultano in fase tra loro;
- Sono presenti movimenti localizzati a singoli sensori, durante i diversi test;
- La forma modale è riconducibile al caso generico dell'asta incastrata alla base e libera in sommità;
- Forma modale in fase e simile al modo 2.

6I. Mode 2

Fig 4.21 - b



- Tutti i sensori risultano in fase tra loro;
- La sommità ha spostamenti maggiori all'aumentare dell'accelerazione alla base;
- La forma modale è riconducibile al caso generico dell'asta incastrata alla base e libera in sommità;
- Forma modale in fase e simile al modo 1.

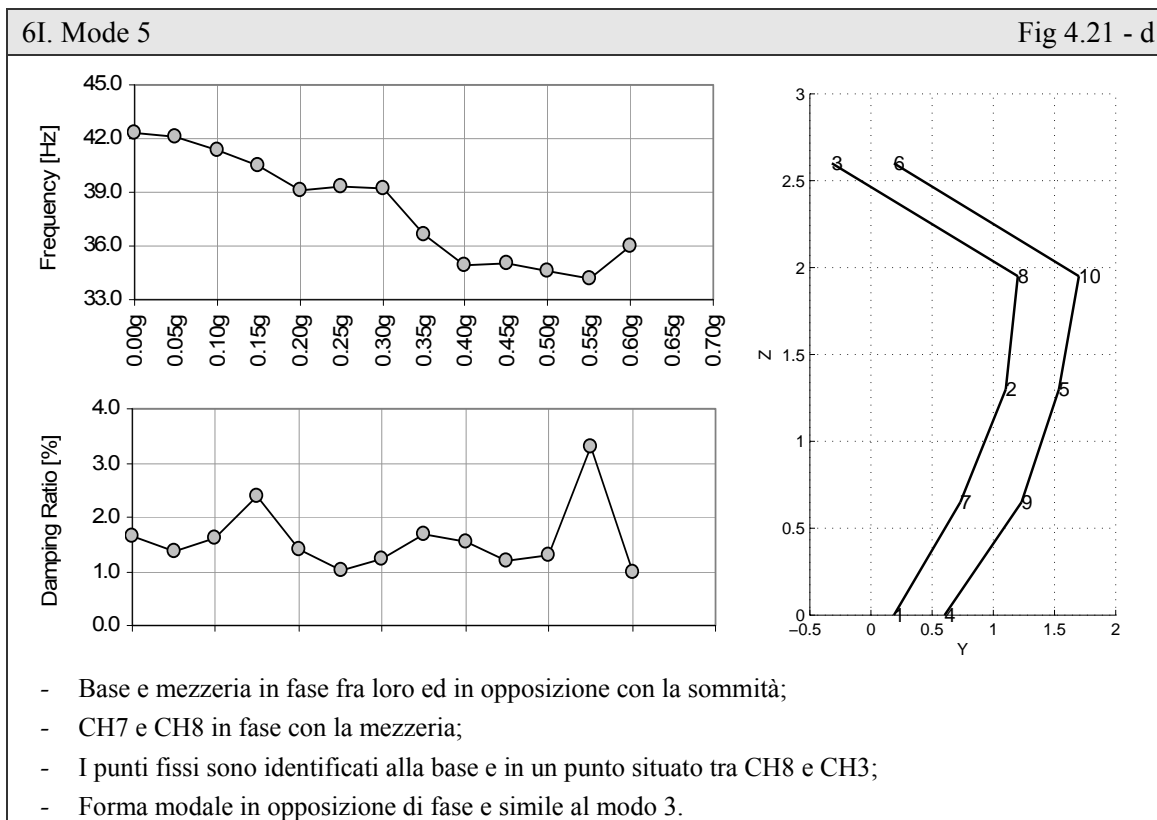
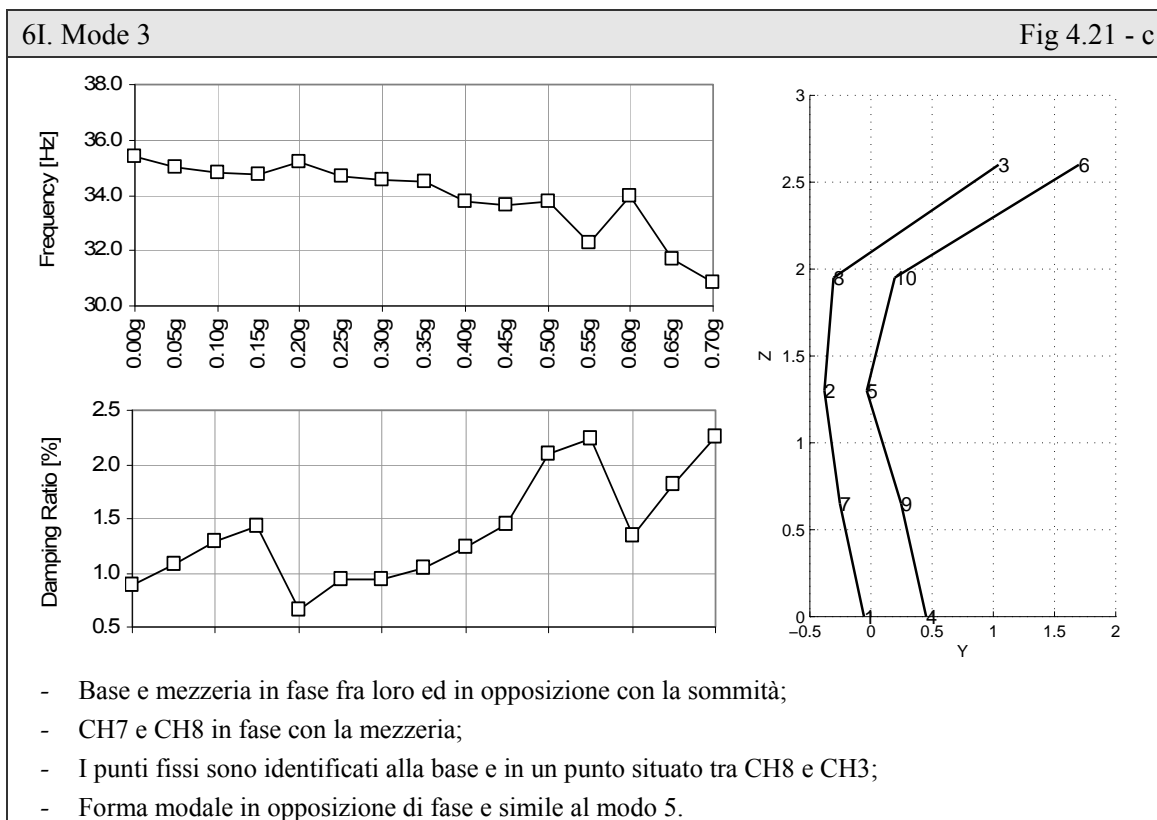


Fig 4.21: Pannello 6I. Andamento delle frequenze per ogni forma modale identificata. Le figure sulla destra riguardano la situazione iniziale (0.00g A)

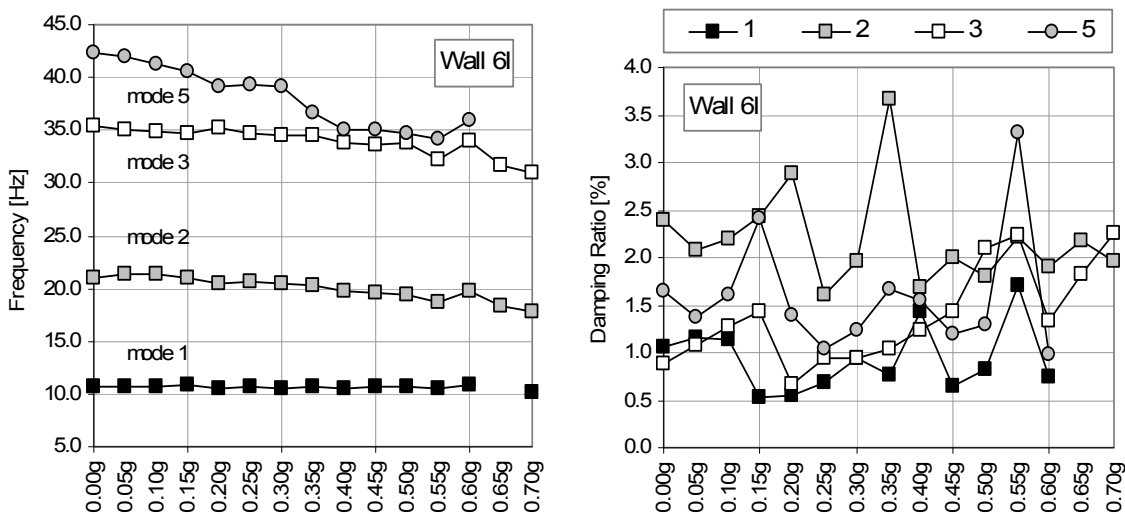


Fig 4.22: Pannello 6I. Confronto fra diversi modi identificati, in termini di frequenze e rapporti di smorzamento.

In Fig 4.22 sono riassunte graficamente le variazioni delle parametri modali. Nel primo diagramma è chiaramente visibile il decremento delle frequenze. In particolare ci si riferisce a “Mode 5”, nel quale si osserva una differenza tra il primo e l’ultimo dato disponibile superiore a 6 Hz. Anche in “Mode 2” e “Mode 3” si osservano decrementi importanti con Δf_{tot} di 3.2 Hz e 4.5 Hz rispettivamente. “Modo 1” invece appare più costante.

I rispettivi rapporti di smorzamento assumono un andamento meno definito, pur mantenendo valori non elevati, inferiori al 4%. In generale, in ciascun modo identificato, si osservano dei massimi sia a circa 0.15g che a circa 0.45g.

4.3.3. Osservazioni

Esaminando le risposte dei campioni iniettati, si nota maggior somiglianza a frequenze elevate. “Mode 3” e “Mode 5” si manifestano ad intervalli di frequenza affini, ricoprendo un intervallo più elevato nel pannello 6I. Anche le forme modali presentano una notevole somiglianza (Fig 4.23), fatta eccezione per qualche movimento localizzato legato alle caratteristiche fisico-costruttive proprie del modello. Queste osservazioni lasciano pensare che si trattino effettivamente di modi fondamentali.

“Mode 1” si rileva a circa 10 Hz con una maggior escursione di misurazioni in 5I rispetto 6I. “Mode 2” si presenta a 15 Hz nel primo caso e a 20 Hz circa nel secondo. I rapporti di smorzamento assumono un andamento piuttosto oscillante, individuando dei picchi di dissipazione di energia a circa 0.40g in 5I, mentre in 6I a circa 0.15g e 0.55g. In ogni caso si mantiene al di sotto del 3%.

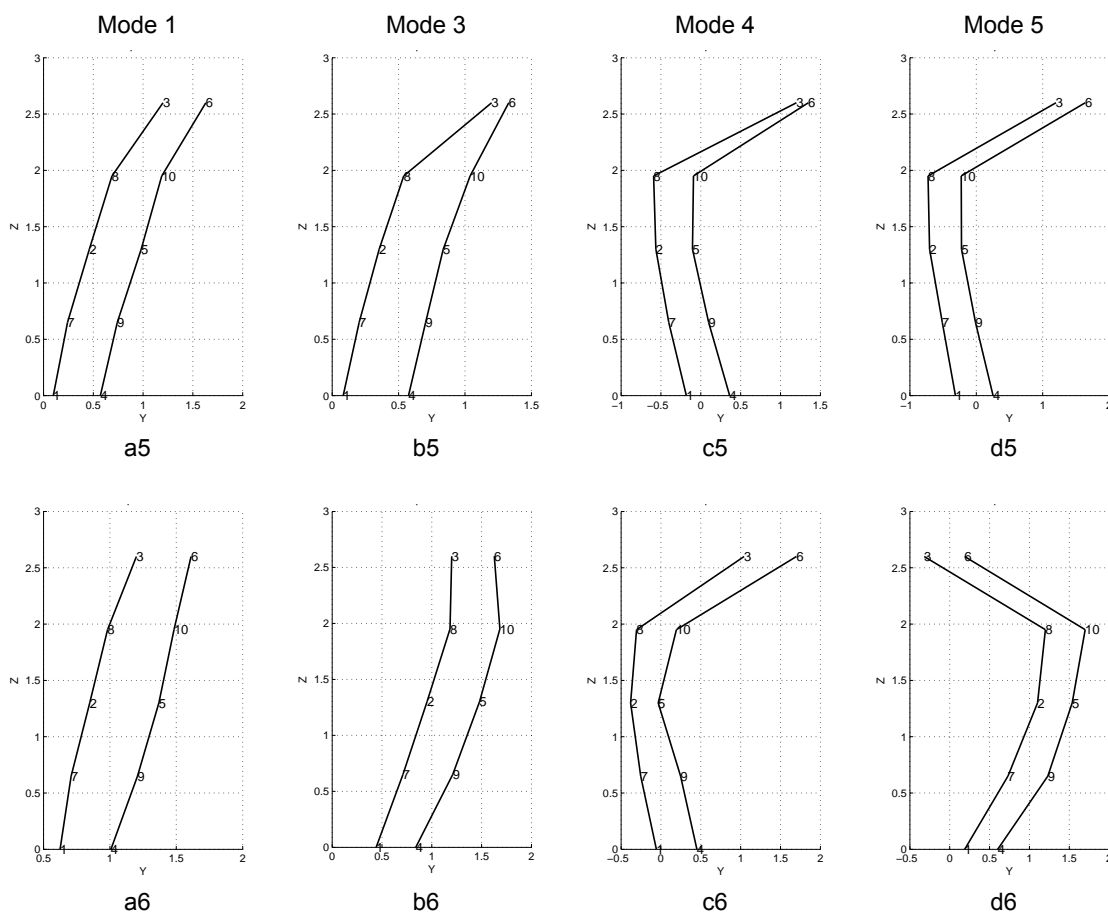


Fig 4.23: Confronto tra le forme modali individuate in 5I (sopra) e 6I (sotto).

4.4. Pannelli rinforzati con tiranti e iniezione

Gli ultimi campioni sottoposti a prova riguardano pannelli in muratura multistrato rinforzati (Strengthened Masonry, SM) con l'uso combinato di tirantini antiespulsivi ed iniezione, le cui caratteristiche fisiche sono già state esaminate al paragrafo § 2.1.3. In entrambi i casi la miscela si è diffusa consolidando completamente il nucleo, ad eccezione di una piccola porzione nella sommità di 7IT. La configurazione geometrica dei nodi, sulla quale si è basato il processo di identificazione dinamica, è quella presentata in Fig 4.1-b. Per il pannello in esame non si è potuto raggiungere il collasso, essendo giunto all'accelerazione massima per la tavola vibrante considerato il peso del pannello (limite imposto dal momento ribaltante massimo).

4.4.1. Wall 7IT

Il rilievo geometrico del pannello con l'individuazione dell'area iniettata è stato presentato in Fig. 3.49 (cfr § 3.4.1). Durante le campagne di misura ambientale la tavola vibrante era in posizione alta, mentre il sistema oleodinamico era in bassa pressione. Infine, si ricorda che le prove a 0.75g sono state ripetute cinque volte, non potendo incrementare l'accelerazione per raggiungimento del momento ribaltante limite della tavola vibrante. Nonostante ciò non è avvenuto il collasso.

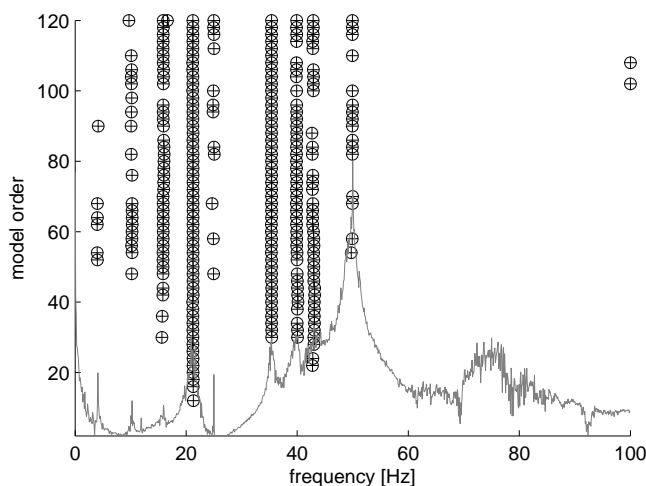


Fig 4.24: Pannello 7IT. Esempio di diagramma di stabilizzazione rilevato con SSI-DATA/ref (0.00g A).

Nel diagramma di stabilizzazione (Fig 4.24) si individuano più modi apparentemente stabili. Una matrice di ordine superiore permette di avere una migliore precisione e la certezza che si tratti di modi strutturali e non numerici. Si è così appurato che le forme modali ricercate ad ogni passo di prova si trovano in un intorno di 10 Hz, 21 Hz e 48 Hz. I dati rilevati sono riportati in Tab 4.14 e Tab 4.15 per quanto concerne le frequenze e i rapporti di smorzamento.

Tab 4.14: Pannello 7IT. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori delle frequenze.

Step [g]		Wall 7IT - Frequencies [Hz]		
0.00g	A	10.07	21.20	49.95
0.05g	A	-	21.91	50.66
0.10g	A	10.08	21.87	-
0.15g	A	10.35	21.84	-
0.20g	A	10.14	21.63	49.50
0.25g	A	10.19	21.61	47.67
0.30g	A	10.20	21.59	48.68
0.35g	A	10.26	21.44	48.62
0.40g	A	10.19	21.43	46.59
0.45g	A	10.14	21.34	46.79
0.50g	A	10.26	21.39	46.68
0.55g	A	10.38	21.37	46.52
0.60g	A	10.25	21.39	46.46
0.65g	A	10.25	21.44	46.28
0.70g	A	10.16	21.46	46.09
0.75g	A	9.96	21.29	45.86
0.75g II	A	10.03	21.26	46.10
0.75g III	A	10.09	21.26	-
0.75g IV	A	10.39	21.13	46.22
0.75g V	A	10.30	21.27	-
Δf tot [Hz]		-0.23	-0.07	3.73
Modes		1	2	5

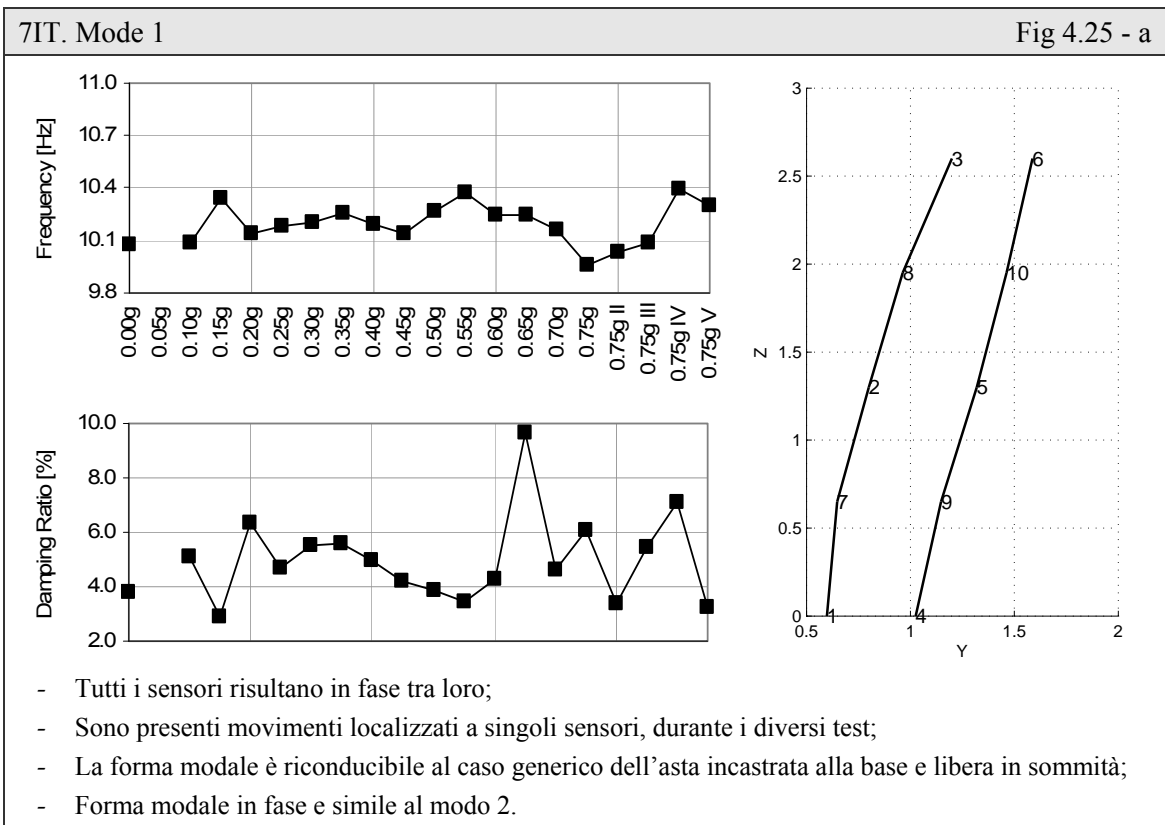
Da una prima analisi dei valori riportati in Tab 4.14 e Tab 4.15, si nota la mancanza di alcuni valori. La motivazione è da ricercarsi nel processo di identificazione dinamica che li coinvolge. Non è stato, infatti, possibile rilevare quelle precise forme modali dalle misurazioni ambientali disponibili in quel specifico PGA. Inoltre, la ripetizione delle prove a 0.75g non ha portato a risultati differenti.

L'andamento delle frequenze denota un chiaro decremento Δf_{tot} di circa 4 Hz in "Mode 5", mentre gli altri modi si presentano piuttosto costanti. Osservando invece i rapporti di smorzamento, si osservano valori elevati, sino a circa 10%, nella prima forma modale. Questa caratteristica può far pensare che non si tratti effettivamente di un modo proprio, ma che sia legato a movimenti localizzati della struttura.

In Fig 4.25 si analizza separatamente ogni modo identificato. L'andamento dei parametri modali viene rappresentato in un grafico e affiancato dall'immagine di output fornita da MACEC 3.2 a processo ultimato. Dato che lo spostamento era in direzione Y, si è scelta la vista laterale che offre la possibilità di comprendere il comportamento globale del pannello.

Tab 4.15: Pannello 7IT. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: rapporti di smorzamento.

Step [g]		Wall 7IT - Damping Ratios [%]		
0.00g	A	3.82	2.66	0.69
0.05g	A	-	1.73	1.67
0.10g	A	5.10	1.59	-
0.15g	A	2.89	1.51	-
0.20g	A	6.36	1.44	2.16
0.25g	A	4.69	1.94	1.40
0.30g	A	5.52	1.82	2.54
0.35g	A	5.56	1.52	2.73
0.40g	A	4.97	1.37	0.95
0.45g	A	4.22	1.51	0.10
0.50g	A	3.83	1.44	0.56
0.55g	A	3.45	1.55	0.74
0.60g	A	4.29	1.43	1.12
0.65g	A	9.64	1.97	0.52
0.70g	A	4.64	1.36	0.77
0.75g	A	6.09	1.88	1.28
0.75g II	A	3.40	1.48	1.36
0.75g III	A	5.42	1.77	-
0.75g IV	A	7.12	1.74	0.67
0.75g V	A	3.26	1.26	-
Modes		1	2	5



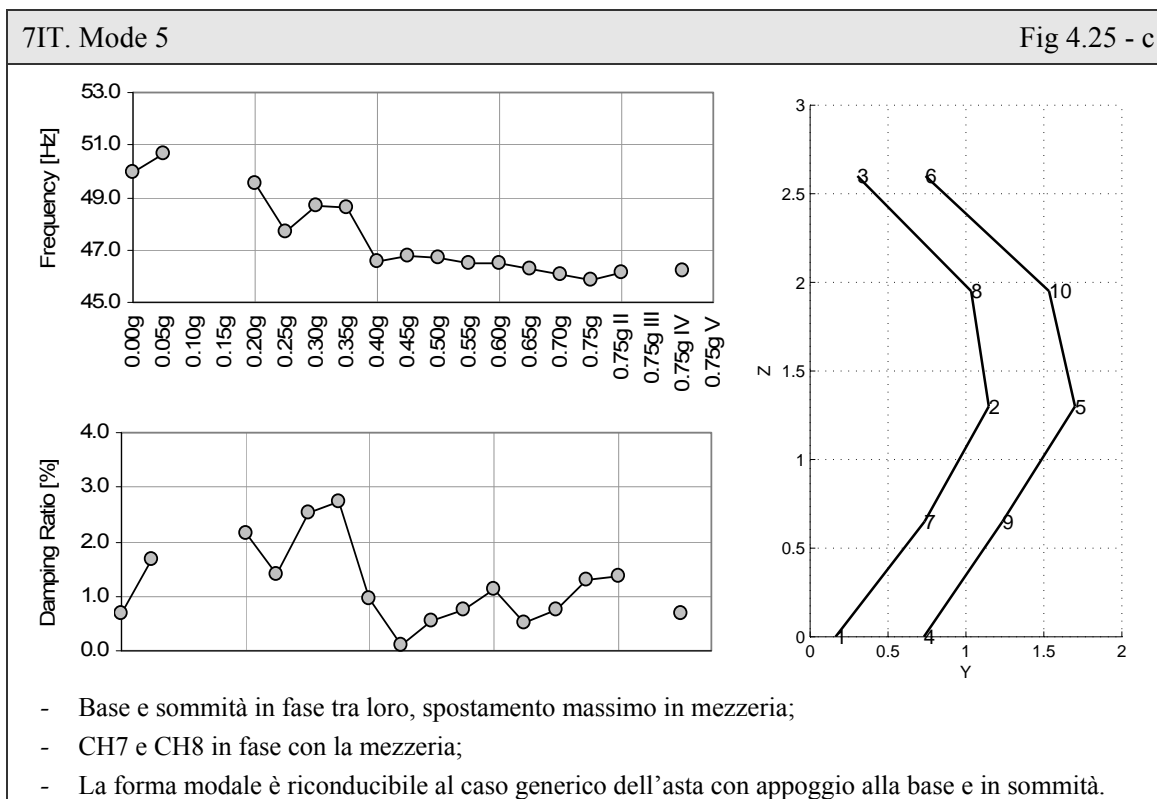
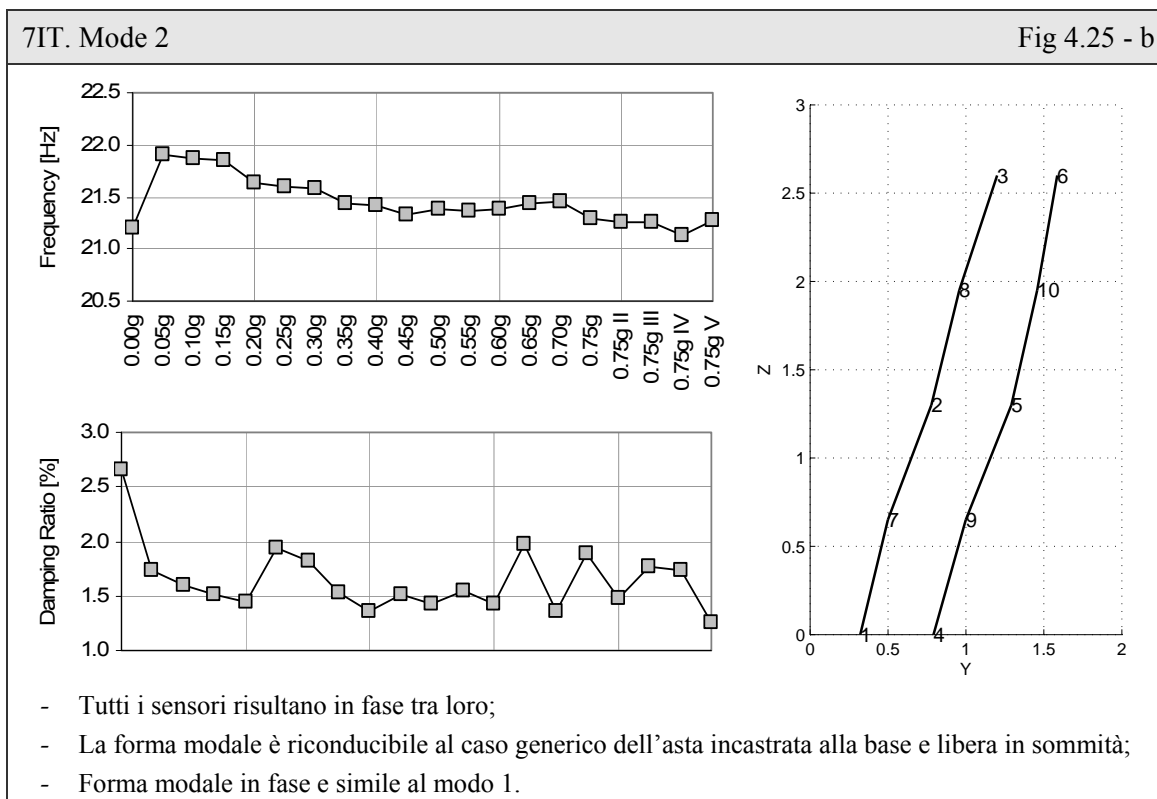


Fig 4.25: Pannello 7IT. Andamento delle frequenze per ogni forma modale identificata. Le figure sulla destra riguardano la situazione iniziale (0.00g A)

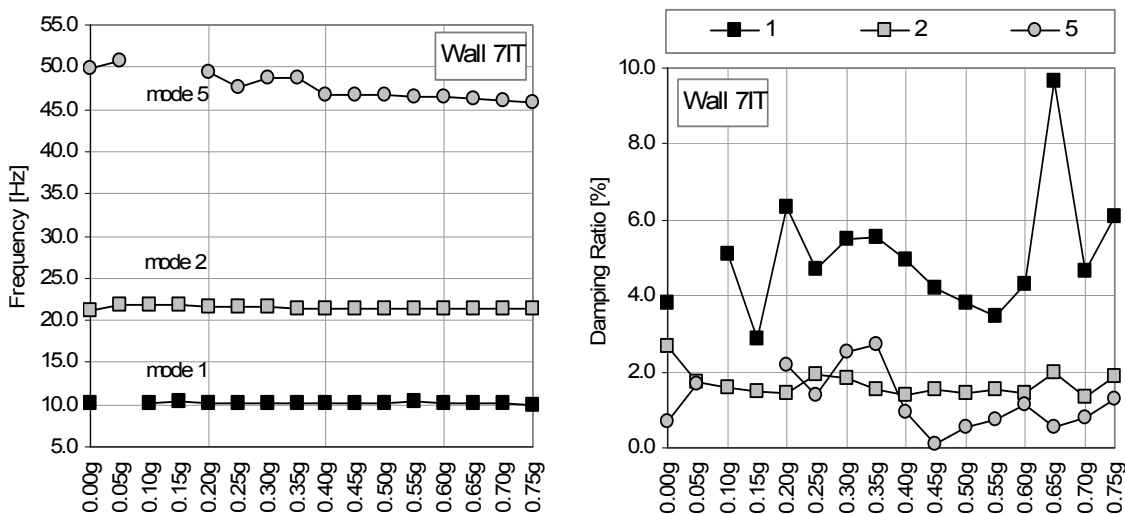


Fig 4.26: Pannello 7IT. Confronto fra diversi modi identificati, in termini di frequenze e rapporti di smorzamento.

Un grafico riassuntivo della variazione dei parametri modali all’aumentare dell’intensità e per le diverse frequenze è proposto in Fig 4.26. E’ evidente l’andamento pressoché costante delle frequenze relative ai primi due modi identificati. Nonostante ciò l’ingrandimento offerto in Fig 4.25-b, mostra la presenza di un lieve ma graduale decremento dello smorzamento per “Mode 2”, pari a circa 0.60 Hz (escludendo il dato iniziale a 0.00g). La diminuzione risulta invece evidente in “Mode 5”.

I rapporti di smorzamento, senza considerare quello del primo modo già trattato, sono inferiori del 3%. La struttura mantiene una bassa capacità di dissipazione di energia, in quanto non si evidenziano picchi ben definiti di smorzamento che lascerebbero pensare alla formazione di un meccanismo di rottura, che di fatto non è avvenuto.

Per una migliore resa grafica, nei diagrammi riassuntivi sono state tralasciate le risposte delle prove ripetute a 0.75g. Com’è stato precedentemente osservato, i parametri modali non subiscono variazioni rilevanti.

4.4.2. Wall 8IT

Come nel caso precedente, l'incremento di rigidità dovuto al consolidamento riduce notevolmente l'ampiezza delle oscillazioni possibili, e perciò delle forme modali rilevabili. Il pannello, come da Fig. 3.57 (cfr § 3.4.2), era completamente iniettato. Le misurazioni ambientali sono avvenute a tavola vibrante in posizione alta e con sistema oleodinamico in bassa pressione.

I modi strutturalmente stabili sono stati facilmente identificati nel diagramma di stabilizzazione (Fig 4.27) perché mantengono inalterate le proprie caratteristiche anche ad ordini elevati. Mediante questo procedimento si sono individuate le frequenze proprie in un intorno dei 21 Hz e in un intervallo compreso tra i 48 Hz e i 37 Hz a seconda del PGA in analisi. Esse sono riprese dettagliatamente in Tab 4.16.

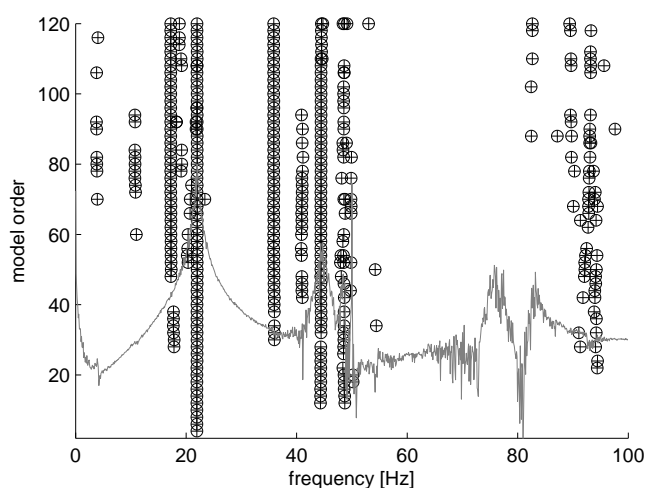


Fig 4.27: Pannello 8IT. Esempio di diagramma di stabilizzazione rilevato con SSI-DATA/ref (0.00g A).

E' stato individuato un primo modo a 10 Hz, presente in tutti i passi di prova effettuati. Nonostante ciò, l'andamento dei parametri e delle forme modali in Fig 4.28-a lascia pensare che non si tratti effettivamente di un modo proprio. La variazione delle frequenze risulta poco significativa e i rispettivi rapporti di smorzamento sono elevati, compresi tra 2% e 8%. La resa grafica delle forme modali ha fatto inoltre notare delle differenze legati a movimenti localizzati.

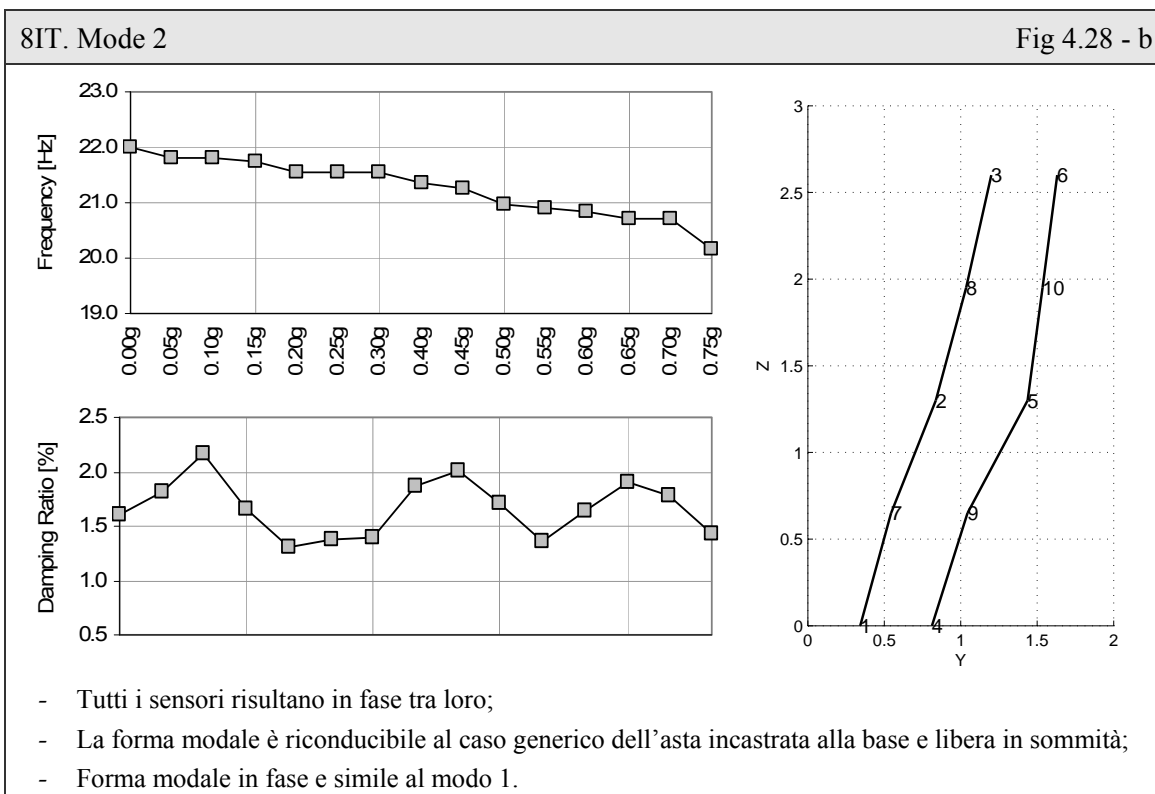
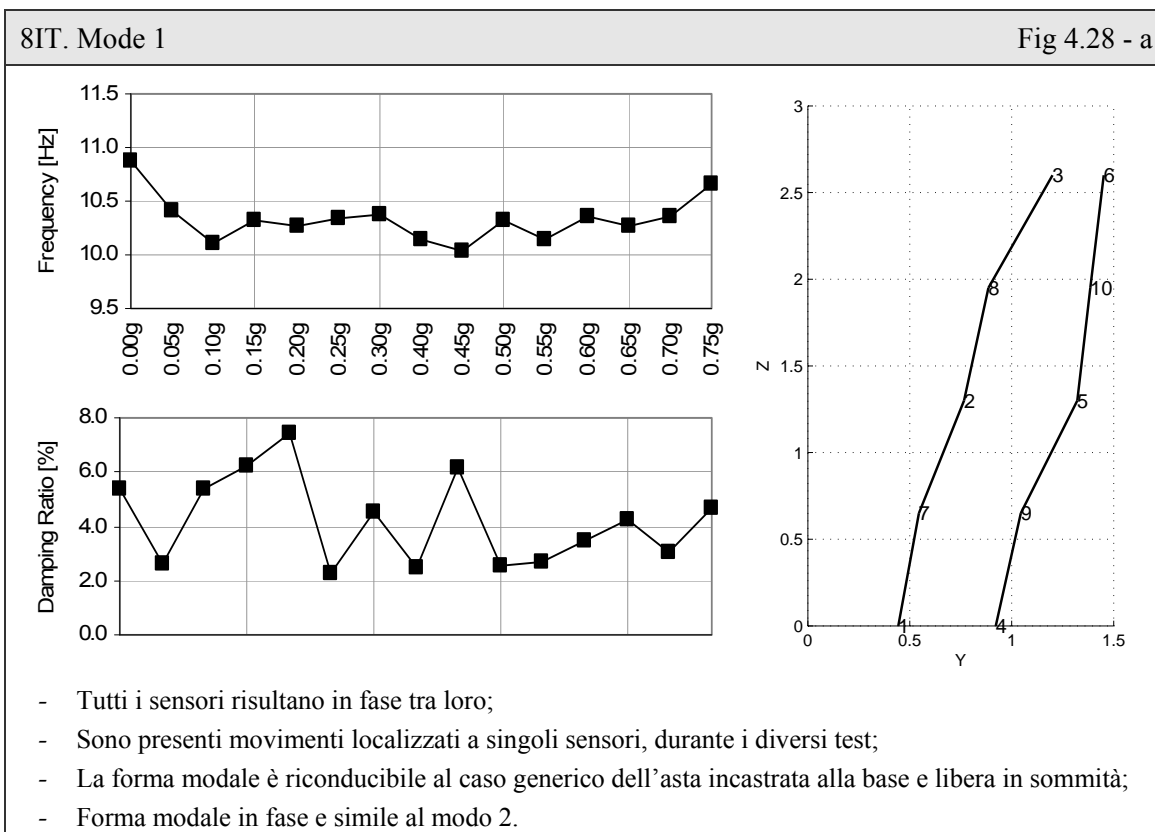
Lo studio di ogni singolo modo identificato è riassunto in Fig 4.28 attraverso i parametri modali. Il modo di vibrare a 10 Hz è legato a quello fondamentale a 21 Hz. Diversamente, il "Mode 5" è direttamente riconducibile al caso generico della doppia cerniera, come da programma sperimentale.

Tab 4.16: Pannello 8IT. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori delle frequenze.

Step [g]		Wall 8IT - Frequencies [Hz]		
0.00g	A	10.87	21.99	48.58
0.05g	A	10.41	21.82	48.30
0.10g	A	10.11	21.81	48.47
0.15g	A	10.32	21.74	47.90
0.20g	B	10.27	21.56	46.79
0.25g	B	10.34	21.56	45.32
0.30g	A	10.37	21.55	45.31
0.40g	A	10.14	21.36	42.87
0.45g	A	10.03	21.25	41.82
0.50g	A	10.32	20.97	40.64
0.55g	B	10.14	20.91	40.13
0.60g	A	10.37	20.83	40.10
0.65g	A	10.28	20.71	38.22
0.70g	A	10.36	20.71	38.13
0.75g	B	10.65	20.16	37.29
Δf tot [Hz]		0.22	1.83	11.29
Modes		1	2	5

Tab 4.17: Pannello 8IT. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori dei rapporti di smorzamento.

Step [g]		Wall 8IT - Damping Ratios [%]		
0.00g	A	5.35	1.60	0.73
0.05g	A	2.61	1.81	0.48
0.10g	A	5.39	2.16	0.30
0.15g	A	6.22	1.66	0.76
0.20g	B	7.43	1.31	1.54
0.25g	B	2.28	1.38	1.36
0.30g	A	4.52	1.40	1.32
0.40g	A	2.50	1.87	1.10
0.45g	A	6.18	2.01	1.23
0.50g	A	2.56	1.72	1.46
0.55g	B	2.67	1.35	1.29
0.60g	A	3.45	1.63	1.31
0.65g	A	4.21	1.91	1.20
0.70g	A	3.06	1.78	1.02
0.75g	B	4.68	1.44	1.32
Modes		1	2	5



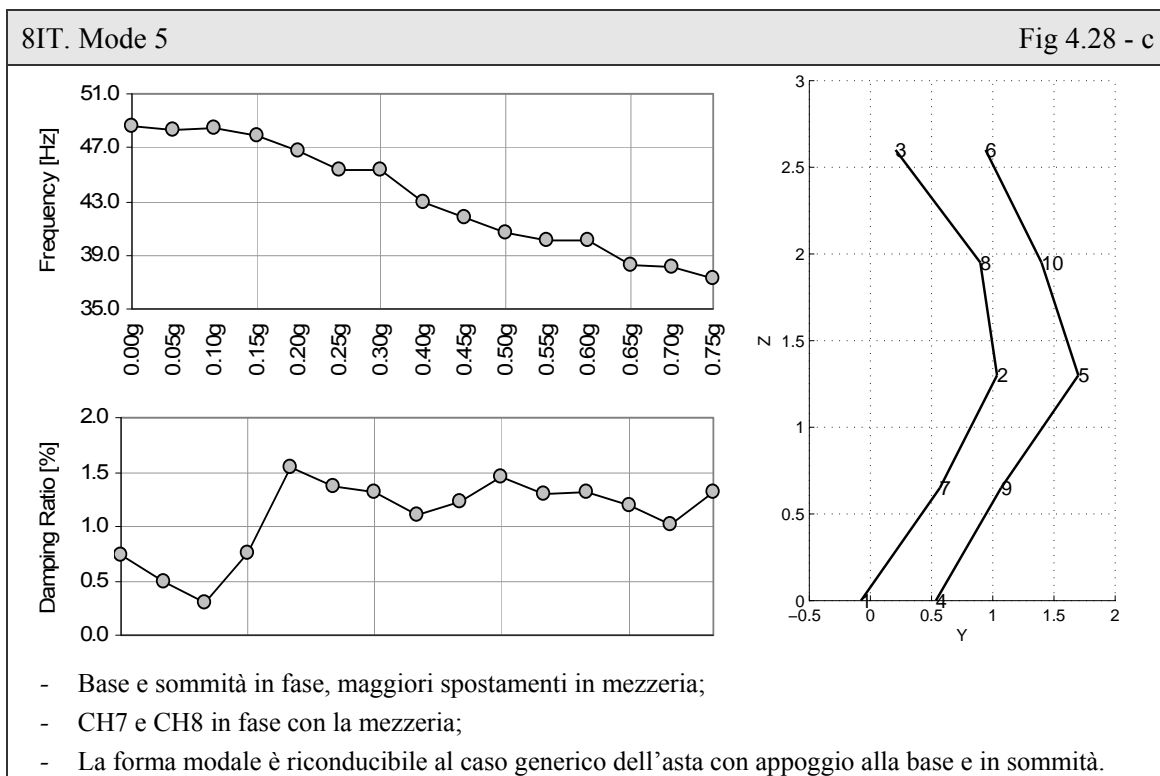


Fig 4.28: Pannello 8IT. Andamento delle frequenze per ogni forma modale identificata. Le figure sulla destra riguardano la situazione iniziale (0.00g A)

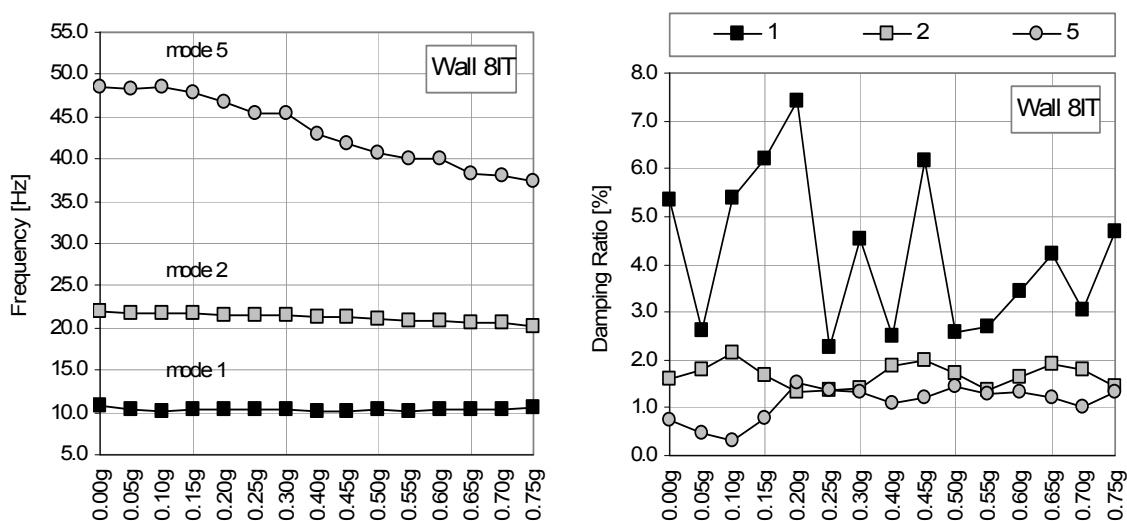


Fig 4.29: Pannello 8IT. Confronto fra diversi modi identificati, in termini di frequenze e rapporti di smorzamento.

In Fig 4.29 sono riassunte graficamente le variazioni delle frequenze proprie e dei rispettivi rapporti di smorzamento. Nel primo diagramma il decremento che avviene nel corso della prova è particolarmente accentuato in “Mode 5” (circa 11 Hz), mentre è più contenuto (circa 2 Hz) in “Mode 2”. In questi casi, i rapporti di smorzamento oscillano a valori inferiori del 2%. Questo

comportamento indica una limitata capacità di dissipazione di energia, che non è in grado di svilupparsi in meccanismo di collasso ed è quindi a favore della sicurezza.

4.4.3. Osservazioni

Dal confronto tra i parametri modali ottenuti nei pannelli 7IT e 8IT con il processo di identificazione dinamica, si riscontrano le stesse forme modali a intervalli di frequenze affini (Fig 4.30). In entrambi i casi, il primo modo è riconducibile al secondo, il quale effettivamente è da ritenersi fondamentale. Il terzo modo individuato (denominato “Mode 5”) ricorda il caso generico dell’asta con doppio appoggio e subisce un’elevata escursione di valori in termini di frequenza, raggiungendo, in 8IT, un Δf_{tot} di 11 Hz.

La variazione dei rapporti di smorzamento è notevole in “Mode 1” e limitata nei modi propri. Ne consegue una ridotta capacità di dissipazione dell’energia che si manifesta durante l’evento sismico con una buona risposta in termini di resistenza, che non induce a collasso.

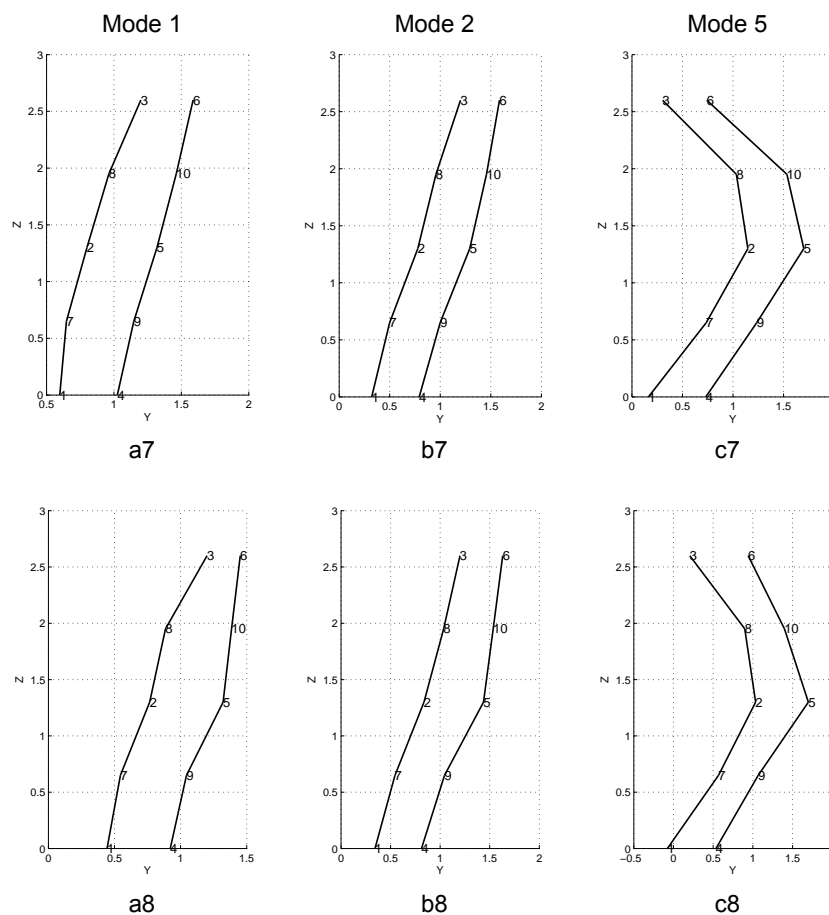


Fig 4.30: Confronto tra le forme modali individuate in 7IT (sopra) e 8IT (sotto).

4.5. Confronto tra le caratteristiche dinamiche

Confrontando le forme modali e le rispettive frequenze (Fig 4.31) individuate per ogni pannello, si è notato un comportamento dinamico non sempre affine tra i muri non iniettati e quelli iniettati. Per tale motivo, si procede lo studio di questo capitolo mantenendo distinti i primi quattro pannelli non consolidati (1-URM, 2-URM, 3T, 4T) dai secondi quattro rinforzati (previo miscela legante (5I, 6I, 7IT, 8IT)).

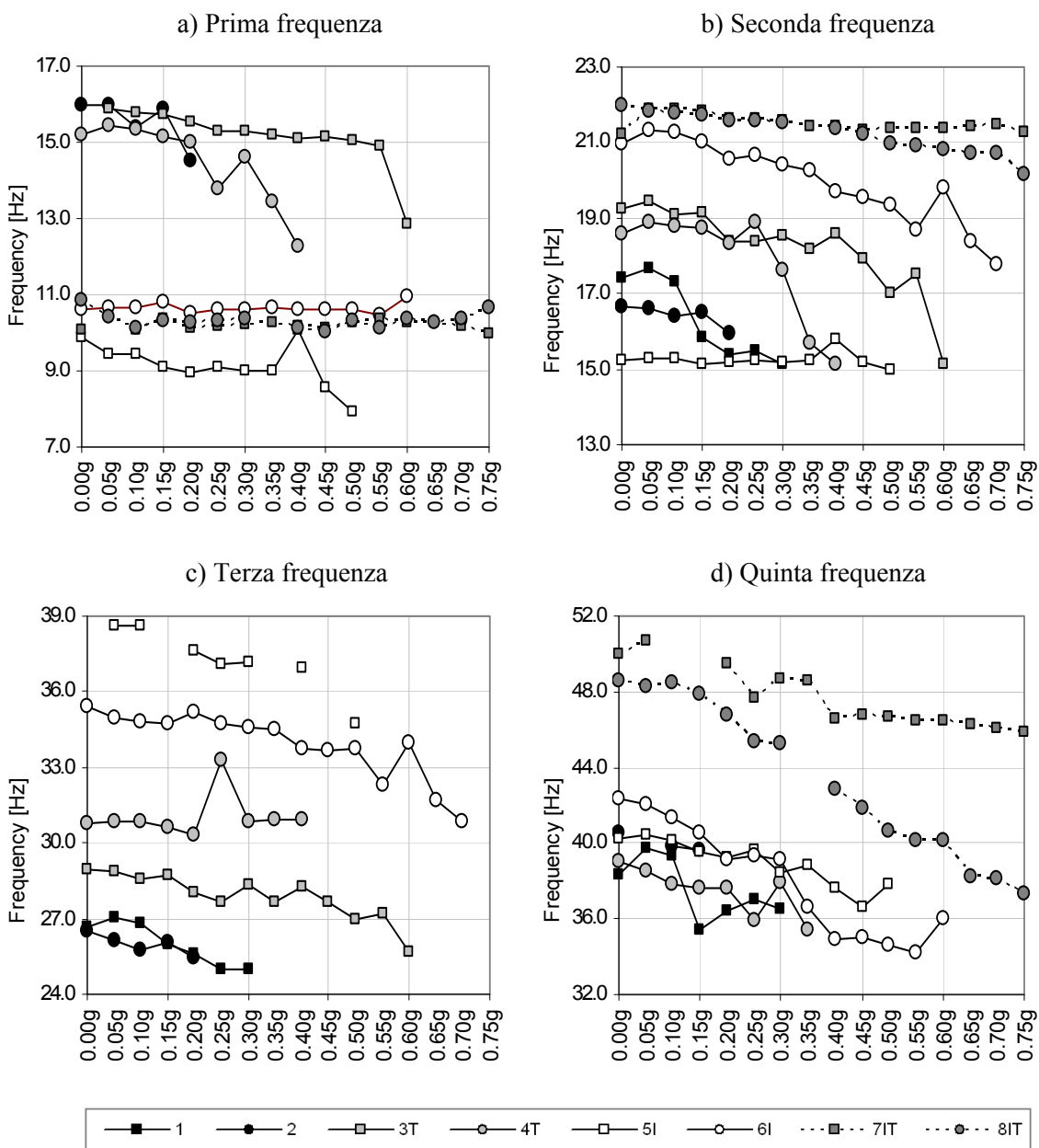


Fig 4.31: Principali frequenze rilevate. Confronto tra pannelli non iniettati ed iniettati.

Un'ulteriore analisi di confronto sulle frequenze viene effettuata attraverso istogrammi di decremento in Fig 4.32. In corrispondenza di ciascun modo proprio individuato nel corso di questo capitolo, vengono paragonate le risposte in termini di frequenza rilevate ad ogni pannello. Il diagramma a colonne rappresenta solamente il dato iniziale e quello finale, indicando, in alto, i valori precedentemente determinati della differenza Δf_{tot} .

Nonostante si mantenga la differenziazione tra modelli non iniettati e iniettati, l'intervallo di visualizzazione dell'asse Y comprende sempre venti valori, gli stessi se si tratta del medesimo modo analizzato. Mediante questa condizione viene conservata la scala di rappresentazione e risulta perciò possibile comparare visivamente i decrementi, nonché il range di frequenze coinvolto.

La prima frequenza (Fig 4.31-a, Fig 4.32-a/b) nei pannelli iniettati si attesta a circa 10 Hz e manifesta un andamento pressoché costante. Nei casi non consolidati la prima frequenza identificata evidenzia valori superiori compresi tra i 12 Hz e 16 Hz, manifestando inoltre un Δf_{tot} maggiore. Un comportamento simile viene osservato nella terza frequenza (Fig 4.31-c, Fig 4.32-e/f), dove però le frequenze minori si riscontrano nel primo gruppo di campioni. Gli intervalli a cui si fa riferimento sono tra 25 Hz e 31 Hz per i non iniettati, e tra 31 Hz e 39 Hz per i rimanenti. La differenza fra i due gruppi è dunque considerevole.

Nella seconda frequenza (Fig 4.31-b, Fig 4.32-c/d) invece viene coinvolto, in ambo le situazioni, lo stesso range compreso tra 15 Hz e 22 Hz. Il decremento globale è di circa 2 Hz, evidenziando una diminuzione maggiore di frequenza per i pannelli 3T e 6I. Un andamento simile si verifica anche in "Mode 5" (Fig 4.31-d, Fig 4.32-i/l), almeno per quanto riguarda i primi sei modelli (ad eccezione di 3T per il quale non si riscontra questa frequenza) compresi tra 35 Hz e 42 Hz. Mentre i muri rinforzati con l'uso combinato di tirantini e miscele leganti (7IT e 8IT) raggiungono frequenze iniziali vicine ai 50 Hz, che si riducono visibilmente fino a 46 Hz e 37 Hz rispettivamente.

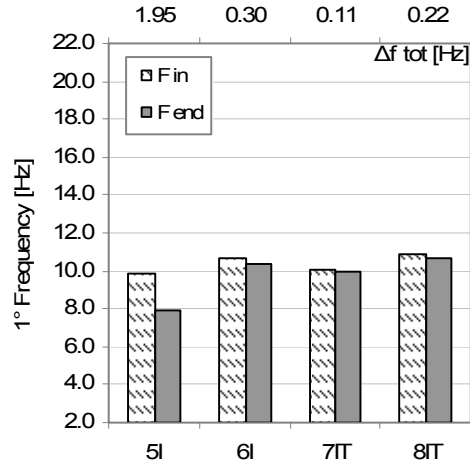
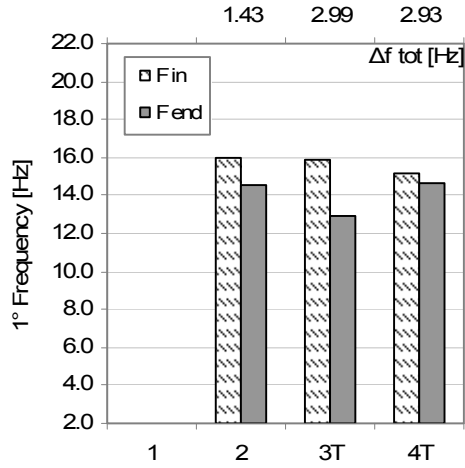
Quarta e sesta frequenza (Fig 4.32-g/h/m/n) sono rilevabili solamente nei primi due campioni (1-URM e 2-URM), grazie alla disposizione degli accelerometri. Nel primo caso l'andamento all'aumentare della sollecitazione sismica è piuttosto costante attorno a valori pari a 31 Hz, mentre nel secondo Δf_{tot} assume valori più rilevanti, coinvolgendo frequenze comprese tra 37 Hz e 40 Hz.

In conclusione, dall'analisi delle figure Fig 4.31 e Fig 4.32 si nota che, ad eccezione della prima frequenza, in linea generale i pannelli consolidati assumono valori di frequenza maggiori rispetto a quelli non iniettati.

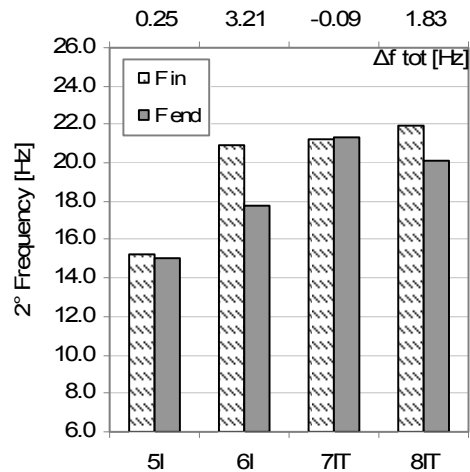
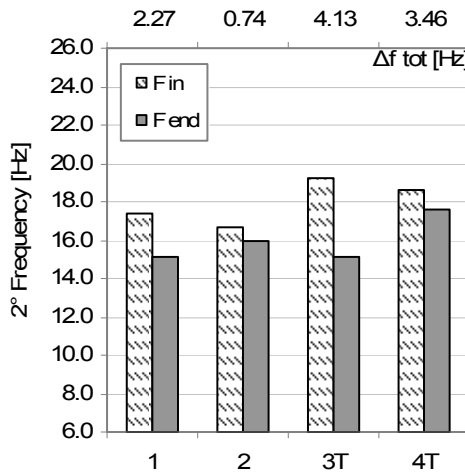
PANNELLI NON INIETTATI

PANNELLI INIETTATI

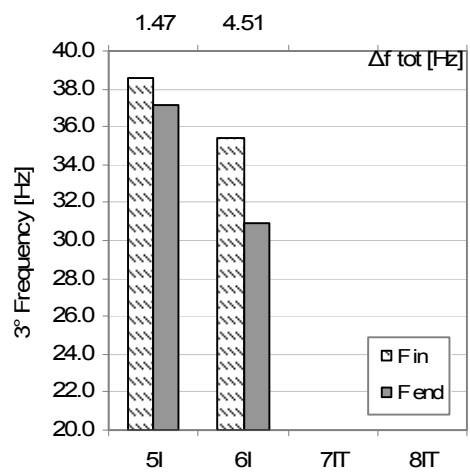
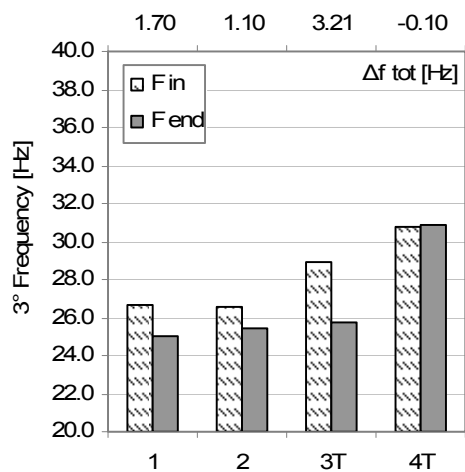
a) Prima frequenza identificata b)



c) Seconda frequenza identificata d)



e) Terza frequenza identificata f)



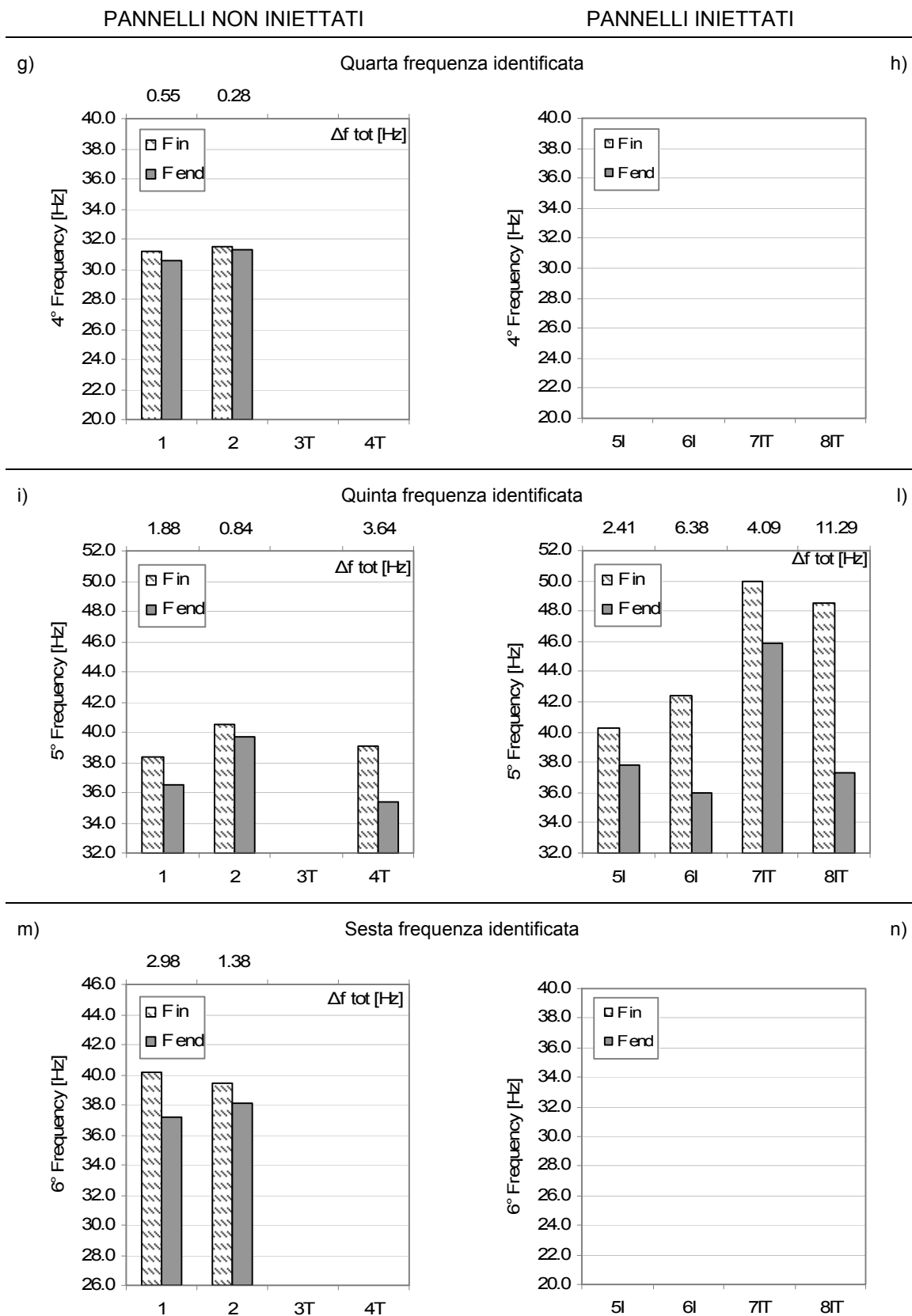


Fig 4.32: Decrementi osservabili nelle frequenze rilevate. Confronto tra pannelli non iniettati ed iniettati.

4.5.1. Pannelli non iniettati

La diversa disposizione degli accelerometri nei campioni 1-URM e 2-URM, rispetto alla configurazione adottata nei rimanenti modelli (Fig 4.1), comporta una visualizzazione differente delle forme modali e quindi un confronto non immediato delle stesse. Nonostante ciò è comunque possibile individuare nei pannelli non rinforzati i modi propri comuni, osservando i valori delle frequenze e tenendo presente che:

- l'assenza di canali posizionati rispettivamente a circa mt 0.65 e mt 1.95, causa l'identificazione di forme modali meno dettagliate (nella vista laterale), perché le misure sono limitate a punti di tre sole altezze differenti (contro i cinque della seconda configurazione);
- la presenza di accelerometri collocati a circa mt 1.30, ai bordi esterni del pannello permette l'individuazione di forme modali non riscontrabili nella seconda configurazione dei sensori di accelerazione (vedi "Mode 4" e "Mode 6").

In questo paragrafo si confrontano i modelli non iniettati: 1-URM, 2-URM, 3T e 4T. Per ciascuna frequenza identificata, il metodo di confronto adottato prevede il dettaglio dei valori numerici dei parametri modali, un raffronto grafico con l'uso di diagrammi PGA-Frequency e PGA-Damping Ratio, ed uno visivo fra le forme modali ottenute.

Prima frequenza identificata

La prima frequenza identificata è stata denominata, nei paragrafi precedenti, "Mode 1". Dai diagrammi di stabilizzazione esaminati durante l'identificazione dinamica di 1-URM, non è stata rilevata. Negli altri muri invece (Tab 4.18 e Fig 4.34), essa si manifesta a circa 16 Hz a PGA inferiori e, con un decremento analogo, raggiunge circa 13 Hz in 3T, pannello contraddistinto da un maggior numero di prove.

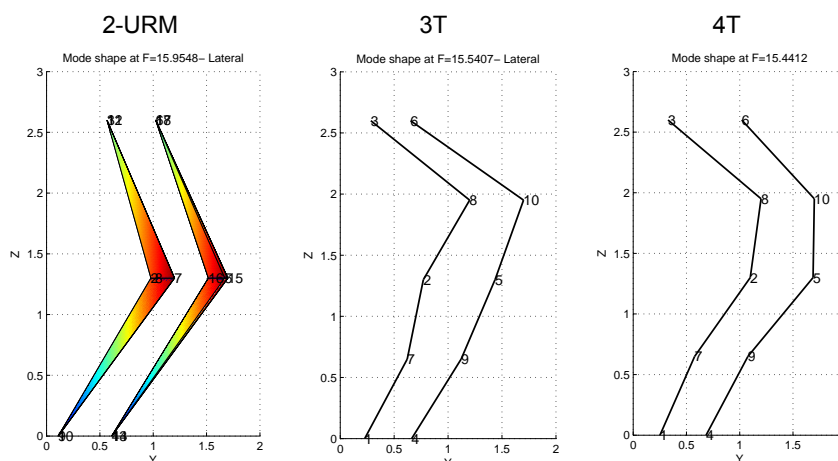


Fig 4.33: Pannelli non iniettati. Andamento delle forme modali rilevate nella prima frequenza identificata.

In Tab 4.18 viene introdotto $\Delta f_{0.20g}$ che indica l'incremento di frequenza relativo nei pannelli rinforzati rispetto a quelli URM. La misura è puntuale in quanto calcolata ad un solo passo di prova (0.20g). Si nota un aumento molto limitato: di 1 Hz in 3T e di 0.46 Hz in 4T.

Osservando le forme modali corrispondenti ai dati suddetti (Fig 4.33) e in particolare i soli sensori alle estremità e quelli di mezzeria, è chiaro che si tratta di uno stesso modo di vibrare. Le diversità riscontrabili nella parte superiore sono legate a caratteristiche fisiche del pannello o del banco di prova. La situazione esaminata era quella dell'asta a doppio incastro, meglio visualizzata nei muri rinforzati. In questi però, la permeazione di miscela nella parte inferiore è causa di un comportamento evidentemente più rigido che ne riduce la capacità di spostamento rispetto allo stato iniziale (parte superiore).

Tab 4.18: Pannelli non iniettati. Valori dei parametri modali nella prima frequenza identificata.

Step [g]	1° Frequency [Hz]				Damping Ratio [%]			
	1-URM	2-URM	3T	4T	1-URM	2-URM	3T	4T
0.00g	-	15.95	-	15.20	-	2.20	-	1.85
0.05g	-	16.00	15.86	15.44	-	1.72	1.82	1.43
0.10g	-	15.40	15.78	15.33	-	2.31	1.72	1.33
0.15g	-	15.89	15.72	15.17	-	1.85	1.39	0.83
0.20g	-	14.53	15.54	14.99	-	2.43	1.33	1.25
0.25g	-	-	15.27	13.80	-	-	1.43	2.18
0.30g	-	-	15.31	14.62	-	-	1.63	1.33
0.35g	-	-	15.21	13.43	-	-	1.53	1.75
0.40g	-	-	15.09	12.27	-	-	1.42	2.62
0.45g	-	-	15.14	-	-	-	1.41	-
0.50g	-	-	15.03	-	-	-	2.05	-
0.55g	-	-	14.88	-	-	-	1.76	-
0.60g	-	-	12.87	-	-	-	1.40	-
0.65g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.70g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.75g	-	-	-	-	-	-	-	-
Δf tot	-	1.43	2.99	2.93				
<F0.20g>	14.53		-	-				
Δf 0.20g			1.00	0.46				

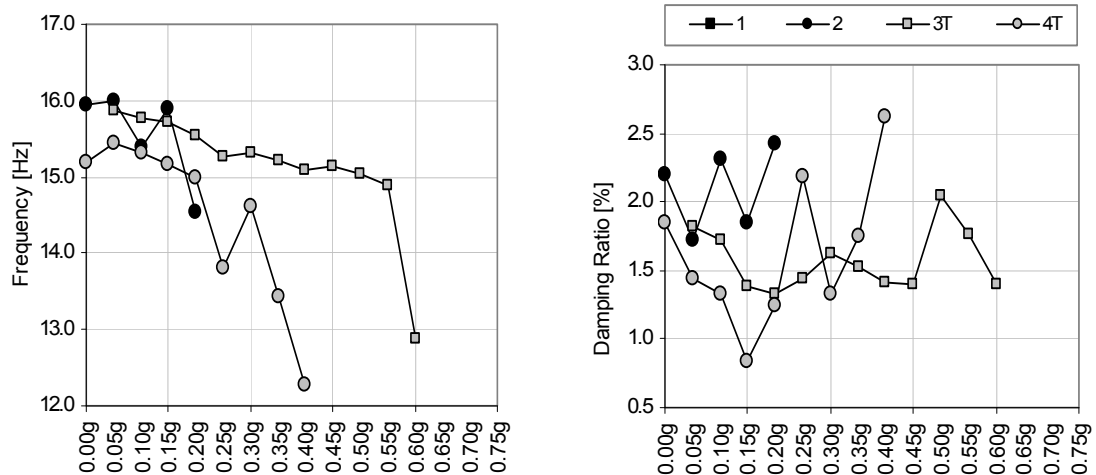


Fig 4.34: Pannelli non iniettati. Andamento dei parametri modali nella prima frequenza identificata.

Seconda frequenza identificata

Denominata nei paragrafi precedenti “Mode 2”, la seconda frequenza identificata viene ora confrontata tra i pannelli non iniettati. I valori determinati nel corso dell’identificazione modale, sono riassunti in Tab 4.19. Com’è evidente nel diagramma in Fig 4.36, si presenta un chiaro incremento di frequenze nei campioni tirantati, rispetto ai non rinforzati. Tale aumento è stato valutato in modo puntuale ($\Delta f_{0.20g}$) di circa 2.7 Hz, partendo da un dato medio di riferimento URM di 15.65 Hz.

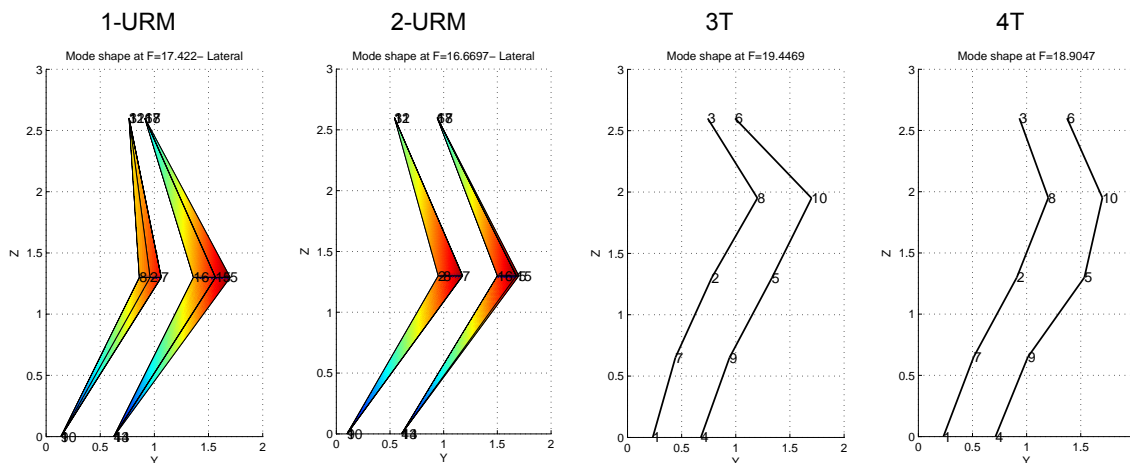


Fig 4.35: Pannelli non iniettati. Andamento delle forme modali rilevate nella seconda frequenza identificata.

Tab 4.19: Pannelli non iniettati. Valori dei parametri modali nella seconda frequenza identificata.

Step [g]	2° Frequency [Hz]				Damping Ratio [%]			
	1-URM	2-URM	3T	4T	1-URM	2-URM	3T	4T
0.00g	17.42	16.67	19.26	18.58	1.38	1.64	1.55	2.72
0.05g	17.67	16.60	19.45	18.90	1.68	1.63	1.58	1.28
0.10g	17.32	16.42	19.11	18.77	1.81	1.58	1.74	1.64
0.15g	15.85	16.49	19.16	18.75	2.45	2.23	1.54	1.86
0.20g	15.37	15.93	18.36	18.34	1.59	1.94	2.27	2.93
0.25g	15.50	-	18.36	18.89	1.10	-	1.72	2.87
0.30g	15.16		18.51	17.64	1.10		2.13	1.85
0.35g	-		18.20	15.69	-		2.32	1.50
0.40g			18.57	15.12			2.20	1.49
0.45g			17.93	-			2.39	-
0.50g			17.01				3.01	
0.55g			17.51				2.07	
0.60g			15.13				1.26	
0.65g								
0.70g								
0.75g								
Δf tot	2.27	0.74	4.13	3.46				
<F _{0.20g} >	15.65							
Δf 0.20g			2.71	2.69				

Il confronto tra le forme modali visibili in Fig 4.35 denota uno stesso comportamento tra i modelli esaminati, basti osservare i valori delle ascisse nei sensori comuni. Le figure sono state rilevate a 0.00g per i casi non rinforzati e 0.05g per i tirantati. Rispetto a “Mode 1” si verificano spostamenti maggiori in sommità. Nei modelli rinforzati mediante barre metalliche è evidente l’influenza delle permeazioni di miscela nella metà inferiore degli stessi. Pensando alle condizioni di vincolo imposte da programma sperimentale, il caso dell’asta a doppia cerniera, si presuppone uno spostamento affine tra i nodi 7-9 e 8-10. Ciò non avviene e si presenta un comportamento molto rigido nel tratto inferiore dovuto appunto alla permeazione.

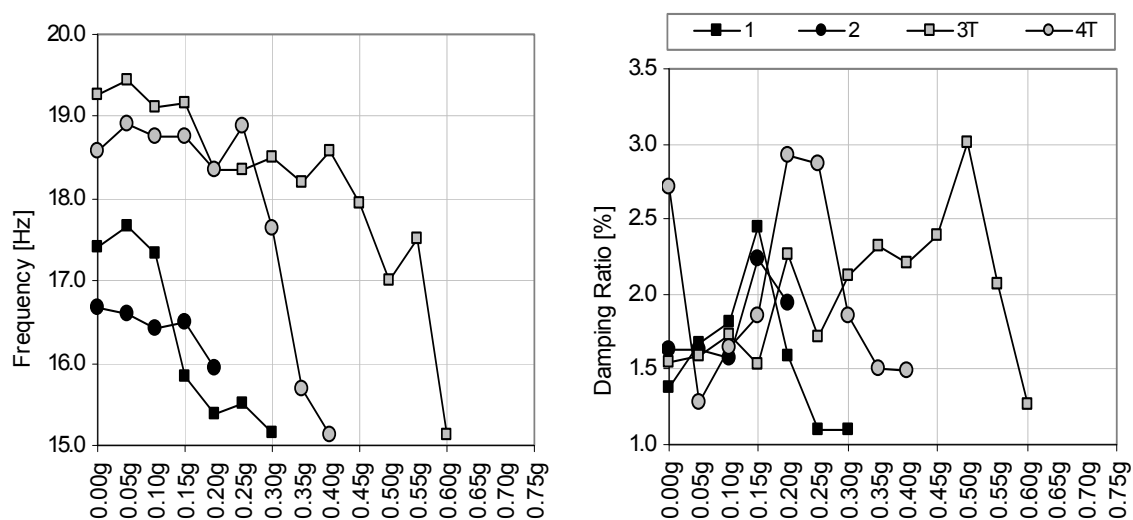


Fig 4.36: Pannelli non iniettati. Andamento dei parametri modali nella seconda frequenza identificata.

Terza frequenza identificata

Osservando le forme modali (Fig 4.37) determinate con il processo di identificazione dinamica, e ponendo attenzione ai trasduttori aventi la stessa collocazione, è stata individuata questa terza frequenza comune (precedentemente definita “Mode 3”). Nel movimento si mantengono come punti fissi la base e un punto a 3/4 dell’altezza del campione.

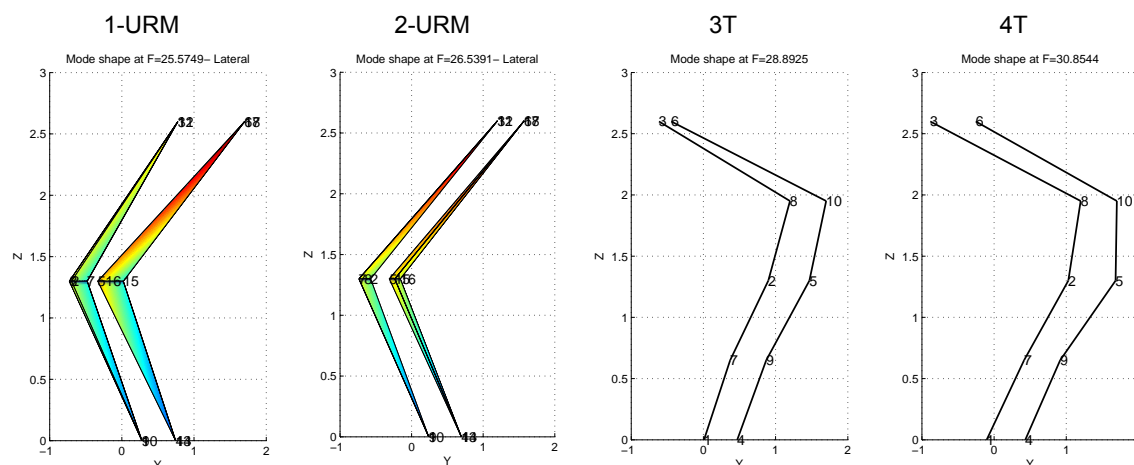


Fig 4.37: Pannelli non iniettati. Andamento delle forme modali rilevate nella terza frequenza identificata.

Tab 4.20: Pannelli non iniettati. Valori dei parametri modali nella terza frequenza identificata.

Step [g]	3° Frequency [Hz]				Damping Ratio [%]			
	1-URM	2-URM	3T	4T	1-URM	2-URM	3T	4T
0.00g	26.68	26.54	28.92	30.80	1.55	1.38	1.49	1.92
0.05g	27.08	26.15	28.89	30.85	2.03	1.32	1.68	2.02
0.10g	26.81	25.78	28.59	30.87	2.12	2.29	1.78	1.63
0.15g	25.95	26.09	28.71	30.61	2.08	2.70	1.40	1.99
0.20g	25.57	25.44	28.03	30.31	2.05	2.04	1.54	1.99
0.25g	24.98	-	27.62	33.29	0.15	-	2.18	1.84
0.30g	24.98	-	28.31	30.89	0.65	-	1.62	1.52
0.35g	-	-	27.67	30.94	-	-	1.30	2.83
0.40g	-	-	28.27	30.90	-	-	1.58	1.92
0.45g	-	-	27.63	-	-	-	1.67	-
0.50g	-	-	26.94	-	-	-	2.46	-
0.55g	-	-	27.21	-	-	-	1.92	-
0.60g	-	-	25.71	-	-	-	2.57	-
0.65g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.70g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.75g	-	-	-	-	-	-	-	-
Δf tot	1.70	1.10	3.21	-0.10				
<F _{0.20g} >	25.51							
Δf 0.20g			2.52	4.81				

Anche in questo caso, dalle forme modali si osserva, nella parte inferiore dei modelli rinforzati, la maggiore rigidità dovuta alle permeazioni di miscela. I parametri modali di riferimento sono riportati in Tab 4.20, poi rappresentati in Fig 4.38. Nei muri non rinforzati (1-URM e 2-URM) si sviluppano le stesse frequenze, mentre nei tirantati si riscontrano misure costanti a circa 30 Hz in 4T, e inferiori ma maggiormente variabili in 3T. Viene inoltre introdotto il valore $\Delta f_{0.20g}$, con il quale si deduce l'incremento di frequenza osservabile nei pannelli rinforzati rispetto a quelli URM. Si tratta di un termine relativo e puntuale (calcolato solamente a 0.20g). Si osserva un aumento notevole di 2.5 Hz in 3T e di 4.8 Hz in 4T.

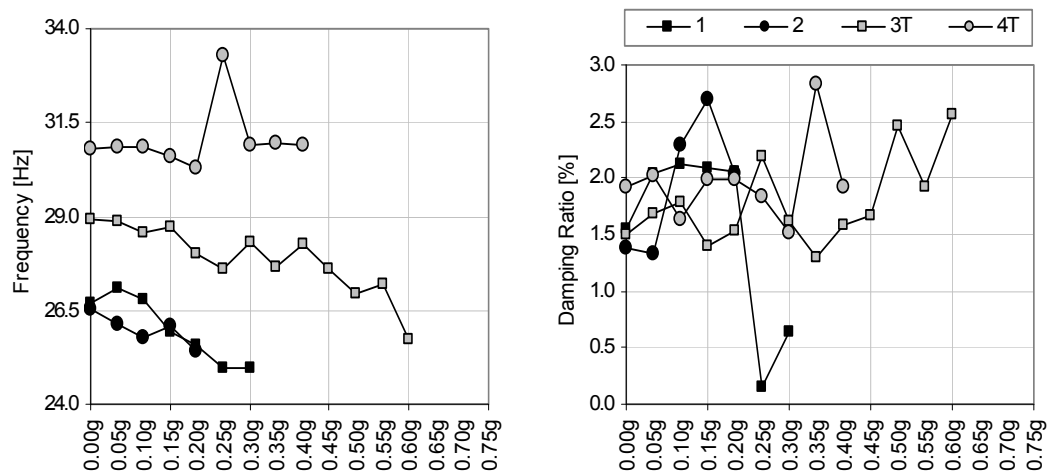


Fig 4.38: Pannelli non iniettati. Andamento dei parametri modali nella terza frequenza identificata.

Quarta frequenza identificata

La quarta frequenza identificata è stata denominata, durante l'identificazione dinamica, "Mode 4". Come si osserva in Fig 4.39, si tratta di una forma modale visibile solamente nei campioni non rinforzati, grazie alla collocazione degli accelerometri A7 e A8 sulle estremità laterali nella mezzeria del pannello. Per tale ragione e per una migliore visualizzazione della forma modale, sono state qui riportate sia le viste laterali che tridimensionali.

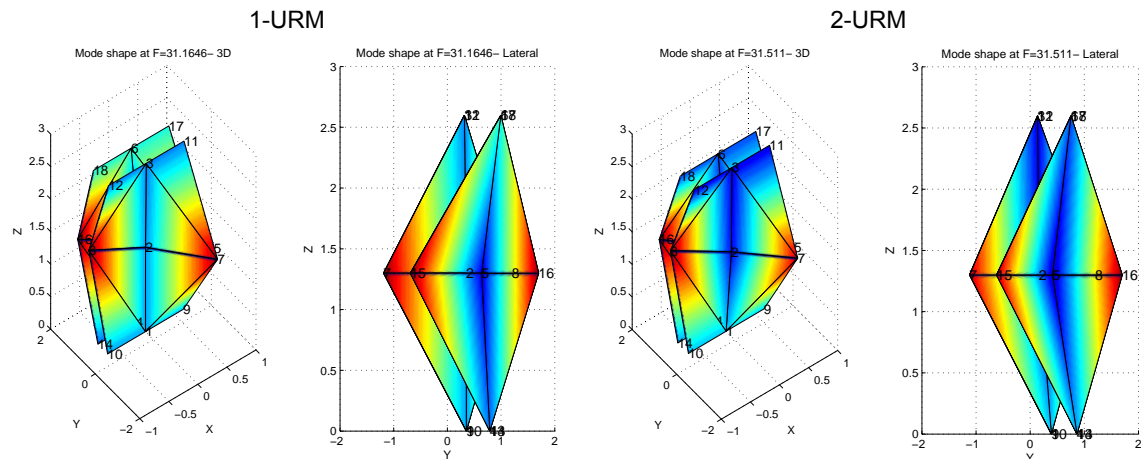


Fig 4.39: Pannelli non iniettati. Andamento delle forme modali rilevate nella quarta frequenza identificata.

Tab 4.21: Pannelli non iniettati. Valori dei parametri modali nella quarta frequenza identificata.

Step [g]	4° Frequency [Hz]				Damping Ratio [%]			
	1-URM	2-URM	3T	4T	1-URM	2-URM	3T	4T
0.00g	31.16	31.53	-	-	0.94	1.13	-	-
0.05g	31.65	31.47	-	-	1.16	0.47	-	-
0.10g	31.48	31.36	-	-	1.09	0.88	-	-
0.15g	30.73	31.42	-	-	1.40	1.26	-	-
0.20g	30.69	31.25	-	-	0.97	0.96	-	-
0.25g	30.82	-	-	-	0.94	-	-	-
0.30g	30.61	-	-	-	0.41	-	-	-
0.35g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.40g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.45g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.50g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.55g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.60g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.65g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.70g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.75g	-	-	-	-	-	-	-	-
Δf tot	0.55	0.28	-	-	-	-	-	-
<F0.20g>	30.97				-	-	-	-

La frequenza di riferimento è, in entrambi i casi, 31 Hz. Come è riportato in Tab 4.21 e Fig 4.40, la variazione all'aumentare dell'accelerazione alla base è molto ridotta. I rapporti di smorzamento sono anch'essi limitati.

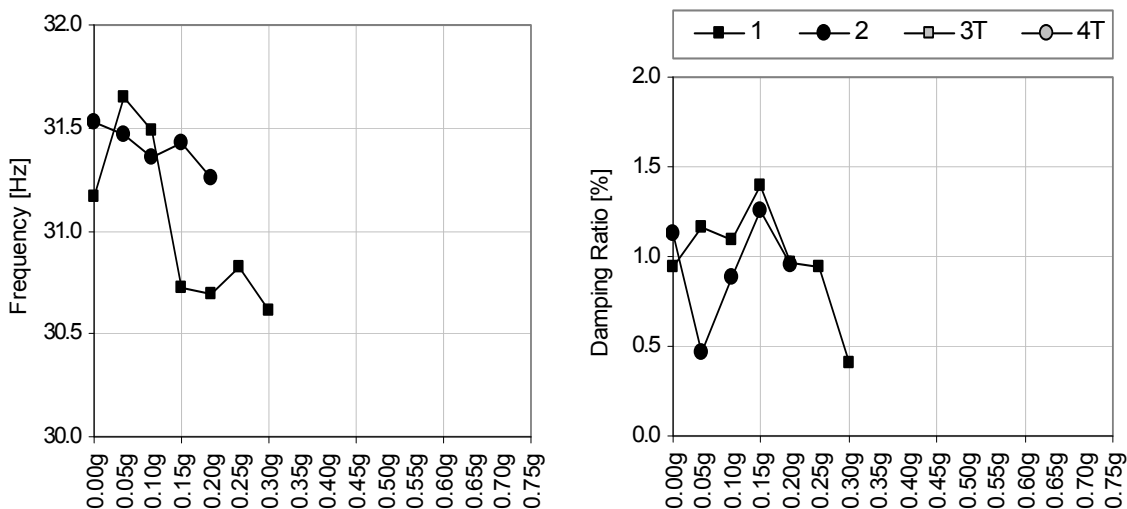


Fig 4.40: Pannelli non iniettati. Andamento dei parametri modali nella quarta frequenza identificata.

Quinta frequenza identificata

La quinta frequenza individuata (“Mode 5”) è caratterizzata da grandi spostamenti in sommità e da un movimento in fase tra base e mezzeria (Fig 4.41). Dai diagrammi di stabilizzazione esaminati durante l'identificazione dinamica di 3T, non è stata rilevata. Nella forma modale di 4T risulta maggiormente evidente, rispetto a quelle viste alle frequenze precedenti, la rigidità della parte soggetta a permeazione di miscela legante (metà inferiore).

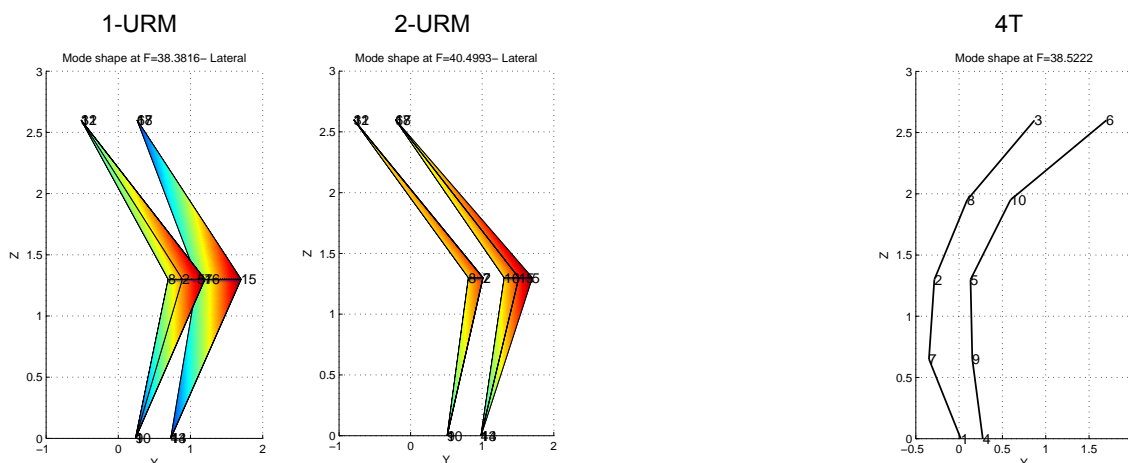


Fig 4.41: Pannelli non iniettati. Andamento delle forme modali rilevate nella quinta frequenza identificata.

Le frequenze ed i rapporti di smorzamento rilevati sono elencati in Tab 4.22 e rappresentati in Fig 4.42. Viene inoltre introdotto un valore di paragone $\Delta f_{0,20g}$, con il quale si deduce l'incremento di frequenza osservabile nei pannelli rinforzati con i tiranti rispetto a quelli non

rinforzati. Si tratta di un termine relativo e puntuale in quanto calcolato come differenza di misure e ad un solo passo di prova (0.20g). In tal modo si riscontra un aumento limitato di 1.17 Hz in 4T.

Tab 4.22: Pannelli non iniettati. Valori dei parametri modali nella quinta frequenza identificata.

Step [g]	5° Frequency [Hz]				Damping Ratio [%]			
	1-URM	2-URM	3T	4T	1-URM	2-URM	3T	4T
0.00g	38.38	40.50	-	39.06	1.23	1.73	-	1.62
0.05g	39.70	-	-	38.52	0.69	-	-	1.73
0.10g	39.34	39.83	-	37.84	1.25	1.39	-	1.31
0.15g	35.42	39.66	-	37.61	2.21	1.79	-	1.23
0.20g	36.47	-	-	37.63	2.66	-	-	1.63
0.25g	36.98	-	-	35.92	0.90	-	-	2.02
0.30g	36.51	-	-	37.90	1.07	-	-	1.64
0.35g	-	-	-	35.42	-	-	-	1.84
0.40g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.45g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.50g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.55g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.60g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.65g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.70g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.75g	-	-	-	-	-	-	-	-
Δf tot	1.88	0.84	-	3.64				
<F0.20g>	36.47							
Δf 0.20g			-	1.17				

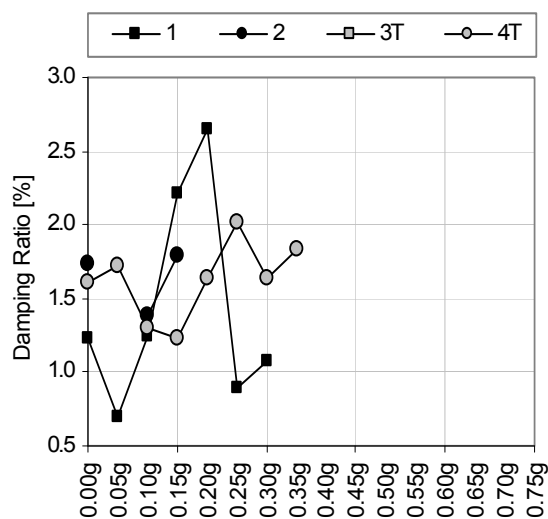
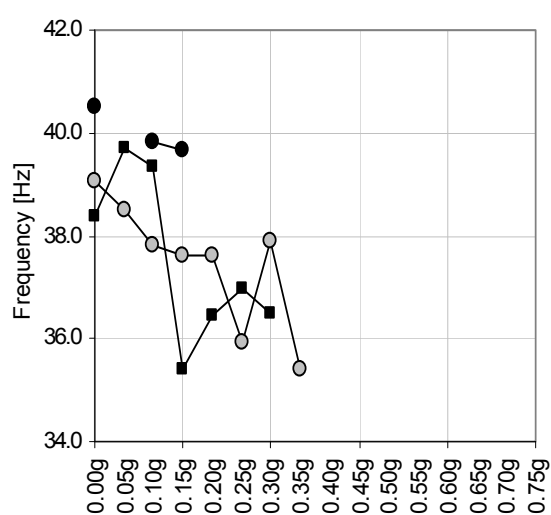


Fig 4.42: Pannelli non iniettati. Andamento dei parametri modali nella quinta frequenza identificata.

Sesta frequenza identificata

Come nella quarta frequenza, anche in “Mode 6” gli spostamenti avvengono attorno all’asse verticale centrale del pannello. Questa forma modale (Fig 4.43) può essere visualizzata solamente nei primi campioni, per la particolare posizione dei sensori A7 e A8. I valori dei parametri modali che descrivono tali forme sono riportati in Tab 4.23. Il loro andamento (Fig 4.44) in 1-URM oscilla all’interno di un intervallo di frequenze compreso tra 40 Hz e 34 Hz, mentre in 2-URM si limita ad un intorno di 38 Hz. I rapporti di smorzamento sono poco elevati.

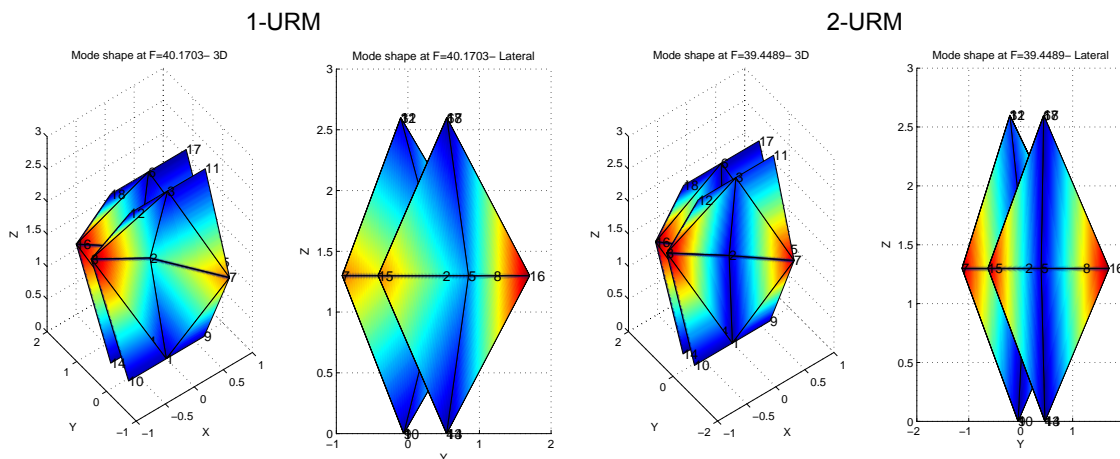


Fig 4.43: Pannelli non iniettati. Andamento delle forme modali rilevate nella sesta frequenza identificata.

Tab 4.23: Pannelli non iniettati. Valori dei parametri modali nella sesta frequenza identificata.

Step [g]	6° Frequency [Hz]				Damping Ratio [%]			
	1-URM	2-URM	3T	4T	1-URM	2-URM	3T	4T
0.00g	40.17	39.45	-	-	1.16	1.52	-	-
0.05g	41.06	39.75	-	-	1.59	1.59	-	-
0.10g	40.51	37.80	-	-	0.34	1.41	-	-
0.15g	36.63	37.81	-	-	1.78	1.26	-	-
0.20g	34.84	38.07	-	-	1.61	1.56	-	-
0.25g	35.86	-	-	-	0.63	-	-	-
0.30g	37.19	-	-	-	1.75	-	-	-
0.35g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.40g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.45g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.50g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.55g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.60g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.65g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.70g	-	-	-	-	-	-	-	-
0.75g	-	-	-	-	-	-	-	-
Δf tot	2.98	1.38	-	-				
<F0.20g>	36.45							

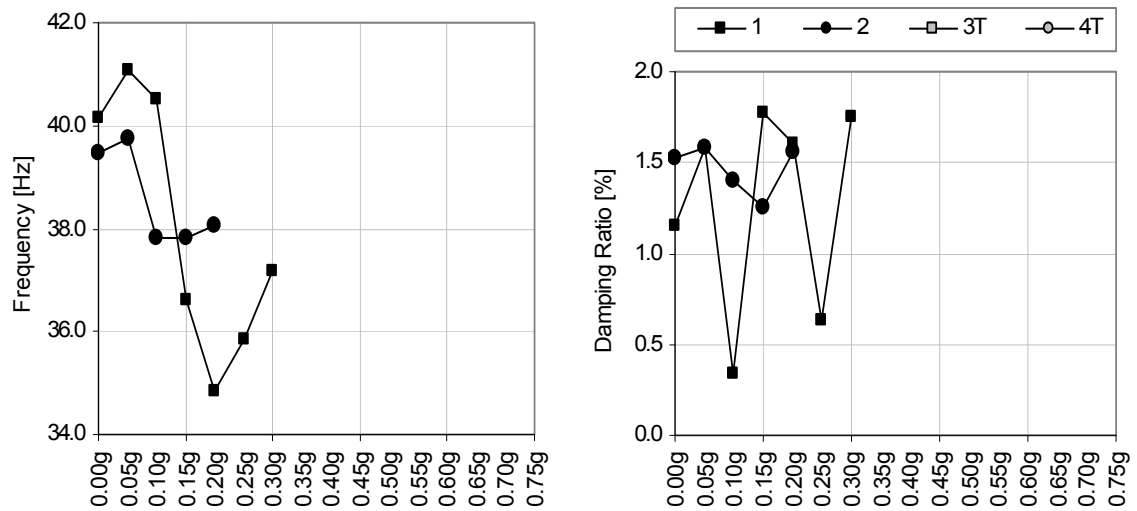


Fig 4.44: Pannelli non iniettati. Andamento dei parametri modali nella sesta frequenza identificata.

4.5.2. Pannelli iniettati

I modelli qui confrontati sono quelli iniettati: 5I, 6I, 7IT e 8IT. I sensori sono collocati nella medesima posizione per tutti i pannelli murari considerati, risultando così più semplice confrontare le forme modali. Per questo motivo non sono considerate la quarta e la sesta frequenza visibili solamente (1-URM e 2-URM) grazie ai sensori posti sulle estremità (Fig 4.1).

Il metodo di confronto adottato prevede l'analisi di ogni frequenza identificata e per ciascuna il dettaglio con i valori dei parametri modali, un raffronto con l'uso di grafici PGA-Frequency e PGA-Damping Ratio, ed uno visivo con le forme modali fornite da MACEC 3.2.

Prima frequenza identificata

La prima frequenza identificata, denominata nei paragrafi precedenti "Mode 1", è collocata in un intorno di 10 Hz, con variazione maggiore rilevabile solamente in 5I, come visibile in Fig 4.46. I parametri modali a cui si riferisce sono riassunti in Tab 4.24.

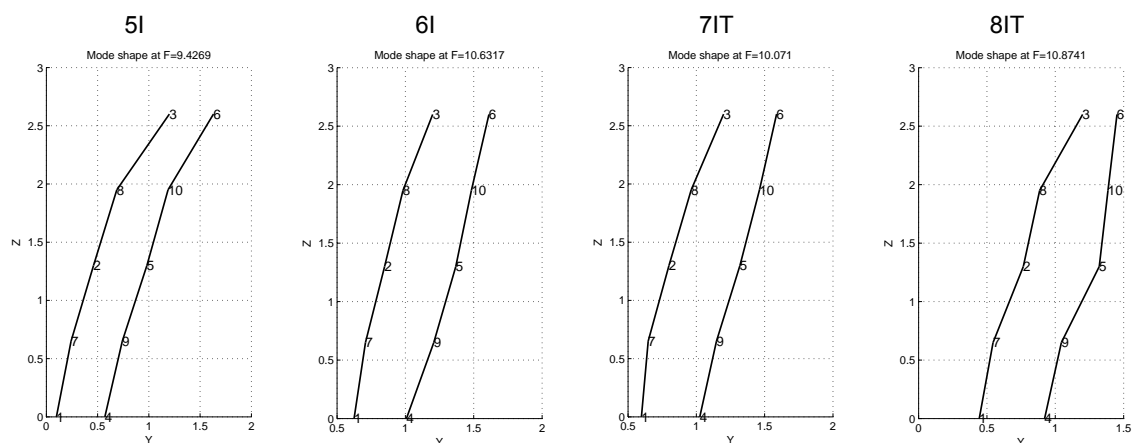


Fig 4.45: Pannelli iniettati. Andamento delle forme modali rilevate nella prima frequenza identificata.

In Tab 4.24 viene introdotto un valore di paragone $\Delta f_{0.20g}$, con il quale si deduce l'incremento di frequenza osservabile nei pannelli rinforzati con i tiranti rispetto a quelli solo consolidati. Si tratta quindi di un termine relativo e puntuale in quanto è calcolato come differenza di misure e ad un solo passo di prova (0.20g). In tal modo si riscontra una riduzione molto limitata, di circa 0.30 Hz.

Tab 4.24: Pannelli iniettati. Valori dei parametri modali nella prima frequenza identificata.

Step [g]	1° Frequency [Hz]				Damping Ratio [%]			
	5I	6I	7IT	8IT	5I	6I	7IT	8IT
0.00g	9.88	10.63	10.07	10.87	2.82	1.05	3.82	5.35
0.05g	9.43	10.66	-	10.41	1.41	1.15	-	2.61
0.10g	9.42	10.65	10.08	10.11	2.08	1.15	5.10	5.39
0.15g	9.09	10.80	10.35	10.32	1.92	0.54	2.89	6.22
0.20g	8.96	10.53	10.14	10.27	1.34	0.55	6.36	7.43
0.25g	9.12	10.60	10.19	10.34	2.10	0.68	4.69	2.28
0.30g	9.00	10.59	10.20	10.37	2.20	0.94	5.52	4.52
0.35g	9.00	10.65	10.26	-	1.84	0.76	5.56	-
0.40g	10.08	10.59	10.19	10.14	2.77	1.43	4.97	2.50
0.45g	8.55	10.62	10.14	10.03	2.20	0.65	4.22	6.18
0.50g	7.92	10.62	10.26	10.32	2.16	0.82	3.83	2.56
0.55g	-	10.48	10.38	10.14	-	1.70	3.45	2.67
0.60g		10.95	10.25	10.37		0.74	4.29	3.45
0.65g		-	10.25	10.28		-	9.64	4.21
0.70g		10.33	10.16	10.36		5.38	4.64	3.06
0.75g		-	9.96	10.65		-	6.09	4.68
Δf tot	1.95	0.49	0.11	0.22				
<F0.20g>		10.53						
Δf 0.20g	-1.57		-0.39	-0.26				

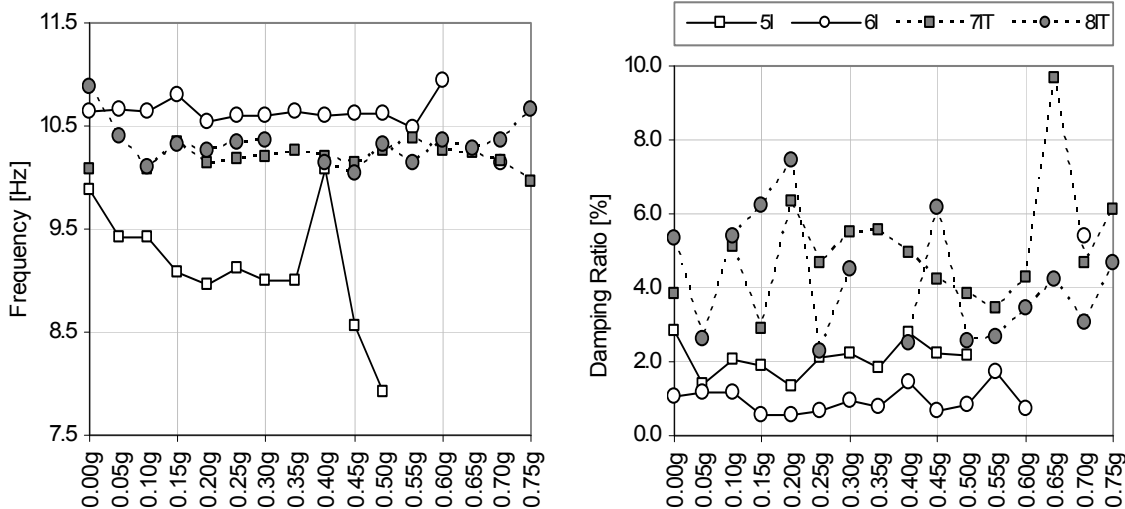


Fig 4.46: Pannelli iniettati. Andamento dei parametri modali nella prima frequenza identificata.

Fatta eccezione per dei movimenti localizzati a singoli sensori, le forme modali di 6I, 7IT e 8IT sono tra loro molto simili (Fig 4.45), basti paragonare gli spostamenti di ogni nodo. Evidentemente si tratta dello stesso modo di vibrare che si presenta in campioni diversi. Maggiori differenze si riscontrano invece in 5I, nel quale il movimento risultava bloccato alla base anche a frequenze maggiori. Nonostante ciò l'andamento globale è assimilabile agli altri.

Seconda frequenza identificata

Questa seconda frequenza era stata denominata, nei paragrafi precedenti, "Mode 2". Le misure determinate nel corso dell'identificazione modale, sono riassunte in Tab 4.25.

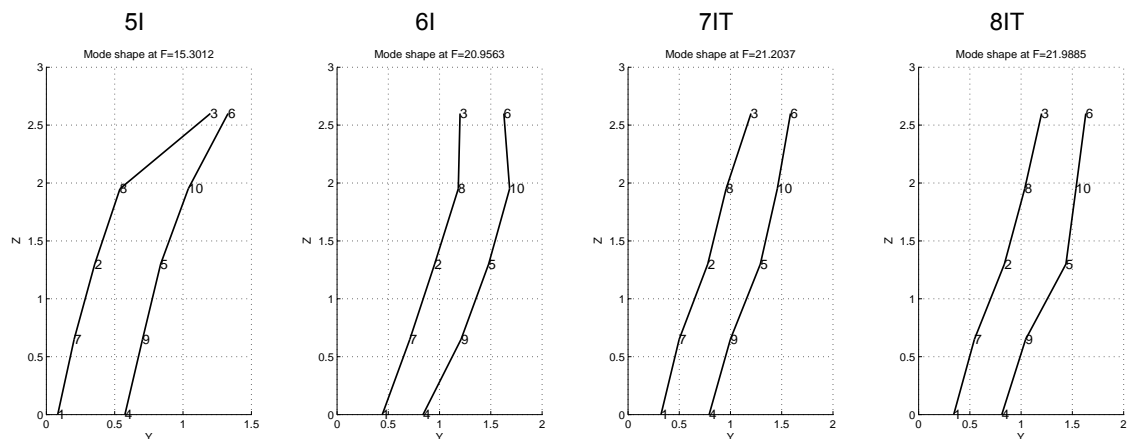


Fig 4.47: Pannelli iniettati. Andamento delle forme modali rilevate nella seconda frequenza identificata.

Tab 4.25: Pannelli iniettati. Valori dei parametri modali nella seconda frequenza identificata.

Step [g]	2° Frequency [Hz]				Damping Ratio [%]			
	5I	6I	7IT	8IT	5I	6I	7IT	8IT
0.00g	15.25	20.96	21.20	21.99	1.38	2.38	2.66	1.60
0.05g	15.30	21.35	21.91	21.82	1.17	2.07	1.73	1.81
0.10g	15.27	21.29	21.87	21.81	1.27	2.19	1.59	2.16
0.15g	15.14	21.01	21.84	21.74	1.43	2.42	1.51	1.66
0.20g	15.20	20.54	21.63	21.56	1.11	2.88	1.44	1.31
0.25g	15.24	20.65	21.61	21.56	1.26	1.60	1.94	1.38
0.30g	15.21	20.41	21.59	21.55	1.06	1.95	1.82	1.40
0.35g	15.23	20.26	21.44	-	1.32	3.67	1.52	-
0.40g	15.80	19.70	21.43	21.36	1.88	1.68	1.37	1.87
0.45g	15.18	19.52	21.34	21.25	1.24	1.99	1.51	2.01
0.50g	15.00	19.33	21.39	20.97	1.27	1.80	1.44	1.72
0.55g	-	18.71	21.37	20.91	-	2.22	1.55	1.35
0.60g		19.78	21.39	20.83		1.91	1.43	1.63
0.65g		18.39	21.44	20.71		2.17	1.97	1.91
0.70g		17.75	21.46	20.71		1.97	1.36	1.78
0.75g		-	21.29	20.16		-	1.88	1.44
Δf tot	0.25	3.21	-0.09	1.83				
<F0.20g>		20.54						
Δf 0.20g	-5.34		1.09	1.02				

Osservando le forme modali in Fig 4.47, si individua una chiara somiglianza nei modelli iniettati e tirantati, con movimento in fase dei sensori dovuto al nucleo compatto e omogeneo grazie ad un intervento ben eseguito. Lo stesso andamento si ritrova in 6I, ma la porzione in sommità priva di miscela legante assume spostamenti meno rigidi. Un comportamento equivalente avviene in 5I, il quale però appare ancora alterato dal blocco della base. Come in “Mode 1” si verifica un chiaro salto di valore (Fig 4.48) tra le frequenze di 5I e quelle degli altri campioni iniettati. Tale differenza, valutata come $\Delta f_{0,20g}$, si presenta superiore a 5 Hz.

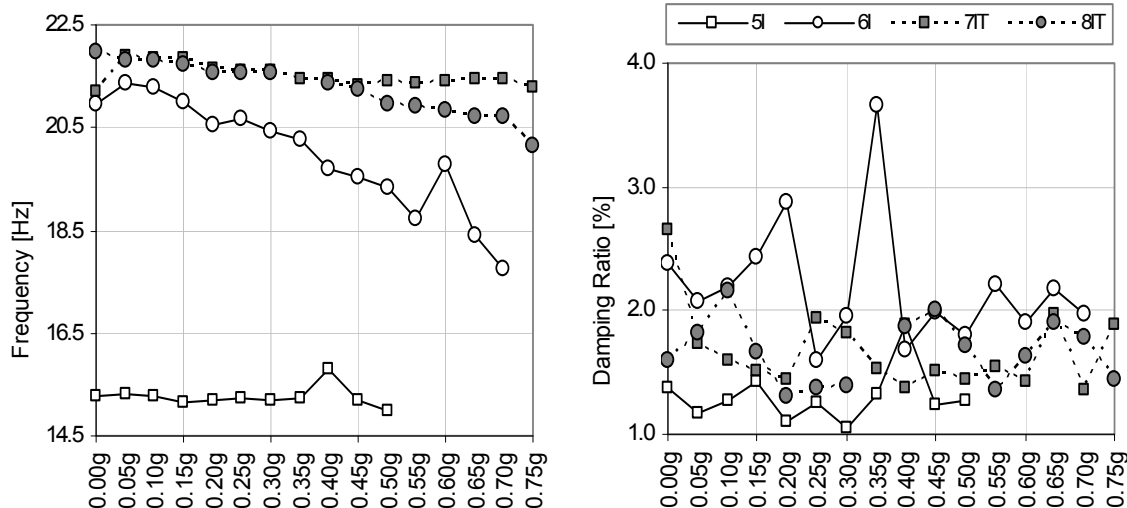


Fig 4.48: Pannelli iniettati. Andamento dei parametri modali nella seconda frequenza identificata.

Terza frequenza identificata

Si analizza ora la terza frequenza identificata (“Mode 3”) che non è stato tuttavia possibile identificare nei diagrammi di stabilizzazione dei pannelli 7IT e 8IT. Inoltre, come si può notare in Tab 4.26 e Fig 4.50, non è stato possibile individuarla nemmeno in molti passi di prova di 5I.

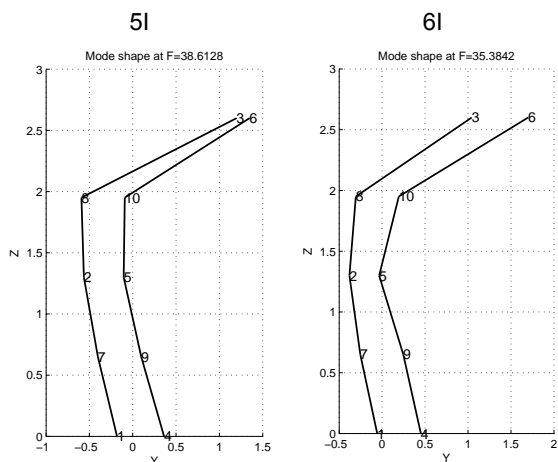


Fig 4.49: Pannelli iniettati. Andamento delle forme modali rilevate nella terza frequenza identificata.

L’andamento delle forme modali (Fig 4.49) è diverso solamente in sommità ed in mezzzeria probabilmente a causa dell’accelerometro A9, posizionato accanto ad A2 all’interno di un

sistema di protezione metallico che potrebbe non essere stato perfettamente fissato al muro, o a causa di alcuni aspetti specifici del pannello. Nella parte sommitale, inoltre, la miscela non è perfettamente penetrata e lo spostamento modale sembra essere maggiore.

Tab 4.26: Pannelli iniettati. Valori dei parametri modali nella terza frequenza identificata.

Step [g]	3° Frequency [Hz]				Damping Ratio [%]			
	5I	6I	7IT	8IT	5I	6I	7IT	8IT
0.00g	-	35.38	-	-	-	0.88	-	-
0.05g	38.61	34.98	-	-	1.10	1.09	-	-
0.10g	38.64	34.84	-	-	1.25	1.28	-	-
0.15g	-	34.72	-	-	-	1.43	-	-
0.20g	37.62	35.22	-	-	1.96	0.66	-	-
0.25g	37.10	34.70	-	-	1.79	0.94	-	-
0.30g	37.15	34.56	-	-	1.41	0.93	-	-
0.35g	-	34.50	-	-	-	1.04	-	-
0.40g	36.98	33.77	-	-	1.53	1.24	-	-
0.45g	-	33.67	-	-	-	1.44	-	-
0.50g	34.71	33.75	-	-	1.01	2.10	-	-
0.55g	-	32.28	-	-	-	2.23	-	-
0.60g		33.99	-	-		1.34	-	-
0.65g		31.71	-	-		1.82	-	-
0.70g		30.87	-	-		2.25	-	-
0.75g		-	-	-		-	-	-
Δf tot	3.90	4.51						
$\langle F_{0.20g} \rangle$		35.22						
Δf 0.20g	2.40							

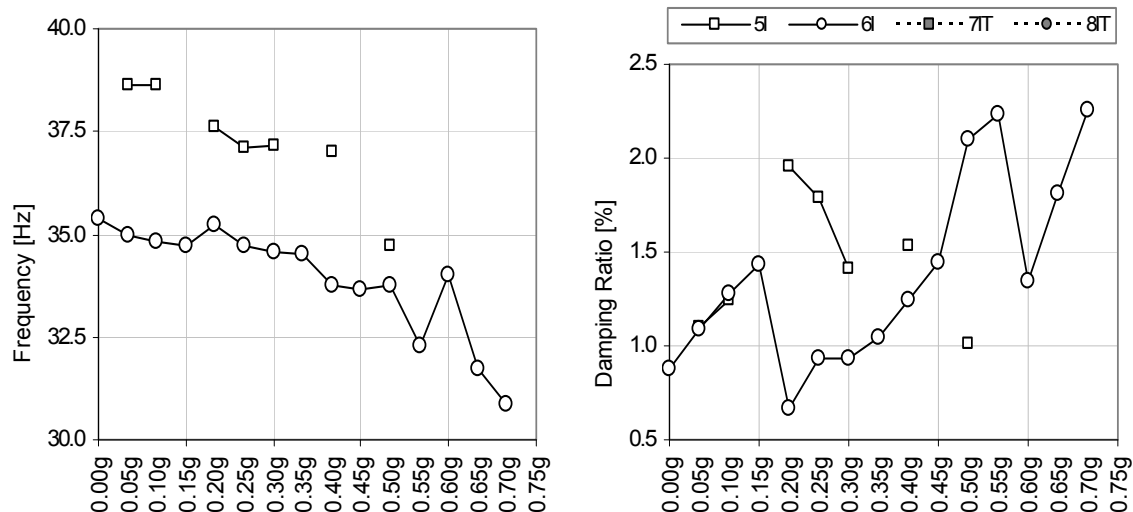


Fig 4.50: Pannelli iniettati. Andamento dei parametri modali nella terza frequenza identificata.

Quinta frequenza identificata

L'ultima frequenza individuata ("Mode 5") è presente in tutti e quattro i pannelli iniettati, manifestandosi però a frequenze diverse. Tale discrepanza è visibile anche nelle forme modali (Fig 4.51) le quali non sono esattamente le stesse, ma sono le più simili che si è potuto identificare. I valori sono rappresentati in Tab 4.27 e in Fig 4.52. I campioni solo iniettati coprono un intervallo di frequenze compreso tra 34 Hz e 42 Hz circa, mentre quelli iniettati e tirantati tra 37 Hz e 50 Hz circa.

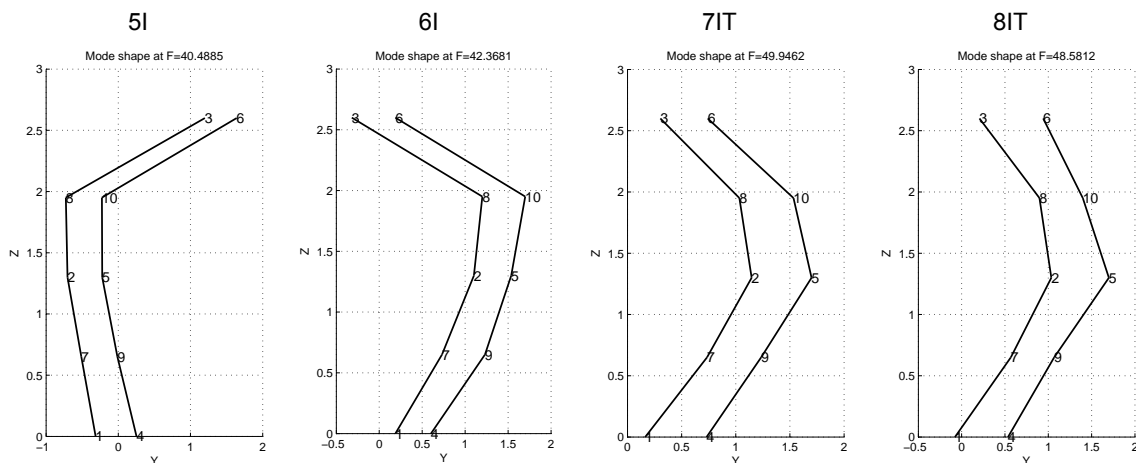


Fig 4.51: Pannelli iniettati. Andamento delle forme modali rilevate nella quinta frequenza identificata.

Tab 4.27: Pannelli iniettati. Valori dei parametri modali nella quinta frequenza identificata.

Step [g]	5° Frequency [Hz]				Damping Ratio [%]			
	5I	6I	7IT	8IT	5I	6I	7IT	8IT
0.00g	40.25	42.37	49.95	48.58	1.35	1.64	0.69	0.73
0.05g	40.49	42.05	50.66	48.30	1.14	1.38	1.67	0.48
0.10g	40.14	41.35	-	48.47	1.09	1.61	-	0.30
0.15g	39.49	40.51	-	47.90	0.89	2.40	-	0.76
0.20g	39.24	39.11	49.50	46.79	1.04	1.39	2.16	1.54
0.25g	39.69	39.35	47.67	45.32	1.41	1.03	1.40	1.36
0.30g	38.39	39.17	48.68	45.31	1.02	1.24	2.54	1.32
0.35g	38.82	36.63	48.62	-	1.27	1.68	2.73	-
0.40g	37.62	34.96	46.59	42.87	1.37	1.56	0.95	1.10
0.45g	36.65	35.03	46.79	41.82	1.53	1.20	0.10	1.23
0.50g	37.84	34.63	46.68	40.64	1.23	1.30	0.56	1.46
0.55g	-	34.22	46.52	40.13	-	3.31	0.74	1.29
0.60g		35.98	46.46	40.10		0.99	1.12	1.31
0.65g		-	46.28	38.22		-	0.52	1.20
0.70g		-	46.09	38.13		-	0.77	1.02
0.75g		-	45.86	37.29		-	1.28	1.32
Δf tot	2.41	6.38	4.09	11.29				
<F0.20g>	39.18							
Δf 0.20g			10.32	7.61				

Viene inoltre introdotto un valore di paragone $\Delta f_{0.20g}$, con il quale si deduce l'incremento di frequenza osservabile nei pannelli rinforzati con i tiranti rispetto a quelli solo consolidati. Si tratta quindi di un termine relativo e puntuale in quanto è calcolato come differenza di misure e ad un solo passo di prova (0.20g). In tal modo si riscontra un aumento molto elevato, di 10.3 Hz in 7IT e di 7.6 Hz in 8IT.

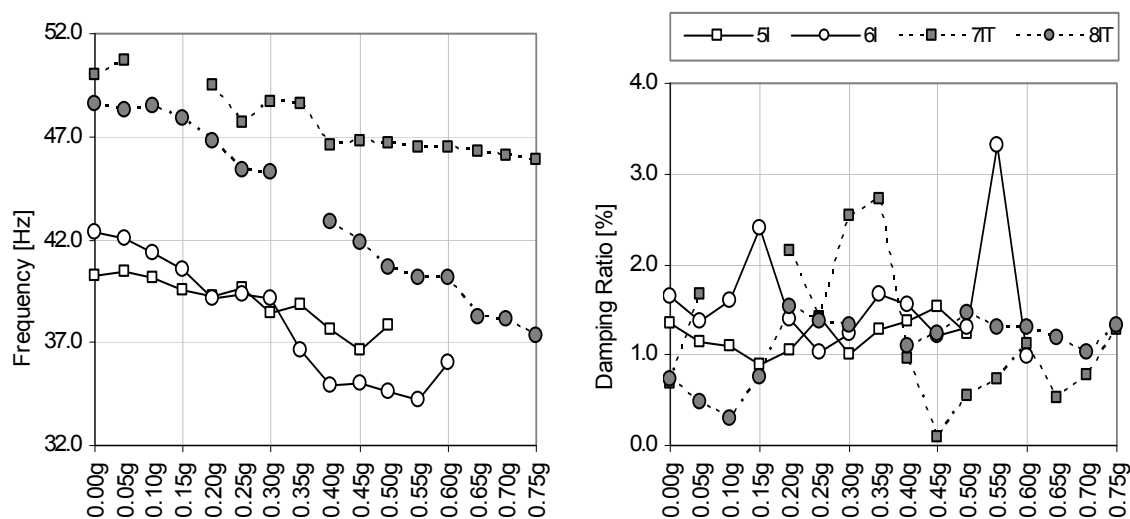


Fig 4.52: Pannelli iniettati. Andamento dei parametri modali nella quinta frequenza identificata.

In Fig 4.51 si possono confrontare le forme modali individuate, l'andamento è molto simile con spostamenti diversi sui nodi della parte superiore. In 7IT e 8IT è chiaramente visibile il tipico modo di vibrare dell'asta a doppia cerniera. Questo comportamento risulta invece alterato sulla sommità di 5I e 6I, forse a causa delle lesioni evidenti sin dai primi passi di prova (Fig 4.53).



Fig 4.53: Fessurazioni sulla sommità dei pannelli 5I (a sinistra) e 6I (a destra) presenti sin dai passi di prova a PGA inferiori.

4.5.3. Osservazioni

Si conclude questa sezione di confronti con qualche considerazione globale, alla luce di tutti i commenti suddetti. Come già specificato, durante l'identificazione dinamica, non è stato possibile individuare forme modali comuni a tutti i casi di studio analizzati. Tuttavia, pur mantenendo distinte le risposte dei campioni non iniettati da quelli consolidati, si possono rilevare alcune somiglianze nei modi di vibrare e nei corrispondenti intervalli di frequenza.

Tali analogie si riscontrano in particolar modo nella seconda e terza frequenza, le quali coinvolgono rispettivamente range compresi tra 15-22 Hz e 25-38 Hz. In ambo i casi, i modelli iniettati raggiungono valori più elevati in quanto presentano un comportamento monolitico che ne riduce la propagazione di fessurazioni, incrementando la capacità di reazione a PGA elevate.

Osservando la risposta delle diverse tipologie analizzate, nei casi non rinforzati si nota un decremento in termini di frequenza, all'aumentare dell'accelerazione al suolo, sempre molto limitato (al più intorno i 2 Hz), legato ad un quadro fessurativo consistente sin dall'inizio. Per lo stesso motivo i rapporti di smorzamento raggiungono un massimo già a 0.15g, in seguito al quale si ha una riduzione della capacità intrinseca della struttura di dissipare le forze dinamiche.

Negli elementi murari rinforzati con le barre di acciaio, tale decremento di frequenza è maggiore e in genere compreso tra 3-4 Hz. In corrispondenza, l'andamento dei rapporti di smorzamento manifesta la massima capacità di dissipazione a PGA elevate, in prossimità dell'effettivo collasso. Nelle forme modali si osserva inoltre un comportamento maggiormente monolitico nella parte inferiore, soggetta a permeazioni di miscela legante.

Nei casi consolidati, sia con che senza l'applicazione combinata di tiranti, il decremento è ridotto ad un intorno di 2 Hz per le prime due frequenze individuate, e molto elevato per le successive. In entrambi i casi si presenta uno sviluppo graduale, con una elevata capacità di dissipazione delle azioni sismiche visibile dall'andamento dei rapporti di smorzamento. Relativamente a quest'ultimo aspetto, si osserva la formazione di un meccanismo di rottura e quindi di dissipazione delle forze dinamiche che induce al collasso di 5I e 6I, rispettivamente a circa 0.40g e 0.55g. Diversamente, in 7IT e 8IT l'andamento è più stabile, senza l'individuazione di precisi valori massimi.

Conclusioni

La presente Tesi si colloca nel campo del recupero e della conservazione di quel patrimonio edilizio che largamente è diffuso nei centri storici minori italiani ed europei. Indagini diagnostiche in loco hanno più volte rivelato situazioni di degrado fisico-meccanico dei materiali e strutturale dei manufatti, dovuto a eventi sismici, ad aggressioni ambientali e ad azioni antropiche. Per questo motivo negli ultimi anni si è fatta sempre più pressante la necessità d'interventi di tutela mirata che ne permettono la fruibilità e la sicurezza, nonché la salvaguardia. Enti ed Organizzazioni nazionali e sovranazionali a livello europeo ed extra-europeo hanno avviato e finanziato numerosi progetti di ricerca al fine di approfondire la conoscenza della valutazione e riduzione della vulnerabilità e del rischio sismico, sulla base degli effetti causati dai recenti terremoti, migliorando così le attuali linee guida e normative.

In quest'ambito, l'Università di Padova è coinvolta in diverse campagne per indagare l'efficacia di tecniche e materiali diffusamente impiegati per la consolidazione e il rafforzamento di strutture esistenti. In particolare, la sperimentazione qui presentata è parte conclusiva di un progetto di ricerca e collaborazione tra l'Università di Padova e Tassullo SpA nel contesto del Consorzio Nazionale ReLUIS, del progetto europeo NIKER e del progetto di accordo bilaterale fra Italia e Giappone finanziato dal Ministero italiano degli Affari Esteri (MAE).

La tipologia costruttiva indagata in questa Tesi è la muratura multistrato in pietra, con paramenti esterni portanti e nucleo pressoché incoerente. Lo strato di riempimento è caratterizzato da un'alta percentuale di vuoti tra la malta e gli inerti di varia natura e dimensione che lo compongono [Giuffrè et al, 1993; Binda et al, 1999]. Ne consegue un'elevata vulnerabilità dovuta a:

- forte disomogeneità e irregolarità presente sia nello spessore murario sia nel piano principale della muratura;
- scarsa resistenza meccanica, a causa della ridotta resistenza della malta e all'elevata presenza di vuoti;
- frequente mancanza di connessione trasversale tra gli opposti paramenti esterni, i quali tendono a sviluppare soprattutto meccanismi di collasso fuori-piano, per instabilità o per espulsione localizzata dei paramenti esterni,) rispetto alla rottura per compressione del materiale.

Queste osservazioni, insieme ad una conoscenza approfondita delle caratteristiche proprie del supporto e del materiale di apporto, sono basilari per la scelta dell'intervento "più appropriato" [Valluzzi, 2004]. Ne consegue l'importanza di individuare la giusta combinazione tecnica-materiali al fine di migliorare le condizioni e la resistenza del manufatto e di assicurarne sufficiente durabilità. Con tali attenzioni, in questa sperimentazione si sono quindi adottati tirantini antiespulsivi trasversali e iniezioni di malta a base di calce idraulica naturale per il rafforzamento della connessione tra i gli strati portanti esterni e il consolidamento del nucleo. I campioni, le cui caratteristiche sono state trattate nel capitolo § 2, erano così distinti:

- n°2 non rinforzati (URM) – 1-URM e 2-URM
- n°2 rinforzati con tirantini trasversali (SM-T) – 3T e 4T
- n°2 consolidati con iniezione di malta a base di calce idraulica naturale (SM-I) – 5I e 6I
- n°2 rinforzati con l'uso combinato di tirantini e iniezione di malta (SM-IT) – 7IT e 8IT

Nello studio si è voluta simulare l'azione del sisma agente su di una porzione di muratura portante (maschio murario) situata all'ultimo piano di un edificio storico. Si tratta della situazione più gravosa in termini di stabilità – e quindi più interessante da studiare – a causa dell'incremento delle accelerazioni sismiche in relazione alla quota, in elevazione, dell'elemento d'interesse. Al fine di riprodurre il comportamento reale di questa parte di edificio è stato progettato un apposito telaio in acciaio in grado di idealizzare uno schema a doppia cerniera, alla base ed in sommità del pannello murario. Le sollecitazioni agenti sui campioni sono quindi la bassa compressione verticale, dovuta esclusivamente al peso proprio degli orizzontamenti, combinata ad elevati carichi sismici orizzontali.

La sperimentazione viene svolta nel Laboratorio di Dinamica Strutturale e Controllo delle Vibrazioni del Centro Ricerche ENEA ("La Casaccia", Roma). Attraverso l'uso della tavola vibrante i modelli vengono sottoposti a carico sismico fuori-piano a PGA crescente. L'input di riferimento è quello registrato in Montenegro (15/04/1979).

Utilizzando le rilevazioni sismiche è stato possibile indagare l'effettivo valore di accelerazione alla base e la forza agente, nonché i fattori di amplificazione delle accelerazioni, l'apertura tra i paramenti, l'abbassamento del pannello e la deformazione dei tirantini, qualora fossero applicati. Servendosi invece delle misure ambientali è stata effettuata l'identificazione dinamica con MACEC 3.2, ottenendo le forme modali, le frequenze proprie e i rapporti di smorzamento. Quest'ultima parte ha permesso di indagare effettivamente il comportamento dinamico, visualizzando i diversi modi di vibrare che si possono formare sulla tipologia in esame.

Pannelli non rinforzati

La sperimentazione sui campioni non rinforzati ha permesso di capire il comportamento della muratura portante a tre paramenti in pietra allo stato originario. I risultati ottenuti evidenziano come gli elementi riproducano la condizione reale, anche se il collasso è stato raggiunto a PGA maggiori rispetto ai casi osservati in seguito ai principali eventi sismici recenti (Irpinia, 1980; Lunigiana e Garfagnana, 1995; Umbria e Marche, 1997; Abruzzo, 2009). Tale situazione è legata alle difficoltà di ricreare esattamente la situazione reale in sede di laboratorio, e quindi tutti quegli apporti all'azione sismica legati al degrado fisico-meccanico dei materiali e alle specifiche condizioni al contorno (orizzontamenti, aggetti, carenze costruttive,...).

Il collasso su tavola vibrante è avvenuto a 0.35g per 1-URM e 0.25g per 2-URM, anche se il valore effettivo di accelerazione al suolo è da considerarsi inferiore del 30%, vale a dirsi circa 0.25g e 0.18g rispettivamente. In entrambi i casi si è verificato un meccanismo di rottura fuori-piano a causa dell'espulsione di uno dei due paramenti. Va inoltre osservato come il collasso abbia coinvolto i 2/3 superiori del pannello.

L'espulsione dei paramenti è stata preceduta da un danno diffuso sulla superficie di entrambi i paramenti e da una separazione degli stessi, calcolata in mezzeria, di circa 7.8 mm in 1-URM e 3.2 mm in 2-URM. L'abbassamento non è stato misurato sul primo pannello, mentre sul secondo si è verificato durante il collasso con valori di circa 2.7 mm.

Dall'identificazione modale si è potuto constatare che effettivamente il comportamento dinamico dei due modelli è affine. Si sono infatti individuate frequenze analoghe corrispondenti a forme modali associabili e rapporti di smorzamento limitati. Il decremento di frequenza (di circa 2 Hz) all'incrementare dell'accelerazione al suolo, nel muro 1-URM, è una chiara conseguenza della diffusione del danno visibile nel quadro fessurativo. Per lo stesso motivo i rapporti di smorzamento raggiungono un massimo già a 0.15g, in seguito al quale si ha una riduzione della capacità intrinseca della struttura di dissipare le forze dinamiche.

In seguito a queste analisi, i pannelli non rinforzati sono considerati come riferimento per determinare l'efficacia e l'influenza delle tecniche di rinforzo adottate negli altri casi di studio.

Pannelli rinforzati con tiranti

Sei barre in acciaio filettato ad aderenza migliorata sono state applicate con pre-tensionamento, a coppie, a 1/4, 1/2 e 3/4 dell'altezza del pannello, allo scopo di migliorare il collegamento fra i paramenti esterni opposti. L'effettiva situazione di progetto è stata alterata a causa della permeazione di miscela legante nella metà inferiore di entrambi i campioni.

Il contributo dei tirantini è evidente già dalla sollecitazione massima che è stato possibile raggiungere nonché dal meccanismo di rottura. Il PGA nominale raggiunto è 0.60g e 0.45g, corrispondente ad un valore effettivo di circa 0.42g e 0.34g. Lo sviluppo del danno, ed in seguito il collasso, ha interessato in entrambi i casi la porzione in sommità, al di sopra dei tiranti posti in posizione più elevata. Risulta perciò determinante studiare con precisione la configurazione di posa delle barre, con particolare attenzione per l'area soggetta a maggior amplificazione dell'accelerazione al suolo. Durante le prove che hanno preceduto la rottura,

sono stati infatti calcolati fattori di amplificazione delle accelerazioni nella parte sommitale, che sono risultati essere pari a 3 volte (in 4T) quelli di sollecitazione alla base.

La buona esecuzione dell'intervento e l'efficacia dello stesso è confermata dai valori estremamente contenuti di separazione relativa tra i paramenti esterni rilevati nella mezzeria. In tal senso si osservano dilatazioni, nello spessore dei pannelli, in 3T dell'ordine di 10^{-2} mm mentre in 4T di 0.12 mm al momento del collasso. Durante la sperimentazione si verifica invece l'abbassamento graduale del muro, dovuto ad un progressivo aumento del danno, fino ad un massimo di circa 1.9 mm e 1.3 mm rispettivamente. La deformazione delle barre, misurata a livello puntuale, è associata ad un incremento di tensione in 3T e ad un rilassamento in 4T dovuto probabilmente ad un assestamento sulla superficie esterna. In particolare, nel primo caso si raggiungono circa 88.5 μ Strain a 0.55g, corrispondenti ad una tensione di circa 18.6 MPa

Le prime tre frequenze identificate si riscontrano in entrambi i pannelli con forme modali simili e rapporti di smorzamento non elevati. Nel comportamento dinamico risulta evidente l'andamento monolitico della parte inferiore caratterizzata da permeazione di miscela legante. Il decremento di frequenza risulta essere effettivamente correlato allo sviluppo del danno: in 3T si concentra nelle ultime prove, mentre in 4T è presente sin dall'inizio. Tale valore si presenta superiore ai casi non rinforzati, con valori in genere compresi tra 3 Hz e 4 Hz.

Le osservazioni suddette, paragonate ai risultati dei campioni non rinforzati, implicano:

- a vantaggio, un effettivo miglioramento delle connessioni tra gli strati che comporta un incremento della resistenza globale all'azione sismica. In media, prima del collasso, viene raggiunto circa il doppio (incremento del 73%) della reale accelerazione alla base calcolata nei casi non rinforzati:

$$URM=0.22g < SM-T=0.38g$$

- a svantaggio, la necessità di una precisa progettazione della collocazione delle barre che eviti la concentrazione del danno nelle zone più deboli. In tal senso ci si può servire di uno studio analitico di previsione del comportamento dinamico dell'elemento in esame.

In generale, questo tipo di intervento è efficace per contrastare fenomeni di danneggiamento fuori dal piano, a condizione che la pre-tensione delle barre non sia né troppo elevata (effetti di punzonamento) né troppo bassa (tirante non efficace). I vantaggi principali sono legati al fatto che è un intervento reversibile, economico e poco invasivo.

Pannelli rinforzati con iniezione

L'iniezione di miscela a base di calce idraulica naturale non ha interessato completamente i pannelli in esame, lasciando delle porzioni non omogenee in sommità per una porzione pari a circa 1/5 dell'altezza complessiva dell'elemento murario.

L'intervento consente di raggiungere PGA elevate prima del collasso: 0.55g in 5I e 0.75g in 6I, corrispondenti a valori reali di circa 0.42g e 0.53g. In ambo i casi, il meccanismo di rottura interessa solamente la porzione non iniettata, che risulta inevitabilmente la porzione più vulnerabile e caratterizzata da una resistenza minore. Nel muro 5I il danno si sviluppa in modo progressivo nella zona sommitale di entrambi i paramenti. L'analisi di amplificazione delle

accelerazioni evidenzia inoltre valori sino a cinque volte superiori a quelli dell'input di prova. Per il pannello 6I interessa in modo particolare il fronte e le sezioni a PGA elevate, con fattori di amplificazione inferiori a due.

Un diverso comportamento si presenta anche osservando la risposta dei sensori di spostamento. La massima apertura nella sezione trasversale è di circa 0.25 mm ed avviene a 0.15g (4.2 kN) nel muro 5I e a 0.35g (11.8 kN) in 6I. Al momento del collasso si osservano invece valori di compressione pari a 0.15 mm e 0.35 mm, rispettivamente. Il picco di abbassamento si verifica durante gli ultimi passi di prova (0.35g e 0.65g), raggiungendo in 5I spostamenti pari a circa il doppio di 6I (0.4 mm e 0.25mm). Inoltre, nel primo pannello si conclude la prova con un innalzamento notevole di 1.37 mm a 0.50g.

L'analisi modale rispecchia il comportamento suddetto, con decremento graduale delle frequenze nel primo pannello e concentrato ai passi di prova con PGA superiore nel secondo. Le forme modali sono tra loro più coerenti a frequenze elevate ("Mode 3" e "Mode 5"), nelle quali si evidenzia il comportamento monolitico della parte ben iniettata in contrasto con la sommità non omogenea, nonché un elevato decremento delle frequenze sino a due volte superiore rispetto a "Mode 1" e "Mode 2", ma anche in relazione ai casi non rinforzati.

Sulla base dei confronti dei risultati ottenuti dalle analisi dei pannelli mediante l'iniezione di miscela legante e quelli in condizione non rinforzata, si può dedurre che:

- a vantaggio, il consolidamento del nucleo determina una buona connessione tra gli strati e un comportamento monolitico fino a sollecitazioni elevate. Questi elementi testimoniano un miglioramento delle caratteristiche meccaniche globali dell'elemento e quindi della sua risposta all'azione sismica. Inoltre risulta possibile sostenere PGA elevate con un incremento rispetto al caso d'origine del 118%:

$$URM=0.22g < SM-I=0.48g$$

- a svantaggio, un intervento mal-eseguito che comporti la presenza di porzioni non iniettate, determina la creazione di zone deboli, caratterizzate da una bassa resistenza rispetto alle aree consolidate. Questo causa un'elevata concentrazione del danno e quindi un collasso anticipato rispetto al caso di un intervento eseguito correttamente. La verifica della qualità può essere fatta in situ mediante prove non distruttive di diverso tipo, fra le quali quelle soniche sono quelle che hanno fornito informazioni più dettagliate.

In generale, va posta particolare attenzione alla scelta dei materiali impiegati, alla progettazione della maglia dei fori per l'iniezione e alla pressione d'immissione della miscela. L'intervento è risultato maggiormente invasivo rispetto al caso dei inserimento dei tiranti in acciaio. Risulta maggiormente adatto nei casi in cui siano presenti lesioni diffuse e murature in pietra con elevate percentuali di vuoti interni.

Pannelli rinforzati con tiranti e iniezione

La combinazione delle tecniche di rinforzo impiegate prevede l'iniezione del nucleo del pannello e l'applicazione di sei barre d'acciaio filettato ad aderenza migliorata poste, a coppie, a 1/4, 1/2 e 3/4 dell'altezza del pannello. In questo modo si è potuto migliorare notevolmente le caratteristiche meccaniche della struttura, evitando il collasso.

In entrambi i modelli si raggiunge lo 0.75g, corrispondente ad un valore reale calcolato di 0.85g in 7IT e 0.57g in 8IT. Viene mantenuta l'integrità globale della muratura con fessurazioni localizzate che insorgono solamente nella zona sommitale, dove l'accelerazione viene amplificata sino a due volte e mezza.

Lo sviluppo del danno avviene in 7IT ad accelerazioni al suolo comprese tra 0.35g e 0.55g, mentre nel secondo si presentano gradualmente durante l'intero sviluppo della prova.

La qualità e l'efficacia dell'intervento è visibile anche osservando la separazione relativa fra gli strati esterni della muratura. In 7IT l'andamento è crescente fino a 0.6 mm a 0.70g (32.3 kN) per concludere con un salto costante, medio, a 1.4 mm. In 8IT invece il picco di 0.27 mm è concentrato a 0.30g (11.2 kN). L'abbassamento è molto limitato e poco significativo in ambo i pannelli, così come la deformazione e la tensione delle barre d'acciaio (21 μ Strain e 4.4 MPa). I parametri relativi ai tirantini, si manifestano in 8IT con valori quattro volte inferiori a quelli di 3T. Ne consegue che durante quest'ultima sperimentazione, l'azione del sisma viene sostenuta quasi completamente dall'intervento d'iniezione, che vincola reciprocamente i paramenti esterni, limitando la funzione dei tiranti. In 7IT invece si osserva un rilassamento della barra legato agli assestamenti in superficie.

Le forme modali individuate dimostrano come il comportamento della struttura risulti essere monolitico, coinvolgendo così entrambi i paramenti nella stessa forma modale. Il miglioramento dei legami interni della muratura, a seguito del consolidamento, limita notevolmente le oscillazioni possibili e quindi il numero di modi di vibrare rilevabili. Il decremento delle frequenze all'incrementare dell'accelerazione al suolo assume valori molto elevati (3.7 Hz e 11.3 Hz rispettivamente) in "Mode 5". L'andamento dei rapporti di smorzamento non evidenzia eccessivi picchi, dimostrando così una notevole capacità intrinseca della struttura di dissipare le forze dinamiche

Paragonando la risposta con quelle ottenute dagli altri campioni sottoposti a prova si desumono vantaggi e svantaggi già visti nei singoli casi di applicazione dei tiranti e di miscela iniettante. Viene confermata e dimostrata l'importanza della qualità dell'intervento d'iniezione, la quale è in grado di assolvere elevate accelerazioni al suolo senza l'aggiunta di ulteriori tecniche di rinforzo. Si è notato infatti come le barre metalliche si siano attivate solo in minima parte rispetto alla tipologia rinforzata con i soli tiranti. In particolare, nel caso di 7IT, sono state raggiunte PGA reali superiori di:

- 3.8 volte quella dei pannelli non rinforzato;
- 2.2 volte quella dei campioni tirantati;
- 1.8 volte quella dei modelli iniettati.

Ulteriori sviluppi futuri

La campagna sperimentale effettuata offre ulteriori spunti e dati per sviluppare ulteriormente la ricerca presentata in questa Tesi.

- Elaborazione delle registrazioni relative agli spostamenti globali di ciascun pannello murario. Sarebbe quindi possibile valutare l'effettivo spostamento assoluto, avvenuto durante l'input sismico, dei punti in cui sono installati i sensori, diversamente da quello di tipo relativo (tra i due elementi in cui erano applicati gli estensimetri) esaminato nel capitolo § 3. Tali valori venivano rilevati da apparecchiature fisse posizionate all'esterno del banco di prova.
- Implementazione delle misure effettuate previo accelerometri durante le prove sinusoidali (sweep tests), ossia la caratterizzazione dinamica tramite impulso basato su una forzante sinusoidale. Si tratta di un ulteriore studio d'identificazione dinamica che può venire eseguito attraverso l'uso di un software adeguato, diverso da MACEC 3.2.
- Valutazione dell'influenza delle iniezioni sulla frequenza, individuata nel capitolo § 4. A livello fisico, la frequenza propria è direttamente proporzionale alla rigidità meccanica del sistema (costante elastica) e inversamente proporzionale alla massa sottoposta al movimento, secondo la legge:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k'_t}{m'_t}}$$

Si tratta quindi di indagare la relazione tra l'incremento di massa dovuto alla miscela iniettante e l'andamento delle frequenze proprie identificate.

Allegato A. Forme Modali

Questo allegato propone la descrizione analitica di tutte le forme modali esaminate nel capitolo § 4 riguardante la fase di identificazione dinamica.

Ad ogni passo di prova effettuato su tavola vibrante in laboratorio ENEA, e in corrispondenza di ciascuna frequenza propria individuata, si indica la posizione effettiva dei sensori accelerometrici scalata allo spostamento modale unitario. Si ottiene così una descrizione analitica di ciascun modo proprio identificato.

Wall 1-URM – Pannello non rinforzato

Step [g]		Wall 1 - Mode Shapes for each Frequency									
		1		3		4		5		6	
0.00g	B	17.42		26.68		31.16		38.38		40.17	
		-0.1122	0.0208	0.1813	-0.0590	0.2874	-0.0657	0.1857	-0.0693	-0.0004	-0.0487
		-0.7880	0.1375	-0.6993	0.1906	0.2639	-0.1239	0.6941	-0.2544	0.3530	-0.2010
		-0.6278	0.1176	0.5368	-0.1344	0.2644	-0.0099	-0.4014	0.1477	-0.0308	0.0771
		0.1024	-0.0199	-0.1504	0.0449	-0.2346	0.0551	-0.1770	0.0661	-0.0042	0.0340
		1	0	1	0	-0.1014	0.0522	-0.4960	-0.0176	-0.2889	0.0035
		0.3432	-0.0073	-0.9729	-0.0136	-0.4028	-0.0901	0.1989	0.0043	-0.0151	-0.0334
		-0.8864	-0.0028	-0.7396	0.0113	-0.9860	-0.1043	1.0000	0.0000	-0.7490	-0.1525
		-0.7176	-0.0024	-0.6828	-0.0169	1	0	1	0	1	0
0.05g	A	17.67		27.08		31.65		39.70		41.06	
		-0.1073	0.0487	0.1521	-0.0992	-0.2272	0.1857	0.2002	-0.2101	-0.0111	-0.0270
		-0.8100	0.3126	-0.6880	0.4545	-0.0507	0.0528	0.5199	-0.6177	0.2127	-0.4918
		-0.5893	0.2386	0.4710	-0.2737	-0.2710	0.2383	-0.3481	0.4010	0.0052	0.2641
		0.0994	-0.0426	-0.1303	0.0900	0.2074	-0.1524	-0.1664	0.1802	-0.0257	0.0170
		1	0	1	0	-0.0318	-0.0054	-0.5846	0.0120	-0.4192	0.0767
		0.3725	-0.0125	-0.8735	-0.0249	0.5312	-0.0232	0.2521	-0.0017	0.0912	-0.1211
		-0.8835	-0.0005	-0.6078	0.0172	1	0	1	0	-0.3286	-0.4902
		-0.7649	0.0003	-0.8503	-0.0222	-0.7927	0.0154	0.7594	-0.0210	1	0
0.10g	A	17.32		26.81		31.48		39.34		40.51	
		-0.1168	0.0462	0.1725	-0.0973	-0.2342	0.1629	0.1744	-0.1664	0.0420	-0.0798
		-0.8167	0.2997	-0.6893	0.4114	-0.0587	0.0454	0.5470	-0.4751	0.3287	-0.3668
		-0.6040	0.2408	0.4475	-0.2437	-0.2430	0.1976	-0.3295	0.3039	-0.1154	0.1479
		0.1036	-0.0398	-0.1367	0.0817	0.2021	-0.1340	-0.1544	0.1464	-0.0370	0.0646
		1	0	1	0	-0.0186	0.0040	-0.5323	-0.0327	-0.4074	-0.0030
		0.3870	-0.0201	-0.8518	-0.0094	0.4780	-0.0195	0.2072	0.0022	0.0264	-0.0045
		-0.8819	0.0006	-0.5839	0.0209	1	0	1	0	-0.2824	-0.1036
		-0.7721	0.0064	-0.8298	-0.0301	-0.8023	0.0071	0.6056	0.0726	1	0
0.15g	A	15.85		25.95		30.73		35.42		36.63	
		-0.0935	0.0325	-0.2344	0.1548	0.1856	-0.1283	0.1106	-0.1025	0.0374	-0.0539
		-0.8197	0.2833	0.5672	-0.2991	0.2408	-0.2452	0.5893	-0.5880	-0.1023	0.1355
		-0.5971	0.2066	-0.5077	0.3190	0.1386	-0.0504	-0.3024	0.2873	-0.0593	0.0497
		0.0809	-0.0285	0.1977	-0.1316	-0.1583	0.1108	-0.0977	0.0889	-0.0375	0.0493
		1	0	-0.8399	-0.0421	-0.2461	0.0394	-0.7070	-0.0104	0.1392	-0.0224
		0.3194	0.0099	1	0	-0.2746	-0.0587	0.1699	0.0107	0.0607	0.0059
		-0.8763	-0.0061	0.4276	0.0262	-0.6879	-0.0948	0.5750	0.0187	1	0
		-0.7610	-0.0060	0.6684	0.0565	1	0	1	0	-0.8129	0.0379
0.20g	A	15.37		25.57		30.69		36.47		34.84	
		-0.0949	0.0001	-0.2237	0.0638	-0.1036	0.0253	0.2576	-0.0564	0.0869	-0.0645
		-0.9316	-0.0030	0.5669	-0.1301	-0.1198	0.0274	0.9250	-0.2514	-0.0083	-0.1189
		-0.6394	0.0276	-0.6259	0.1622	-0.2428	0.0834	-0.5579	0.1523	-0.1165	0.1435
		0.0859	0.0080	0.2047	-0.0002	0.0889	0.0064	-0.2018	-0.0332	-0.0907	0.0255
		1	0	-0.6739	0.1637	0.1197	-0.0230	-0.8304	0.2697	0.0632	0.1223
		0.3075	0.0172	1	0	0.2540	-0.0083	0.1782	-0.0350	-0.0044	-0.0842
		-0.9651	-0.1554	0.3992	-0.0080	1	0	0.9458	0.1966	1	0
		-0.8027	-0.1123	0.6043	0.0240	-0.8085	-0.0172	1	0	-0.5110	-0.1955
Modes		1		3		4		5		6	

Step [g]		Wall 1 - Mode Shapes for each Frequency									
		1		3		4		5		6	
0.20g	II A	13.09		24.78		27.60					
		-0.0524	0.0119	-0.2170	0.1740	-0.0354	0.0297				
		-0.8170	0.2865	0.3426	-0.1900	-0.1601	0.1560				
		-0.5038	0.1723	-0.5526	0.4399	-0.1300	0.1363				
		0.0486	-0.0130	0.1838	-0.1491	0.0297	-0.0250				
		1	0	-0.5438	-0.0505	0.2593	-0.0007				
		0.1835	0.0132	1	0	0.0453	-0.0131				
		-0.9002	-0.0104	0.1203	0.0459	1	0				
		-0.7344	-0.0062	0.4849	0.0651	-0.9615	0.0077				
0.25g	B	15.50		24.98		30.82		36.98		35.86	
		0.0851	-0.0022	-0.2435	-0.0154	-0.1330	0.0138	0.1768	0.0747	0.0664	-0.0043
		0.9206	-0.0172	0.6605	0.0015	-0.1229	0.0186	0.4499	0.4967	0.0690	-0.0099
		0.5510	0.0236	-0.6548	0.0430	-0.2356	-0.0034	-0.4125	-0.2224	-0.1872	0.0214
		-0.0664	0.0013	0.2112	0.0103	0.1083	-0.0057	-0.1415	-0.0657	-0.0637	0.0112
		-0.9907	0.0313	-0.7482	-0.0325	0.1765	-0.0208	-0.3367	-0.5523	0.0051	-0.0064
		-0.2276	-0.0358	1	0	0.2356	0.0222	0.1171	0.1008	0.0469	-0.0028
		1	0	0.6460	0.0369	1	0	1	0	1	0
		0.7683	0.0129	0.6002	0.0203	-0.8637	0.0178	0.1380	0.9227	-0.4594	-0.0014
0.30g	A	15.16		24.98		30.61		36.51		37.19	
		0.0768	-0.0122	-0.2323	0.0423	-0.1365	0.0592	0.1315	-0.0838	-0.0101	0.0182
		0.9116	-0.1646	0.5964	-0.1462	-0.1692	0.0594	0.5085	-0.5722	0.3792	-0.1742
		0.5034	-0.0851	-0.6999	0.2026	-0.2006	0.0931	-0.2784	0.3041	-0.0441	0.0284
		-0.0724	0.0124	0.1997	-0.0372	0.1170	-0.0465	-0.1042	0.0683	-0.0109	-0.0174
		-0.9781	0.0145	-0.6595	-0.0208	0.2215	0.0075	-0.5724	0.2905	-0.4581	-0.0294
		-0.2438	-0.0067	1	0	0.2241	-0.0161	0.0825	-0.0902	-0.0007	0.0050
		1	0	0.5638	0.0123	1	0	1	0	-0.5611	0.0661
		0.7810	-0.0046	0.5474	0.0167	-0.8919	-0.0080	0.6172	-0.4929	1	0
Modes		1		3		4		5		6	

Wall 2-URM – Pannello non rinforzato

Step [g]		Wall 2 - Mode Shapes for each Frequency											
		1	2	3	4	6	5						
0.00g	A	15.95	16.67	26.54	31.53	39.45	40.50						
		0.0904	-0.0135	-0.0833	0.0059	0.1989	-0.0063	0.3345	-0.0621	-0.0197	0.0372	-0.4148	0.0962
		0.8081	-0.1071	-0.7871	0.0764	-0.4770	-0.0191	0.1007	-0.0622	0.0626	0.0444	-0.8327	0.1429
		0.4692	-0.0602	-0.4497	0.0363	1	0	0.0638	0.0689	-0.1735	0.0165	0.6503	-0.1143
		-0.0913	0.0134	0.0895	-0.0084	-0.1627	0.0064	-0.3113	0.0595	0.0022	-0.0288	0.3937	-0.0851
		-0.9749	0.0032	1	0	0.6656	0.1127	0.0504	0.0530	0.0086	-0.0890	1	0
		-0.4362	-0.0016	0.3663	0.0141	-0.8853	-0.1266	-0.2256	-0.0828	0.0055	0.0489	-0.5928	0.0061
		1	0	-0.9805	-0.0087	-0.6046	-0.0993	-0.9726	-0.0947	-0.9347	0.1131	-0.8426	-0.0070
		0.8478	-0.0045	-0.8335	-0.0029	-0.5401	-0.1009	1	0	1	0	-0.6731	0.0162
0.05g	A	16.00	16.60	26.15	31.47	39.75							
		0.0899	-0.0266	-0.0852	0.0253	0.2120	-0.0027	0.3441	-0.1353	0.0722	-0.0520		
		0.7821	-0.2425	-0.7632	0.2311	-0.4884	-0.0216	0.0777	-0.1008	0.0663	-0.0268		
		0.4636	-0.1456	-0.4467	0.1366	1	0	0.0811	0.0887	0.0453	-0.0702		
		-0.0901	0.0268	0.0897	-0.0286	-0.1736	0.0039	-0.3199	0.1253	-0.0567	0.0384		
		-0.9736	0.0042	1	0	0.5970	0.3692	0.0530	0.0821	-0.1197	-0.0285		
		-0.4469	-0.0019	0.3762	0.0088	-0.7788	-0.4490	-0.1997	-0.1245	0.0379	0.0132		
		1	0	-0.9733	-0.0090	-0.5365	-0.3289	-0.9683	-0.1401	1	0		
		0.8518	-0.0052	-0.8385	-0.0030	-0.4837	-0.3095	1	0	-0.9144	0.0483		
0.10g	A	15.40	16.42	25.78	31.36	37.80	39.83						
		0.0945	-0.0279	-0.0750	0.0213	0.2166	0.0097	-0.2702	0.1571	0.0300	-0.0287	-0.2701	0.2234
		0.7939	-0.2304	-0.7755	0.2282	-0.4783	0.0049	-0.0462	0.0620	0.0248	-0.0423	-0.5982	0.5081
		0.4736	-0.1484	-0.4110	0.1161	1	0	-0.0169	-0.0680	0.0803	-0.0437	0.5049	-0.4459
		-0.0942	0.0279	0.0817	-0.0236	-0.1793	-0.0130	0.2523	-0.1487	-0.0466	0.0383	0.2558	-0.2140
		-0.9480	0.0026	1	0	0.5921	0.3003	-0.0535	-0.0304	-0.1175	0.0306	1	0
		-0.4657	0.0100	0.3444	0.0078	-0.7933	-0.4165	0.1502	0.0545	-0.0175	-0.0180	-0.5792	-0.0081
		1	0	-0.9927	-0.0065	-0.5750	-0.3022	1	0	1	0	-0.4786	-0.0720
		0.8414	-0.0073	-0.8504	-0.0012	-0.4686	-0.2376	-0.9913	0.0665	-0.9661	-0.0335	-0.9707	0.0637
0.15g	B	15.89	16.49	26.09	31.42	37.81	39.66						
		-0.0898	0.0085	-0.0818	0.0124	0.2109	-0.0191	0.3415	-0.0696	-0.0005	0.0211	0.3083	-0.0819
		-0.8144	0.0861	-0.7680	0.0704	-0.4949	-0.0179	0.1253	-0.0727	0.0706	0.0179	0.7214	-0.1807
		-0.4631	0.0470	-0.4435	0.0533	1	0	-0.0378	0.1136	-0.1778	0.0230	-0.5242	0.1283
		0.0917	-0.0088	0.0903	-0.0147	-0.1743	0.0169	-0.3205	0.0686	0.0332	-0.0249	-0.2852	0.0739
		1	0	1	0	0.7310	0.1286	0.0256	0.0768	0.0121	-0.0511	-0.9518	0.0088
		0.4140	0.0064	0.3456	0.0048	-0.9267	-0.1440	-0.1408	-0.0965	0.1037	0.0315	0.5271	0.0084
		-0.9932	-0.0054	-0.9399	-0.0168	-0.6437	-0.1094	-0.9126	-0.1249	-0.8240	0.0660	1	0
		-0.8430	-0.0010	-0.8160	-0.0042	-0.5629	-0.1220	1	0	1	0	0.3862	0.0081
0.20g	A	14.53	15.93	25.44	31.25	38.07							
		0.0709	-0.0109	-0.0416	0.0087	0.2104	-0.0048	0.2935	-0.0971	0.1116	-0.0379		
		0.8055	-0.1478	-0.6944	0.1271	-0.3977	-0.0180	0.1200	-0.0873	0.1882	-0.0617		
		0.5368	-0.0974	-0.5063	0.0867	1	0	-0.0678	0.1199	0.0470	-0.0650		
		-0.0726	0.0120	0.0620	-0.0159	-0.1774	0.0051	-0.2749	0.0913	-0.0913	0.0297		
		-0.9601	0.0051	1	0	0.5122	0.1888	-0.0348	0.0500	-0.2506	-0.0304		
		-0.4517	-0.0022	0.2126	0.0186	-0.8915	-0.2994	-0.0414	-0.0857	-0.0015	0.0274		
		1	0	-0.8186	-0.0145	-0.4896	-0.1764	-0.8452	-0.0892	1	0		
		0.8556	-0.0040	-0.8323	-0.0130	-0.4387	-0.1712	1	0	-0.6666	0.0627		
Modes		1	2	3	4	6	5						

Wall 3T – Pannello rinforzato con tiranti

Step [g]		Wall 3T - Mode Shapes for each Frequency							
		1		2		3		nc	
0.00g	A	19.26		28.92		32.17			
		0.1893	-0.0831	-0.0056	0.0069	-0.1655	0.1487		
		0.6053	-0.2592	0.5959	-0.4043	0.3573	-0.2338		
		0.5887	-0.2584	-0.3608	0.2565	-0.3093	0.1783		
		-0.1449	0.0638	0.0280	-0.0195	0.2263	-0.2063		
		-0.6970	-0.0018	-0.7694	-0.0112	-0.4765	-0.0455		
		-0.4399	0.0054	0.7294	-0.0051	0.8292	0.0400		
		0.3759	0.0001	0.2817	0.0056	-0.0113	0.0332		
		1	0	1	0	1	0		
0.05g	A	15.86		19.45		28.89		32.66	
		-0.2207	0.0259	0.1889	-0.0458	0.0009	0.0073	-0.1823	0.1195
		-0.5127	0.0642	0.6292	-0.1550	0.7071	-0.2496	0.4478	-0.1418
		1	0	0.5977	-0.1558	-0.4857	0.1652	-0.5038	0.1970
		0.1629	-0.0187	-0.1436	0.0351	0.0203	-0.0156	0.2470	-0.1578
		0.7670	0.0731	-0.6941	-0.0058	-0.8065	-0.0291	-0.5274	-0.0629
		0.1276	-0.0343	-0.4111	-0.0039	0.7872	0.0130	1	0
		-0.6517	-0.0758	0.3683	0.0045	0.3090	0.0170	0.0207	0.0538
		-0.8389	-0.0435	1	0	1	0	0.9376	-0.0228
0.10g	A	15.78		19.11		28.59		32.51	
		-0.1564	-0.0013	0.1915	-0.0090	-0.0135	0.0119	-0.2271	0.0573
		-0.4094	-0.0078	0.6418	-0.0304	0.7168	-0.0303	0.4035	0.0234
		1	0	0.6242	-0.0356	-0.4927	0.0114	-0.4818	0.0070
		0.1138	0.0043	-0.1450	0.0076	0.0353	-0.0117	0.3007	-0.0777
		0.6254	0.0446	-0.6856	-0.0074	-0.7769	-0.0354	-0.4521	-0.0676
		-0.0487	0.0004	-0.3945	-0.0073	0.8123	0.0035	1	0
		-0.5372	-0.0431	0.3643	0.0040	0.2887	0.0215	-0.0223	0.0578
		-0.6813	-0.0415	1	0	1	0	0.9140	-0.0362
0.15g	B	15.72		19.16		28.71		32.46	
		0.2045	-0.0679	0.1831	-0.0656	-0.0072	0.0193	-0.1897	0.1707
		0.5866	-0.1906	0.6118	-0.2211	0.6415	-0.3491	0.3734	-0.1989
		-0.6235	0.0958	0.6145	-0.2289	-0.3761	0.2085	-0.3718	0.2087
		-0.1543	0.0494	-0.1385	0.0499	0.0262	-0.0288	0.2465	-0.2186
		-0.8423	-0.0073	-0.6886	-0.0067	-0.7855	-0.0300	-0.4785	-0.0627
		-0.1385	0.0268	-0.3957	-0.0070	0.8103	-0.0150	1	0
		0.6530	0.0151	0.3662	0.0044	0.2936	0.0206	-0.0258	0.0496
		1	0	1	0	1	0	0.9384	-0.0145
0.20g	A	15.54		18.36		28.03		32.30	
		0.1809	-0.0540	0.1601	-0.0622	-0.0616	0.0502	-0.2196	0.2110
		0.6128	-0.1935	0.5844	-0.2275	0.5705	-0.3227	0.1900	-0.0775
		0.2340	-0.0324	0.8130	-0.3525	0.0183	-0.0857	0.0602	-0.1753
		-0.1306	0.0361	-0.1179	0.0463	0.0730	-0.0551	0.2693	-0.2577
		-0.7793	-0.0001	-0.6643	-0.0068	-0.7074	-0.0296	-0.2460	-0.0540
		-0.1198	-0.0412	-0.3049	0.0011	0.9930	-0.0027	1	0
		0.5181	-0.0047	0.3433	0.0041	0.2270	0.0191	-0.1498	0.0456
		1	0	1	0	1	0	0.7948	-0.0226
Modes		1		2		3		nc	

Step [g]		Wall 3T - Mode Shapes for each Frequency							
		1		2		3		nc	
0.25g	A	15.27		18.36		27.62		32.20	
		0.1837	-0.0745	0.1590	-0.0762	-0.0650	0.0807	-0.1919	0.2582
		0.6551	-0.2634	0.5752	-0.2746	0.4568	-0.3293	0.1499	-0.0730
		0.2053	-0.0516	0.6986	-0.3557	-0.0399	-0.0429	-0.0216	-0.1207
		-0.1399	0.0523	-0.1182	0.0571	0.0719	-0.0844	0.2411	-0.3192
		-0.8395	-0.0038	-0.6760	-0.0038	-0.6088	-0.0584	-0.2096	-0.0632
		-0.1532	-0.0521	-0.3235	-0.0024	1	0	1	0
		0.5530	0.0028	0.3528	0.0028	0.1770	0.0348	-0.1797	0.0566
		1	0	1	0	0.9043	0.0178	0.7868	-0.0304
0.30g	A	15.31		18.51		28.31		32.28	
		0.2375	-0.0776	0.1685	-0.0667	-0.0334	0.0418	-0.2126	0.2070
		0.7608	-0.2435	0.5934	-0.2413	0.6153	-0.3746	0.2335	-0.1328
		-0.1294	-0.0080	0.7247	-0.3245	-0.1179	0.0166	-0.0702	-0.0250
		-0.1735	0.0470	-0.1263	0.0487	0.0520	-0.0504	0.2638	-0.2548
		-0.9930	-0.0187	-0.6845	-0.0070	-0.7778	-0.0393	-0.3207	-0.0570
		-0.1366	0.0183	-0.3509	-0.0088	0.9428	0.0020	1	0
		0.7164	0.0181	0.3597	0.0054	0.2749	0.0263	-0.1143	0.0434
		1	0	1	0	1	0	0.8194	-0.0117
0.35g	A	15.21		18.20		27.67		32.23	
		-0.2435	0.0967	0.1579	-0.0762	-0.0324	0.0655	-0.1711	0.2620
		-0.7562	0.3006	0.5722	-0.2781	0.5351	-0.4111	0.1779	-0.0904
		0.0472	0.0305	0.6791	-0.3586	-0.1444	0.0682	-0.1205	0.0159
		0.1784	-0.0634	-0.1160	0.0557	0.0500	-0.0760	0.2207	-0.3160
		1	0	-0.6741	-0.0078	-0.7239	-0.0523	-0.2414	-0.0765
		0.1981	-0.0179	-0.3254	-0.0052	0.9682	-0.0415	1	0
		-0.7208	-0.0044	0.3501	0.0053	0.2393	0.0373	-0.1615	0.0640
		-0.9851	0.0224	1	0	1	0	0.7872	-0.0352
0.40g	A	15.09		18.57		28.27		32.22	
		-0.2313	-0.0149	0.1619	-0.0971	-0.0283	0.0480	-0.1482	0.2819
		-0.3970	-0.0164	0.5694	-0.3406	0.5252	-0.5430	0.1859	-0.1605
		1	0	0.5535	-0.3590	-0.3007	0.2842	-0.1802	0.1632
		0.1541	0.0132	-0.1195	0.0719	0.0446	-0.0642	0.1923	-0.3479
		0.5840	0.3011	-0.7036	-0.0077	-0.8127	-0.0347	-0.2840	-0.0668
		0.0263	0.0113	-0.3517	0.0007	0.9947	0.0054	1	0
		-0.5947	-0.3115	0.3717	0.0050	0.2877	0.0215	-0.1503	0.0526
		-0.2421	-0.1365	1	0	1	0	0.8467	-0.0176
0.45g	A	15.14		17.93		27.63		32.11	
		-0.2058	0.0034	0.1692	-0.0186	-0.0840	0.0266	-0.3138	0.1091
		-0.4147	0.0053	0.6292	-0.0681	0.6166	-0.0872	0.1548	0.0173
		1	0	0.5210	-0.0680	-0.7586	0.1432	-0.5451	0.0868
		0.1426	0.0004	-0.1243	0.0139	0.0991	-0.0269	0.3873	-0.1266
		0.6461	0.0569	-0.6783	-0.0057	-0.6809	-0.0284	-0.1997	-0.0540
		0.0657	0.0089	-0.3008	0.0017	1	0	1	0
		-0.6009	-0.0590	0.3517	0.0047	0.2158	0.0189	-0.1930	0.0540
		-0.4068	-0.0236	1	0	0.9421	0.0001	0.8092	-0.0345
Modes		1		2		3		nc	

Step [g]		Wall 3T - Mode Shapes for each Frequency							
		1		2		3		nc	
0.50g	A	15.03		17.01		26.94		32.05	
		-0.2823	0.0959	0.1408	-0.0590	-0.0884	0.0917	-0.2337	0.3027
		-0.7188	0.2975	0.5557	-0.2448	0.3972	-0.2545	0.0531	0.0700
		0.5820	-0.1765	0.4486	-0.2121	-0.6308	0.4578	-0.3894	0.2892
		0.1945	-0.0686	-0.1023	0.0422	0.0934	-0.0900	0.2830	-0.3526
		1	0	-0.6408	-0.0121	-0.5069	-0.0530	-0.0270	-0.0851
		0.2456	-0.0105	-0.2406	-0.0162	1	0	1	0
		-0.7691	-0.0124	0.3264	0.0084	0.1265	0.0306	-0.2974	0.0655
		-0.9232	0.0285	1	0	0.8230	0.0086	0.8254	-0.0370
0.55g	B	14.88		17.51		27.21		31.96	
		0.2125	-0.0593	0.1540	-0.0549	-0.0877	0.0632	-0.2614	0.2535
		0.6732	-0.2000	0.5950	-0.2150	0.4727	-0.2629	0.0893	0.0653
		-0.3927	0.1138	0.4750	-0.1737	-0.6636	0.4010	-0.4698	0.2747
		-0.1443	0.0329	-0.1123	0.0398	0.0971	-0.0674	0.3129	-0.3114
		-0.8761	-0.0096	-0.6690	-0.0060	-0.5806	-0.0239	-0.0650	-0.1057
		-0.0954	-0.0047	-0.2772	-0.0040	1	0	1	0
		0.6156	0.0149	0.3443	0.0045	0.1633	0.0156	-0.2735	0.0944
		1	0	1	0	0.8563	-0.0098	0.7939	-0.0619
0.60g	A	12.87		15.13		25.71		32.02	
		0.0967	-0.0237	0.0730	-0.0147	0.2084	0.0109	-0.5046	0.3010
		0.6362	-0.1460	0.6603	-0.1767	-0.1083	0.0307	-0.0895	0.0845
		0.1259	-0.0323	0.4542	-0.1177	1	0	-0.7082	0.3727
		0.0000	-0.0011	0.0000	-0.0012	0.0010	0.0003	-0.0124	0.0011
		-0.0001	0.0001	-0.0001	-0.0002	0.0001	-0.0001	0.0004	0.0010
		0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	0.0000	0.0001	-0.0018	0.0004
		0.3219	0.0008	0.2465	0.0038	0.0552	0.0499	-0.4729	0.0099
		1	0	1	0	-0.2204	-0.0819	1	0
Modes		1		2		3		nc	

Wall 4T – Pannello rinforzato con tiranti

Step [g]		Wall 4T - Mode Shapes for each Frequency									
		nc	1		2		3		5		
0.00g	A	10.22	15.20		18.58		30.80		39.06		
		0.5424	-0.1105	-0.2332	-0.0243	0.2031	-0.0037	-0.0587	-0.0182	-0.0325	0.0370
		0.8085	-0.0593	-0.9505	0.0015	0.7683	0.0103	0.8433	0.0323	0.2200	-0.0009
		1	0	0.1043	-0.0971	0.8469	-0.0017	-0.4453	-0.0650	-0.7799	-0.0299
		-0.3900	0.1376	0.1366	-0.0019	-0.1858	0.0051	0.0312	0.0145	-0.1729	-0.0250
		-0.9115	0.0713	1	0	-0.8719	-0.0081	-0.9665	-0.0172	-0.2962	-0.0082
		-0.9548	0.1062	0.1630	0.0667	-0.7991	0.0107	0.3407	0.0506	1	0
		0.6117	-0.0912	-0.4746	0.0112	0.4371	-0.0030	0.3535	-0.0035	0.2933	0.0321
		0.9633	-0.0682	-0.9028	-0.0094	1	0	1	0	-0.1077	-0.0242
0.05g	A	10.00	15.44		18.90		30.85		38.52		
		0.4662	-0.1996	0.2094	-0.0053	0.1925	-0.0054	-0.0856	0.0090	-0.0088	-0.0137
		0.7602	-0.2081	0.9154	-0.0306	0.7576	-0.0271	0.8550	-0.0609	0.2375	-0.0153
		1	0	0.2726	0.0005	0.7776	-0.0146	-0.7339	0.0682	-0.7232	0.0531
		-0.4671	0.1413	-0.1531	0.0031	-0.1769	0.0057	0.0561	-0.0055	-0.1880	0.0117
		-0.6901	0.2519	-0.9903	-0.0118	-0.8608	-0.0061	-0.9857	-0.0178	-0.3061	-0.0195
		-0.9364	0.0482	-0.4323	-0.0175	-0.7274	-0.0148	0.6281	-0.0014	1	0
		0.5452	-0.2244	0.4811	0.0037	0.4262	0.0015	0.3464	0.0057	0.2894	0.0180
		0.9244	-0.1302	1	0	1	0	1	0	-0.0768	-0.0138
0.10g	A	11.90	15.33		18.77		30.87		37.84		
		0.1345	-0.0365	0.2023	-0.0566	0.1771	-0.0678	-0.0672	0.0505	-0.0004	-0.0175
		0.7989	-0.0076	0.8820	-0.2620	0.7107	-0.2736	0.7192	-0.4689	0.1371	-0.1179
		1	0	0.2972	-0.0796	0.7253	-0.2721	-0.6100	0.4350	-0.4529	0.3884
		-0.1226	-0.0022	-0.1469	0.0400	-0.1637	0.0621	0.0439	-0.0336	-0.1543	0.1286
		-0.8260	-0.1873	-0.9882	-0.0132	-0.8613	-0.0077	-0.9888	-0.0148	-0.2254	-0.0123
		-0.9527	-0.2586	-0.4484	-0.0170	-0.7254	-0.0090	0.6440	-0.0163	1	0
		0.3569	0.0889	0.4779	0.0042	0.4248	0.0024	0.3488	0.0064	0.2625	0.0153
		0.9453	0.2433	1	0	1	0	1	0	-0.1302	-0.0164
0.15g	A	12.12	15.17		18.75		30.61		37.61		
		0.1400	-0.1033	0.1967	-0.0317	0.1805	-0.0401	-0.0911	0.0388	0.0260	-0.0446
		0.7940	-0.0789	0.8928	-0.1736	0.7455	-0.1762	0.8135	-0.3246	0.1625	-0.0858
		1	0	0.3024	0.0319	0.7291	-0.1713	-0.7385	0.3182	-0.5562	0.2906
		-0.0949	0.0639	-0.1474	0.0225	-0.1666	0.0373	0.0615	-0.0259	-0.1850	0.0998
		-0.8595	-0.0561	-0.9877	0.0006	-0.8626	-0.0080	-0.9953	-0.0189	-0.2219	-0.0078
		-0.9683	-0.1452	-0.4192	-0.0727	-0.6951	-0.0056	0.6888	-0.0097	1	0
		0.3804	0.0090	0.4762	-0.0020	0.4247	0.0033	0.3484	0.0052	0.2641	0.0081
		0.9862	0.1005	1	0	1	0	1	0	-0.1520	-0.0154
0.20g	A	11.91	14.99		18.34		30.31		37.63		
		0.1839	0.0365	0.1768	-0.0127	0.1736	-0.0263	-0.1134	0.0296	0.0130	-0.0212
		0.7599	-0.1070	0.8914	-0.1157	0.7521	-0.1049	0.8435	-0.2105	0.2059	-0.0725
		0.8527	-0.0626	0.3182	0.0385	0.7650	-0.1528	-0.7799	0.2198	-0.5271	0.1668
		-0.1634	-0.0210	-0.1364	0.0064	-0.1626	0.0257	0.0777	-0.0205	-0.1610	0.0362
		-0.9244	-0.0480	-0.9829	-0.0016	-0.8576	-0.0157	-0.9944	-0.0222	-0.2727	0.0059
		-0.9093	-0.0264	-0.4323	-0.0594	-0.7388	0.0295	0.6684	-0.0120	1	0
		0.4732	0.0332	0.4693	0.0044	0.4196	0.0042	0.3408	0.0079	0.2409	0.0117
		1	0	1	0	1	0	1	0	0.0065	-0.0463
Modes		nc	1		2		3		5		

Step [g]		Wall 4T - Mode Shapes for each Frequency									
		nc	1		2		3		5		
0.25g	A	10.51	13.80		18.89		33.29		35.92		
		0.2727 0.0285	-0.0986 0.0060	-0.0382 -0.0548	0.1156 0.0051	-0.1671 -0.0348					
		0.6521 0.0025	-0.5875 0.0435	-0.7220 0.0865	0.6646 -0.2063	-0.4069 0.0108					
		1 0	-0.9237 0.0935	-0.6959 0.0772	-0.8644 0.2275	1 0					
		-0.2365 -0.0132	0.0893 -0.0051	0.0328 0.0420	-0.1182 0.0066	0.1353 0.0236					
		-0.7480 -0.0632	0.6648 0.0186	0.7922 0.0191	-0.7854 0.0499	0.4393 0.1005					
		-0.9683 -0.1499	1 0	1 0	1 0	-0.7780 -0.1879					
		0.4105 0.0368	-0.3046 -0.0088	-0.3311 -0.0338	0.3873 -0.0107	-0.2743 -0.0776					
		0.8033 0.1093	-0.7976 -0.0130	-0.9382 -0.0118	0.6013 -0.0705	-0.1201 0.0032					
0.30g	B	10.14	14.62		17.64		30.89		37.90		
		0.4780 -0.0119	0.1516 -0.0444	0.1569 0.0030	-0.2135 0.1496	-0.2174 -0.0064					
		0.7247 -0.0984	0.8016 -0.2315	0.6949 0.0135	0.6710 -0.4568	-0.4824 0.0060					
		1 0	0.7836 -0.2407	1 0	-0.1582 0.1261	1 0					
		-0.3574 0.1240	-0.1263 0.0380	-0.1492 -0.0035	0.1650 -0.1155	0.2061 0.0075					
		-0.9530 -0.0499	-0.9190 -0.0094	-0.7319 -0.2853	-0.9303 -0.0141	0.3971 0.3611					
		-0.9754 -0.1355	-0.8566 0.0024	-0.8743 -0.3211	0.0154 0.0001	-0.6688 -0.6061					
		0.6792 0.0837	0.4418 0.0040	0.3566 0.1373	0.2563 0.0045	-0.2633 -0.2467					
		0.9639 0.1121	1 0	0.8808 0.3310	1 0	-0.1178 -0.0767					
0.35g	A	10.46	13.43		15.69		30.94		35.42		
		0.2253 0.0143	0.0936 0.0019	0.0810 0.0021	0.1092 -0.0837	-0.1908 -0.0042					
		0.6177 0.0242	0.5549 0.0112	0.4121 0.0128	-0.8596 0.1660	-0.6633 0.0162					
		1 0	1 0	1 0	0.6755 -0.0267	1 0					
		-0.2075 -0.0024	-0.0856 -0.0014	-0.0822 -0.0006	-0.0825 0.0689	0.1918 0.0078					
		-0.7054 -0.0851	-0.6173 -0.0630	-0.4736 -0.0623	1 0	0.7397 0.1447					
		-0.8889 -0.0934	-0.8516 -0.0738	-0.8054 -0.0786	-0.2098 -0.0764	-0.8892 -0.2041					
		0.3851 0.0500	0.2836 0.0294	0.2173 0.0268	-0.3674 -0.0285	-0.4210 -0.0894					
		0.7925 0.0721	0.7740 0.0706	0.6602 0.0731	-0.8414 0.0633	-0.4056 -0.0527					
0.40g	A	10.21	12.27		15.12		30.90				
		0.1832 -0.0407	0.0791 0.0020	0.0559 0.0041	-0.0271 0.0078						
		0.5804 -0.0494	0.5443 0.0127	0.3060 0.0159	-0.7888 -0.0034						
		1 0	1 0	1 0	1 0						
		-0.2069 0.0369	-0.0722 -0.0017	-0.0614 -0.0019	0.0467 -0.0037						
		-0.6975 0.0330	-0.6055 -0.0102	-0.3604 -0.0177	0.9211 -0.0185						
		-0.7814 0.0926	-0.7562 -0.0033	-0.7034 -0.0036	-0.7524 0.0295						
		0.3717 -0.0388	0.2834 0.0052	0.1738 0.0067	-0.4227 0.0093						
		0.8367 -0.0492	0.7966 0.0059	0.5421 0.0116	-0.7552 0.0298						
Modes		nc	1		2		3		5		

Wall 5I – Pannello rinforzato con iniezione

Step [g]		Wall 5I - Mode Shapes for each Frequency							
		1		2		3		5	
0.00g	B	9.88		15.25		38.61		40.25	
		0.0969	-0.0147	0.0410	0.0096			-0.2650	0.0012
		0.3917	-0.0110	0.2987	0.0016			-0.5223	-0.0094
		1	0	1	0			1	0
		-0.0657	0.0150	-0.0291	-0.0062			0.2292	0.0019
		-0.4029	-0.0642	-0.2832	-0.0788			0.4091	0.3660
		-0.9180	-0.1710	-0.7070	-0.1883			-0.6296	-0.5789
		0.2090	0.0257	0.1441	0.0458			-0.3182	-0.2826
		0.5727	0.0931	0.4528	0.1256			-0.3828	-0.3502
0.05g	A	9.43		15.30		38.61		40.49	
		0.0821	0.0007	0.0691	0.0019	-0.1511	-0.0063	-0.2608	-0.0016
		0.3840	0.0011	0.2952	0.0000	-0.4697	-0.0093	-0.5861	-0.0079
		1	0	1	0	1	0	1	0
		-0.0590	-0.0013	-0.0623	0.0011	0.1139	0.0140	0.2063	0.0027
		-0.3967	-0.0600	-0.2728	-0.0647	0.4105	0.2915	0.4778	0.3660
		-0.9323	-0.1357	-0.6715	-0.1618	-0.5601	-0.4323	-0.7353	-0.6010
		0.1988	0.0303	0.1648	0.0403	-0.2695	-0.1984	-0.3385	-0.2592
		0.5673	0.0808	0.4366	0.1049	-0.3990	-0.2905	-0.4779	-0.3716
0.10g	A	9.42		15.27		38.64		40.14	
		0.0831	-0.0050	0.0753	-0.0025	-0.1755	-0.0088	-0.2563	0.0048
		0.3825	-0.0026	0.2981	-0.0018	-0.4928	-0.0097	-0.5844	-0.0047
		1	0	1	0	1	0	1	0
		-0.0598	0.0044	-0.0670	0.0054	0.1341	0.0119	0.2035	-0.0017
		-0.4006	-0.0110	-0.2811	-0.0108	0.5160	0.0754	0.5999	0.0796
		-0.9427	-0.0291	-0.6772	-0.0364	-0.7176	-0.1299	-0.9684	-0.1507
		0.2015	0.0031	0.1739	0.0050	-0.3454	-0.0539	-0.4234	-0.0572
		0.5714	0.0149	0.4481	0.0184	-0.5096	-0.0785	-0.6108	-0.0845
0.15g	A	9.09		15.14		38.64		39.49	
		0.0762	0.0001	0.0722	0.0024			-0.2427	0.0066
		0.3790	0.0000	0.2865	0.0025			-0.5588	0.0157
		1	0	1	0			1	0
		-0.0550	0.0005	-0.0638	-0.0020			0.1777	-0.0088
		-0.3871	-0.0873	-0.2548	-0.0998			0.3543	0.4350
		-0.9181	-0.2052	-0.6544	-0.2500			-0.5637	-0.5876
		0.1937	0.0443	0.1524	0.0618			-0.2421	-0.2996
		0.5565	0.1237	0.4077	0.1587			-0.3644	-0.4179
0.20g	A	8.96		15.20		37.62		39.24	
		0.0722	0.0013	0.0657	0.0024	-0.1481	-0.0107	0.1265	-0.0062
		0.3760	0.0029	0.2732	0.0023	-0.4750	-0.0068	0.4329	-0.1163
		1	0	1	0	1	0	-0.6574	0.1755
		-0.0518	-0.0019	-0.0606	-0.0012	0.0826	0.0076	-0.1252	0.0150
		-0.3949	-0.0271	-0.2617	-0.0311	0.4687	0.1553	-0.4369	-0.0262
		-0.9434	-0.0612	-0.6994	-0.0800	-0.4793	-0.1742	1	0
		0.1952	0.0150	0.1558	0.0193	-0.2864	-0.0982	0.3039	0.0172
		0.5679	0.0364	0.4231	0.0489	-0.4533	-0.1440	0.5388	0.0094
	Modes	1		2		3		5	

Step [g]		Wall 5I - Mode Shapes for each Frequency							
		1		2		3		5	
0.25g	A	9.12		15.24		37.10		39.69	
		0.0815	-0.0018	0.0675	0.0025	-0.1736	-0.0042	0.1224	-0.0478
		0.3870	-0.0002	0.2719	0.0029	-0.5121	-0.0082	0.3716	-0.0565
		1	0	1	0	1.0000	0.0000	-0.5116	0.0721
		-0.0598	0.0020	-0.0578	-0.0014	0.1116	0.0039	-0.1435	0.0341
		-0.4062	-0.0082	-0.2649	-0.0120	0.5342	0.0502	-0.3879	0.0224
		-0.9461	-0.0212	-0.7318	-0.0279	-0.6700	-0.0767	1	0
		0.2034	0.0042	0.1524	0.0090	-0.3337	-0.0340	0.2923	-0.0191
		0.5758	0.0104	0.4214	0.0173	-0.5409	-0.0493	0.4893	-0.0103
0.30g	A	9.00		15.21		37.15		38.39	
		0.0752	-0.0024	0.0638	0.0022	-0.1649	-0.0098	0.1675	-0.0079
		0.3756	0.0000	0.2610	0.0044	-0.5277	-0.0108	0.4798	-0.0466
		1	0	1	0	1	0	-0.6843	0.0455
		-0.0529	0.0022	-0.0573	-0.0020	0.1108	0.0109	-0.1495	0.0153
		-0.3976	-0.0131	-0.2505	-0.0203	0.5437	0.0923	-0.4896	-0.0256
		-0.9548	-0.0311	-0.7384	-0.0508	-0.7975	-0.1582	1	0
		0.1957	0.0067	0.1468	0.0161	-0.3400	-0.0632	0.3333	0.0160
		0.5688	0.0171	0.4055	0.0328	-0.5712	-0.0966	0.5822	0.0134
0.35g	A	9.00		15.23				38.82	
		0.0749	0.0024	0.0753	0.0000			-0.1912	-0.0060
		0.3803	0.0028	0.2716	0.0014			-0.4050	0.0098
		1	0	1	0			1	0
		-0.0545	-0.0019	-0.0639	0.0023			0.0829	-0.0007
		-0.3812	-0.1077	-0.2317	-0.1154			0.1677	0.3856
		-0.9095	-0.2523	-0.6631	-0.3301			-0.0796	-0.1611
		0.1900	0.0552	0.1403	0.0676			-0.1035	-0.2383
		0.5459	0.1524	0.3708	0.1834			-0.1315	-0.2666
0.40g	B	10.08		15.80		36.98		37.62	
		0.2903	0.0148	0.1356	-0.0005	0.1247	-0.0072	-0.1558	-0.0008
		0.5795	0.0159	0.5390	0.0034	0.3479	-0.0365	-0.2929	-0.0052
		1	0	1	0	-0.8264	0.0897	1	0
		-0.2407	-0.0046	-0.1030	0.0016	-0.1087	0.0059	0.1139	0.0021
		-0.5875	-0.0262	-0.5592	-0.0330	-0.3648	-0.0030	0.3044	0.0434
		-0.9185	-0.0279	-0.9389	-0.0534	1	0	-0.7160	-0.1027
		0.4011	0.0157	0.3030	0.0176	0.2501	0.0049	-0.2231	-0.0307
		0.7502	0.0273	0.7724	0.0454	0.4275	-0.0034	-0.2693	-0.0390
0.45g	A	8.55		15.18				36.65	
		0.0664	0.0004	0.0644	0.0018			-0.1329	0.0003
		0.3625	0.0025	0.2224	0.0033			-0.3935	-0.0051
		1	0	1	0			1	0
		-0.0466	0.0001	-0.0557	-0.0001			0.0679	-0.0009
		-0.3694	-0.0935	-0.1895	-0.0916			0.2001	0.3529
		-0.9206	-0.2291	-0.6578	-0.3061			-0.1999	-0.3737
		0.1806	0.0457	0.1169	0.0570			-0.1213	-0.2147
		0.5293	0.1323	0.3111	0.1506			-0.1833	-0.3221
Modes		1		2		3		5	

Step [g]		Wall 5I - Mode Shapes for each Frequency							
		1		2		3		5	
0.50g	A	7.92		15.00		34.71		37.84	
		0.0555	0.0032	0.0370	0.0000	-0.1209	0.0113	-0.1243	-0.0132
		0.3407	0.0038	0.0864	0.0085	0.3051	-0.0302	-0.2683	-0.0318
		1	0	1	0	-0.5953	0.1722	1	0
		-0.0354	-0.0018	-0.0359	0.0014	0.3467	-0.0379	0.1077	0.0074
		-0.3566	-0.0069	-0.0769	-0.0092	-0.3196	0.0073	0.2649	0.0502
		-0.9177	-0.0122	-0.7145	-0.0333	1.0000	0.0000	-0.7707	-0.1593
		0.1757	0.0046	0.0547	0.0047	0.0153	0.0026	-0.1612	-0.0296
		0.5120	0.0095	0.1461	0.0185	0.4599	-0.0059	-0.3346	-0.0751
	Modes	1		2		3		5	

Wall 6I – Pannello rinforzato con iniezione

Step [g]		Wall 6I - Mode Shapes for each Frequency							
		1		2		3		5	
0.00g	A	10.63		20.96		35.38		42.37	
		0.5202	0.0221	0.3678	0.0046	0.0420	0.0225	0.1081	-0.1128
		0.7067	0.0039	0.7929	0.0115	0.3161	-0.0227	0.8403	-0.3707
		1	0	1	0	-0.8286	0.2615	-0.2155	0.1567
		-0.4227	-0.0066	-0.2822	-0.0022	-0.0377	-0.0146	-0.0380	0.0758
		-0.7225	-0.0478	-0.8010	-0.1553	-0.4388	-0.0767	-0.8634	0.0262
		-0.9237	-0.0652	-0.9270	-0.1533	1	0	0.2561	-0.0472
		0.5880	0.0481	0.5809	0.1140	0.2044	0.0552	0.6078	-0.0342
		0.8148	0.0820	0.9690	0.1828	0.2377	0.0916	1	0
0.05g	A	10.66		21.35		34.98		42.05	
		0.5000	0.0017	0.3795	0.0018	0.0593	-0.0090	0.0918	0.0110
		0.6868	-0.0098	0.8187	0.0097	0.3818	0.0058	0.8340	0.0199
		1	0	0.9830	-0.0006	-0.8862	-0.0169	-0.2619	-0.0158
		-0.4059	0.0026	-0.2911	-0.0003	-0.0466	0.0078	-0.0212	-0.0060
		-0.7419	0.0203	-0.8206	-0.0028	-0.5117	-0.0004	-0.8317	-0.0086
		-0.9342	0.0045	-0.8792	0.0003	1	0	0.2796	0.0047
		0.5872	-0.0075	0.5993	0.0025	0.2707	-0.0074	0.5668	0.0062
		0.8076	-0.0045	1	0	0.3300	0.0183	1	0
0.10g	A	10.65		21.29		34.84		41.35	
		0.4774	-0.0068	0.3592	-0.0278	0.0550	-0.0148	0.1249	-0.0495
		0.6566	0.0059	0.7862	-0.0586	0.3831	-0.0452	0.8302	-0.1452
		1	0	0.9135	-0.0787	-0.8689	0.1283	-0.3482	0.0789
		-0.3700	0.0064	-0.2755	0.0225	-0.0421	0.0122	-0.0546	0.0341
		-0.7124	-0.0225	-0.8200	-0.0117	-0.5113	-0.0087	-0.8378	-0.0002
		-0.9180	-0.0418	-0.8544	0.0005	1	0	0.3602	-0.0050
		0.5810	0.0137	0.5965	0.0094	0.2772	-0.0033	0.5852	-0.0035
		0.7964	-0.0110	1	0	0.3666	0.0446	1	0
0.15g	A	10.80		21.01		34.72		40.51	
		0.4540	0.0569	0.3078	-0.2081	0.0365	-0.0360	0.0196	-0.1164
		0.6396	0.0134	0.6806	-0.4586	0.2777	-0.3316	0.3541	-0.7690
		1	0	0.7753	-0.5398	-0.5365	0.7075	-0.1556	0.3387
		-0.3746	-0.0086	-0.2345	0.1600	-0.0247	0.0261	0.0079	0.0496
		-0.6607	-0.2161	-0.8211	0.0072	-0.5389	-0.0368	-0.8150	0.0045
		-0.9040	-0.3021	-0.8568	0.0330	1	0	0.3513	0.0171
		0.5359	0.2067	0.5959	-0.0044	0.2924	0.0193	0.5518	-0.0083
		0.7849	0.3203	1	0	0.4228	0.0614	1	0
0.20g	A	10.53		20.54		35.22		39.11	
		0.5219	0.0299	0.3003	-0.1919	0.0508	-0.0693	0.0644	-0.1313
		0.7127	0.0171	0.6897	-0.4231	0.3149	-0.3525	0.4374	-0.7489
		1	0	0.7830	-0.5035	-0.5498	0.7112	-0.2159	0.3536
		-0.4225	-0.0106	-0.2268	0.1459	-0.0358	0.0532	-0.0268	0.0644
		-0.6987	-0.1701	-0.8192	0.0042	-0.5796	-0.0402	-0.8547	0.0076
		-0.8802	-0.2371	-0.8263	0.0215	1	0	0.4002	0.0000
		0.5671	0.1540	0.5883	-0.0030	0.3176	0.0225	0.5823	-0.0155
		0.7765	0.2667	1	0	0.4448	0.0484	1	0
Modes		1		2		3		5	

Step [g]		Wall 6l - Mode Shapes for each Frequency							
		1		2		3		5	
0.25g	B	10.60		20.65		34.70		39.35	
		0.5067	0.0298	0.3209	-0.1005	0.0627	-0.0308	-0.0723	0.0563
		0.6957	0.0155	0.7448	-0.2311	0.5453	-0.2309	0.7645	-0.2980
	1	0		0.7701	-0.2462	-0.8632	0.3370	-0.3198	0.0760
		-0.4006	-0.0180	-0.2422	0.0765	-0.0321	0.0163	0.1194	-0.0706
		-0.7417	-0.0895	-0.7830	0.0658	-0.6768	0.0174	-0.8374	-0.0402
		-0.8946	-0.0963	-0.7282	0.0673	1	0	0.3074	0.0683
		0.5977	0.0602	0.5655	-0.0469	0.3916	-0.0161	0.5808	0.0256
		0.8131	0.1685	1	0	0.6582	0.0617	1	0
0.30g	B	10.59		20.41		34.56		39.17	
		0.4769	-0.0798	0.3215	-0.0678	0.0438	-0.0224	-0.1502	0.0646
		0.6808	-0.0607	0.7669	-0.1499	0.5775	-0.2652	0.7579	-0.2780
	1	0		0.7662	-0.1625	-0.8479	0.3466	-0.2553	0.0411
		-0.3887	0.0694	-0.2421	0.0515	-0.0101	0.0058	0.1884	-0.0772
		-0.7599	-0.0189	-0.7967	0.0031	-0.7155	0.0333	-0.8388	-0.0606
		-0.9332	-0.0890	-0.7084	0.0200	1	0	0.2257	0.0817
		0.6013	0.0016	0.5730	-0.0023	0.4164	-0.0240	0.5911	0.0447
		0.6557	0.1372	1	0	0.7394	-0.0161	1	0
0.35g	A	10.65		20.26		34.50		36.63	
		0.5095	0.0095	0.3442	-0.0822	0.0663	-0.0096	0.0934	-0.0357
		0.7124	0.0083	0.8289	-0.1864	0.4303	-0.0796	0.7362	-0.2780
	1	0		0.8670	-0.2182	-0.8592	0.2812	-0.4350	0.1534
		-0.4184	-0.0070	-0.2548	0.0645	-0.0480	0.0105	-0.0327	0.0123
		-0.8004	-0.0471	-0.8564	0.0342	-0.5521	-0.0434	-0.7796	0.0401
		-0.9105	-0.1053	-0.8358	0.0432	1	0	0.4190	0.0039
		0.6222	0.0540	0.6013	-0.0250	0.3087	0.0265	0.5031	-0.0271
		0.7162	0.2429	1	0	0.4574	0.1099	1	0
0.40g	A	10.59		19.70		33.77		34.96	
		0.5241	0.0049	0.2778	-0.1857	0.0113	-0.0086	0.0005	-0.0047
		0.7347	0.0007	0.6841	-0.4437	0.3561	-0.6625	0.3649	-0.6425
	1	0		0.5948	-0.3968	-0.5047	0.8383	-0.2842	0.3919
		-0.4186	0.0026	-0.2071	0.1408	0.0107	-0.0336	0.0264	-0.0452
		-0.7572	-0.2245	-0.8118	0.0024	-0.7772	0.0322	-0.6801	-0.0101
		-0.8899	-0.2808	-0.6249	0.0058	1	0	0.4337	0.0605
		0.6072	0.1837	0.5780	-0.0024	0.4590	-0.0206	0.4293	0.0038
		0.8232	0.2875	1	0	0.9586	-0.0594	1	0
0.45g	A	10.62		19.52		33.67		35.03	
		0.5166	0.0208	0.3003	-0.0590	0.0130	-0.0006	0.0055	0.0074
		0.7435	0.0026	0.7558	-0.1487	0.7428	-0.2342	0.6895	-0.2153
	1	0		0.6373	-0.1303	-0.8708	0.2483	-0.3832	0.0213
		-0.4195	-0.0192	-0.2231	0.0443	0.0372	-0.0147	0.0505	-0.0263
		-0.8316	-0.0593	-0.7843	0.0085	-0.7850	-0.0207	-0.6529	-0.0361
		-0.9681	-0.0769	-0.5814	0.0101	0.9072	0.0487	0.3017	0.1177
		0.6460	0.0600	0.5542	-0.0043	0.4706	0.0107	0.4245	0.0184
		0.8845	0.0605	1	0	1	0	1	0
Modes		1		2		3		5	

Step [g]		Wall 6I - Mode Shapes for each Frequency							
		1		2		3		5	
0.50g	B	10.62		19.33		33.75		34.63	
		0.5062	0.0159	0.3037	-0.0379	-0.0143	0.0033	0.0097	-0.0183
		0.7520	0.0096	0.7673	-0.0945	0.7395	-0.1178	0.6687	-0.1042
		1	0	0.6263	-0.0815	-0.9019	0.1411	-0.1578	-0.1406
		-0.4089	-0.0117	-0.2249	0.0286	0.0618	-0.0109	0.0506	0.0046
		-0.7948	-0.0464	-0.7847	0.0153	-0.7370	-0.0300	-0.5886	-0.0384
		-0.9460	-0.0382	-0.5636	0.0159	0.8944	0.0366	0.0507	0.1843
		0.6394	0.0373	0.5547	-0.0100	0.4367	0.0155	0.3957	0.0167
		0.9925	-0.0266	1	0	1	0	1	0
0.55	A	10.48		18.71		32.28		34.22	
		0.5325	0.0126	0.2933	-0.0042	-0.0077	-0.0157	-0.1149	-0.0641
		0.7755	0.0157	0.7681	-0.0099	0.7462	0.0210	0.4060	0.0345
		1	0	0.5708	-0.0114	-0.9796	-0.0687	-0.9636	-0.0290
		-0.4337	-0.0117	-0.2153	0.0040	0.0562	0.0147	0.1233	0.0623
		-0.8082	0.0490	-0.7841	0.0127	-0.7667	0.0019	-0.4323	-0.0049
		-0.9485	0.0461	-0.5090	0.0112	0.9669	0.0433	1	0
		0.6558	-0.0184	0.5470	-0.0081	0.4459	-0.0029	0.2209	-0.0245
		0.9790	-0.0688	1	0	1	0	0.5417	0.0758
0.60	C	10.95		19.78		33.99		35.98	
		0.5129	-0.0209	0.3068	-0.0446	0.0039	-0.0047	0.0204	-0.0151
		0.7195	-0.0266	0.7728	-0.1111	0.7370	-0.1868	0.7042	-0.1870
		1	0	0.6369	-0.1007	-0.9257	0.1939	-0.3964	-0.0037
		-0.4871	-0.0251	-0.2475	0.0365	0.0338	-0.0047	0.0325	-0.0014
		-0.8645	-0.0871	-0.8880	-0.0103	-0.8734	-0.0199	-0.7774	-0.0270
		-0.9273	-0.1497	-0.5840	0.0029	0.9338	0.0559	0.2814	0.1254
		0.6975	0.0615	0.5622	0.0038	0.4569	0.0039	0.4473	0.0024
		0.9410	0.0496	1	0	1	0	1	0
0.65	B			18.39		31.71			
				0.2642	-0.0929	0.0734	-0.0108		
				0.7269	-0.2561	-0.5663	-0.0082		
				0.4600	-0.1602	1	0		
				-0.2115	0.0739	-0.0984	0.0083		
				-0.8748	0.0037	0.5375	0.3557		
				-0.4359	0.0022	-0.8069	-0.5099		
				0.5431	-0.0038	-0.2538	-0.1706		
				1	0	-0.6785	-0.4304		
0.70	A	10.33		17.75		30.87			
		-0.4707	0.0727	0.2463	-0.1086	0.0875	-0.0021		
		-0.7138	0.1703	0.7021	-0.3131	-0.4866	-0.0126		
		-0.9724	0.1229	0.4060	-0.1772	1	0		
		0.3144	0.0711	-0.1962	0.0797	-0.1086	0.0002		
		0.9579	0.0737	-0.8684	-0.0025	0.4028	0.3785		
		1	0	-0.3970	-0.0017	-0.7034	-0.6267		
		-0.7212	-0.0851	0.5344	-0.0002	-0.1828	-0.1709		
		-0.9406	0.0121	1	0	-0.5177	-0.4754		
Modes		1		2		3		5	

Wall 7IT – Pannello rinforzato con tiranti e iniezione

Step [g]		Wall 7IT - Mode Shapes for each Frequency					
		1		2		5	
0.00g	A	10.07		21.20		49.95	
		0.4977	-0.0304	0.2684	0.0007	-0.1310	0.0428
		0.6665	-0.0049	0.6485	0.0058	-0.7169	0.6280
		1	0	1	0	-0.1350	0.2124
		-0.4336	0.0619	-0.2431	-0.0030	0.1788	-0.0739
		-0.6759	-0.0938	-0.6124	-0.2453	1	0
		-0.8903	-0.1687	-0.8424	-0.3309	0.1868	-0.0713
		0.5335	0.0808	0.3862	0.1547	-0.6122	-0.0115
		0.7881	0.1490	0.7427	0.2920	-0.8589	0.0540
0.05g	A			21.91		50.66	
				0.2730	0.0016	-0.1744	-0.1040
				0.6611	0.0042	1	0
				1	0	0.4898	0.1125
				-0.2477	-0.0025	0.1093	0.0962
				-0.6503	-0.1783	-0.8595	-0.4977
				-0.8781	-0.2376	-0.3037	-0.3043
				0.4117	0.1140	0.4489	0.1634
				0.7836	0.2113	0.8318	0.5513
0.10g	A	10.08		21.87			
		0.3843	0.0608	0.2745	-0.0002		
		0.6509	0.0084	0.6632	0.0026		
		1	0	1	0		
		-0.3994	-0.0269	-0.2495	0.0004		
		-0.6490	-0.1628	-0.5830	-0.3378		
		-0.9296	-0.1902	-0.7861	-0.4525		
		0.5314	0.0954	0.3701	0.2139		
		0.8566	0.2068	0.7016	0.4035		
0.15g	A	10.35		21.84			
		0.3967	0.0162	0.2770	-0.0006		
		0.5952	0.0503	0.6679	0.0027		
		1	0	1	0		
		-0.3901	0.0111	-0.2517	0.0005		
		-0.5956	-0.2191	-0.5420	-0.4033		
		-0.8336	-0.2550	-0.7256	-0.5380		
		0.4814	0.1670	0.3438	0.2554		
		0.7435	0.2435	0.6505	0.4817		
0.20g	A	10.14		21.63		49.50	
		0.3519	0.0158	0.2802	-0.0008	0.1950	0.0563
		0.6272	0.0453	0.6735	0.0015	-0.8725	0.4276
		1	0	1	0	-0.4235	0.0680
		-0.3757	-0.0269	-0.2542	0.0010	-0.1464	-0.0709
		-0.5412	-0.0807	-0.6765	-0.1382	1	0
		-0.8876	-0.0521	-0.8980	-0.1827	0.3529	0.1205
		0.4839	0.0930	0.4311	0.0876	-0.4878	0.0781
		0.7938	0.0329	0.8100	0.1632	-0.9870	-0.0710
	Modes	1		2		5	

Step [g]		Wall 7IT - Mode Shapes for each Frequency					
		1		2		5	
0.25g	A	10.19		21.61		47.67	
		0.2799	0.0071	0.2744	0.0006	-0.0909	0.0465
		0.5894	0.0014	0.6785	0.0042	-0.9031	0.3942
		1	0	1	0	-0.1844	0.0467
		-0.3489	0.0079	-0.2500	-0.0003	0.1088	-0.0754
		-0.6754	-0.0317	-0.6796	-0.1453	1	0
		-0.9099	-0.0368	-0.8944	-0.1878	0.1466	0.0234
		0.4683	0.0013	0.4278	0.0914	-0.5813	0.0226
		0.7808	0.0049	0.8118	0.1710	-0.8629	-0.0186
0.30g	A	10.20		21.59		48.68	
		0.3823	0.0561	0.2792	0.0012	-0.2690	-0.2000
		0.6043	0.0427	0.6839	0.0042	1	0
		1	0	1	0	0.4403	0.1682
		-0.4188	-0.0353	-0.2546	-0.0003	0.1885	0.1796
		-0.5934	-0.1101	-0.6381	-0.2845	-0.5679	-0.7972
		-0.8385	-0.1331	-0.8329	-0.3659	-0.0979	-0.4087
		0.4958	0.1112	0.4028	0.1797	0.3398	0.2802
		0.7930	0.1669	0.7590	0.3348	0.4921	0.8558
0.35g	A	10.26		21.44		48.62	
		0.4023	0.0403	0.2787	-0.0003	-0.4422	0.1146
		0.6263	0.0088	0.6922	0.0026	0.6493	-0.5294
		1	0	1	0	0.6019	-0.2581
		-0.3953	-0.0125	-0.2539	0.0016	0.4247	-0.1064
		-0.6948	-0.0901	-0.6792	-0.1841	-0.8258	0.1192
		-0.9570	-0.0878	-0.8746	-0.2357	-0.5600	-0.1069
		0.5245	0.1005	0.4274	0.1156	0.2013	-0.1321
		0.8904	0.0724	0.8064	0.2170	1	0
0.40g	A	10.19		21.43		46.59	
		0.3817	0.0255	0.2795	-0.0006	0.0040	0.0545
		0.6115	0.0397	0.6951	0.0026	-0.4649	0.8795
		1	0	1	0	-0.0904	0.1122
		-0.3975	0.0171	-0.2546	0.0006	0.0206	-0.0790
		-0.6225	-0.1455	-0.6220	-0.3329	1	0
		-0.9001	-0.1561	-0.7971	-0.4256	0.0952	0.0242
		0.4896	0.0788	0.3913	0.2099	-0.5839	0.0186
		0.8017	0.1357	0.7385	0.3933	-0.8718	-0.0076
0.45g	A	10.14		21.34		46.79	
		0.4356	-0.0107	0.2838	-0.0003	-0.0152	0.0702
		0.6349	0.0203	0.6972	0.0029	1	0
		1	0	1	0	0.2063	-0.0485
		-0.4139	0.0581	-0.2575	0.0002	-0.0121	-0.0674
		-0.6566	-0.1635	-0.5949	-0.3857	-0.3326	-0.9309
		-0.9050	-0.1944	-0.7619	-0.4916	-0.0971	-0.1305
		0.5358	0.1068	0.3774	0.2445	0.1568	0.5206
		0.8079	0.1604	0.7064	0.4549	0.3354	0.8218
	Modes	1		2		5	

Step [g]		Wall 7IT - Mode Shapes for each Frequency					
		1		2		5	
0.50g	A	10.26		21.39		46.68	
		0.4343	0.0138	0.2803	0.0006	-0.0316	0.0374
		0.6620	0.0127	0.7004	0.0030	1	0
		1	0	1	0	0.1749	-0.0161
		-0.3943	-0.0070	-0.2551	-0.0003	-0.0112	-0.0350
		-0.6618	-0.0819	-0.6852	-0.1991	-0.8046	-0.5631
		-0.8874	-0.1254	-0.8718	-0.2506	-0.1072	-0.0432
		0.5054	0.0647	0.4310	0.1259	0.4460	0.3283
		0.7935	0.0835	0.8114	0.2332	0.7247	0.5002
0.55g	A	10.38		21.37		46.52	
		0.3965	0.0460	0.2796	0.0006	0.0715	-0.0526
		0.6283	0.0154	0.7042	0.0032	-0.9380	0.3445
		1	0	1	0	-0.1930	0.0801
		-0.4313	-0.0260	-0.2548	-0.0004	-0.0382	0.0413
		-0.6645	-0.0891	-0.7053	-0.1232	1	0
		-0.9332	-0.0508	-0.8914	-0.1535	0.1502	-0.0133
		0.5475	0.0831	0.4426	0.0780	-0.5375	-0.0130
		0.8208	0.0505	0.8344	0.1435	-0.9295	-0.0003
0.60g	A	10.25		21.39		46.46	
		0.4270	0.0304	0.2795	-0.0001	0.0968	-0.0129
		0.6503	0.0157	0.7076	0.0025	-0.9772	0.1459
		1	0	1	0	-0.2042	0.0487
		-0.3983	0.0077	-0.2552	0.0002	-0.0640	0.0128
		-0.6849	-0.0226	-0.7179	-0.0679	1	0
		-0.8854	-0.0125	-0.9024	-0.0844	0.1598	-0.0162
		0.5376	0.0135	0.4507	0.0432	-0.5221	-0.0304
		0.8201	-0.0162	0.8485	0.0787	-0.9363	0.0027
0.65g	A	10.25		21.44		46.28	
		0.4104	0.0134	0.2758	0.0015	-0.0172	0.0317
		0.6348	0.0313	0.7058	0.0051	1	0
		1	0	1	0	0.1629	-0.0308
		-0.3763	-0.0156	-0.2529	-0.0021	-0.0039	-0.0381
		-0.6554	-0.2397	-0.5979	-0.4013	-0.3291	-0.9409
		-0.8393	-0.2408	-0.7548	-0.5014	-0.0618	-0.0934
		0.5000	0.0824	0.3740	0.2524	0.1793	0.5457
		0.8311	0.1886	0.7076	0.4710	0.3314	0.8501
0.70g	A	10.16		21.46		46.09	
		0.4170	0.0728	0.2765	0.0005	0.0035	0.0158
		0.6736	0.0472	0.7136	0.0032	1	0
		1	0	1	0	0.0959	-0.0207
		-0.4138	-0.0200	-0.2533	-0.0003	-0.0124	-0.0149
		-0.6714	-0.0603	-0.6985	-0.2084	-0.8073	-0.5520
		-0.9534	-0.0482	-0.8697	-0.2580	-0.0430	0.0024
		0.5288	0.0612	0.4361	0.1311	0.4702	0.3466
		0.8694	0.0494	0.8227	0.2435	0.7417	0.4701
Modes		1		2		5	

Step [g]		Wall 7IT - Mode Shapes for each Frequency					
		1		2		5	
0.75g	A	9.96		21.29		45.86	
		0.3730	0.0379	0.2857	0.0002	-0.0767	0.0426
		0.5998	0.0316	0.7271	0.0060	1	0
		1	0	1	0	0.1260	-0.2571
		-0.3685	0.0035	-0.2635	0.0002	0.0674	-0.1098
		-0.5761	-0.1476	-0.6781	-0.2805	-0.5376	-0.8181
		-0.8340	-0.1311	-0.8264	-0.3348	-0.1751	0.0455
		0.4844	0.0943	0.4299	0.1787	0.1606	0.5451
		0.7186	0.1393	0.7908	0.3226	0.6215	0.6714
0.75g II	A	10.03		21.26		46.10	
		0.3781	0.0910	0.2818	0.0002	-0.0011	0.1794
		0.5956	0.0319	0.7373	0.0032	1	0
		1	0	1	0	-0.0389	-0.3058
		-0.3946	-0.0130	-0.2594	-0.0002	0.0189	-0.1766
		-0.6509	-0.1016	-0.7254	-0.2245	-0.7845	-0.5338
		-0.9020	-0.0785	-0.8713	-0.2672	-0.0562	0.2436
		0.5536	0.0440	0.4565	0.1421	0.4176	0.5062
		0.8194	0.0541	0.8437	0.2586	0.7816	0.3457
0.75g III	A	10.09		21.26			
		0.3900	0.0127	0.2799	0.0003		
		0.6029	0.0094	0.7385	0.0053		
		1	0	1	0		
		-0.4127	0.0298	-0.2581	-0.0001		
		-0.6474	-0.1971	-0.6114	-0.4529		
		-0.8802	-0.2373	-0.7348	-0.5370		
		0.5061	0.1433	0.3842	0.2851		
		0.7468	0.2239	0.7113	0.5237		
0.75g IV	A	10.39		21.13		46.22	
		0.2919	0.0457	0.2832	0.0001	-0.2171	0.0578
		0.5623	-0.0007	0.7339	0.0043	1	0
		1	0	1	0	0.1785	-0.1280
		-0.2945	-0.0290	-0.2598	-0.0003	0.1974	-0.0887
		-0.6361	-0.0959	-0.7142	-0.2325	-0.7374	-0.6153
		-0.8430	-0.1233	-0.8623	-0.2761	-0.1620	-0.0081
		0.4185	0.0427	0.4521	0.1475	0.3395	0.4237
		0.8103	0.0698	0.8312	0.2677	0.7851	0.5861
0.75g V	A	10.30		21.27			
		0.4093	0.0014	0.2843	0.0005		
		0.6384	0.0222	0.7341	0.0023		
		1	0	1	0		
		-0.3901	0.0163	-0.2616	-0.0004		
		-0.6777	-0.1268	-0.6634	-0.3683		
		-0.8814	-0.1661	-0.7986	-0.4430		
		0.4981	0.0770	0.4205	0.2348		
Modes		1		2		5	

Wall 8IT – Pannello rinforzato con tiranti e iniezione

Step [g]		Wall 8IT - Mode Shapes for each Frequency					
		1		2		5	
0.00g	A	10.87		21.99		48.58	
		0.3639	0.0657	0.2856	0.0003	0.0047	-0.0642
		0.6372	-0.0397	0.6976	0.0044	-0.3563	0.7857
		1	0	1	0	-0.0588	0.1611
		-0.3449	-0.0668	-0.2597	-0.0018	0.0005	0.0294
		-0.6574	-0.1925	-0.6787	-0.3870	1	0
		-0.7553	-0.2407	-0.8223	-0.4604	0.3669	-0.0169
		0.4340	0.1338	0.3954	0.2226	-0.4735	-0.0054
		0.7073	0.2116	0.7528	0.4208	-0.7485	0.0150
0.05g	A	10.41		21.82		48.30	
		0.3659	-0.0168	0.2846	0.0008	-0.0453	-0.0195
		0.6877	-0.0398	0.6949	0.0056	-0.6751	0.5501
		1	0	1	0	-0.0814	0.0881
		-0.2702	-0.0485	-0.2569	-0.0022	0.0432	-0.0126
		-0.6070	-0.0583	-0.7350	-0.2437	1	0
		-0.7416	-0.1870	-0.8957	-0.2870	0.3011	-0.0144
		0.4149	0.0472	0.4301	0.1397	-0.5194	-0.0051
		0.7082	0.1010	0.8189	0.2623	-0.7116	0.0138
0.10g	A	10.11		21.81		48.47	
		0.2098	-0.0807	0.2891	0.0021	0.0833	-0.1421
		0.5448	-0.0249	0.6971	0.0054	-0.8035	0.1706
		1	0	1	0	-0.1522	0.0769
		-0.1393	0.0825	-0.2630	-0.0025	-0.0280	0.0817
		-0.5867	-0.0063	-0.7868	-0.0581	1	0
		-0.7924	-0.0132	-0.9558	-0.0596	0.3630	-0.0689
		0.3275	-0.0117	0.4629	0.0322	-0.4644	-0.0464
		0.7094	0.0100	0.8753	0.0544	-0.7476	0.0472
0.15g	A	10.32		21.74		47.90	
		0.2557	0.0485	0.2844	-0.0007	0.0064	-0.0531
		0.6262	-0.0199	0.7016	0.0040	-0.1910	0.8557
		1	0	1	0	-0.0184	0.1361
		-0.3949	-0.1176	-0.2576	-0.0016	0.0030	0.0182
		-0.6803	-0.2220	-0.6344	-0.4597	1	0
		-0.8322	-0.3471	-0.7686	-0.5469	0.3248	-0.0197
		0.3618	0.1961	0.3707	0.2646	-0.4886	-0.0020
		0.7283	0.2819	0.7055	0.5014	-0.7264	0.0184
0.20g	B	10.27		21.56		46.79	
		0.3745	0.0388	0.2845	-0.0031	0.0856	-0.0300
		0.6961	-0.0469	0.7117	0.0014	-0.4344	0.7791
		1	0	1	0	-0.1403	0.1104
		-0.3116	-0.0802	-0.2586	0.0032	-0.0949	0.0226
		-0.6978	-0.1825	-0.6990	-0.3851	1	0
		-0.8625	-0.2185	-0.8329	-0.4587	0.3753	0.0489
		0.4164	0.1885	0.4062	0.2205	-0.4549	0.0375
		0.7257	0.2232	0.7698	0.4212	-0.7590	-0.0278
	Modes	1		2		5	

Step [g]		Wall 8IT - Mode Shapes for each Frequency					
		1		2		5	
0.25g	B	10.34		21.56		45.32	
		0.3333	0.0203	0.2860	-0.0015	0.0828	-0.0547
		0.6337	-0.0271	0.7344	0.0028	-0.5825	0.6505
		1	0	1	0	-0.1001	0.0845
		-0.4310	-0.0631	-0.2601	0.0004	-0.0910	0.0403
		-0.7116	-0.1037	-0.7602	-0.3294	1	0
		-0.7775	-0.1548	-0.8922	-0.3783	0.3672	0.0276
		0.4330	0.1501	0.4361	0.1853	-0.4349	0.0263
		0.7529	0.1546	0.8302	0.3513	-0.7557	-0.0116
0.30g	A	10.37		21.55		45.31	
		0.3324	-0.0060	0.2801	-0.0001	0.1255	-0.0987
		0.5933	-0.0549	0.7308	0.0041	-0.6889	0.5285
		1	0	1	0	-0.1571	0.1166
		-0.3974	-0.0380	-0.2545	-0.0009	-0.1384	0.0704
		-0.7333	-0.0697	-0.7797	-0.2570	1	0
		-0.8206	-0.0990	-0.9201	-0.2954	0.4413	0.0118
		0.4688	0.0616	0.4455	0.1440	-0.3969	0.0126
		0.7494	0.0920	0.8544	0.2738	-0.8014	-0.0023
0.40g	A	10.14		21.36		42.87	
		0.4341	-0.0039	0.2773	-0.0003	-0.2941	-0.0204
		0.6791	-0.1135	0.7464	0.0062	-0.8673	0.1174
		1	0	1	0	0.2409	0.0072
		-0.5089	0.0043	-0.2515	-0.0009	0.3048	0.0045
		-0.7549	-0.0070	-0.8394	-0.0696	1	0
		-0.9460	0.0314	-0.9790	-0.0698	0.0047	-0.0563
		0.5592	0.0187	0.4739	0.0366	-0.6772	-0.0314
		0.8861	-0.0199	0.9147	0.0664	-0.5303	0.0384
0.45g	A	10.03		21.25		41.82	
		0.3271	0.0392	0.2761	0.0014	-0.1378	0.1838
		0.6062	-0.0112	0.7689	0.0053	-0.5532	0.6837
		1	0	1	0	0.1441	-0.1950
		-0.3807	-0.0551	-0.2523	-0.0019	0.1376	-0.1986
		-0.6033	-0.1689	-0.7778	-0.3865	1	0
		-0.7788	-0.1539	-0.8896	-0.4316	0.0071	0.0080
		0.4239	0.1059	0.4338	0.2132	-0.6531	0.0135
		0.6900	0.1543	0.8410	0.4079	-0.5308	0.0004
0.50g	A	10.32		20.97		40.64	
		0.3761	-0.0131	-0.2730	0.0000	-0.1215	0.0032
		0.6800	-0.1159	-0.7793	-0.0017	-0.8621	0.0111
		1	0	-0.9916	0.0054	0.1742	0.0003
		-0.4582	0.0835	0.2477	0.0003	0.1295	-0.0091
		-0.7667	-0.0548	0.8878	0.0105	1	0
		-0.8322	0.0307	1	0	0.1061	-0.0039
		0.4392	0.0077	-0.4890	-0.0031	-0.5706	0.0030
		0.7843	-0.0254	-0.9486	-0.0008	-0.5884	0.0063
Modes		1		2		5	

Step [g]		Wall 8IT - Mode Shapes for each Frequency					
		1		2		5	
0.55g	B	10.14		20.91		40.13	
		0.4181	0.0330	-0.2271	0.1412	-0.0394	0.0654
		0.6527	-0.0652	-0.6694	0.4118	-0.4328	0.7937
	1	0		-0.8424	0.5225	0.0839	-0.1331
		-0.4341	-0.0251	0.2059	-0.1263	0.0410	-0.0743
		-0.7666	-0.1065	0.9846	0.0230	1	0
		-0.8718	-0.2497	1	0	0.1562	-0.0071
		0.5081	0.1641	-0.4827	-0.0014	-0.5506	0.0020
		0.7987	0.2276	-0.9484	0.0009	-0.6333	0.0094
0.60g	A	10.37		20.83		40.10	
		0.3939	0.0232	-0.2643	0.0218	-0.0782	0.0257
		0.6700	-0.0893	-0.7768	0.0629	-0.8642	0.1499
	1	0		-0.9817	0.0847	0.1495	-0.0311
		-0.4135	-0.0590	0.2397	-0.0182	0.0805	-0.0302
		-0.7622	-0.0084	0.8795	0.0092	1	0
		-0.9824	-0.0701	1	0	0.1408	0.0066
		-0.0010	0.0015	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
		0.8329	0.0354	-0.9487	-0.0001	-0.6106	0.0004
0.65g	A	10.28		20.71		38.22	
		0.4109	-0.0913	-0.2306	0.1177	-0.2410	0.3005
		0.6906	-0.0489	-0.7087	0.3592	-0.5368	0.6306
	1	0		-0.8701	0.4493	0.1266	-0.1579
		-0.3225	-0.0095	0.2101	-0.1063	0.1872	-0.2227
		-0.6091	-0.1111	0.8877	0.0108	1	0
		-0.9275	-0.2255	1	0	-0.1841	0.0249
		0.4869	0.0976	-0.4681	-0.0022	-0.7674	0.0279
		0.7960	0.1573	-0.9528	-0.0005	-0.4148	-0.0131
0.70g	A	10.36		20.71		38.13	
		0.3358	0.0535	-0.2056	0.1510	-0.1455	0.2385
		0.6767	-0.0389	-0.6492	0.4733	-0.3288	0.7867
	1	0		-0.7904	0.5863	0.0686	-0.1887
		-0.5114	0.0962	0.1865	-0.1350	0.0960	-0.1890
		-0.6856	-0.2052	0.8942	0.0096	1	0
		-0.7732	-0.3506	1	0	-0.0814	-0.0365
		0.5044	0.1569	-0.4747	-0.0029	-0.6965	-0.0281
		0.7686	0.2575	-0.9579	-0.0008	-0.4769	0.0225
0.75g	B	10.65		20.16		37.29	
		0.3774	0.0349	-0.2351	0.0476	-0.0052	0.0059
		0.6421	-0.0562	-0.7903	0.1606	-0.8146	0.3277
	1	0		-0.9540	0.1978	0.1020	-0.0425
		-0.3695	-0.0360	0.2118	-0.0421	0.0019	-0.0040
		-0.7790	-0.0248	0.9010	0.0089	1	0
		-0.8044	-0.0789	1	0	0.1803	-0.0003
		0.4751	0.1094	-0.4683	-0.0032	-0.4818	0.0029
		0.7528	0.0951	-0.9635	-0.0005	-0.6396	0.0050
Modes		1		2		5	

Bibliografia

- ABK (1981). “*Methodology for Mitigation of Seismic Hazards in Existing Unreinforced Masonry Buildings: Wall Testing, Out-Of-Plane*. ABK Topical Report 04”. Technical report, El Segundo, California.
- Binda, L., Baronio, G., Penazzi, D., Palma, M., Tiraboschi, C. (1999). “Caratterizzazione di murature in pietra in zona sismica: Data-Base sulle sezioni murarie e indagini sui materiali”. *Atti del IX Convegno Nazionale “L’ingegneria sismica in Italia”* (Torino, 20-23 settembre 1999).
- Bresolato, F. (2008). *Indagini sperimentali con prove soniche su murature in pietra consolidate mediante iniezioni: Controllo dell’efficacia dell’intervento di iniezione*. MSc Thesis, Facoltà di Ingegneria, Università di Padova. Supervisor: Valluzzi, M.R., Modena, C.
- Cunha, A., Caetano, E., Magalhães, F., Moutinho, C. (2006). “From input-output to output-only modal identification of civil engineering structures”. Technical report, Structural Assessment Monitoring and Control (SAMCO) Final Report 2006 - F11 Selected Papers.
- Da Porto, F. (2000). *Indagini sperimentali sull’efficacia di tecniche di consolidamento di murature storiche in pietra*. Master’s Thesis, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Padova.
- Dal Pont (2009). *Sperimentazione dinamica su modelli di edificio in pietra per la valutazione dell’efficacia del consolidamento mediante iniezioni*. MSc Thesis, Facoltà di Ingegneria, Università di Padova, Supervisore: Valluzzi, M.R.
- De Stefano, A., Clemente, P. (2006). “SHM on Historical Heritage: Robust Methods to Face Large Uncertainties”. Technical report, Structural Assessment Monitoring and Control (SAMCO) Final Report 2006 - F11 Selected Papers.
- Elmenschawi, A., Sorour, M., Mufti, A., Jaeger, L.G., Shrive, N. (2010). “*Damping mechanisms and damping ratios in vibrating unreinforced stone masonry*”. In *Engineering Structures*, **32**, pp.3269-3278.
- Elmenschawi, A., Duchesne, D., Paquette, J., Mufti, A., Jaeger, L., Shrive, N. (2011). “Elastic moduli of stone masonry based on static and dynamic tests”. *Atti del “11th North American Masonry Conference (NAMC)”* (Minneapolis, 5-8 Giugno 2011), Minnesota, USA.

- Ewins, D.J. (1984). *Modal Testing: Theory and practice*. Taunton, Research Studies, pp.313.
- Giuffrè, A. (1990). *Lecture sulla meccanica delle murature storiche*. Roma, Kappa, pp.84.
- Giuffrè, A., Baggio, C., Carocci, C. (1993). *Sicurezza e conservazione dei centri storici: il caso Ortigia*. Roma-Bari, Laterza, pp.279.
- Goodwin, C., Tonks, G., Ingham, J.M. (2011). "Retrofit techniques for seismic improvement of URM buildings". In *Journal of the Structural Engineering Society New Zealand.*, **24**(1), pp.30-45.
- Griffith, M.C., Lam, N.T.K., Wilson, J.L., Doherty, K. (2004). "Experimental investigation of unreinforced brick masonry walls in flexure". In *Journal of Structural Engineering*, **130**(3), pp.423-432.
- Griffith, M.C., Magenes, G., Melis, G., Picchi, L. (2003). "Evaluation of out-of-plane stability of unreinforced masonry walls subjected to seismic excitation". In *Journal of Earthquake Engineering*, **7**(1), pp.141-169.
- Ismail, N., Laursen, P., Ingham, J.M. (2009). "Out-of-Plane Testing of Seismically Retrofitted URM Walls using Posttensioning". *Atti della XVIII conferenza annuale "Australian Earthquake Engineering Society (AEES)"* (Newcastle, 11-13 Dicembre 2009), New South Wales, Australia.
- Mannoni, T., Cicirello, C. (1997). "Atlante dei tipi costruttivi murari dell'Italia settentrionale". *Atti del II Seminario Nazionale di Studio "La protezione del patrimonio culturale: la questione sismica"* (Roma, 9-10 Aprile 1997), a cura di R. Ballardini, Roma, Gangemi ed., pp.182.
- Mazzon, N. (2010). *Influence of grout injection on the dynamic behaviour of stone masonry buildings*. Ph.D. Thesis, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Padova.
- Meisl, C.S., Elwood, K.J., Mattman, D.W., Ventura, C.E. (2006). "Out-of-plane seismic performance of unreinforced clay brick masonry walls". *Atti del "8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering (NCEE)"* (San Francisco, 18-22 Aprile 2006), California, USA.
- Modena, C., Pineschi, F., Valluzzi, M.R. (2000). *Valutazione della vulnerabilità sismica di alcune classi di strutture esistenti. Sviluppo e valutazione di metodi di rinforzo*. Roma, CNR/GNDT, pp.89.
- Modena, C., Franchetti, P., Zonta, D., Menga, R., Pizzigalli, E., Ravasio, F., Muti, M., Meloni, R., Bordone, G. (2001). "Static and dynamic analyses of Maniace Castle in Siracusa-Sicily". *Atti del "3rd International Seminar on Historical Constructions (ISHC)"* (Guimarães, 7-9 Novembre 2001), Portugal, pp.933-942.
- Munari, M. (2010). *Sviluppo di procedure per valutazioni sistematiche di vulnerabilità sismica di edifici esistenti in muratura*. Ph.D. Thesis, Università degli Studi di Padova.

- Paolozzi, A., Gasbarri, P. (2006). Dynamic Analysis with Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring. In *Multifunctional Structures Integration of Sensors and Antennas*. Meeting Proceedings RTO-MP-AVT-141, Paper 9, pp.9.1-9.24. Neuilly-sur-Seine, France.
- Pappas, A. (2011). *Calibration of the numerical material behaviour of multi-leaf stone masonry walls based on experimental results*. Master Thesis SAHC (Structural Analysis of monuments and Historical Constructions). Supervisore: Valluzzi, M.R.
- Pasin, N. (2008). *Indagini sperimentali con prove soniche su murature in pietra consolidate mediante iniezioni: Verifica dell'iniettabilità della muratura*. MSc Thesis, Facoltà di Ingegneria, Università di Padova. Supervisor: Valluzzi, M.R., Modena, C.
- Peeters, B., De Roeck, G. (1999). "Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis". In *Mechanical Systems and Signal Processing*, **13**(6), pp.855-878.
- Penna, A., Galasco, A., Magenes, G. (2007). "Selezione dell'accelerogramma da utilizzare per la prova su tavola vibrante". Technical report, Università di Pavia. Allegato 4.2-UR01-1.
- Pigouni, A.E. (2011). *Experimental study on the effectiveness of the grout technique on three-leaf stone masonry walls*. Master Thesis SAHC (Structural Analysis of monuments and Historical Constructions). Supervisore: Valluzzi, M.R.
- Ramos, J.L. (2007). *Damage identification on masonry structures based on vibration signatures*. Ph.D. Thesis, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- Ramos, J.L., Lourenço, P., Costa, A. (2005). "Operational modal analysis for damage detection of a masonry construction". *Atti del "1st International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC)"*(Copenhagen, 26-27 Aprile 2005), Denmark, pp.495-502.
- Reynders, E., De Roeck, G. (2008). Reference-based combined deterministic–stochastic subspace identification for experimental and operational modal analysis. In *Mechanical Systems and Signal Processing*, **22**, pp.617-637
- Reynders, E., Degrauwe, D., De Roeck, G., P.E., M.ASCE, Magalhães, F., Caetano, E. (2010). "Combined Experimental-Operational Modal Testing of Footbridges". In *Journal of Engineering Mechanics*, **136**(6), pp.687-696.
- Reynders, E., Schevenels, M., De Roeck, G. (2011). "*MACEC 3.2: a Matlab toolbox for experimental and operational modal analysis. User's manual*". Kasteelpark Arenberg, Leuven, Belgium (<http://bwk.kuleuven.be/bwm/macec>).
- Rocchi, P. (2008). *Atlante del consolidamento degli edifici storici*. Bologna, Proctor, **1**, pp.509.
- Simsir, C.C., Aschheim, M.A., Abrams, D.P. (2004). "Out-of-plane dynamic response of unreinforced masonry bearing walls attached to flexible diaphragms". *Atti della "XIII World Conference on Earthquake Engineering (WCEE)"*, (Vancouver, 1-6 Agosto 2004) Canada, pp.2045.

- Tomažević, M. (2009). "Shear Resistance of Masonry Walls and Eurocode 6: Shear versus Tensile Strength of Masonry," In *Materials and Structures*, **42**(7), pp.889-907.
- Trifunac, M.D., Ivanović, S.S. (2003). "Re-occurrence of site-specific response in former Yugoslavia - part 1: Montenegro". In *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **23**, pp.637-661.
- Valluzzi, M.R. (2000). *Comportamento meccanico di murature consolidate con materiali e tecniche a base di calce*. Ph.D. Thesis, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Padova.
- Valluzzi, M.R., Michielon, E., Modena, C., Binda, L. (2001). "Modellazione del comportamento di edifici in muratura sotto azioni sismiche: l'esperienza Umbria-Marche". *Atti del X Congresso Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia"*, (Potenza-Matera, 9-13 Settembre 2001).
- Valluzzi, M.R., da Porto, F., Modena, C. (2004). "Behavior and modeling of strengthened three-leaf stone masonry walls". In *Materials and Structures*, **37**, pp.184-192.
- Valluzzi, M.R., Mazzon, N., Munari, M., Casarin, F., Modena, C. (2009). "Effectiveness of injections evaluated by sonic tests on reduced scale multi-leaf masonry building subjected to seismic actions". *Atti del "7th International Symposium on Non Destructive Testing in Civil Engineering (NDTCE)"* (Nantes, 30 Giugno-03 Luglio 2009), France, pp. 677-682.
- Van Overschee, P., De Moor, B. (1998). *Subspace identification for linear system - Theory, implementation, applications*. Kluwer Academic Publisher, pp.254.
- Varela-Rivera, J.L., Navarrete-Macias, D., Fernandez-Baqueiro, L.E., Moreno, E.I.(2011). "Out-of-plane behaviour of confined masonry walls". In *Engineering Structures*, **33**, pp.1734-1741.
- Vincenzi, L. (2007). *Identificazione dinamica delle caratteristiche modali e delle proprietà meccaniche di strutture mediante algoritmi di ottimizzazione*. Ph.D. Thesis, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Bologna.
- Vintzileou, E.N. (2007). "Iniezione di malta liquida in muratura a cassetta: risultati sperimentali e previsione delle caratteristiche meccaniche". *Atti del Seminario CIAS "Evoluzione nella sperimentazione per le costruzioni"* (Cipro, 21-28 Aprile 2007), pp.191-211.
- Wilhelm, M., Mojsilovic, N., Dazio, A. (2007). "Out-of-plane shaking table tests on unreinforced masonry walls". *Atti del "10th North American Masonry Conference (NAMC)"* (St. Louis, 3-6 Giugno 2007), Missouri, USA.

Sitografia

- “Centro Ricerche ENEA, Roma”: www.enea.it
- “Centro Ricerche ENEA (La Casaccia), Roma”: www.casaccia.enea.it
- “Consorzio ReLUIS (Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica), Napoli”: www.reluis.it
- “Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Roma”: www.ingv.it
- “Progetto NIKER (New Integrated Knowledge based approaches to the protection of cultural heritage from Earthquake-induced Risk), Padova”: www.niker.eu
- “Tassullo SpA, Trento”: www.tassullo.it

Normativa di riferimento

CEN (2005). *Eurocode 6 - Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures*. EN 1996-1-1:2005. Brussels.

Circolare M.LL.PP. 30/07/1981 n.21745. *Istruzioni relative alla normativa tecnica per la riparazione ed il rafforzamento degli edifici in muratura danneggiati dal sisma*. Ministero dei Lavori Pubblici, G.U./1981.

Circolare M.II.TT. 02/02/2009 n.617. *Istruzioni per l'applicazione delle nuove "Norme Tecniche per le Costruzioni"*. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Suppl. Ord. n.27 alla G.U. n.47/2009.

D.I. 23/05/2005. *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni*. Decreto Interministeriale, G.U./2006.

D.M.LL.PP. 24/01/1986. *Norme tecniche relative alle costruzioni antisismiche*. Ministero dei Lavori Pubblici, G.U. n. 108/1986.

D.M.LL.PP 16/1/1996. *Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche*. Ministero dei Lavori Pubblici, Suppl. Ord. alla G.U. n.29/1996.

D.M.II.TT. 14/01/2008. *NTC 2008 - Norme Tecniche per le Costruzioni*. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, G.U. n.29/2008.

DPCM 12/10/2007. *Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale*. Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri, G.U. n.24/2007.

DPCM 09/02/2011. *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale allineate alle nuove "Norme Tecniche per le Costruzioni"*. Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri, G.U. n.47/2011.

OPCM 3274. *Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica*. Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri, Suppl. Ord. n.105 alla G.U./2003.

OPCM 3431. *Ulteriori modifiche ed integrazioni all'OPCM 3274/2003*. Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri, Suppl. Ord. alla G.U. n.107/2005.

- UNI EN 1015-11. *Metodi di prova per malte per opere murarie. Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita.* UNI, 2007.
- UNI EN 12372. *Metodi di prova per pietre naturali. Determinazione della resistenza a flessione sotto carico concentrato.* UNI, 2007.
- UNI EN 12390-1. *Prova sul calcestruzzo indurito. Forma, dimensioni ed altri requisiti per provini e per casseforme.* UNI, 2002.
- UNI EN 12390-2. *Prova sul calcestruzzo indurito. Confezione e stagionatura dei provini per prove di resistenza.* UNI, 2002.
- UNI EN 12390-3. *Prova sul calcestruzzo indurito. Resistenza alla compressione dei provini.* UNI, 2003.
- UNI EN 12390-4. *Prova sul calcestruzzo indurito. Resistenza alla compressione. Specifiche per macchine di prova.* UNI, 2002.
- UNI EN 12390-6. *Prova sul calcestruzzo indurito. Resistenza a trazione indiretta dei provini.* UNI, 2002.
- UNI EN 14580. *Metodi di prova per pietre naturali. Determinazione del modulo elastico statico.* UNI, 2005.
- UNI EN 1926. *Metodi di prova per pietre naturali. Determinazione della resistenza a compressione uniassiale.* UNI, 2007.
- UNI EN 1936. *Metodi di prova per pietre naturali. Determinazione della massa volumica reale ed apparente e della porosità totale e aperta.* UNI, 2007.

Indice delle Tabelle

Tab 1: Programma sperimentale del progetto di ricerca e collaborazione tra l'Università di Padova, Tassullo SpA ed il Centro Ricerche ENEA di Roma ("La Casaccia"), nell'ambito del consorzio nazionale ReLUIIS (Rete Laboratori Università di Ingegneria Sismica).	IX
Tab 1.1: Criteri di stabilità per l'individuazione dei modi strutturali. [Vincenzi, 2007].....	46
Tab 2.1: Caratteristiche meccaniche della malta di allettamento. [Mazzon, 2010].....	53
Tab 2.2: Caratteristiche meccaniche delle pietre. [Mazzon, 2010].....	54
Tab 2.3: Caratteristiche meccaniche della malta di iniezione a sinistra, e del composto malta d'iniezione e frammenti di pietra a destra. [Mazzon, 2010]	55
Tab 2.4: Caratteristiche del pannello 1-URM.....	57
Tab 2.5: Caratteristiche del pannello 2-URM.....	58
Tab 2.6: Caratteristiche del pannello 3T.....	59
Tab 2.7: Caratteristiche del pannello 4T.....	60
Tab 2.8: Caratteristiche del pannello 5I.....	61
Tab 2.9: Caratteristiche del pannello 6I.....	62
Tab 2.10: Caratteristiche del pannello 7IT.....	63
Tab 2.11: Caratteristiche del pannello 8IT.....	64
Tab 2.12: Percentuali medie di parte solida, vuota e iniettata, per ciascun campione.	65
Tab 2.13: Stima della percentuale di volume iniettata sulla base dell'incremento di massa.....	66
Tab 2.14: Caratteristiche della tavola vibrante. [Mazzon, 2010].....	71
Tab 3.1: Pannello 1-URM. Accelerazione al suolo nominale e reale, frequenza di acquisizione, deviazione standard e coefficiente di variazione, forza agente.	79
Tab 3.2: Pannello 1-URM. Spostamenti ultimi, assoluti e relativi, registrati dai sensori analogici in mezzeria e in sommità durante ogni singola prova. Valori in mm.....	84
Tab 3.3: Pannello 2-URM. Accelerazione al suolo nominale e reale, frequenza di acquisizione, deviazione standard e coefficiente di variazione, forza agente.	86
Tab 3.4: Pannello 2-URM. Spostamenti ultimi, assoluti e relativi, registrati dai sensori analogici in mezzeria e in sommità durante ogni singola prova. Valori in mm.....	91
Tab 3.5: Pannello 3T. Accelerazione al suolo nominale e reale, frequenza di acquisizione, deviazione standard e coefficiente di variazione, forza agente.	93
Tab 3.6: Pannello 3T. Spostamenti ultimi, assoluti e relativi, registrati dai sensori analogici in mezzeria e in sommità durante ogni singola prova. Valori in mm.....	101
Tab 3.7: Pannello 3T. Deformazioni assolute e relative, registrate dai sensori FBG nei tiranti, durante ogni singola prova. Il valor medio è calcolato tra i dati assoluti.	103
Tab 3.8: Pannello 3T. Tensioni assolute e relative, registrate dai sensori FBG nei tiranti, durante ogni singola prova. Il valor medio è calcolato tra i dati assoluti.....	104
Tab 3.9: Pannello 4T. Accelerazione al suolo nominale e reale, frequenza di acquisizione, deviazione standard e coefficiente di variazione, forza agente.	105

Tab 3.10: Pannello 4T. Spostamenti ultimi, assoluti e relativi, registrati dai sensori analogici in mezzeria e in sommità durante ogni singola prova. Valori in mm.	111
Tab 3.11: Pannello 4T. Deformazioni assolute e relative, registrate dai sensori FBG nei tiranti, durante ogni singola prova. Il valor medio è calcolato tra i dati assoluti.	113
Tab 3.12: Pannello 4T. Tensioni assolute e relative, registrate dai sensori FBG nei tiranti, durante ogni singola prova. Il valor medio è calcolato tra i dati assoluti.	114
Tab 3.13: Pannello 5I. Accelerazione al suolo nominale e reale, frequenza di acquisizione, deviazione standard e coefficiente di variazione, forza agente.....	115
Tab 3.14: Pannello 5I. Spostamenti ultimi, assoluti e relativi, registrati dai sensori analogici in mezzeria e in sommità durante ogni singola prova. Valori in mm.	122
Tab 3.15: Pannello 6I. Accelerazione al suolo nominale e reale, frequenza di acquisizione, deviazione standard e coefficiente di variazione, forza agente.....	124
Tab 3.16: Pannello 6I. Spostamenti ultimi, assoluti e relativi, registrati dai sensori analogici in mezzeria e in sommità durante ogni singola prova. Valori in mm.	133
Tab 3.17: Pannello 7IT. Accelerazione al suolo nominale e reale, frequenza di acquisizione, deviazione standard e coefficiente di variazione, forza agente.....	135
Tab 3.18: Pannello 7IT. Spostamenti ultimi, assoluti e relativi, registrati dai sensori analogici in mezzeria e in sommità durante ogni singola prova. Valori in mm.	145
Tab 3.19: Pannello 7IT. Deformazioni assolute e relative, registrate dai sensori FBG nei tiranti, durante ogni singola prova. Il valor medio è calcolato tra i dati assoluti.	147
Tab 3.20: Pannello 7IT. Tensioni assolute e relative, registrate dai sensori FBG nei tiranti, durante ogni singola prova. Il valor medio è calcolato tra i dati assoluti.	147
Tab 3.21: Pannello 7IT. Accelerazione al suolo nominale e reale, frequenza di acquisizione, deviazione standard e coefficiente di variazione, forza agente.....	148
Tab 3.22: Pannello 8IT. Spostamenti ultimi, assoluti e relativi, registrati dai sensori analogici in mezzeria e in sommità durante ogni singola prova. Valori in mm.	156
Tab 3.23: Pannello 8IT. Deformazioni assolute e relative, registrate dai sensori FBG nei tiranti, durante ogni singola prova. Il valor medio è calcolato tra i dati assoluti.	158
Tab 3.24: Pannello 8IT. Tensioni assolute e relative, registrate dai sensori FBG nei tiranti, durante ogni singola prova. Il valor medio è calcolato tra i dati assoluti.	159
Tab 3.25: PGA effettivi sviluppati dalla tavola dinamica su ciascun pannello testato.....	161
Tab 3.26: Forze agenti su ciascun pannello durante l'evento sismico simulato in laboratorio ENEA.....	163
Tab 3.27: Spostamenti ultimi assoluti rilevati, su ciascun pannello, dai sensori analogici di mezzeria. Si considera il valore medio tra i sensori P3 e P4, il dato positivo indica un'apertura dei paramenti.	164
Tab 3.28: Spostamenti ultimi assoluti rilevati, su ciascun pannello, dal sensore analogico in sommità. P5 è ortogonale al movimento della tavola vibrante, il verso positivo indica un'abbassamento.....	166
Tab 3.29: Deformazioni medie assolute registrate sui tirantini dai sensori FBG.....	167
Tab 3.30: Tensioni medie assolute stimate sui tirantini relazionando la deformazione con il modulo elastico dell'acciaio.....	168
Tab 4.1: Collegamenti e superfici definiti tra i nodi della configurazione geometrica usata in MACEC 3.2.	170
Tab 4.2: Pannello 1-URM. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori delle frequenze.	174
Tab 4.3: Pannello 1-URM. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori dei rapporti di smorzamento.	174
Tab 4.4: Pannello 2-URM. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori delle frequenze.	179
Tab 4.5: Pannello 2-URM. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori dei rapporti di smorzamento.	180

Tab 4.6: Pannello 3T. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori delle frequenze.....	187
Tab 4.7:Pannello 3T. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori dei rapporti di smorzamento.....	187
Tab 4.8: Pannello 4T. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori delle frequenze.....	191
Tab 4.9:Pannello 4T. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori dei rapporti di smorzamento.....	192
Tab 4.10: Pannello 5I. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori delle frequenze.....	198
Tab 4.11:Pannello 5I. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori dei rapporti di smorzamento.....	198
Tab 4.12: Pannello 6I. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori delle frequenze.....	202
Tab 4.13:Pannello 6I. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori dei rapporti di smorzamento.....	203
Tab 4.14: Pannello 7IT. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori delle frequenze.....	209
Tab 4.15: Pannello 7IT. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: rapporti di smorzamento.....	210
Tab 4.16: Pannello 8IT. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori delle frequenze.....	214
Tab 4.17:Pannello 8IT. Forme modali stabili identificate con Macec 3.2: valori dei rapporti di smorzamento.....	214
Tab 4.18: Pannelli non iniettati. Valori dei parametri modali nella prima frequenza identificata.....	223
Tab 4.19: Pannelli non iniettati. Valori dei parametri modali nella seconda frequenza identificata.....	224
Tab 4.20: Pannelli non iniettati. Valori dei parametri modali nella terza frequenza identificata.....	226
Tab 4.21: Pannelli non iniettati. Valori dei parametri modali nella quarta frequenza identificata.....	227
Tab 4.22: Pannelli non iniettati. Valori dei parametri modali nella quinta frequenza identificata.....	229
Tab 4.23: Pannelli non iniettati. Valori dei parametri modali nella sesta frequenza identificata.....	230
Tab 4.24: Pannelli iniettati. Valori dei parametri modali nella prima frequenza identificata.....	232
Tab 4.25: Pannelli iniettati. Valori dei parametri modali nella seconda frequenza identificata.....	233
Tab 4.26: Pannelli iniettati. Valori dei parametri modali nella terza frequenza identificata.....	235
Tab 4.27: Pannelli iniettati. Valori dei parametri modali nella quinta frequenza identificata.....	236

Indice delle Figure

Fig 1.1: Quadro schematico delle principali linee di faglia che attraversano il Mediterraneo e che delimitano la placca africana e quella euroasiatica.	18
Fig 1.2: Morfologia di murature in pietra in sezione: singole e multistrato. [Binda et al., 1999].....	19
Fig 1.3: Alcuni dei meccanismi nel piano osservati nel centro storico de L'Aquila a seguito del sisma del 6 Aprile 2009. [Munari, 2010].....	20
Fig 1.4: Alcuni dei meccanismi fuori-piano di murature multistrato in pietra, osservati nel centro storico di Castelnuovo (AQ) a seguito del sisma del 6 Aprile 2009. [Mazzon, 2010].....	21
Fig 1.5: Collasso fuori-piano (a sinistra) e modelli semplificati (a destra) per murature in pietra multistrato. [Giuffrè et al., 1993].....	21
Fig 1.6: Disposizione dei fori per l'iniezione di miscele. [Modena et al., 2000].....	23
Fig 1.7: Schema di iniezione per pressione. [Modena et al., 2000].....	24
Fig 1.8: Impiego di tirantini antiespulsivi in muratura a più paramenti. [Rocchi, 2008].....	25
Fig 1.9: Allestimento sperimentale (a sinistra) e localizzazione dei sensori (a destra). [ABK, 1981].....	28
Fig 1.10: Configurazione sperimentale (sinistra) e alcuni risultati (destra). [Griffith et al., 2004].....	29
Fig 1.11: Allestimento di prova e dettaglio del supporto in sommità. [Wilhelm et al., 2007].....	30
Fig 1.12: Campioni di prova e schemi delle sezioni con individuazione dei sistemi di rinforzo utilizzati per collegare i paramenti. [Elmenschawi et al., 2010].....	31
Fig 1.13: Configurazioni delle prove nel piano e fuori-piano. Posizionamento dei sensori (sinistra) e del pannello (destra) su tavola vibrante, vincolato alla base e in sommità. [Elmenschawi et al., 2010].....	32
Fig 1.14: Dettagli dell'ancoraggio finale della barra di post-tensionamento. [Ismail et al., 2009].....	34
Fig 1.15: Configurazione di prova. [Ismail et al., 2009].....	34
Fig 1.16: Sezione trasversale delle tipologie di campioni utilizzati nello studio di Tu et al. [2010].	35
Fig 1.17 Dettaglio della connessione tra i pannelli e il telaio in c.a. [Tu et al., 2010].....	35
Fig 1.18: Campione B1, allestimento della prova su tavola vibrante. [Tu et al., 2010].....	36
Fig 1.19: Allestimento di prova. In alto a sinistra la disposizione dei sensori di spostamento; a destra il campione con tre (in alto) e con quattro (in basso) supporti. [Varela-Rivera et al., 2011].....	36
Fig 1.20: Configurazione di prova: schema e modello reale su tavola vibrante. [Simsir et al., 2004].....	37
Fig 1.21: Risultati in termini di frequenza e di forme modali dei pannelli murari - serie A. [Ramos, 2007].....	38
Fig 1.22: Accelerometro Piezoelettrico: (a) sezione trasversale; (b) PCB Model 393B12. [Ramos, 2007].....	40
Fig 1.23: Accelerometro Capacitivo: (a) sezione trasversale; (b) PCB Model 3703. [Ramos, 2007].....	41
Fig 1.24: Force-balance accelerometer: (a)mass-spring system in its equilibrium position; (b)deformation due to an applied acceleration; and (c)GEOSIG model AC-63. [Ramos, 2007].....	41
Fig 1.25: Schema della tecnica di identificazione di input-output. [Ramos, 2007].....	43
Fig 1.26: Dispositivi per la messa in vibrazione delle strutture. [Cunha et al., 2006].....	43

Fig 1.27: Schema della tecnica di identificazione di output-only. [Ramos, 2007].....	44
Fig 1.28: Esempio di diagramma di stabilizzazione. [Reynders e De Roeck, 2008].....	46
Fig 2.1: Schema geometrico dei pannelli con relativi acronimi e dimensioni. [Mazzon, 2010]	50
Fig 2.2: Stato di avanzamento con dettaglio della sezione trasversale del muro durante la costruzione. ..	51
Fig 2.3: Taglio e movimentazione dei pannelli.	51
Fig 2.4: A sinistra esecuzione dei fori e dell'iniezione di malta a base di calce idraulica naturale; a destra dettaglio della sezione post-iniezione, durante il taglio dei pannelli.	52
Fig 2.5: Prospetto anteriore del muro completo, a seguito del taglio dei pannelli.	52
Fig 2.6: Prove a flessione e a compressione sui provini di malta T30V. [Mazzon, 2010].....	53
Fig 2.7: Determinazione del Modulo Elastico e della Resistenza a flessione e a compressione nei provini di pietra calcarea di Cugnano (BL). [Mazzon, 2010].....	54
Fig 2.8: Determinazione del Modulo Elastico e della Resistenza a flessione e a compressione nei provini di malta per iniezione FEN-X/b. [Mazzon, 2010].....	55
Fig 2.9: Preparazione del provino e prove a trazione indiretta e a compressione. [Mazzon, 2010].....	55
Fig 2.10: Posizionamento dei tiranti nella muratura: a sinistra vista esterna, a destra vista in sezione a seguito del collasso.	56
Fig 2.11: Pannello 1-URM. Rilievo pre-prova: sezione B-B' sx, prospetto frontale, sezione A-A' dx.	57
Fig 2.12: Pannello 2-URM. Rilievo pre-prova: sezione B-B' sx, prospetto frontale, sezione A-A' dx. L'area iniettata è indicata con una polilinea rossa.....	58
Fig 2.13: Pannello 3T. Rilievo pre-prova: sezione B-B' sx, prospetto frontale, sezione A-A' dx. L'area iniettata è indicata con una polilinea rossa.	59
Fig 2.14: Pannello 4T. Rilievo pre-prova: sezione B-B' sx, prospetto frontale, sezione A-A' dx. L'area iniettata è indicata con una polilinea rossa.	60
Fig 2.15: Pannello 5I. Rilievo pre-prova: sezione B-B' sx, prospetto frontale, sezione A-A' dx. L'area iniettata è indicata con una polilinea rossa.	61
Fig 2.16: Pannello 6I. Rilievo pre-prova: sezione B-B' sx, prospetto frontale, sezione A-A' dx. L'area iniettata è indicata con una polilinea rossa.	62
Fig 2.17: Pannello 7IT. Rilievo pre-prova: sezione B-B' sx, prospetto frontale, sezione A-A' dx. L'area iniettata è indicata con una polilinea rossa.	63
Fig 2.18: Pannello 8IT. Rilievo pre-prova: sezione B-B' sx, prospetto frontale, sezione A-A' dx. L'area iniettata è indicata con una polilinea rossa.	64
Fig 2.19: Percentuali medie di parte solida, vuota e iniettata, per ciascun campione, con indicazione in rosso del livello stabilito di parte solida (90%) da programma sperimentale.....	65
Fig 2.20: Confronto tra i valori calcolati in Tab 2.13 e quelli approssimati in Tab 2.12 relativi alla percentuale di parte iniettata in ciascun campione. L'area tratteggiata indica l'intervallo di valori previsti da programma sperimentale corrispondenti a 10-15%.	66
Fig 2.21: Accelerogramma registrato durante il sisma del Montenegro nelle direzioni X (sx) e Y (dx). ..	67
Fig 2.22: Spettri di risposta normalizzati per il set di registrazioni selezionato. [Penna et al., 2007].....	68
Fig 2.23: A sinistra: localizzazione dei due principali eventi sismici avvenuti nel 1979 in Montenegro (15 Aprile con $M_L=6.8$; e 24 Maggio con $M_L=6.4$) e delle scosse di assestamento. A destra: approssimazione del picco di velocità al suolo durante l'evento principale, con indicazione della velocità massima registrata a terra in cm/s, nella rispettiva stazione. [Trifunac e Ivanović, 2003]	68
Fig 2.24: Schema statico di progetto.....	69
Fig 2.25: Geometria del telaio di acciaio utilizzato nelle prove dinamiche.	70
Fig 2.26: Sistema di fissaggio del pannello al telaio posizionato sulla tavola vibrante.	70
Fig 2.27: A sinistra Laboratorio di Dinamica Strutturale e Controllo delle Vibrazioni del Centro Ricerche ENEA "La Casaccia", Roma. A destra schema funzionale della tavola vibrante.....	71

Fig 2.28: Trasduttori di accelerazione utilizzati nella sperimentazione.	72
Fig 2.29: Trasduttori di spostamento (in alto) e marker (in basso).	73
Fig 2.30: Esempi di sensori in fibra ottica a reticolo di Bragg (Fibre Bragg Grating, FBG).	73
Fig 2.31: Definizione del sistema di riferimento cartesiano, per l'individuazione del verso e della direzione dei trasduttori e dell'input sismico.	74
Fig 2.32: Disposizione dei sensori nei pannelli URM (1 e 2).	75
Fig 2.33: Disposizione dei sensori nei pannelli SM (3T, 4T, 5I, 6I, 7IT e 8IT)	75
Fig 3.1: Pannello 1-URM. Rilievo geometrico con indicazione della posizione e della nomenclatura dei sensori e del quadro fessurativo pre-prova.	80
Fig 3.2: Pannello 1-URM. Rilievo fotografico del fronte e del quadro fessurativo pre-prova.	81
Fig 3.3: Pannello 1-URM. Analisi del quadro fessurativo e dell'azione sismica per ogni prova effettuata in laboratorio ENEA. A sinistra: grafico dei fattori di amplificazione.	83
Fig 3.4: Pannello 1-URM. Rilievo fotografico del collasso, 0.35g (fronte-sezione B-B'-retro).	83
Fig 3.5: Pannello 1-URM. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con il PGA, ad ogni prova di laboratorio.	84
Fig 3.6: Pannello 1-URM. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con la forza agente, ad ogni prova di laboratorio.	85
Fig 3.7: Pannello 1-URM. Confronto tra gli spostamenti ultimi assoluti e relativi, registrati in mezzeria dai sensori analogici. Da sinistra: spostamenti del sensore P4 (di sinistra) e del sensore P3 (di destra).	85
Fig 3.8: Pannello 2-URM. Rilievo geometrico con indicazione della posizione e della nomenclatura dei sensori e del quadro fessurativo pre-prova.	87
Fig 3.9: Pannello 2-URM. Analisi del quadro fessurativo e dell'azione sismica per ogni prova effettuata in laboratorio ENEA. A sinistra: grafico dei fattori di amplificazione.	89
Fig 3.10: Pannello 2-URM. Fattori di amplificazione delle accelerazioni calcolati sulla base dei dati registrati dai sensori accelerometrici in laboratorio ENEA.	89
Fig 3.11: Pannello 2-URM. Rilievo fotografico del collasso, 0.25g (fronte-retro).	90
Fig 3.12: Pannello 2-URM. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con il PGA, ad ogni prova di laboratorio.	91
Fig 3.13: Pannello 2-URM. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con la forza agente, ad ogni prova di laboratorio.	91
Fig 3.14: Pannello 2-URM. Confronto tra gli spostamenti ultimi assoluti e relativi, registrati in mezzeria dai sensori analogici. Da sinistra: spostamenti del sensore P4 (di sinistra) e del sensore P3 (di destra).	92
Fig 3.15: Pannello 3T. Rilievo geometrico con indicazione della posizione e della nomenclatura dei sensori e del quadro fessurativo pre-prova.	94
Fig 3.16: Pannello 3T. Analisi del quadro fessurativo e dell'azione sismica per ogni prova effettuata in laboratorio ENEA. A sinistra: grafico dei fattori di amplificazione.	98
Fig 3.17: Pannello 3T. Fattori di amplificazione delle accelerazioni calcolati sulla base dei dati registrati dai sensori accelerometrici in laboratorio ENEA.	99
Fig 3.18: Pannello 3T. Rilievo fotografico del collasso, particolari del tirantino e del basamento.	99
Fig 3.19: Pannello 3T. Rilievo fotografico del collasso, 0.60g (fronte-sezione B-B'-retro).	100
Fig 3.20: Pannello 3T. Rilievo fotografico effettuato in seguito alla seconda prova a 0.60g.	100
Fig 3.21: Pannello 3T. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con il PGA, ad ogni prova di laboratorio.	101
Fig 3.22: Pannello 3T. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con la forza agente, ad ogni prova di laboratorio.	102

Fig 3.23: Pannello 3T. Confronto tra gli spostamenti ultimi assoluti e relativi, registrati in mezzeria dai sensori analogici. Da sinistra: spostamenti del sensore P4 (di sinistra) e del sensore P3 (di destra).....	102
Fig 3.24: Pannello 3T. Deformazioni assolute registrate nei tirantini antiespulsivi in mezzeria dai sensori FBG, ad ogni prova di laboratorio.....	103
Fig 3.25: Pannello 4T. Rilievo fotografico dello spostamento relativo avvenuto sul retro a 0.40g.	105
Fig 3.26: Pannello 4T. Rilievo geometrico con indicazione della posizione e della nomenclatura dei sensori e del quadro fessurativo pre-prova.	106
Fig 3.27: Pannello 4T. Analisi del quadro fessurativo e dell'azione sismica per ogni prova effettuata in laboratorio ENEA. A sinistra: grafico dei fattori di amplificazione.....	109
Fig 3.28: Pannello 4T. Fattori di amplificazione delle accelerazioni calcolati sulla base dei dati registrati dai sensori accelerometrici in laboratorio ENEA.	110
Fig 3.29: Pannello 4T. Rilievo fotografico del collasso, 0.45g (fronte e retro).....	110
Fig 3.30: Pannello 4T. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con il PGA, ad ogni prova di laboratorio.....	111
Fig 3.31: Pannello 4T. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con la forza agente, ad ogni prova di laboratorio.	112
Fig 3.32: Pannello 4T. Confronto tra gli spostamenti ultimi assoluti e relativi, registrati in mezzeria dai sensori analogici. Da sinistra: spostamenti del sensore P4 (di sinistra) e del sensore P3 (di destra).....	112
Fig 3.33: Pannello 4T. Deformazioni assolute registrate nei tirantini antiespulsivi in mezzeria dai sensori FBG, ad ogni prova di laboratorio.....	113
Fig 3.34: Pannello 5I. Rilievo geometrico con indicazione della posizione e della nomenclatura dei sensori e del quadro fessurativo pre-prova.	116
Fig 3.35: Pannello 5I. Rilievo fotografico: a sinistra propagazione della fessurazione pre-prova sul fronte, a destra del basamento a seguito del collasso.....	116
Fig 3.36: Pannello 5I. Analisi del quadro fessurativo e dell'azione sismica per ogni prova effettuata in laboratorio ENEA. A sinistra: grafico dei fattori di amplificazione.....	120
Fig 3.37: Pannello 5I. Fattori di amplificazione delle accelerazioni calcolati sulla base dei dati registrati dai sensori accelerometrici in laboratorio ENEA.	121
Fig 3.38: Pannello 5I. Rilievo fotografico del collasso, 0.55g (fronte-sezione B-B'-retro).	121
Fig 3.39: Pannello 5I. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con il PGA, ad ogni prova di laboratorio.....	122
Fig 3.40: Pannello 5I. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con la forza agente, ad ogni prova di laboratorio.	123
Fig 3.41: Pannello 5I. Confronto tra gli spostamenti ultimi assoluti e relativi, registrati in mezzeria dai sensori analogici. Da sinistra: spostamenti del sensore P4 (di sinistra) e del sensore P3 (di destra).....	123
Fig 3.42: Pannello 6I. Rilievo geometrico con indicazione della posizione e della nomenclatura dei sensori e del quadro fessurativo pre-prova.	125
Fig 3.43: Pannello 6I. Analisi del quadro fessurativo e dell'azione sismica per ogni prova effettuata in laboratorio ENEA. A sinistra: grafico dei fattori di amplificazione.....	130
Fig 3.44: Pannello 6I. Fattori di amplificazione delle accelerazioni calcolati sulla base dei dati registrati dai sensori accelerometrici in laboratorio ENEA.	131
Fig 3.45: Pannello 6I. Rilievo fotografico del collasso, 0.75g (fronte-sezione B-B'-retro).	131
Fig 3.46: Pannello 6I. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con il PGA, ad ogni prova di laboratorio.....	132

Fig 3.47: Pannello 6I. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con la forza agente, ad ogni prova di laboratorio.	133
Fig 3.48: Pannello 6I. Confronto tra gli spostamenti ultimi assoluti e relativi, registrati in mezzeria dai sensori analogici. Da sinistra: spostamenti del sensore P4 (di sinistra) e del sensore P3 (di destra).....	134
Fig 3.49: Pannello 7IT. Rilievo geometrico con indicazione della posizione e della nomenclatura dei sensori e del quadro fessurativo pre-prova.....	136
Fig 3.50: Pannello 7IT. Analisi del quadro fessurativo e dell'azione sismica per ogni prova effettuata in laboratorio ENEA. A sinistra: grafico dei fattori di amplificazione.....	143
Fig 3.51: Pannello 7IT. Fattori di amplificazione delle accelerazioni calcolati sulla base dei dati registrati dai sensori accelerometrici in laboratorio ENEA.....	143
Fig 3.52: Pannello 7IT. Rilievo fotografico a prova conclusa, 0.75g (fronte-sezione B-B'-retro).	144
Fig 3.53: Pannello 7IT. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con il PGA, ad ogni prova di laboratorio.	144
Fig 3.54: Pannello 7IT. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con la forza agente, ad ogni prova di laboratorio.	145
Fig 3.55: Pannello 7IT. Confronto tra gli spostamenti ultimi assoluti e relativi, registrati in mezzeria dai sensori analogici. Da sinistra: spostamenti del sensore P4 (di sinistra) e del sensore P3 (di destra).....	146
Fig 3.56: Pannello 7IT. Deformazioni assolute registrate nei tirantini antiespulsivi in mezzeria dai sensori FBG, ad ogni prova di laboratorio.	146
Fig 3.57: Pannello 8IT. Rilievo geometrico con indicazione della posizione e della nomenclatura dei sensori e del quadro fessurativo pre-prova.....	149
Fig 3.58: Pannello 8IT. Analisi del quadro fessurativo e dell'azione sismica per ogni prova effettuata in laboratorio ENEA. A sinistra: grafico dei fattori di amplificazione.....	154
Fig 3.59: Pannello 8IT. Fattori di amplificazione delle accelerazioni calcolati sulla base dei dati registrati dai sensori accelerometrici in laboratorio ENEA.....	155
Fig 3.60: Pannello 8IT. Rilievo fotografico a prova conclusa, 0.75g (fronte-sezione B-B'-retro).	155
Fig 3.61: Pannello 8IT. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con la forza agente, ad ogni prova di laboratorio.	156
Fig 3.62: Pannello 8IT. Spostamenti ultimi assoluti registrati dai sensori analogici posti in mezzeria e relazionati con la forza agente, ad ogni prova di laboratorio.	157
Fig 3.63: Pannello 8IT. Confronto tra gli spostamenti ultimi assoluti e relativi, registrati in mezzeria dai sensori analogici. Da sinistra: spostamenti del sensore P4 (di sinistra) e del sensore P3 (di destra).....	157
Fig 3.64: Pannello 8IT. Deformazioni assolute registrate nei tirantini antiespulsivi in mezzeria dai sensori FBG, ad ogni prova di laboratorio.	158
Fig 3.65: Massimi PGA (nominali) raggiunti da ciascun pannello. In tutti i casi è avvenuto il collasso, ad eccezione di 7IT e 8IT.	160
Fig 3.66: Relazione tra PGA nominali e PGA effettivi sviluppati dalla tavola vibrante su ciascun pannello durante della sperimentazione dinamica.	161
Fig 3.67: Relazione tra PGA effettivi sviluppati dalla tavola vibrante e la forza agente su ciascun pannello, durante la sperimentazione dinamica. Sono indicate anche le rispettive zona di sismicità secondo OPCM 3274 [2003].	162
Fig 3.68: Relazione tra il PGA nominale e gli spostamenti ultimi assoluti rilevati, su ciascun pannello, dai sensori analogici di mezzeria. Si considera il valore medio tra i sensori P3 e P4.	164
Fig 3.69: Relazione tra le forze agenti e gli spostamenti ultimi assoluti rilevati, su ciascun pannello, dai sensori analogici di mezzeria. Si considera il valore medio tra i sensori P3 e P4.	165

Fig 3.70: Relazione tra il PGA nominale e gli spostamenti ultimi assoluti rilevati, su ciascun pannello, dai sensori analogici in sommità.	165
Fig 4.1: Configurazione geometrica dei nodi per l'implementazione dei dati ambientali in MACEC 3.2. a) si riferisce ai pannelli non rinforzati (URM) mentre b) a quelli rinforzati (SM).....	170
Fig 4.2: Configurazione geometrica delle superfici e dei collegamenti lineari per l'implementazione dei dati ambientali in MACEC 3.2. a) Si riferisce ai pannelli non rinforzati (URM) b) a quelli rinforzati (SM).	171
Fig 4.3: Pannello 1-URM. Esempio di diagramma di stabilizzazione rilevato con SSI-DATA/ref (prova 0.15g A).	173
Fig 4.4: Pannello 1-URM. Andamento delle frequenze per ogni forma modale identificata. Le figure sulla destra riguardano la situazione iniziale (0.00g B).....	177
Fig 4.5: Pannello 1-URM. Confronto fra diversi modi identificati, in termini di frequenze e rapporti di smorzamento.	177
Fig 4.6: Pannello 2-URM. Esempio di diagramma di stabilizzazione rilevato con SSI-DATA/ref (prova 0.10g A).	179
Fig 4.7: Pannello 2-URM. Andamento delle frequenze per ogni forma modale identificata. Le figure sulla destra riguardano la situazione iniziale (0.00g A).....	183
Fig 4.8: Pannello 2-URM. Confronto fra diversi modi identificati, in termini di frequenze e rapporti di smorzamento.	183
Fig 4.9: Confronto tra le forme modali individuate in 1-URM (sopra) e 2-URM (sotto).	185
Fig 4.10: Pannello 3T. Esempio di diagramma di stabilizzazione rilevato con SSI-DATA/ref (0.05g A).	186
Fig 4.11: Pannello 3T. Andamento delle frequenze per ogni forma modale identificata. Le figure sulla destra riguardano la situazione a 0.05g.	190
Fig 4.12: Pannello 3T. Confronto fra diversi modi identificati, in termini di frequenze e rapporti di smorzamento.	190
Fig 4.13: Pannello 4T. Esempio di diagramma di stabilizzazione rilevato con SSI-DATA/ref (0.10g A).	191
Fig 4.14: Pannello 4T. Andamento delle frequenze per ogni forma modale identificata. Le figure sulla destra riguardano la situazione a 0.05g.	194
Fig 4.15: Pannello 4T. Confronto fra diversi modi identificati, in termini di frequenze e rapporti di smorzamento.	195
Fig 4.16: Confronto tra le forme modali individuate in 3T (sopra) e 4T (sotto).	196
Fig 4.17: Pannello 5I. Esempio di diagramma di stabilizzazione rilevato con SSI-DATA/ref (0.05g A).	197
Fig 4.18: Pannello 5I. Andamento delle frequenze per ogni forma modale identificata. Le figure sulla destra riguardano la situazione a 0.05g.	200
Fig 4.19: Pannello 5I. Confronto fra diversi modi identificati, in termini di frequenze e rapporti di smorzamento.	201
Fig 4.20: Pannello 6I. Esempio di diagramma di stabilizzazione rilevato con SSI-DATA/ref (0.00g A).	202
Fig 4.21: Pannello 6I. Andamento delle frequenze per ogni forma modale identificata. Le figure sulla destra riguardano la situazione iniziale (0.00g A).....	205
Fig 4.22: Pannello 6I. Confronto fra diversi modi identificati, in termini di frequenze e rapporti di smorzamento.	206
Fig 4.23: Confronto tra le forme modali individuate in 5I (sopra) e 6I (sotto).	207
Fig 4.24: Pannello 7IT. Esempio di diagramma di stabilizzazione rilevato con SSI-DATA/ref (0.00g A).	208

Fig 4.25: Pannello 7IT. Andamento delle frequenze per ogni forma modale identificata. Le figure sulla destra riguardano la situazione iniziale (0.00g A).....	211
Fig 4.26: Pannello 7IT. Confronto fra diversi modi identificati, in termini di frequenze e rapporti di smorzamento.....	212
Fig 4.27: Pannello 8IT. Esempio di diagramma di stabilizzazione rilevato con SSI-DATA/ref (0.00g A).	213
Fig 4.28: Pannello 8IT. Andamento delle frequenze per ogni forma modale identificata. Le figure sulla destra riguardano la situazione iniziale (0.00g A).....	216
Fig 4.29: Pannello 8IT. Confronto fra diversi modi identificati, in termini di frequenze e rapporti di smorzamento.....	216
Fig 4.30: Confronto tra le forme modali individuate in 7IT (sopra) e 8IT (sotto).	217
Fig 4.31: Principali frequenze rilevate. Confronto tra pannelli non iniettati ed iniettati.....	218
Fig 4.32: Decrementi osservabili nelle frequenze rilevate. Confronto tra pannelli non iniettati ed iniettati.	221
Fig 4.33: Pannelli non iniettati. Andamento delle forme modali rilevate nella prima frequenza identificata.	222
Fig 4.34: Pannelli non iniettati. Andamento dei parametri modali nella prima frequenza identificata.	223
Fig 4.35: Pannelli non iniettati. Andamento delle forme modali rilevate nella seconda frequenza identificata.	224
Fig 4.36: Pannelli non iniettati. Andamento dei parametri modali nella seconda frequenza identificata.	225
Fig 4.37: Pannelli non iniettati. Andamento delle forme modali rilevate nella terza frequenza identificata.	225
Fig 4.38: Pannelli non iniettati. Andamento dei parametri modali nella terza frequenza identificata.	226
Fig 4.39: Pannelli non iniettati. Andamento delle forme modali rilevate nella quarta frequenza identificata.	227
Fig 4.40: Pannelli non iniettati. Andamento dei parametri modali nella quarta frequenza identificata.	228
Fig 4.41: Pannelli non iniettati. Andamento delle forme modali rilevate nella quinta frequenza identificata.	228
Fig 4.42: Pannelli non iniettati. Andamento dei parametri modali nella quinta frequenza identificata.	229
Fig 4.43: Pannelli non iniettati. Andamento delle forme modali rilevate nella sesta frequenza identificata.	230
Fig 4.44: Pannelli non iniettati. Andamento dei parametri modali nella sesta frequenza identificata.	231
Fig 4.45: Pannelli iniettati. Andamento delle forme modali rilevate nella prima frequenza identificata.	231
Fig 4.46: Pannelli iniettati. Andamento dei parametri modali nella prima frequenza identificata.	232
Fig 4.47: Pannelli iniettati. Andamento delle forme modali rilevate nella seconda frequenza identificata.	233
Fig 4.48: Pannelli iniettati. Andamento dei parametri modali nella seconda frequenza identificata.	234
Fig 4.49: Pannelli iniettati. Andamento delle forme modali rilevate nella terza frequenza identificata.	234
Fig 4.50: Pannelli iniettati. Andamento dei parametri modali nella terza frequenza identificata.	235
Fig 4.51: Pannelli iniettati. Andamento delle forme modali rilevate nella quinta frequenza identificata.	236
Fig 4.52: Pannelli iniettati. Andamento dei parametri modali nella quinta frequenza identificata.	237
Fig 4.53: Fessurazioni sulla sommità dei pannelli 5I (a sinistra) e 6I (a destra) presenti sin dai passi di prova a PGA inferiori.....	237

«Non rimanete intrappolati nei dogmi che vi porteranno a vivere secondo il pensiero di altre persone. Non lasciate che il rumore delle opinioni altrui zittisca la vostra voce interiore.

E, ancora più importante, abbiate il coraggio di seguire il vostro cuore e la vostra intuizione: loro vi guideranno in qualche modo nel conoscere cosa veramente vorrete diventare. Tutto il resto è secondario. Siate affamati. Siate folli.»

[S.Jobs, tratto dal discorso ai laureandi dell'Università di Stanford, 2005]
