

**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

DICAM – Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**PROVE SU TAVOLA VIBRANTE DI UN SILO METALLICO A  
FONDO PIANO: ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA  
MEDIANTE MISURAZIONI OTTICHE**

CANDIDATO

Caterina Neri

RELATORE

Chiar.mo Prof. Ing. Stefano Silvestri

Anno Accademico 2018-2019

Sessione I



# INDICE

1	INTRODUZIONE.....	1
1.1	Background teorico.....	1
1.2	Obiettivo della tesi.....	3
1.3	Organizzazione del testo.....	3
2	RISPOSTA SISMICA DEI SILOS.....	4
2.1	Normativa europea.....	4
2.2	Silvestri et al. 2012.....	6
2.3	Pieraccini et al. 2015.....	11
3	PROGETTO SERA – SILOS.....	13
3.1	Geometria Struttura.....	14
3.2	Strumentazione, tipo di acquisizione e filtraggio dei dati.....	17
3.3	Input utilizzati.....	24
3.4	Configurazioni testate.....	28
3.5	Programma di prova.....	29
4	FASE DI RIEMPIMENTO DEL SILO.....	38
4.1	Soluzione statica di Janssen.....	39
4.2	Celle di pressione.....	40
4.3	Estensimetri.....	42
5	PROVE IN CONFIGURAZIONE A BASE FISSA.....	47
5.1	Celle di pressione.....	48
5.2	Accelerometri.....	53
5.3	Amplificazioni dinamiche.....	57
5.4	Estensimetri.....	59
5.5	Sforzi nei montanti.....	63
5.6	Markers.....	63

6	PROVE IN CONFIGURAZIONE A BASE ISOLATA .....	70
6.1	Celle di pressione.....	70
6.2	Accelerometri.....	70
6.3	Amplificazioni dinamiche.....	70
6.4	Estensimetri .....	70
6.5	Sforzi nei montanti.....	71
6.6	Markers .....	71
7	TRATTAMENTO E ANALISI DATI: MARKERS .....	75
7.1	Marker sui montanti.....	75
7.2	Marker sulla virola.....	87
8	QUADRO GLOBALE DELLA RISPOSTA DEL SISTEMA SILO – GRANO ...	90
	CONCLUSIONI.....	123
	BIBLIOGRAFIA .....	125
	RINGRAZIAMENTI .....	126

## INDICE FIGURE

Figura 2.1 profilo della sovra – pressione dinamica secondo l’Eurocodice 8 .....	5
Figura 2.2 rappresentazione grafica del toroide E (rosso) e del disco interno (D). (immagine tratta da [7])7	7
Figura 2.3 forze scambiate tra i due elementi E, D e la parete del silo. (immagine tratta da [7]).....	8
Figura 2.4 profilo della sovra – pressione dinamica secondo la teoria di Silvestri et al. ....	10
Figura 2.5 rappresentazione grafica della distribuzione di pressione orizzontale sulle pareti, secondo le diverse teorie. (immagine tratta da [5]).....	11
Figura 2.6 confronto dell’andamento delle sovra pressioni dinamiche secondo tre diverse teorie.....	12
Figura 3.1 struttura testata e relativi particolari strutturali: silo (sinistra), tetto (in alto al centro), montante (in alto a destra), virola corrugata (al centro), isolatore (a destra al centro), platea di fondazione (in basso a destra).....	14
Figura 3.2 geometria e sezione della virola corrugata. ....	15
Figura 3.3 sezione dei montanti.....	15
Figura 3.4 schema grafico della pianta della struttura su tavola vibrante e individuazione del sistema di riferimento .....	17
Figura 3.5 funzione filtro passa basso utilizzato .....	17
Figura 3.6 posizione e numerazione canali degli accelerometri uniassiali e triassiali .....	18
Figura 3.7 particolare estensimetri, foto (sinistra) e schema grafico (destra).....	19
Figura 3.8 posizione e numerazione canali degli estensimetri posizionati a $Z = 42$ cm (sinistra) e a $Z = 49$ cm (destra) .....	20
Figura 3.9 posizione e numerazione canali degli estensimetri posizionati a $Z = 150$ cm (sinistra) e a $Z = 250$ cm .....	20
Figura 3.10 celle di pressione, foto (sinistra) e schema grafico (destra) .....	21
Figura 3.11 posizione e numerazione canali delle celle di pressione .....	21
Figura 3.12 posizioni marker.....	22
Figura 3.13 posizione e numerazione dei canali dei marker.....	23
Figura 3.14 sistema di riferimento globale dei marker .....	23
Figura 3.15 spettro compatibilità accelerogramma A1 .....	24
Figura 3.16 spettro compatibilità accelerogramma RS1 .....	25
Figura 3.17 spettro compatibilità accelerogramma RS3.....	25
Figura 3.18 rappresentazione compatta dei diversi accelerogrammi reali spettro – compatibili .....	26
Figura 3.19 accelerogramma A1 0.5 g utilizzato in fase di test.....	26
Figura 3.20 accelerogramma RS1 0.5 g utilizzato in fase di test.....	27
Figura 3.21 accelerogramma RS3 0.5 g utilizzato in fase di test.....	27
Figura 3.22 schema grafico della configurazione a base fissa (sinistra) e particolare degli ancoraggi (destra) .....	28
Figura 3.23 schema grafico della configurazione a base isolata (sinistra) e particolare di un isolatore (destra) .....	29
Figura 4.1 schema grafico del caricamento eccentrico del grano .....	38

Figura 4.2 posizione delle barre graduate.....	38
Figura 4.3 foto barre graduate .....	39
Figura 4.4 andamento delle pressioni sulla sezione orizzontale del silo (figura estratta dall'articolo originale [9]).....	39
Figura 4.5 andamento delle pressioni statiche durante la fase di caricamento .....	41
Figura 4.6 fenomeno periodico della deformazione durante la fase di riempimento.....	42
Figura 5.1 andamento delle pressioni statiche durante i test a configurazione fissa.....	48
Figura 5.2 andamento della sovrappressione dinamica all'aumentare dell'accelerazione al suolo .....	49
Figura 5.3 pressione statica (in alto), sovra – pressione dinamica (al centro )pressione totale (in basso)..	51
Figura 5.4 pressione statica (in alto), sovra – pressione dinamica (al centro )pressione totale (in basso)..	52
Figura 7.1 rappresentazione grafica della posizione dei marker sulla virola e relativa numreazione.....	87
Figura 8.1 struttura testata e relativa strumentazione .....	90

## INDICE TABELLE

Tabella 3.1 peso proprio dei differenti elementi.....	16
Tabella 3.2 elenco prove effettuate.....	37
Tabella 5.1 elenco prove in configurazione fissa riportate .....	47
Tabella 5.2 elenco test utilizzati per riportare i dati relativi agli accelerogrammi.....	53
Tabella 6.1 elenco prove in configurazione isolata riportate .....	70
Tabella 8.1 elenco test riportati in questo capitolo .....	90

## 1 INTRODUZIONE

La progettazione sismica di silos in acciaio a fondo piano contenenti materiale granulare rappresenta una sfida, in quanto risulta fortemente dipendente dall'interazione tra i grani e le pareti del silo. Le disposizioni normative EN 1998-4:2006 prevedono di considerare una massa efficace pari circa all'80% della massa totale insilata. Dalla teoria analitica proposta successivamente da Silvestri et al. 2012 e poi raffinata da Pieraccini et al. 2015, è emerso, però, che per silos tozzi risulta sufficiente una massa efficace pari circa al 30-70% di quella totale. In seguito alla validazione sperimentale di tale teoria sulla base delle prove eseguite su un silo in scala presso i laboratori EQUALS (Bristol), nel 2019 è stata realizzata una campagna sperimentale (progetto SERA – SILOS), su un silo in acciaio a fondo piano a grandezza naturale presso i laboratori di EUCENTRE (Pavia). Tramite l'analisi e l'interpretazione dei risultati ottenuti si intende, da un lato verificare la validità della teoria proposta da Silvestri et al. e dall'altro ampliare le conoscenze in merito alla risposta del sistema grano – silo sottoposto a diversi input dinamici.

### 1.1 Background teorico

Il comportamento strutturale di silos a fondo piano contenenti materiale granulare risulta essere profondamente diverso dal comportamento di strutture ordinarie, in quanto il peso proprio della struttura resistente è molto inferiore rispetto a quello del materiale insilato.

Da tale condizione nasce la necessità di studiare il complesso meccanismo tramite il quale il materiale interagisce con la struttura. Infatti, la progettazione di queste strutture (statica e dinamica) richiede una corretta quantificazione della massa efficace, ovvero di quella porzione della massa totale di materiale che grava sulle pareti del silo.

Le ricerche scientifiche in questo ambito sono iniziate nel XIX secolo e sono tuttora in corso, in quanto rimangono aperte diverse questioni inerenti al comportamento del sistema struttura – materiale, che necessitano di approfondimenti.

In ambito statico è di particolare rilevanza il modello proposto da Janssen (1895) e Koenen (1896), che permette di stimare le pressioni esercitate sulla parete del silo dal materiale granulare. Tale modello si basa sull'ipotesi di assialsimmetria della distribuzione di pressioni verticali sulla sezione trasversale del silo e sull'assunzione di tali pressioni come costanti, definite pari al valor medio sulla sezione medesima. Secondo Janssen, le pressioni agenti sulla struttura dipendono dalla massa efficace di materiale granulare che viene completamente sostenuta orizzontalmente dalle pareti.

Ciò avviene grazie alla mobilitazione di forze di attrito (sia verticali che orizzontali) che si originano sulla superficie di contatto. Date tali premesse è possibile calcolare l'andamento delle suddette pressioni. Queste ultime crescono con l'aumento dell'altezza del materiale interno fino ad un valore di plateau, senza però aumentare ulteriormente per altezze maggiori. Si basano su questo modello le disposizioni progettuali dell'Eurocodice 1 Parte 4 [1].

Per quanto riguarda l'ambito dinamico, la progettazione fa riferimento alle disposizioni dell'Eurocodice 8 Parte 4 [2], che si basa sugli studi effettuati da Rotter e Hull [6], Younan e Veletsos [10] [11]. Tali disposizioni prevedono di considerare la massa partecipante al moto come l'80% di quella totale. I risultati numerici ottenuti da Holler e Meskouris [4] hanno però evidenziato che questa approssimazione risulta sperimentalmente appropriata per silos snelli, mentre per silos tozzi è troppo conservativa.

Recentemente gli studi analitici di Silvestri et al 2012 [7] e Pieraccini et al. 2015 [5] hanno confermato le conclusioni alle quali sono giunti Holler e Meskouris [4], valutando la massa partecipante per silos tozzi pari circa al 30-70% della massa totale. Tali considerazioni sono state validate tramite prove su tavola vibrante [8], effettuate su un silo a fondo piano contenente Ballottini glass. La struttura, realizzata in policarbonato e caratterizzata da un'altezza di 1.5 m, con diametro di 1.2 m e pareti di 3 mm di spessore, è stata testata presso l'Earthquake and Large Structures Laboratory (EQUALS) dell'Università di Bristol.

Al fine di indagare la validità della teoria di Silvestri et al. 2012 [7] e Pieraccini et al. 2015 [5] anche nel caso di un silo a grandezza naturale contenente frumento tenero (grano), è stata condotta a febbraio del 2019 una campagna sperimentale presso i laboratori di EUCENTRE (Pavia). Questa si inserisce nell'ambito del progetto europeo SERA-SILOS (Seismology and Earthquake Engineering Research Infrastructure Alliance for Europe), e si è posta i seguenti obiettivi:

- l'identificazione delle proprietà dinamiche della struttura (i.e. periodo proprio di vibrazione, amplificazione dinamica, rapporto di smorzamento);
- la verifica sperimentale della teoria analitica di Silvestri et al. 2012 [7] e Pieraccini et al. 2015 [5];
- la valutazione del beneficio che l'introduzione di un sistema di isolamento alla base del silo può comportare sulla struttura.

### 1.2 Obiettivo della tesi

La presente tesi si inserisce all'interno del progetto SERA – SILOS. In particolare, si intendono presentare in modo organico i primi risultati ottenuti a seguito della campagna sperimentale presso i laboratori di EUCENTRE (Pavia), mettendo in evidenza l'analisi dei dati forniti dalle acquisizioni ottiche. Inoltre, si fornisce un primo approccio alla complessa fase di interpretazione dati, volta a fornire maggiori informazioni riguardo alla risposta del sistema struttura – grano sotto l'azione di diversi input.

### 1.3 Organizzazione del testo

Il testo viene organizzato come segue:

La prima parte è composta dai capitoli 1 e 2 e intende descrivere le conoscenze attuali sul sistema struttura metallica – materiale granulare e la loro interazione sia in ambito statico [9] che dinamico [1] [2] [5] [7]. In particolare, si intende fornire un quadro teorico generale della risposta sismica da mettere a confronto con i risultati sperimentali. A tale scopo vengono riportate le disposizioni della normativa europea che regola la progettazione sismica delle strutture in esame [1] [2] e le teorie proposte dalla ricerca scientifica [5] [7] che stimano le sovra-pressioni dinamiche esercitate dal grano sulle virole del silo, considerando gli effetti dell'attrito tra i diversi strati.

Nella seconda parte, composta dal capitolo 3 viene trattato il progetto SERA - SILOS. Viene quindi descritta la progettazione della prova, riportando le geometrie degli elementi, le configurazioni testate, la tipologia e la posizione della strumentazione, il tipo di acquisizione e filtraggio dei dati e il tipo di input scelti a cui sottoporre la struttura.

La terza parte è composta dai capitoli 4, 5, 6 e 7 e riguarda le prove effettuate sulla struttura. Si presentano e analizzano i risultati ottenuti riguardanti le fasi di: caricamento, test dinamici in configurazione a base fissa, test dinamici in configurazione a base isolata. I dati elaborati riguardano le seguenti strumentazioni: celle di pressione, accelerometri monoassiali esterni, estensimetri posizionati sui montanti di metà struttura e il monitoraggio ottico di marker.

La quarta parte è rappresentata dall'appendice A, che comprende tutti i risultati ottenuti.

## 2 RISPOSTA SISMICA DEI SILOS

La risposta sismica di silos in acciaio a fondo piano contenenti materiale granulare dipende fortemente dall'interazione tra le pareti e il materiale stesso. Mentre una buona modellizzazione del comportamento di tali strutture in condizioni statiche risulta essere quella proposta da Janssen [9] e Koenen, valutare la risposta dinamica è più complesso. L'Eurocodice 8 Parte 4 [2] fornisce una stima della massa partecipante pari circa all'80% della massa totale insilata. Come mostrato dagli studi di Holler e Meskouris (2006) [4], tale normativa risulta troppo conservativa nel caso di silos tozzi.

A tal proposito, di recente, Silvestri et al. 2012 [7] e Pieraccini et al. 2015 [5] hanno sviluppato una teoria analitica che, a partire dal modello proposto da Janssen, si propone di valutare le sovra-pressioni dinamiche sulle pareti, tenendo conto della loro distribuzione non simmetrica.

La modellazione del sistema silo – grano considera il materiale insilato come una successione di strati di altezza infinitesima. Vengono quindi considerate le forze in gioco tra strati successivi e fra gli strati stessi e le pareti del silo. In particolare, il sistema così modellato viene suddiviso in due volumi distinti: uno completamente sostenuto dagli strati sottostanti e l'altro dalle pareti.

### 2.1 Normativa europea

La normativa europea EN 1998-4 2006 fornisce le disposizioni progettuali per silos in acciaio a fondo piano contenenti materiale granulare soggetti ad azione sismica. Le linee guida proposte si basano principalmente sugli studi numerici effettuati da Rotter e Hull (1989) e sulla formulazione analitica di Younan e Veletsos (1998), che considera le pareti aventi rigidità infinita e la superficie di contatto tra grani e pareti corrugata.

La normativa riguarda:

- il calcolo delle sovrappressioni quasi-statiche che generano forze orizzontali sulle pareti della struttura durante un input sismico;
- metodologie di analisi della struttura;
- la modellazione numerica del sistema grano – silo.

L'espressione per il calcolo delle sovra pressioni orizzontali, per silos circolari è la seguente:

$$\Delta p h_s = \Delta p h_{s0} \cos(\theta) \quad (1)$$

$$\text{con: } \Delta p h_{s0} = \alpha(z) \gamma \min(r_s^*; 3x) \quad (2)$$

dove:

- $\Delta p h_{s0}$  è la pressione di riferimento;
- $\theta$  è l'angolo tra la linea radiale al punto di interesse sulla parete e la direzione della componente orizzontale dell'azione sismica;
- $\alpha(z)$  è il rapporto tra l'accelerazione misurata sul silo ad una distanza verticale "z" dalla superficie del materiale insilato, e l'accelerazione di gravità;
- $\gamma$  è il peso specifico del materiale granulare;
- $r_s^* = \min(h_b, d_c/2)$  dove  $h_b = \min(\text{altezza silo, raggio})$ ;
- $x$  è la distanza misurata lungo il raggio, alla quota z.

Se si considera un'accelerazione costante pari a  $a_{eh0}/g$  è possibile considerare  $\alpha(z) = a_{eh0}$  e l'equazione (2) diventa:

$$\Delta p h_{s0} = a_{eh0} \gamma \min(r_s^*; 3x) \quad (3)$$

In questo caso le sovrappressioni dinamiche seguono l'andamento riportato in figura 2.1.

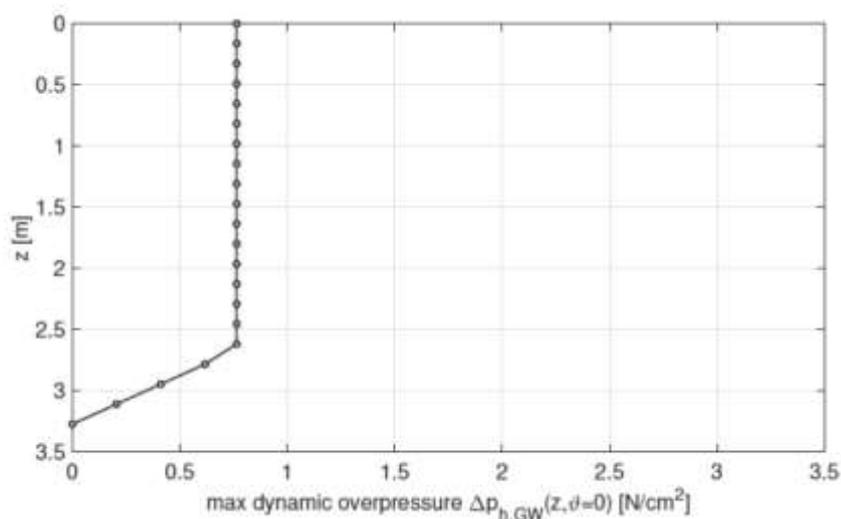


Figure 2.1 profilo della sovra – pressione dinamica secondo l'Eurocodice 8

Le sollecitazioni di taglio e momento flettente alla base della struttura si possono ricavare integrando le pressioni lungo l'altezza. A tal proposito la normativa europea prevede due diverse metodologie:

- semplificata

$$T_{EC8,semplificata} = a_{eh0} \cdot \gamma \cdot \pi \cdot R^2 \cdot H \cdot 0.8 \quad (4)$$

$$M_{EC8,semplificata} = a_{eh0} \cdot \gamma \cdot \pi \cdot R^2 \cdot H \cdot 0.8 \cdot H/2 \quad (5)$$

- accurata

$$T_{EC8} = a_{eh0} \cdot \gamma \cdot \pi \cdot R^2 \cdot H \cdot (1 - R/6H) \quad (6)$$

$$M_{EC8} = a_{eh0} \cdot \gamma \cdot \pi \cdot R^2 / 2 \cdot (H^2 - R^2/27) \quad (7)$$

Le espressioni sopra riportate si basano su un approccio quasi statico e sulle seguenti assunzioni:

- il grano si muove in fase con la struttura, durante l'eccitazione sismica;
- la massa partecipante si può modellizzare come concentrata nel centro di gravità e valutarne l'inerzia rotazionale rispetto ad esso.

Dalle espressioni (4) e (6) si può ricavare la massa partecipante non considerando il termine relativo all'accelerazione. In particolare, l'espressione (6) riporta una massa effettiva pari a  $(1 - R/6H)$  mentre l'espressione (4) pari all'80% della massa totale. Considerando un rapporto  $H/2R = 1$  la massa partecipante derivante da (6) è il 92% della massa totale insilata, mentre con rapporto  $H/2R = 2$  (silo snello) ha valore pari al 96%.

I risultati ottenuti da Holler e Meskouris [4] hanno però mostrato che, mentre un silo snello l'Eurocodice 8 dà una stima ragionevole, per silos tozzi andrebbe considerato un valore molto più basso della massa partecipante.

## 2.2 Silvestri et al. 2012

Al fine di valutare in modo più accurato la massa partecipante e la massima pressione orizzontale esercitata dal materiale insilato sulle pareti, sotto input sismico, Silvestri et al. (2012) [7] e Pieraccini et al. (2015) [5] hanno sviluppato una teoria analitica. Tale teoria è stata sviluppata a partire dal modello di Janssen (non applicabile in dinamica), che computa il complesso delle forze mutuali scambiate nel sistema grano – struttura.

I risultati ottenuti indicano che, nel caso di silos tozzi con rapporto  $H/2R$  basso, la porzione di grano che interagisce con le pareti del silo risulta essere notevolmente più bassa rispetto alla massa partecipante valutata secondo le disposizioni dell'Eurocodice 8 [2].

Per lo studio del sistema grano – parete il materiale granulare viene considerato come una successione di strati sovrapposti di altezza infinitesima (così da poter passare dal caso discreto al caso continuo). Per ogni strato vengono individuate le pressioni e gli sforzi trasmessi sia con gli strati adiacenti sia con la parete del silo. In particolare, ogni strato viene suddiviso in due elementi: un elemento (in figura 2.2 indicato in rosso) che rappresenta la porzione di grano che interagisce con la struttura e un elemento (in figura 2.2 indicato in blu) che grava sugli strati sottostanti. Considerando, quindi, l'intera massa di materiale granulare, si possono individuare due volumi: un toroide esterno (elemento E) di spessore  $s(z)$  e un disco centrale (elemento D).

Il sistema, così descritto, è stato valutato in condizioni di accelerazione costante sia verticale che orizzontale, in accordo con l'assunzione adottata dall'Eurocodice 8 (§3.3), nel quale il parametro  $\alpha(z)$  non è dipendente dal tempo.

Inoltre, si considera il materiale granulare come incompressibile e senza vuoti, mentre le pareti del silo possono essere considerate o infinitamente rigide o flessibili a seconda del tipo di profilo verticale delle accelerazioni orizzontali atteso.

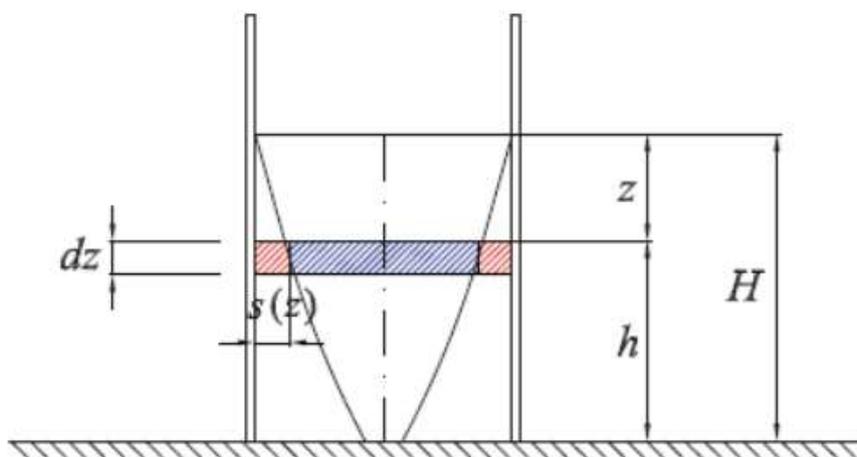


Figure 2.2 rappresentazione grafica del toroide E (rosso) e del disco interno (D). (immagine tratta da [7])

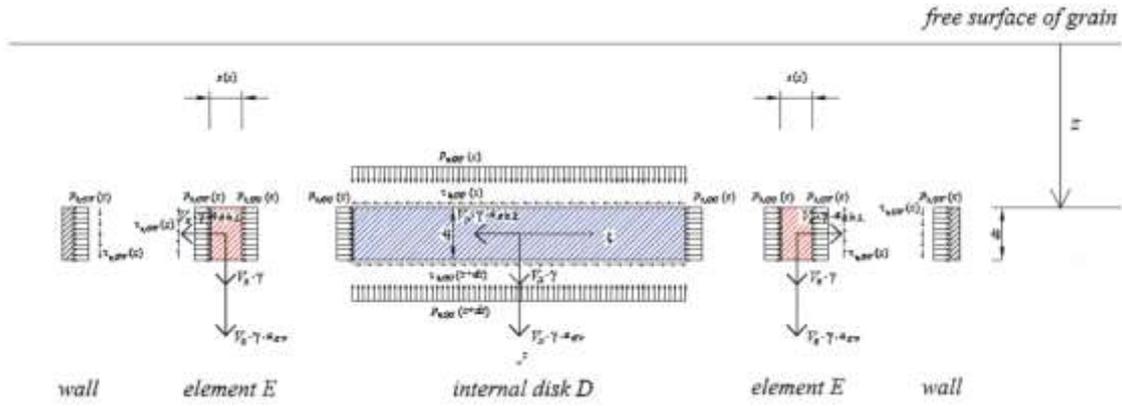


Figure 2.3 forze scambiate tra i due elementi E, D e la parete del silo. (immagine tratta da [7])

A partire dall'equilibrio sull'elemento D e integrando lungo lo spessore, è possibile determinare, considerando l'equilibrio verticale, l'espressione della pressione verticale scambiata tra due strati di grano, mentre considerando l'equilibrio orizzontale, l'espressione dello sforzo di taglio scambiata tra due strati di grano (pedice GG "grain – grain"):

$$p_{v,GG}(z) = \int (1 + a_{ev}(z))\gamma dz + C_1 \quad (8)$$

$$p_{h,GG}(z) = \lambda \cdot p_{v,GG}(z) \quad (9)$$

$$\tau_{h,GG}(z) = \int a_{eh}(z)\gamma dz + C_2 \quad (10)$$

dove  $\lambda$  rappresenta il rapporto di pressione e le costanti di integrazione  $C_1$  e  $C_2$  devono essere valutate imponendo le condizioni al contorno.

Scrivendo l'equilibrio verticale e orizzontale dell'elemento toroidale E è possibile ricavare le azioni scambiate tra grano e parete (pedice GW "grain – wall").

$$p_{h,GW}(z) = \frac{p_{h,GG}(z)}{1 - v(z) \cdot a_{eh}(z) \cdot \cos\theta \cdot \mu_{GW}} \quad (11)$$

$$\tau_{v,GW}(z) = \mu_{GW} \cdot p_{h,GW}(z) \quad (12)$$

$$\tau_{h,GW}(z) = a_{eh}(z) \cdot \sin\theta \cdot \gamma \cdot s(z) \cdot \left(1 - \frac{s(z)}{2R}\right) \quad (13)$$

dove

- $v(z) = 1/(1 + a_{ev}(z))$
- $s(z) = R - \sqrt{R^2 - R \cdot \frac{2p_{h,GG}(z) \cdot v(z) \cdot \mu_{GW}}{\gamma(1-v(z) \cdot a_{eh}(z) \cdot \cos\vartheta \cdot \mu_{GW})}} \cdot z$  rappresenta lo spessore del toroide esterno E.

Se si considera un input sismico con accelerazione verticale e orizzontale costante, le quantità sopra calcolate possono essere ricavate come segue:

$$p_{v,GG}(z) = (1 + a_{ev0}) \cdot \gamma \cdot z \quad (15)$$

$$p_{h,GG}(z) = \lambda \cdot (1 + a_{ev0}) \cdot \gamma \cdot z \quad (16)$$

$$\tau_{h,GG}(z) = a_{eh0} \cdot \gamma \cdot z \quad (17)$$

$$p_{h,GW}(z) = \frac{\lambda \cdot \gamma \cdot z}{v_0(1 - v_0 \cdot a_{eh0} \cdot \cos\vartheta \cdot \mu_{GW})} \quad (18)$$

$$\tau_{v,GW}(z) = \mu_{GW} \cdot p_{h,GW}(z) \quad (19)$$

$$\tau_{h,GW}(z) = \left( \frac{a_{eh0} \cdot \sin\vartheta \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot \mu_{GW}}{1 - v_0 \cdot a_{eh0} \cdot \cos\vartheta \cdot \mu_{GW}} \right) z \quad (20)$$

La valutazione della pressione statica viene ottenuta a partire dall'espressione (18) considerando l'accelerazione orizzontale nulla:

$$p_{h0}(z) = \frac{\lambda \cdot \gamma \cdot z}{v_0} = \lambda \cdot \gamma \cdot (1 + a_{ev0}) \cdot z \quad (21)$$

A questo punto è possibile ottenere la sola sovra-pressione (o depressione) scambiata tra materiale granulare e parete del silo, dovuta alla presenza di un'accelerazione orizzontale diversa da zero:

$$\Delta p_h(z, \theta) = p_{h,GW}(z, \theta) - p_{h0}(z) \quad (22)$$

Mentre la pressione statica ha una distribuzione assialsimmetrica, la sovra-pressione ha una distribuzione non simmetrica a causa della presenza dell'accelerazione dinamica.

La teoria analitica presentata si discosta dall'approccio proposto dall'Eurocodice 8 [2] in quanto le tensioni dovute all'attrito orizzontale che si esercita tra due strati di grano non viene trascurato.

L'andamento delle sovrapressioni è rappresentato nella figura seguente:

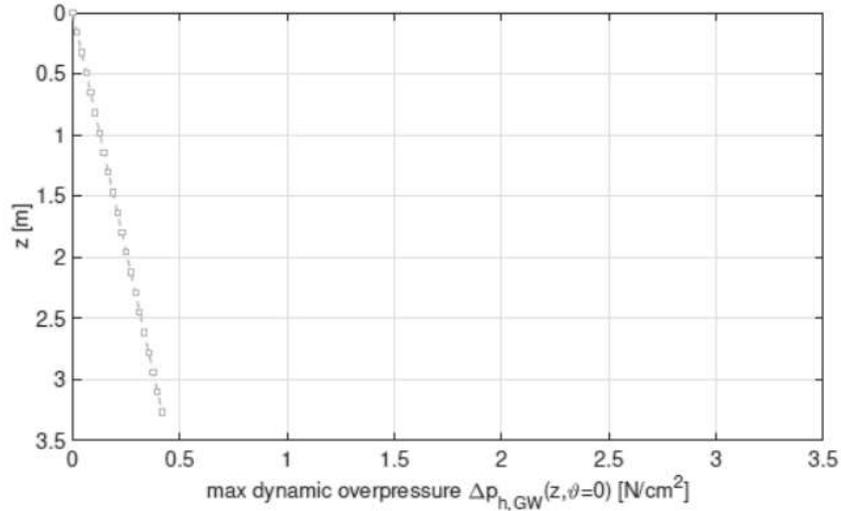


Figure 2.4 profilo della sovra – pressione dinamica secondo la teoria di Silvestri et al.

Integrando le pressioni agenti sulla parete al variare di  $z$  si valutano le sollecitazioni di taglio e momento flettente alla base del silo:

$$T_{S,12} = a_{eh0} \cdot \gamma \cdot \pi \cdot R^2 \cdot H \cdot \left( \frac{\lambda \cdot \mu_{GW}}{1 - v_0^2 \cdot a_{eh0}^2 \cdot \mu_{GW}^2} \right) \quad (23)$$

$$M_{S,12} = \frac{1}{3} a_{eh0} \cdot \gamma \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \left( \frac{\lambda \cdot \mu_{GW}}{1 - v_0^2 \cdot a_{eh0}^2 \cdot \mu_{GW}^2} \right) \quad (24)$$

In questo caso la massa partecipante, che si ottiene dall'espressione (23), risulta dipendente dal rapporto di pressione ( $\lambda$ ), dal coefficiente di attrito grano – parete ( $\mu_{GW}$ ) e dall'accelerazione orizzontale ( $a_{eh0}$ ). Considerando un silo con rapporto  $H/2R \leq 1$ , ovvero un silo tozzo, nonché diverse combinazioni dei parametri sopra citati, il valore di massa partecipante risulta compreso all'incirca tra il 30% e il 70% della massa totale. Tale risultato risulta di molto inferiore alle prescrizioni dell'Eurocodice 8.

### 2.3 Pieraccini et al. 2015

I limiti di validità della teoria di Silvestri et al. 2012 [7] risultano molto stringenti. Per questo motivo lo studio di Pieraccini et al. 2015 [5] si pone l'obiettivo di raffinare e ampliare le applicazioni della teoria analitica di Silvestri et al. 2012.

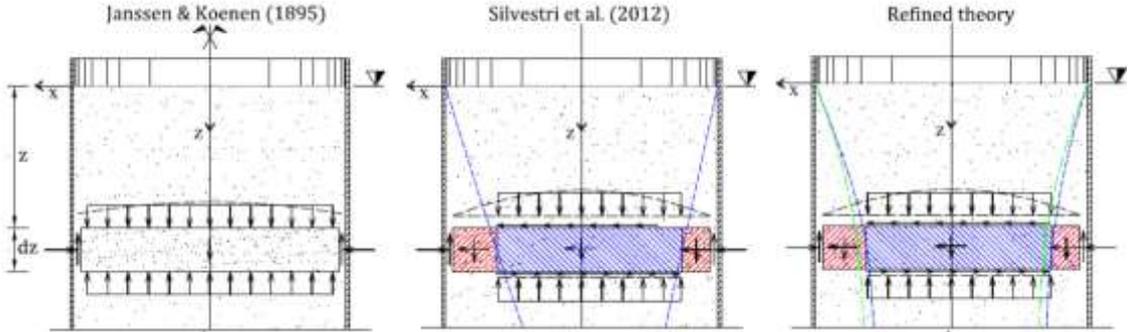


Figure 2.5 rappresentazione grafica della distribuzione di pressione orizzontale sulle pareti, secondo le diverse teorie.  
(immagine tratta da [5])

A partire dalla stessa ipotesi di accelerazione orizzontale e verticale costanti, si riportano le espressioni per ricavare le pressioni e le sollecitazioni:

$$p_{v,GG}(z) = (1 + a_{ev0}) \cdot \gamma \cdot z \quad (25)$$

$$p_{h,GG}(z) = \lambda \cdot (1 + a_{ev0}) \cdot \gamma \cdot z \quad (26)$$

$$\tau_{h,GG}(z) = a_{eh0} \cdot \gamma \cdot z \quad (27)$$

$$p_{h,GW}(z, \vartheta) = \frac{p_{h,GG}(z)(R - s(z, \vartheta))}{\beta_0(\vartheta)R} \quad (28)$$

$$\tau_{h,GW}(z, \vartheta) \cdot R = a_{eh0} \cdot \sin\theta \cdot \gamma \cdot \left( R - \frac{s(z, \vartheta)}{2} \right) \cdot s(z, \vartheta) \quad (29)$$

dove:

$$\beta_0 = 1 - \mu_{GW} \cdot v_0 \cdot a_{eh0} \cdot \cos\vartheta \quad (30)$$

$$s(z, \vartheta) = \frac{\omega(z) + R\beta_0(\vartheta) - \sqrt{\omega(z)^2 + R^2 \cdot \beta_0(\vartheta)}}{\beta_0(\vartheta)} \quad (31)$$

$$\omega(z) = \mu_{GW} \cdot \lambda \cdot z \quad (32)$$

L'espressione della sola pressione statica, caratterizzata da una distribuzione assialsimmetrica, è la seguente:

$$p_{h,GW,statica}(z) = \lambda \cdot \gamma \cdot z \cdot \frac{\sqrt{\omega(z)^2 + R^2} - \omega(z)}{R} \quad (33)$$

$$s_{statica}(z) = \omega(z) + R - \sqrt{\omega(z)^2 + R^2} \quad (34)$$

Mentre per quanto riguarda la sovra-pressione dinamica:

$$\Delta p_h(z, \theta) = p_{h,GW}(z, \theta) - p_{h,GW,statica}(z) \quad (35)$$

Di seguito si riporta l'andamento delle tre teorie esposte messe a confronto:

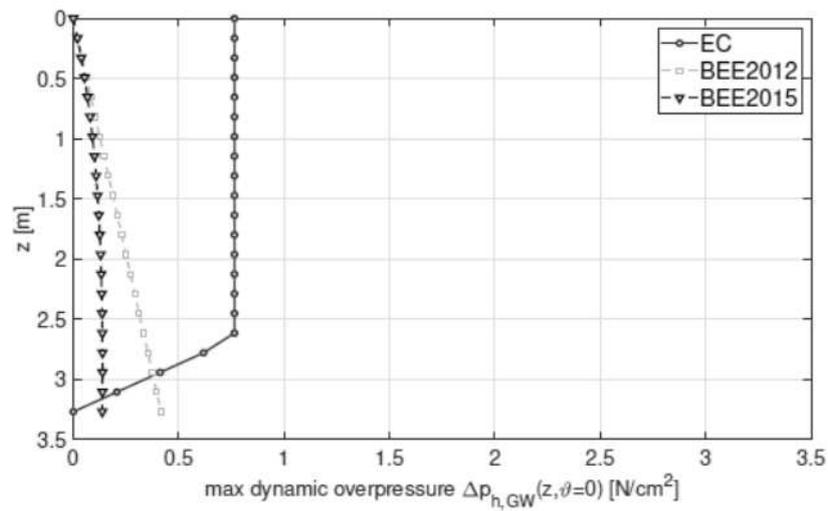


Figure 2.6 confronto dell'andamento delle sovra pressioni dinamiche secondo tre diverse teorie

### 3 PROGETTO SERA – SILOS

Il progetto SERA (Seismology and Earthquake Engineering Research Infrastructure Alliance for Europe) è un progetto pluriennale ad ampio spettro che mira a fornire un importante contributo per il miglioramento dell'accesso alle banche-dati europee, oltre che a ridurre l'esposizione della nostra società ai rischi relativi ad eventi sismici naturali ed antropogenici.

Nel presente elaborato di tesi si fa riferimento ad una campagna sperimentale sponsorizzata dal progetto stesso e nota come SERA-SILOS<sup>1</sup> (SEismic Response of Actual steel SILOS), avente l'obiettivo di investigare, attraverso una serie di test su tavola vibrante, le azioni provocate da un mezzo granulare solido, posto all'interno di un silo a grandezza naturale, sottoposto ad input sismici.

Le prove vengono effettuate presso il laboratorio di EUCENTRE (Pavia) che dispone di una tavola vibrante monoassiale 5.6 m x 7.0 m con portata massima di 140 tonnellate.

Gli obiettivi di questa campagna sperimentale sono i seguenti:

- il comportamento dinamico: si intendono valutare le proprietà dinamiche, e la loro dipendenza dal livello di accelerazione dell'input, quali il periodo di vibrazione, fattore di smorzamento, amplificazione dinamica del sistema silo – grano ottenuto mediante l'utilizzo di input sinusoidale e di rumore bianco (white – noise);
- la risposta sismica: si intendono valutare le sollecitazioni quali momento ribaltante e taglio alla base, che permettono di verificare la teoria analitica proposta da Silvestri et al. (2012);
- il comportamento in configurazione isolata: si intendono valutare i benefici derivanti dall'introduzione di isolatori alla base del silo.

La progettazione della campagna sperimentale è stata realizzata in modo tale da essere il più possibile in accordo con le condizioni su cui si basa la teoria analitica.

---

<sup>1</sup> per maggiori informazioni consultare la seguente pagina: <https://sera-ta.eucentre.it/index.php/sera-ta-project-18/>

#### 3.1 Geometria Strutturale

Il silo testato è un silo cilindrico a fondo piano (flat – bottom) in acciaio ed è il più piccolo prodotto dall'azienda italiana AGI FRAME che ne ha eseguito la progettazione e la costruzione secondo le disposizioni dell'Eurocodice, rispettivamente EN 1991-4:2006 [1], EN 1993-4-1:2007, and EN 1998-4:2006 [2], utilizzando uno spettro elastico in termini di accelerazione avente una PGA pari a 0.52 g.



Figure 3.1 struttura testata e relativi particolari strutturali: silo (sinistra), tetto (in alto al centro), montante (in alto a destra), virola corrugata (al centro), isolatore (a destra al centro), platea di fondazione (in basso a destra).

Il silo ha un'altezza pari a 5.45 m e ha un raggio pari a 1.82 m. Il sistema resistente è realizzato con acciaio galvanizzato zincato S450GD+Z ed è costituito dai seguenti elementi strutturali:

- virola corrugata;
- montanti;
- tetto.

La parete del silo è costituita da 5 porzioni di virola corrugata, alte 881 mm e di spessore pari a 1 mm, collegate tramite bullonatura sia verticale che orizzontale. La parete del silo è sostenuta da 8 irrigidimenti verticali (montanti) caratterizzati da una sezione trasversale aperta a “omega” (come in figura 3.1) di spessore variabile lungo l'altezza (dall'alto verso il basso: 1,5, 2 e 3 mm). Il collegamento degli stessi alla virola avviene tramite l'impiego di bulloni M10 distanziati ogni 7 cm.

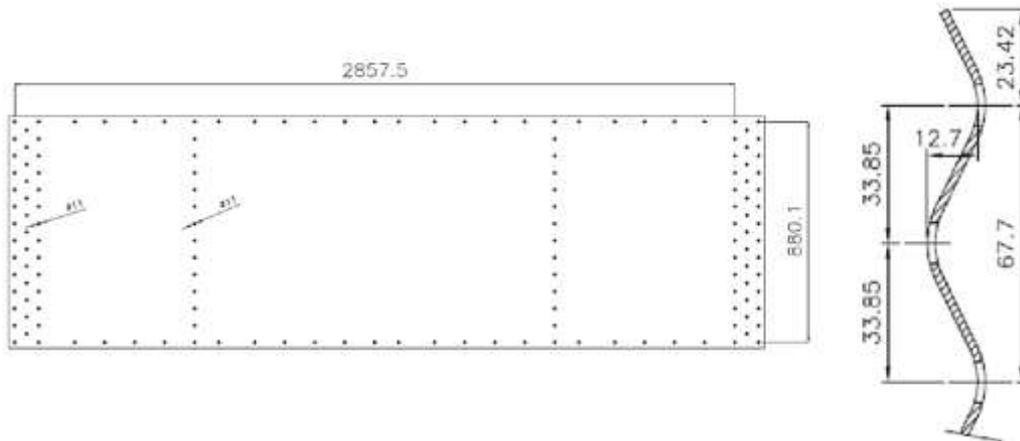


Figure 3.2 geometria e sezione della virola corrugata.

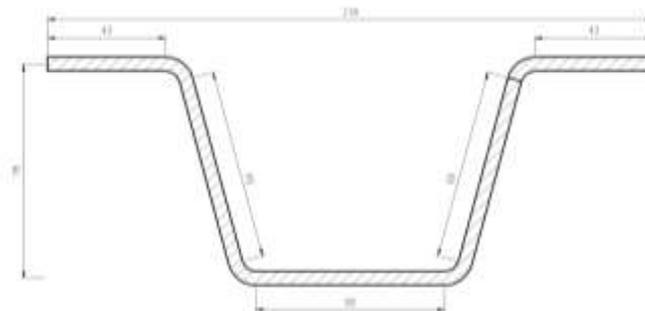


Figure 3.3 sezione dei montanti

Il tetto è costituito da 16 lamiere inclinate di  $31^\circ$  ed è fissato alla struttura mediante bulloni. Inoltre, il silo presenta una scala che consente l'accesso al foro posto in sommità, attraverso il quale avviene il riempimento e un tubo di ripresa, posto sulla parete del silo, per permettere lo scaricamento tramite l'inserimento di una coclea.

La struttura è ancorata ad una piastra pre-tesa in calcestruzzo armato di dimensioni 4.8m x 4.8m x 0.4m ed è appoggiata su 4 isolatori di tipo *Curved Surface Sliders friction pendulum* progettati dall'azienda MAURER (Svizzera) al fine di ottenere un periodo di vibrazione di 3 s. Gli isolatori sono caratterizzati da un raggio pari a 2.2364 m e uno spostamento massimo di 20 cm.

Il silo viene riempito con grano tenero fino a un'altezza di 3,3 m, al fine di riprodurre un rapporto  $H/2R$  approssimativamente uguale a 1, in accordo con la teoria analitica proposta dalla ricerca scientifica.

La tipologia di grano utilizzata ha le seguenti proprietà:

- $\gamma = 8.40 \text{ kN/m}^3$ , peso specifico;
- $\lambda = 0.55$ , rapporto di pressione laterale;
- $\mu_{GW} = 0.46$ , coefficiente di attrito tra il grano (G) e la parete del silo (W);
- $\phi_r = 30^\circ$ , angolo di attrito interno.

In particolare, le proprietà sopra riportate sono il risultato di una serie di prove sperimentali effettuate presso il laboratorio LISG dell'Università di Bologna. <sup>2</sup>

Il peso complessivo a cui è sottoposta la tavola viene riportato di seguito:

Silo	12	<i>kN</i>
Grano	285	<i>kN</i>
Platea di fondazione (R.C. plate)	230	<i>kN</i>
Totale	527	<i>kN</i>

Tabella 3.1 peso proprio dei differenti elementi

Il sistema di riferimento utilizzato prevede l'asse X quello parallelo alla direzione di applicazione dell'input sismico, l'asse Z quello verticale e l'asse Y ottenuto da questi secondo la regola della mano destra.

---

<sup>2</sup> Per maggiori informazioni consultare la tesi di Sulyman Mansour: "On the mechanical properties of a "grain-silo system" for the interpretation of shaking-table tests on a full-scale flat-bottom steel silo"

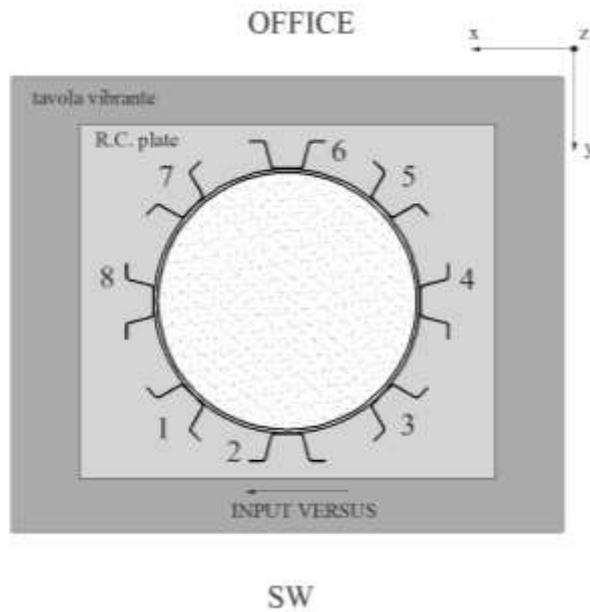


Figure 3.4 schema grafico della pianta della struttura su tavola vibrante e individuazione del sistema di riferimento

### 3.2 Strumentazione, tipo di acquisizione e filtraggio dei dati

La strumentazione utilizzata per il monitoraggio e per la ricostruzione del comportamento statico e dinamico del silo è costituita da 28 accelerometri (di cui 6 triassiali), 24 estensimetri monoassiali, 4 celle di pressione, 4 potenziometri, 4 tastatori verticali (durante le prove in configurazione isolata) e 70 marker per la ricostruzione dello spostamento dei montanti.

L'acquisizione dei dati viene effettuata ad una frequenza di 256 Hz, 200 Hz nel caso dei marker. A causa della presenza di rumori elettrici ad alte frequenze, i dati vengono filtrati attraverso l'applicazione di un filtro passa basso impostando una frequenza di taglio pari a 30 Hz.

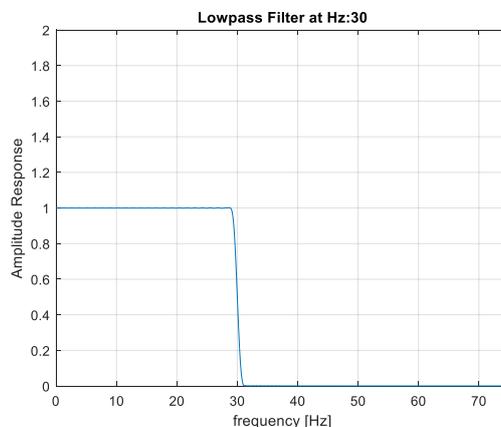


Figure 3.5 funzione filtro passa basso utilizzato

### Accelerometri

Gli accelerometri monoassiali sono stati posizionati sui montanti 4 e 8 del silo, sulla platea in calcestruzzo e sulla tavola vibrante, mentre quelli triassiali sono stati posti all'interno del grano cercando di posizionarne 4 centralmente e 2 lateralmente così da poter valutare eventuali differenze nella modalità di spostamento del grano. La disposizione è riportata in figura 3.6. L'acquisizione di tali strumenti avviene in continuo e permette di ottenere informazioni riguardanti l'amplificazione dinamica sul sistema.

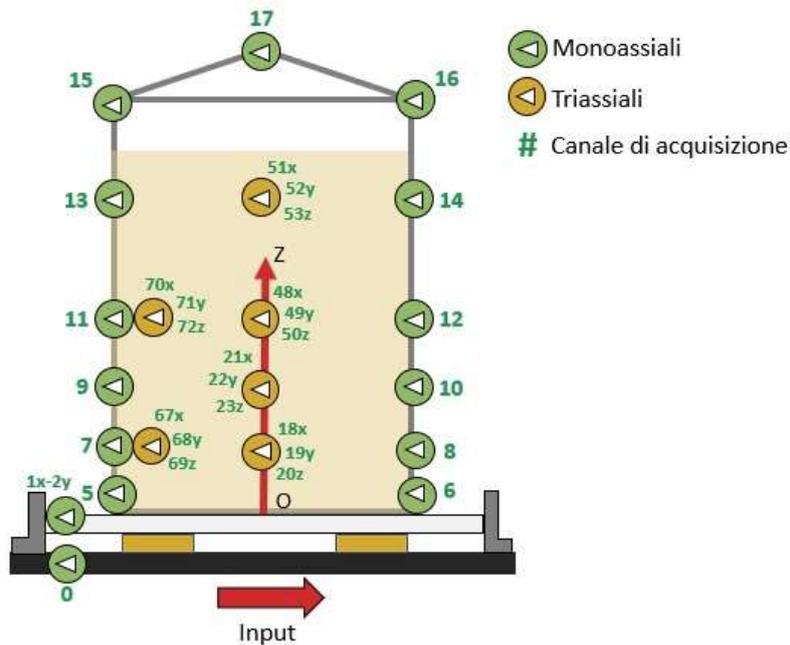


Figure 3.6 posizione e numerazione canali degli accelerometri uniassiali e triassiali

### Estensimetri

Gli estensimetri (strain gauges) sono stati posizionati esternamente alla struttura, sia in verticale, sui montanti, sia in orizzontale, direttamente sulla virola corrugata.

Gli estensimetri utilizzati sono di tipo elettrico a resistenza, costituiti da una griglia di filo metallico applicata rigidamente su un supporto plastico. L'estensimetro è poi incollato alla superficie da monitorare tramite collanti istantanei. Durante le prove il filo metallico segue la deformazione dell'elemento a cui viene incollato, allungandosi o accorciandosi, generando una variazione della resistenza elettrica del filo. Misurando tali variazioni con il ponte di Wheatstone si risale all'entità della deformazione locale.

La strumentazione verticale è stata distribuita sulla sezione trasversale del montante in modo tale da poter ricostruire lo stato tensionale<sup>3</sup> ipotizzando un comportamento secondo la teoria di De Saint Venant. Sono stati monitorati solamente una parte dei montanti, rispetto alla direzione di applicazione dell'input sismico, in quanto, essendo la struttura simmetrica in pianta, si prevede un comportamento simmetrico. Inoltre, i restanti montanti sono monitorati attraverso dei marker che ne misurano lo spostamento nel tempo.

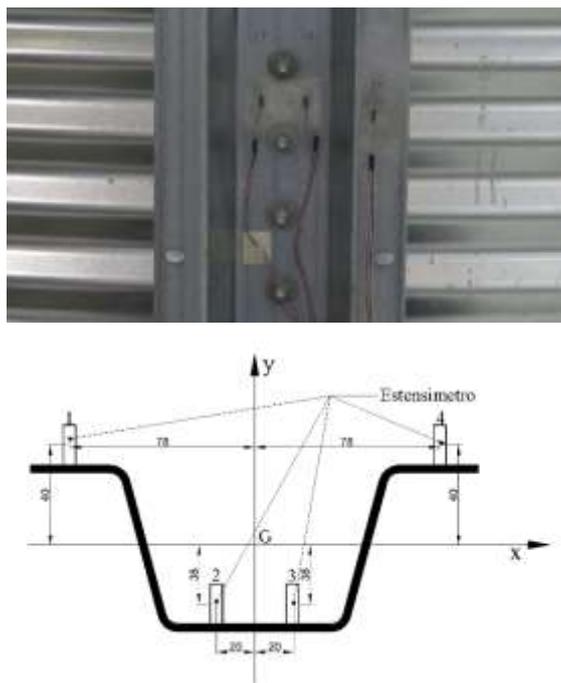


Figure 3.7 particolare estensimetri, foto (sinistra) e schema grafico (destra)

Il numero di montanti monitorati varia con la quota, secondo quanto riportato di seguito:

- Quota  $z = 42$  cm: i montanti monitorati sono in totale 5, per un totale di 14 estensimetri.
- Quota  $z = 49$  cm: i montanti monitorati sono in totale 2, per un totale di 4 estensimetri.
- Quota  $z = 150$  cm: i montanti monitorati sono in totale 2 (in direzione di applicazione dell'input sismico), per un totale di 4 estensimetri.
- Quota  $z = 250$  cm: i montanti monitorati sono in totale 1, per un totale di 1 estensimetro.

<sup>3</sup> per maggiori informazioni consultare la tesi di Matteo Marra: “Prove su tavola vibrante di silo metallico a fondo piano: identificazione dinamica mediante accelerometri”

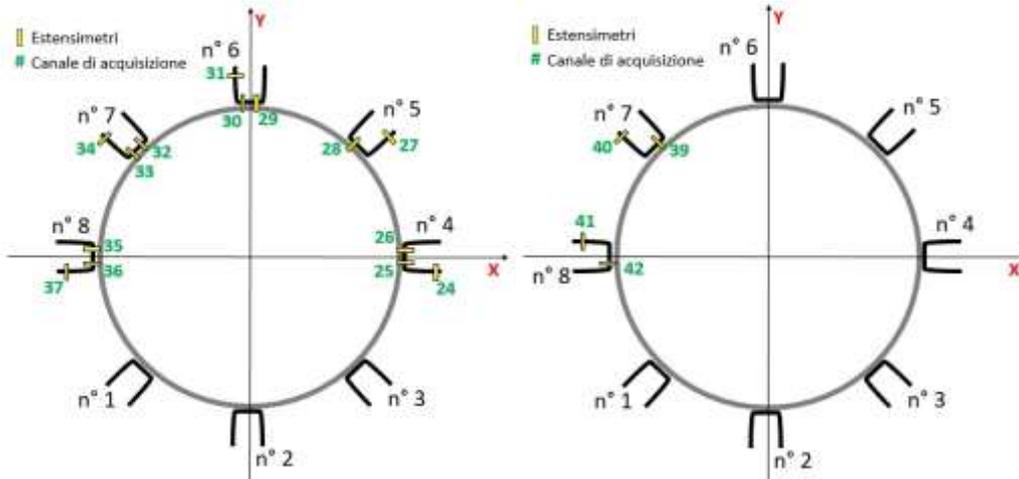


Figure 3.8 posizione e numerazione canali degli estensimetri posizionati a  $Z = 42$  cm (sinistra) e a  $Z = 49$  cm (destra)

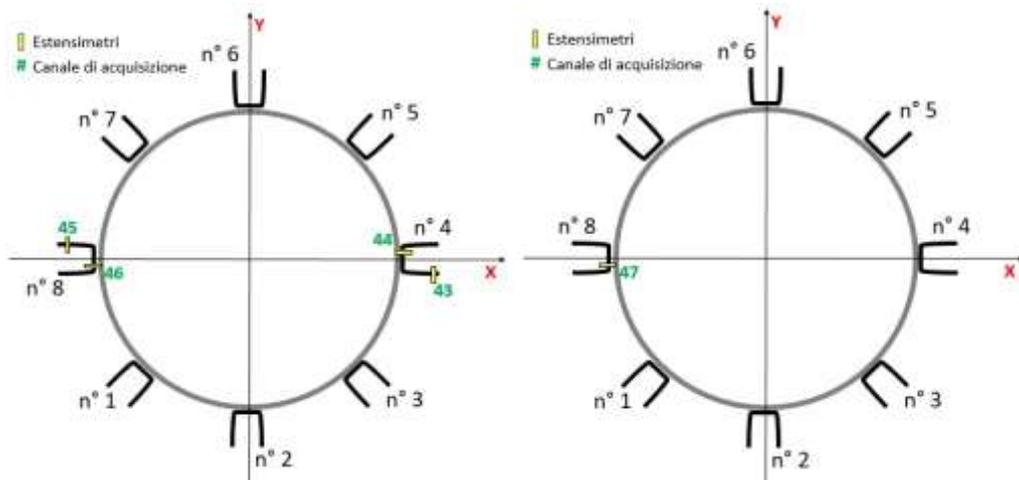


Figure 3.9 posizione e numerazione canali degli estensimetri posizionati a  $Z = 150$  cm (sinistra) e a  $Z = 250$  cm (destra)

### Celle di pressione

Le celle di pressione sono posizionate alla quota di 42 cm e alla quota di 150 cm rispettivamente due per ogni quota. Sono di forma cilindrica e di due tipologie che differiscono per l'area della superficie di misura,  $r = 5.50$  cm e  $r = 2.45$  cm.

Le celle di pressione sono costituite da un cilindro esterno ed uno interno libero di scorrere e di applicare una forza, e quindi una deformazione, su una cella di carico elettronica che ne misura il valore. Dal tale valore, conoscendo i raggi dei vari cilindri si ricava la pressione.



Figure 3.10 celle di pressione, foto (sinistra) e schema grafico (destra)

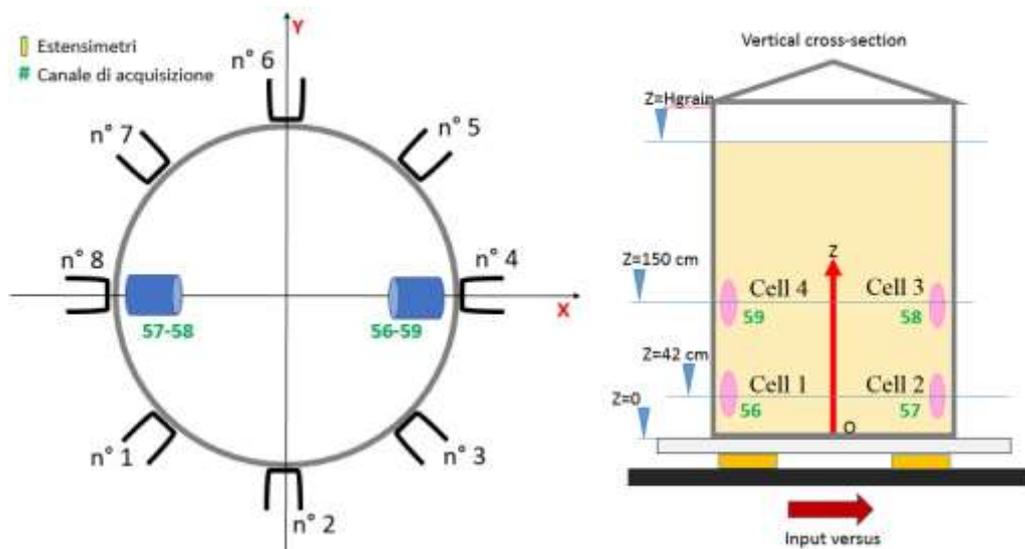


Figure 3.11 posizione e numerazione canali delle celle di pressione

Markers

I marker sono elementi catarifrangenti, la cui posizione viene monitorata, con frequenza di 200 Hz, nel tempo tramite un sistema di acquisizione ottica 3D con videocamere ad alta risoluzione.

Tale strumentazione è stata posizionata come in figura 3.12. I marker totali sono 70 e sono divisi in gruppi in base alla posizione in cui sono stati inseriti:

- montanti e piastre di ancoraggio: permettono di valutare la deformata ad ogni istante temporale;
- tavola vibrante: permettono di individuare il sistema di riferimento globale a cui gli spostamenti acquisiti sono riferiti;
- virola corrugata: permettono di effettuare valutazioni prettamente sulle pareti del silo così da avere maggiori informazioni sul meccanismo resistente che si sviluppa;
- platea di fondazione: vengono utilizzati per valutare e controllare eventuali spostamenti relativi tra platea e tavola vibrante.

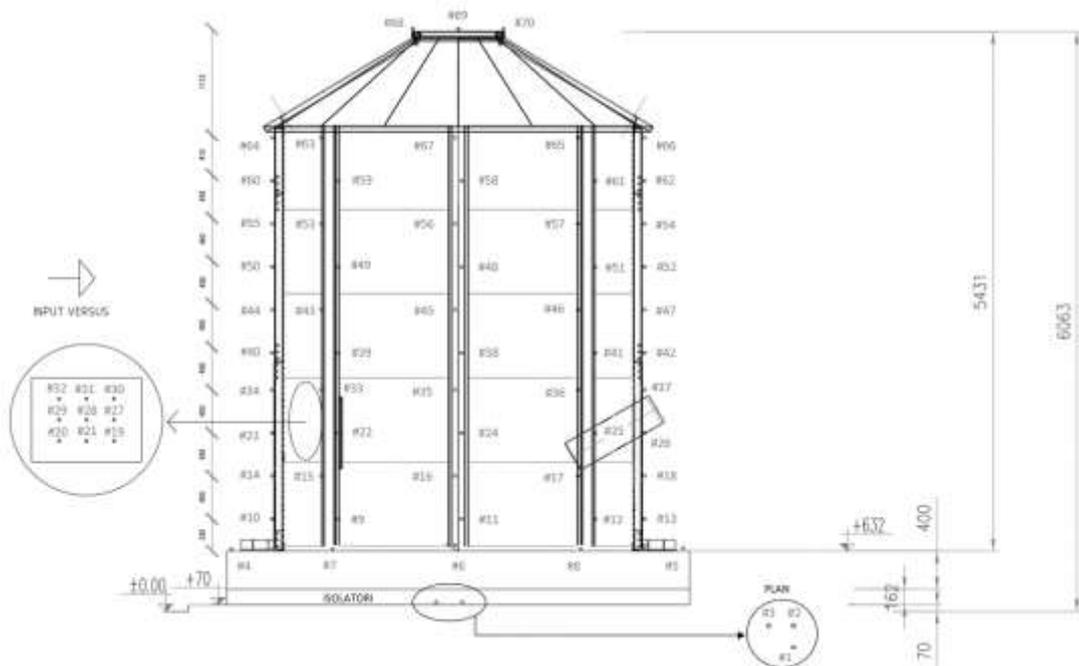


Figure 3.12 posizioni marker



Figure 3.13 posizione e numerazione dei canali dei marker

Il sistema di riferimento a cui sono riferite le misure è individuato da tre marker posizionati sulla tavola vibrante. L'asse X è parallelo alla direzione di immissione dell'input della tavola vibrante, mentre l'asse Y è ortogonale all'asse X e giace sul piano della tavola vibrante, infine l'asse Z risulta uscente dal piano realizzato dall'asse X e Y.

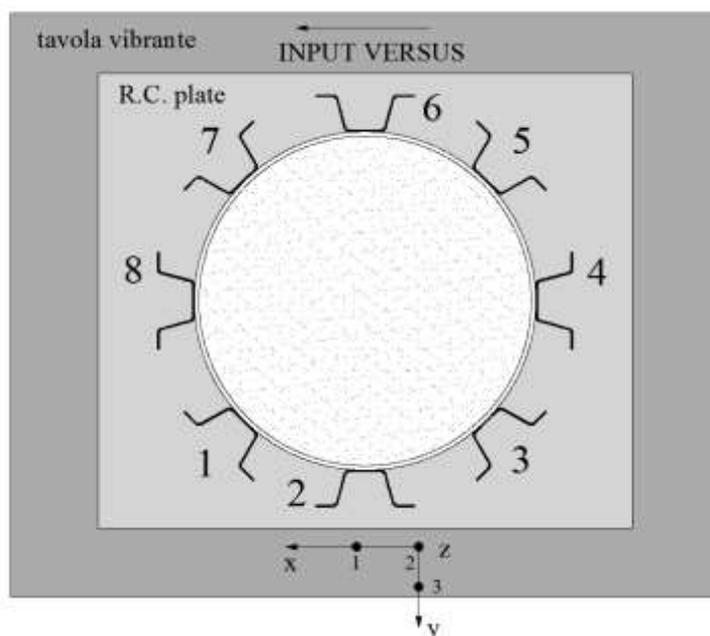


Figure 3.14 sistema di riferimento globale dei marker

### 3.3 Input utilizzati

Al fine di soddisfare gli obiettivi finali che la campagna sperimentale si è posta, sono stati individuati i seguenti input con cui eccitare la struttura:

- rumore bianco (*white noise*: WN) a diversi valori di accelerazione massima (PGA) che permette l'identificazione dinamica del sistema struttura – materiale insilato. Infatti, essendo un segnale con alto contenuto in tutte le frequenze, è possibile valutare la frequenza propria del sistema che, allo stato attuale, risulta essere una delle questioni aperte riguardo alla normativa;
- sinusoidi a bassa frequenza (0.5 – 1 Hz) con le quali è possibile ottenere un ampio intervallo temporale in cui è ragionevole considerare una condizione di accelerazione costante, in corrispondenza di ogni picco. In questo modo si ottengono risultati in accordo con le ipotesi delle teorie proposte dalla ricerca scientifica (Silvestri et al., Pieraccini et al.);
- accelerogrammi utilizzati per investigare la risposta simica del silo.

Gli accelerogrammi utilizzati sono stati scelti in quanto garantiscono compatibilità con lo spettro di progetto del silo, definito in accordo con la normativa.

- artificiale MCE: A1;

L'accelerogramma A1 è stato costruito rispettando lo spettro definito dalla normativa europea considerando il tipo I, classe di suolo C, PGA di MCE pari a 0.45g.

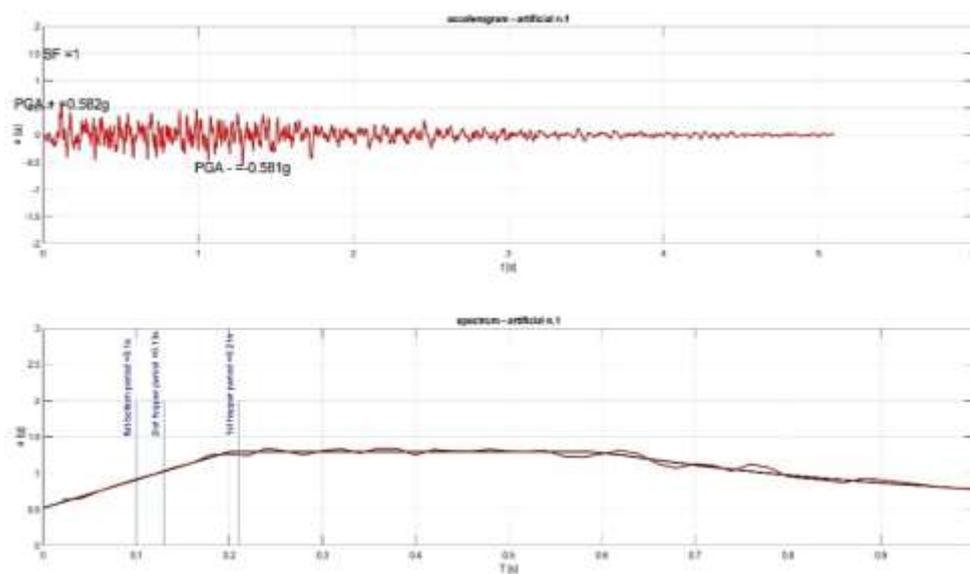


Figure 3.15 spettro compatibilità accelerogramma A1

– reali scalati: RS1 e RS3 ottenuti con l'ausilio del software REXEL.

L'accelerogramma RS1 (misurato in Irpinia il 23/11/1980) è stato scelto in quanto è caratterizzato da alti valori a frequenze non prossime alla frequenza propria della struttura, prevista in fase di progettazione della prova.

L'accelerogramma RS3 (misurato a Kalamata, Grecia, il 13/09/1986) è stato scelto in modo tale da generare una condizione di amplificazione dinamica sulla struttura che quindi genera uno stato tensionale più gravoso per la struttura.

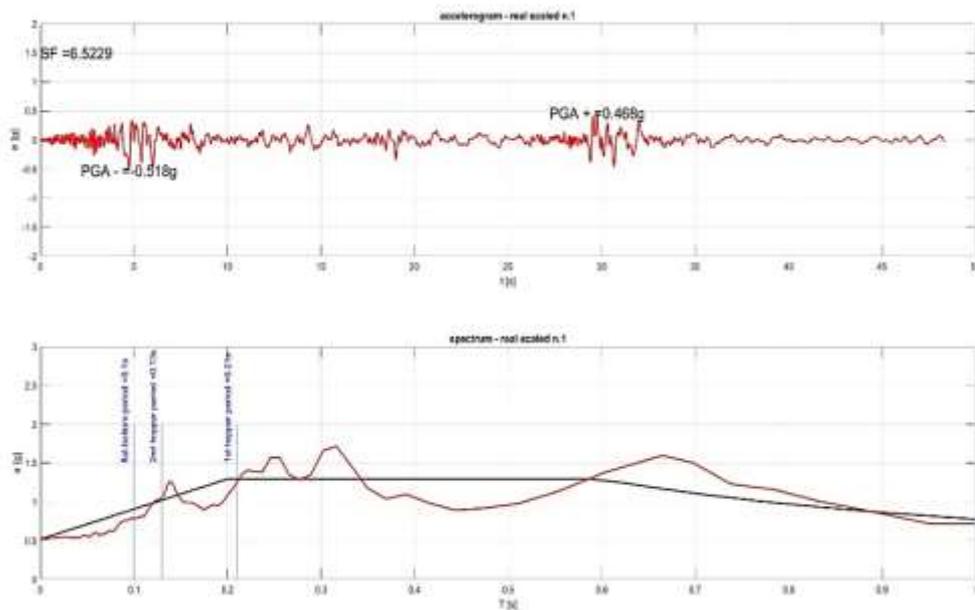


Figure 3.16 spettro compatibilità accelerogramma RS1

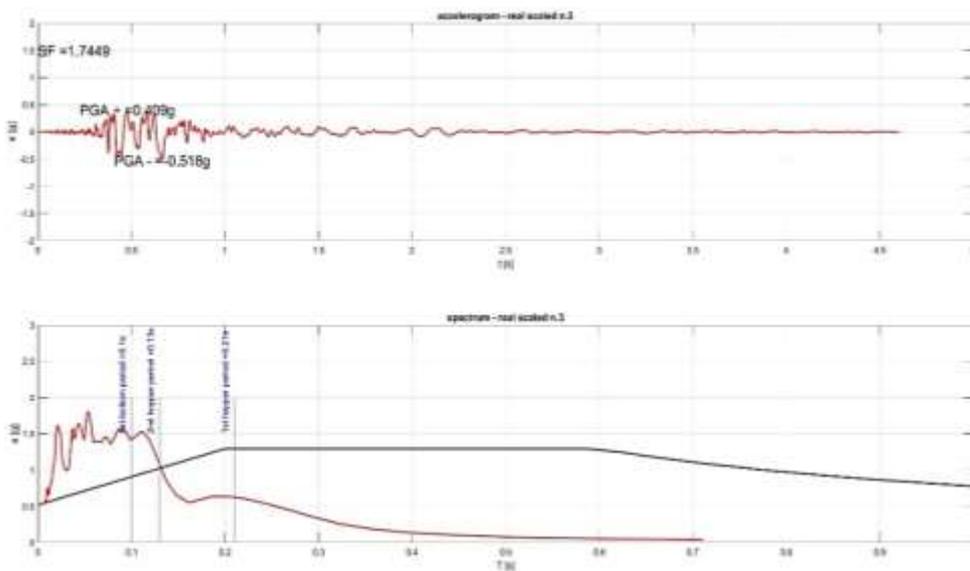


Figure 3.17 spettro compatibilità accelerogramma RS3

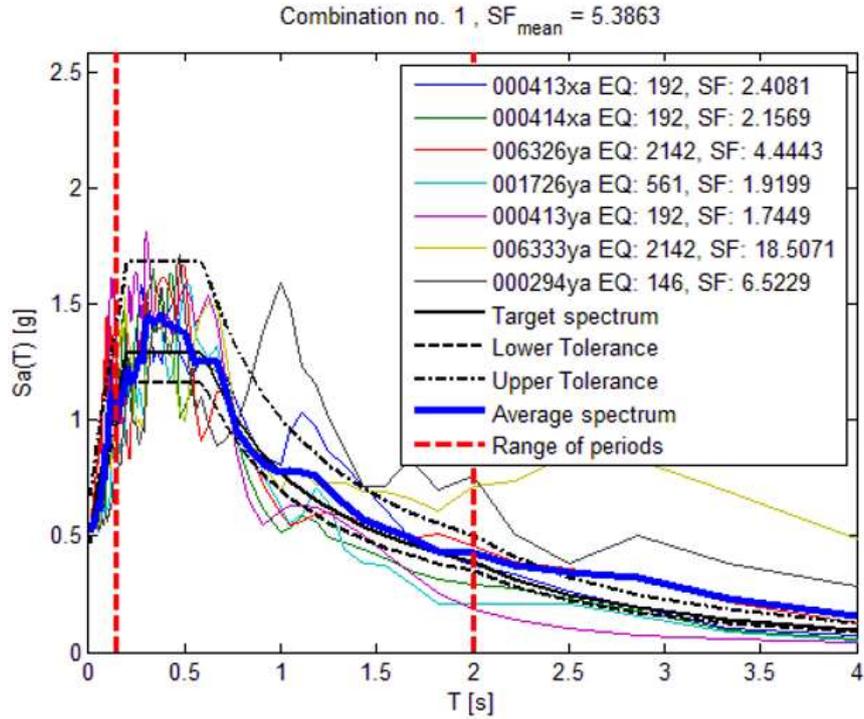


Figure 3.18 rappresentazione compatta dei diversi accelerogrammi reali spettro – compatibili

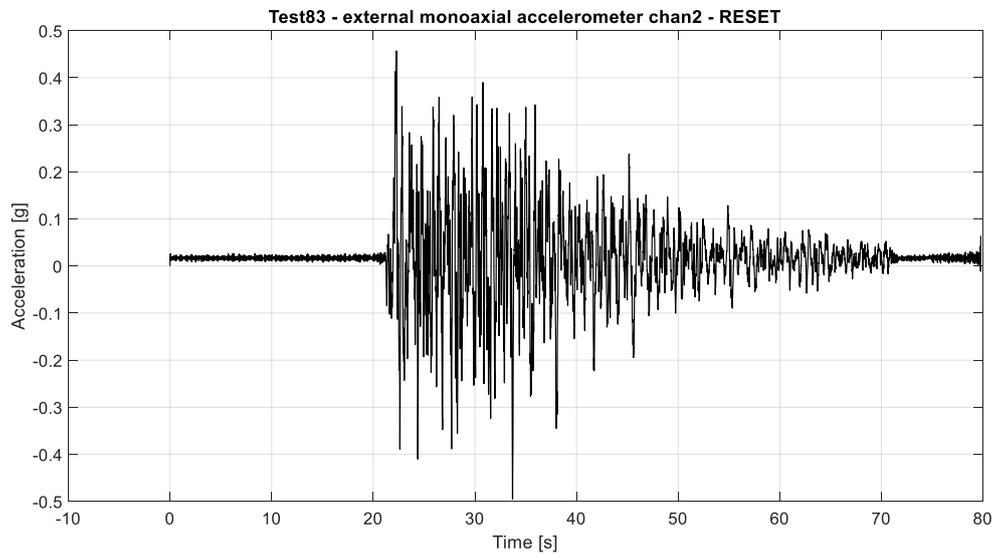


Figure 3.19 accelerogramma A1 0.5 g utilizzato in fase di test

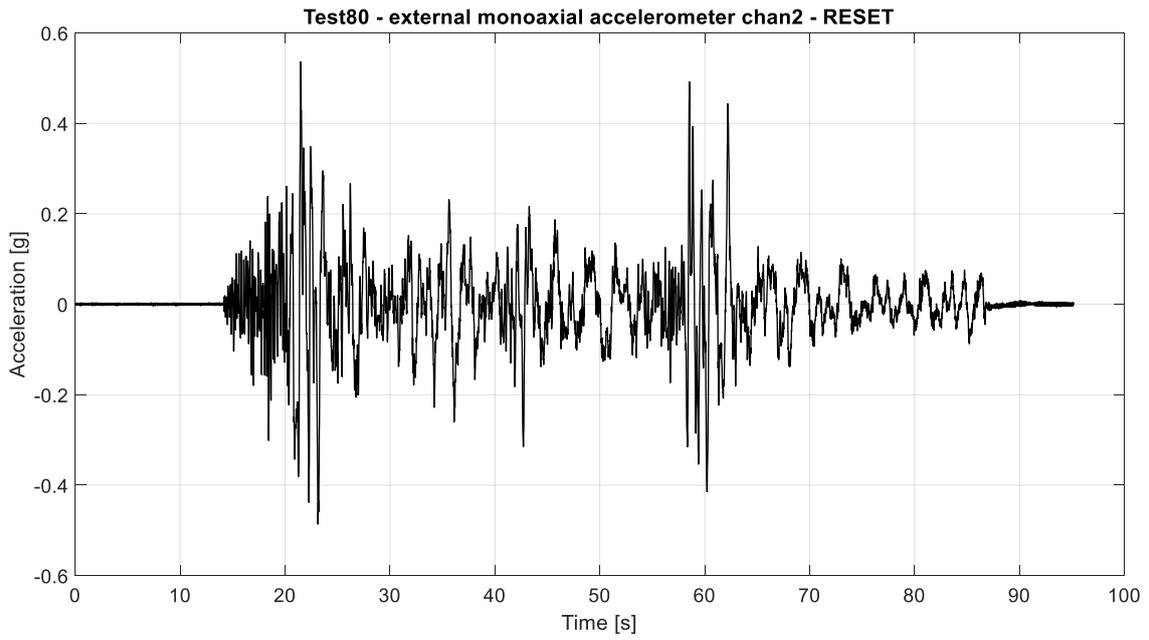


Figure 3.20 accelerogramma RS1 0.5 g utilizzato in fase di test

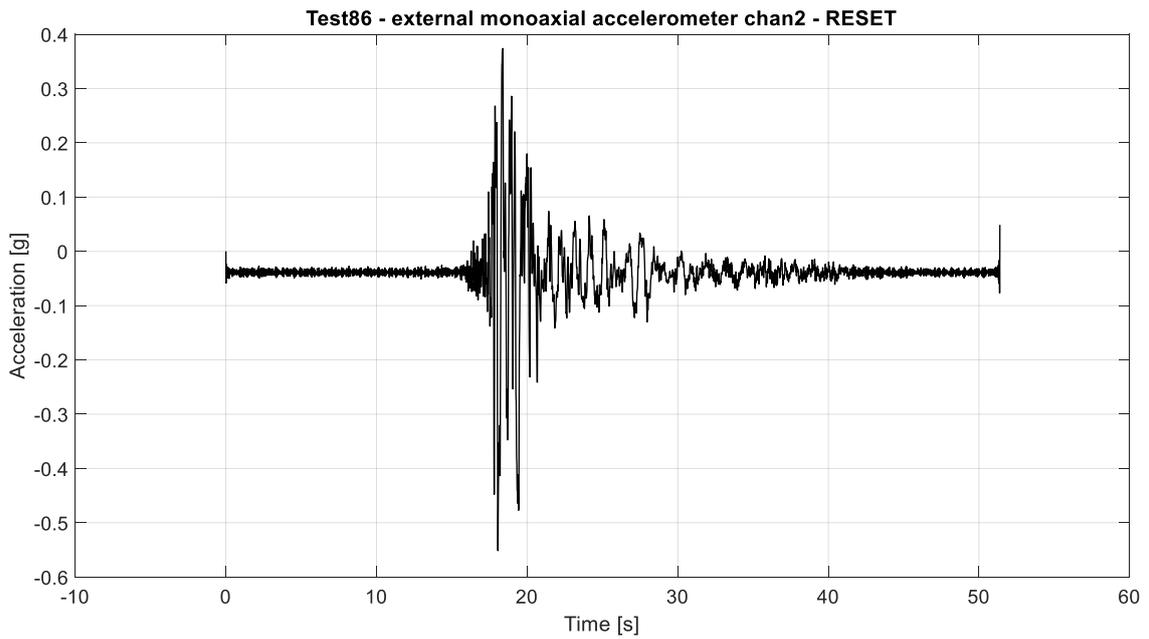


Figure 3.21 accelerogramma RS3 0.5 g utilizzato in fase di test

### 3.4 Configurazioni testate

La struttura viene testata sulla tavola vibrante in due configurazioni:

- a base fissa;
- a base isolata;

La prima configurazione permette di studiare il comportamento del sistema struttura metallica – materiale e identificare le sue proprietà dinamiche, sotto l'azione di diversi input, riportati al paragrafo §3.3.

La configurazione fissa è garantita dalla presenza di ancoraggi metallici applicati tra la platea di fondazione e la tavola vibrante (come in figura 3.21), in modo da evitare eventuali meccanismi rigidi quali lo scorrimento e il ribaltamento della struttura sovrastante. Tramite la rimozione di questi ultimi si ottiene la seconda configurazione.

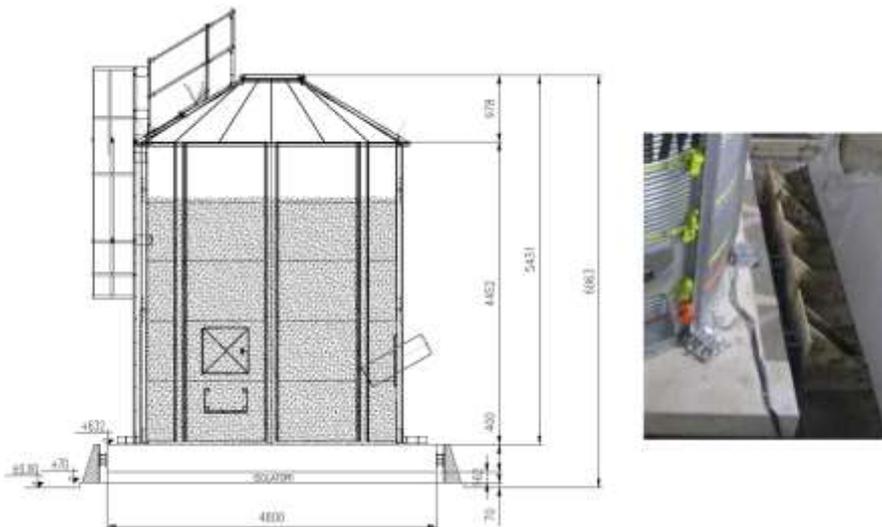


Figure 3.22 schema grafico della configurazione a base fissa (sinistra) e particolare degli ancoraggi (destra)

La seconda configurazione ha un duplice scopo: in primo luogo, studiare gli effetti del sistema di isolamento sulle pressioni esercitate dal solido granulare sulla parete del silo, poiché, come è noto, la risposta dinamica del sistema grano – silo è significativamente modificata dagli isolatori; in secondo luogo, rispetto alla configurazione a base fissa, valutare i vantaggi dell'introduzione di un sistema di isolamento di base per un possibile ragionamento sulla fattibilità e l'analisi costi/benefici di una soluzione ancora poco esplorata.

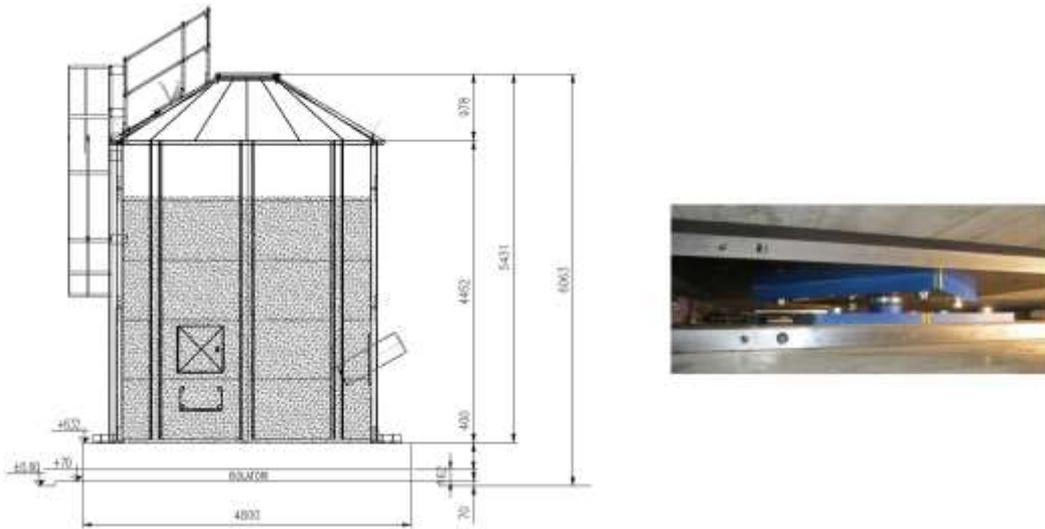


Figure 3.23 schema grafico della configurazione a base isolata (sinistra) e particolare di un isolatore (destra)

### 3.5 Programma di prova

Il programma prove comprende l'elenco di tutte le prove eseguite divise in 4 fasi:

- riempimento del silo;
- configurazione a base fissa;
- configurazione isolata alla base;
- scarico del silo.

Il protocollo per i test prevede prima dell'inizio della fase di prove a configurazione fissa una fase di tuning della tavola al fine di ottenere una funzione di trasferimento pari a 1, ovvero tale che, dato un input, la tavola è in grado di riprodurlo con errori minimi. Questa procedura viene eseguita utilizzando input di tipo SLOW ovvero input molto lunghi con accelerazioni basse e segnali di tipo white noise WN a basse accelerazioni (0.03g e 0.07g).

Inoltre, per ogni tipo di input, vengono eseguite più ripetizioni dello stesso (compensate) ad accelerazioni crescenti fino all'ultima compensata, caratterizzata dall'effettiva accelerazione massima voluta.

Tutte le prove sono state numerate come in tabella 3.1 e le sigle utilizzate sono le seguenti:

- RND: segnale di rumore bianco (white noise);
- SIN: input sinusoidale;
- EQUAKE: accelerogramma;
- SLOW: input lento per calibrare il controller della tavola vibrante;
- PULSE: impulso utilizzato per la configurazione a base isolata.

3. Progetto SERA - SILOS

TIME	N° TEST	SIGNAL	COMP.	PGA
<b>FILLING - 20/02/2019</b>				
11:49	Load 1	first 150 KN amount of grain		
12:11	Load 2			
12:47	Load 3	second 100 KN amount of grain		
13:19	Load 4			
13:53	Load 5	third 35 KN amount of grain		
<b>FIXED BASE - 25/02/2019</b>				
13:48	1	RND	/	0.07 g
14:21	2	SIN 0.5 Hz	A	0.1g
14:23	3	SIN 0.5 Hz	B	0.1g
14:26	4	SIN 0.5 Hz	C	0.1g
14:27	5	SIN 0.5 Hz	D	0.1g
14:30	6	SIN 0.5 Hz	E	0.1g
14:32	7	SIN 0.5 Hz	F	0.1g
14:34	8	SIN 0.5 Hz	G	0.1g
14:42	9	SIN 0.5 Hz	/	0.1g
15:19	10	EQUAKE RS1	A	0.1g
15:31	11	EQUAKE RS1	B	0.1g
15:35	12	EQUAKE RS1	C	0.1g
15:37	13	EQUAKE RS1	D	0.1g
15:35	14	EQUAKE A1	A	0.1g
15:49	15	EQUAKE A1	B	0.1g
15:51	16	EQUAKE A1	C	0.1g
15:57	17	EQUAKE RS3	A	0.1 g
15:58	18	EQUAKE RS3	B	0.1 g
16:00	19	EQUAKE RS3	C	0.1 g
18:02	20	RND	A	0.15 g
18:06	21	RND	B	0.15 g
18:24	22	SIN 1 Hz	A	0.2g
18:25	23	SIN 1 Hz	B	0.2g
18:27	24	SIN 1 Hz	C	0.2g
18:28	25	SIN 1 Hz	D	0.2g
18:30	26	SIN 1 Hz	E	0.2g

3. Progetto SERA - SILOS

<b>FIXED BASE – 26/02/2019</b>				
10:27	27	SLOW	2	-
10:39	28	SLOW	3	-
11:08	29	EQUAKE RS1	A	0.2 g
11:11	30	EQUAKE RS1	B	0.2 g
11:13	31	EQUAKE RS1	C	0.2 g
11:21	32	EQUAKE A1	A	0.2 g
11:23	33	EQUAKE A1	B	0.2 g
11:26	34	EQUAKE A1	C	0.2 g
11:30	35	EQUAKE RS3	A	0.2 g
11:32	36	EQUAKE RS3	B	0.2 g
11:33	37	EQUAKE RS3	C	0.2 g
11:36	38	EQUAKE RS3	D	0.2 g
11:39	39	RND	A	0.2 g
11:43	40	RND	A_bis	0.2 g
12:38	41	SIN 1 Hz	A	0.3g
12:40	42	SIN 1 Hz	B	0.3g
12:41	43	SIN 1 Hz	C	0.3g
12:43	44	SIN 1 Hz	D	0.3g
12:45	45	SIN 1 Hz	E	0.3g
12:54	46	EQUAKE RS1	A	0.3 g
12:57	47	EQUAKE RS1	B	0.3 g
12:59	48	EQUAKE RS1	C	0.3 g
13:03	49	EQUAKE A1	A	0.3 g
13:05	50	EQUAKE A1	B	0.3 g
13:07	51	EQUAKE A1	C	0.3 g
13:12	52	EQUAKE RS3	A	0.3 g
13:14	53	EQUAKE RS3	B	0.3 g
13:15	54	EQUAKE RS3	C	0.3 g
13:17	55	EQUAKE RS3	D	0.3 g
15:14	56	SIN 1 Hz	A	0.4 g
15:16	57	SIN 1 Hz	B	0.4 g
15:17	58	SIN 1 Hz	C	0.4 g
15:19	59	SIN 1 Hz	D	0.4 g

### 3. Progetto SERA - SILOS

15:30	60	EQUAKE RS1	A	0.4 g
15:32	61	EQUAKE RS1	B	0.4 g
15:59	62	EQUAKE RS1	C	0.4 g
16:05	63	EQUAKE A1	A	0.4 g
16:08	64	EQUAKE A1	B	0.4 g
16:10	65	EQUAKE A1	C	0.4 g
16:12	66	EQUAKE A1	D	0.4 g
16:16	67	EQUAKE RS3	A	0.4 g
16:18	68	EQUAKE RS3	B	0.4 g
16:19	69	EQUAKE RS3	C	0.4 g
16:49	70	STATIC	A	-
17:18	71	SIN 1 Hz	B	0.5 g
17:20	72	SIN 1 Hz	C	0.5 g
17:23	73	SIN 1 Hz	D	0.5 g
17:25	74	SIN 1 Hz	E	0.5 g
17:29	75	SIN 1 Hz	F	0.5 g
17:31	76	SIN 1 Hz	G	0.5 g
17:37	77	EQUAKE RS1	A	0.5 g
17:41	78	EQUAKE RS1	B	0.5 g
17:45	79	EQUAKE RS1	C	0.5 g
17:48	80	EQUAKE RS1	D	0.5 g
17:53	81	EQUAKE A1	A	0.5 g
17:55	82	EQUAKE A1	B	0.5 g
17:57	83	EQUAKE A1	C	0.5 g
18:02	84	EQUAKE RS3	A	0.5 g
18:03	85	EQUAKE RS3	B	0.5 g
18:05	86	EQUAKE RS3	C	0.5 g
<b>FIXED BASE - 27/02/2019</b>				
10:09	87	SLOW	4	-
10:48	88	RND	B	0.07 g
10:51	89	RND	B_bis	0.07 g
10:57	90	RND	C	0.15g
10:59	91	RND	C_bis	0.15g
11:04	92	RND	B	0.2g

### 3. Progetto SERA - SILOS

11:06	93	RND	B_bis	0.2g
11:23	94	RND	A	0.25g
11:25	95	RND	A_bis	0.25g
11:25	96	RND	A_tris	0.25g
11:56	97	SIN 0.5 Hz	A	0.1 g
11:57	98	SIN 0.5 Hz	B	0.1 g
11:59	99	SIN 0.5 Hz	C	0.1 g
12:01	100	SIN 0.5 Hz	D	0.1 g
12:02	101	SIN 0.5 Hz	E	0.1 g
12:07	102	SIN 1 Hz	A	0.2 g
12:08	103	SIN 1 Hz	B	0.2 g
12:10	104	SIN 1 Hz	C	0.2 g
12:11	105	SIN 1 Hz	D	0.2 g
12:13	106	SIN 1 Hz	E	0.2 g
12:16	107	SIN 1 Hz	A	0.3 g
12:19	108	SIN 1 Hz	B	0.3 g
12:20	109	SIN 1 Hz	C	0.3 g
12:22	110	SIN 1 Hz	D	0.3 g
12:24	111	SIN 1 Hz	E	0.3 g
13:12	112	SIN 1 Hz	A	0.4 g
13:13	113	SIN 1 Hz	B	0.4 g
13:16	114	SIN 1 Hz	C	0.4 g
13:17	115	SIN 1 Hz	D	0.4 g
13:18	116	SIN 1 Hz	E	0.4 g
13:21	117	SIN 1 Hz	A	0.5 g
13:22	118	SIN 1 Hz	B	0.5 g
13:23	119	SIN 1 Hz	C	0.5 g
13:27	120	SIN 1 Hz	D	0.5 g
13:29	121	SIN 1 Hz	E	0.5 g
15:01	122	EQUAKE RS3	/	0.6 g
15:07	123	EQUAKE RS1	/	0.6 g
15:25	124	EQUAKE RS13	bis	0.6 g
15:37	125	EQUAKE A1	/	0.6 g
16:01	126	SIN 5Hz	A	0.1 g

### 3. Progetto SERA - SILOS

16:03	127	SIN 5Hz	B	0.1 g
16:04	128	SIN 5Hz	C	0.1 g
16:05	129	SIN 5Hz	D	0.1 g
16:27	130	SIN 6 Hz	A	0.1g
16:28	131	SIN 6 Hz	B	0.1g
16:30	132	SIN 6 Hz	C	0.1g
16:31	133	SIN 6 Hz	D	0.1g
16:32	134	SIN 6 Hz	E	0.1g
16:49	135	SIN 7 Hz	A	0.1g
16:50	136	SIN 7 Hz	B	0.1g
16:52	137	SIN 7 Hz	C	0.1g
16:53	138	SIN 7 Hz	D	0.1g
16:54	139	SIN 7 Hz	E	0.1g
17:05	140	SIN 8 Hz	A	0.1 g
17:06	141	SIN 8 Hz	B	0.1 g
17:07	142	SIN 8 Hz	C	0.1 g
17:09	143	SIN 8 Hz	D	0.1 g
17:10	144	SIN 8 Hz	E	0.1 g
17:12	145	SIN 8 Hz	F	0.1 g
<b>ISOLATED BASE – 01/03/2019</b>				
11:19	146	SLOW	5	-
11:20	147	SLOW	6	-
11:57	148	RND	A	0.05 g
11:59	149	RND	B	0.05 g
12:02	150	RND	C	0.05 g
12:04	151	RND	D	0.05 g
12:07	152	RND	E	0.05 g
12:11	153	RND	F	0.05 g
12:13	154	RND	G	0.05 g
12:15	155	RND	H	0.05 g
12:18	156	RND	I	0.05 g
12:20	157	RND	L	0.05 g
12:23	158	RND	M	0.05 g
12:26	159	RND	N	0.05 g

### 3. Progetto SERA - SILOS

12:28	160	RND	O	0.05 g
12:31	161	RND	P	0.05 g
12:34	162	RND	Q	0.05 g
12:54	163	RND	2A	0.05 g
12:55	164	RND	2B	0.05 g
12:59	165	RND	2C	0.05 g
13:08	166	EQUAKE A1	A	0.1g
13:08	167	EQUAKE A1	B	0.1g
13:10	168	EQUAKE A1	C	0.1g
13:22	169	RND	A	0.3 g
13:25	170	RND	B	0.3 g
13:37	171	EQUAKE A1	A	0.1 g
13:39	172	EQUAKE A1	B	0.1 g
13:42	173	EQUAKE A1	C	0.1 g
13:44	174	EQUAKE A1	D	0.1 g
13:47	175	EQUAKE A1	A	0.2 g
13:51	176	EQUAKE A1	B	0.2 g
13:53	177	EQUAKE A1	C	0.2 g
13:56	178	EQUAKE A1	D	0.2 g
13:58	179	EQUAKE A1	E	0.2 g
14:02	180	RND	A	0.4 g
14:06	181	RND	B	0.4 g
14:16	182	RND	2A	0.15 g
14:27	183	EQUAKE A1	A	0.3 g
14:29	184	EQUAKE A1	B	0.3 g
14:32	185	EQUAKE A1	C	0.3 g
14:34	186	EQUAKE A1	D	0.3 g
14:38	187	EQUAKE A1	E	0.3 g
14:47	188	RND	2A	0.2 g
15:00	189	EQUAKE A1	A	0.4 g
15:04	190	EQUAKE A1	B	0.4 g
15:06	191	EQUAKE A1	C	0.4 g
15:10	192	EQUAKE A1	D	0.4 g
15:12	193	EQUAKE A1	E	0.4 g

### 3. Progetto SERA - SILOS

15:48	194	EQUAKE A1	/	0.45 g
16:02	195	EQUAKE A1	/	0.5 g
16:30	196	EQUAKE A1	/	0.55 g
<b>ISOLATED BASE – 04/03/2019</b>				
10:29	197	SLOW	7	-
10:41	198	RND	3A	0.2g
10:44	199	RND	4A	0.2g
10:47	200	RND	4B	0.2g
10:55	201	EQUAKE RS3	A	0.1 g
10:57	202	EQUAKE RS3	B	0.1 g
10:58	203	EQUAKE RS3	C	0.1 g
11:00	204	EQUAKE RS3	D	0.1 g
11:02	205	EQUAKE RS3	E	0.1 g
11:28	206	EQUAKE RS3	A	0.2 g
11:30	207	EQUAKE RS3	B	0.2 g
11:32	208	EQUAKE RS3	C	0.2 g
11:34	209	EQUAKE RS3	D	0.2 g
11:35	210	EQUAKE RS3	E	0.2 g
11:53	211	EQUAKE RS3	A	0.3 g
11:54	212	EQUAKE RS3	B	0.3 g
11:56	213	EQUAKE RS3	C	0.3 g
11:57	214	EQUAKE RS3	D	0.3 g
11:59	215	EQUAKE RS3	E	0.3 g
12:15	216	EQUAKE RS3	A	0.4 g
12:17	217	EQUAKE RS3	B	0.4 g
12:18	218	EQUAKE RS3	C	0.4 g
12:20	219	EQUAKE RS3	D	0.4 g
12:21	220	EQUAKE RS3	E	0.4 g
14:17	221	EQUAKE RS3	/	0.45g
14:33	222	EQUAKE RS3	/	0.5g
15:00	223	EQUAKE RS3	/	0.55g
15:15	224	EQUAKE RS1	A	0.1 g
15:18	225	EQUAKE RS1	B	0.1 g
15:20	226	EQUAKE RS1	C	0.1 g

### 3. Progetto SERA - SILOS

15:22	227	EQUAKE RS1	D	0.1 g
15:37	228	EQUAKE RS1	A	0.2 g
15:39	229	EQUAKE RS1	B	0.2 g
15:41	230	EQUAKE RS1	C	0.2 g
15:43	231	EQUAKE RS1	D	0.2 g
16:08	232	EQUAKE RS1	/	0.2 g
16:27	233	EQUAKE RS1	/	0.25 g
16:41	234	EQUAKE RS1	/	0.3 g
17:59	235	EQUAKE RS1	/	0.3 g
18:13	236	EQUAKE RS1	/	0.35 g
<b>ISOLATED BASE – 05/03/2019</b>				
10:08	237	SLOW	8	-
10:20	238	PULSE	A	0.1 g
10:21	239	PULSE	B	0.1 g
10:23	240	PULSE	C	0.1 g
10:24	241	PULSE	D	0.1 g
10:25	242	PULSE	E	0.1 g
10:30	243	PULSE	A	0.2 g
10:31	244	PULSE	B	0.2 g
10:32	245	PULSE	C	0.2 g
10:35	246	PULSE	D	0.2 g
10:50	247	PULSE	E	0.2 g
11:00	248	PULSE	/	0.3g
11:22	249	SIN 0.7 Hz	A	0.13 g
11:23	250	SIN 0.7 Hz	B	0.13 g
11:29	251	SIN 0.7 Hz	C	0.13 g
11:37	252	SIN 0.7 Hz	D	0.13 g
11:44	253	SIN 0.7 Hz	E	0.13 g
12:02	254	SIN 0.6 Hz	A	0.14 g
12:05	255	SIN 0.6 Hz	B	0.14 g
12:13	256	SIN 0.6 Hz	C	0.14 g
<b>DISCHARGING – 06/03/2019</b>				

Tabella 3.2 elenco prove effettuate

## 4 FASE DI RIEMPIMENTO DEL SILO

La fase di riempimento del silo è avvenuta tramite l'inserimento del grano attraverso il foro predisposto sul tetto della struttura. In totale sono state caricate 28.5 tonnellate di materiale granulare che, considerando un peso specifico pari a  $8.40 \text{ kN/m}^3$ , corrispondono a 288 kN.

Per evitare che si rovinasse la strumentazione interna al silo, in particolare gli accelerometri triassiali, si è deciso di deviare leggermente il flusso di grano. Conseguentemente, il riempimento è avvenuto in modo eccentrico, portando il materiale a concentrarsi maggiormente su un lato del silo. Questa configurazione del grano influenza l'interazione con le pareti stesse in quanto la compattazione del materiale, sotto il peso proprio, avverrà anch'essa in modo non simmetrico.

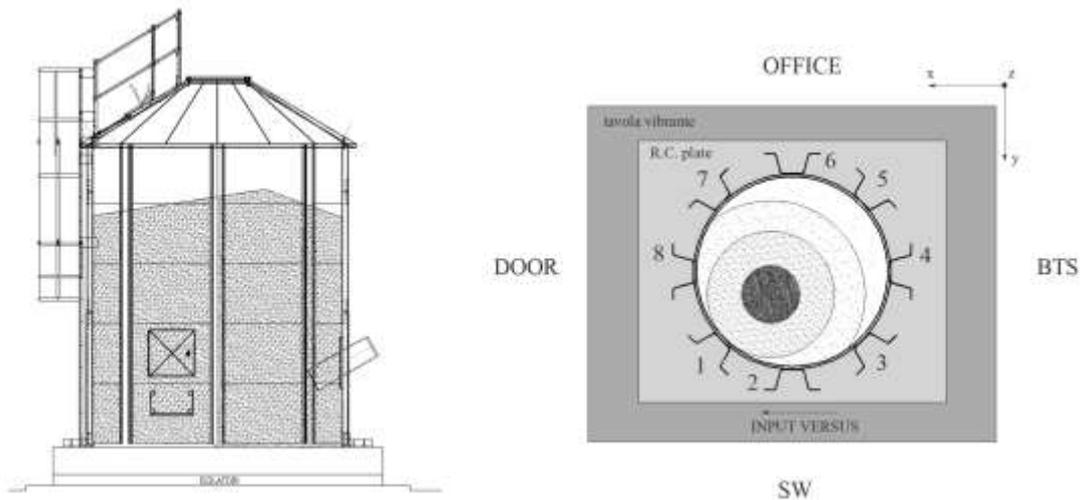


Figure 4.1 schema grafico del caricamento eccentrico del grano

Al fine di conoscere la disposizione del grano interna si sono predisposte delle barre graduate in corrispondenza dei montanti 4,6,8 e 2 (come da figura 4.2).

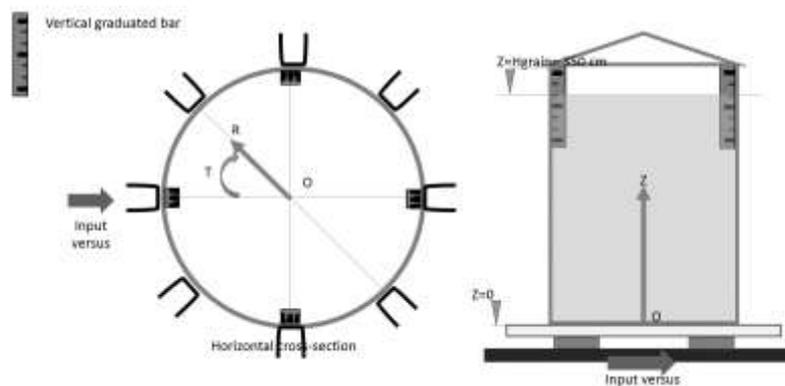


Figure 4.2 posizione delle barre graduate



Figure 4.3 foto barre graduate

#### 4.1 Soluzione statica di Janssen

Il complesso meccanismo che governa l'interazione tra materiale granulare e silo è di fondamentale importanza sia in ambito statico che dinamico. Studi effettuati a partire dal XIX secolo hanno evidenziato come il rischio di collasso della struttura sia maggiore soprattutto durante le fasi di riempimento/scarico e durante eventi sismici.

Per quanto riguarda la fase di riempimento si fa riferimento alla teoria proposta da Janssen [9], teoria largamente accettata e validata da diverse analisi sia numeriche che sperimentali [3].

L'ipotesi alla base della sua formulazione consiste nel definire la pressione verticale ( $p_h$ ) per ogni sezione orizzontale di materiale come costante e pari al valor medio dei valori reali (massimi al centro e minimi alle pareti), come in figura 4.4. A partire dalle pressioni verticali è possibile ricavare le pressioni orizzontali ( $p_v$ ) secondo l'espressione seguente:

$$p_h = K p_v$$

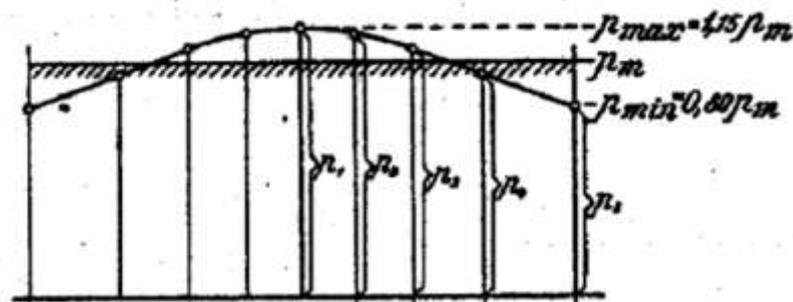


Figure 4.4 andamento delle pressioni sulla sezione orizzontale del silo (figura estratta dall'articolo originale [9])

Lo studio di Janssen parte dalla considerazione che, al momento del riempimento, una parte del peso totale del materiale ( $Q$ ) è completamente supportato dalle pareti della struttura, per cui alla base verrà misurato un peso apparente ( $Q_a$ ).

Questo fenomeno viene attribuito allo sviluppo di attrito all'interfaccia tra materiale e parete. Infatti, la forza d'attrito aumenta in modo tale che, ad un certo livello di riempimento, risulta pari al peso dello strato di grano adiacente alla parete. Da quel livello, la pressione esercitata dal materiale sulla parete raggiunge un valore di plateau, ovvero, un aumento di pressione diventa trascurabile in confronto alla forza di attrito presente. Si parla di effetto di arching, studiato in modo sia numerico che sperimentale [3].

La relazione per valutare la pressione orizzontale è di tipo esponenziale ed è riportata di seguito:

$$p_h = \frac{\gamma R}{\mu} \left( 1 - e^{-\frac{\mu K h}{R}} \right)$$

dove:

- $\gamma$  è il peso specifico del materiale;
- $\mu$  è il coefficiente di attrito tra materiale e parete del silo;
- $R = A/u$  è il raggio idraulico ottenuto come rapporto tra area e circonferenza della sezione trasversale del silo;
- $K$  è il rapporto tra la pressione orizzontale e verticale;
- $h$  è l'altezza di riempimento.

### 4.2 Celle di pressione

Relativamente alla fase di riempimento, in figura 4.5 è mostrato l'andamento della pressione orizzontale esercitata sulle 4 celle, ottenuto allineando le 5 acquisizioni ed eliminando eventuali salti temporali tra le stesse.

Si riportano le seguenti osservazioni:

Il trend dei dati presenta un aumento progressivo fino a plafonarsi secondo un andamento esponenziale. Questo risulta in accordo con quanto previsto dalla teoria presentata da Janssen [9] (vedi paragrafo §4.1).

Inoltre, i momenti nei quali le pressioni misurate diminuiscono possono essere interpretati considerando che, anche durante il riempimento, si può attivare un effetto ad arco, ma solo momentaneo, poiché i grani scorrono gli uni sugli altri modificando la loro posizione precedente. Conseguentemente il peso di tale materiale non viene scaricato sugli strati di grano sottostanti né, quindi, sulle celle di pressione.

La presenza di fenomeni ad arco è da attribuire alla tipologia di percorso tensionale che si sviluppa tra le particelle come evidenziato da diverse ricerche scientifiche [3].

A causa del caricamento eccentrico, le celle alla stessa quota iniziano ad acquisire un aumento di pressione in momenti diversi. Le prime a registrare la presenza del grano sono le celle poste in corrispondenza del montante 8, rispettivamente la cella 2 alla quota  $Z = 42$  cm e la cella 3 alla quota  $Z = 150$  cm.

Infine, la presenza di salti di pressione al minuto 80 e 160 è legata ad un assestamento del grano sotto l'effetto del peso proprio, che avviene rispettivamente durante il cambio dal primo al secondo camion e dal primo al secondo rimorchio del secondo camion.

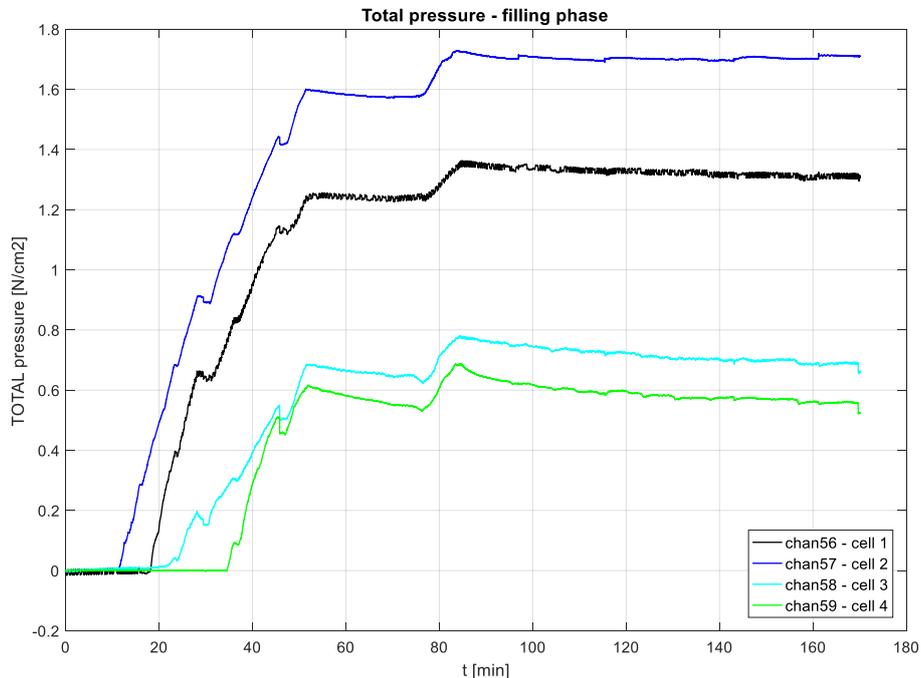


Figure 4.5 andamento delle pressioni statiche durante la fase di caricamento

### 4.3 Estensimetri

Durante questa fase i montanti sono stati monitorati solo attraverso gli estensimetri. Infatti, a causa della presenza dei camion, i marker sono stati acquisiti solo a partire dalla prima prova su base fissa. Nelle figure seguenti è mostrato l'andamento delle deformazioni durante tutta la fase di riempimento. Anche in questo caso si sono allineate le acquisizioni a livello temporale, in modo da avere un quadro complessivo dell'intera fase.

Gli estensimetri mostrano nelle prime fasi del riempimento valori di trazione sui montanti, evidenti soprattutto alle quote più basse. Questo fenomeno è ancora in fase di studio. Per ora, si può ipotizzare che possa dipendere dal fatto che il riempimento sia avvenuto in modo eccentrico e il grano si sia concentrato nella zona di pertinenza dei montanti 1,2 e 3, di cui non abbiamo informazioni in merito alle deformazioni. Quindi, contemporaneamente, il grano, che sta riempiendo il silo, causerebbe uno stato di compressione sui montanti 1,2 e 3 e di trazione nei restanti. Il fenomeno sopra descritto permane per un breve lasso di tempo in quanto, con l'aumento del livello di riempimento, i montanti tornano ad essere compressi.

Nella figura 4.16 riportata di seguito, si intende evidenziare la presenza di uno strano comportamento periodico delle tensioni, con periodo di circa 7 minuti. Ciò sembra poter essere spiegato attraverso un qualche tipo di fenomeno fisico, ma una specifica interpretazione è ancora in fase di elaborazione.

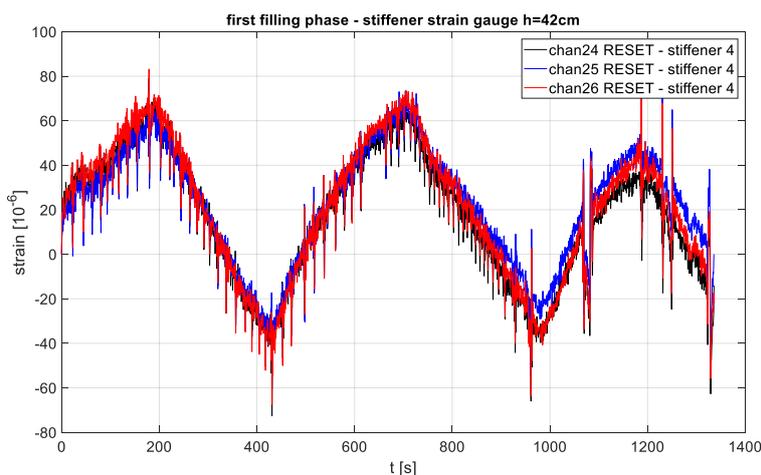
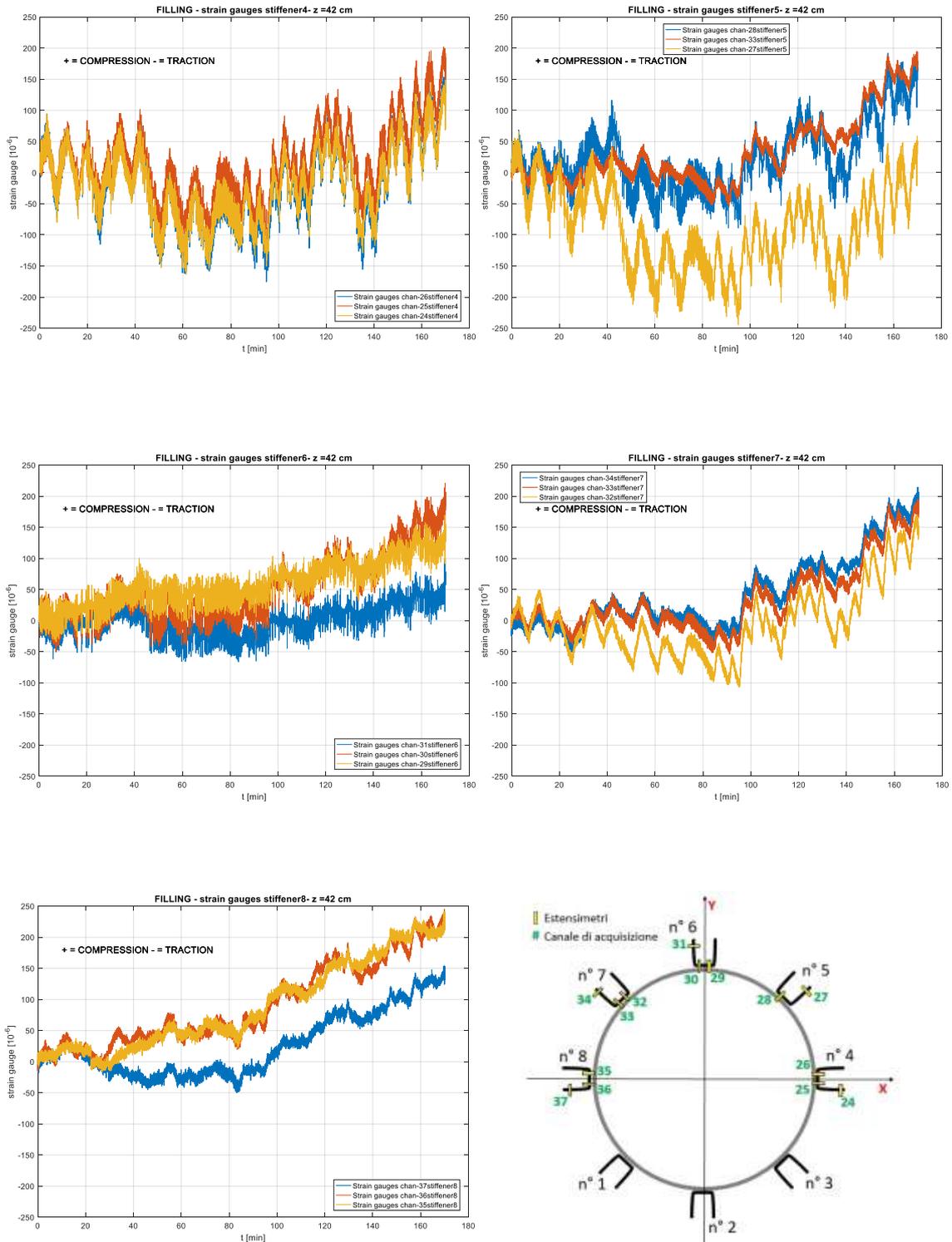


Figure 4.6 fenomeno periodico della deformazione durante la fase di riempimento

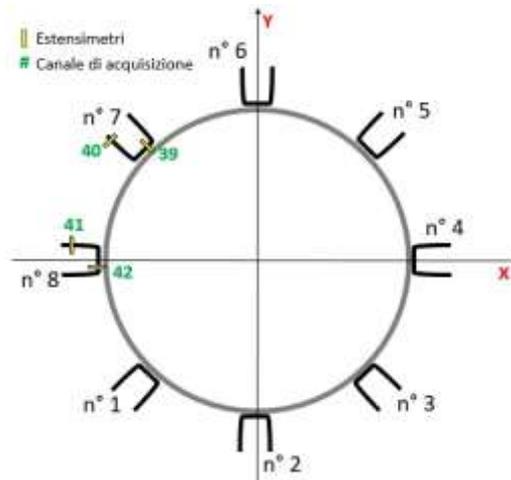
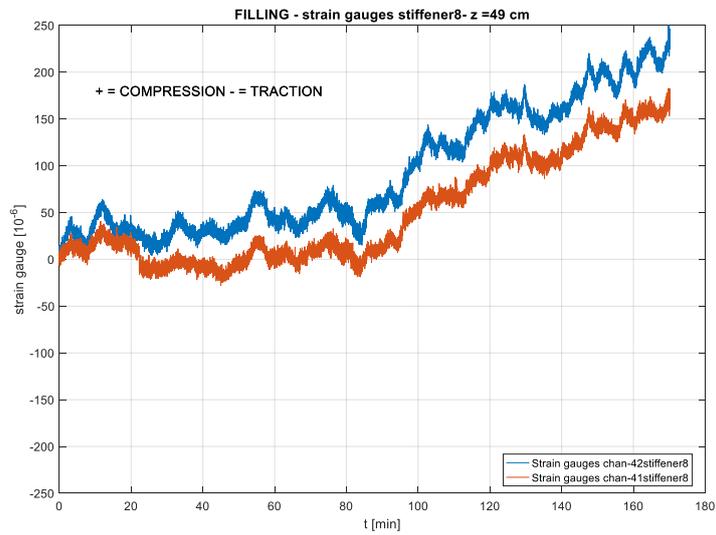
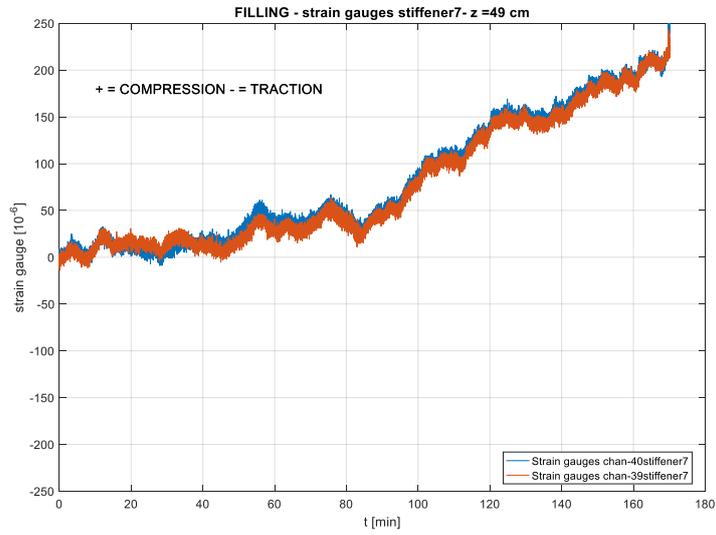
## 4. Fase di riempimento del silo

Quota Z = 42 cm



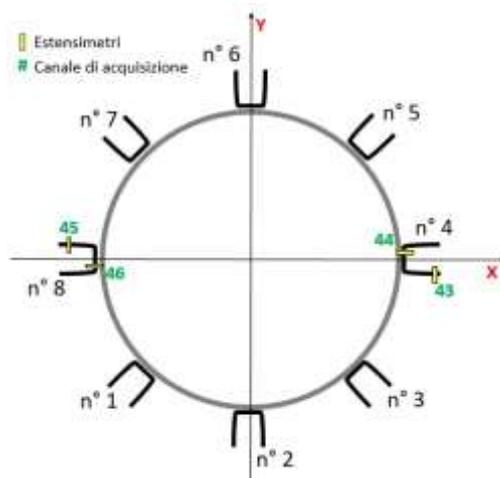
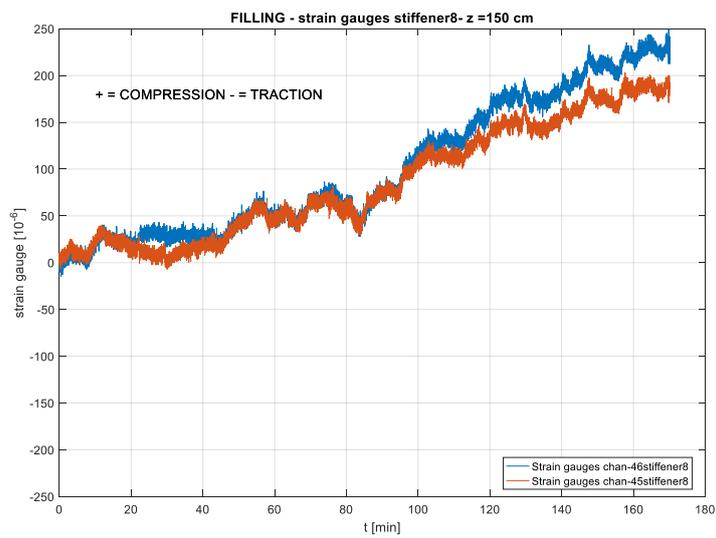
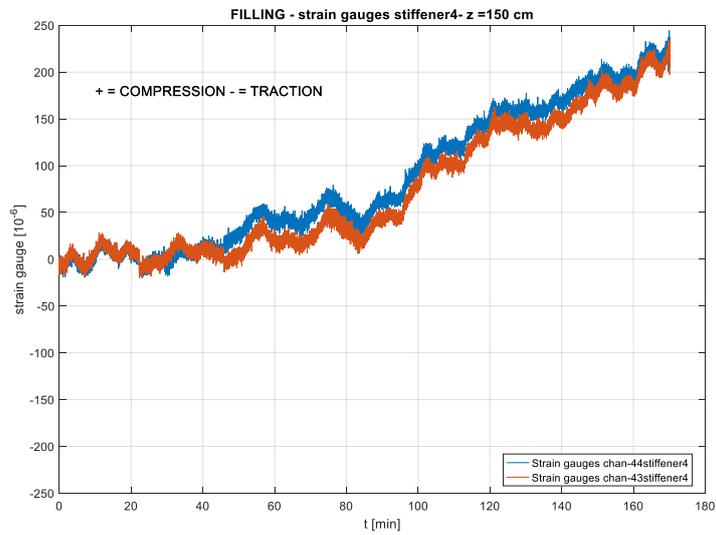
## 4. Fase di riempimento del silo

Quota Z = 49 cm



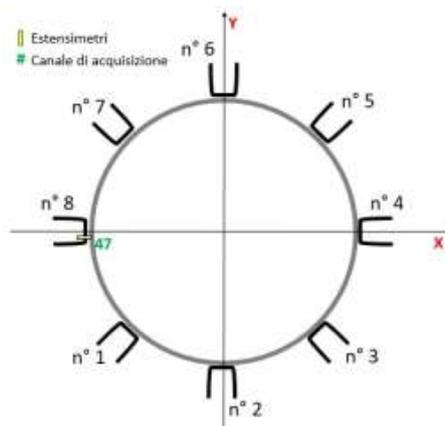
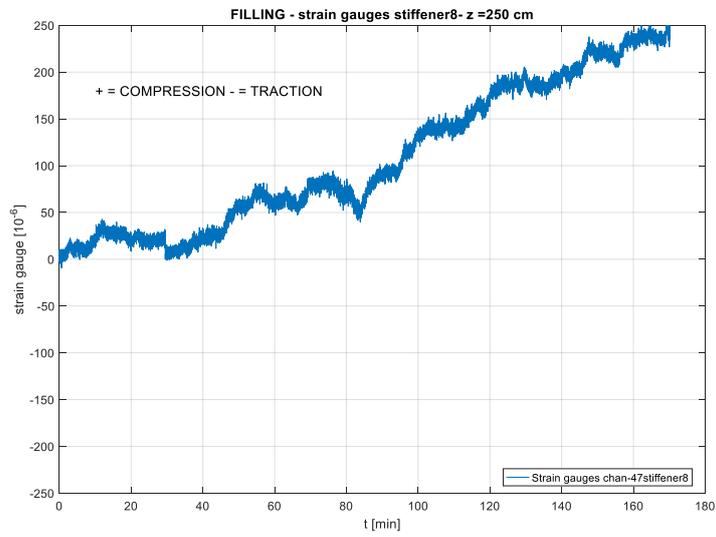
## 4. Fase di riempimento del silo

Quota Z = 150 cm



## 4. Fase di riempimento del silo

Quota Z = 250 cm



## 5 PROVE IN CONFIGURAZIONE A BASE FISSA

Le prove effettuate in configurazione fissa sono 145, comprese le diverse compensate per la calibrazione della tavola vibrante. Nel capitolo seguente si riportano i risultati ottenuti dalle misurazioni delle celle di pressione, estensimetri, accelerometri e marker.

Come già descritto al paragrafo §3.2 i dati vengono filtrati con un filtro passa basso, con frequenza di taglio pari a 30 Hz al fine di eliminare eventuali rumori elettronici. Successivamente, per ottenere i dati da unità elettriche (pedice “V”) a unità ingegneristiche (pedice “ing”) si procede con le seguenti trasformazioni.

Per quanto riguarda gli accelerometri:

$$a_{ing} = a_V \cdot 1000 / \text{costante} \quad (1)$$

Per quanto riguarda le celle di pressione:

$$p_{ing} = \text{costante} \cdot (p_V - \text{offset}) / A_{cella} \quad (2)$$

Per quanto riguarda gli estensimetri:

$$\varepsilon_{ing} = -4(\varepsilon_V - \text{offset}) \cdot \frac{(1 + \text{costante}/120)}{2.1 \cdot (1 + 2(\varepsilon_V - \text{offset}))} \quad (32)$$

Dove gli offset vengono valutati pari ai valori iniziali del primo test e le costanti sono dipendenti dal tipo di strumentazione e dal tipo di collegamento elettronico.

Nel capitolo seguente si riportano i risultati relativi alle ultime compensate di alcuni dei seguenti test, in relazione ai confronti e ai fenomeni che vengono evidenziati:

Input	Sinusoidal		Earthquake		
PGA [g]	1 Hz pre compaction	1 Hz post compaction	A1	RS1	RS3
0.1	/	/	16	13	19
0.3	45	111	51	48	55
0.5	76	121	83	80	86
0.6	/	/	125	123	124

Tabella 5.1 elenco prove in configurazione fissa riportate

I risultati di tutti i test in tabella 5.1 sono riportati in appendice A.

Per poter analizzare solo il comportamento dinamico si depurano i dati dalla componente statica, che viene analizzata separatamente.

In particolare, i test sinusoidali caratterizzati da una frequenza pari a 1 Hz sono stati ripetuti una volta eseguite le prove con accelerazione al suolo pari a 0.4 g. Ciò permette una valutazione della dipendenza, delle quantità misurate, dalla compattazione del grano, avvenuta grazie alla successione di scuotimenti.

### 5.1 Celle di pressione

In figura 5.1 viene riportato il trend delle pressioni statiche durante tutti i test eseguiti su base fissa. Si può notare che, man mano che aumenta il numero di scuotimenti, i valori delle celle di pressione si avvicinano.

Il grano, caricato eccentricamente, tende a distribuirsi più uniformemente, pur considerando che la compattazione e quindi un aumento della densità avviene in modo disuniforme. La compattazione del grano porta il materiale ad essere più rigido e quindi più autosostenuto. Per questo motivo, le pressioni misurate dalle celle 1 e 2, posizionate a quota  $Z = 42$  cm, diminuiscono, mentre le pressioni misurate dalle celle 3 e 4, posizionate a 150 cm, risultano aumentare, per poi rimanere costanti. Si è inoltre notato come il grano interno abbia raggiunto una configurazione a superficie piana solo dopo i primi 100 test. Da ciò si deduce che approssimare la superficie del grano come piana, fin dal riempimento del silo, non è realistica.

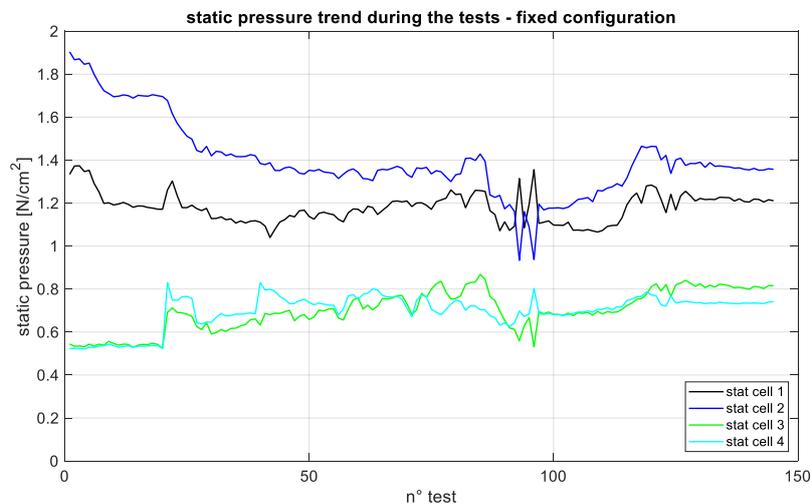


Figure 5.1 andamento delle pressioni statiche durante i test a configurazione fissa

## 5. Prove in configurazione a base fissa

Successivamente si valutano le sovra-pressioni dinamiche. In particolare, è di interesse valutarne il trend al variare dell'accelerazione al suolo. In tal caso, per tutti gli input considerati, viene evidenziato un andamento lineare in accordo con la teoria proposta da [5] e [7].

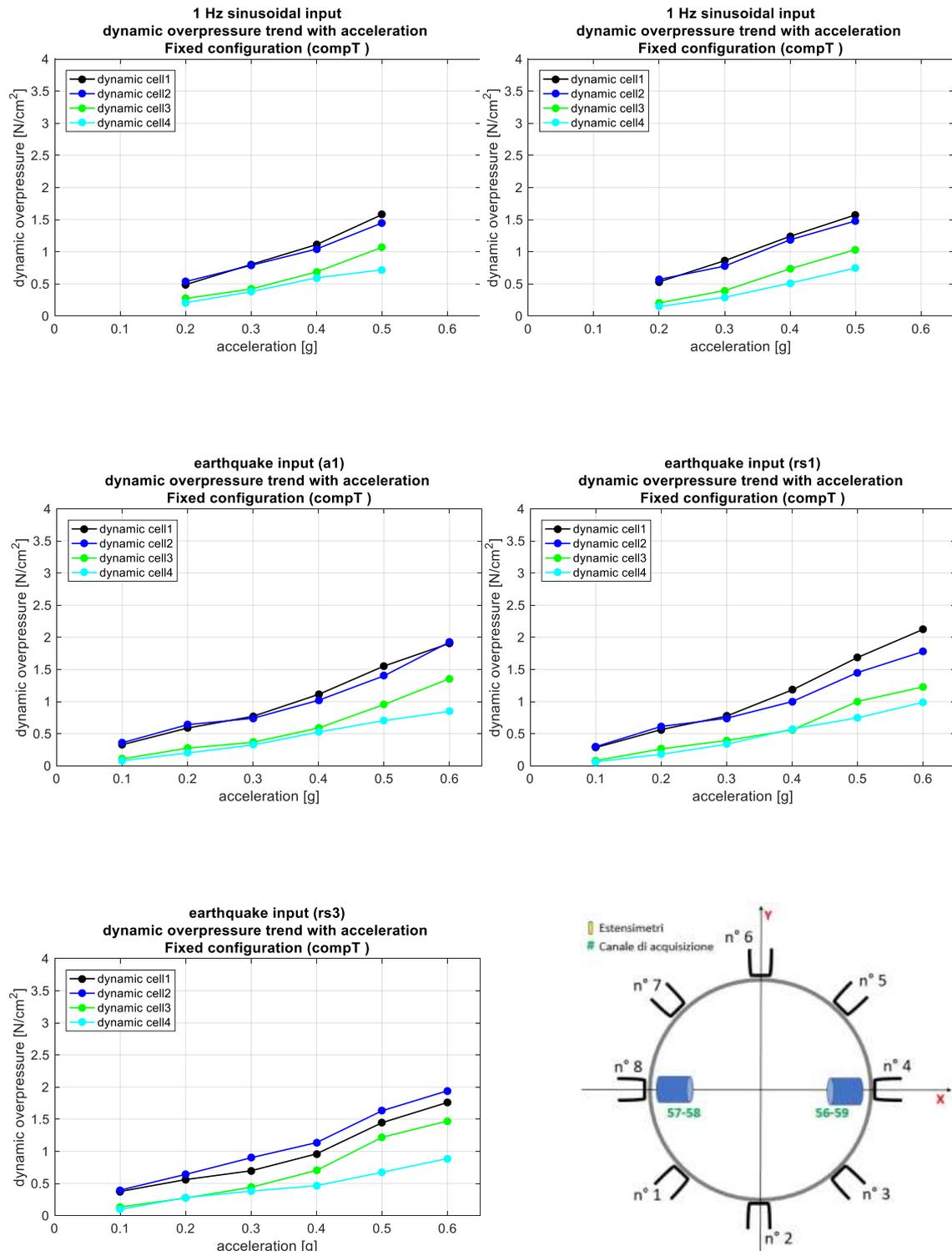


Figure 5.2 andamento della sovrappressione dinamica all'aumentare dell'accelerazione al suolo

Al fine di eseguire un primo confronto con le teorie proposte dalla ricerca scientifica, si considerano i valori delle pressioni statiche, dinamiche e totali. Si considerano solamente i risultati relativi ad input sinusoidali, in quanto sono gli unici input in cui è accettabile considerare una condizione di accelerazione costante, ipotesi alla base delle teorie.

Si può notare come i valori, sia statici che dinamici, risultino maggiori sia dei valori attesi secondo la teoria, sia dei valori definiti in accordo con la normativa europea. Questo fenomeno è ancora in fase di studio e in particolare è importante valutare se la compattazione del grano o le caratteristiche proprie delle celle di pressione possano influire sui valori misurati.

Sinusoidal input 1 Hz 0.5 g pre-compaction: Test 76

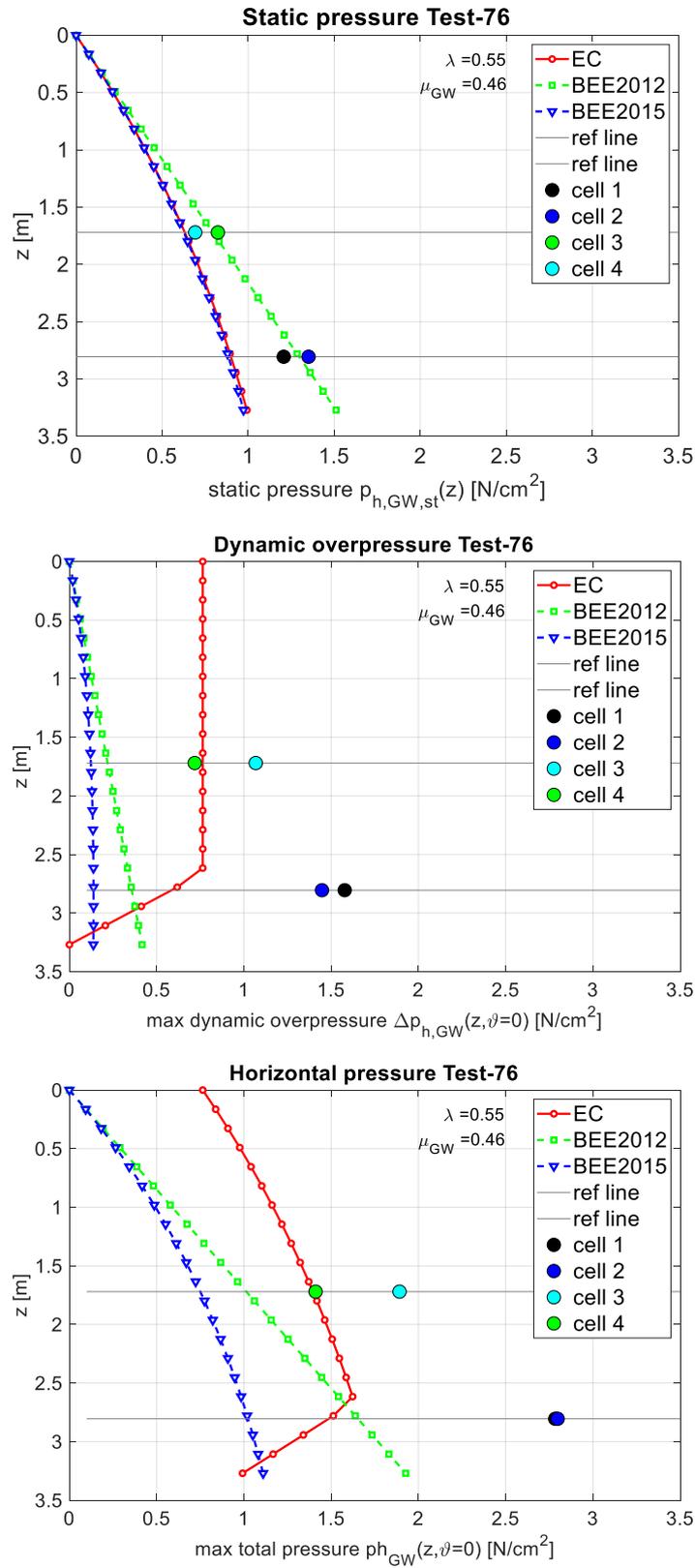


Figure 5.3 pressione statica (in alto), sovra – pressione dinamica (al centro) pressione totale (in basso)

Sinusoidal input 1 Hz 0.5 g post-compaction: Test 121

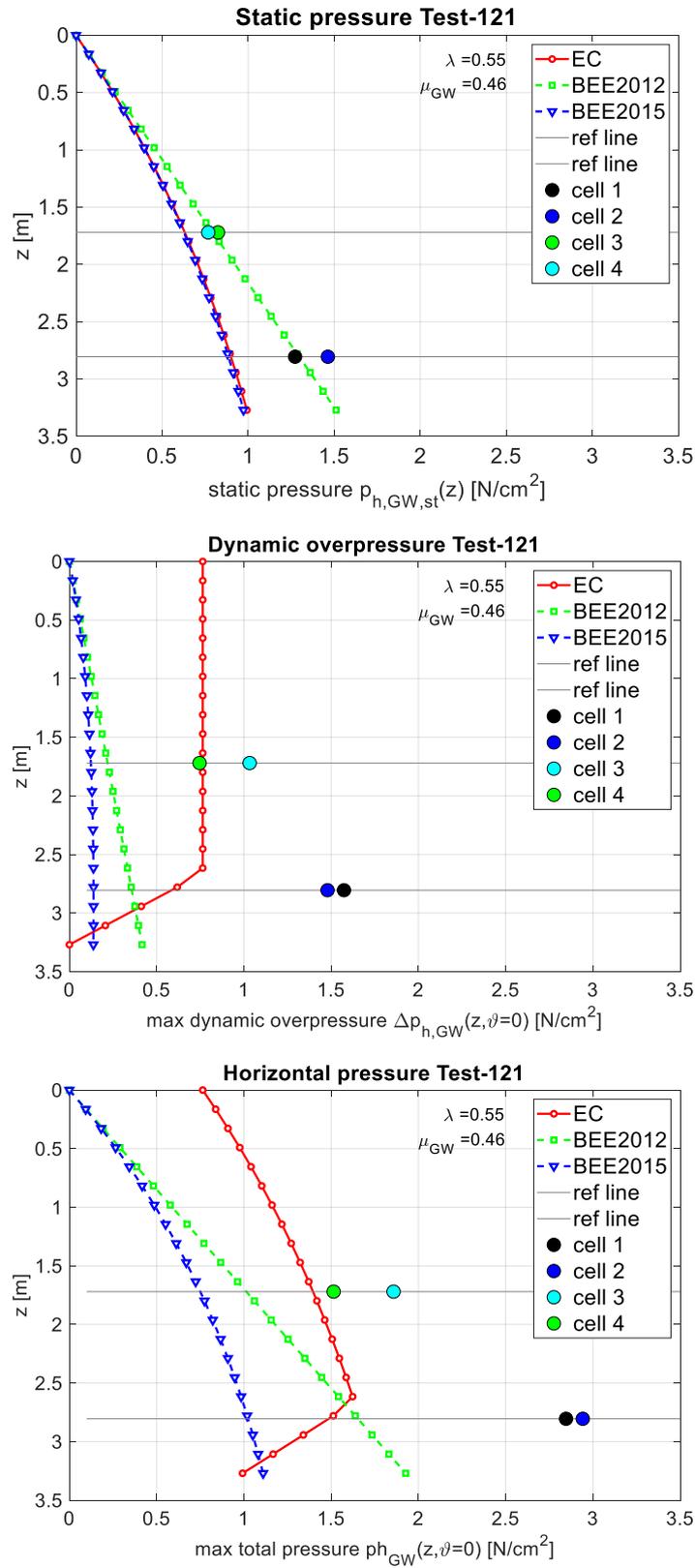


Figure 5.4 pressione statica (in alto), sovra – pressione dinamica (al centro) pressione totale (in basso)

## 5.2 Accelerometri

Gli accelerometri uniassiali monitorati sono posizionati sui montanti 4 e 8, in modo da poter misurare l'accelerazione impressa alla struttura a diverse altezze, lungo la direzione in cui viene eccitato sismicamente il sistema.

Dal momento che i risultati degli accelerometri uniassiali sul montante 4 sono equivalenti ai risultati ottenuti da quelli posizionati sul montante 8, si riportano di seguito solo i risultati relativi al montante 4.

I grafici successivi riportano l'accelerazione misurata rispetto al tempo durante il quale il sistema è soggetto all'azione sismica e uno zoom di tale accelerogramma, così da poter fare un confronto tra i diversi accelerometri alle diverse altezze.

Si nota, infatti, che per input sismici gli accelerometri più in alto risentono di una amplificazione dinamica, in particolare il canale relativo all'accelerometro posizionato sul tetto, in quanto gli effetti sismici si amplificano man mano che ci si allontana dal punto di input dell'azione sismica simulata.

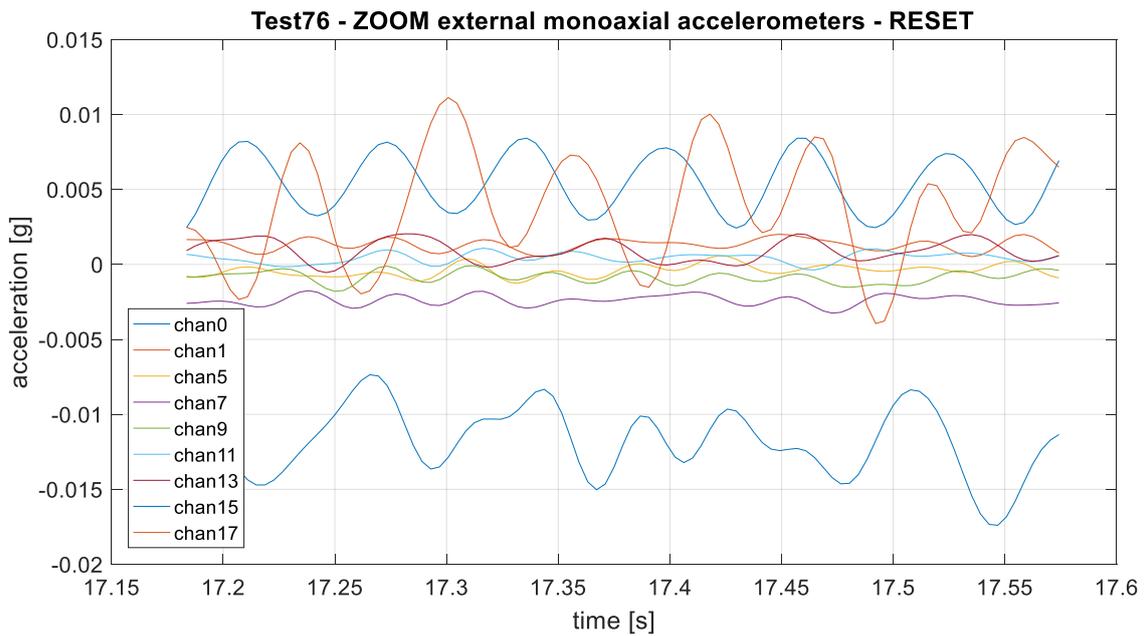
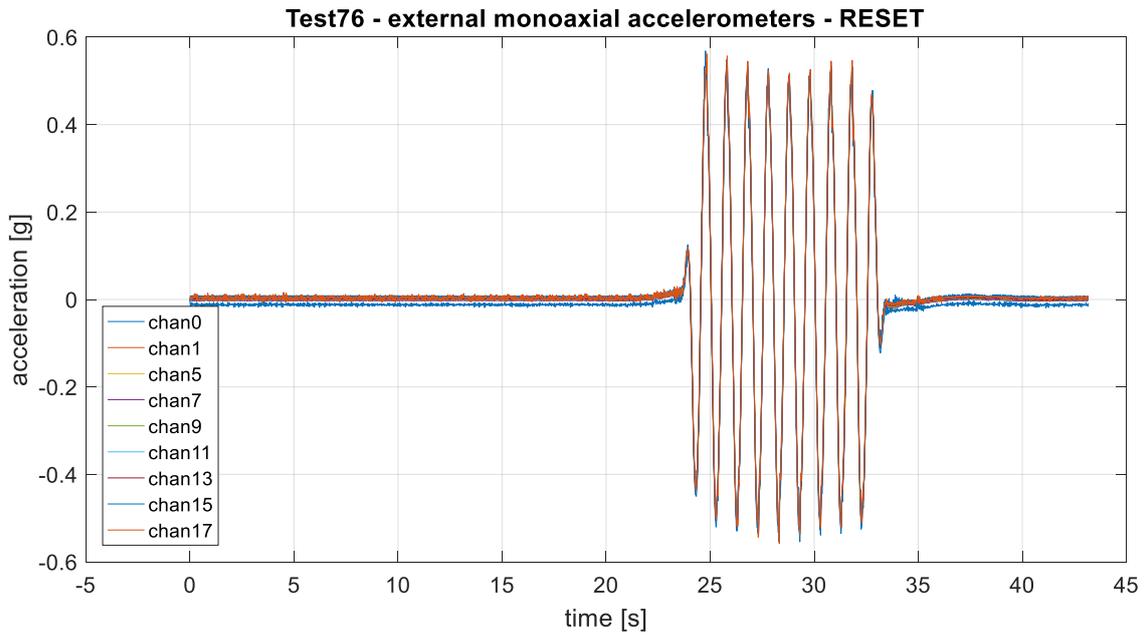
Per l'analisi delle amplificazioni dinamiche, che si originano sulla struttura, si rimanda al paragrafo successivo (§5.3).

In questa sede si riportano i risultati relativi ai seguenti test:

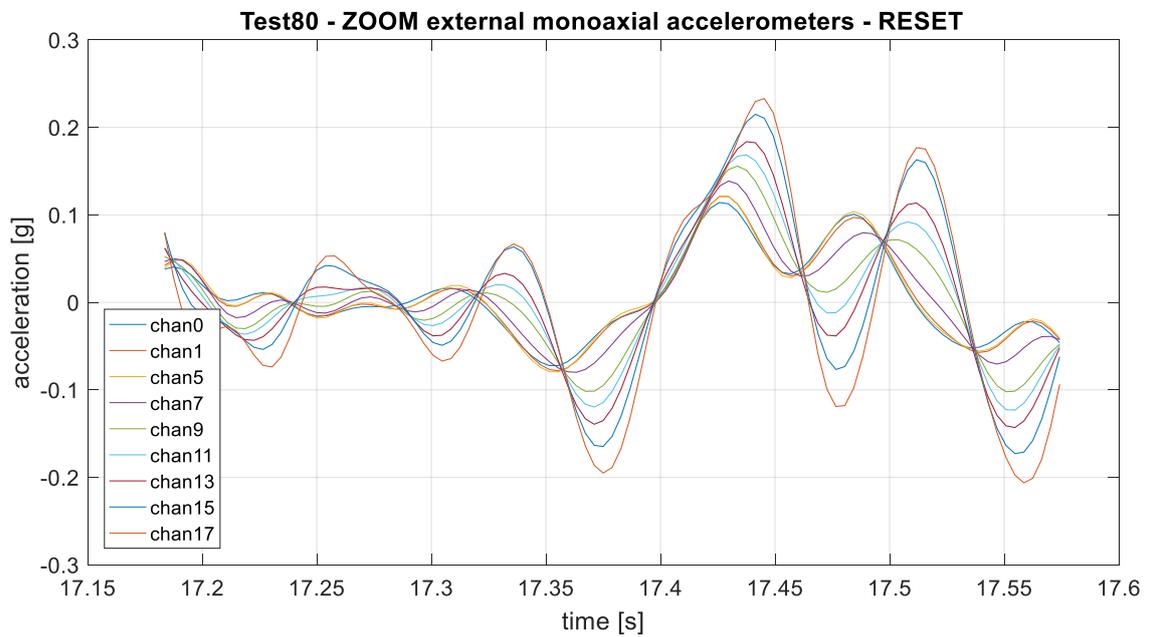
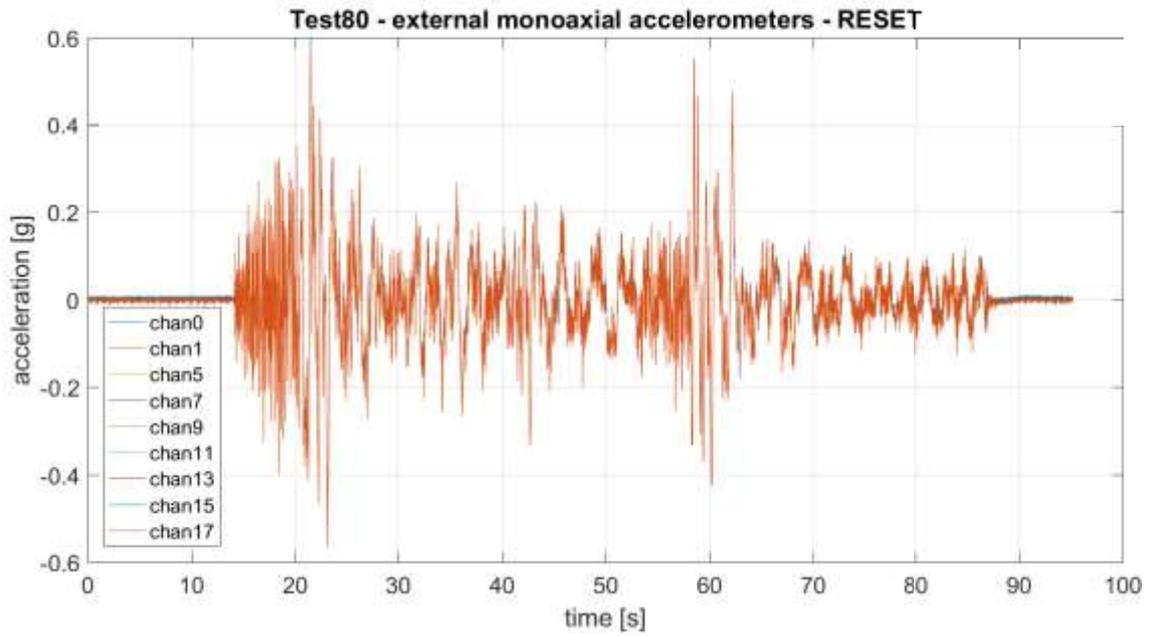
Input	Sinusoidal		Earthquake		
	1 Hz pre compaction	1 Hz post compaction	A1	RS1	RS3
0.1	/	/	16	13	19
0.3	45	111	51	48	55
0.5	76	121	83	80	86
0.6	/	/	125	123	124

Tabella 5.2 elenco test utilizzati per riportare i dati relativi agli accelerogrammi

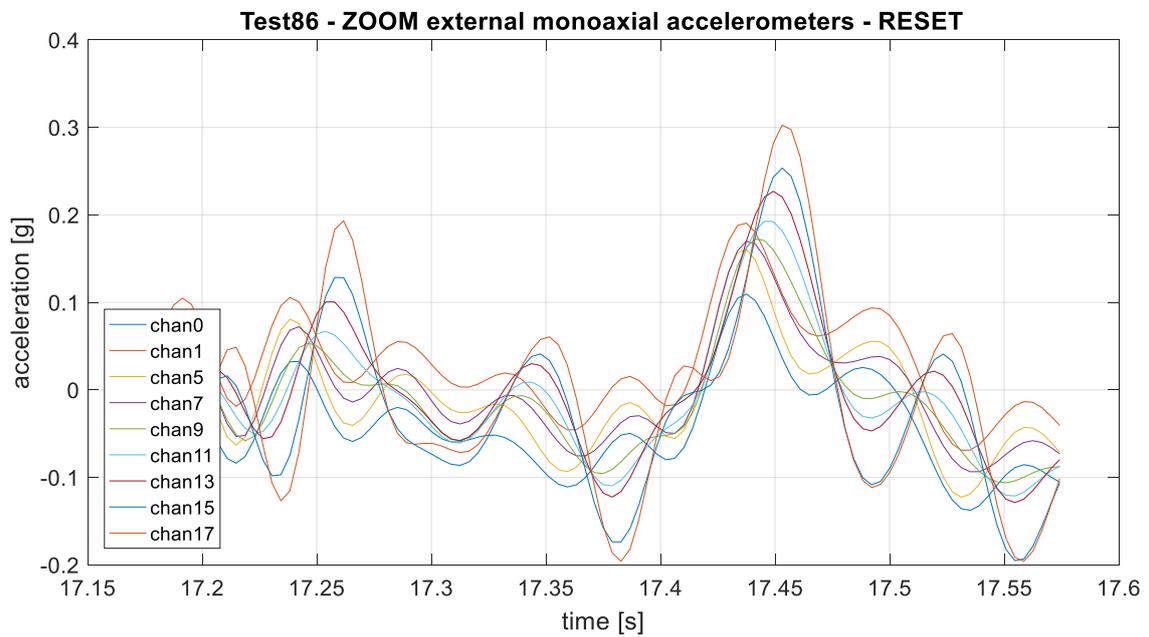
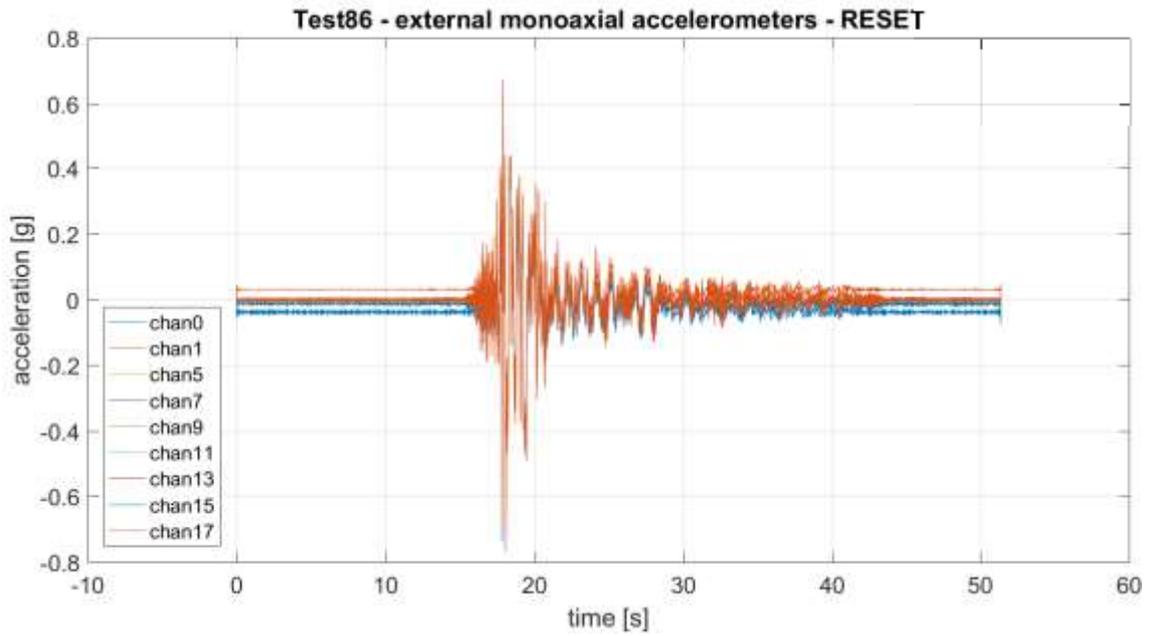
Sinusoidal input 1 Hz 0.5 g pre-compaction: Test 76



Earthquake input RS1 0.5 g: Test 80



Earthquake input RS3 0.5 g: Test 86



### 5.3 Amplificazioni dinamiche

Una volta valutati i risultati degli accelerometri uniassiali nel tempo, si riportano i valori massimi di questi ultimi al variare dell'accelerazione al suolo al fine di evidenziare eventuali amplificazioni dinamiche indotte sulla struttura.

In particolare, si considera la media tra i valori massimi degli accelerometri uniassiali posti sui montanti 4 e 8. Per completezza si riportano con linea tratteggiata in grigio i valori degli accelerometri dei due montanti, separatamente.

In aggiunta si riporta, a fianco di ogni accelerometro, il valore dell'amplificazione dinamica, ottenuta come rapporto tra gli accelerometri posizionati sulla struttura e l'accelerometro posto sulla platea di fondazione.

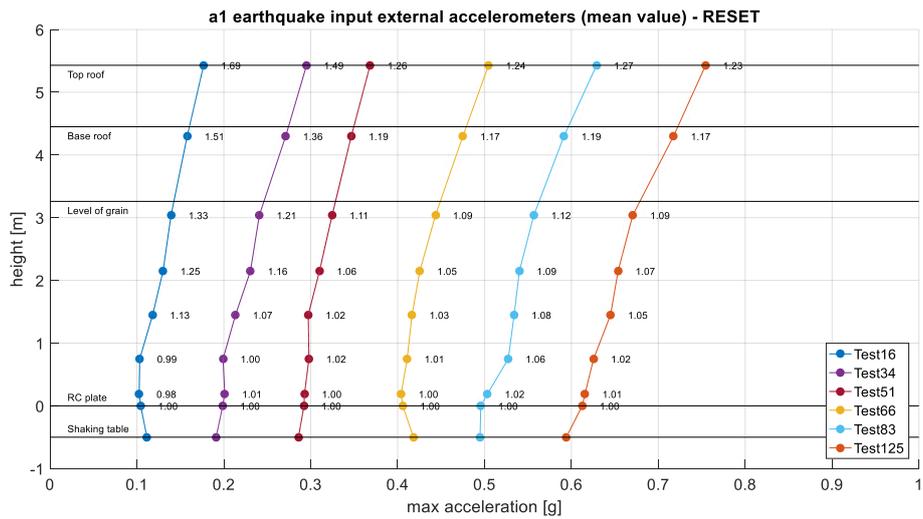
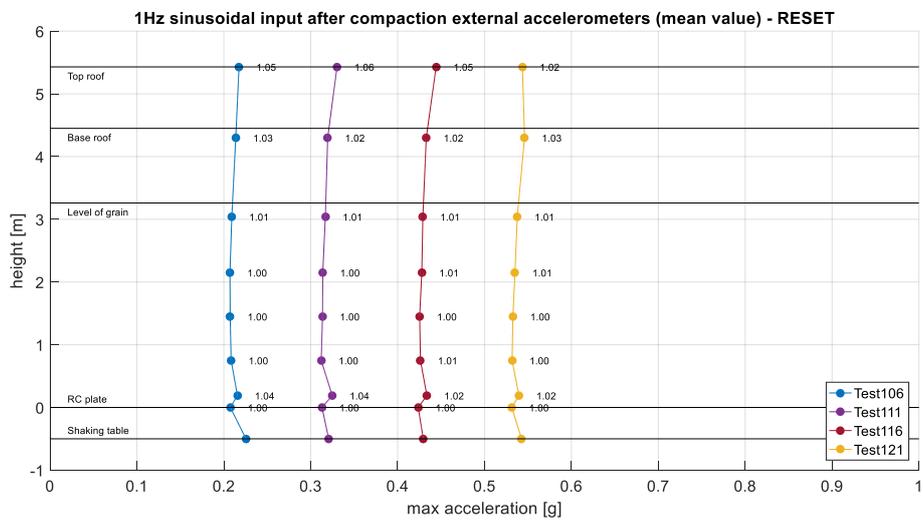
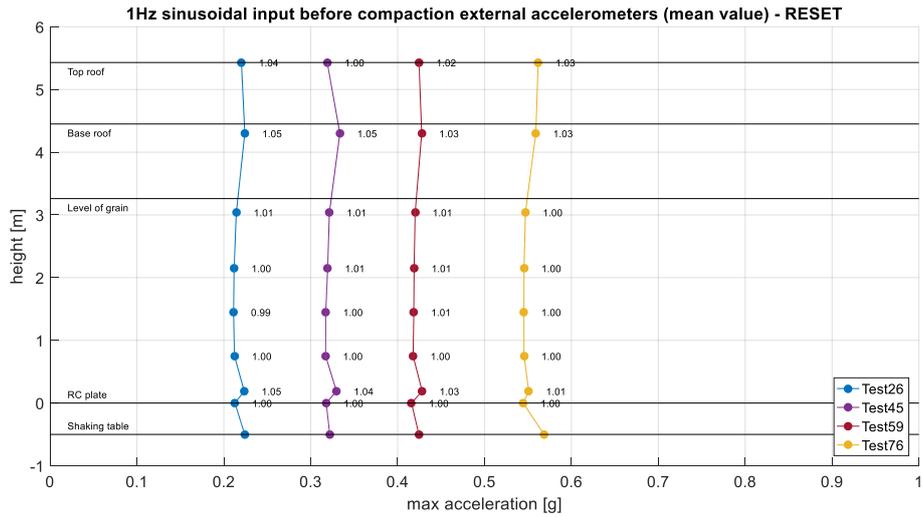
Dalle figure riportate di seguito, si può notare che sotto l'azione di input sinusoidali non si riscontrano amplificazioni sulla struttura, in quanto tale segnale non ha alto contenuto in frequenza in prossimità della frequenza propria della struttura.

Nel caso degli accelerogrammi, invece, è evidente la presenza di amplificazioni dinamiche, più marcate nel caso dell'accelerogramma RS3, in quanto quest'ultimo è caratterizzato da un alto contenuto in frequenza in corrispondenza della frequenza propria della struttura.

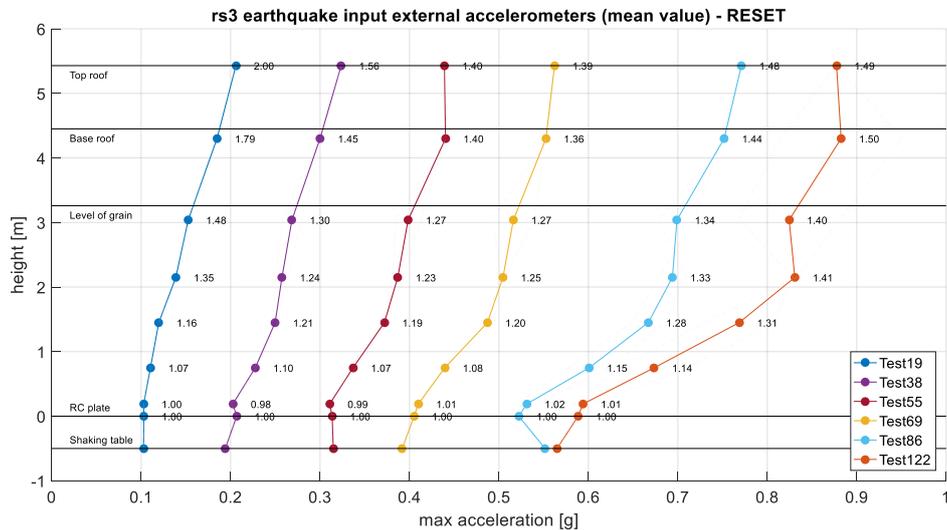
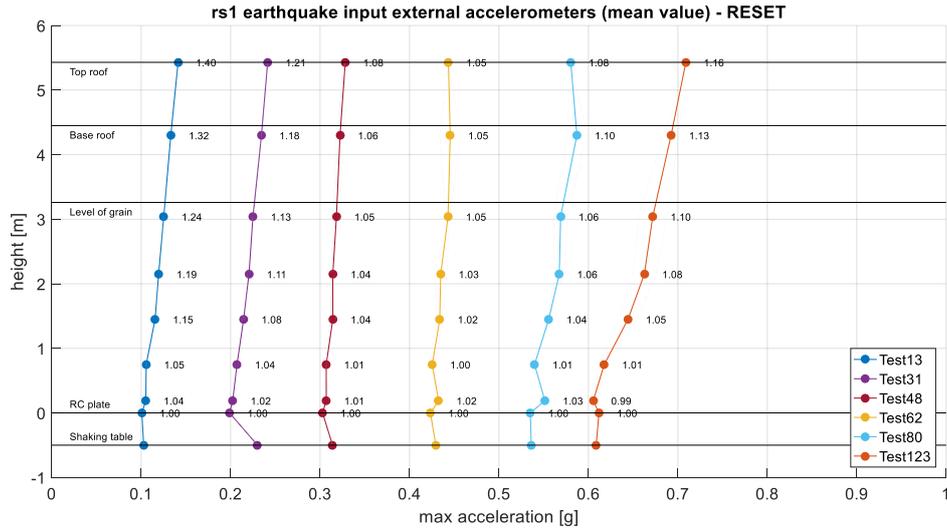
Un'altra osservazione riguarda la diminuzione dell'amplificazione sulla struttura all'aumentare dell'accelerazione al suolo. Tale fenomeno può essere spiegato considerando che, ad un aumento di accelerazione al suolo, corrisponde un aumento della massa efficace che partecipa al moto.

Conseguentemente il materiale insilato è in grado di dissipare maggiore energia tramite l'attrito tra i grani e tra grano e parete, quindi aumenta lo smorzamento. Ciò è valido per gli accelerometri posizionati in modo tale da risentire della presenza del grano, mentre quello posizionato sul tetto non risente dello smorzamento sopra citato.

## 5. Prove in configurazione a base fissa



## 5. Prove in configurazione a base fissa



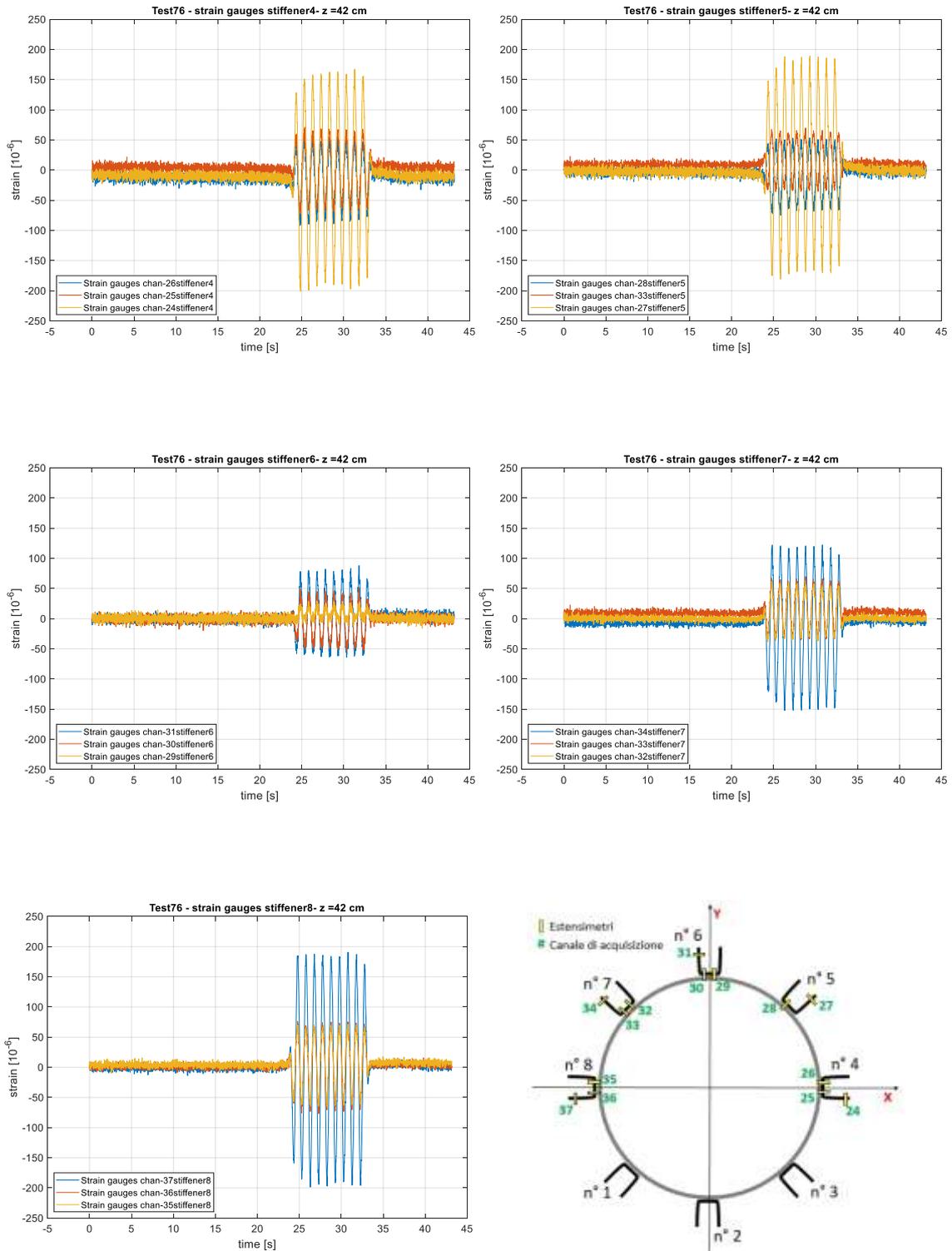
### 5.4 Estensimetri

Nelle figure seguenti si riportano i valori degli estensimetri posti alla quota  $Z = 42$  cm in funzione del tempo. Dal momento che i montanti 4 e 8 si trovano sulla direzione di input risultano i più sollecitati mentre i montanti 6 e 2 risultano i meno sollecitati. Per poter ottenere le sollecitazioni  $N$ ,  $M_x$  e  $M_y$  sui montanti si considera un comportamento secondo de Saint Venant utilizzando le equazioni di Navier<sup>4</sup>.

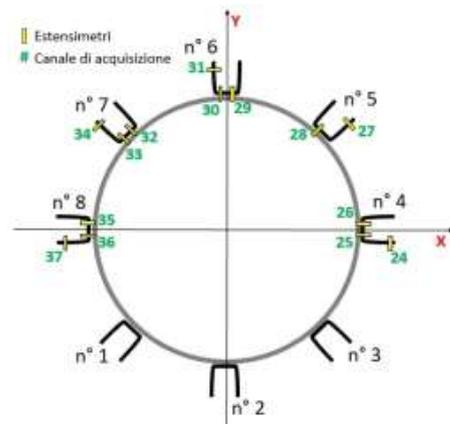
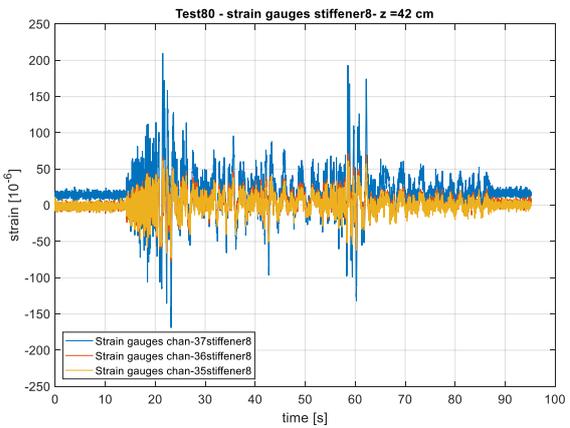
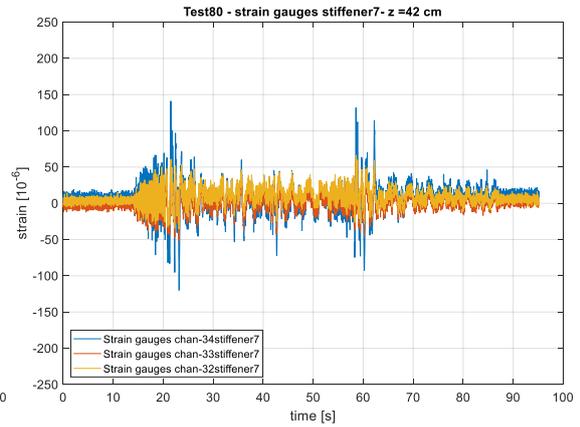
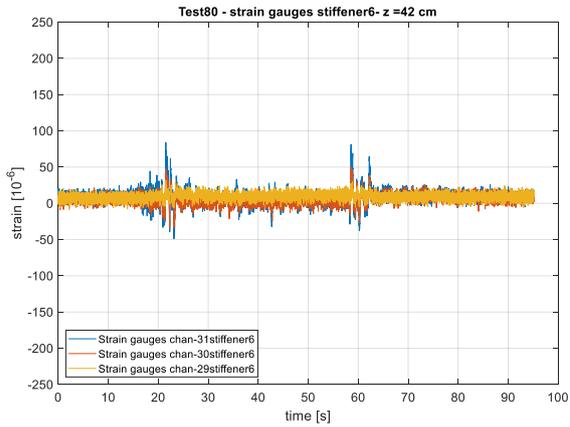
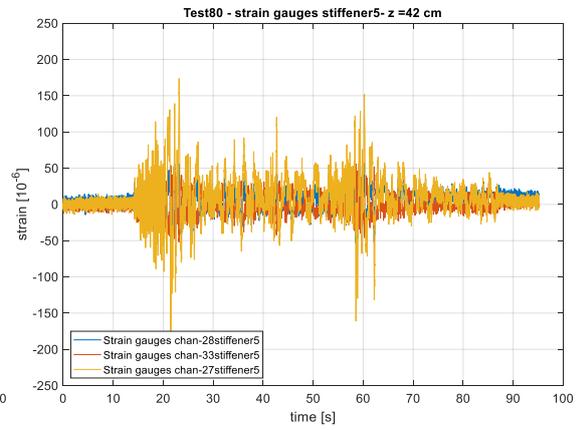
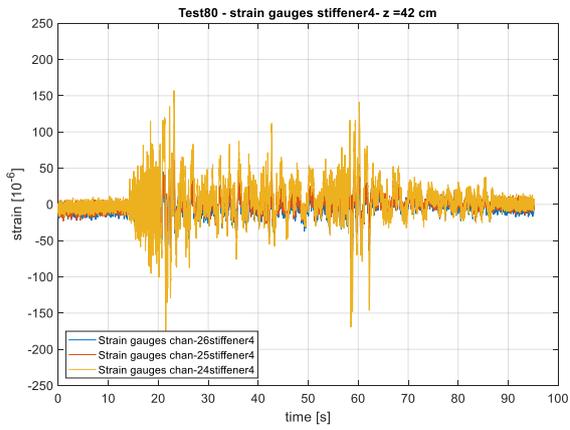
Anche in questo caso si riportano gli stessi test riportati nel caso degli accelerometri.

<sup>4</sup> i risultati sono riportati nella tesi di Matteo Marra ...

Sinusoidal input 1 Hz 0.5 g pre-compaction: Test 76

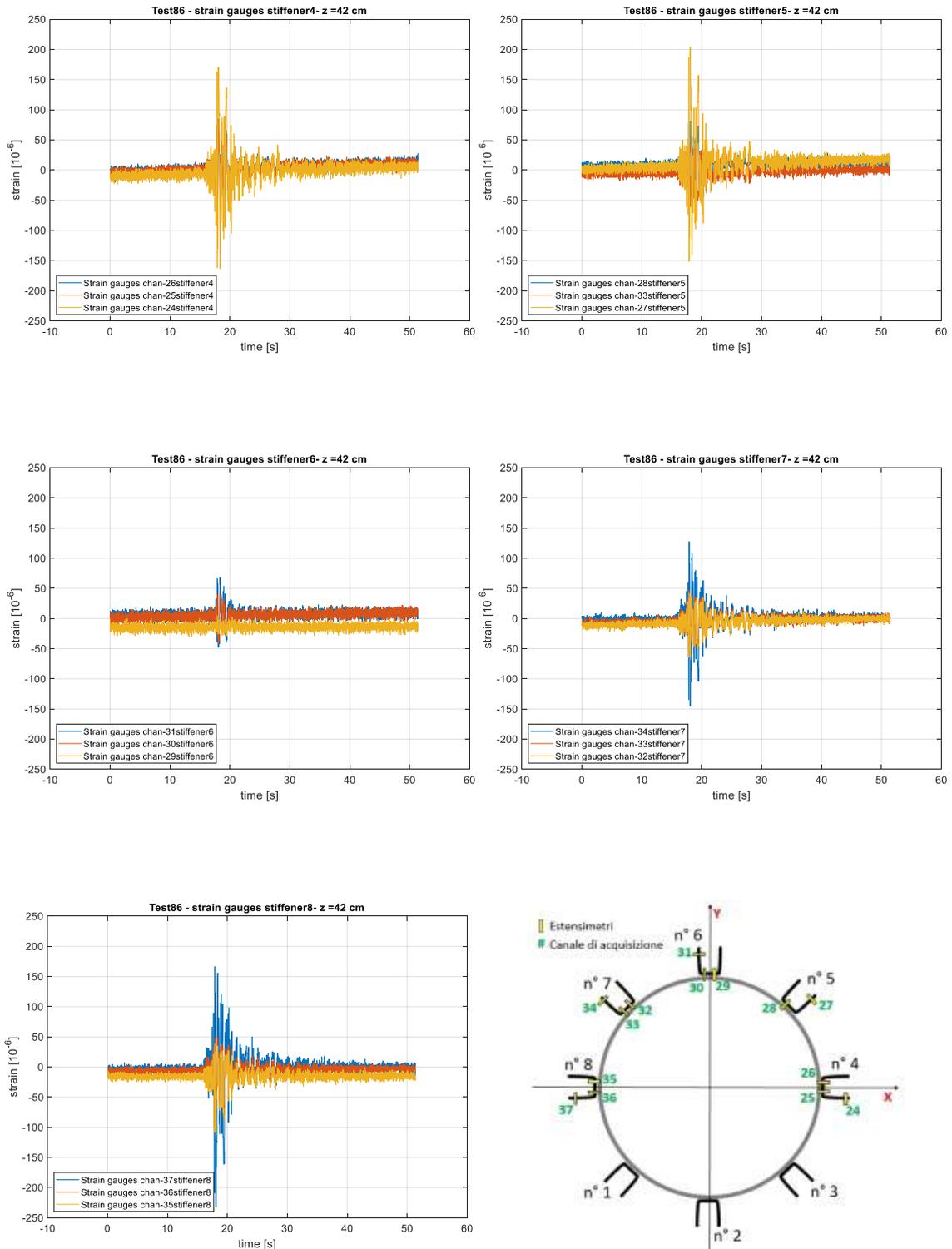


Earthquake input RS1 0.5 g: Test 80



## 5. Prove in configurazione a base fissa

### Earthquake input RS3 0.5 g: Test 86



### 5.5 Sforzi nei montanti

Per questo paragrafo si consulti la tesi di Matteo Marra: “Prove su tavola vibrante di silo metallico a fondo piano: identificazione dinamica mediante accelerometri”.

### 5.6 Markers

I marker permettono di valutare gli spostamenti nel tempo. In particolare, è di interesse analizzare i valori dei marker sui montanti e sulla virola. I primi consentono di ottenere la deformata nel tempo, mentre i secondi permettono di valutare il tipo di meccanismo resistente della struttura.

Per quanto riguarda i marker sui montanti si sceglie di considerare due diverse deformate:

- deformata massima rispetto ad un marker di riferimento: permette di valutare la deformata massima positiva e negativa in modo coerente nel tempo. In particolare, si sceglie come marker di riferimento quello posizionato circa alla superficie del grano.
- inviluppo massimo: non considerando la coerenza temporale, si considerano i massimi e minimi assoluti dei diversi marker, in modo da visualizzare gli spostamenti massimi che il montante subisce.

Per quanto riguarda i marker sulla virola, questi sono posizionati formando un rettangolo. Tali acquisizioni permettono di studiare lo stato di sollecitazione delle due diagonali. In caso si riscontri trazione su una diagonale e compressione sull'altra diagonale, si può dedurre che la struttura ha un comportamento sia flessionale sia tagliante. Questo tipo di analisi risulta di fondamentale interesse, in quanto l'effettivo meccanismo di strutture di stoccaggio tozze è ancora un punto su cui non si hanno chiare informazioni e conoscenze.

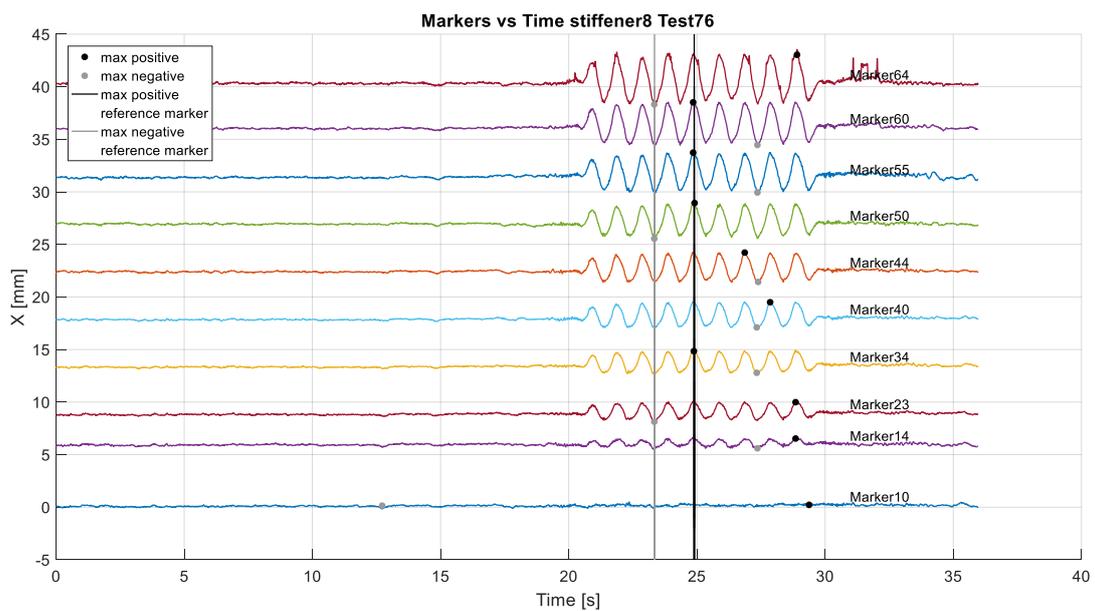
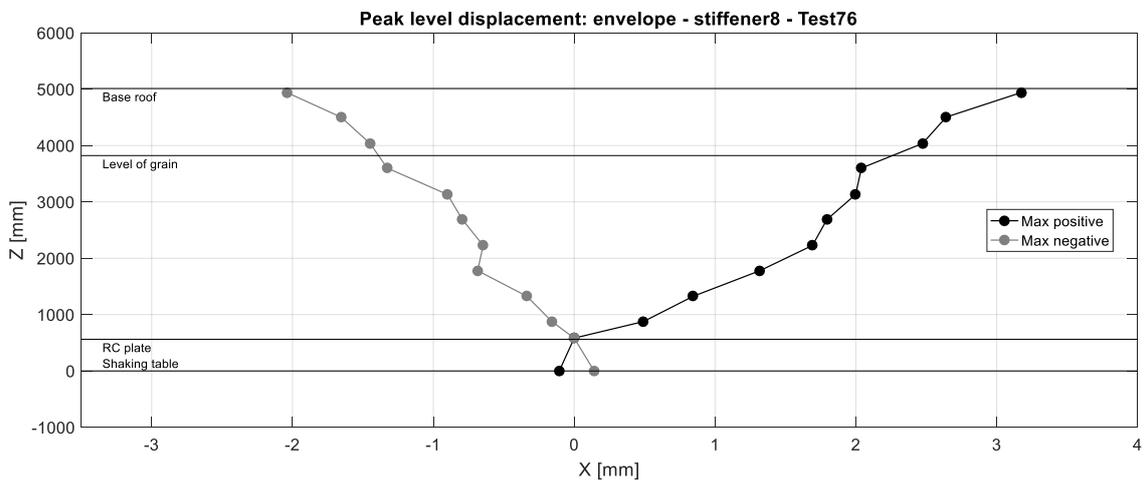
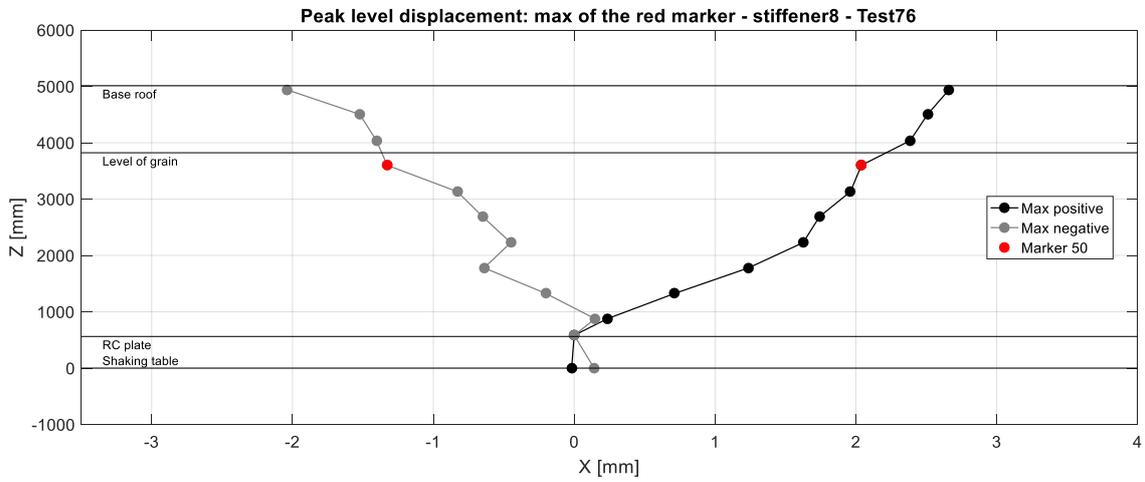
I dati grezzi sono riferiti ad un sistema di riferimento globale come in figura 3.12. I risultati riportati sono ottenuti resettando i dati al primo valore e depurandoli dalla media dei marker posizionati sulla platea di fondazione. Inoltre, viene valutato anche lo spostamento relativo tra platea di fondazione e tavola vibrante, così da controllare che gli ancoraggi laterali, inseriti al fine di rendere la configurazione a base fissa, possano essere ragionevolmente considerati come infinitamente rigidi.

Una volta valutata la deformata, si procede al calcolo delle sollecitazioni sui montanti sfruttando le equazioni della linea elastica. Per tali analisi si faccia riferimento al capitolo 6.

## 5. Prove in configurazione a base fissa

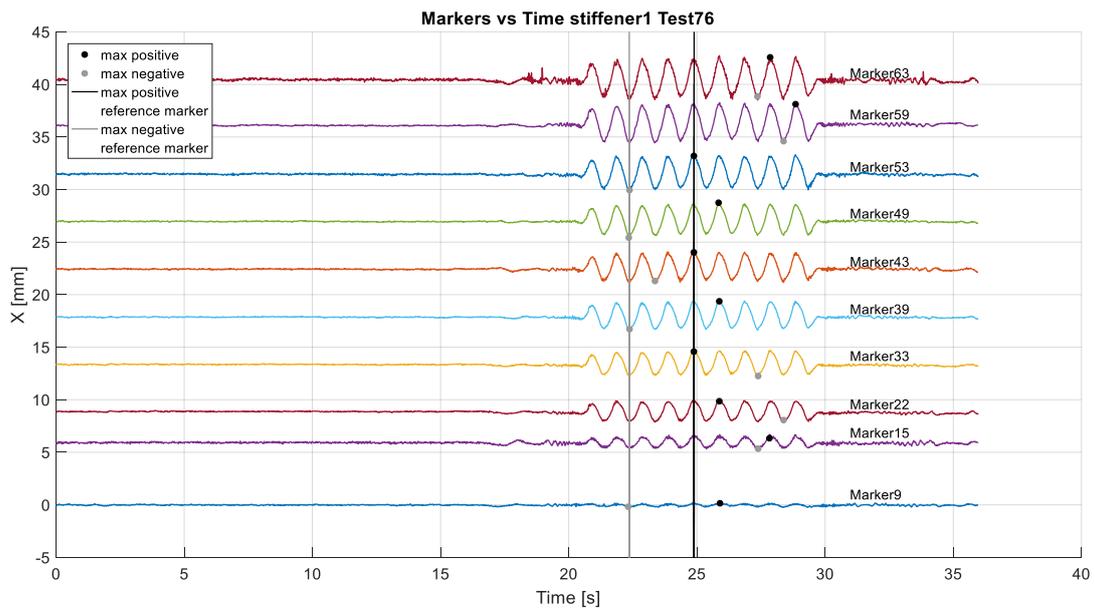
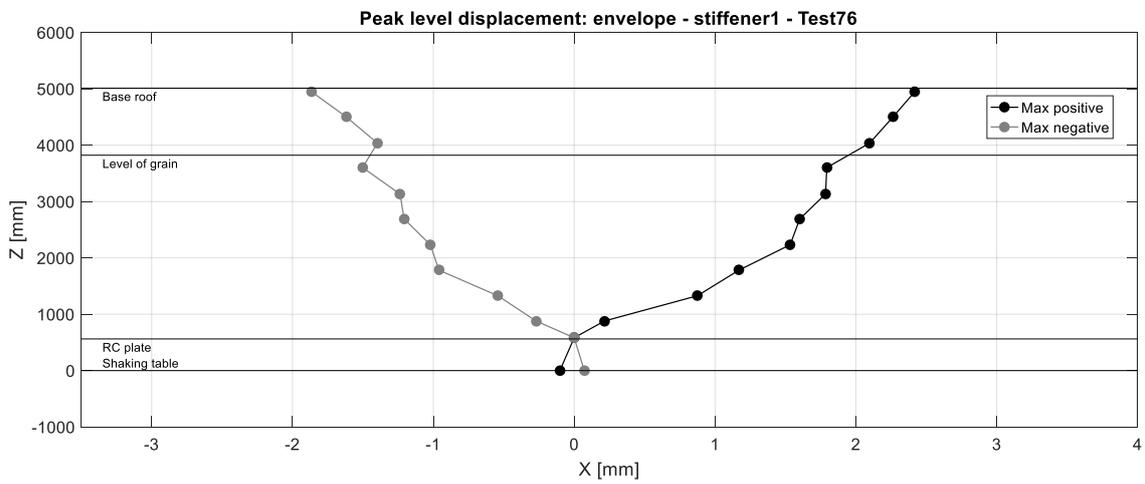
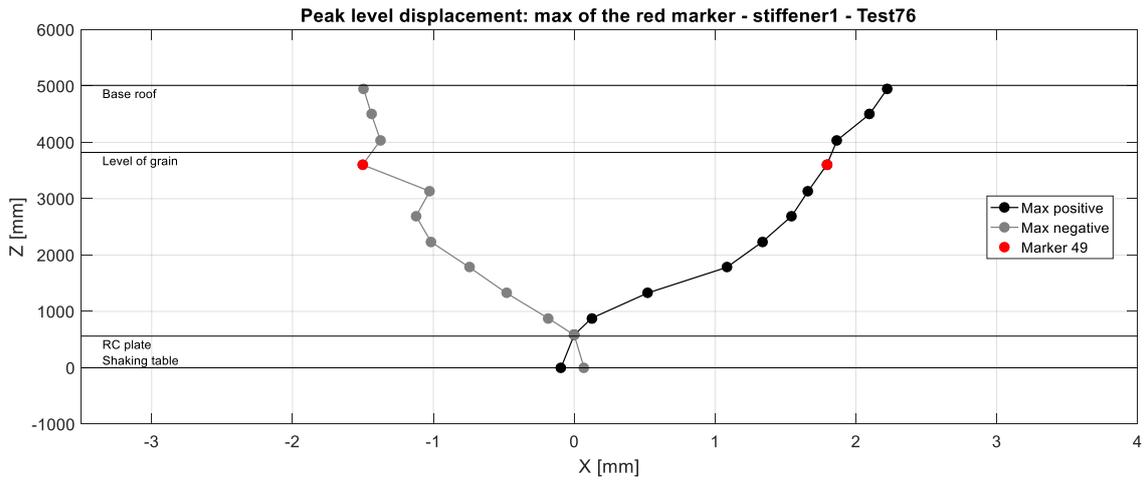
### Sinusoidal input 1 Hz 0.5 g pre-compaction: Test 76

#### Montante 8



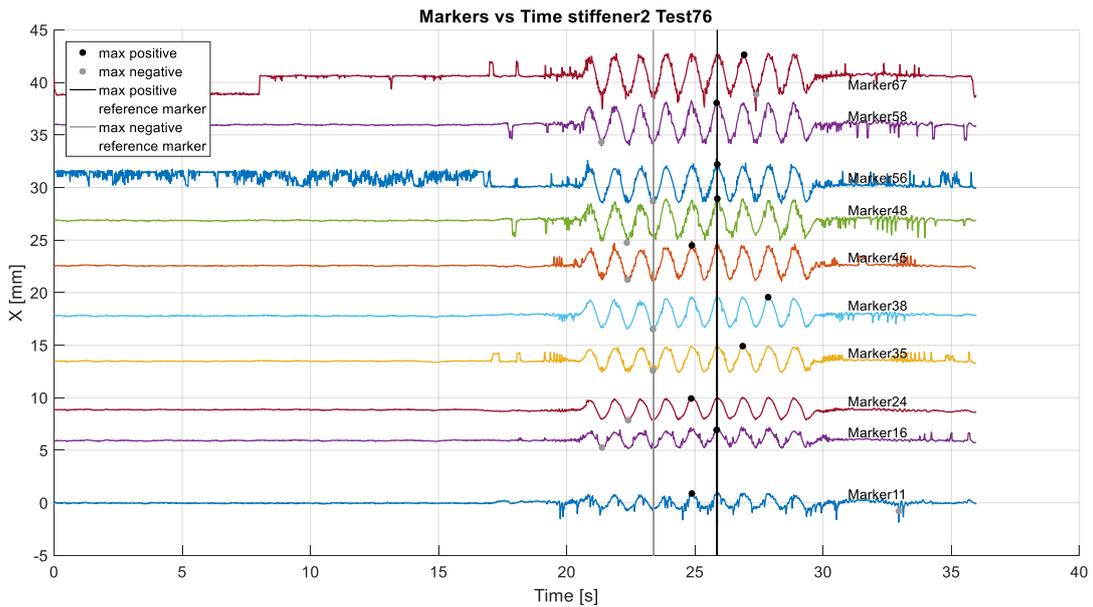
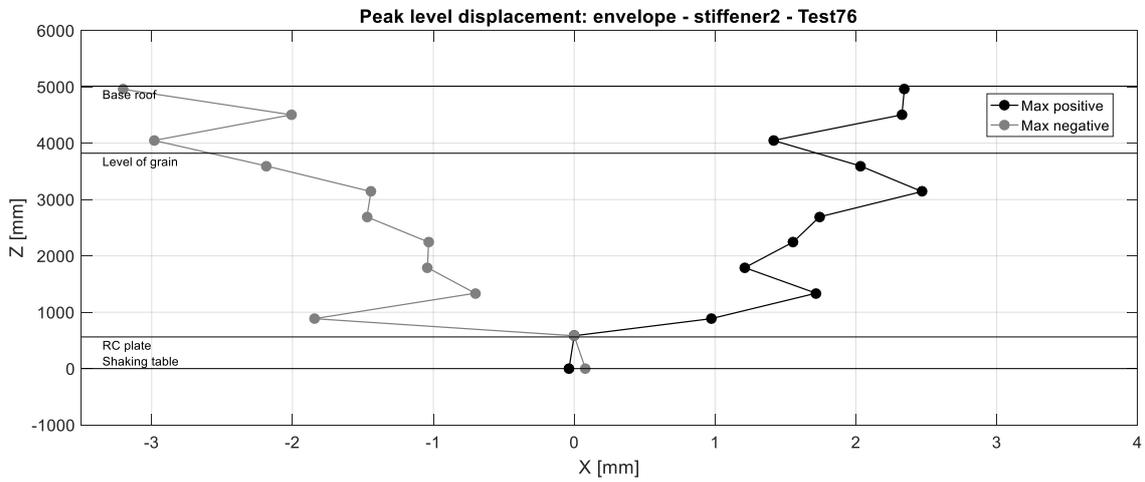
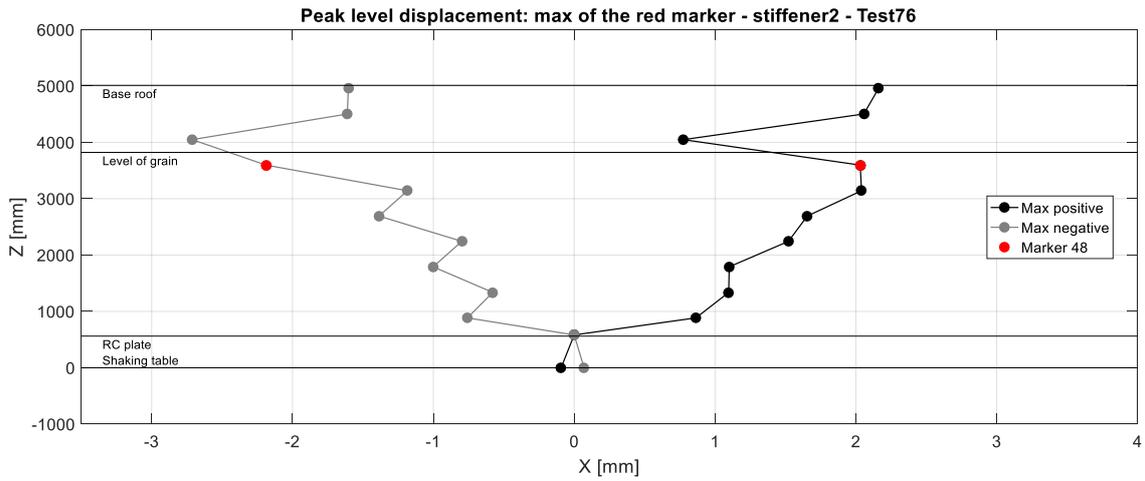
## 5. Prove in configurazione a base fissa

### Montante 1



5. Prove in configurazione a base fissa

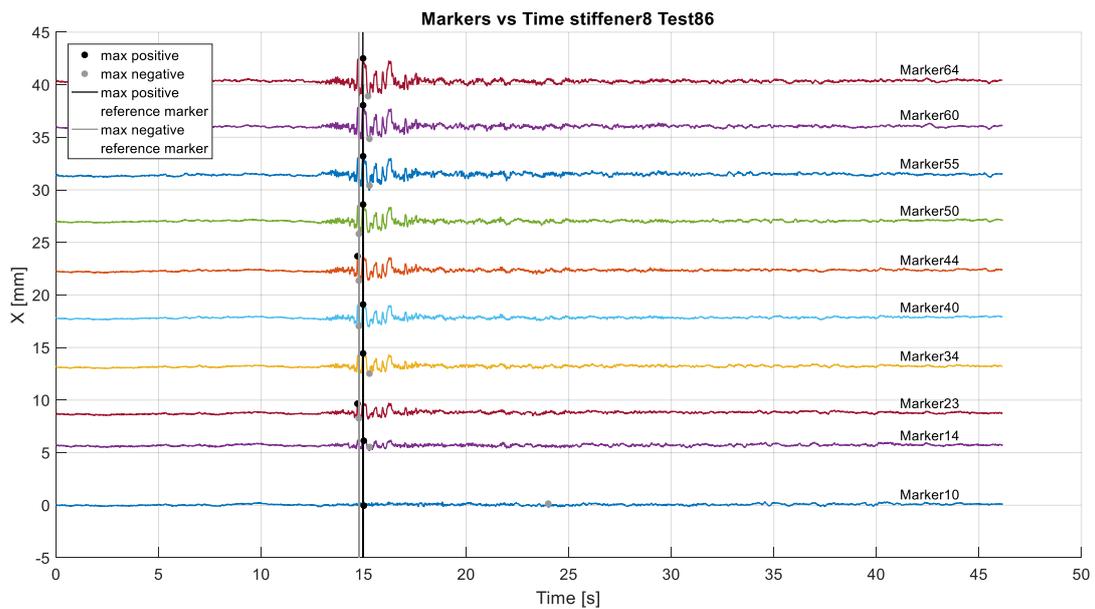
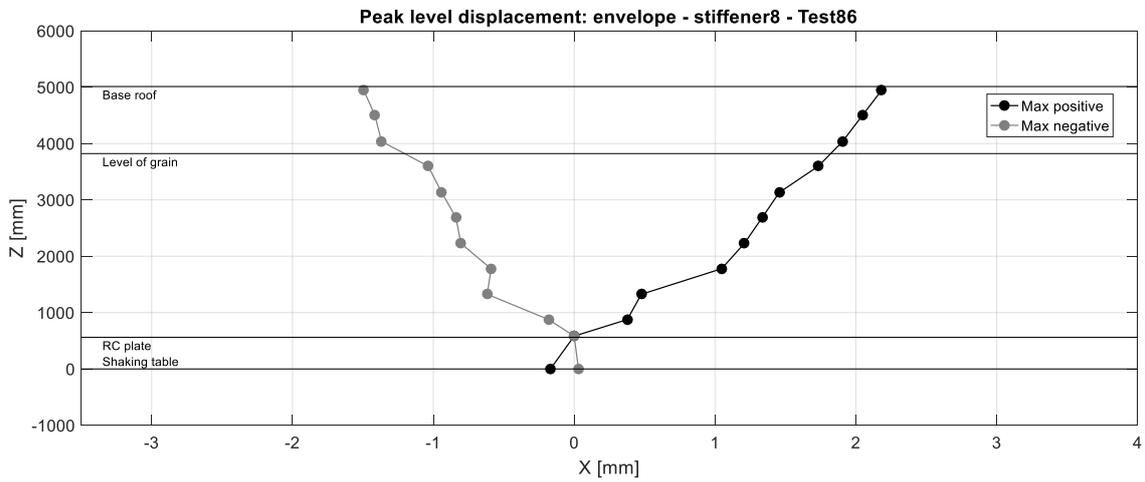
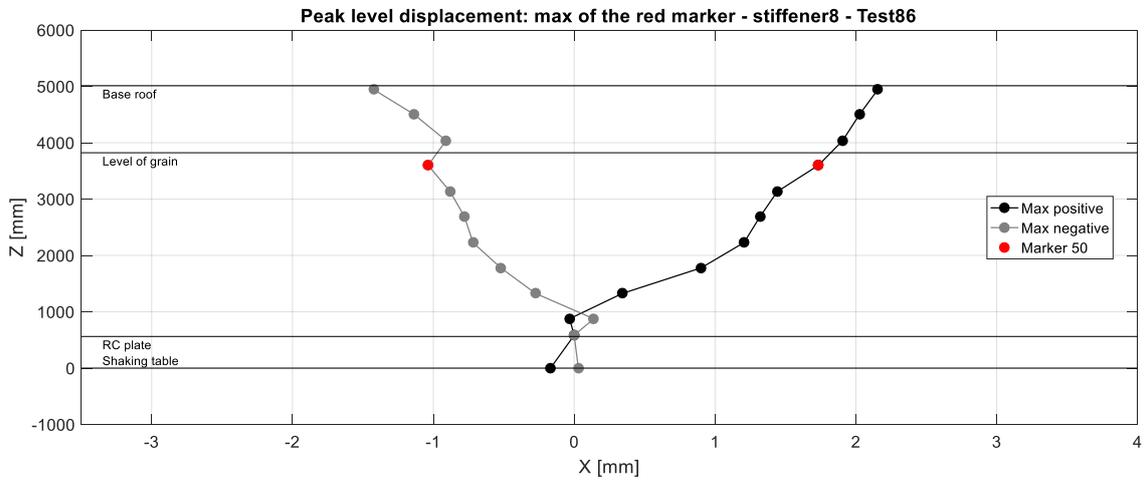
Montante 2



## 5. Prove in configurazione a base fissa

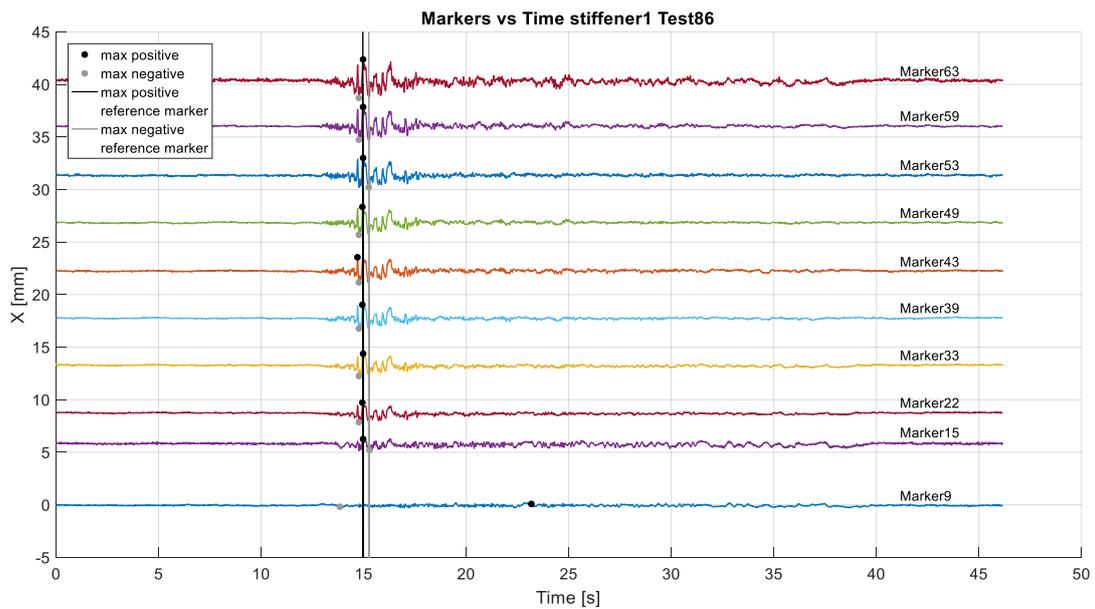
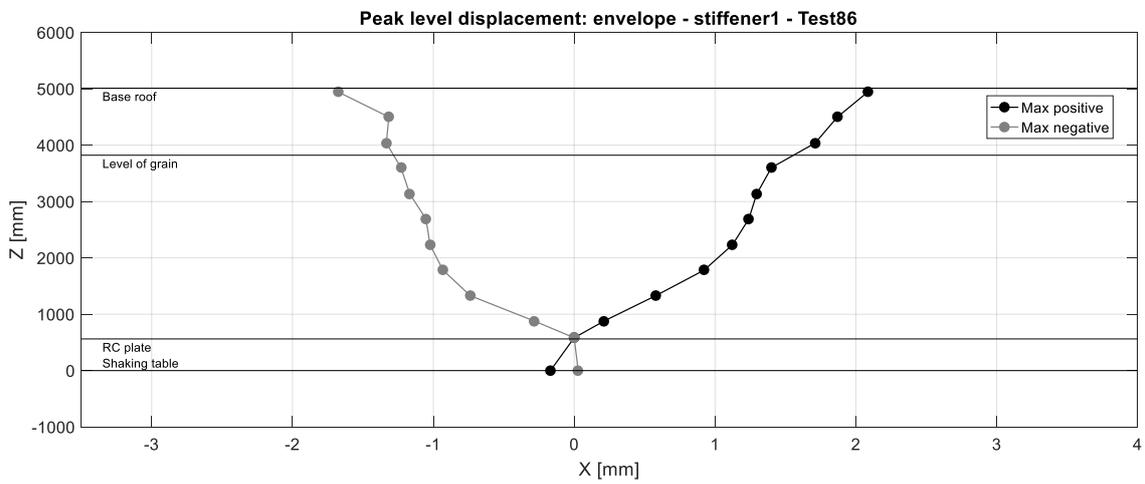
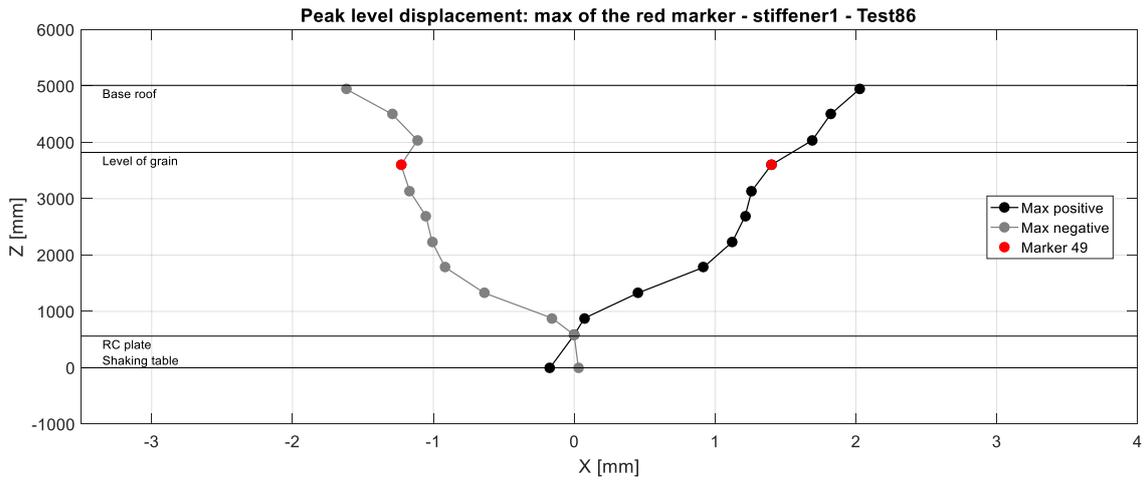
### Earthquake input RS3 0.5 g: Test 86

#### Montante 8



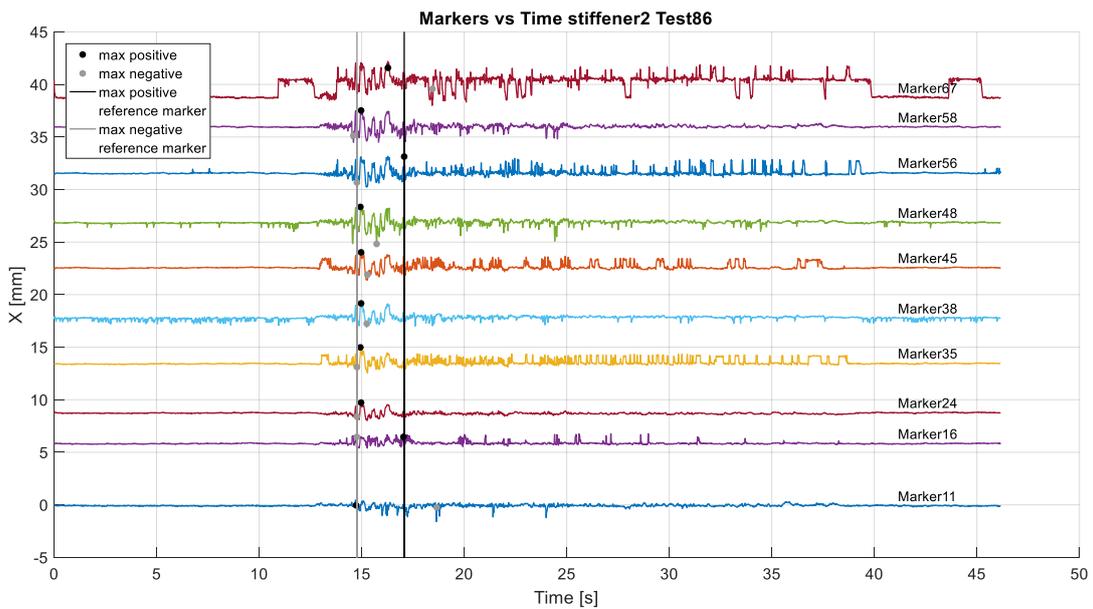
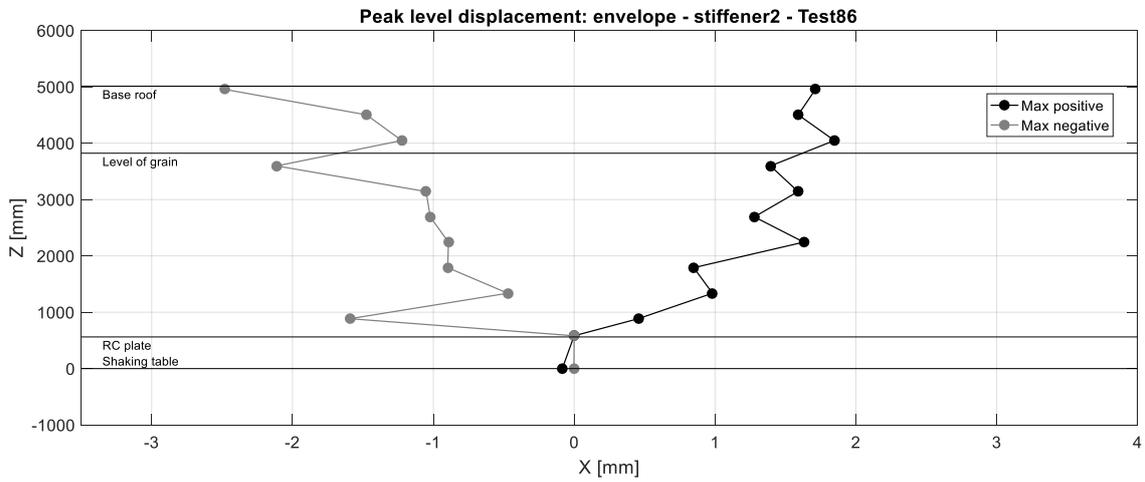
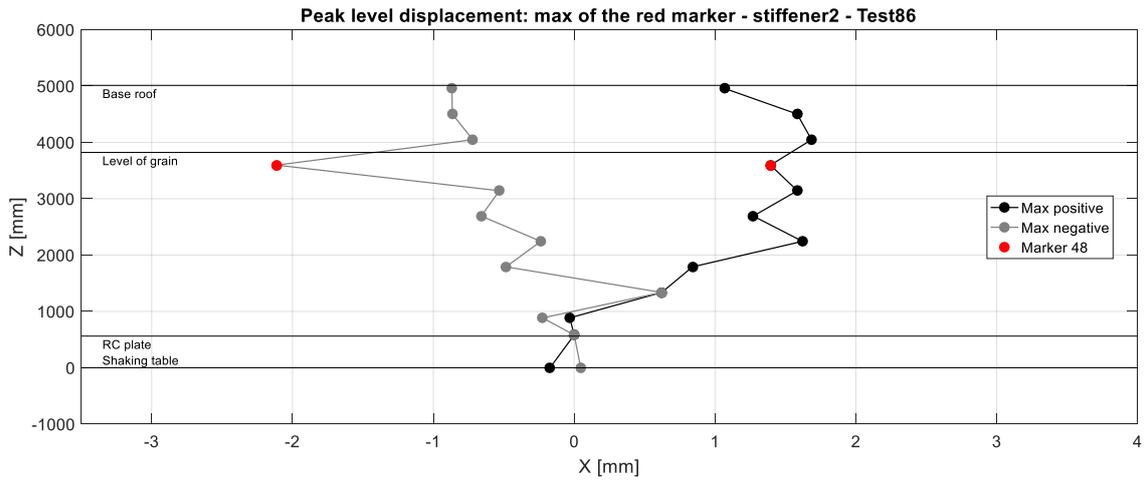
## 5. Prove in configurazione a base fissa

### Montante 1



## 5. Prove in configurazione a base fissa

### Montante 2



## 6 PROVE IN CONFIGURAZIONE A BASE ISOLATA

Le prove effettuate in configurazione isolata sono 111, comprese le diverse compensate per la calibrazione della tavola vibrante. Nel capitolo seguente si riportano i risultati ottenuti dalle misurazioni delle acquisizioni dei marker<sup>5</sup>.

Come già descritto al paragrafo §3.2 i dati vengono filtrati con un filtro passa basso con frequenza di taglio pari a 30 Hz al fine di eliminare eventuali rumori elettronici.

Input	Earthquake		
PGA [g]	A1	RS1	RS3
0.1	174	227	205
0.3	187	235	215
0.5	195	/	222
0.55	196	/	223

Tabella 6.1 elenco prove in configurazione isolata riportate

I risultati di tutti i test in tabella 6.1 sono riportati in appendice A.

Per poter analizzare solo il comportamento dinamico si depurano i dati dalla componente statica, che viene analizzata separatamente.

### 6.1 Celle di pressione

Per questo paragrafo si consulti la tesi di Matteo Marra: “Prove su tavola vibrante di silo metallico a fondo piano: identificazione dinamica mediante accelerometri”.

### 6.2 Accelerometri

Per questo paragrafo si consulti la tesi di Matteo Marra: “Prove su tavola vibrante di silo metallico a fondo piano: identificazione dinamica mediante accelerometri”.

### 6.3 Amplificazioni dinamiche

Per questo paragrafo si consulti la tesi di Matteo Marra: “Prove su tavola vibrante di silo metallico a fondo piano: identificazione dinamica mediante accelerometri”.

### 6.4 Estensimetri

Per questo paragrafo si consulti la tesi di Matteo Marra: “Prove su tavola vibrante di silo metallico a fondo piano: identificazione dinamica mediante accelerometri”.

<sup>5</sup> Per i paragrafi 6.1,6.2,6.3,6.4 e 6.5 si consulti la tesi di Matteo Marra: “Prove su tavola vibrante di silo metallico a fondo piano: identificazione dinamica mediante accelerometri”.

### **6.5 Sforzi nei montanti**

Per questo paragrafo si consulti la tesi di Matteo Marra: “Prove su tavola vibrante di silo metallico a fondo piano: identificazione dinamica mediante accelerometri”.

### **6.6 Markers**

Per quanto riguarda i risultati ottenuti dal monitoraggio dei marker si utilizza la stessa modalità di analisi riportata nel paragrafo §5.6.

Il sistema di isolamento, come mostrato per il test 174 (A1 0.1 g) non viene attivato per PGA basse, in quanto è necessario vincere l’attrito interno all’isolatore, per poter attivare il suo funzionamento.

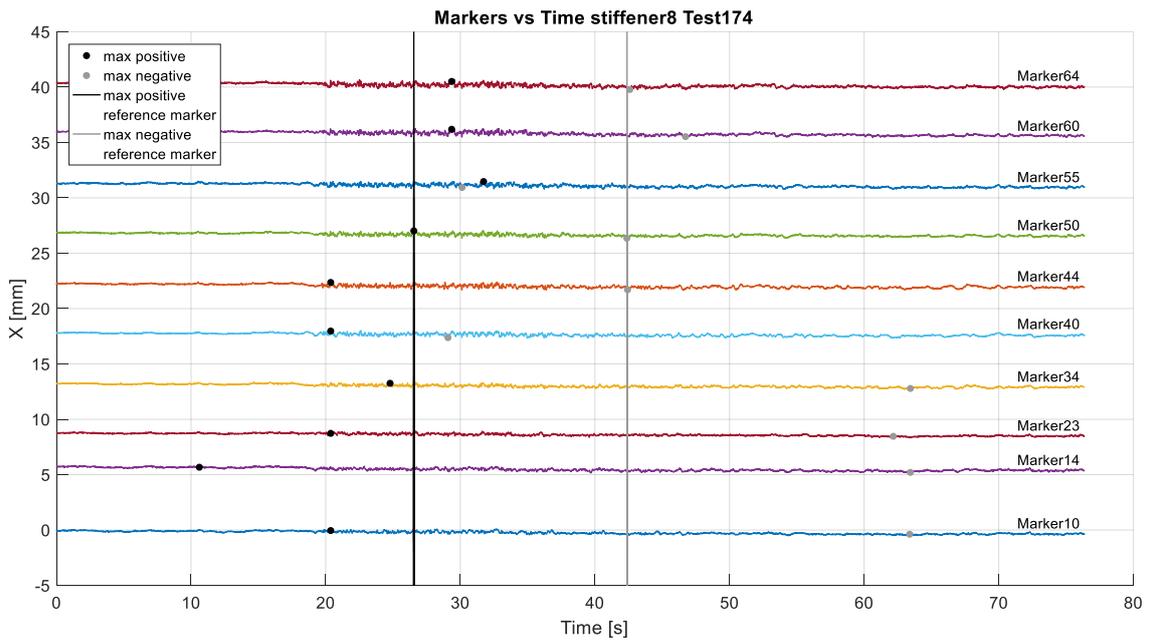
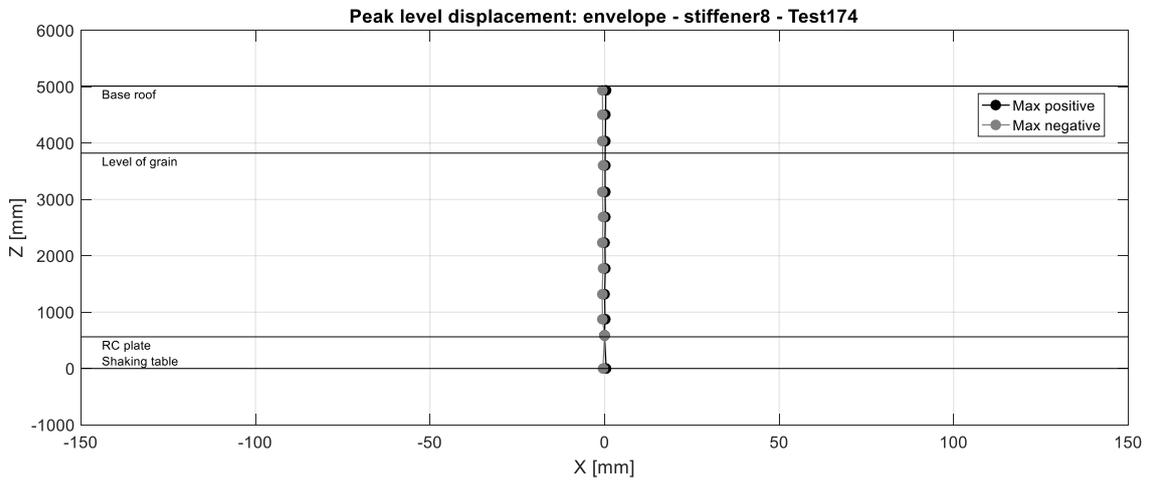
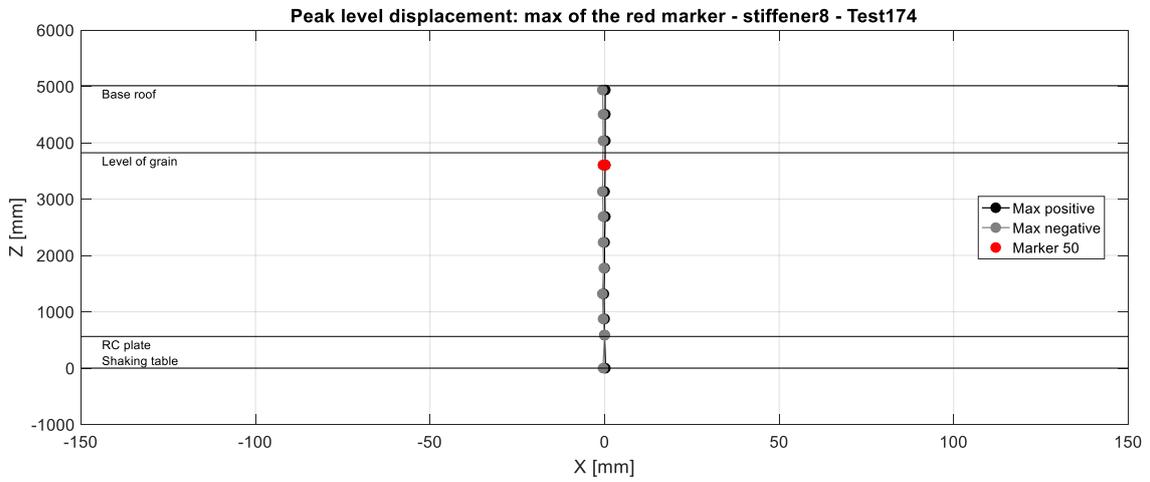
Per accelerazioni al suolo più alte viene evidenziata, invece, l’entità del beneficio sulla struttura, pari allo spostamento relativo tra la platea di fondazione e la tavola vibrante. A questo proposito, l’accelerogramma RS1 genera, a parità di accelerazione al suolo, gli spostamenti più alti negli isolatori, rispetto agli altri input. Ciò è dovuto al fatto che il sistema isolato è caratterizzato da un periodo proprio di vibrazione più vicino alla frequenza eccitata maggiormente, appunto, dall’accelerogramma RS1.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti per il solo montante 8.

## 6. Prove in configurazione a base isolata

### Earthquake input A1 0.1 g: Test 174

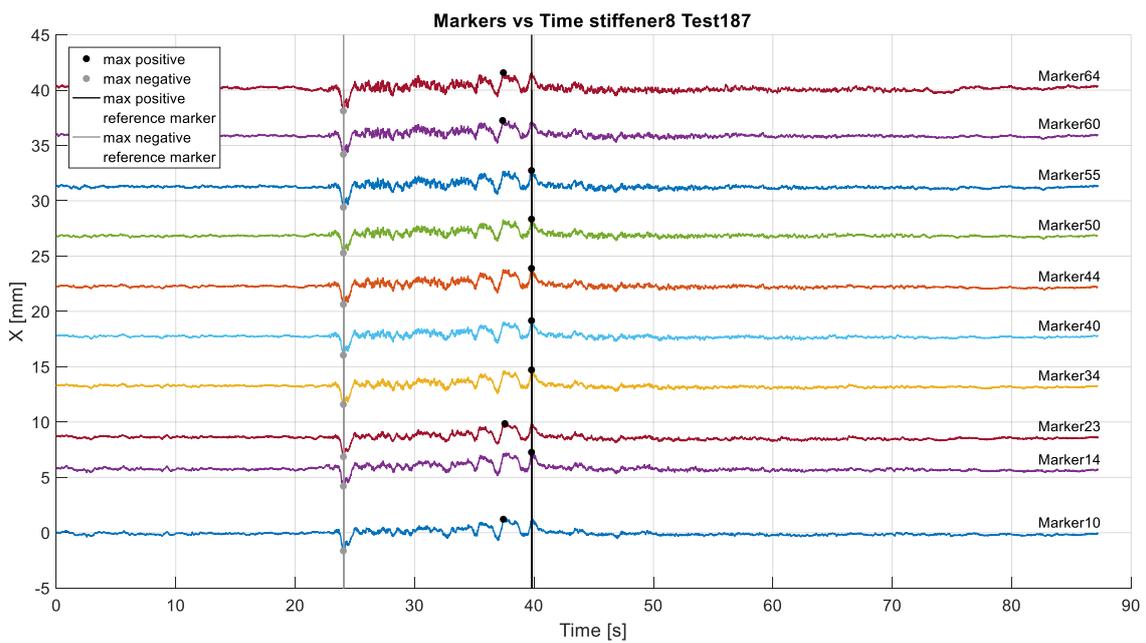
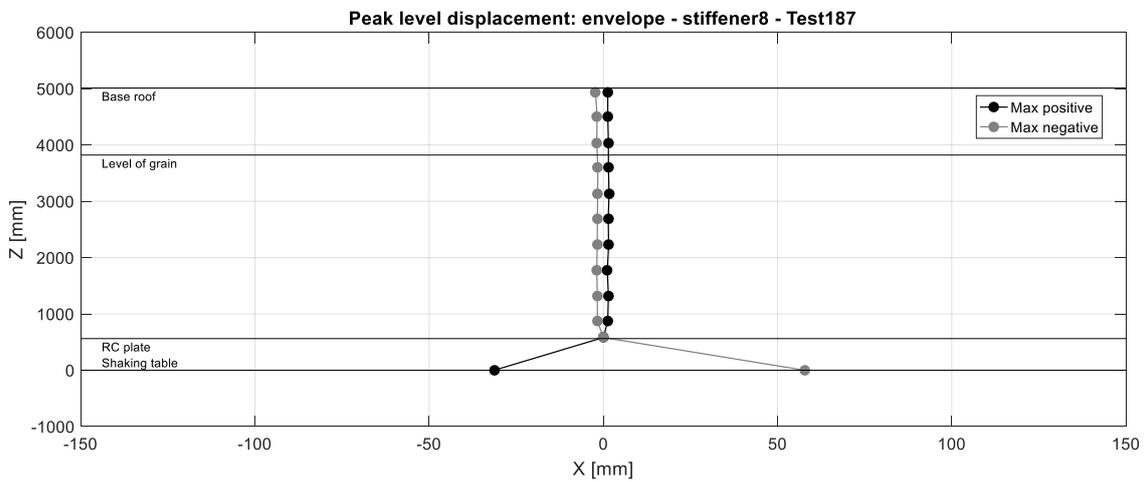
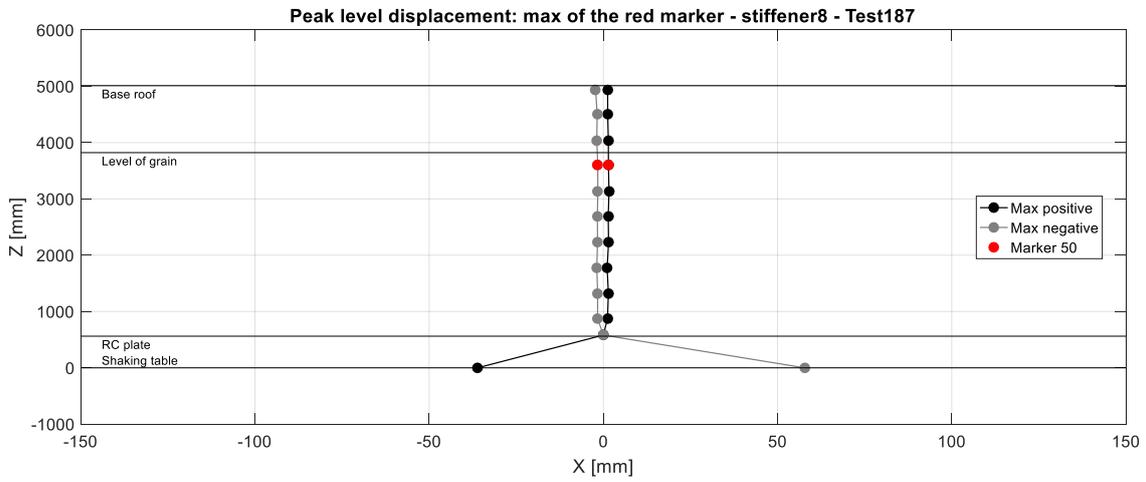
#### Montante 8



6. Prove in configurazione a base isolata

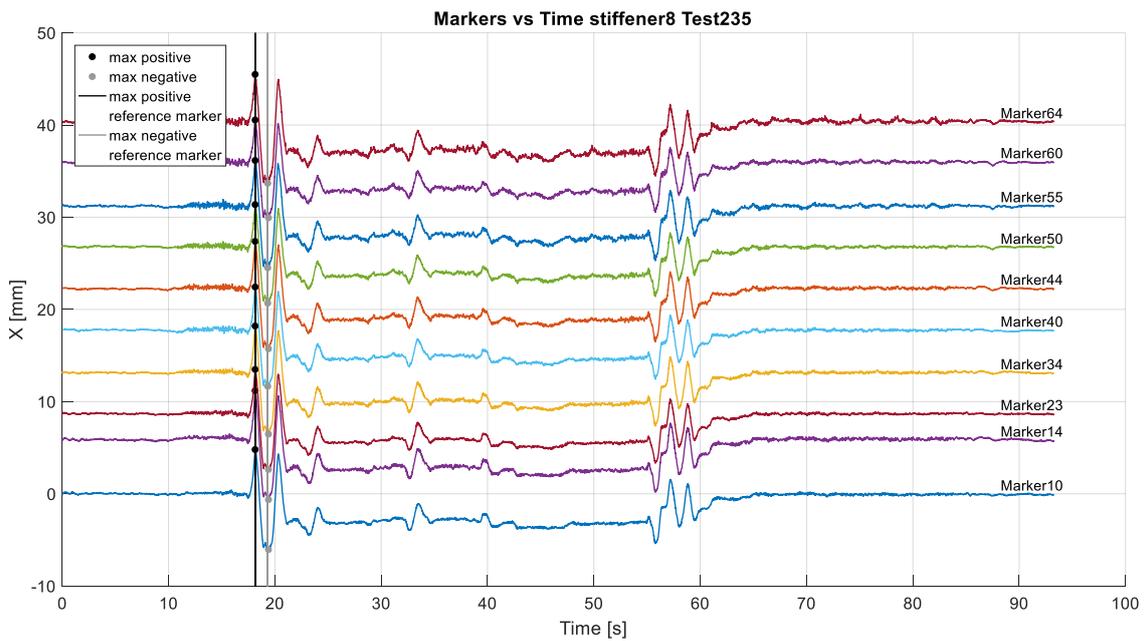
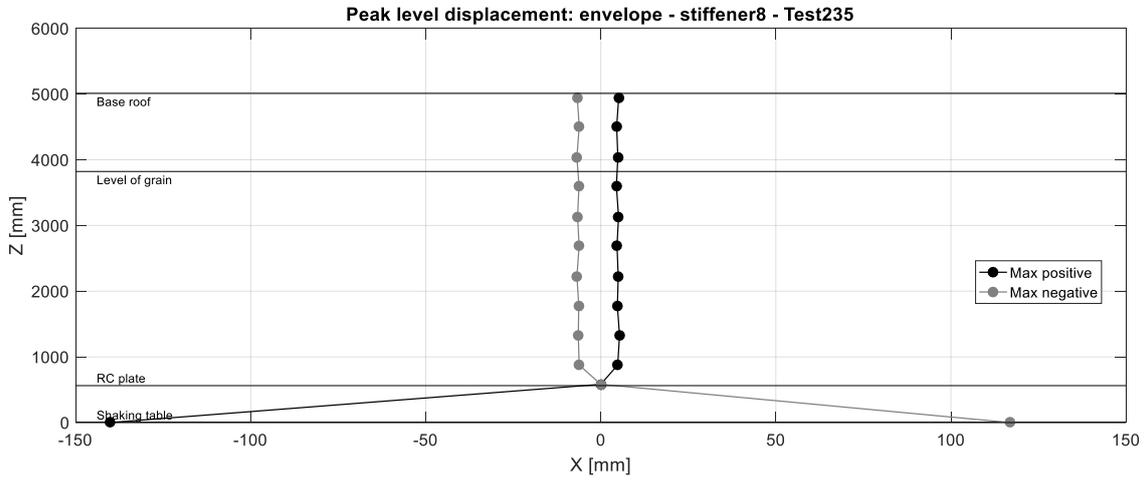
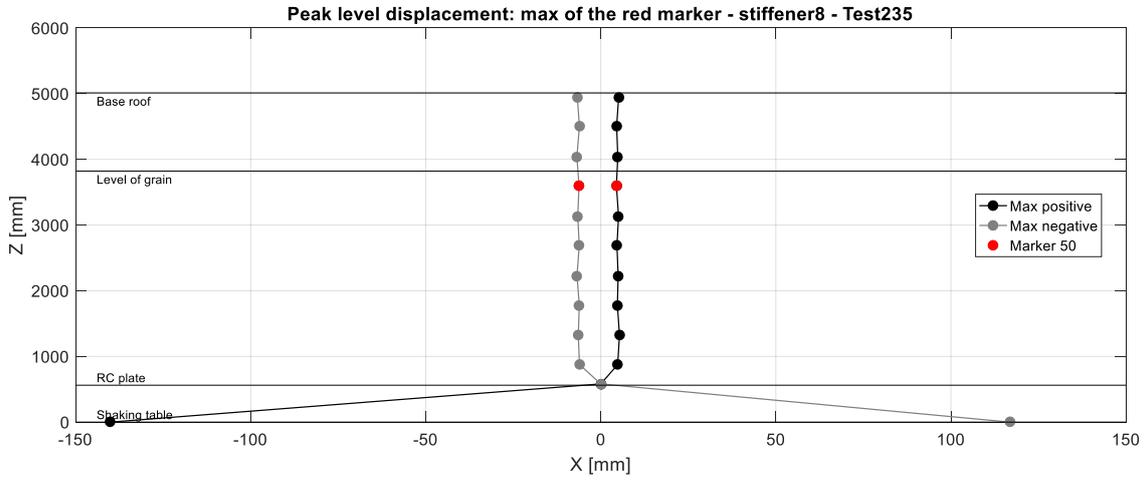
Earthquake input A1 0.3 g: Test 187

Montante 8



Earthquake input RS1 0.3 g: Test 235

Montante 8



## 7 TRATTAMENTO E ANALISI DATI: MARKERS

### 7.1 Marker sui montanti

L'acquisizione ottica dei marker permette di monitorare nel tempo la posizione di 70 punti distribuiti sulla struttura come in figura 3.11. Il sistema di riferimento a cui sono riferite le misure è individuato da tre marker posizionati sulla tavola vibrante secondo la figura 3.12.

Per ogni test e per ogni montante monitorato si valutano: (i) lo spostamento relativo tra i marker sui montanti e la platea di fondazione e (ii) tra la platea di fondazione e la tavola vibrante. Quest'ultimo permette di valutare il funzionamento degli ancoraggi laterali alla platea, per le prove in configurazione fissa, e l'effettivo beneficio sugli spostamenti della platea in relazione all'effettivo spostamento della tavola, per le prove in configurazione isolata.

Per poter analizzare separatamente ogni test è stato necessario resettare i dati al primo valore, ottenendo così il solo spostamento dinamico dovuto all'input scelto.

Il fatto di poter ottenere dati relativi agli spostamenti, e quindi alle deformate, consente diverse osservazioni e analisi:

- è possibile confrontare le deformate con i valori di altre strumentazioni come gli accelerometri monoassiali;
- è possibile ottenere, tramite l'utilizzo delle equazioni della linea elastica, le sollecitazioni sul montante;
- è possibile confrontare le sollecitazioni ottenute dalle acquisizioni degli estensimetri e quelle ricavate a partire dagli spostamenti sui montanti.

Date le equazioni differenziali della linea elastica:

$$E \cdot J \cdot v^{IV} = \cdot q \quad (1)$$

$$E \cdot J \cdot v^{III} = \cdot -T \quad (2)$$

$$E \cdot J \cdot v^{II} = \cdot -M \quad (3)$$

$$E \cdot J \cdot v^I = \cdot \varphi \quad (4)$$

dove  $E$  è il modulo elastico del materiale,  $J$  è il momento d'inerzia dell'elemento,  $q$  è il carico distribuito sulla trave,  $T$  e  $M$  sono rispettivamente le sollecitazioni di taglio e momento e infine  $\varphi$  è l'angolo di rotazione.

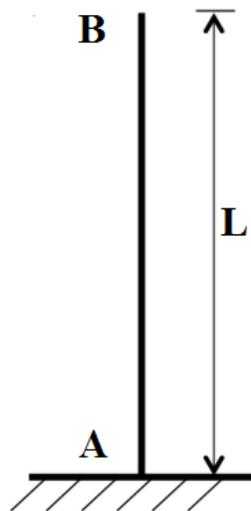
Per poter ottenere le sollecitazioni è quindi necessario derivare i dati sperimentali. A tal fine si fa ricorso a metodologie numeriche, quali le differenze finite in avanti (5) e all'indietro (6) di primo ordine:

$$f'(x_i) = \left( \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{\Delta x} \right) \quad (5)$$

$$f'(x_i) = \left( \frac{f(x_i) - f(x_{i-1}))}{\Delta x} \right) \quad (6)$$

L'utilizzo delle differenze finite in avanti (5) non consente di valutare l'ultimo valore, quello delle differenze finite all'indietro (6), il primo. In altre parole, ad ogni derivata successiva, o il primo o l'ultimo valore non vengono valutati. Contando solo 10 punti su ogni montante sarebbe quindi troppo restrittivo utilizzare differenze finite centrali o differenze finite di ordini superiori, in quanto i valori non valutati sarebbero maggiori dei valori sperimentali.

Per poter ottenere le sollecitazioni di momento flettente, taglio e carico distribuito a più quote possibili, si considera il montante come una semplice mensola incastrata alla base trascurando il comportamento a lastra ortotropa del montante accoppiato alla virola. Si utilizzano le seguenti condizioni al contorno:



$$v(0) = 0$$

$$v'(0) = 0$$

$$v''(L) = 0$$

$$v'''(L) = 0$$

Nel momento in cui si applicano le condizioni al contorno relative all'incastro alla base, si fa uso delle differenze finite all'indietro, mentre quando si impongono le condizioni al contorno alla sommità della mensola si considerano le differenze finite in avanti.

Nel caso in esame si considerano le seguenti quantità:

- $E = 206'000 \text{ MPa}$
- $J_{montante2} = 1'011'698.91 \text{ mm}^4$
- $J_{montante1,3} = 226'520.73 \text{ mm}^4$
- $J_{montante4,8} = 3'532'539.85 \text{ mm}^4$

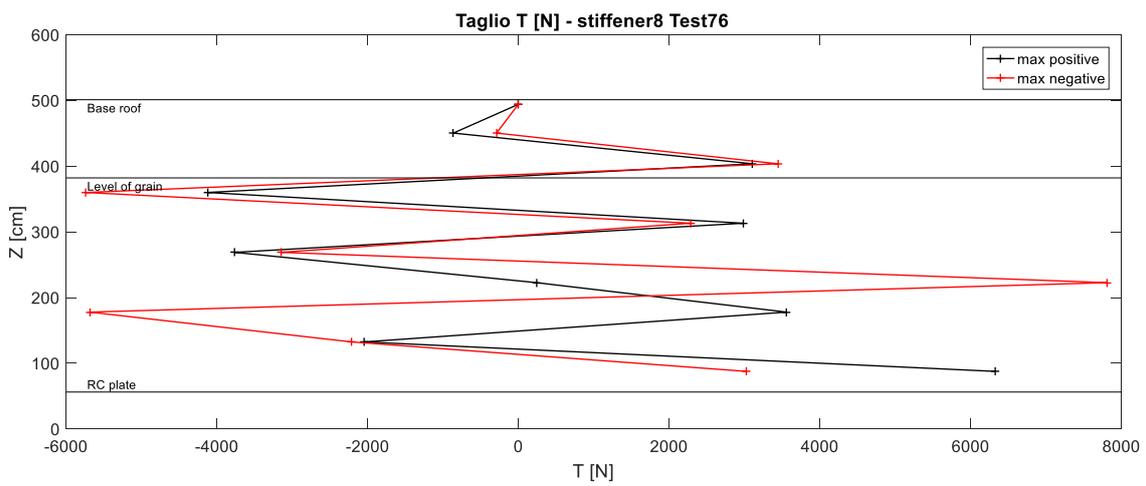
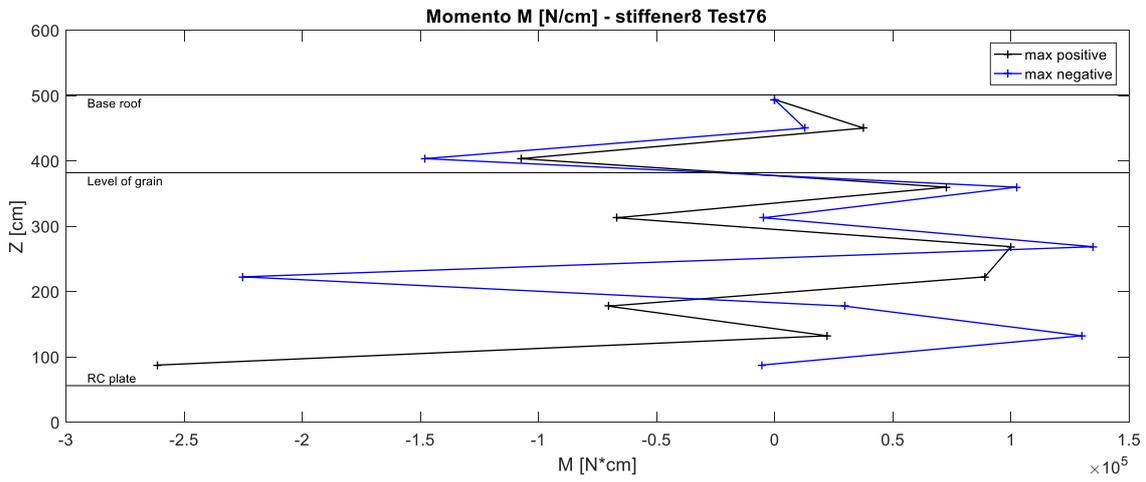
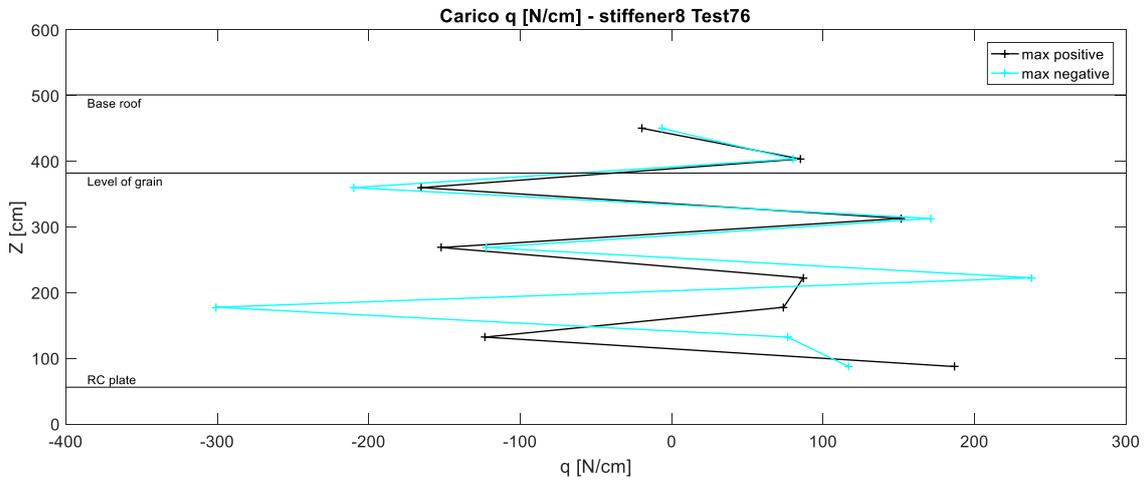
Il momento d'inerzia  $J$  varia per ogni montante in quanto la direzione di spostamento dei montanti risulta parallela all'asse X del sistema di riferimento locale per il montante 2, parallela all'asse Y del sistema di riferimento locale per i montanti 4 e 8 e inclinata di  $45^\circ$  rispetto all'asse X del sistema di riferimento locale per i montanti 1 e 3.

I risultati riportati di seguito evidenziano un fenomeno per il quale le sollecitazioni cambiano spesso di segno. Questo fenomeno necessita di studi più approfonditi che sono già in corso. Per il momento si può ipotizzare che questo fenomeno sia dovuto alla procedura con la quale si ricavano le sollecitazioni. Queste ultime tengono conto dell'effetto dovuto alla rigidità offerta dal materiale insilato e dovuto alla rigidità del montante, considerato come una trave su suolo alla Winkler, dove le successive circonferenze sono rappresentabili come molle di rigidità incognita.

Di seguito si riportano alcuni risultati relativi al solo montante 8, per i test a configurazione a base fissa e a base isolata.

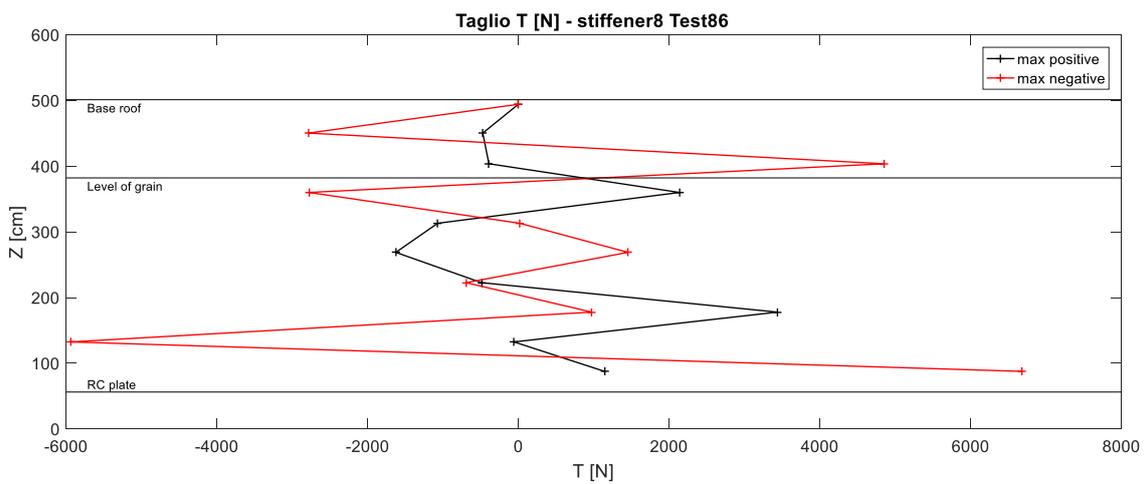
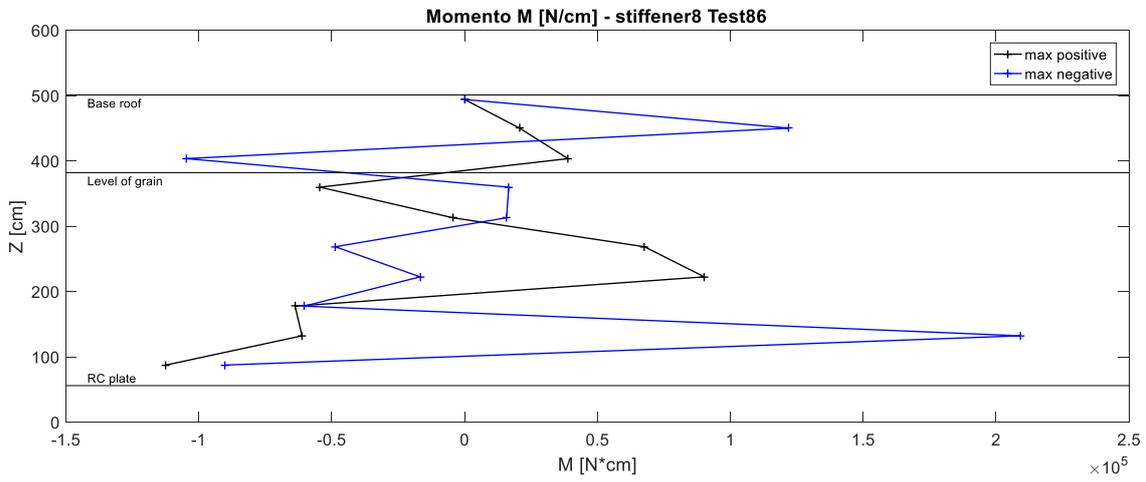
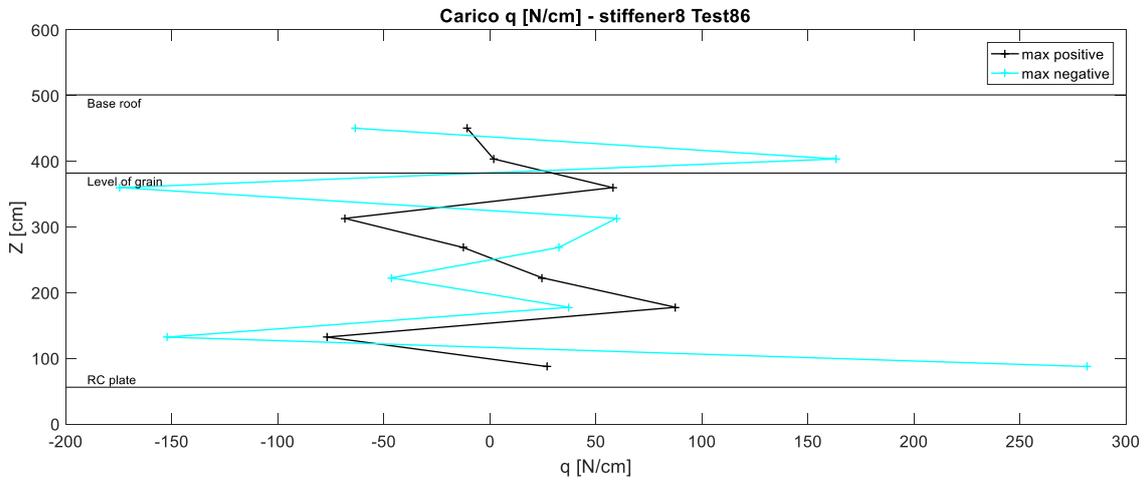
Sinusoidal input 1 Hz 0.5 g pre-compaction: Test 76

Montante 8



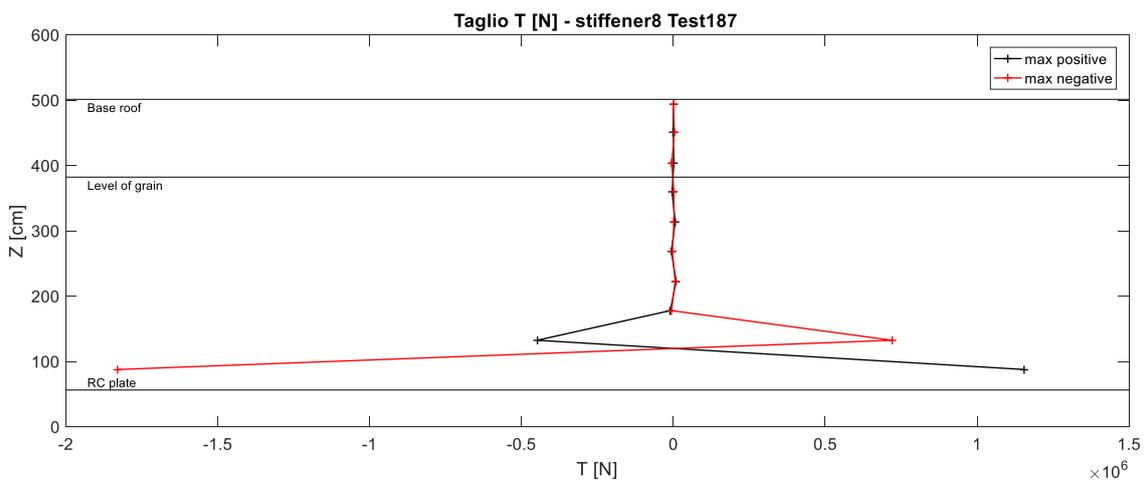
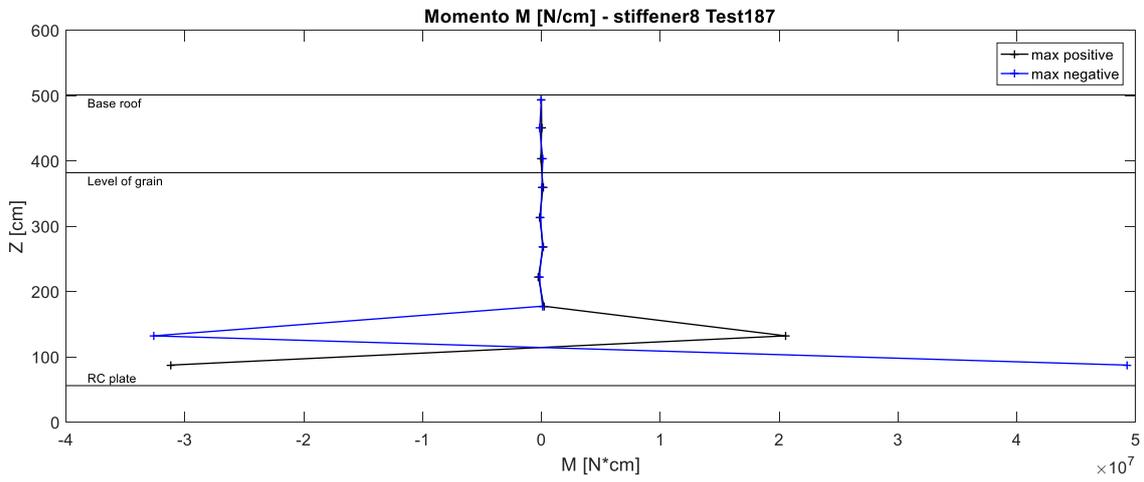
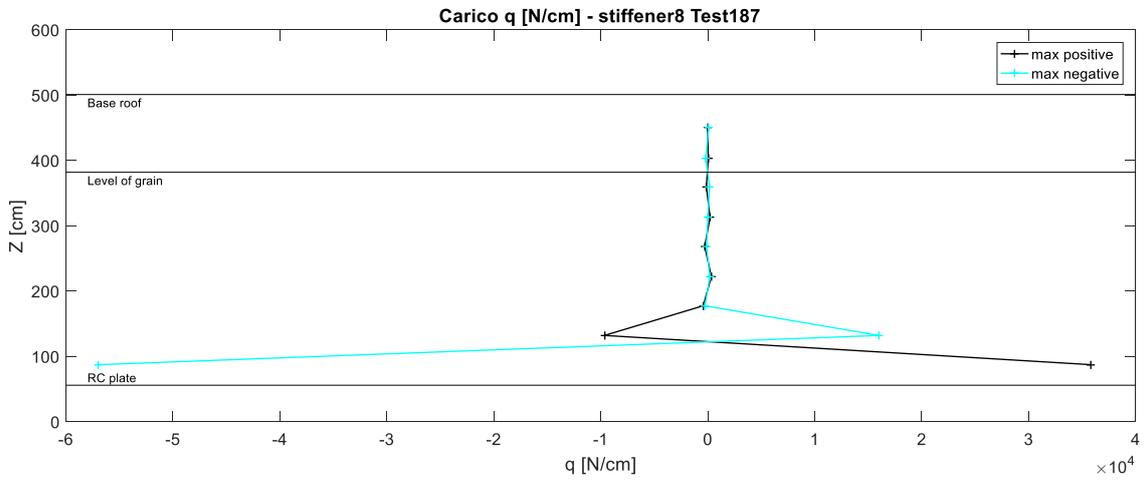
Earthquake input RS3 0.5 g: Test 86

Montante 8



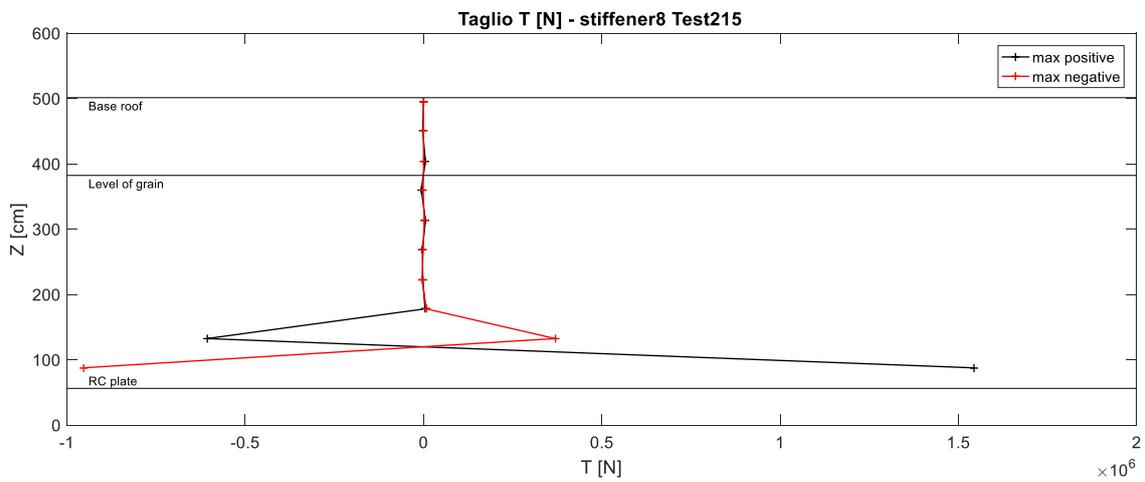
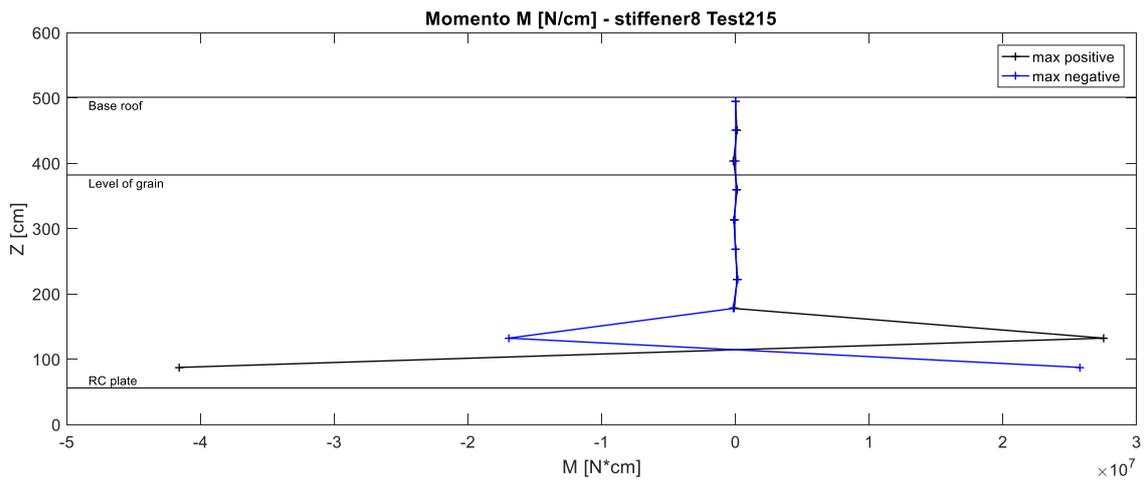
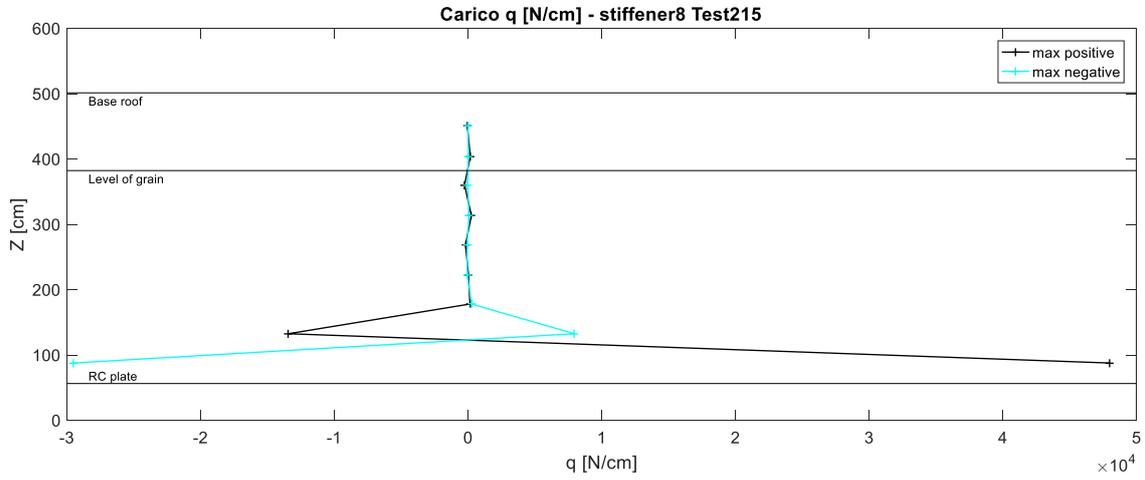
Earthquake input A1 0.3 g: Test 187

Montante 8



Earthquake input RS3 0.3 g: Test 215

Montante 8



In alternativa a questa procedura è stata effettuata un'interpolazione polinomiale di grado (n-1) dove n è il numero di dati sperimentali. L'interpolazione polinomiale è rappresentabile come una combinazione lineare del tipo:

$$p_n(x) = \sum_{j=0}^n \alpha_j x^j \quad (7)$$

Dall'espressione (7) si impongono le condizioni di interpolazione, ricavando il sistema lineare:

$$p_n(x_i) = y_i = \sum_{j=0}^n \alpha_j x_i^j \quad i = 1, \dots, n \quad (8)$$

I coefficienti di tale espressione compongono la matrice di Vandermonde:

$$\psi = \begin{bmatrix} 1 & x_0 & x_0^2 & \dots & x_0^n \\ 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^n \end{bmatrix}$$

Nel caso di interpolazioni polinomiali, la disposizione dei nodi influenza l'errore di interpolazione. Data la disposizione pressoché equispaziata dei nodi, l'interpolazione effettuata risulta affetta da un fenomeno detto di Runge, per il quale l'interpolazione tramite polinomi ad alto grado non va a buon fine nei punti estremi. Al fine di migliorare l'interpolazione si sono utilizzati i nodi di Chebyshev. Questi ultimi permettono di realizzare una serie di nodi non equispaziati così da minimizzare il fenomeno sopra citato.

I nodi di Chebyshev si ottengono valutando gli zeri del polinomio di Chebyshev di grado n-1 dove n è il numero di punti da interpolare. Il polinomio di Chebyshev è definito come:

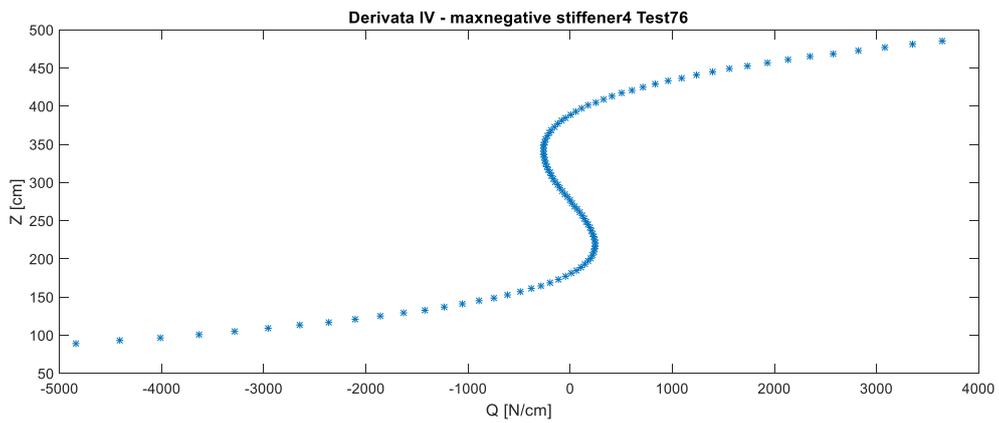
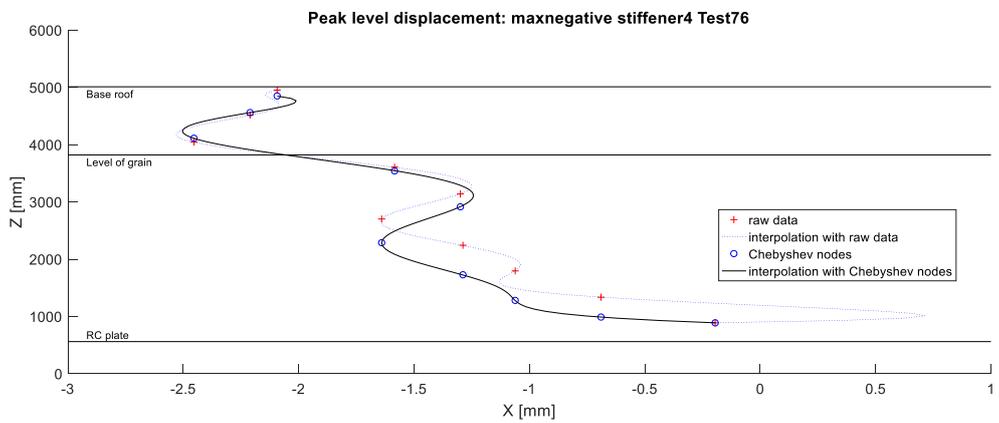
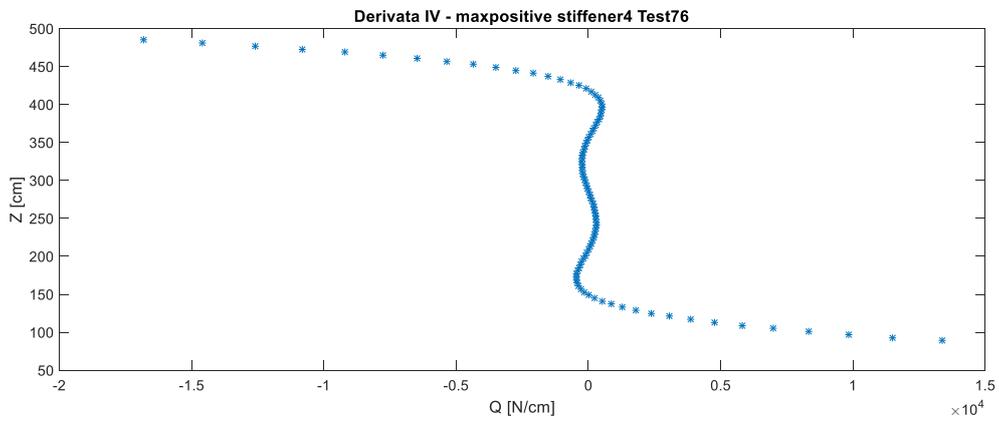
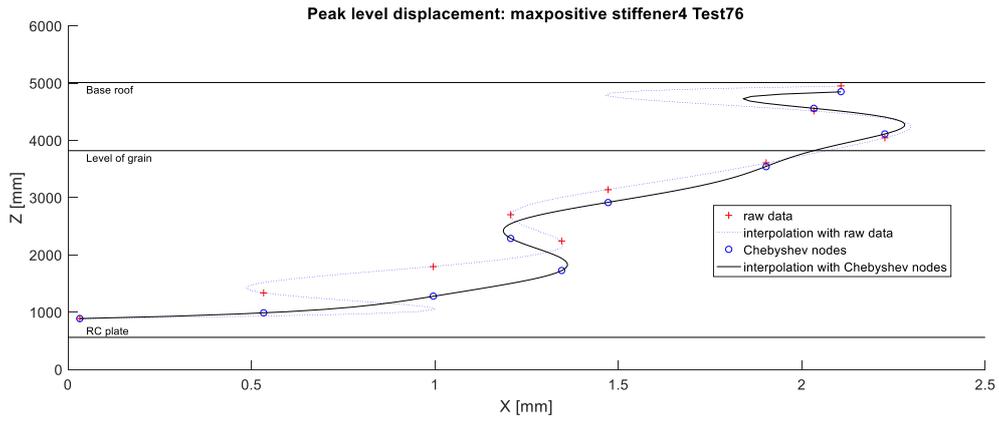
$$T_{n+1}(x) = \cos((n+1)\theta), \quad \text{per } x = \cos(\theta) \text{ e } \theta \in [0, \pi] \quad (9)$$

E gli zeri del polinomio di Chebyshev, all'interno di un intervallo [a,b] sono definiti come segue:

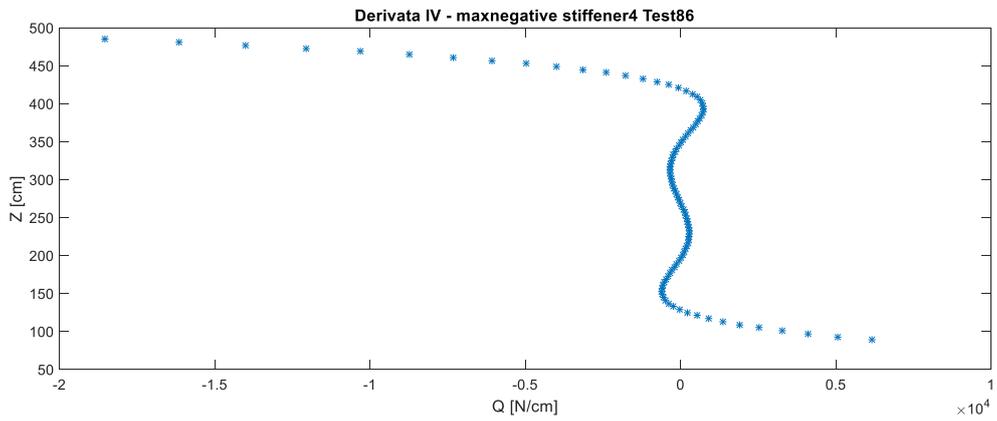
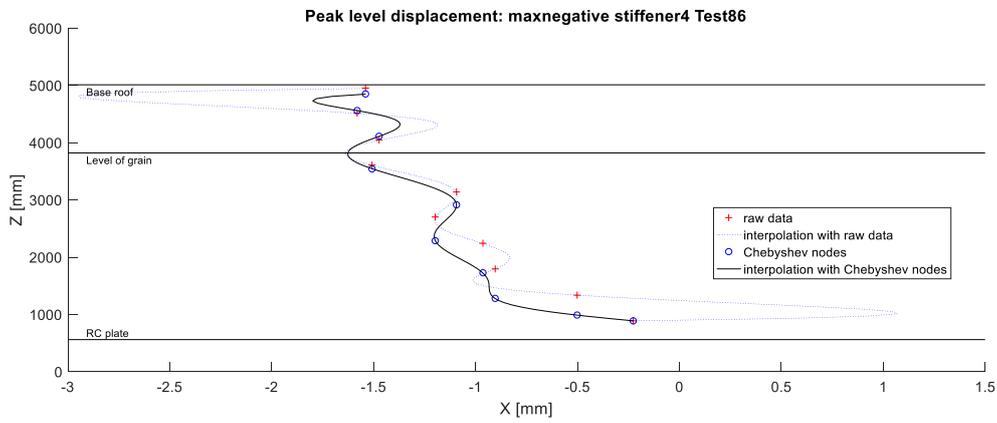
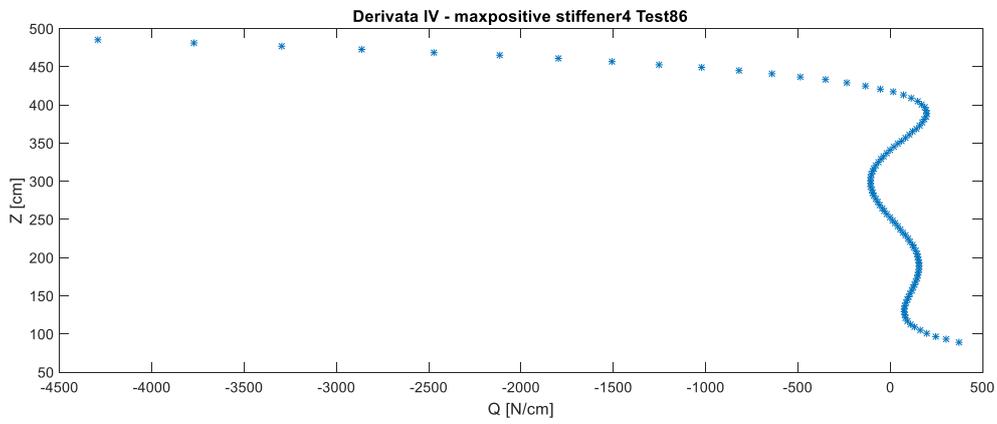
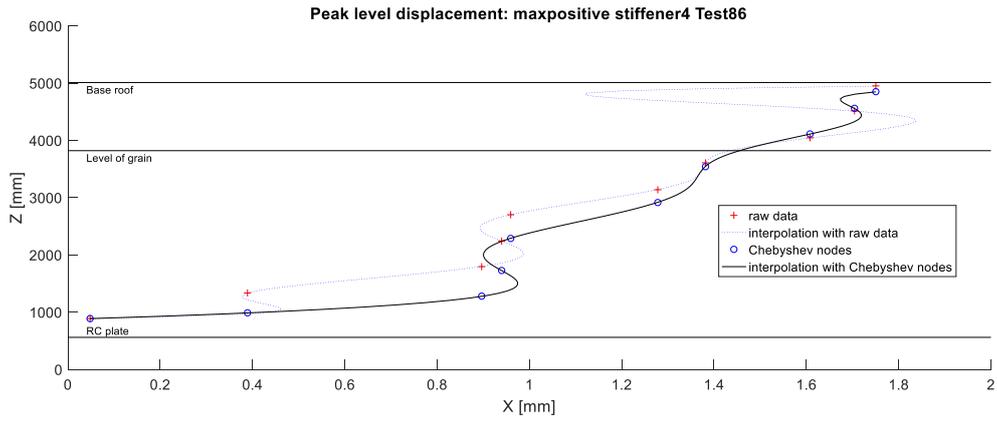
$$x_k = \frac{a+b}{2} + \frac{a-b}{2} \cdot \cos\left(\frac{i}{n}\pi\right) \quad \text{con } i = 0, 1, \dots, n \quad (10)$$

Di seguito si riportano, per brevità, i risultati relativi al montante 4 ottenuti dall'interpolazione polinomiale con i nodi di Chebyshev

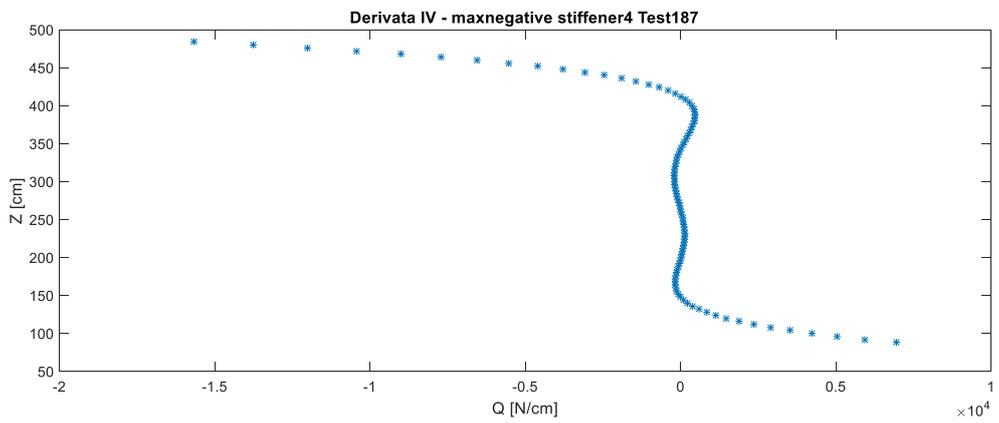
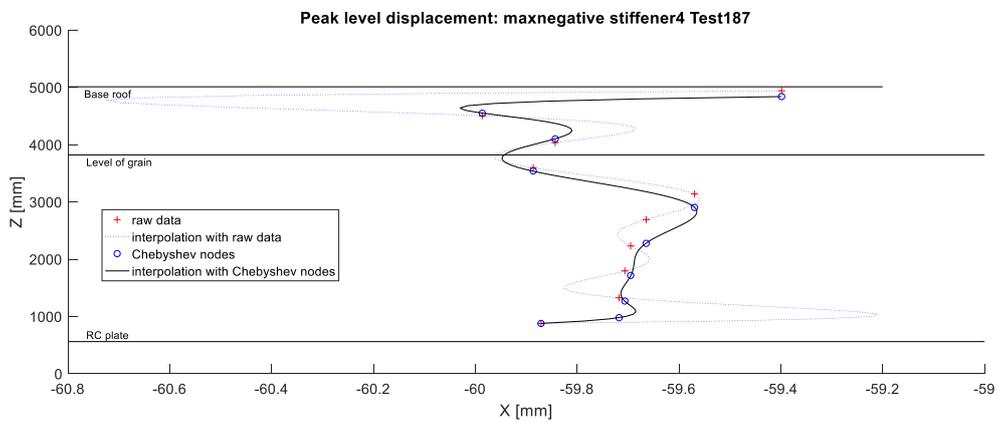
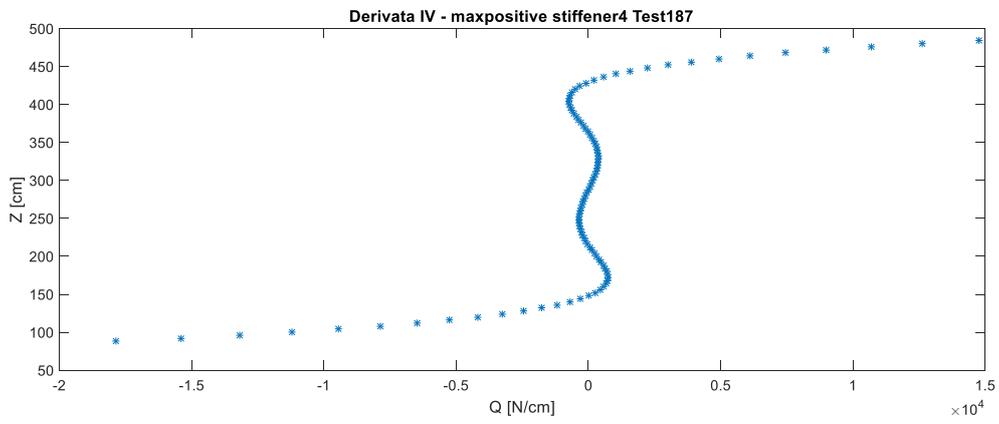
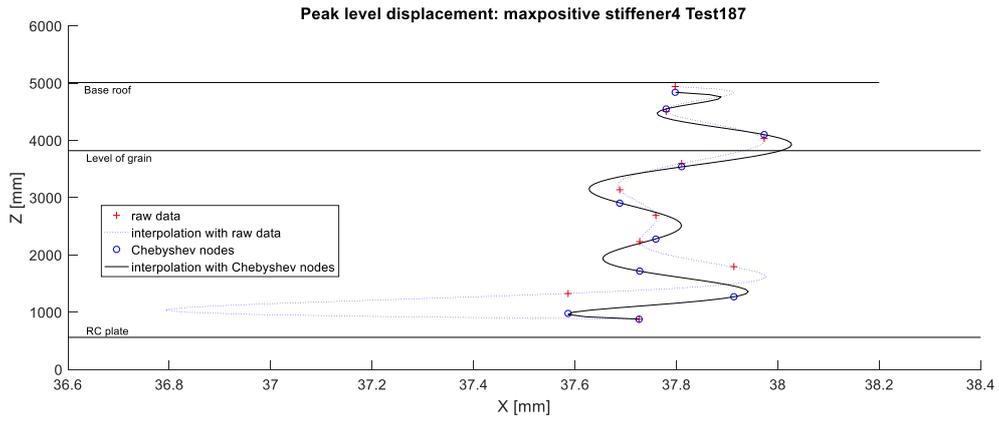
Sinusoidal input 1 Hz 0.5 g pre-compaction: Test 76



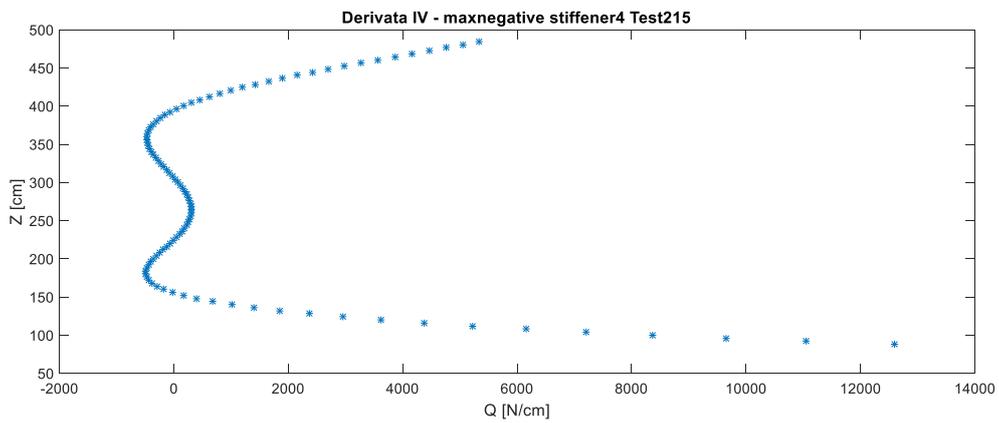
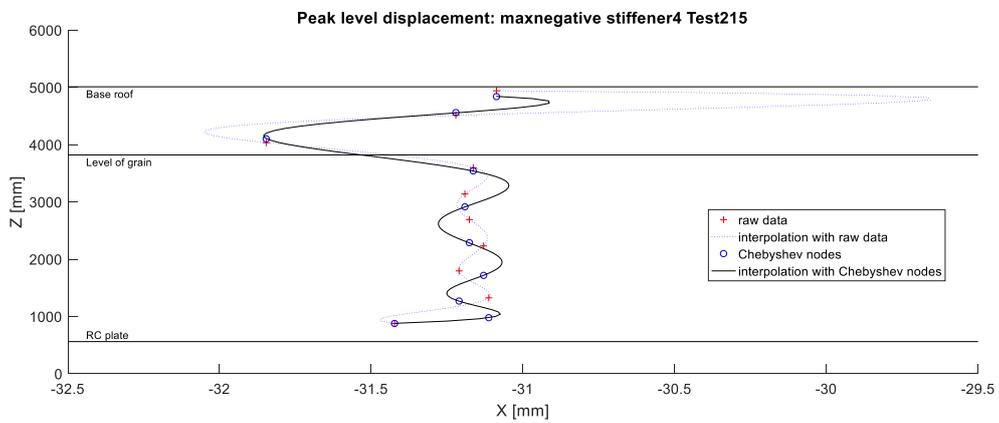
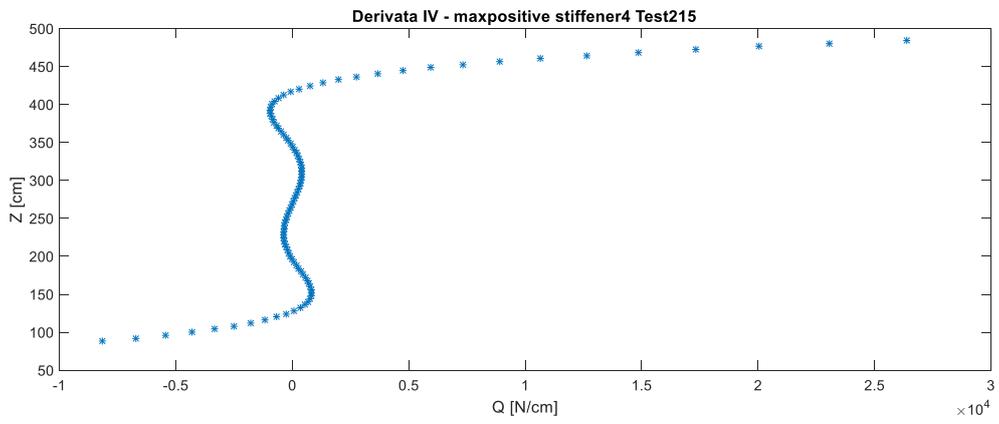
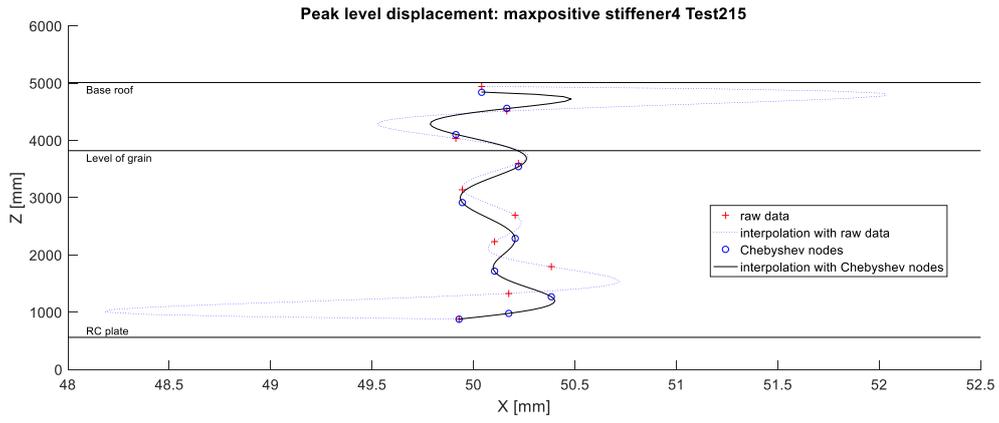
Earthquake input RS3 0.5 g: Test 86



Earthquake input A1 0.3 g: Test 187



Earthquake input RS3 0.3 g: Test 215



## 7.2 Marker sulla virola

I marker posizionati sulla virola permettono di analizzare il meccanismo resistente del silo. A tale scopo, per ogni test, si valuta la variazione di lunghezza delle diagonali principali 20-30 e 19-32, indicate in figura 7.1. Se tale variazione risulta positiva si considera la diagonale soggetta a trazione mentre se negativa si considera soggetta a compressione.

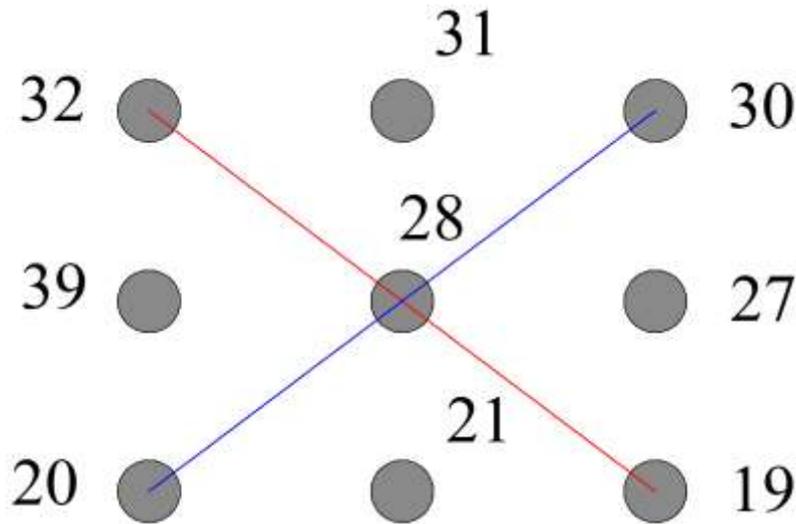
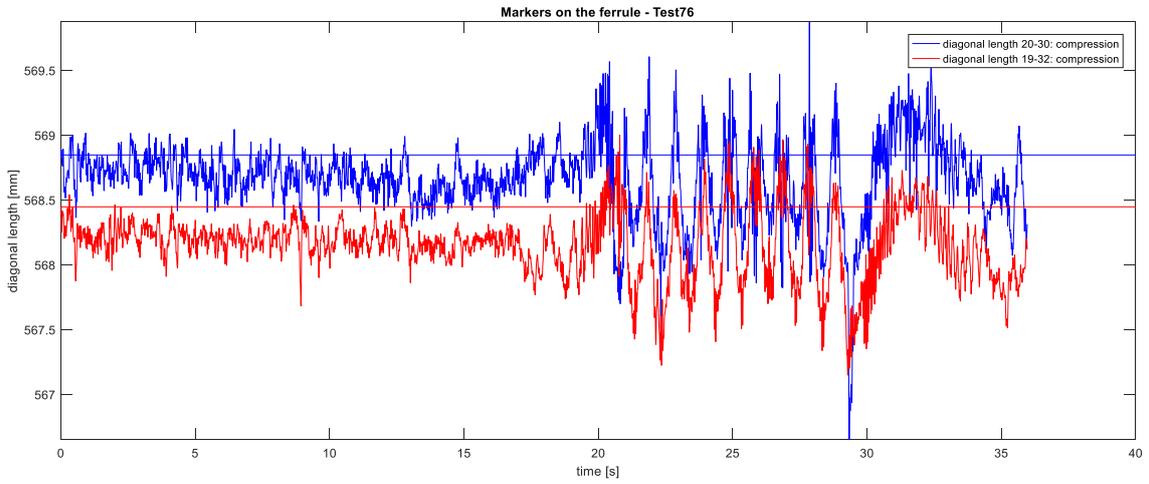


Figure 7.1 rappresentazione grafica della posizione dei marker sulla virola e relativa numreazione

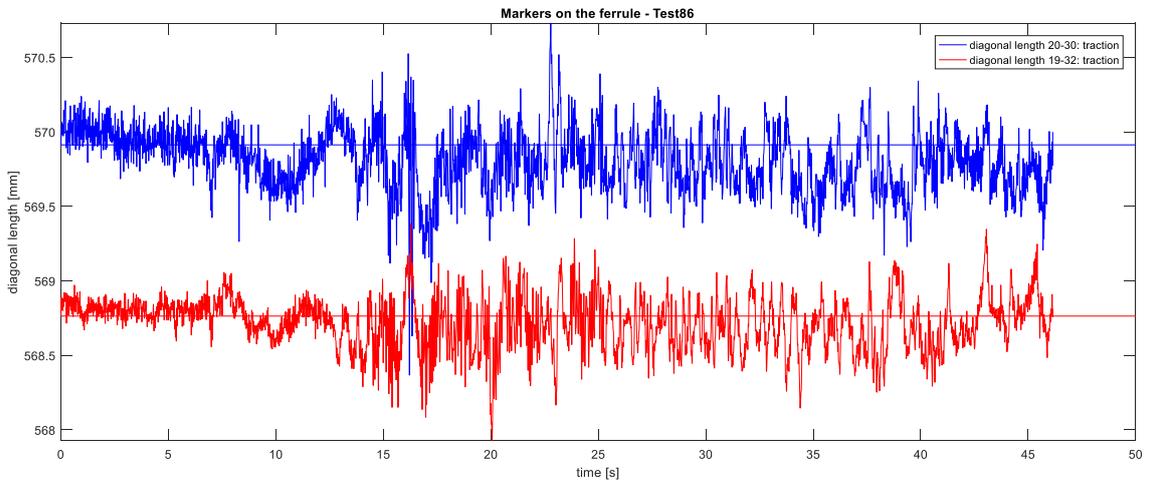
Dai risultati emerge che, per alcuni test, mentre una diagonale risulta compressa, l'altra risulta in trazione. Tale trazione non sempre è in grado di vincere la compressione naturalmente presente sulla virola; per questo motivo anche un abbassamento della compressione presente ad inizio test comporta la presenza di trazione.

Da ciò si deduce che oltre ad un meccanismo flettente, è presente anche un meccanismo a taglio sulla virola. Su questo fenomeno sono in corso opportuni approfondimenti.

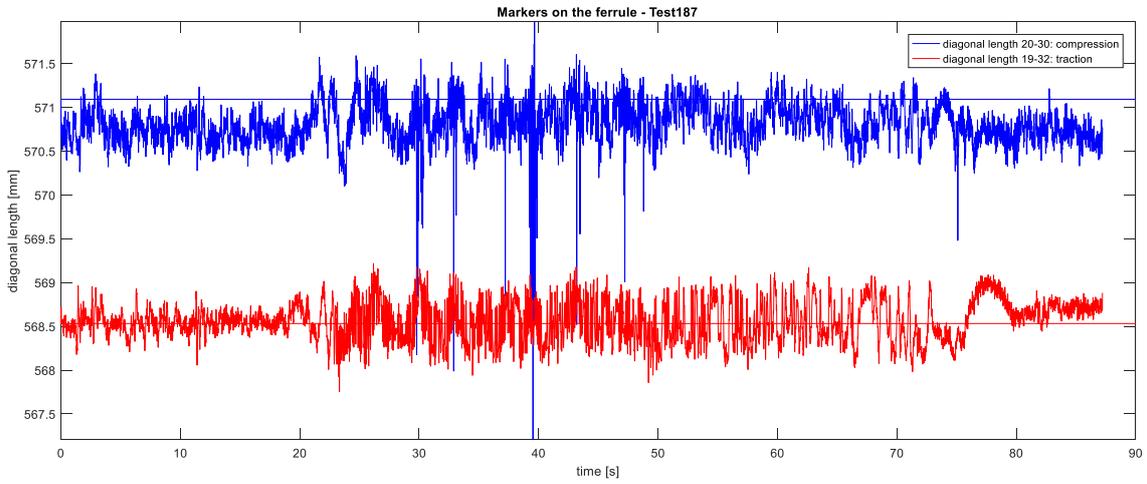
Sinusoidal input 1 Hz 0.5 g pre-compaction: Test 76



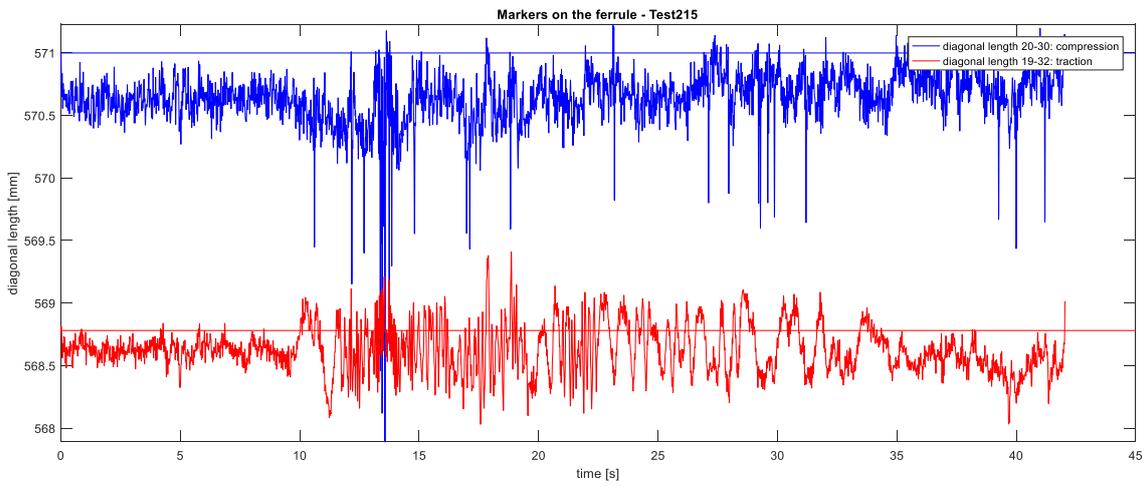
Earthquake input RS3 0.5 g: Test 86



Earthquake input A1 0.3 g: Test 187



Earthquake input RS3 0.3 g: Test 215



## 8 QUADRO GLOBALE DELLA RISPOSTA DEL SISTEMA SILO – GRANO

Per poter avere un quadro generale del comportamento del sistema grano – silo, si riportano le acquisizioni di tutte le strumentazioni, per i seguenti test:

CONFIGURAZIONE A BASE FISSA					
Input	Sinusoidal		Earthquake		
PGA [g]	1 Hz pre compaction	1 Hz post compaction	A1	RS1	RS3
0.5	76	121	83	80	86
CONFIGURAZIONE A BASE ISOLATA					
0.3	/	/	187	235	215

Tabella 8.1 elenco test riportati in questo capitolo

I vari tipi di strumenti sono riportati nella figura 8.1:

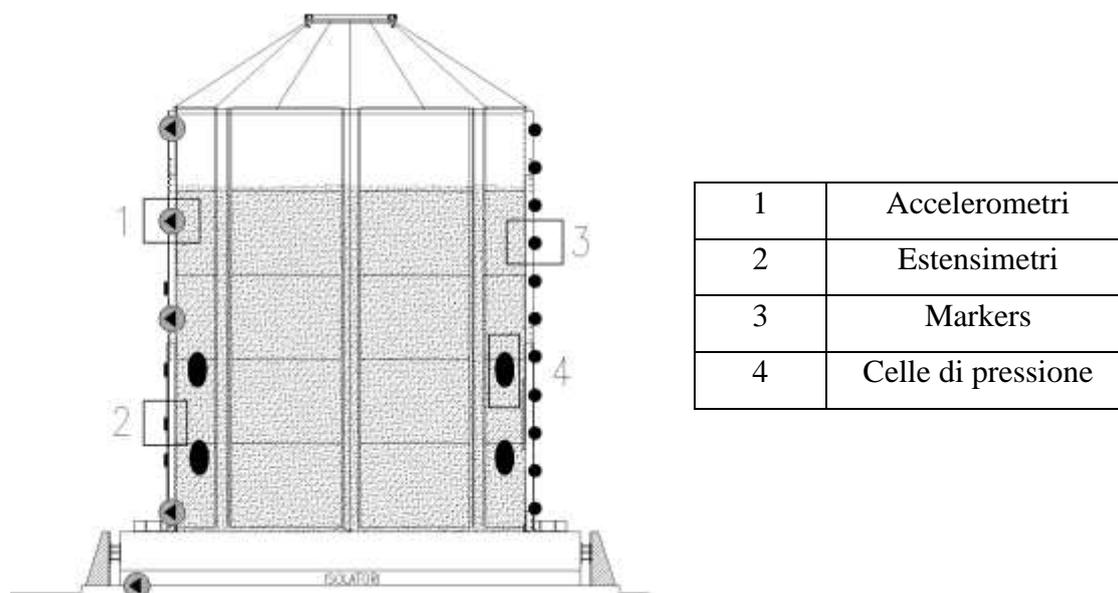
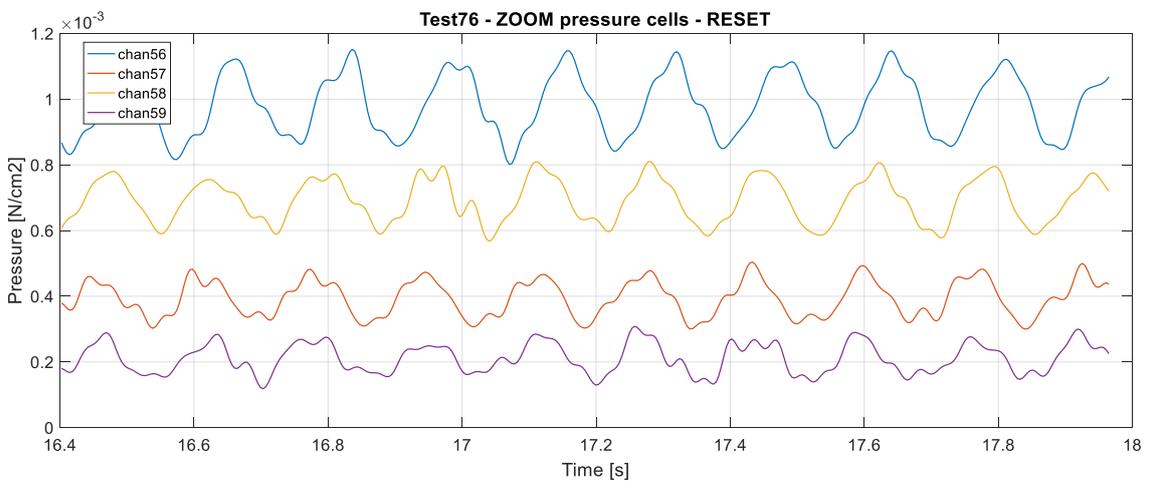
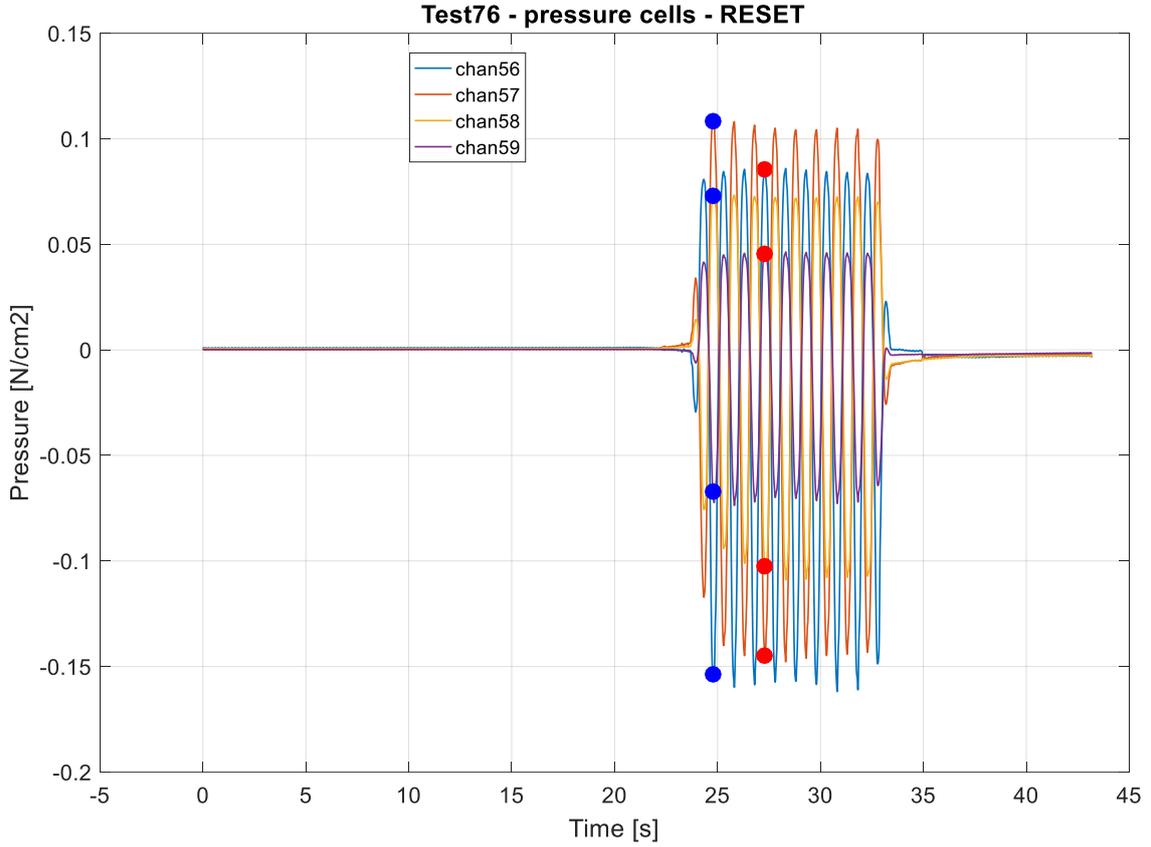


Figure 8.1 struttura testata e relativa strumentazione

Al fine di rendere più leggibili i grafici seguenti si individuano due istanti temporali: l'istante di massimo e di minimo dell'input, individuati rispettivamente con un marker blu e rosso. In questo modo è possibile visualizzare velocemente la contemporaneità della risposta.

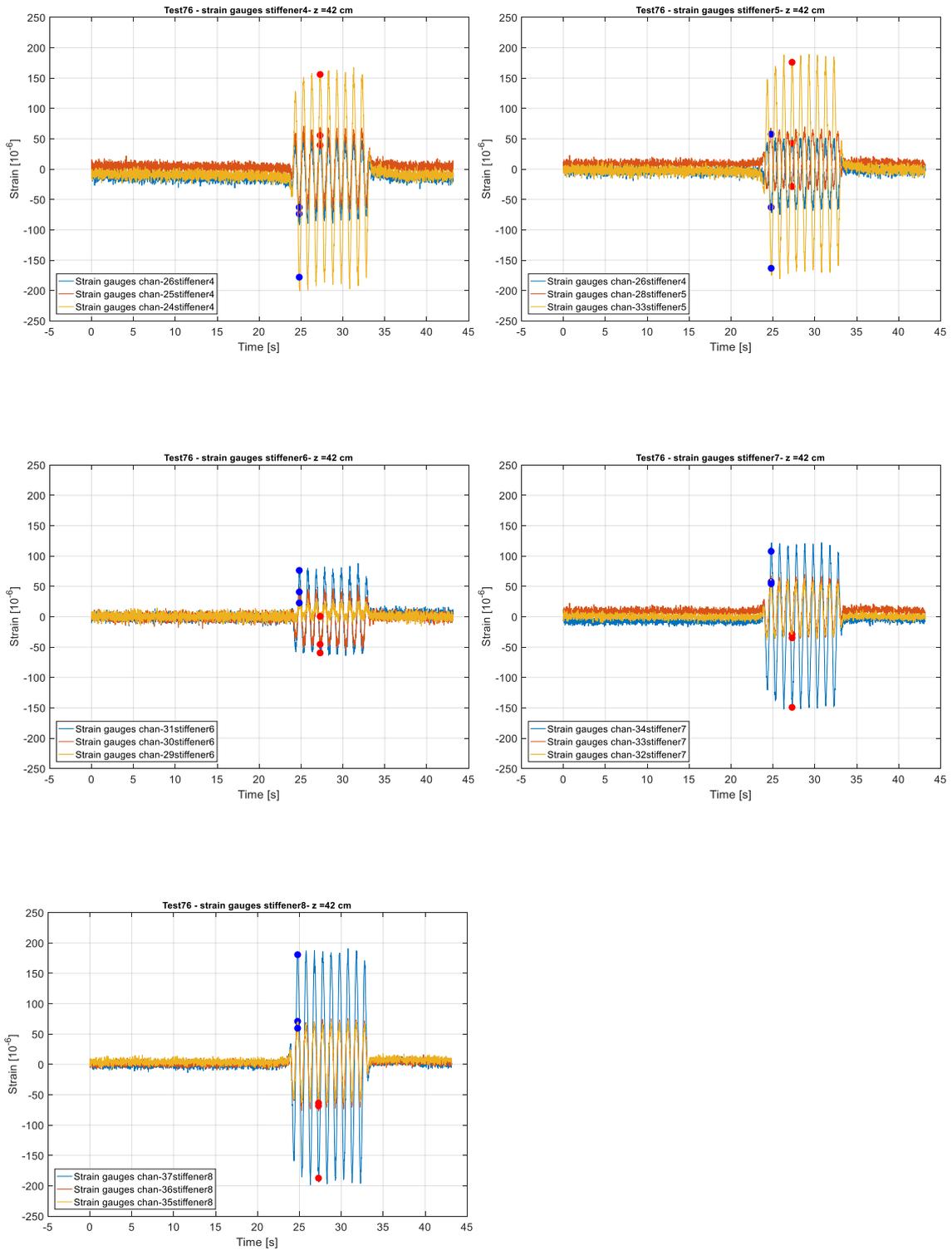
Sinusoidal input 1 Hz pre-compaction 0.5 g: Test 76

Celle di pressione

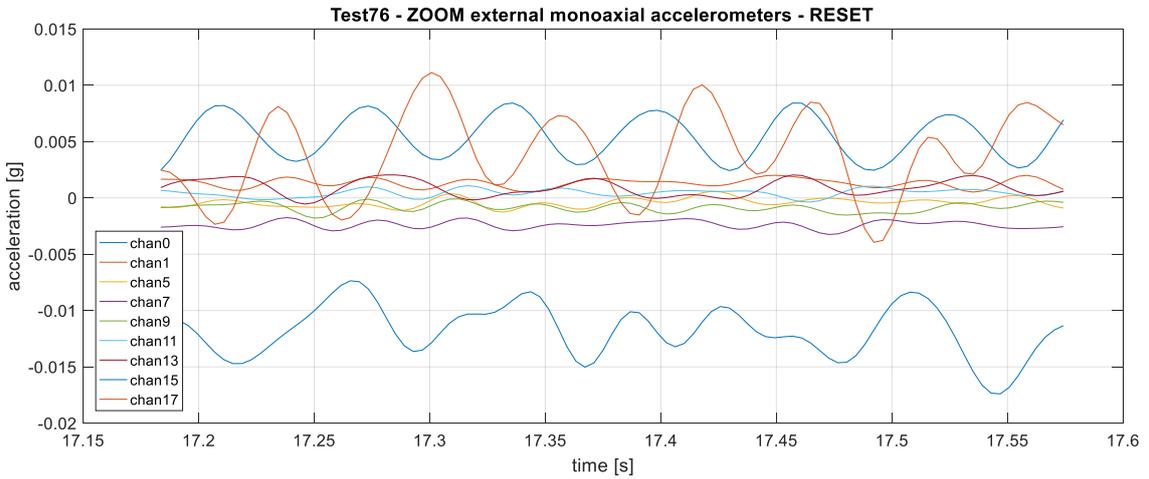
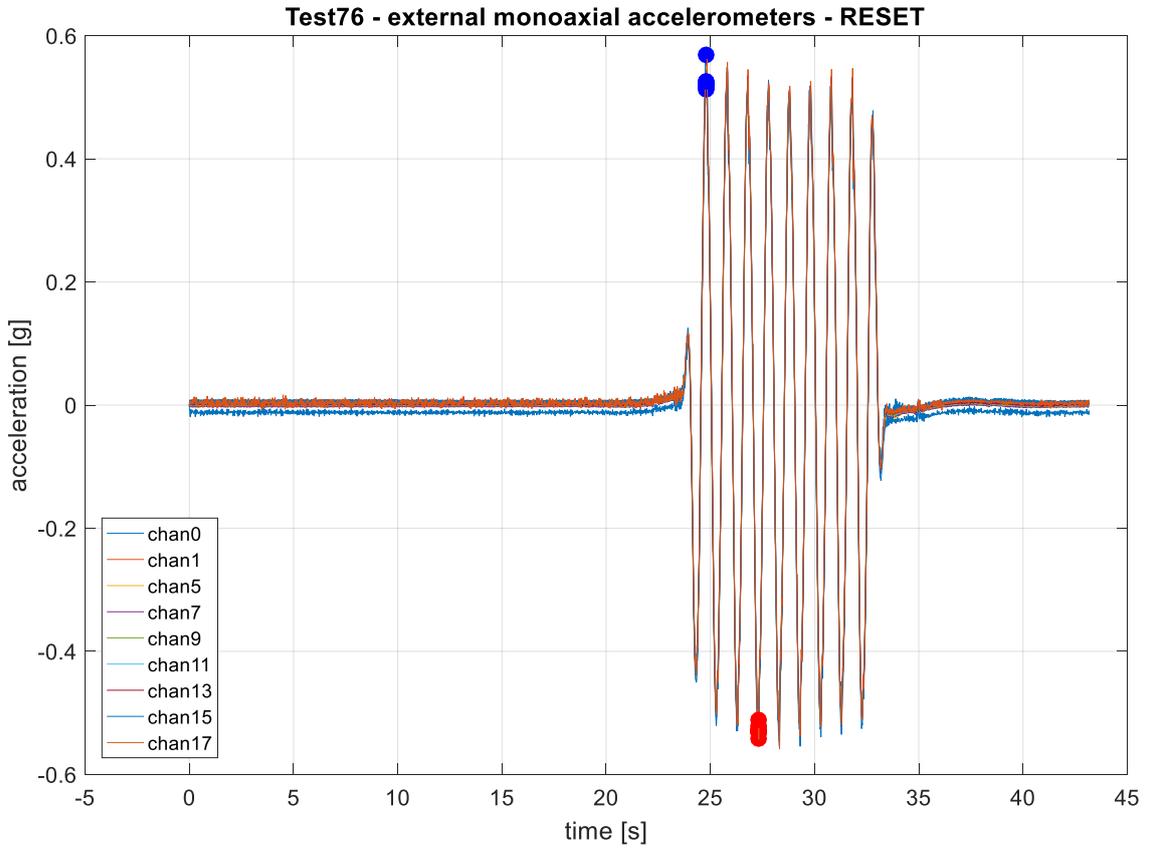


## 8. Quadro globale della risposta del sistema silo - grano

### Estensimetri a quota $Z = 42$ cm

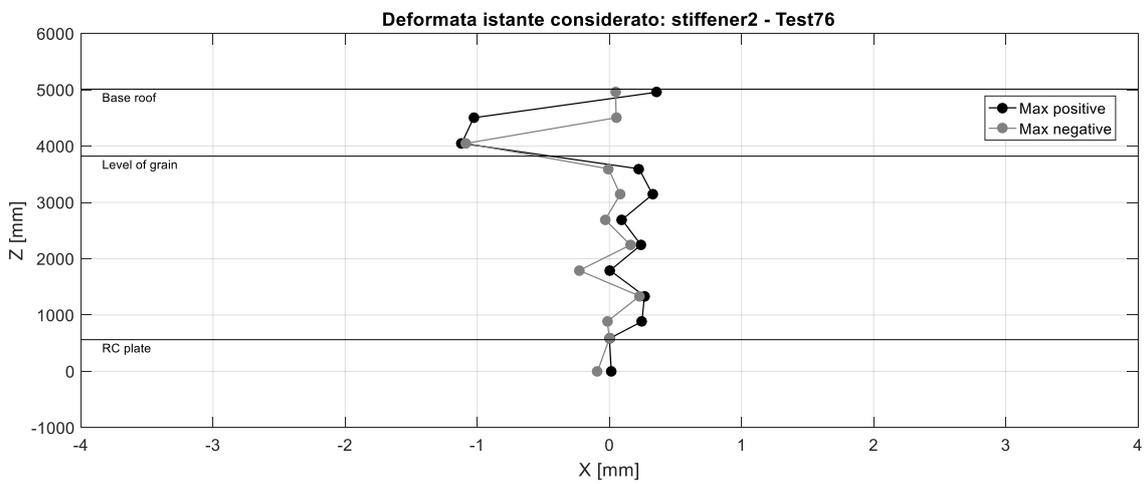
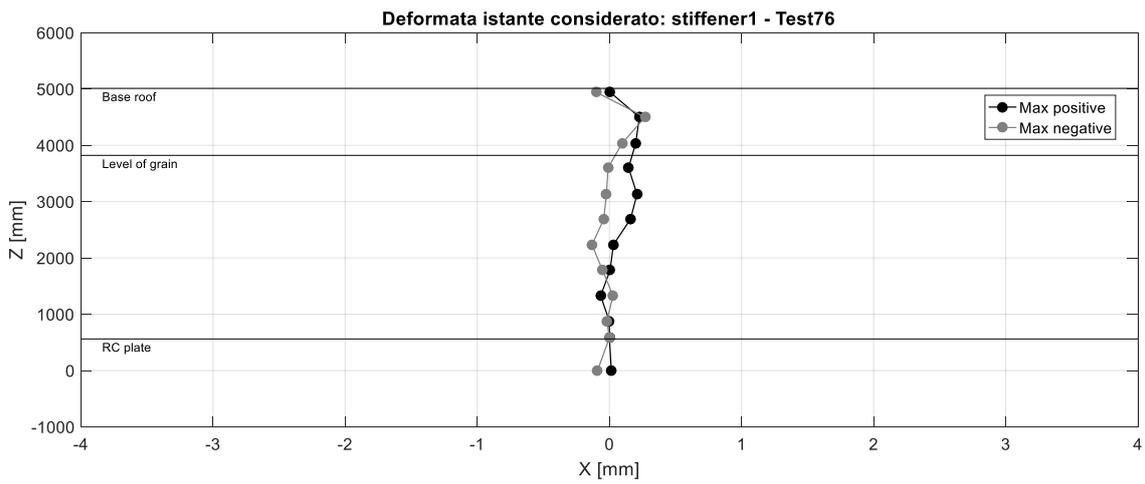
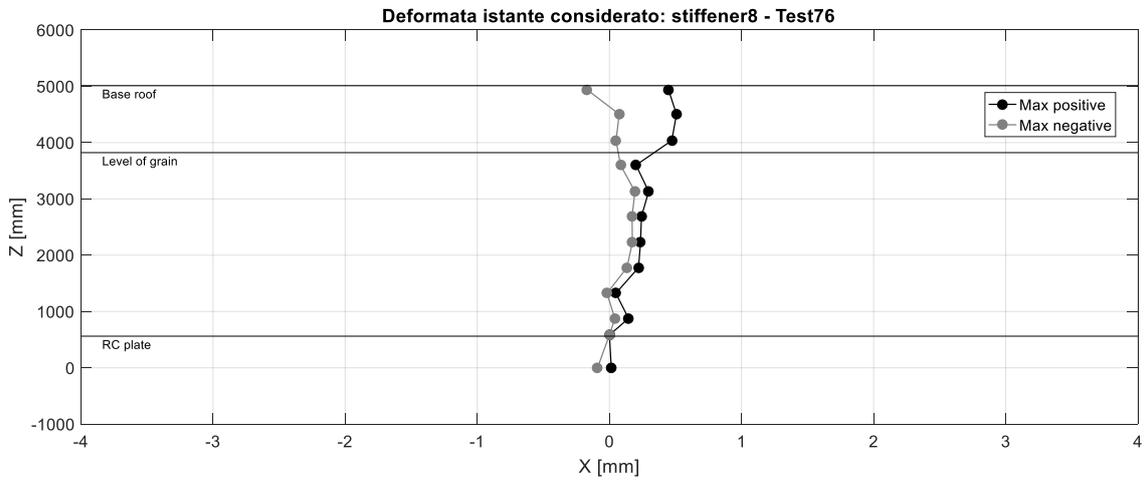


Accelerometri



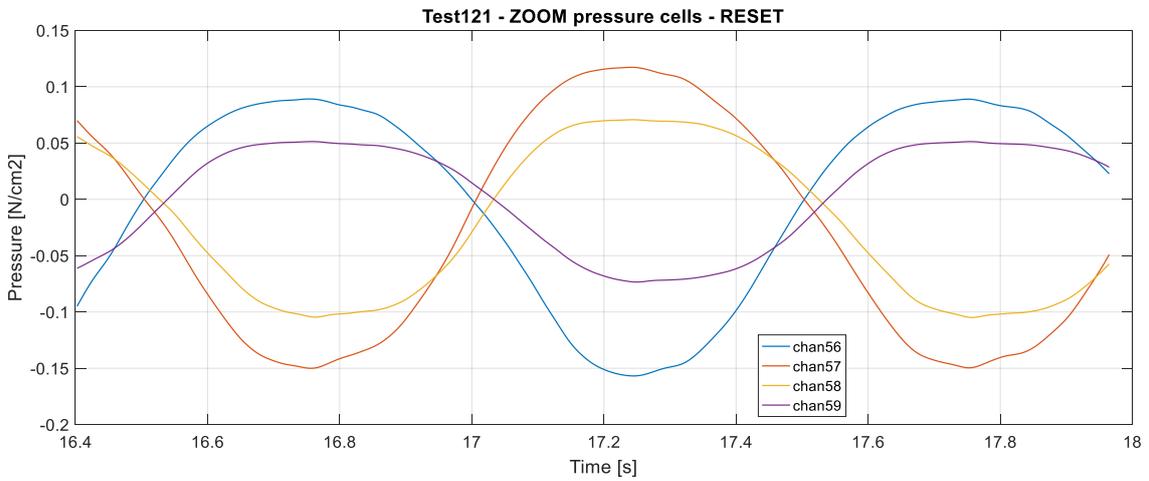
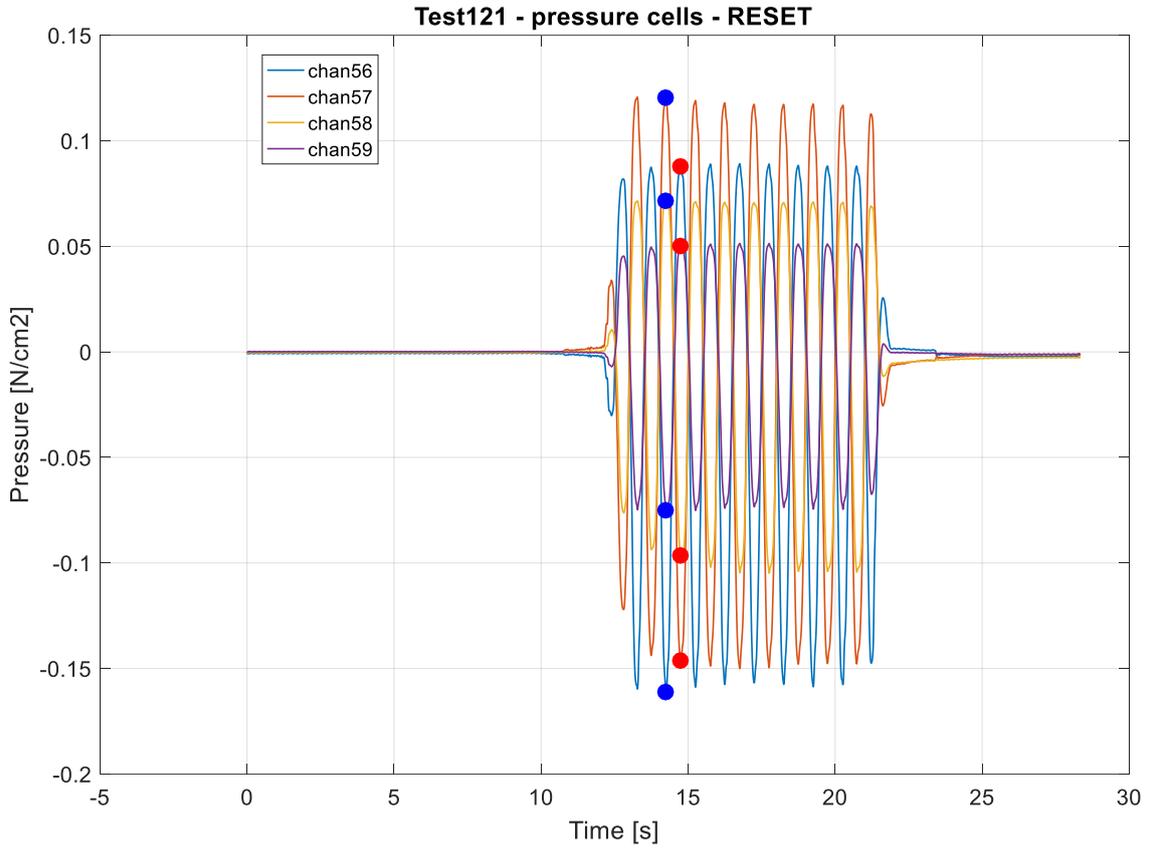
## 8. Quadro globale della risposta del sistema silo - grano

### Markers



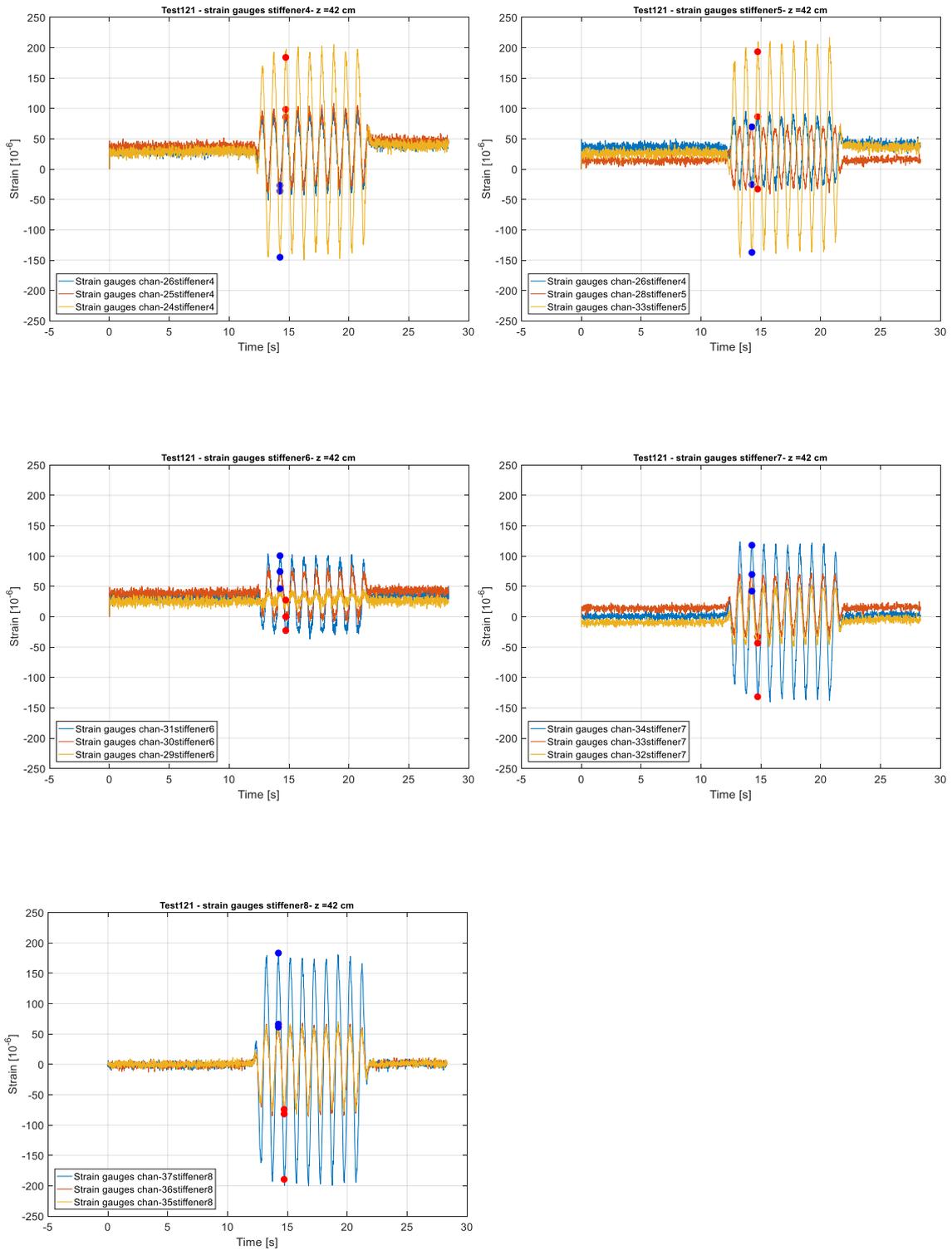
Sinusoidal input 1 Hz post-compaction 0.5 g: Test 121

Celle di pressione

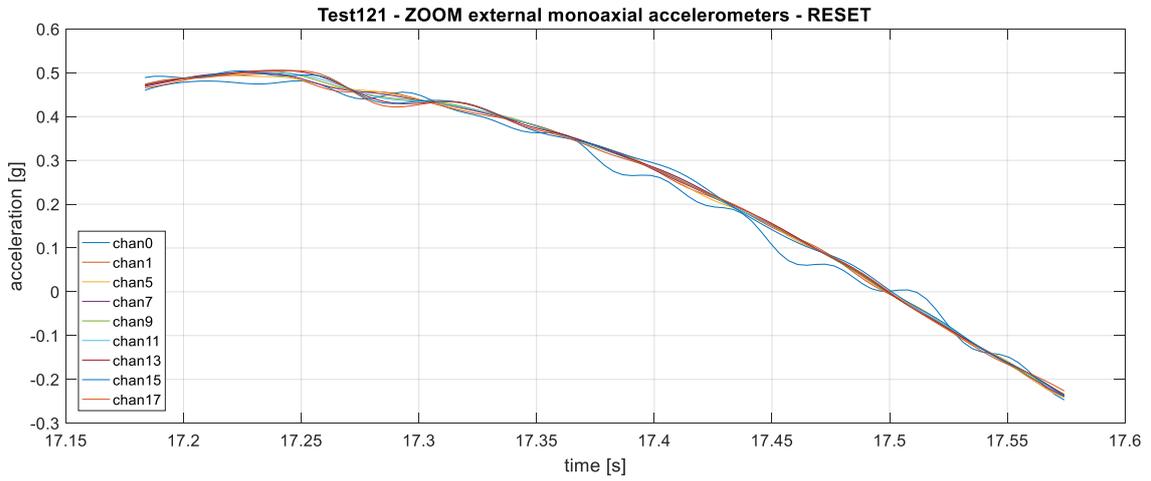
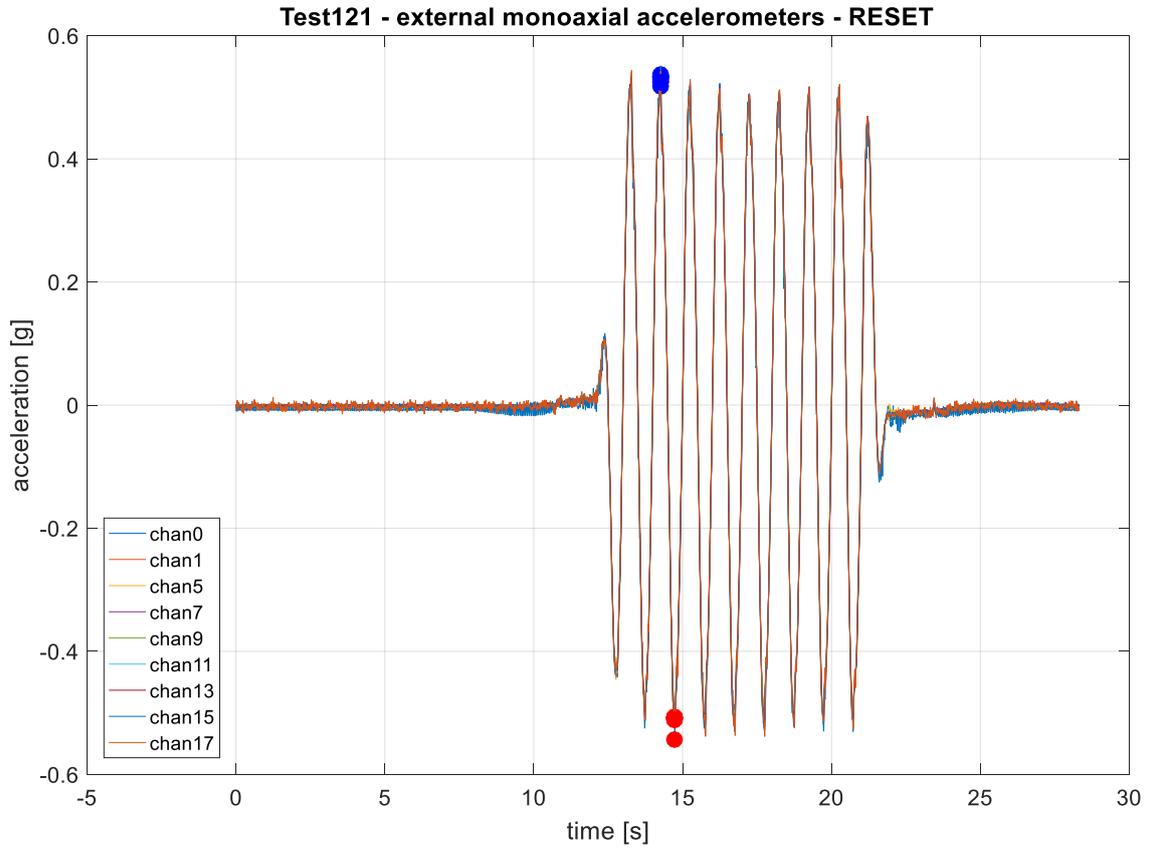


## 8. Quadro globale della risposta del sistema silo - grano

### Estensimetri a quota $Z = 42$ cm

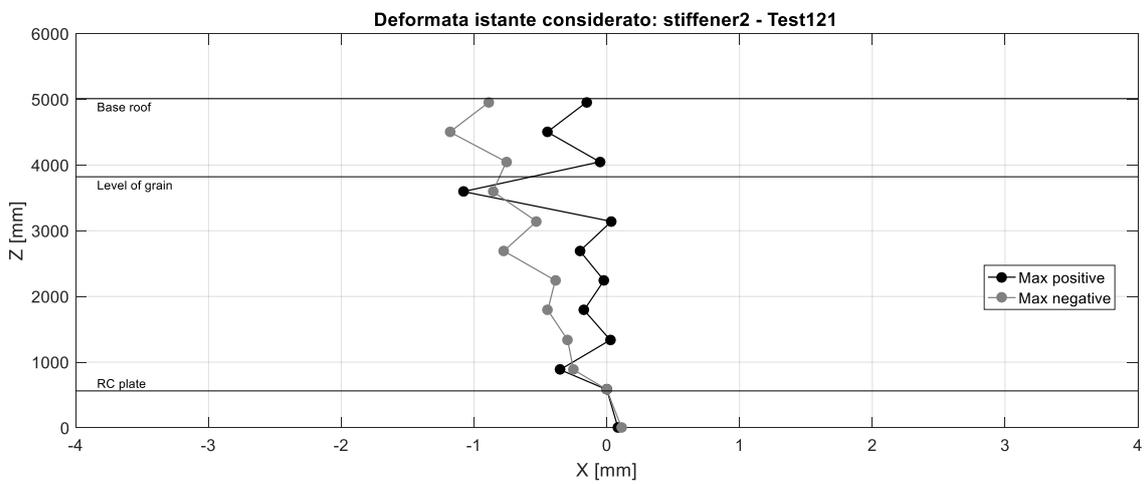
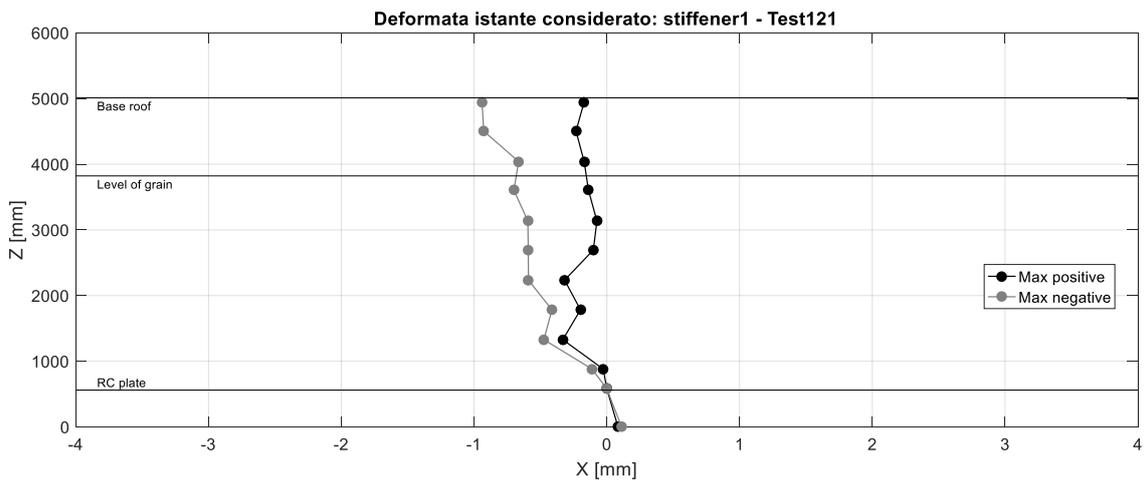
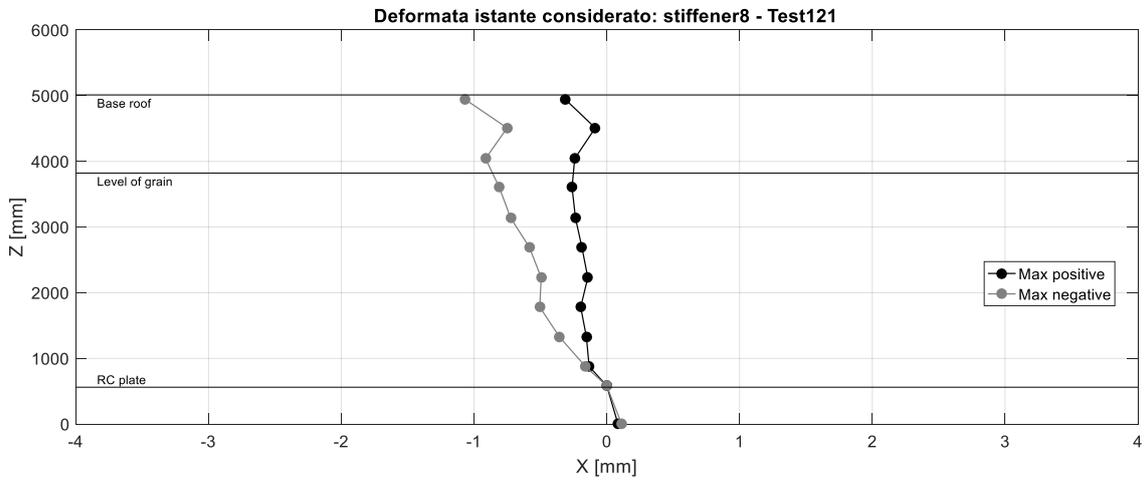


Accelerometri



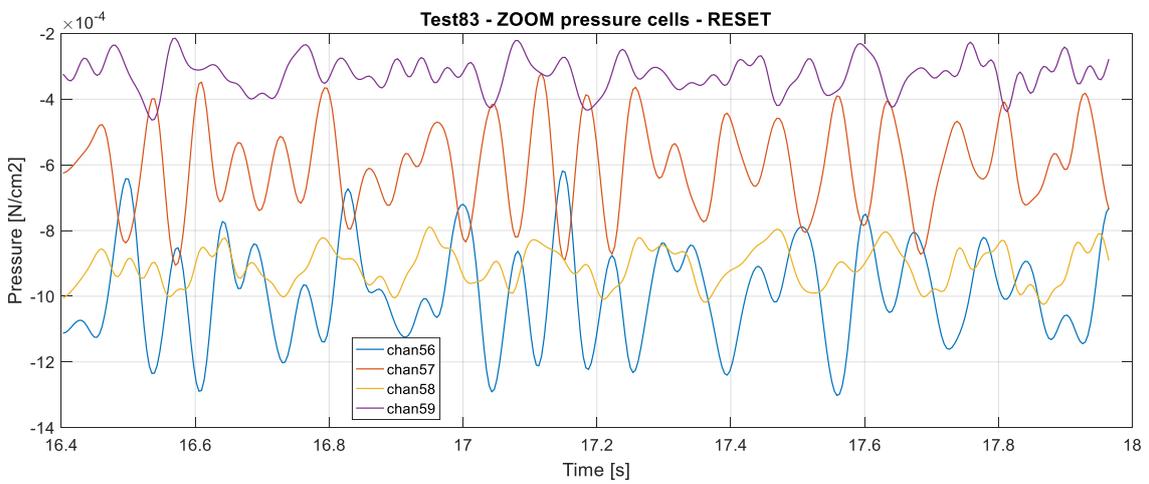
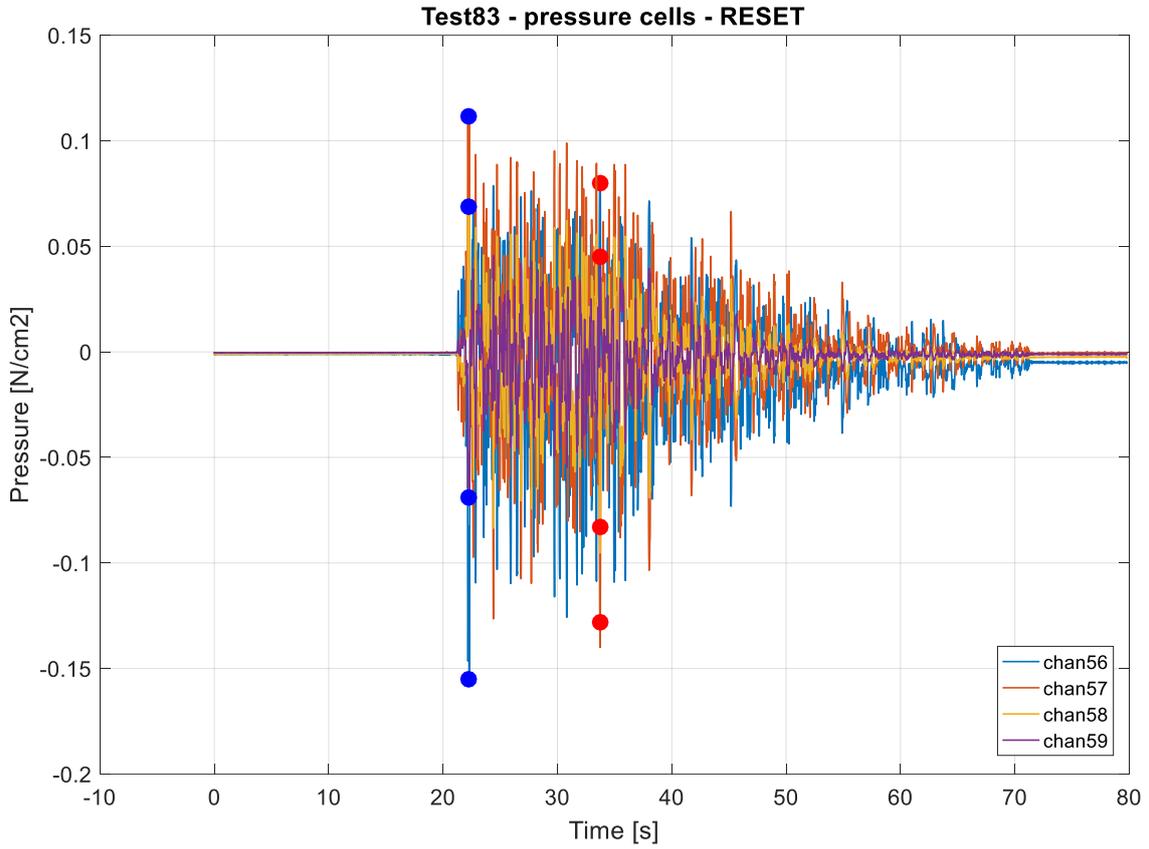
## 8. Quadro globale della risposta del sistema silo - grano

### Markers



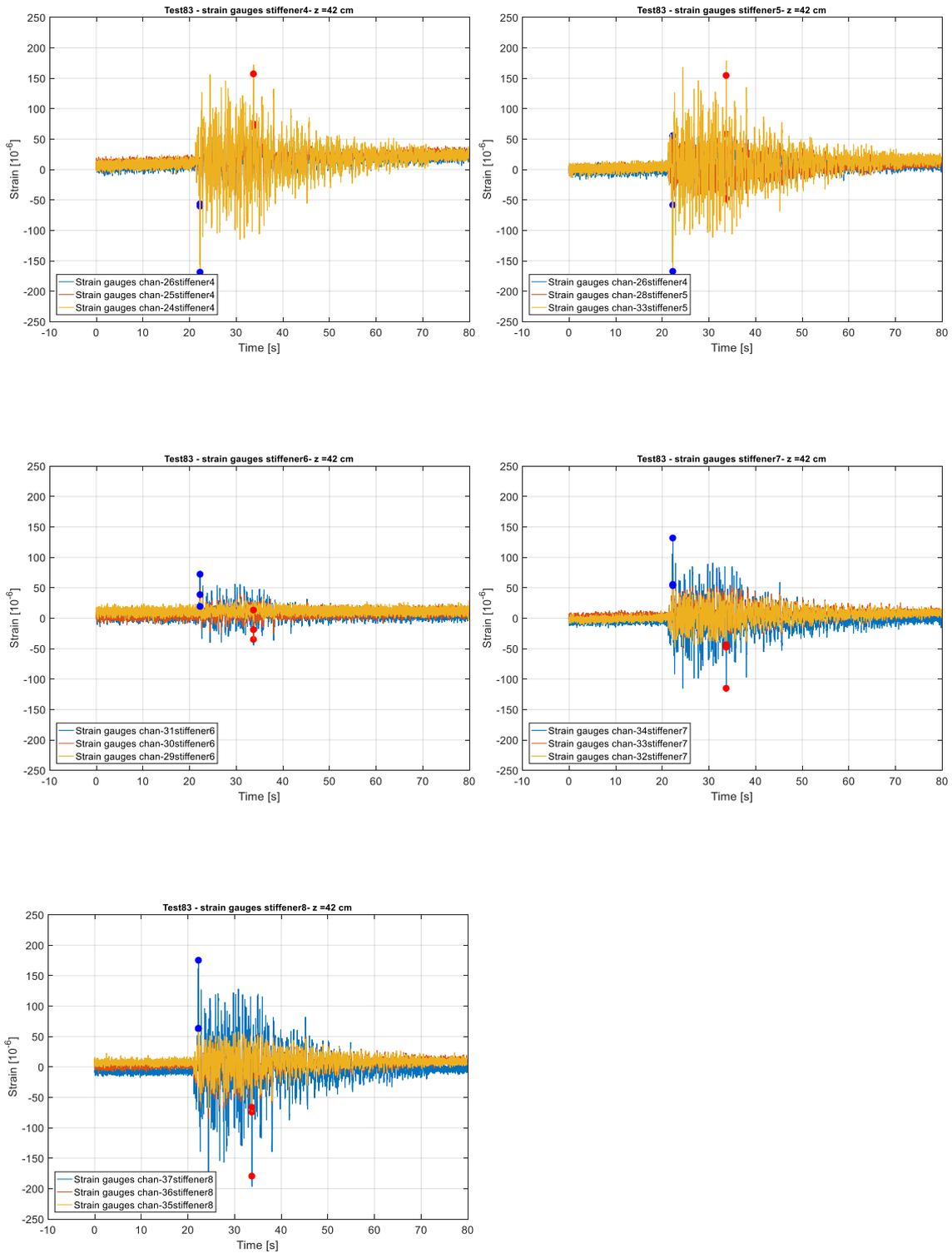
Earthquake input A1 0.5 g: Test 83

Celle di pressione

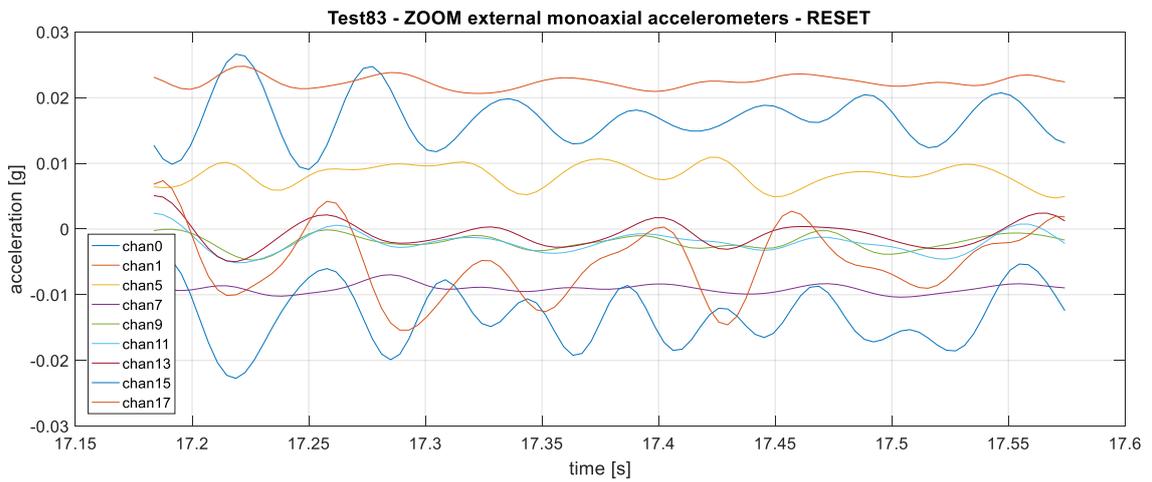
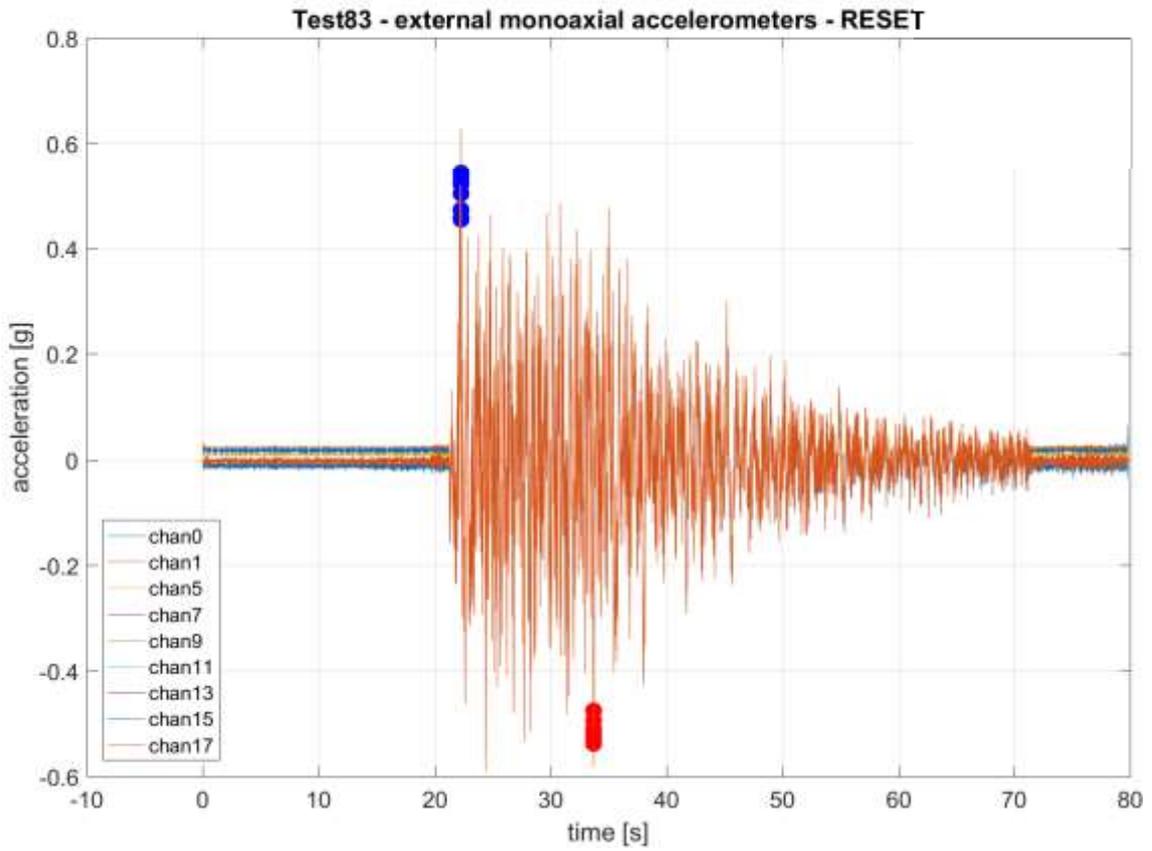


## 8. Quadro globale della risposta del sistema silo - grano

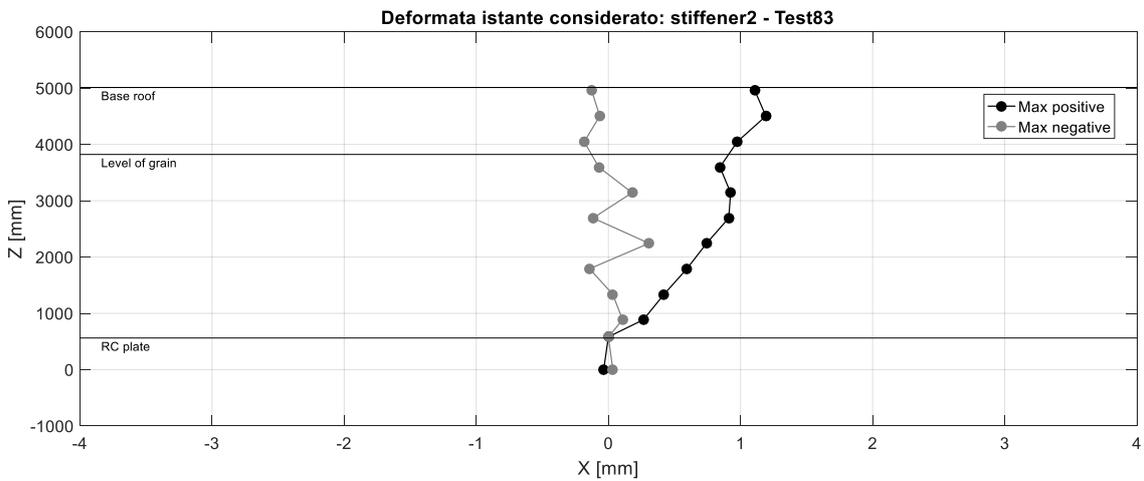
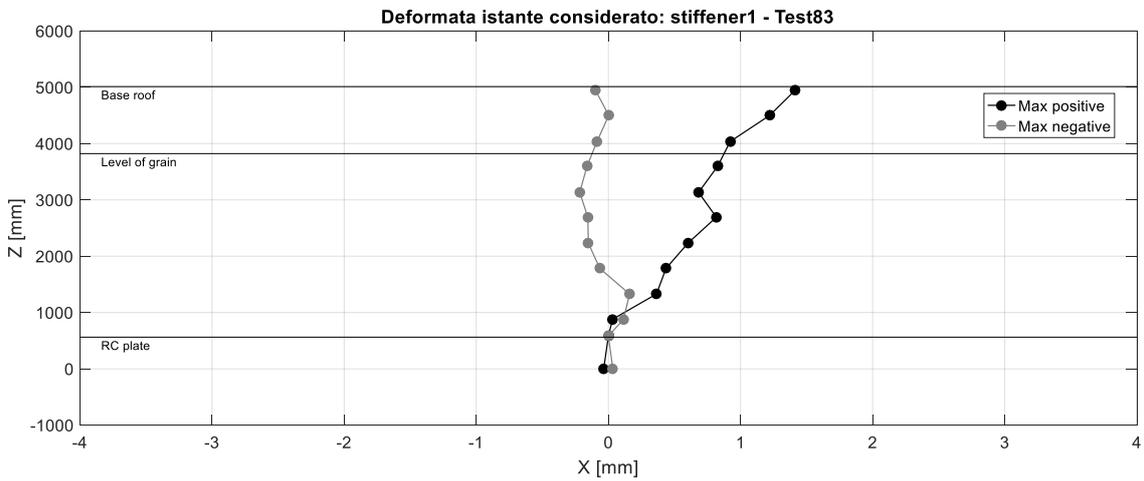
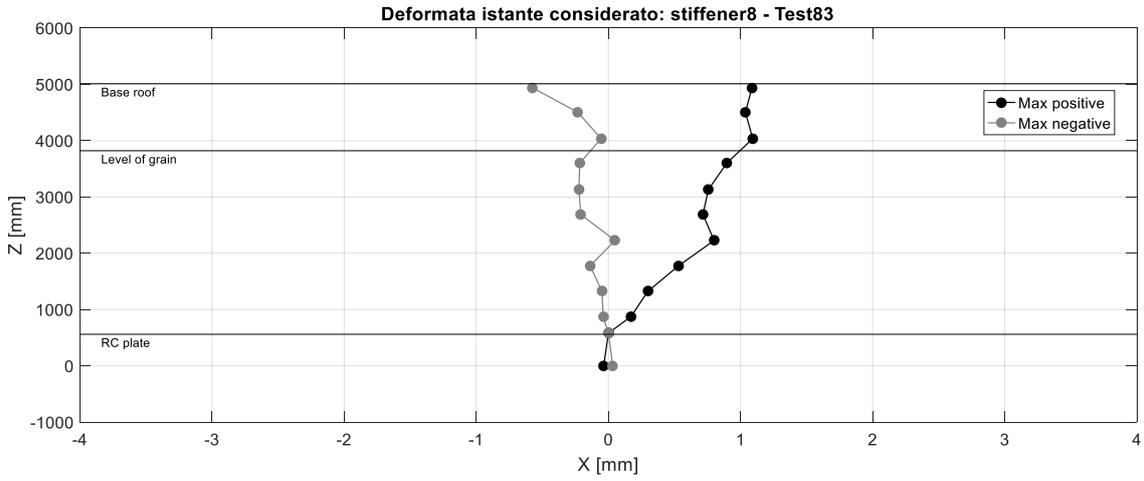
### Estensimetri a quota $Z = 42$ cm



Accelerometri

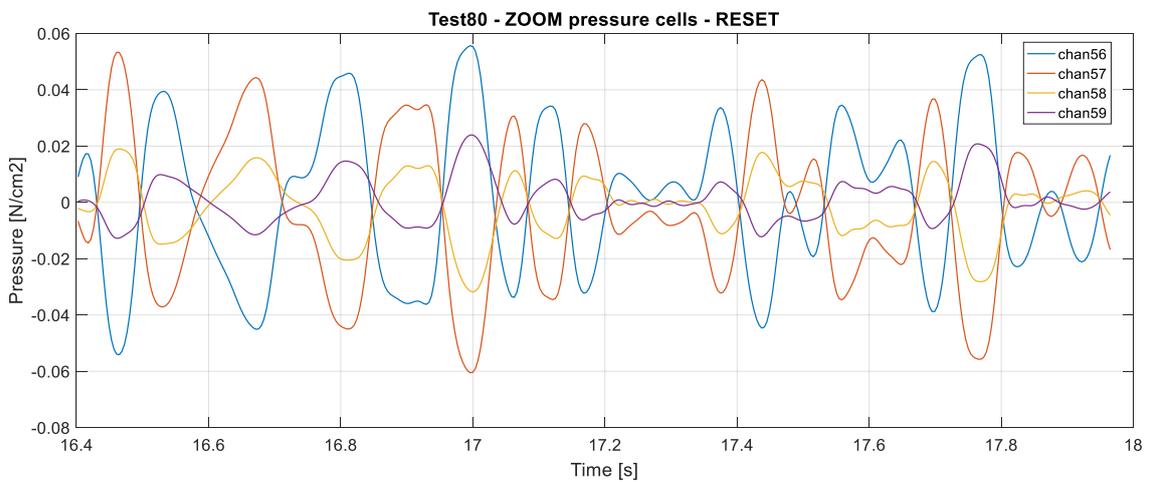
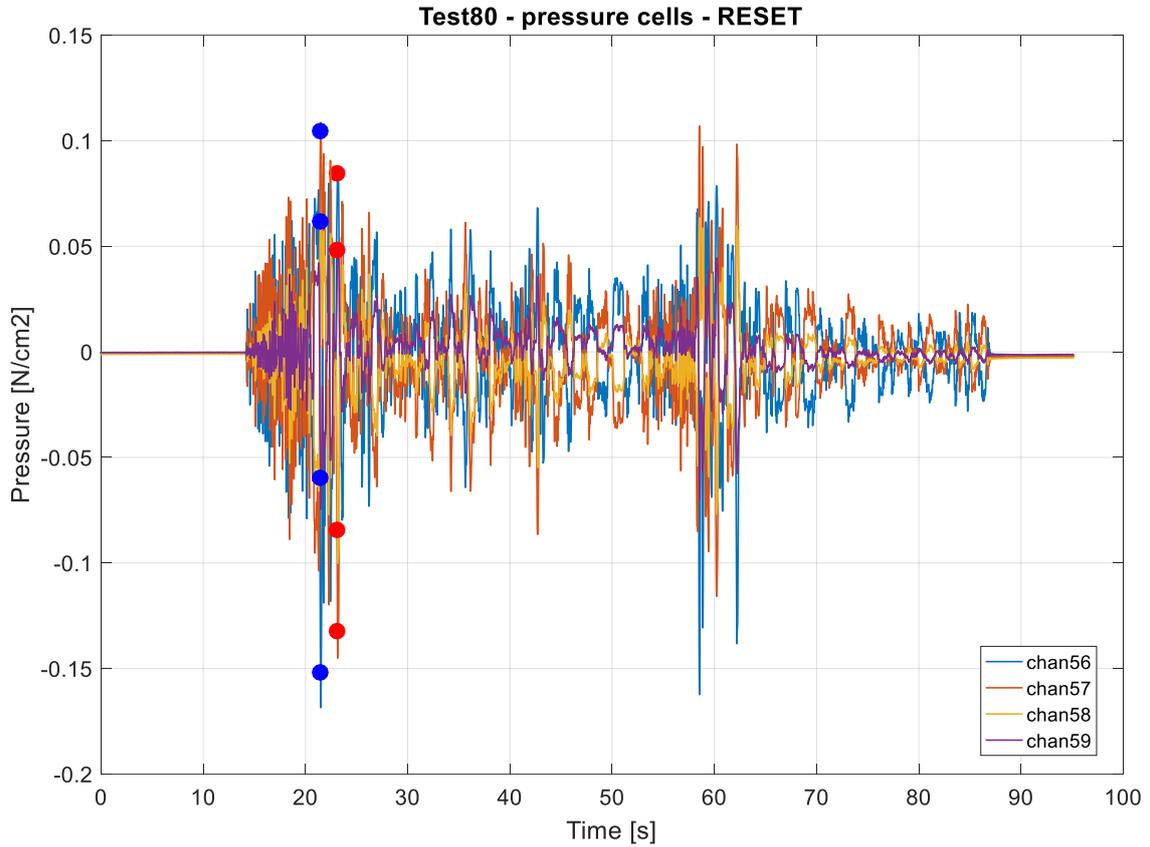


Markers



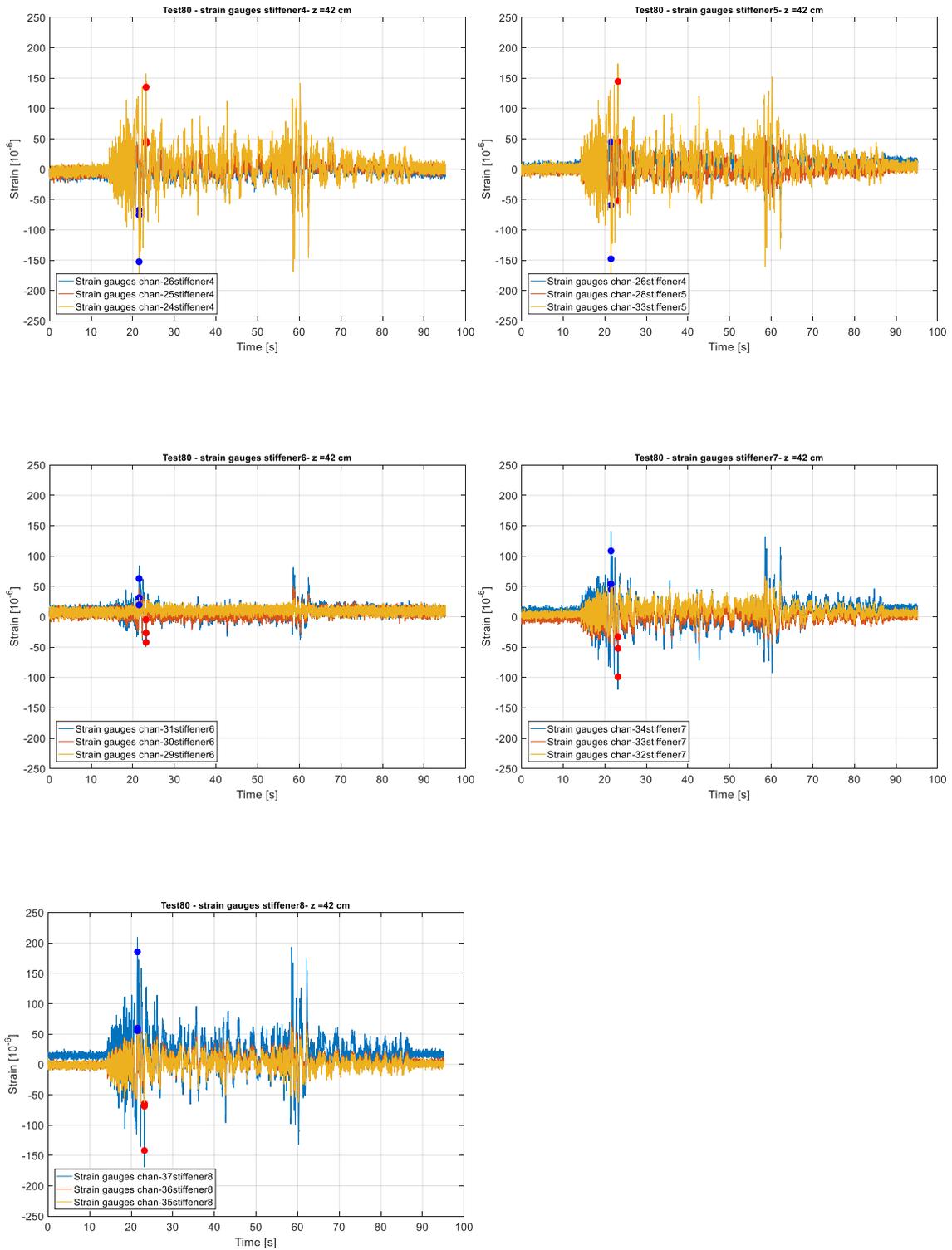
Earthquake input RS1 0.5 g: Test 80

Celle di pressione

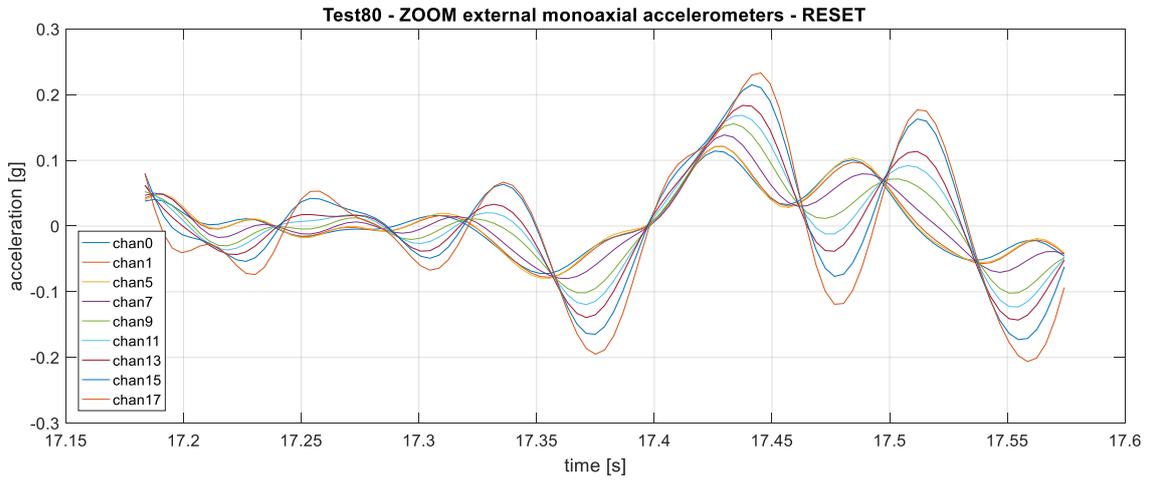
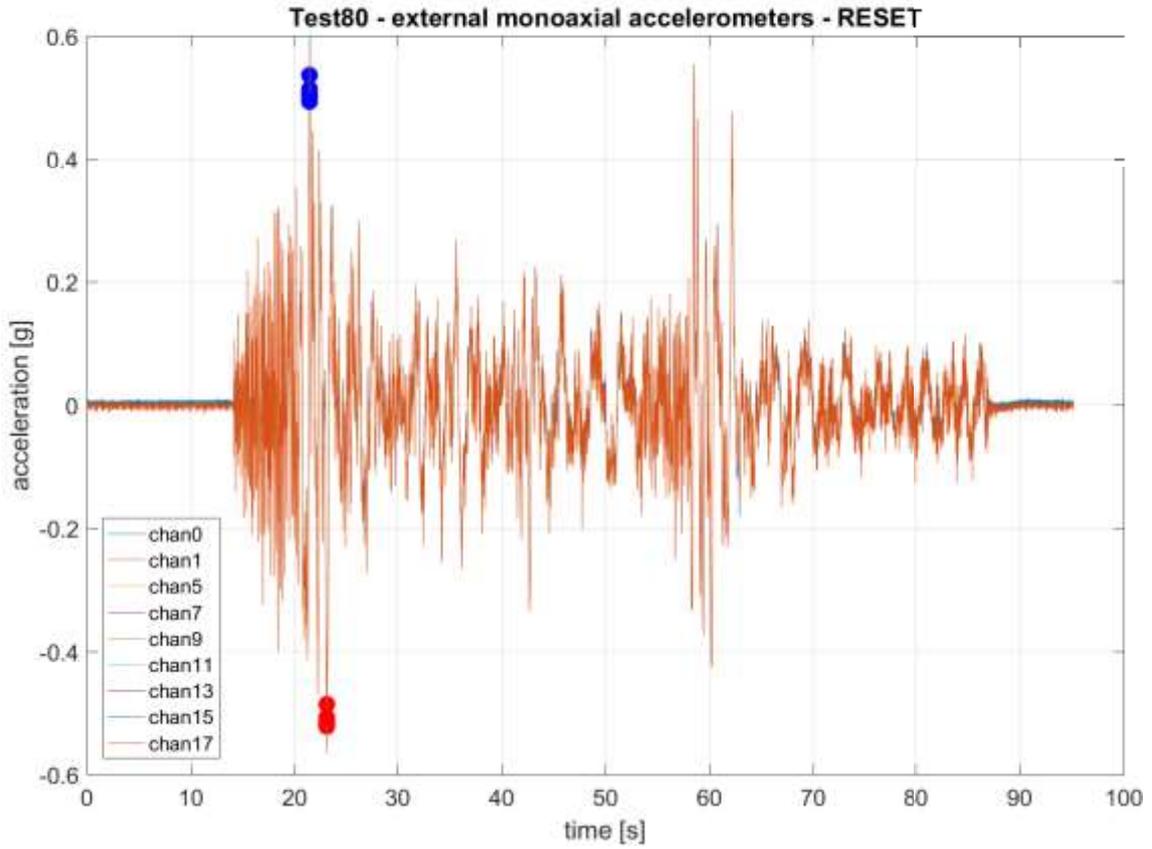


## 8. Quadro globale della risposta del sistema silo - grano

### Estensimetri a quota Z = 42 cm

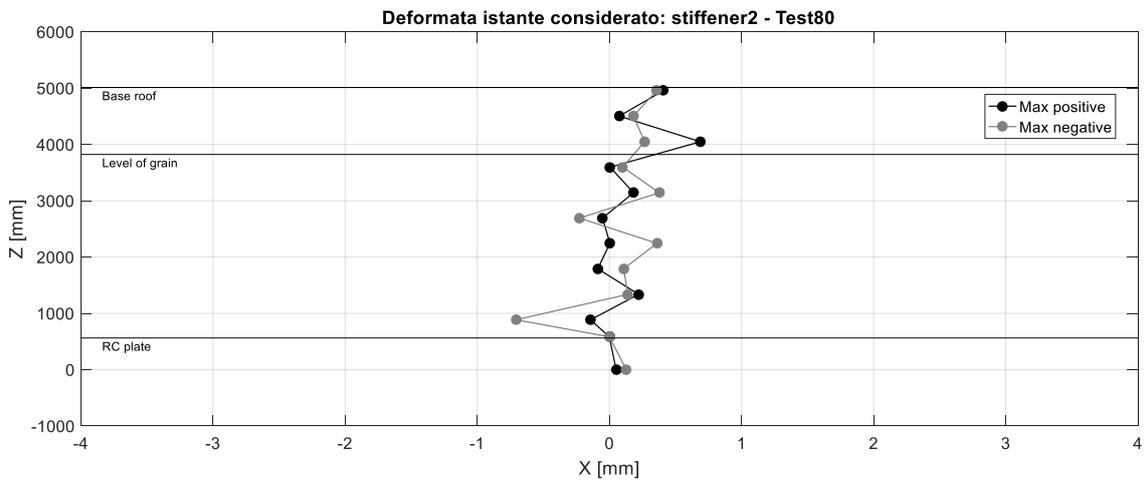
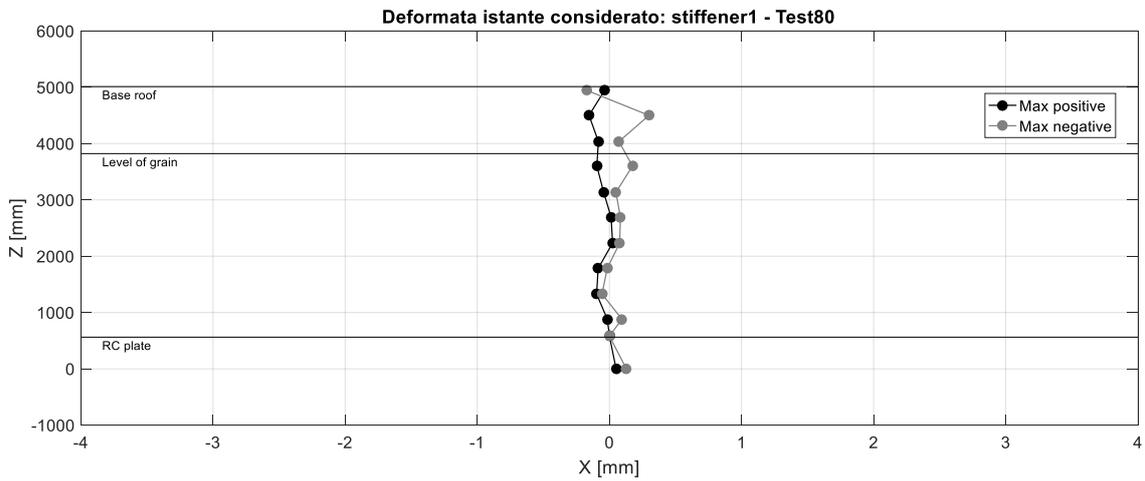
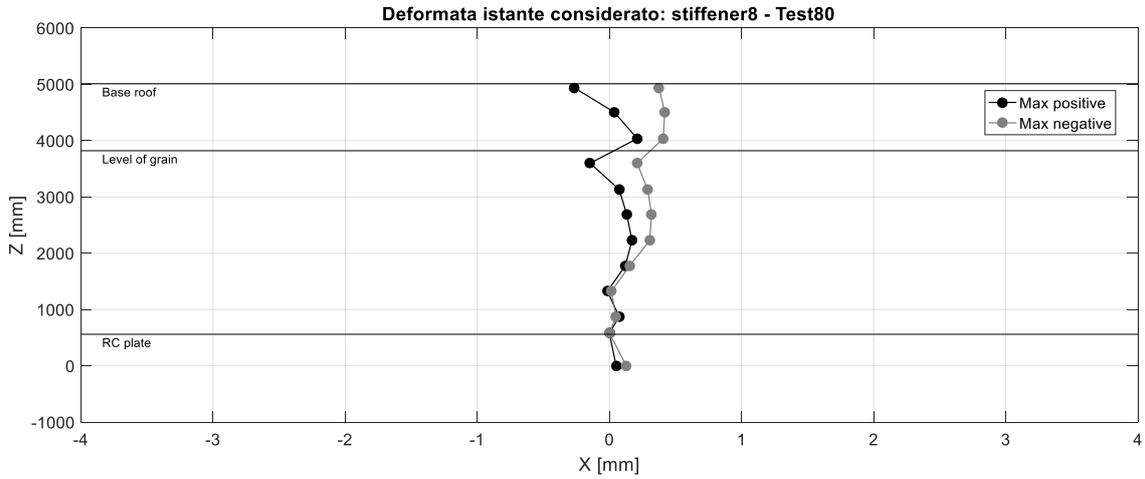


Accelerometri



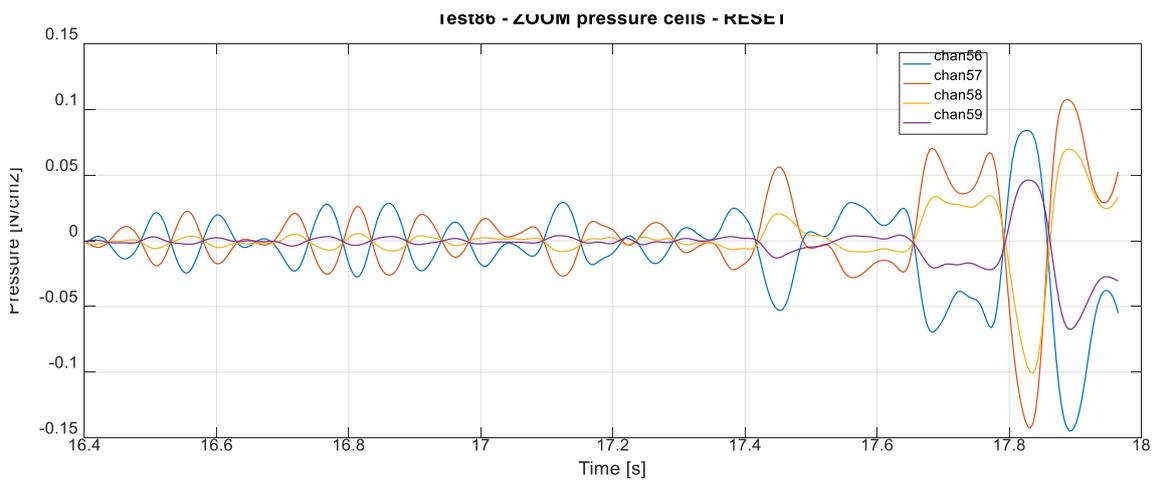
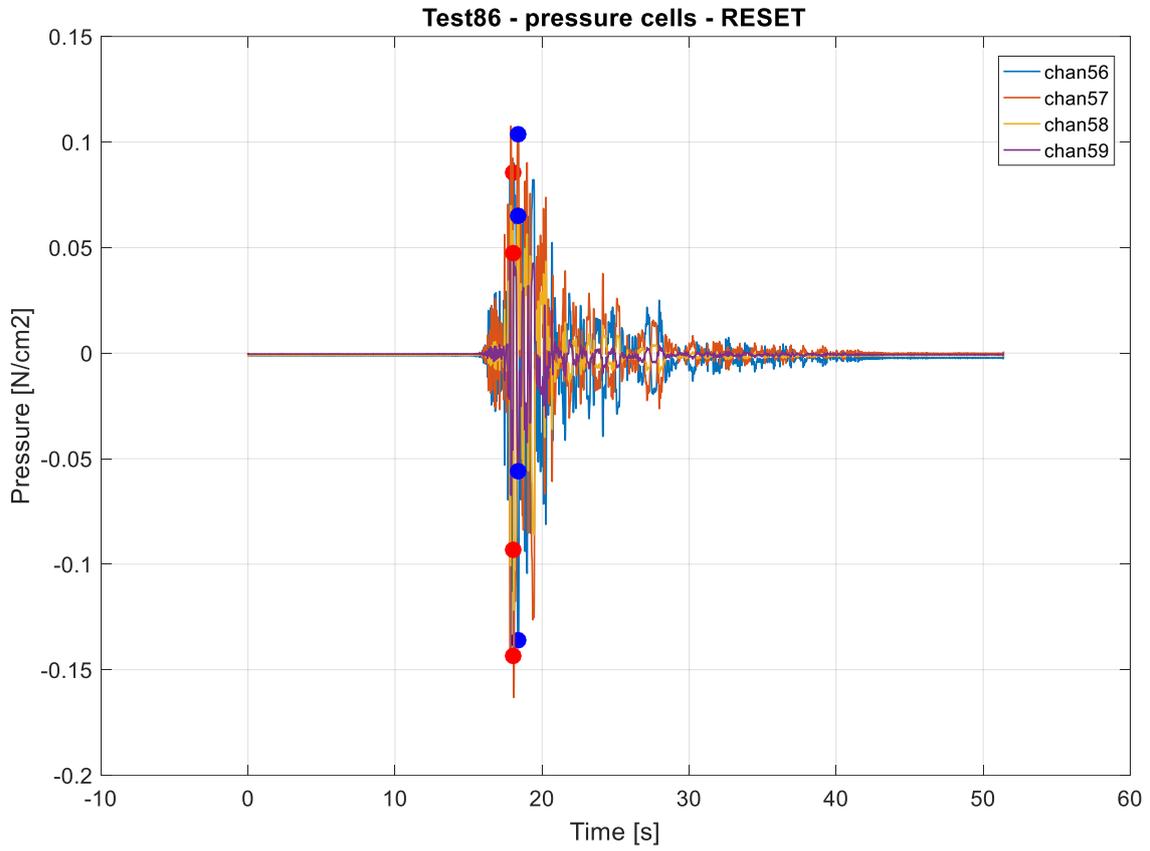
## 8. Quadro globale della risposta del sistema silo - grano

### Markers



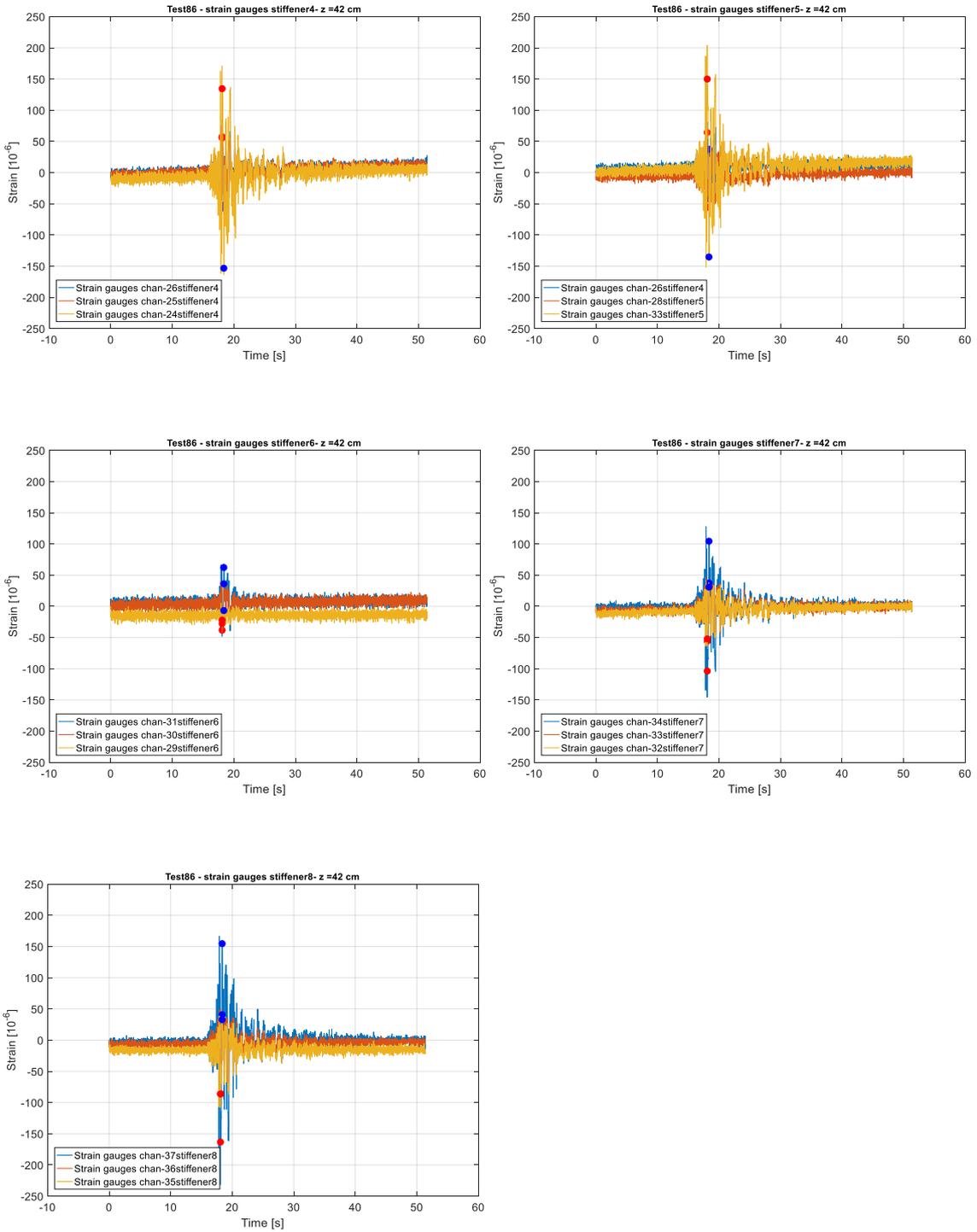
Earthquake input RS3 0.5 g: Test 86

Celle di pressione

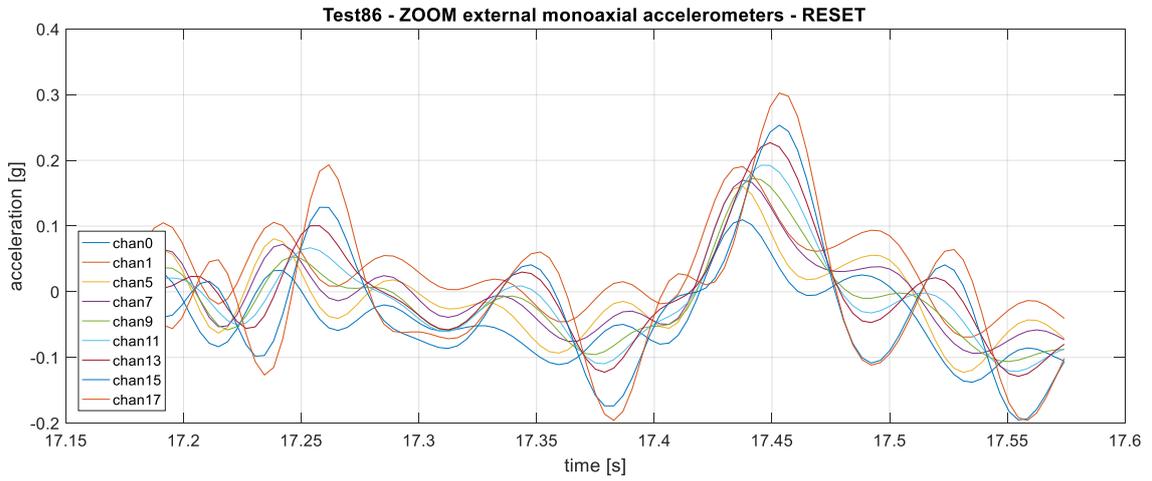
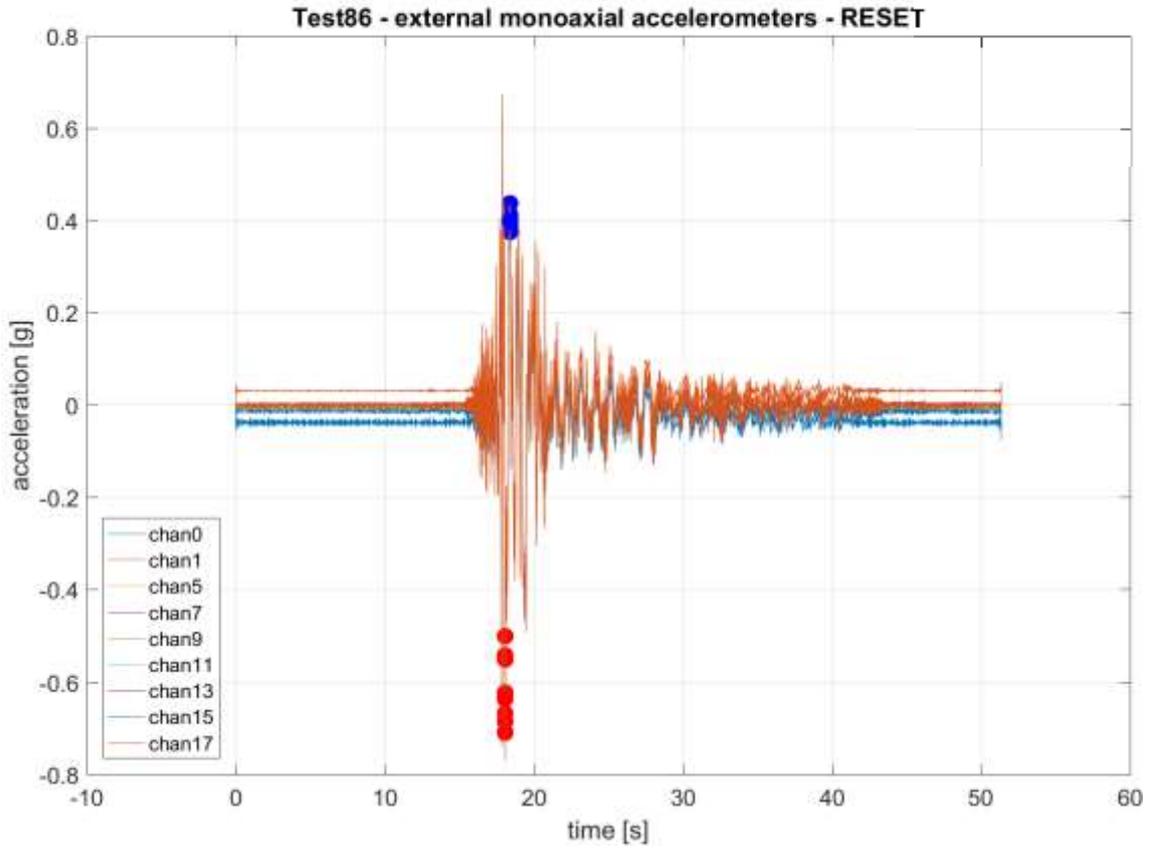


## 8. Quadro globale della risposta del sistema silo - grano

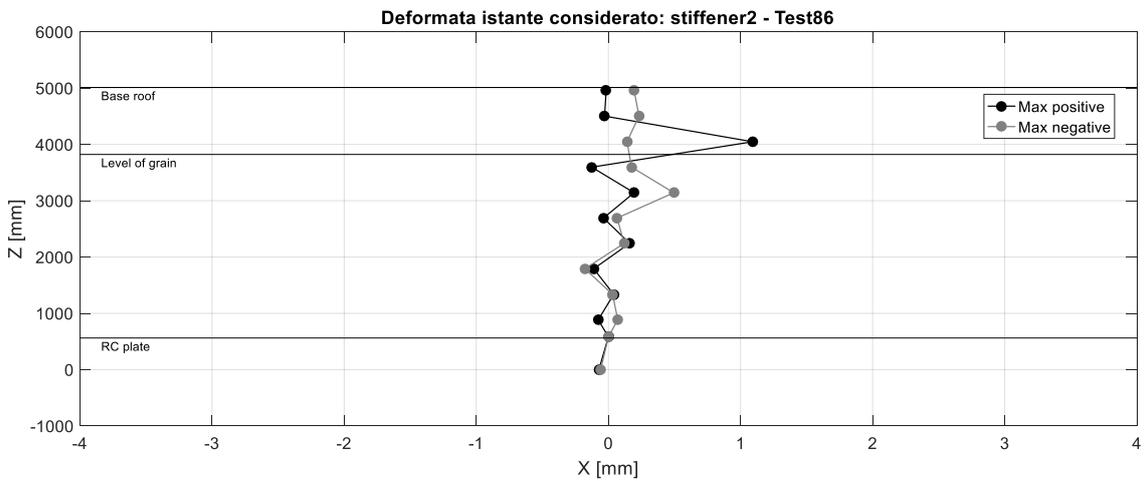
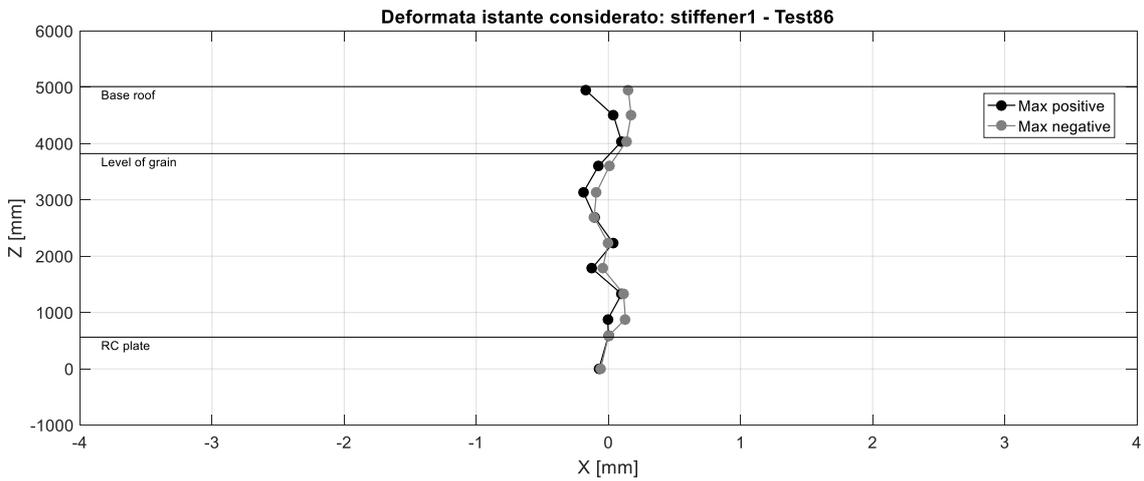
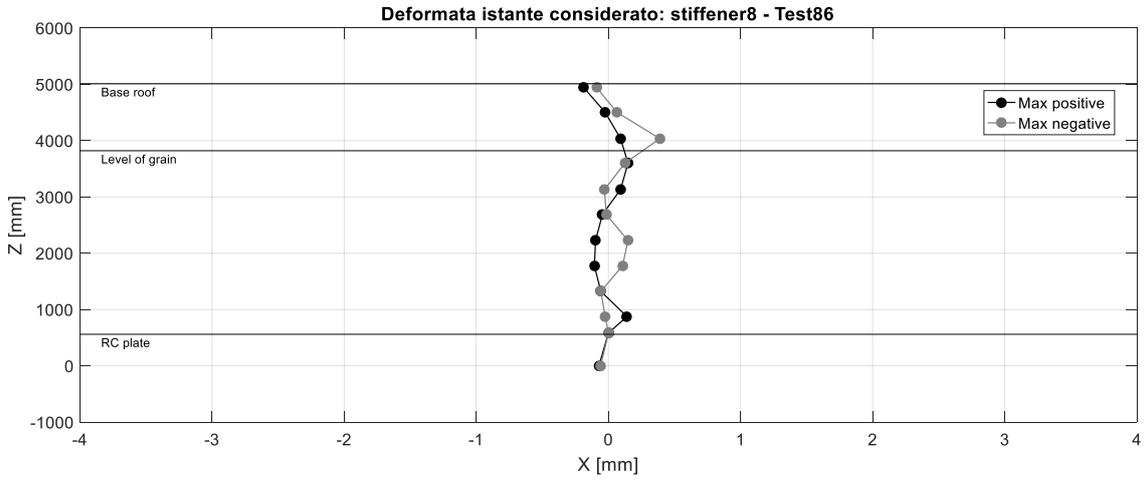
### Estensimetri a quota Z = 42 cm



Accelerometri

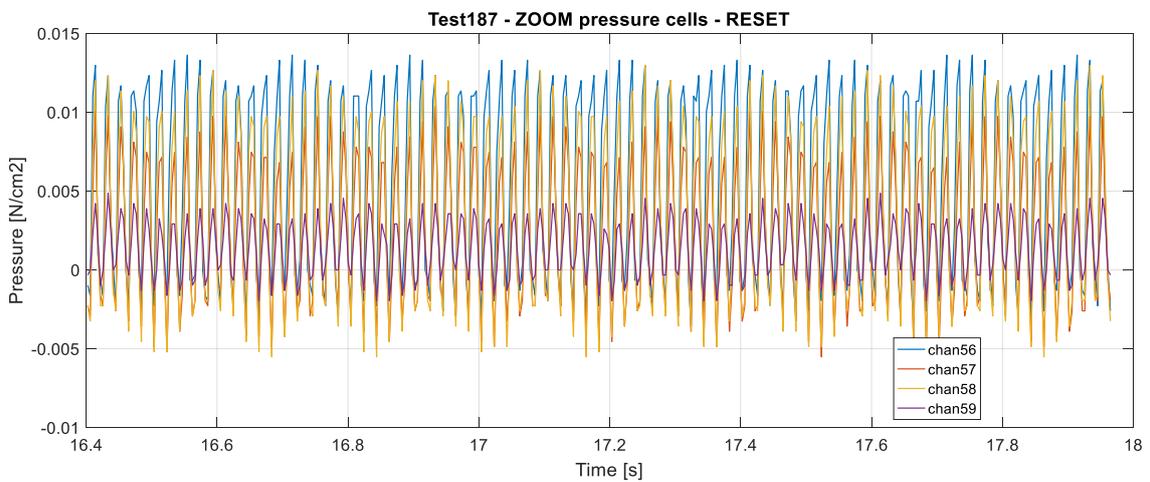
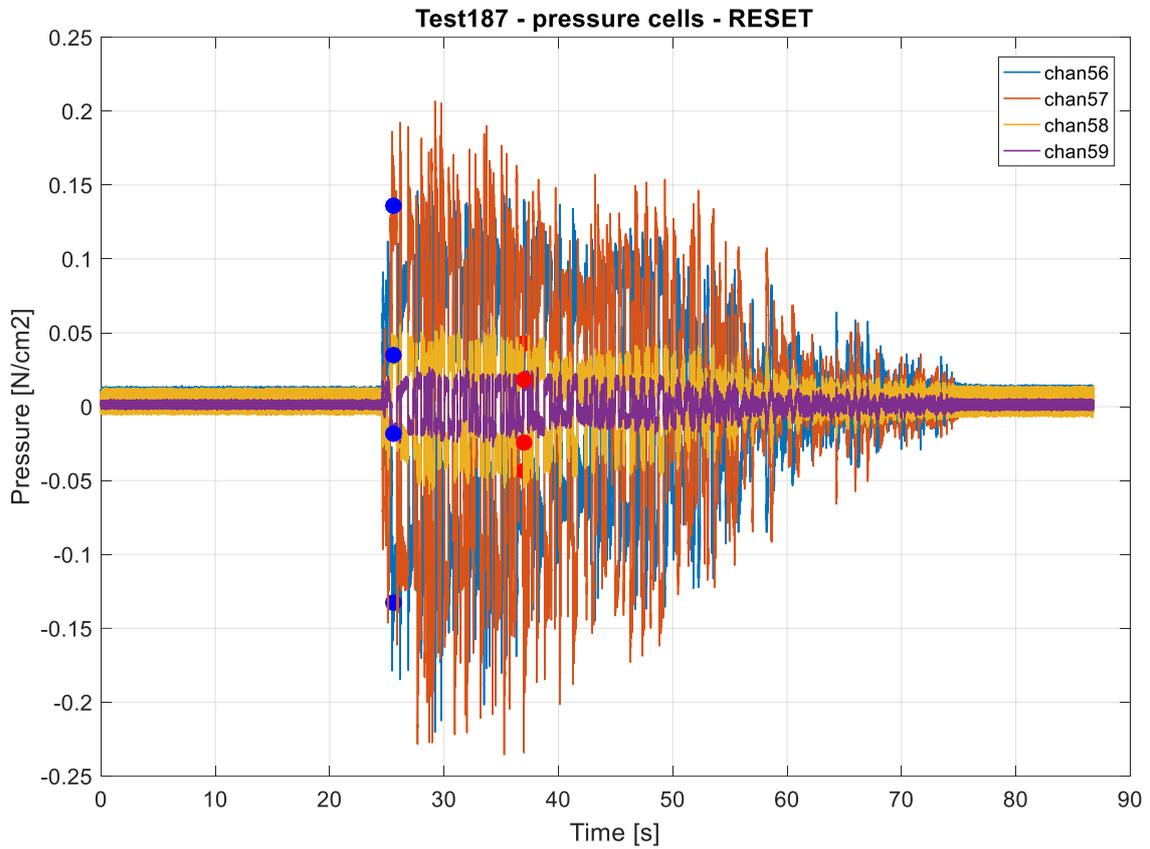


Markers



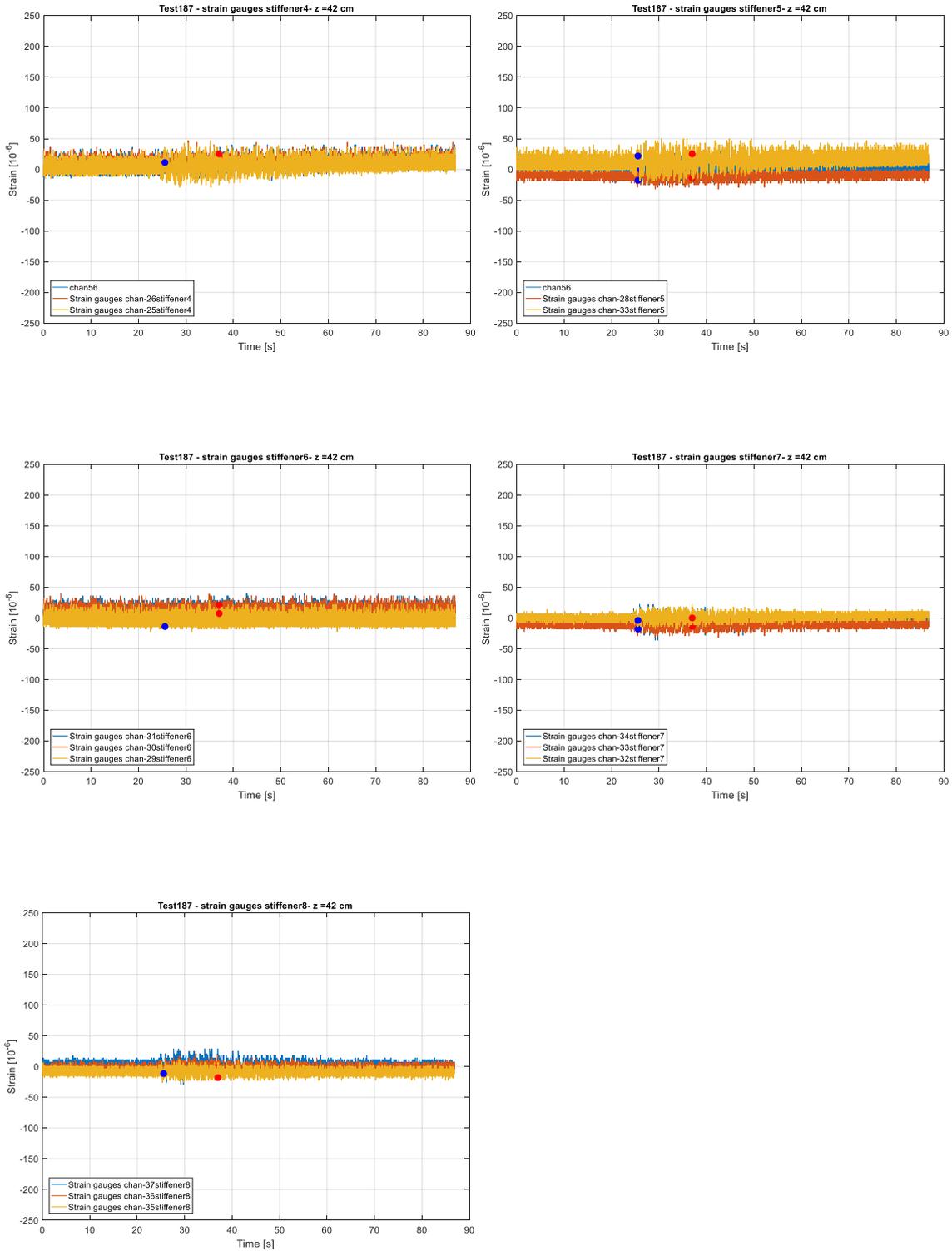
Earthquake input A1 0.3 g: Test 187

Celle di pressione

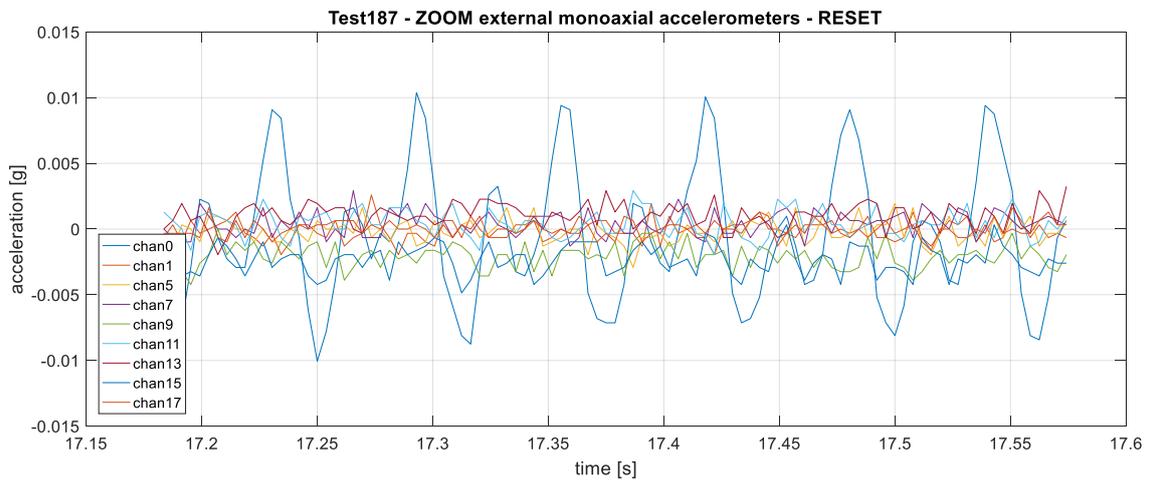
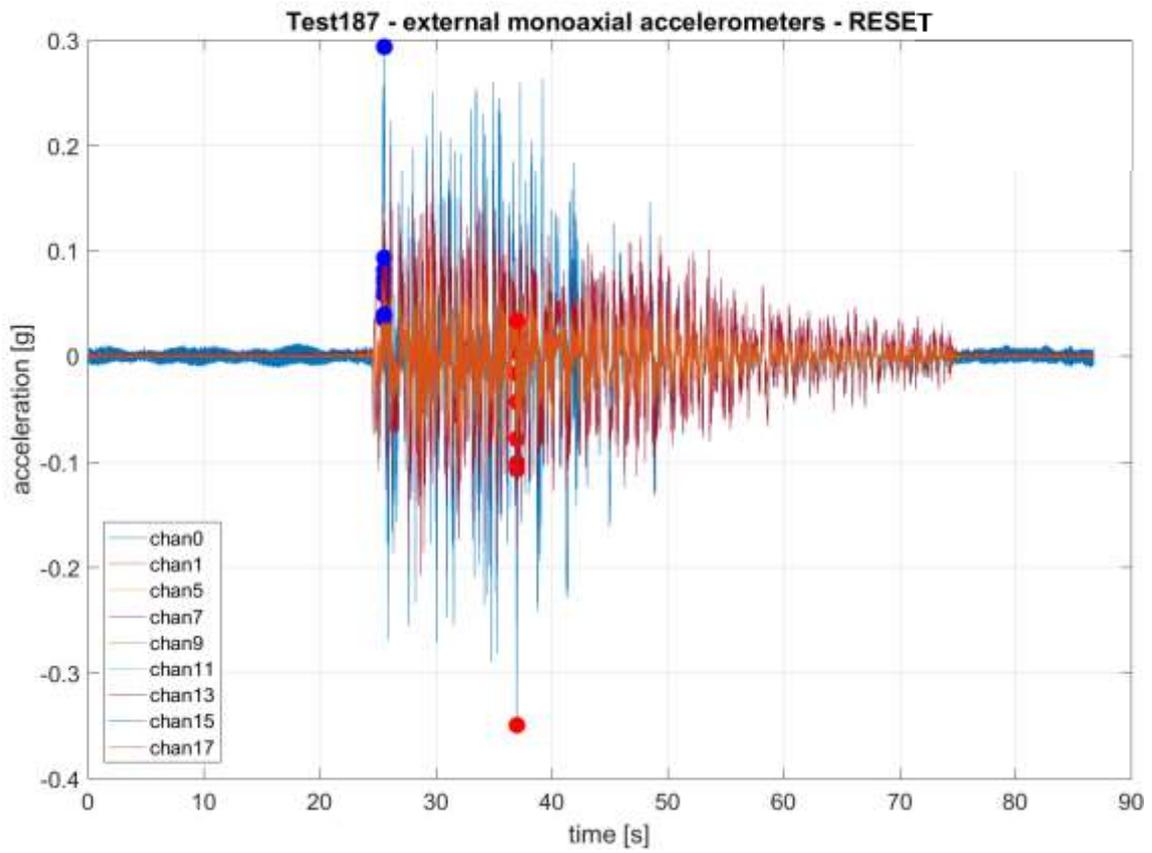


## 8. Quadro globale della risposta del sistema silo - grano

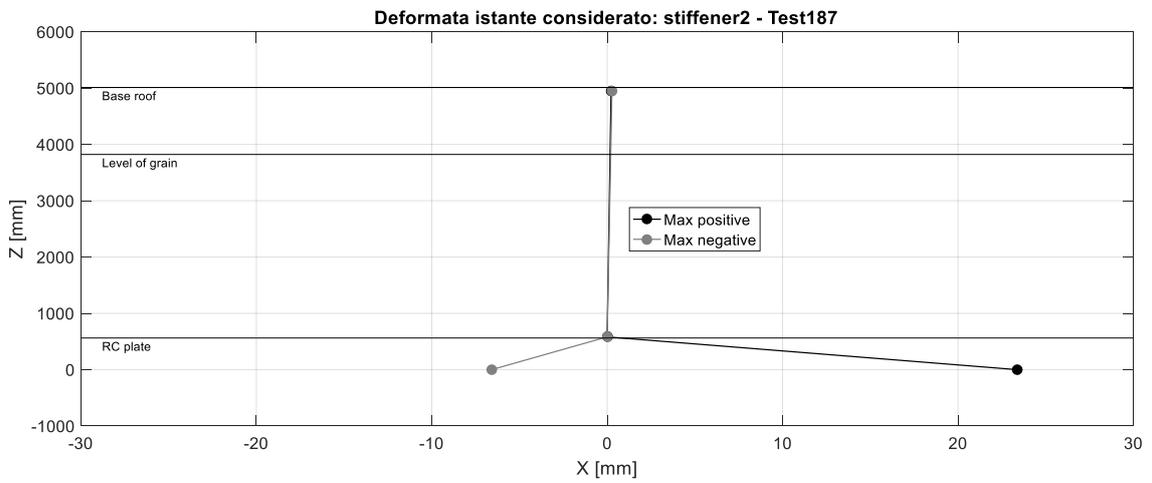
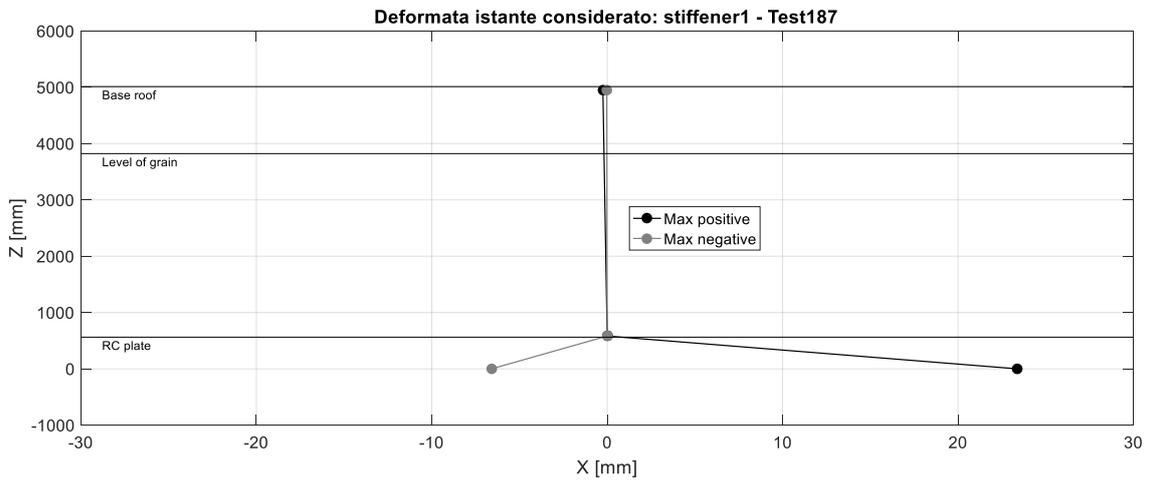
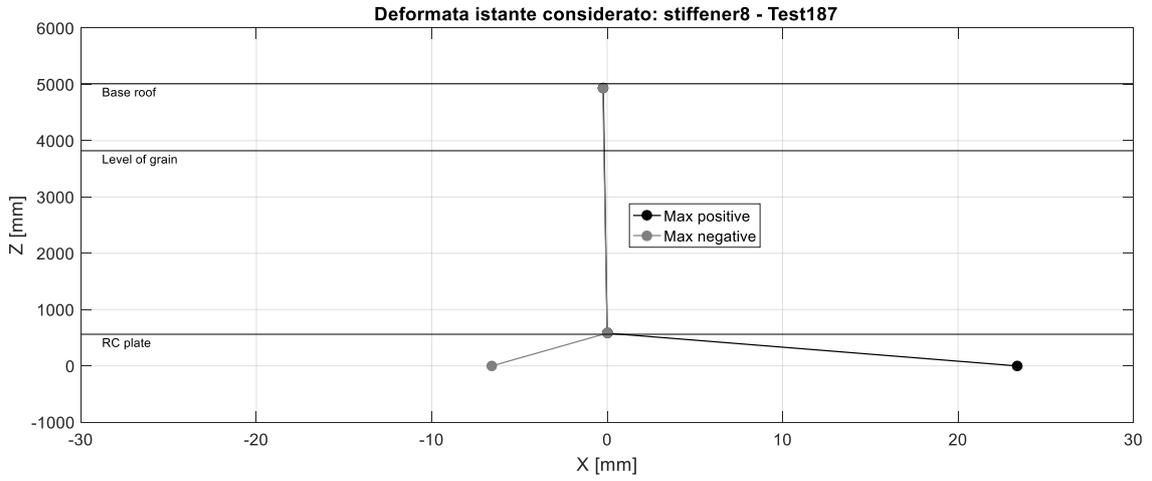
### Estensimetri a quota $Z = 42$ cm



Accelerometri

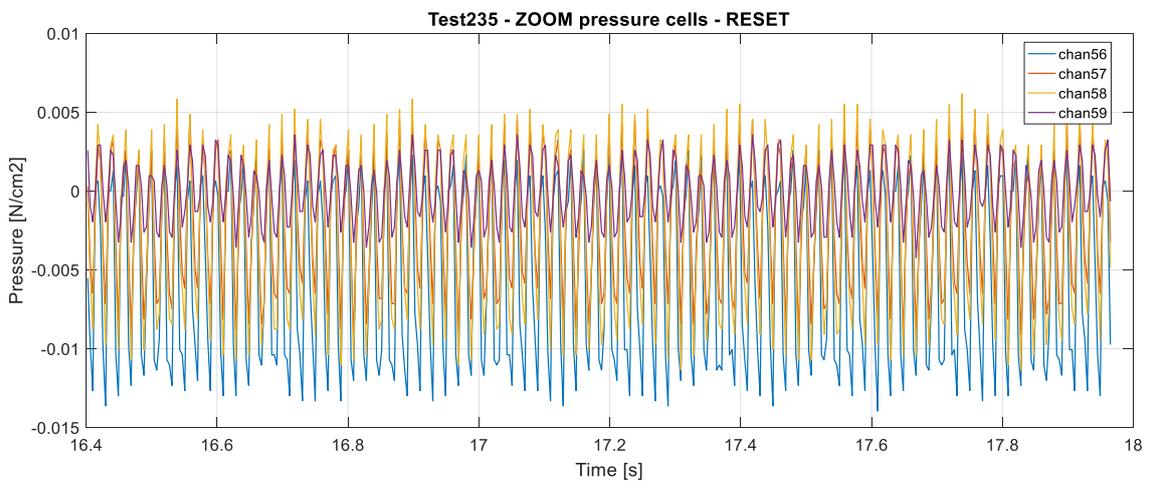
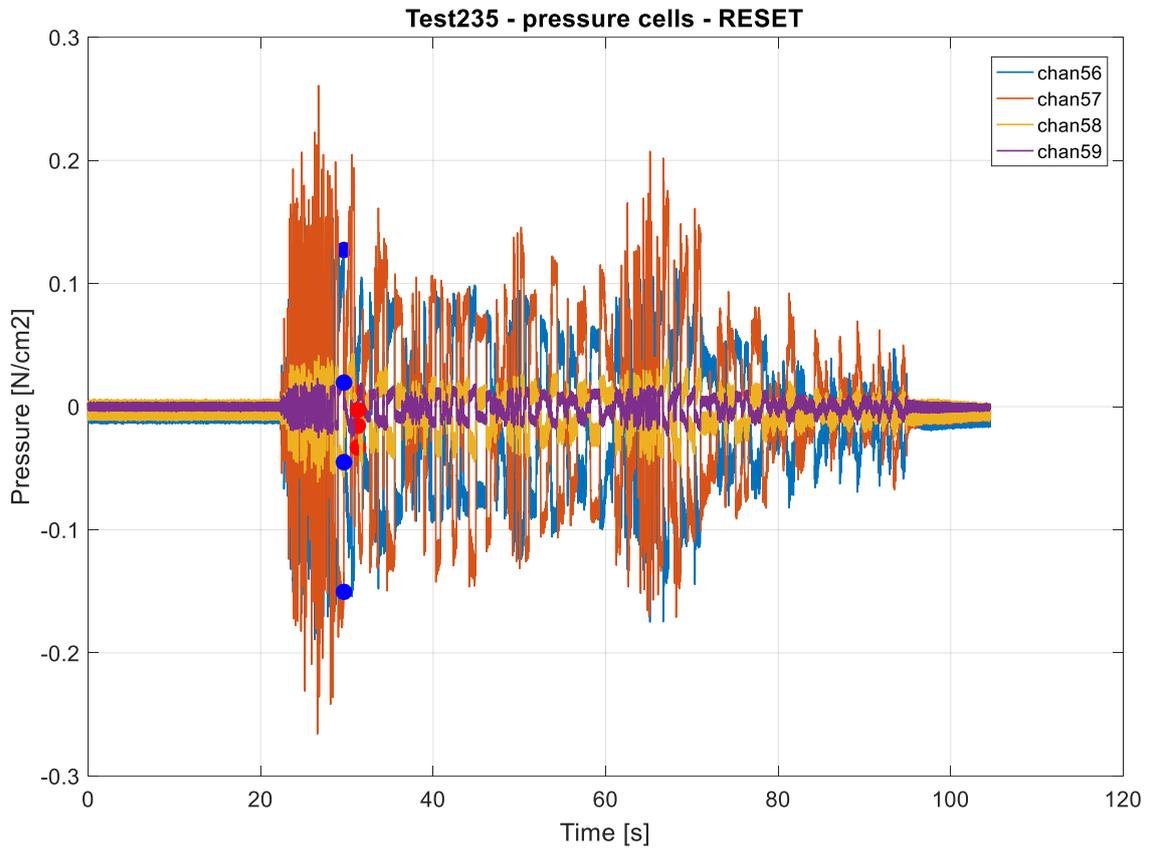


Markers



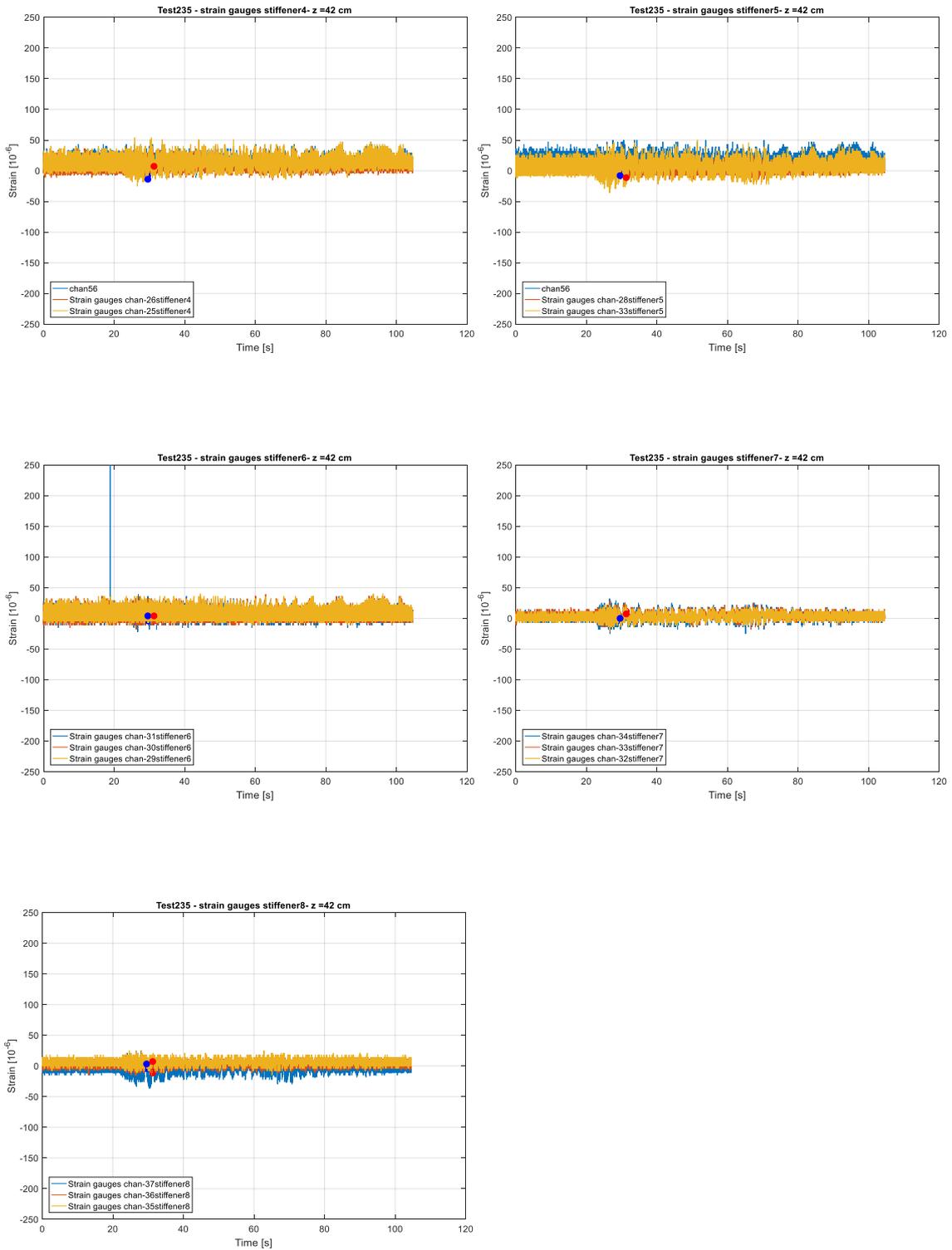
Earthquake input RS1 0.3 g: Test 235

Celle di pressione

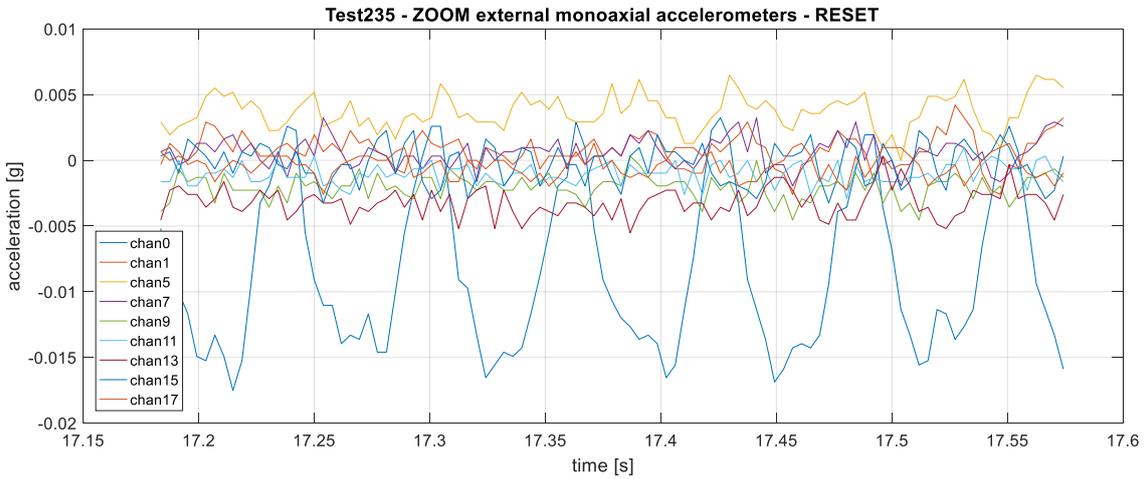
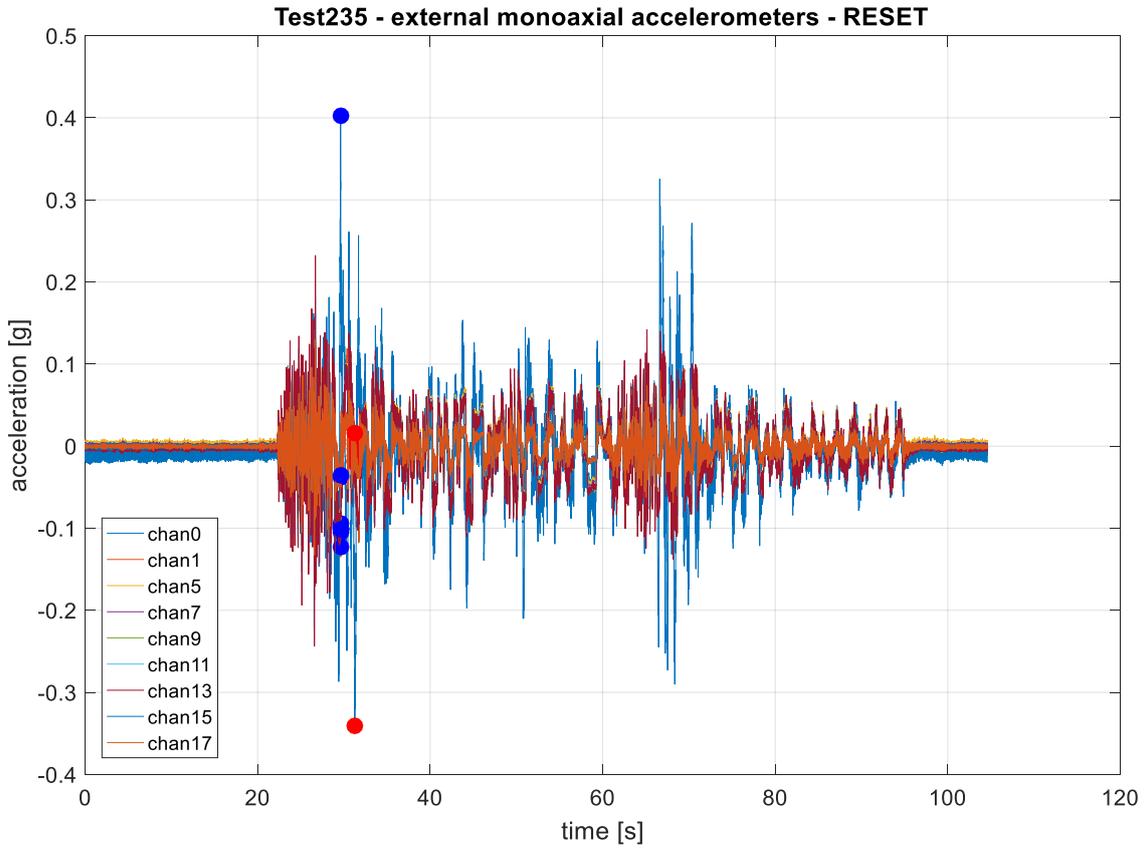


## 8. Quadro globale della risposta del sistema silo - grano

### Estensimetri a quota $Z = 42$ cm

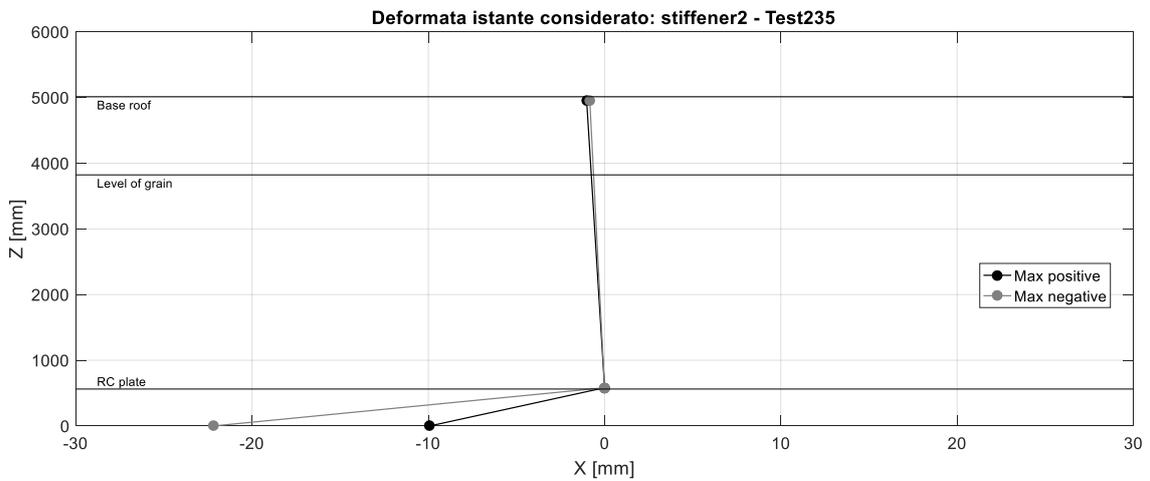
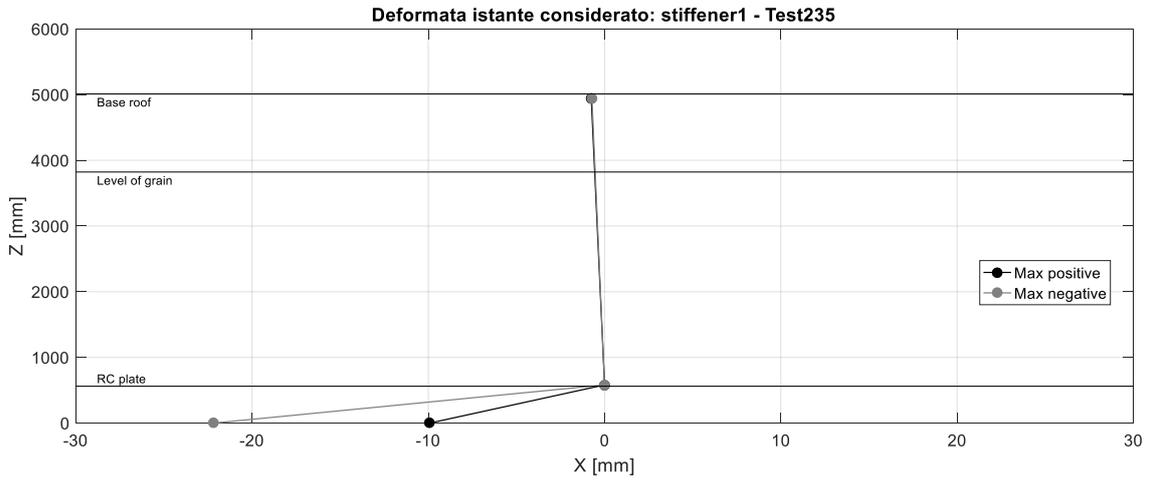
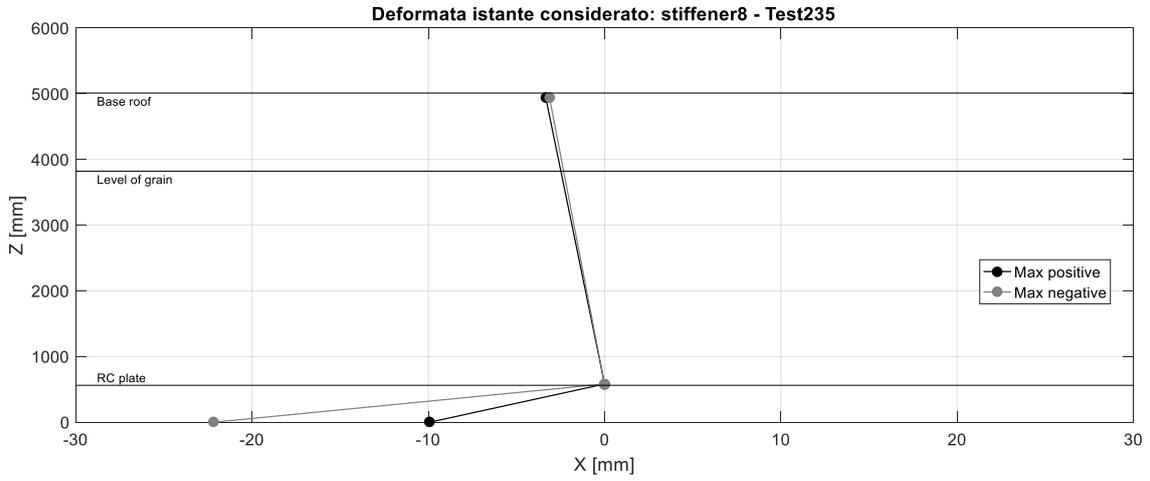


Accelerometri



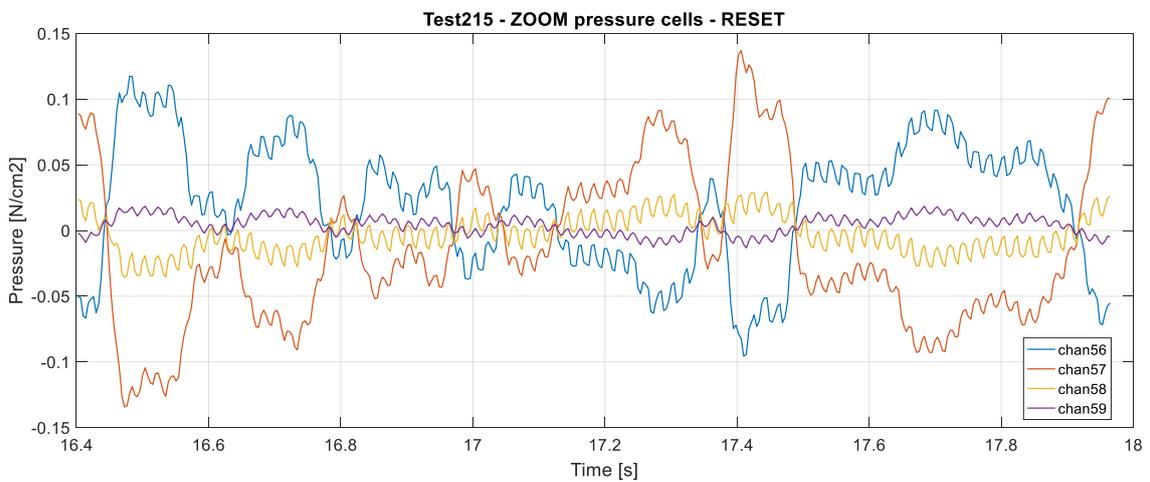
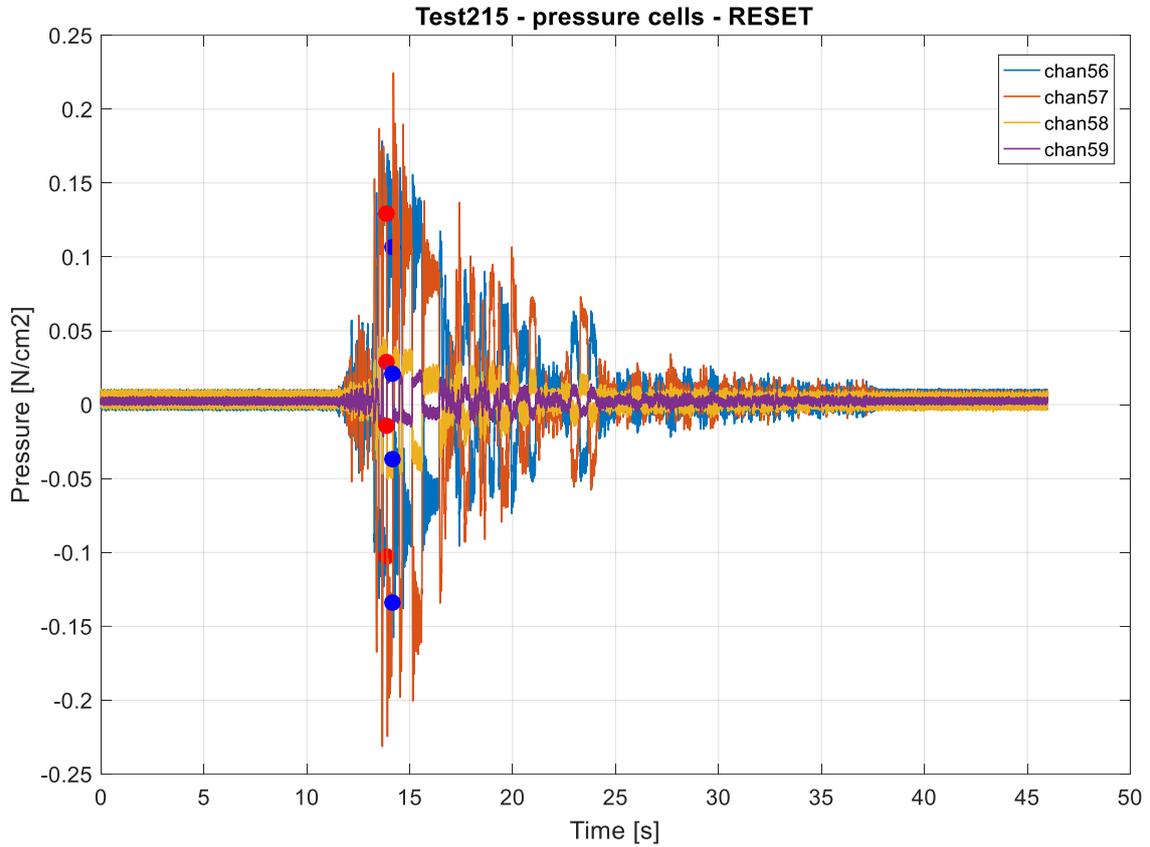
## 8. Quadro globale della risposta del sistema silo - grano

### Markers

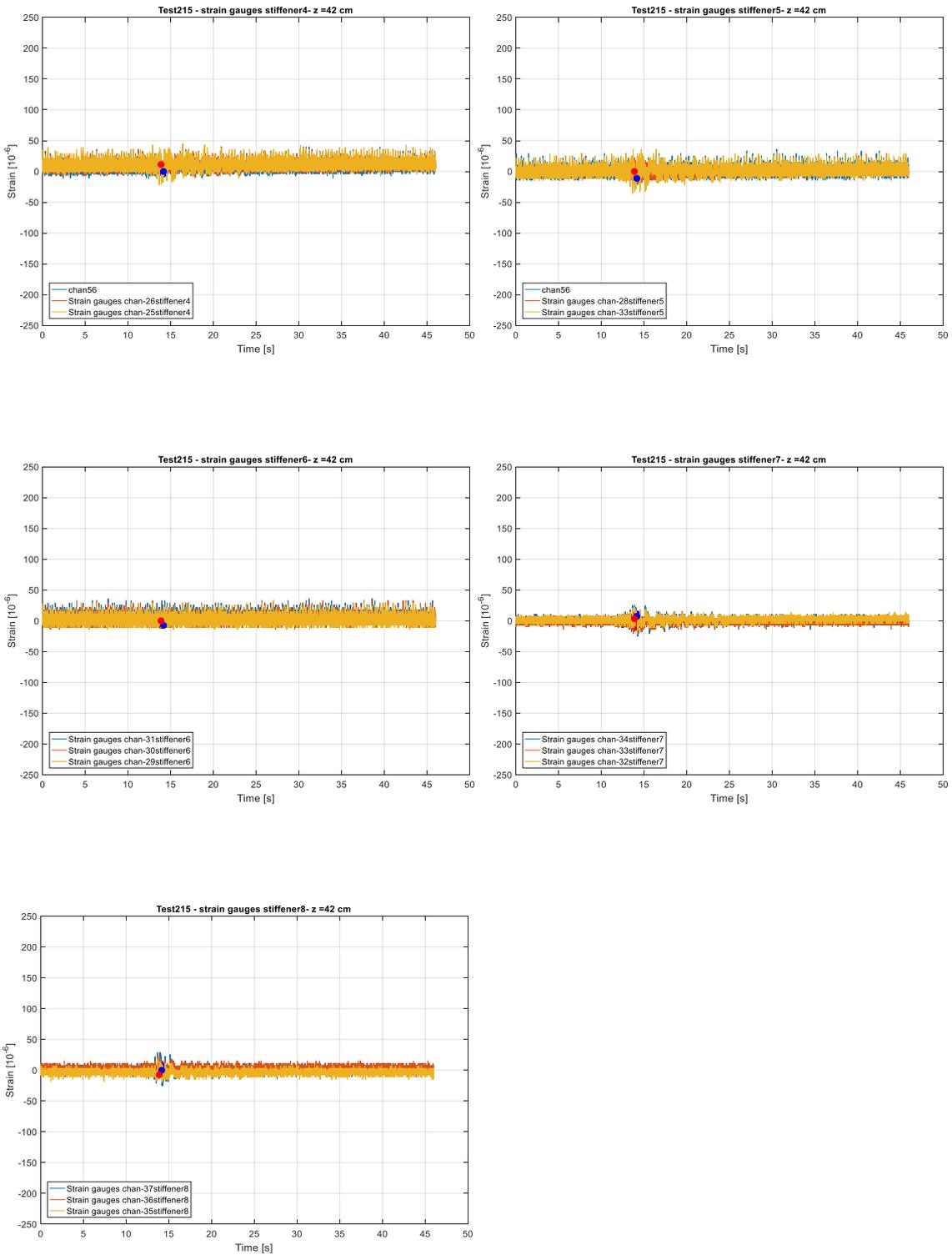


Earthquake input RS3 0.3 g: Test 215

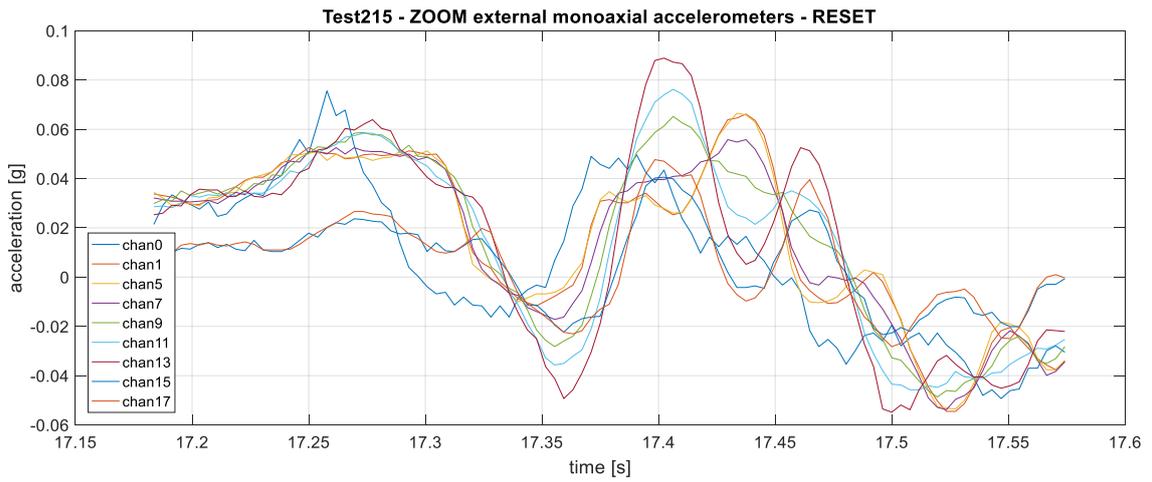
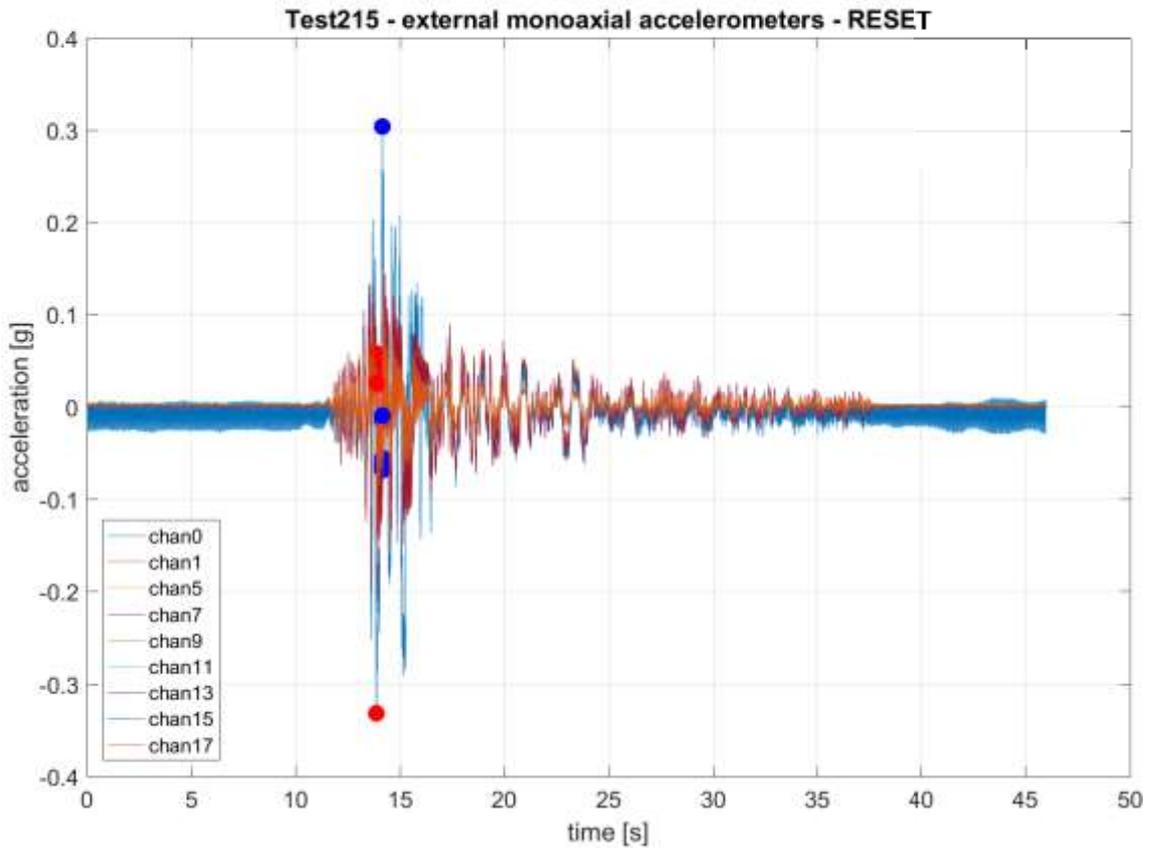
Celle di pressione



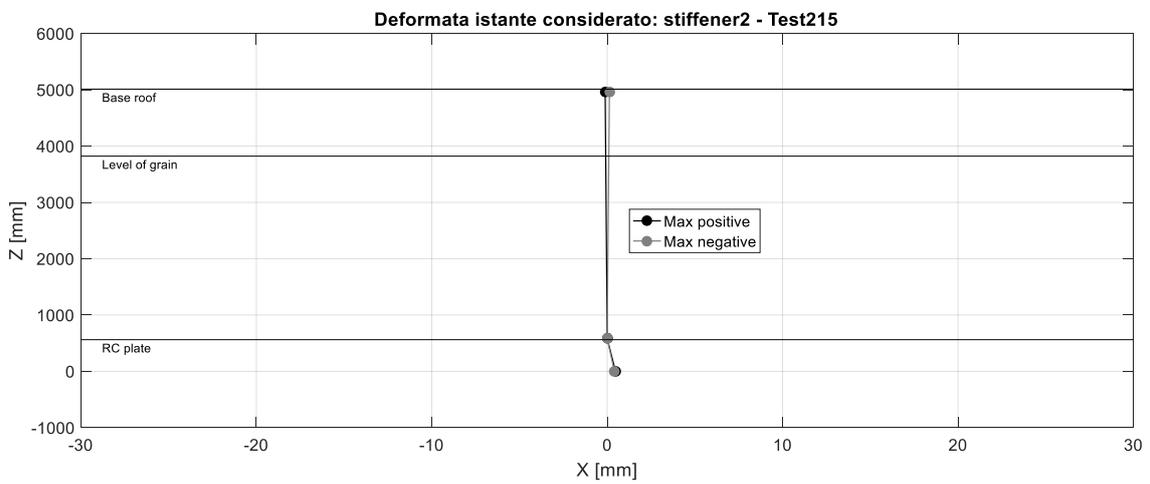
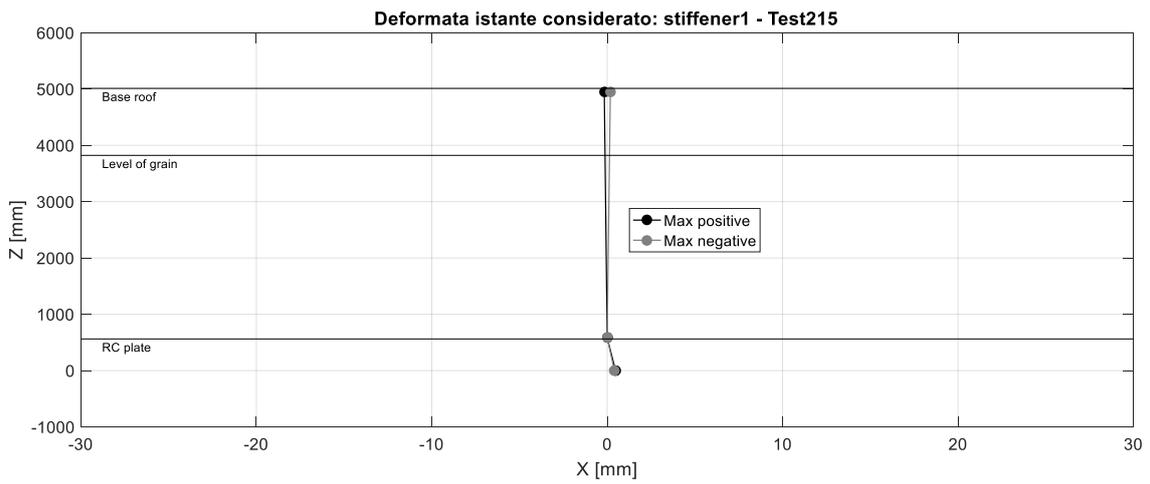
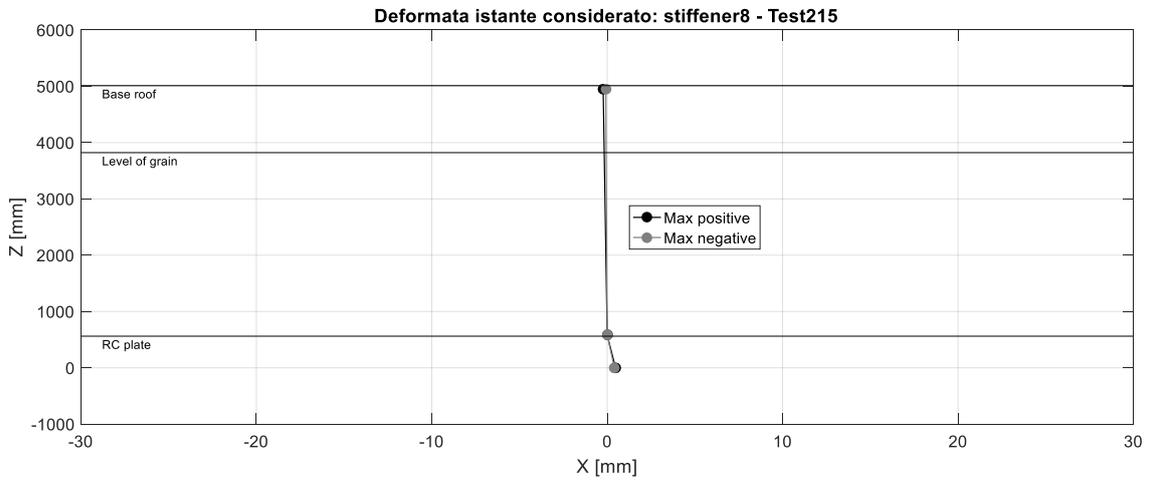
Estensimetri a quota  $Z = 42$  cm



Accelerometri



Markers



## CONCLUSIONI

Questa tesi si inserisce all'interno del progetto SERA – SILOS che ha permesso di eseguire una campagna sperimentale su un silo reale a fondo piano contenente grano, in due configurazioni: a base fissa e a base isolata. Questa sperimentazione ha lo scopo di verificare sperimentalmente la teoria analitica di Silvestri et al. 2012 [7] e Pieraccini et al. 2015 [5].

Questo elaborato rappresenta una prima analisi e un primo approccio alla complessa interpretazione del comportamento dinamico del sistema grano – silo. Quest'ultimo risulta fortemente dipendente dall'interazione tra materiale granulare e parete del silo, ma le ricerche scientifiche su queste tematiche, pur essendo iniziate nel XIX secolo, lasciano aperte diverse tematiche.

I risultati riportati nei capitoli precedenti evidenziano come durante la fase di riempimento le pressioni che il grano esercita sulle pareti del silo risultino in accordo con l'andamento previsto dalla teoria di Janssen. Quest'ultima, infatti, prevede il raggiungimento di un valore di plateau secondo un andamento esponenziale, a causa dell'instaurarsi di fenomeni di “arching”.

Dall'analisi dei risultati relativi alle prove in configurazione a base fissa, si nota che le pressioni hanno un andamento lineare con l'aumento dell'accelerazione al suolo (PGA) in accordo con la teoria di Silvestri et al. 2012 [7] e Pieraccini et al. 2015 [5]. Inoltre, considerando il paragrafo §5.3, si deduce che, con l'aumento dell'accelerazione al suolo, la massa partecipante del grano aumenta e ciò si riflette in un abbassamento delle amplificazioni sulla struttura, ovvero, in un aumento dello smorzamento.

Infine, i risultati relativi ai marker, acquisiti con metodologie ottiche, permettono di ottenere la deformata dei montanti, fondamentale per poter valutare le sollecitazioni sugli stessi. A livello numerico si è però riscontrata difficoltà nell'ottenere le sollecitazioni tramite l'impiego di differenze finite e interpolazione polinomiale dei dati, in quanto le metodologie numeriche richiedono una quantità maggiore di dati sperimentali, rispetto a quelli monitorati, per poter ottenere approssimazioni migliori.

Per quanto riguarda l'analisi dei risultati relativi alle prove in configurazione a base isolata, è risultato evidente un beneficio sulla struttura derivante dall'utilizzo di isolatori di tipo *Curved Surface Sliders friction pendulum*, in quanto tutte le quantità misurate risultano nettamente inferiori a quelle valutate nella configurazione a base fissa.

Questa campagna sperimentale porterà in futuro a studi più approfonditi sui silos a fondo piano contenenti materiali granulari, che sono strutture, da un lato ampiamente utilizzate per lo stoccaggio di materiali industriali e dall'altro caratterizzate da un particolare comportamento strutturale, ancora poco conosciuto.

### **Disclaimer**

Questo lavoro è stato il frutto di una stretta collaborazione con il gruppo di lavoro predisposto per il progetto SERA – SILOS che ha coinvolto studenti, professori e professionisti. In particolare, questo elaborato è stato realizzato in parallelo con la tesi di Matteo Marra: “Prove su tavola vibrante di silo metallico a fondo piano: identificazione dinamica mediante accelerometri”.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] EN 1991-4 2004 Eurocode 1. Basis of design and action on structures. Part 4. Silos, tanks and pipelines. CEN, Brussels
- [2] EN 1998-4 2006 Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance. Part 4. Silos, tanks and pipelines. CEN, Brussels
- [3] HERRMANN, Hans J.; HOVI, J.-P.; LUDING, S. (ed.). *Physics of dry granular media*. Springer Science & Business Media, 2013. (97-122, 129-136, 197-216)
- [4] HOLLER, Stefan; MESKOURIS, Konstantin. Granular material silos under dynamic excitation: numerical simulation and experimental validation. *Journal of structural Engineering*, 2006, 132.10: 1573-1579
- [5] PIERACCINI, Luca; SILVESTRI, Stefano; TROMBETTI, Tomaso. Refinements to the Silvestri's theory for the evaluation of the seismic actions in flat-bottom silos containing grain-like material. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2015, 13.11: 3493-3525
- [6] ROTTER, J. M.; HULL, T. S. Wall loads in squat steel silos during earthquakes. *Engineering Structures*, 1989, 11.3: 139-147
- [7] SILVESTRI, Stefano, et al. On the evaluation of the horizontal forces produced by grain-like material inside silos during earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2012, 10.5: 1535-1560
- [8] SILVESTRI, Stefano, et al. Shaking-table tests of flat-bottom circular silos containing grain-like material. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2016, 45.1: 69-89.
- [9] SPERL, Matthias. Experiments on corn pressure in silo cells—translation and comment of Janssen's paper from 1895. *Granular Matter*, 2006, 8.2: 59-65
- [10] VELETOS, Anestis S.; YOUNAN, Adel H. Dynamics of solid-containing tanks. II: Flexible tanks. *Journal of Structural Engineering*, 1998, 124.1: 62-70
- [11] YOUNAN, Adel H.; VELETOS, Anestis S. Dynamics of solid-containing tanks. I: Rigid tanks. *Journal of Structural Engineering*, 1998, 124.1: 52-61

## **RINGRAZIAMENTI**

Innanzitutto, vorrei esprimere profonda stima e gratitudine al relatore Professore Ing. Stefano Silvestri in quanto mi ha dato la possibilità di partecipare a questa importante campagna sperimentale. Questa è stata caratterizzata da grande condivisione e coinvolgimento da parte di tutti i partecipanti e per questo sono cresciuta professionalmente e ho appreso quanto lavoro, passione e dedizione ci siano dietro le ricerche scientifiche. Inoltre, ho avuto la possibilità di interfacciarmi con grandi esperti del settore come Prof. Ing. Adam J. Sadowski (Imperial College of London) e Prof. Ing. Tomoyo Taniguchi (Tottori University), grandi professionisti come Ing. Francesco Selva e Ing. Laura Vadrucci di FRAME S.P.A e i tecnici del laboratorio EUCENTRE come Prof. Ing. Igor Lanese e Ing. Elisa Rizzo Parisi, che voglio qui ringraziare sentitamente.

Un ringraziamento e un in bocca al lupo per Lorenzo Campanini, Matteo Marra, Sulyman Mansour e Francesco Fenocchio colleghi di lavoro e amici che hanno lavorato in modo appassionato e cercando sempre un confronto costruttivo su nuove idee.

Vorrei ringraziare e dedicare questo lavoro in particolare alla mia famiglia, a Sean e agli amici che mi hanno sempre sostenuto, soprattutto nei momenti più difficili. Grazie a questo sostegno ho avuto la possibilità di concentrarmi al meglio per concludere questo percorso che mi ha arricchito sotto ogni punto di vista e mi ha dato enormi soddisfazioni.