



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

**Prove in sito su edifici isolati alla base, interpretazione e simulazione
numerica**

Site tests on base isolated buildings, interpretation and numerical
simulation

Relatore:

Prof.ssa Laura Ragni

Correlatore:

Ing. Fabio Micozzi

Tesi di Laurea di:

Alberto Poeta

A. A. 2020 / 2021

INDICE

1.0 INTRODUZIONE	pag.1
2.0 ISOLAMENTO SISMICO	pag.2
2.1 Concetti teorici sull'isolamento sismico	pag.4
2.2 Dispositivi di isolamento	pag.8
2.2.1 Dispositivi elastomerici	pag.8
2.2.2 Slitte	pag.18
2.3 Verifiche di progetto sugli isolatori elastomerici	pag.20
2.4 Cenni di normativa sui controlli di accettazione e di qualifica	pag.22
2.4.1 Identificazione e qualificazione del prodotto	pag.22
2.4.2 Prove di accettazione sui dispositivi	pag.25
2.5 Prova Snap-back	pag.26
2.5.1 Ospedale Policlinico di Palermo	pag.26
2.5.2 Caso studio Rapolla	pag.30
3.0 NUOVO CENTRO DI RICERCA UNIVERSITARIO DI CAMERINO	pag.32
3.1 Sottostruttura	pag.33
3.2 Sovrastruttura	pag.34
3.3 Sistema di isolamento	pag.36
3.4 Prove di accettazione sui disp. Elastomerici	pag.38
3.4.1 Prove di capacità verticale	pag.38
3.4.2 Prove cicliche	pag.39
3.4.3 Prove di capacità laterale sotto massimo e minimo carico verticale in condizione sismica	pag.49
4.0 DESCRIZIONE DELLE PROVE IN SITO	pag.50
4.1 Descrizione del sistema di spinta	pag.50

<i>4.2 Configurazione del sistema di monitoraggio</i>	<i>pag.52</i>
<i>4.3 Modalità di elaborazione dei dati delle prove in sito</i>	<i>pag.57</i>
<i>4.4 Risultati delle singole prove</i>	<i>pag.60</i>
<i>4.4.1 Prova dinamica 2</i>	<i>pag.60</i>
<i>4.4.2 Prova statica 3</i>	<i>pag.65</i>
<i>4.4.3 Prova dinamica 4</i>	<i>pag.69</i>
<i>4.4.4 Prova dinamica 5</i>	<i>pag.73</i>
<i>4.4.5 Prova dinamica 6</i>	<i>pag.77</i>
<i>4.4.6 Prova statica 7</i>	<i>pag.80</i>
<i>4.5 Considerazioni finali</i>	<i>pag.84</i>
5.0 METODI PER LA MODELLAZIONE E L'ANALISI DELLE PROVE IN SITO	<i>pag.86</i>
<i>5.1 Tipologia di analisi effettuate</i>	<i>pag.86</i>
<i>5.2 Tipologia di link utilizzati</i>	<i>pag.89</i>
<i>5.2.1 BoucWen</i>	<i>pag.90</i>
<i>5.2.2 Damper exponential</i>	<i>pag.92</i>
<i>5.2.3 Kelvin</i>	<i>pag.95</i>
<i>5.2.4 Linear</i>	<i>pag.96</i>
6.0 SIMULAZIONE NUMERICA DELLE PROVE IN SITO	<i>pag.97</i>
<i>6.1 Modello elastoplastico</i>	<i>pag.97</i>
<i>6.1.1 Taratura BoucWen per Prova Statica 7</i>	<i>pag.98</i>
<i>6.1.2 Taratura BoucWen per hcc150</i>	<i>pag.101</i>
<i>6.1.3 Funzione e calibrazione del Dashpot</i>	<i>pag.102</i>
<i>6.1.4 Prova dinamica 5</i>	<i>pag.108</i>
<i>6.1.5 Prova dinamica 2</i>	<i>pag.120</i>

6.1.6 Prova dinamica 4	<i>pag.122</i>
6. 1.7 Aggiunta del secondo Dashpot	<i>pag.127</i>
6.1.8 Limiti del modello	<i>pag.143</i>
6.2 Modello viscoelastico	<i>pag.144</i>
6.2.1 Prova dinamica 5	<i>pag.146</i>
6.2.2 Prova dinamica 4	<i>pag.152</i>
6.2.3 Prova dinamica 2	<i>pag.157</i>
7.0 CONCLUSIONI	<i>pag.161</i>

1.0 INTRODUZIONE

L'isolamento sismico è una tecnica di protezione sismica degli edifici molto efficace e per questo sempre più diffusa nel mondo e anche in Italia, soprattutto dopo gli ultimi eventi sismici che hanno messo in luce la vulnerabilità degli edifici esistenti, in qualche caso anche di recente costruzione. Il principio è quello di disaccoppiare la struttura dal moto del terreno tramite opportuni dispositivi dotati di elevata rigidità orizzontale e adeguata capacità dissipativa. Ovviamente tali dispositivi svolgono un ruolo fondamentale nella risposta sismica dell'edificio e per questo motivo, oltre ad una corretta progettazione, sono fondamentali i controlli in fase di esecuzione dell'opera cioè le prove di qualifica e accettazione dei dispositivi stessi. Tuttavia tali prove, in accordo con le normative vigenti, riguardano un numero limitato di dispositivi, pertanto il quesito a cui si vuole rispondere con questo elaborato di tesi è il seguente: è possibile testare e conoscere il comportamento dell'intero sistema di isolamento una volta che la struttura è stata ultimata? La risposta a questo quesito è positiva, infatti, sono state eseguite diverse prove di rilascio, che prendono anche il nome di prove Snap-back. Tali prove hanno lo scopo di testare la totalità dei dispositivi utilizzati, e quindi verificare il reale comportamento del sistema di isolamento e della sovrastruttura. La prova consiste nello spingere la struttura, attraverso un sistema di spinta, fino ad un determinato livello di spostamento, per poi rilasciarla causando delle oscillazioni libere, simulando così un evento sismico.

Nel presente elaborato di tesi, dopo un breve excursus su cosa sia l'isolamento sismico e da una descrizione delle prove di rilascio eseguite nel recente passato, si è passati ad analizzare il caso studio del nuovo Centro di Ricerca dell'Università di Camerino, costruito da un edificio in acciaio isolato alla base mediante dispositivi elastomerici e da slitte piane sul quale sono state condotte delle prove di rilascio i cui risultati sono stati oggetto di elaborazione nella presente tesi.

In particolare, lo scopo di questa tesi è quello a creare un modello numerico capace di simulare il comportamento degli isolatori elastomerici durante le diverse fasi delle prove condotte in sito. Sono stati creati diversi modelli basati su diverse ipotesi di comportamento degli isolatori. La taratura è stata svolta a partire dai risultati ottenuti in sito e dalle prove di qualifica e di accettazione svolte sui dispositivi.

Tutti i risultati ottenuti sono stati confrontati con il reale andamento visto in sito e a partire da queste differenze sono state descritte le problematiche, le limitazioni e i possibili upgrade dei modelli.

2.0 ISOLAMENTO SISMICO

L'isolamento sismico costituisce una strategia di protezione usualmente denominata "controllo passivo delle vibrazioni" e rappresenta una soluzione adottata in paesi caratterizzati da frequenti fenomeni sismici. Ricade in quelli che sono definiti "sistemi di controllo passivo per la protezione sismica degli edifici" (come anche i controventi dissipativi) ed è trattato nel capitolo 7 della Normativa Tecnica Italiana (NTC2018). L'isolamento sismico può essere utilizzato sia come strumento di adeguamento delle strutture esistenti sia nel progetto delle nuove costruzioni. La progettazione antisismica delle strutture è basata sul soddisfacimento della disequazione:

$$R_d \geq E_d$$

dove R_d è la resistenza di progetto, mentre E_d è il valore dell'effetto delle azioni che investono la struttura.

Come enunciato dalla norma al §7.10.1, "la riduzione della risposta sismica orizzontale, qualunque siano la tipologia e i materiali strutturali della costruzione, può essere ottenuta mediante una delle seguenti strategie d'isolamento, o mediante una loro appropriata combinazione:

- a) Incrementando il periodo fondamentale della costruzione per portarlo nel campo delle minori accelerazioni di risposta;
- b) Limitando la massima forza orizzontale trasmessa;

In entrambe le strategie le prestazioni dell'isolamento possono essere migliorate attraverso la dissipazione nel sistema di isolamento di una consistente aliquota dell'energia meccanica trasmessa dal terreno alla costruzione."

Vengono riportati (Fig.2.1) gli effetti dei diversi interventi di adeguamento sismico che possono essere utilizzati su un edificio:

1. Il pallino blu rappresenta la struttura esistente;
2. Il pallino arancione si raggiunge a seguito di un intervento di rinforzo strutturale, con aumento della rigidità dell'edificio espressa dalla diminuzione del periodo T ;
3. Il pallino giallo si raggiunge con l'inserimento di controventi dissipativi, i quali portano ad un leggero aumento della rigidità (T più basso rispetto al puntino blu) e dello smorzamento, che porta ad un abbassamento dello spettro;
4. Il pallino rosso rappresenta l'edificio isolato alla base, con un forte incremento del periodo di oscillazione T e dello smorzamento ξ (come indicato dalla norma, la progettazione di un sistema di isolamento non necessariamente è legata all'aumento dello smorzamento).

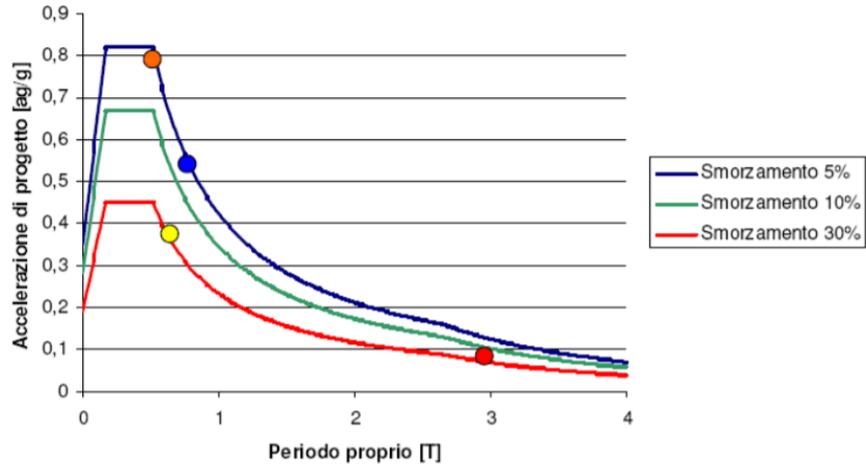


Fig.2.1 - Effetto di differenti interventi di adeguamento su di un edificio

Oltre alla forte riduzione della accelerazione spettrale, l'aumento dello smorzamento dovuto ai meccanismi di dissipazione energetica permette di controllare gli elevati spostamenti a cui si andrebbe incontro a causa dell'aumento del periodo T (Fig. 2.2a-b).

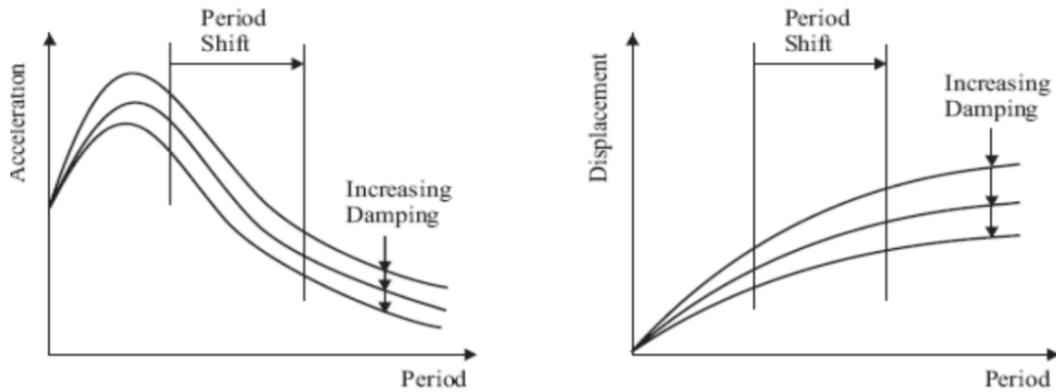


Fig.2.2a-b - Variazione del periodo e aumento dello smorzamento dei sistemi di isolamento

2.1 Concetti teorici dell'isolamento sismico

L'isolamento sismico consiste essenzialmente nel disaccoppiare il moto del terreno da quello della struttura, introducendo una sconnessione lungo l'altezza della struttura stessa che risulta quindi suddivisa in due parti: la sottostruttura, rigidamente connessa al terreno, e la sovrastruttura. La continuità strutturale è garantita attraverso l'introduzione, fra sovrastruttura e sottostruttura, di appoggi, detti isolatori, caratterizzati da un'elevata deformabilità e/o da una bassa resistenza al moto in direzione orizzontale e, normalmente, da una notevole rigidità in direzione verticale.

L'aumento di deformabilità conseguente all'introduzione degli isolatori porta il periodo del sistema strutturale in una zona dello spettro a più bassa accelerazione. Naturalmente l'aumento di periodo si traduce anche in un incremento di spostamenti che però si concentrano negli isolatori, dove viene assorbita e dissipata gran parte dell'energia dovuta al terremoto. La sovrastruttura si comporta come un corpo rigido, subendo spostamenti relativi di interpiano molto contenuti.

I benefici derivanti dall'adozione dell'isolamento sono molteplici:

- Un notevole abbattimento delle forze di inerzia, quindi delle sollecitazioni, prodotte dal sisma sulla struttura, così da evitare il danneggiamento degli elementi strutturali;
- Una drastica riduzione degli spostamenti di interpiano, tale da evitare il danno agli elementi non strutturali;
- Un'elevata protezione del contenuto strutturale;
- Una percezione molto minore delle scosse sismiche da parte degli occupanti.

Un sistema di isolamento deve possedere le seguenti caratteristiche:

- Bassa rigidità orizzontale: al fine di garantire un periodo di isolamento elevato;
- Buona capacità dissipativa: al fine di abbattere ulteriormente le azioni trasmesse in sovrastruttura e gli spostamenti del sistema di isolamento;
- Funzione di appoggio: deve essere in grado di sopportare i carichi verticali in condizione di esercizio e in condizioni sismiche (in presenza di elevati spostamenti orizzontali);

- Adeguata rigidezza nei confronti delle forze orizzontali di piccole entità (vento, traffico o sismi di bassa energia);
- Ricentraggio: capacità di tornare nella posizione iniziale dopo il sisma.

Se ipotizziamo di avere una struttura isolata alla base ad un piano Fig.2.3, troviamo (dal basso verso l'alto):

- la sovrastruttura, posta sopra al sistema di isolamento;
- il sistema di isolamento sismico, attivo sulla superficie di separazione detta "interfaccia di isolamento";
- la sottostruttura, la parte della struttura che è posta al di sotto dell'interfaccia di isolamento e che è soggetta al moto del terreno.

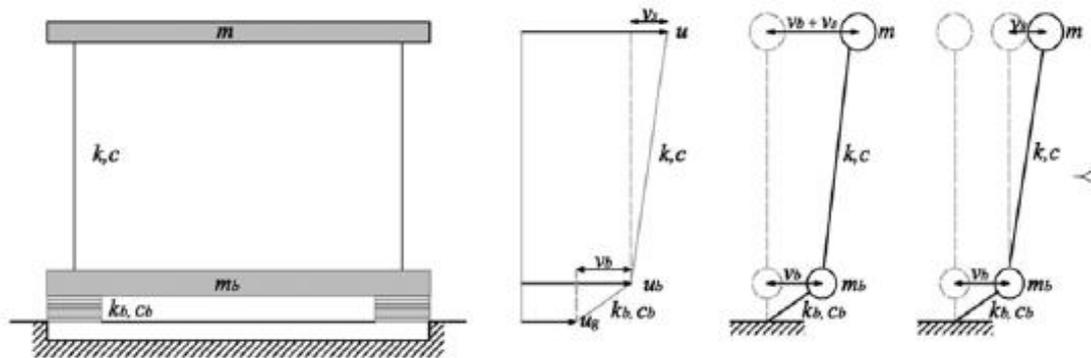


Figura 2.3 Sovrastruttura (s), basamento (b), sottostruttura (g)

Nella precedente figura troviamo le seguenti grandezze:

- m : massa della sovrastruttura esclusa la massa di base;
- m_b : massa del basamento vincolata agli isolatori;
- k_s : rigidezza sovrastruttura;
- c_s : smorzamento sovrastruttura;
- k_b : rigidezza basamento;
- c_b : smorzamento basamento;
- u_s : spostamento sovrastruttura;
- u_b : spostamento basamento;
- u_g : spostamento terreno.

Il sistema di equazioni che governa il comportamento dinamico dell'edificio è:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_s(t) + c_s\dot{v}_s(t) + k_s v_s(t) = 0 \\ m_b\ddot{x}_b(t) + m\ddot{x}_s(t) + c_b\dot{v}_b(t) + k_b v_b(t) = 0 \end{cases}$$

Andando a sostituire la prima equazione nella seconda, scrivendo $x_s = u_g + v_b + v_s$ e $x_b = u_g + v_b$ e raccogliendo i termini si ottiene in forma matriciale:

$$\begin{bmatrix} m & m \\ m & (m + m_b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_s \\ \dot{v}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & 0 \\ 0 & c_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_s \\ \dot{v}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s \\ v_b \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m \\ (m + m_b) \end{bmatrix} \ddot{u}_g(t)$$

Si possono identificare due soluzioni limite:

- caso di struttura a base fissa, in assenza del sistema di isolamento, per la quale il valore della pulsazione e dello smorzamento possono essere calcolati come:

$$\omega_s^2 = \frac{k_s}{m} \quad \xi_s = \frac{c_s}{2\omega_s m}$$

- caso di struttura rigida isolata, ottenendo di fatto un moto rigido della struttura (k_s infinitamente rigida) e un valore di smorzamento pari a:

$$\omega_s^2 = \frac{k_b}{m+m_b} = \frac{k_b}{M} \quad \xi_b = \frac{c_b}{2\omega_b(m+m_b)} = \frac{c_b}{2\omega_b M}$$

Da questi valori si ottengono i parametri che permettono di capire se una struttura si trova più vicina ad una situazione o ad un'altra:

- rapporto di pulsazione $\varepsilon = \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2} = \frac{T_s^2}{T_b^2}$,
- rapporto di masse $\gamma = \frac{m}{m+m_b} = \frac{m}{M}$,
- rapporto di isolamento T_B/T_S .

Dividendo la prima equazione per m e la seconda per $m + M$ si ottiene:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \gamma & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_s \\ \dot{v}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\omega_s \xi_s & 0 \\ 0 & 2\omega_b \xi_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_s \\ \dot{v}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_s^2 & 0 \\ 0 & \omega_b^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s \\ v_b \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{u}_g(t)$$

L'analisi modale si ottiene risolvendo il seguente problema agli autovalori/autovettori:

$$\left(\begin{bmatrix} \omega_s^2 & 0 \\ 0 & \omega_b^2 \end{bmatrix} - \omega_i^2 \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \gamma & 1 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \varphi_{i,s} \\ \varphi_{i,b} \end{bmatrix} = 0 \text{ per } i=1,2$$

Andando ad analizzare il primo modo di vibrare della struttura, troviamo (Fig.1.4):

- Pulsazione $\omega_1 = \omega_b^2(1 - \varepsilon\gamma)$;
- Forma modale $\varphi_1 = \begin{bmatrix} \varepsilon \\ 1 \end{bmatrix}$;
- Fattore di partecipazione $\Gamma_1 = 1 - \gamma\varepsilon$.

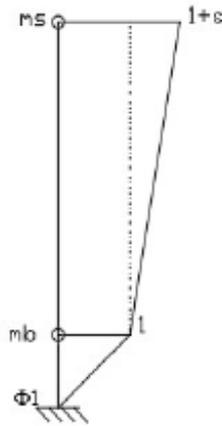


Figura 2.4 Primo modo di vibrare della struttura ad un piano isolata alla base

Si può osservare che se la sovrastruttura è molto più rigida del sistema di isolamento ($k_s > k_b$, quindi $\omega_s^2 > \omega_b^2$ e $T_b \gg T_s$) allora il rapporto di pulsazione $\epsilon \rightarrow 0$. Ciò sta a significare che la sovrastruttura subirà solo uno spostamento rigido al di sopra del sistema di isolamento. Si ottiene un sistema ad 1-DOF (Fig. 2.5), con massa totale $m + m_b$ e rigidezza k_b , e quindi un buon isolamento con basse sollecitazioni sulla sovrastruttura.

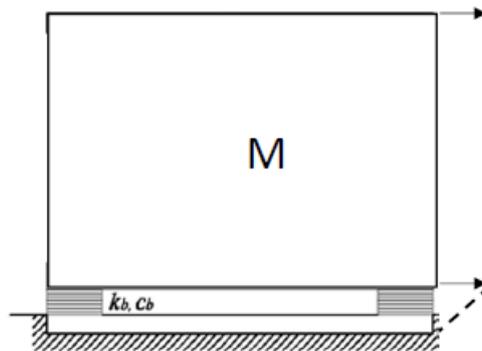


Figura 2.5 Struttura perfettamente isolata

Sapendo che $\omega_b^2 = \frac{k_b}{M}$ e $T_b = \frac{2\pi}{\omega_b}$ fissato il periodo di isolamento di progetto (T_{is}) possiamo determinare la rigidezza del sistema di isolamento:

$$k_b = \left(\frac{2\pi}{T_{is}} \right)^2 M$$

2.2 Dispositivi di isolamento

I componenti di un sistema di isolamento si possono distinguere in isolatori e dispositivi ausiliari. Gli isolatori possono essere raggruppati in due principali categorie: isolatori in materiale elastomerico e acciaio, basati sull'elevata deformabilità elastica della gomma, e isolatori a scorrimento, basati sulla resistenza d'attrito che si sviluppa tra superfici di alcuni materiali opportunamente trattati. I dispositivi ausiliari svolgono la funzione di dissipazione di energia e /o di ricentraggio del sistema e/o di vincolo laterale sotto carichi orizzontali di servizio non sismici.

Un sistema di isolamento può essere o costituito unicamente da una delle due tipologie di dispositivi (con l'eventuale aggiunta di sistemi ausiliari) o può essere ibrido, cioè realizzato da isolatori elastomerici e da slitte piane con PTFE lubrificato. Quest'ultimo approccio permette di ottenere sistemi a bassa rigidezza e buone capacità ricentranti, senza l'utilizzo di dispositivi ausiliari.

Nei successivi capitoli verranno approfonditi i dispositivi elastomerici e le slitte piane, poiché sono costituenti del caso studio.

2.2.1 Dispositivi elastomeri

I dispositivi elastomerici sono costituiti da strati alternati di materiale elastomerico (gomma naturale o materiali artificiali idonei) e di acciaio completamente incorporato nella gomma (per evitare fenomeni di corrosione), quest'ultimo esplica un'azione di confinamento sull'elastomero, che ne limita la deformabilità verticale, incrementando sensibilmente la portanza ai carichi verticali, senza influenzare significativamente la deformabilità a taglio dell'isolatore in direzione orizzontale.

Esistono tre diverse tipologie di dispositivo elastomerico, classificabili in relazione alle caratteristiche dissipative dell'elastomero e all'eventuale presenza di inserti:

- Isolatori in gomma a basso smorzamento (LDRB) (Fig.2.6), presentano un comportamento sostanzialmente elastico al crescere della deformazione e da un rapporto di smorzamento molto basso dell'ordine del 2-4% (Fig.2.7). Il loro comportamento risulta sostanzialmente indipendente dalla frequenza di oscillazione e poco sensibile alla temperatura. Generalmente, a questo tipo di dispositivo sono associati dei dispositivi ausiliari che hanno lo scopo di aumentare la capacità dissipativa in presenza del sisma ed evitare movimenti orizzontali eccessivi legati alle azioni in esercizio;

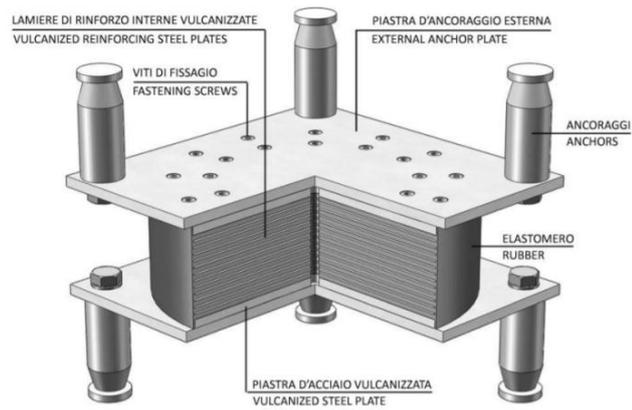


Figura 2.6 Dispositivo LRRB

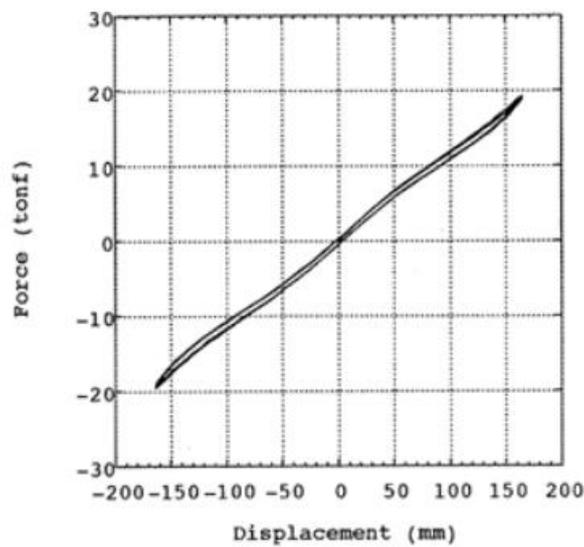


Figura 2.7 Esempio ciclo dispositivo LDRB

- Dispositivi in gomma armata con nucleo in piombo (LRB) (Fig. 2.8), dispongono di un nucleo cilindrico in piombo che permette di ottenere una maggiore rigidezza ai carichi orizzontali di esercizio e un'elevata capacità dissipativa durante il sisma. Il comportamento meccanico di tali dispositivi è dato dalla combinazione del comportamento lineare degli isolatori a basso smorzamento con quello elasto-plastico del nucleo in piombo, sollecitato a taglio (Fig.2.9). Lo smorzamento viscoso equivalente risulta compreso tra il 15% e il 35%, a seconda dello spostamento imposto e della dimensione del nucleo in piombo.

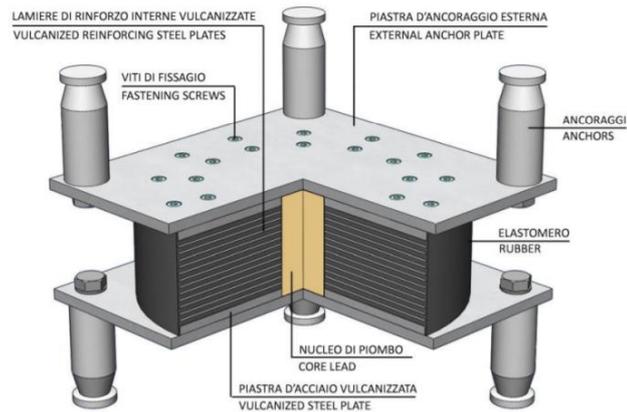


Figura 2.8 Dispositivo LRB

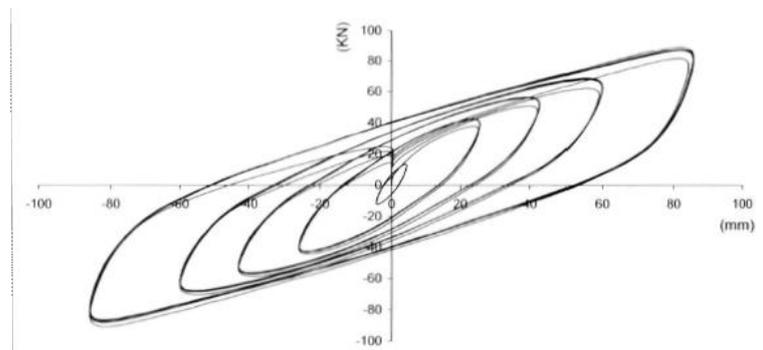


Figura 2.9 Diagramma isteretico tipo LRB

La rigidezza equivalente e lo smorzamento viscoso equivalente risultano funzione del numero di cicli applicato. Sia la rigidezza, che l'energia dissipata, diminuiscono al crescere del numero dei cicli, tendendo a stabilizzarsi dopo 10-15 cicli di carico, con un fenomeno simile allo "scragging". Questo comportamento è dovuto al surriscaldamento del nucleo.

L'entità della diminuzione di rigidezza e smorzamento al crescere del numero di cicli è funzione delle dimensioni del dispositivo in gomma e del nucleo in piombo.

Un comportamento più stabile, può essere ottenute utilizzando nuclei di materiali polimerici ad elevata viscosità.

- Dispositivi in gomma ad alto smorzamento (HDRB), sono realizzati aggiungendo alla mescola della gomma degli additivi (per esempio polvere di grafite o resine) al fine di raggiungere degli elevati valori di smorzamento (tra il 10 e il 20 % per deformazioni dell'ordine del 100%). Questo tipo di dispositivi possono da soli realizzare un sistema di isolamento completo, che soddisfa i requisiti fondamentali precedentemente espressi.

Sono caratterizzati da una serie di grandezze geometriche tipiche (Fig. 2.10) e da due fattori di forma che qualificano l'isolatore e consentono di prevederne il tipo di comportamento in termini di deformazione a taglio e carico assiale. Le due grandezze principali caratterizzanti l'isolatore sono il diametro dell'elastomero D_g e l'altezza dell'elastomero t_e , ottenuto dalla somma dei singoli strati di gomma. Questi ultimi sono intervallati da piastre in acciaio di diametro D_p e spessore t_e .

L'elemento costituito dall'alternanza di strati in gomma e piastre in acciaio è racchiuso tra due piastre in acciaio, per uno spessore totale di h , al di sopra e al di sotto delle quali vengono posizionate delle contro piastre di spessore s , per un'altezza totale H . Le due contro piastre sono collegate tra loro tra quattro bulloni esterni posti a distanza z dal bordo della contro piastra e distanza z_f tra loro. La differenza tra la dimensione della contro piastra e il diametro della gomma è pari a d .

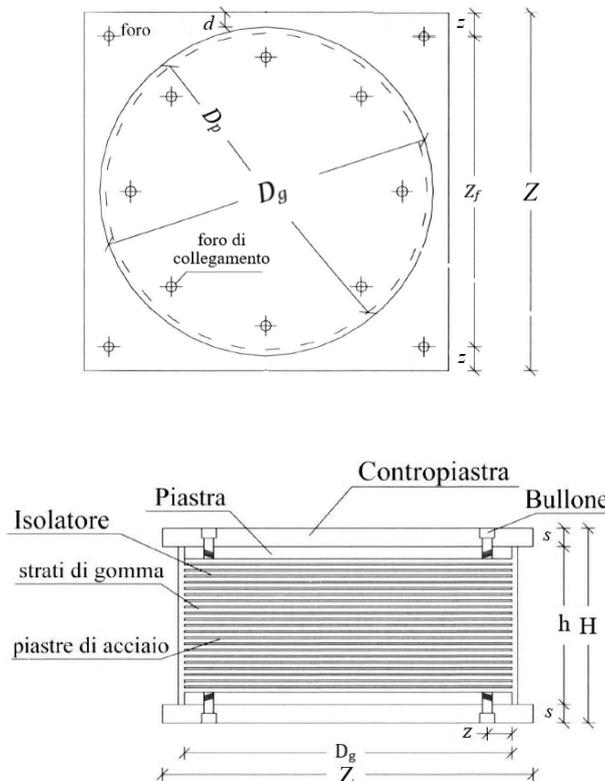


Figura 2.10 Grandezze geometriche di un isolatore elastomerico

Nota la geometria dell'isolatore, è possibile definire i due fattori di forma S_1 e S_2 (si riporta, per le formule sottostanti, la stessa nomenclatura della Fig.2.10):

- Fattore di forma $S_1 = \frac{A_{compressa}}{A_{laterale}} = \frac{D_p}{4t_i}$ (Fig. 2.11), definito come il rapporto tra l'area caricata $A_{compressa}$ e la superficie laterale del singolo strato $A_{laterale}$. È un indice della rigidità verticale del dispositivo che controlla il confinamento della gomma: infatti, al ridursi di t_i , a parità di diametro D_p , si ha un aumento del confinamento degli strati di elastomero con un conseguente aumento della

rigidezza verticale. Al fine di garantire un'adeguata rigidezza verticale è consigliato adottare un valore tra 10 e 30

- Fattore di forma $S_2 = \frac{D_p}{t_e}$ (Fig. 2.12), definito come il rapporto tra il diametro del dispositivo e l'altezza totale della gomma, è un indice della stabilità del dispositivo nei confronti dei carichi verticali in configurazione deformata. A parità di altezza di gomma, aumentando il diametro del dispositivo ho un aumento della stabilità.

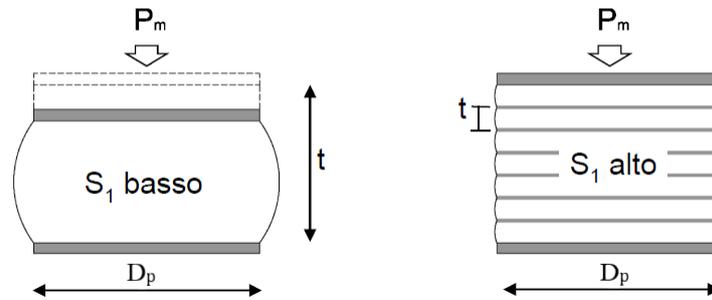


Figura 1.11 Fattore di forma S1

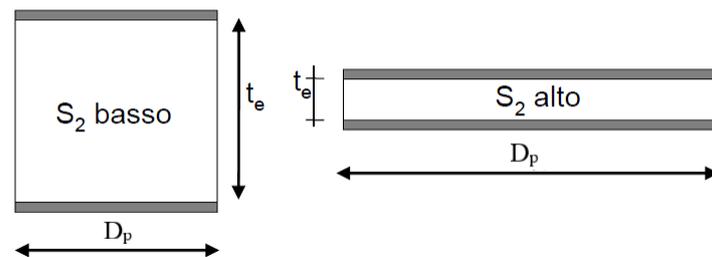


Figura 2.12 Fattore di forma S2

Considerando un generico ciclo isteretico (Fig. 2.13), la risposta meccanica di un isolatore può essere caratterizzata attraverso i parametri equivalenti:

- Rigidezza equivalente $K_{d,eq} = \frac{F_d(x=A)}{A}$, può anche essere calcolata a partire delle caratteristiche dell'isolatore $K_{d,eq} = K_{is} = \frac{G_d A_{is}}{h_{is}}$,
- Smorzamento equivalente $\xi_{d,eq} = \frac{W_d^1}{4\pi E_{dM,eq}^1}$, dove W_d^1 è l'energia dissipata nell'intero ciclo e $E_{dM,eq}^1$ è l'energia elastica definita come: $E_{dM,eq}^1 = K_{d,eq} A^2 / 2$.

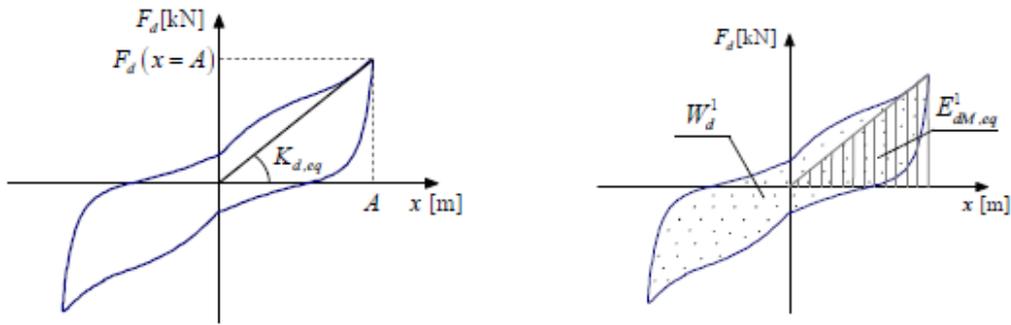


Figura 2.13 Esempio ciclo isteretico HDRB

A seconda della tipologia della mescola le proprietà dell'isolatore cambiano, in particolare ciò che varia è il modulo di elasticità tangenziale G_d (Fig.2.14). Le caratteristiche si riferiscono ad una deformazione del 100% ($\gamma=1$).

Caratteristica	Mescola morbida	Mescola media	Mescola dura
Modulo elastico tangenziale "Gdin"	0.4 MPa	0.8 MPa	1.4 MPa
Coefficiente di smorzamento "S"	15%	15%	15%

Figura 2.14 Variazione caratteristiche isolatori a seconda della tipologia di mescola

I parametri equivalenti, oltre a variare a seconda della tipologia di mescola, sono dipendenti dall'ampiezza di deformazione γ (Fig. 2.15 e Fig. 2.16).

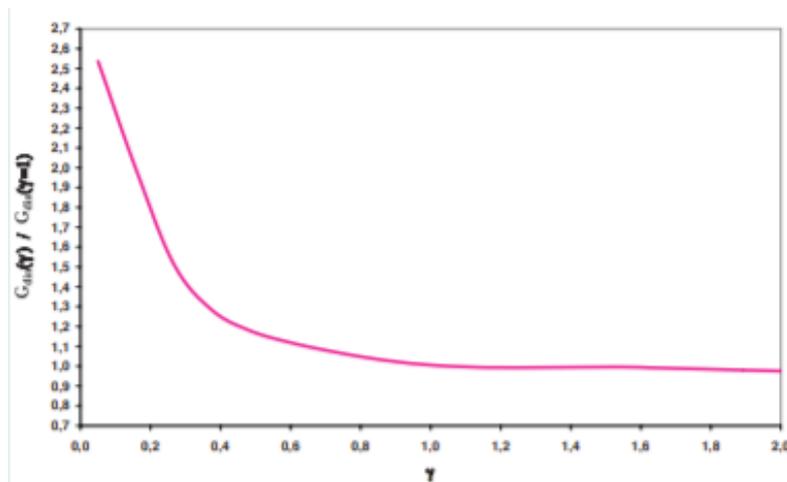


Figura 2.15 Variazione Rigidezza a taglio in funzione di γ

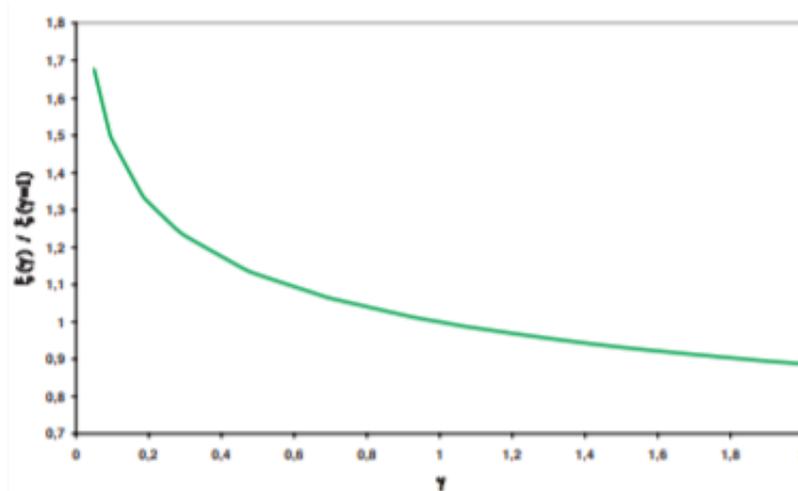


Figura 2.16 Variazione coefficiente di smorzamento in funzione di γ

Il comportamento meccanico degli isolatori ad alto smorzamento è influenzato da innumerevoli fattori, come: la composizione della miscela, l'ampiezza massima di deformazione, la velocità di deformazione, la storia di carico (“scragging”), l’irrigidimento alle grandi deformazioni dovuto alla cristallizzazione della gomma, il rilassamento dovuto ai cicli ripetuti e le condizioni ambientali.

Allo scopo di osservare il comportamento di una gomma vergine e la sua dipendenza dalla deformazione di taglio massima, è riportata una prova di taglio ciclica (Fig. 1.17) a spostamento imposto in cui, mantenendo costante la velocità di prova, sono state effettuati 20 cicli alla deformazione massima e successivamente 20 cicli a deformazioni inferiori.

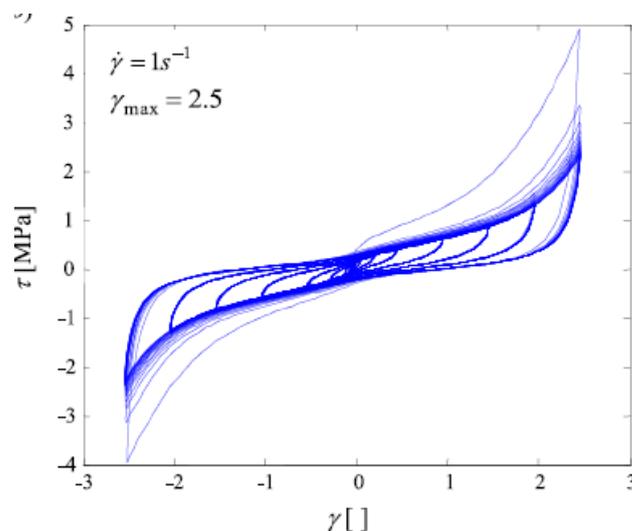


Figura 2.17 Prova a taglio semplice

Dalla figura precedente si può osservare come le proprietà meccaniche degli isolatori ad alto smorzamento variano in modo significativo durante i cicli di deformazione, a causa dello “scragging”, che corrisponde ad un cambiamento della struttura molecolare della gomma. Si può osservare che, una volta che il rilassamento delle sollecitazioni è stabile, per i cicli alla massima ampiezza di deformazione anche i cicli successivi ad ampiezze

inferiori sono stabili, e sono tutti inclusi nel ciclo stabile più grande perché la loro rigidità è influenzata dal rilassamento che è avvenuto per la massima deformazione.

Se effettuiamo la stessa prova, tenendo fissa la velocità di deformazione, ma variando l'ampiezza di deformazione massima, (Fig.2.18) le considerazioni fatte per il precedente esempio ancora valgono; tuttavia, è importante notare come la rigidità dei cicli stabili, ottenuta per differenti livelli di deformazione massima, è profondamente differente (Fig. 2.19). La differenza tra le rigidità è profondamente dipendente dalla storia di carico subita dal dispositivo, ciò può essere osservato dalla Fig. 2.20 in cui sono riportati i cicli stabili alla deformazione $\gamma=0,5$ per i quattro test considerati nella Fig. 2.18. È evidente che la rigidità dei cicli diminuisce all'aumentare della massima deformazione di taglio imposta.

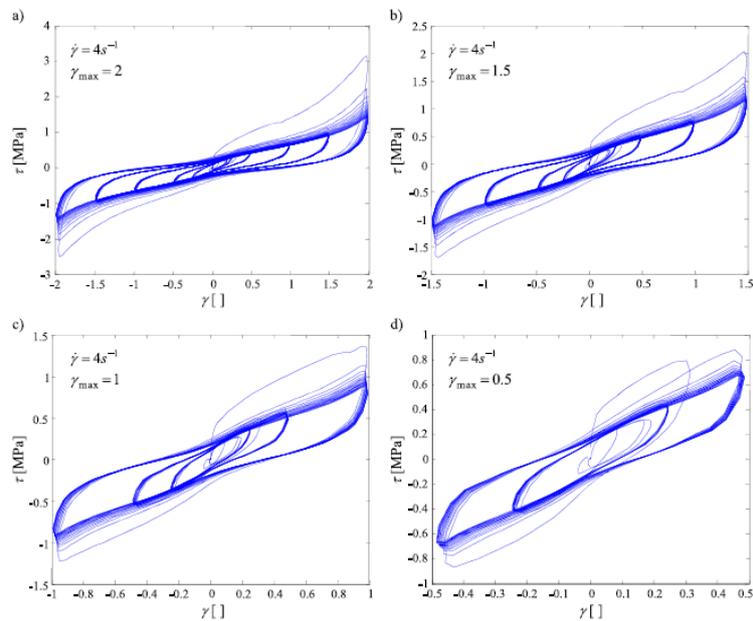


Figura 2.18 Test di taglio semplice caratterizzati da differenti deformazioni massime

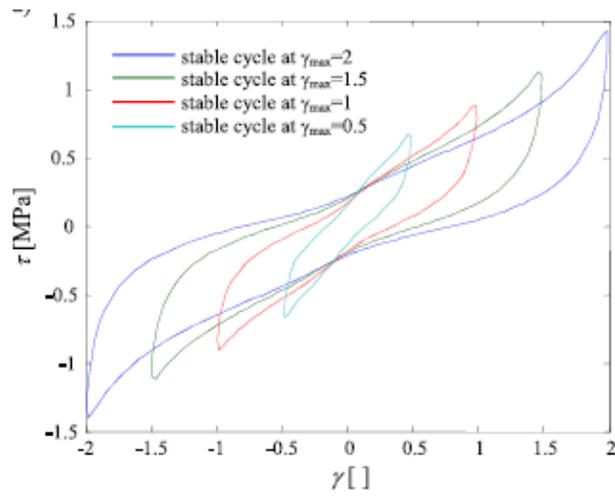


Figura 2.19 Cicli stabili alle diverse massime deformazioni

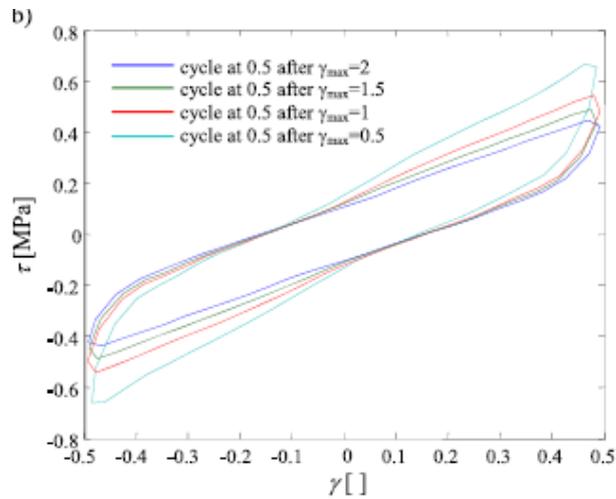


Figura 2.20 Cicli a 0,5 dopo differenti deformazioni massime

Per quanto riguarda la dipendenza dalla velocità di deformazione sono riportati i cicli effettuati alla deformazione massima, ma a differenze velocità di prova (Fig. 2.21).

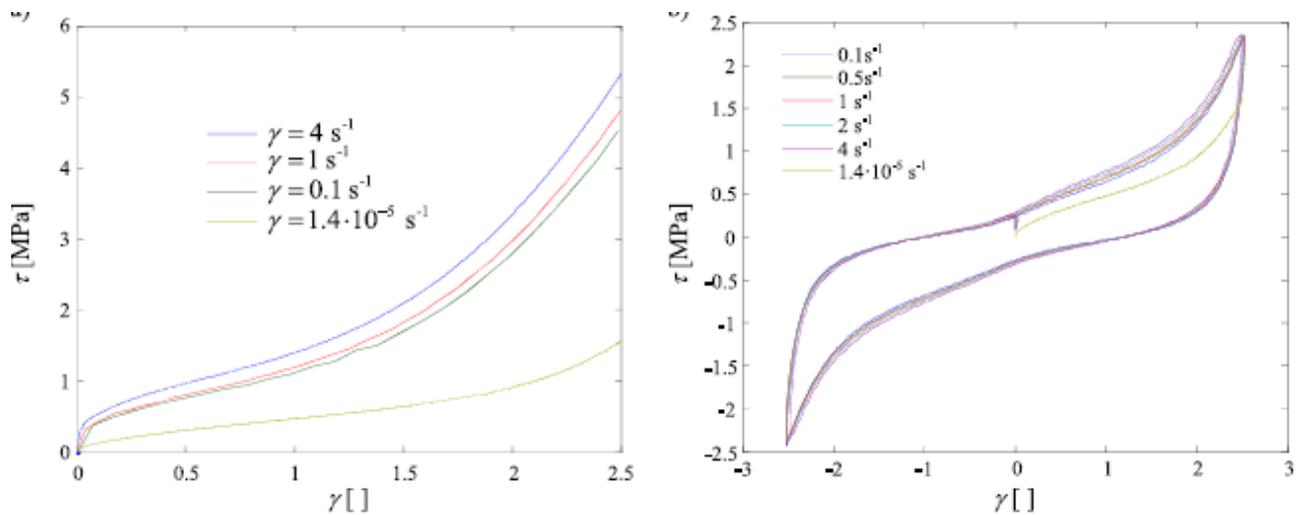


Figura 2.21 Cicli a differenti velocità di prova

Da come si può vedere per le frequenze di interesse per le applicazioni sismiche, la dipendenza delle curve dalla velocità di deformazioni non è molto elevata, anche se non trascurabile, e solo a frequenze molto basse (prove quasi statiche) le sollecitazioni si riducono significativamente.

La notevole differenza tra la risposta quasi statica ($f=1,4 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$) e gli altri cicli sta a significare che gli isolatori sono comunque dipendenti dalla velocità di carico, e quindi dovrebbero essere modellati con un comportamento viscoplastico piuttosto che un materiale elasto-plastico. Essendo un materiale viscoso è corretto ipotizzare che, una volta sollecitato, l'isolatore riesca a tornare alla sua configurazione iniziale in un determinato periodo di tempo.

Per indagare ulteriormente questo aspetto e separare la risposta elastica da quella viscosa, vengono riportate delle prove in cui sono stati imposti degli incrementi di deformazione. Tra uno step e l'altro si è mantenuta per un periodo di tempo la deformazione costante (Fig. 2.22).

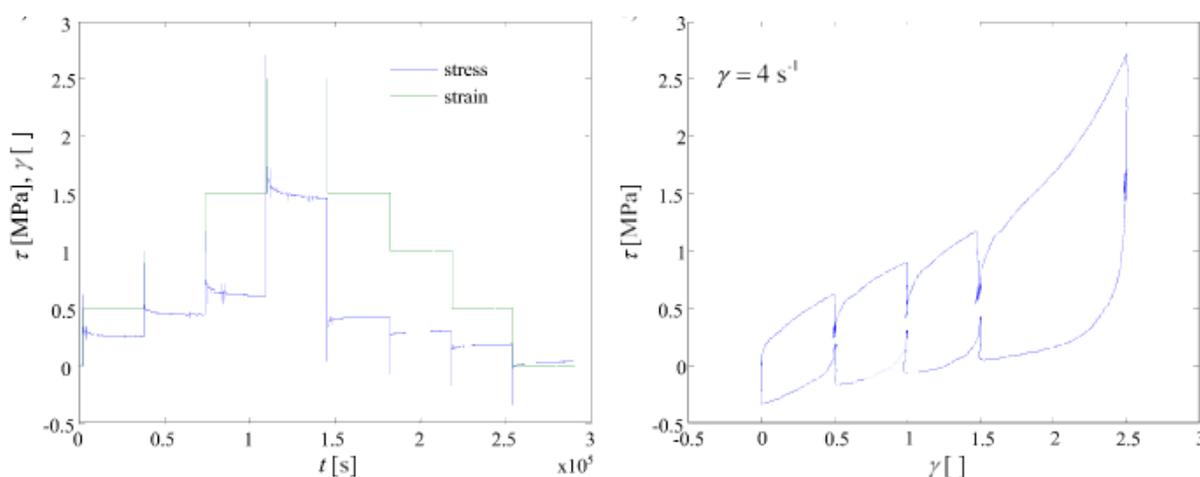


Figura 2.22 Step della prova e diagramma sforzo-deformazione

Dal grafico sforzo-deformazione si può vedere che i limiti superiore e inferiore del contributo elastico sono molto vicini, ciò conferma che la gomma è un materiale a memoria di forma e che dopo un periodo di tempo sufficientemente lungo da un evento sismico gli isolatori ad alto smorzamento ritornano al loro stato naturale senza deformazioni permanenti.

Per avvalorare ancora di più questo concetto, è riportato il grafico sforzo-deformazione di una prova a $\gamma=2,5$ eseguita su un isolatore che era stato testato alla stessa deformazione sei mesi prima. Il confronto (Fig. 2.23) tra le due prove mostra che la curva del test ripetuto dopo 6 mesi è molto vicina a quella della gomma vergine.

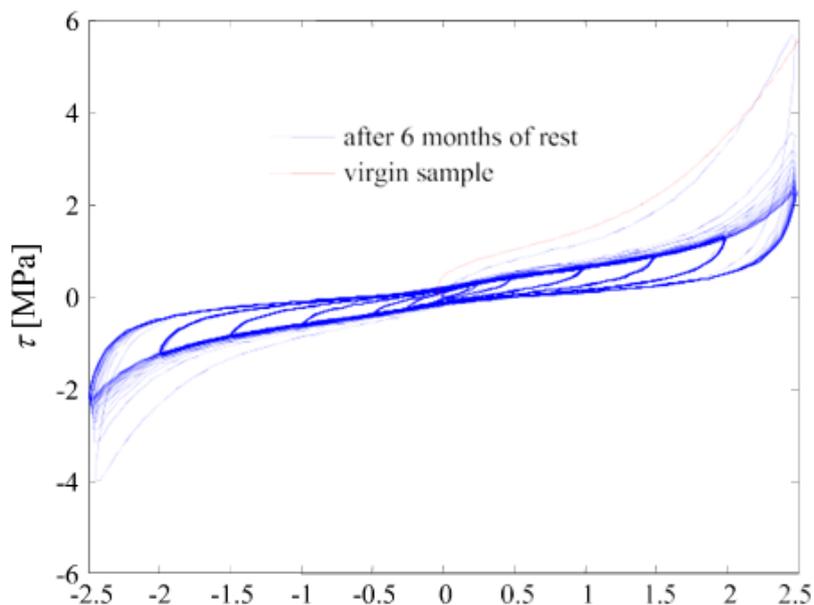


Figura 2.23 Recupero delle caratteristiche

È opportuno dire che i comportamenti precedenti sono riferiti ad un isolatore di un specifico costruttore; al variare del costruttore il comportamento del dispositivo è sostanzialmente diverso, a causa della diversa composizione della gomma.

2.2.2 Slitte

Sono dei dispositivi a scorrimento multi direzionali costituiti da due dischi di diverso diametro che scorrono l'uno su l'altro (Fig. 2.24). Le superfici di scorrimento più utilizzate sono di acciaio inossidabile lucidato e PTFE (teflon) lubrificato. Sono caratterizzate da un basso coefficiente di attrito (<1%) e sono utilizzate in accoppiamento con gli isolatori elastomerici, allo scopo di ottenere periodi di isolamento maggiori (sistemi di isolamento ibrido).

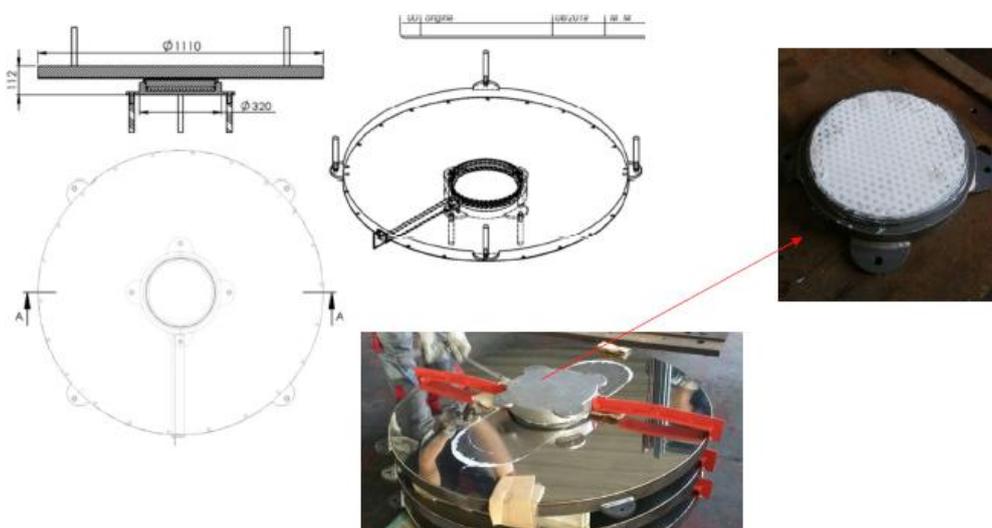


Figura 2.24 Dettaglio slitte

È riportato un esempio di un ciclo forza-deformazione Fig. 1.25.

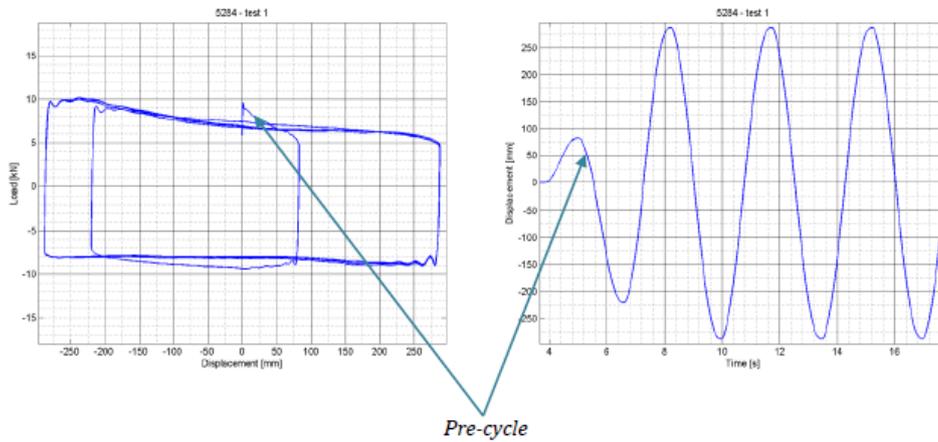


Figura 2.25 Esempio comportamento slitte

Il loro comportamento può essere assimilabile ad un comportamento rigido-plastico; il coefficiente di attrito può essere suddiviso in due aliquote: attrito statico (o di primo distacco) e attrito dinamico. L' attrito dinamico è funzione della lubrificazione delle superfici di contatto, della pressione di contatto, della velocità di scorrimento e della temperatura dell'aria. L'attrito statico non è altro che il contributo da vincere per far avvenire lo scorrimento. Esso risulta maggiore rispetto al dinamico e può essere osservato guardando il picco presente nell'immagine precedente (Fig. 2.25).

2.3 Verifiche di progetto sugli isolatori elastomerici

Una volta scelta la tipologia di dispositivo elastomerico da adottare è doveroso svolgere le verifiche su ogni dispositivo che compone il sistema di isolamento. Come la progettazione, anche le verifiche devono essere effettuate allo SLC e bisogna soddisfare, secondo le NTC 2018:

- Verifica alla massima deformazione dovuta al sisma:

$$\gamma_s = \frac{d_{max}}{t_e} \leq \frac{\gamma^*}{1,5} \leq 2$$

Dove: d_{max} è il prodotto tra lo spostamento ricavato dallo spettro allo SLC e il coefficiente amplificativo, che tiene conto degli effetti torsionali, pari a 1,2, e γ^* è la deformazione a taglio massima raggiunta nelle prove di qualifica.

- Verifica alla deformazione locale (Fig. 2.27):

$$\gamma_t = \gamma_c + \gamma_s + \gamma_a = \frac{1,5V}{G_{din}S_1A_r} + \frac{d}{t_e} + a^2 2t_i t_e \leq 5$$

Dove:

- $V=N_{max}$, massimo sforzo di compressione agente sul dispositivo;
- $a^2 = 3(\sqrt{a_x^2 + a_y^2}) \frac{D^2}{4}$;
- D , diametro dell'isolatore
- S_1 , fattore di forma primario;
- t_e , spessore totale della gomma;
- t_i , spessore del singolo strato di gomma;
- G_{din} , modulo di deformazione a taglio;
- A_r , area di sovrapposizione in configurazione deformata (Fig. 2.28)

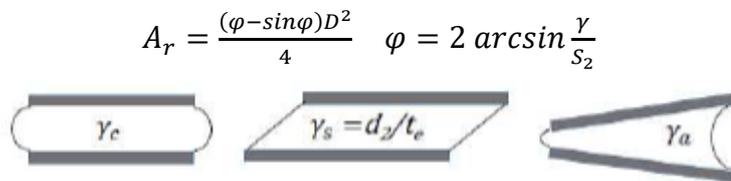


Figura 2.27 Vari contributi nella verifica a deformazione locale

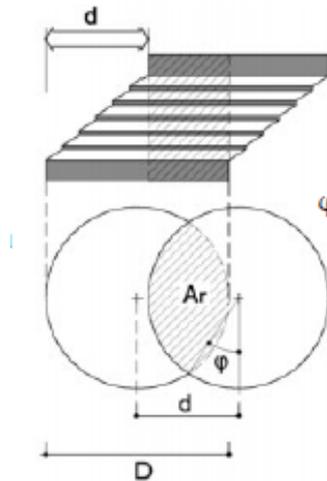


Figura 2.28 Area di sovrapposizione in configurazione deformata dell'isolatore

- Verifica a trazione delle piastre in acciaio:

$$\sigma_s = \frac{1,3V(t_1+t_2)}{A_r t_s} < f_{yk}$$

Dove t_s è lo spessore della piastra di acciaio.

- Verifica a trazione:

$$\sigma_{tr} = \frac{T_{max}}{A_{is}} \leq \min(2G, 1MPa)$$

Questa verifica è necessaria farla solo per gli isolatori che risultano essere caricati a trazione.

- Verifica a compressione:

$$N_{max} \leq V_{cr}/2$$

Dove V_{cr} , carico critico in configurazione deformata, si calcola:

$$V_{cr} = G_{din} A_r (\gamma_s) S_1 S_2$$

2.4 Cenni di normativa sui controlli di accettazione e di qualifica

Dopo la determinazione dei parametri di progetto del sistema di isolamento, il progettista andrà a scegliere il dispositivo più idoneo. La fase, che va dalla scelta del dispositivo da adottare alla posa in opera, è divisa nei seguenti step:

- Identificazione del fabbricante;
- Identificazione e qualificazione del prodotto;
- Controlli di accettazione;
- Posa in opera.

Tutti i dispositivi devono recare marcatura CE (DPR 246/93) e pertanto il fabbricante deve essere in possesso del CPR (Certificate of Constancy of Performance) che attesti la possibilità di produrre in accordo con le direttive europee.

2.4.1 Identificazione e Qualificazione del prodotto

Tutti i materiali e prodotti a uso strutturale devono essere:

- Identificati a cura del fabbricante;
- Qualificati sotto la responsabilità del fabbricante.

Le procedure di qualifica hanno lo scopo di dimostrare che il dispositivo è in grado di mantenere la propria funzionalità nelle condizioni d'uso previste durante la vita utile di progetto. La qualificazione dei dispositivi antisismici avviene seguendo la norma europea armonizzata UNI EN 15129 capitolo 8. Tale norma esplicita: i requisiti prestazionali degli isolatori, le prove da dover effettuare e il numero di dispositivi da testare.

I requisiti prestazionali definiscono le caratteristiche quantificabili che devono essere determinate per gli isolatori elastomerici per mezzo delle prove tipo. Per la UNI EN 15129 si deve controllare:

- Dipendenza delle caratteristiche orizzontali dalla deformazione al taglio della gomma. Le caratteristiche orizzontali, rigidità effettiva K_b e rapporto di smorzamento effettivo $\xi_{\text{eff},b}$, sotto carico ciclico devono essere misurate alle seguenti deformazioni al taglio della gomma: $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, $\pm 50\%$ e $\pm 100\%$. Se la deformazione a taglio $\varepsilon_{q,E}$, allo spostamento di progetto, è maggiore al 100%, si devono aggiungere ulteriori ampiezze di deformazione seguendo ciò che è indicato nel prospetto 9 della UNI EN 15129. La frequenza di prova è di 0,5 Hz.
Il requisito prestazionale richiesto è che i valori K_b e $\xi_{\text{eff},b}$ al terzo ciclo alla deformazione di taglio di progetto della gomma devono ambedue ricadere entro il $\pm 20\%$ del valore di progetto;
- Dipendenza delle caratteristiche orizzontali dalla frequenza. L'effetto della frequenza sulle caratteristiche orizzontali deve essere determinato con prove

eseguite con un'ampiezza di deformazione al taglio della gomma del $\pm 100\%$. Le caratteristiche orizzontali devono essere misurate a tre frequenze; i valori raccomandati sono: 01 Hz, 0,5 Hz, 1,0 Hz. (La normativa italiana NTC 2018 differisce dalla UNI EN 15129 nel numero di frequenze da adottare, infatti le frequenze richieste sono 0,1 Hz e 0,5 Hz). Per ciascuna frequenza di prova si devono riportare i valori K_b e $\xi_{\text{eff},b}$ al terzo ciclo, i quali, ai valori di minimo e di massimo della frequenza, non devono differire più del 20% dal valore alla frequenza media;

- Dipendenza dalla temperatura. Le variazioni delle caratteristiche orizzontali tra le temperature superiore ed inferiore di servizio, T_U e T_L , devono essere determinate seguendo ciò che è presente nel punto 8.2.4.1 della UNI EN 15129. Le caratteristiche orizzontali devono essere misurate ad un'ampiezza di deformazione al taglio della gomma del $\pm 100\%$, con un campo di temperatura che si estende da T_U a T_L . Si deve includere una prova a 23°C . I valori K_b e $\xi_{\text{eff},b}$, al terzo ciclo, non devono scostarsi, alla temperatura più bassa, più del 80% dai corrispondenti valori a 23°C e non devono differire, per la temperatura più alta, più di $\pm 20\%$ da quelli a 23°C ;
- Dipendenza dai cicli ripetuti. Le caratteristiche orizzontali dell'isolatore devono rimanere costanti durante i cicli ripetuti di carico. L'ampiezza di deformazione al taglio della gomma deve essere uguale al 100% o alla deformazione al taglio di progetto se richiesto nelle specifiche di progetto. Il requisito di caratteristiche costanti di K_b e $\xi_{\text{eff},b}$ è soddisfatto quando:
 - Il rapporto tra il minimo e il massimo valore di K_b misurato nei cicli tra il secondo ed il decimo non deve essere minore di 0,7;
 - Il rapporto tra il minimo e il massimo valore di $\xi_{\text{eff},b}$ misurato nei cicli tra il secondo e il decimo non deve essere minore di 0,7;
 - Il rapporto tra il minimo ed il massimo valore di K_b misurato nei cicli tra il primo ed il decimo non deve essere minore di 0,6.
- Capacità di compressione sotto lo spostamento orizzontale nullo. L'isolatore deve essere capace di sopportare un carico verticale pari a $1,3 N_{\text{Sd,ULS}}$ per almeno 3 minuti durante i quali non si devono verificare segni di cedimento.
- Capacità di spostamento orizzontale. Deve essere verificata sotto i carichi assiali $N_{\text{ED,max}}$ e $N_{\text{ED,min}}$ fino a uno spostamento pari a $\gamma_b d_{\text{Ed}}$. γ_b è il fattore parziale per gli isolatori elastomerici, ed il suo valore è assunto pari a 1,15. La prova deve essere condotta con un carico a rampa. I requisiti sono che il carico deve crescere monotonicamente aumentato fino al massimo spostamento e che l'isolatore non deve mostrare alcun segno di cedimento significativo alla fine della prova (segni di perdita di adesione, fessure superficiali o imperfezioni).

- **Rigidità a compressione.** La rigidità K_v dell'isolatore deve essere determinata tra $1/3 N_{Sd,SLS}$ e $N_{Sd,SLS}$, dove $N_{Sd,SLS}$ è il carico assiale derivato dalla combinazioni di azioni secondo la EN 1990. Il requisito è che K_v deve ricadere entro il $\pm 30\%$ del valore determinato nella prova tipo, e l'ispezione visiva al massimo carico non deve mostrare segni di imperfezioni o rotture.
- **Effetto dell'invecchiamento.** Le variazioni delle caratteristiche orizzontali dell'isolatore devono essere stimate inferiori al 20% della vita utile prevista dell'isolatore. Le variazioni devono essere determinate mediante prove di invecchiamento accelerato sul materiale elastomerico dell'isolatore e facendo riferimento a qualsiasi dato disponibile direttamente riferibile alla vita utile di esercizio di dispositivi fabbricati con materiali simili.
- **Effetto dello scorrimento (creep).** La deformazione da scorrimento a breve termine prodotta dal carico normale $N_{Sd,SLS}$, deve essere misurata se richiesto nelle specifiche di progetto. Si raccomanda che la percentuale di scorrimento tra 10 min e 104 min sia inferiore al 20% della deformazione dopo 10 min, se non diversamente specificato.

La tipologia di prove da eseguire e i requisiti della prova di tipo (prove di qualifica) o di controllo di produzione in fabbrica (prove di accettazione) sono sintetizzate nel prospetto 13 (pag. 59) della UNI EN 15129. Le prove devono essere fatte ogni qualvolta che un isolatore viene modificato nella composizione della miscela, nella geometria e nel sistema di ancoraggio.

Per ciascun tipo di isolatore, le prove a compressione di controllo di produzione in fabbrica e alla compressione e taglio (vedere prospetto 13) devono essere eseguite sul primo isolatore della produzione. Successivamente, almeno il 20% degli isolatori prodotti di ciascun tipo devono essere soggetti ad ambedue le prove di controllo di produzione in fabbrica. Per progetti che coinvolgono una struttura supportata da un numero di quattro o meno isolatori, tutti gli isolatori prodotti per questa determinata struttura devono essere sottoposti a prova.

La normativa italiana fissa la massima variazione che devono avere le caratteristiche dell'isolatore (K_b , K_v , $\xi_{eff,b}$) a seconda della fornitura, invecchiamento, temperatura e frequenza di prova (Fig. 2.29).

Tab. 11.9.IV

	Fornitura	Invecchiamento	Temperatura	Frequenza di prova
K_b	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$
K_v	-30%	-	-	-
ξ_b	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$

Figura 2.29 Variazione consentite dei valori caratteristici

2.4.2 Prove di accettazione sui dispositivi

Le prove di accettazione sono l'ultimo step prima della messa in opera dei dispositivi, sono obbligatorie per tutte le tipologie di dispositivi e sono demandate al Direttore dei Lavori il quale è tenuto ad accertare e a verificare la documentazione di qualifica. Nel caso le caratteristiche dei dispositivi non siano conformi, il direttore dei lavori dovrà respingere il lotto.

Le metodologie per le prove di accettazione ed i relativi criteri di valutazione sono indicate nella norma europea armonizzata con riferimento alle prove di Controllo di Produzione in Fabbrica (prospetto 13). Il numero di dispositivi da testare è specificato nella norma italiana; devono essere almeno testati il 20% dei dispositivi, e comunque non meno di 4 e non più del numero di dispositivi da mettere in opera.

Il limite inferiore proposto dalla norma è adeguato nel caso di strutture tradizionali, nel caso di strutture complesse o che hanno uno scopo importante (ospedali, università,...) il numero di dispositivi da testare risulta comunque ridotto. Un metodo alternativo al test di tutti i dispositivi consiste nell'effettuare una prova Snap – back sulla struttura ultimata. Tale prova permette di osservare il reale comportamento del sistema di isolamento e la risposta dinamica della sovrastruttura.

2.5 Prova Snap-back

Al fine di conoscere il reale comportamento dinamico di una struttura isolata alla base, è possibile eseguire una prova di rilascio, che prende il nome di prova Snap-back. La prova consiste nello muovere la struttura, attraverso un sistema di spinta, ad un determinato spostamento, relativo ad un determinato stato limite, per poi rilasciare causando così delle oscillazioni libere, simulando un evento sismico. In questo modo le prestazioni del sistema di isolamento in sito possono essere osservate e confrontate con le caratteristiche di progetto. È possibile effettuare con lo stesso meccanismo di spinta delle prove quasi statiche allo scopo di osservare le proprietà statiche del sistema di isolamento.

Nell'ultimi decenni molte di queste prove sono state effettuate in Italia allo scopo di ricerca. Successivamente saranno descritte alcune prove effettuate negli ultimi anni, per poi passare al caso studio in esame.

2.5.1 Ospedale Policlinico di Palermo

L'ospedale Policlinico di Palermo è una struttura isolata alla base, nel quale il sistema d'isolamento è costituito da isolatori a scorrimento a doppia superficie curva. La pianta dell'edificio non è regolare e ha dimensioni di 46,3 m x 21,3 m. La sovrastruttura, realizzata con elementi in acciaio, è costituita da 3 piani con una altezza di interpiano di 4m.

Sono state effettuate: delle prove di spinta quasi statiche, allo scopo di identificare le fondamentali caratteristiche meccaniche (es. coefficiente di attrito statico) e successivamente verificarle con le ipotesi di progetto, e delle prove di rilascio (prove Snap-back) al fine di osservare il comportamento dinamico del sistema e la capacità di ricentraggio dei dispositivi. La direzione della spinta è stata fissata ortogonalmente al lato più lungo della struttura, nel quale i pilastri forniscono il maggior contributo in termini di rigidità. L'applicazione della spinta è fissata in corrispondenza del centro di massa della struttura, usualmente corrispondente al centro di rigidità del sistema di isolamento. (Fig. 2.30).

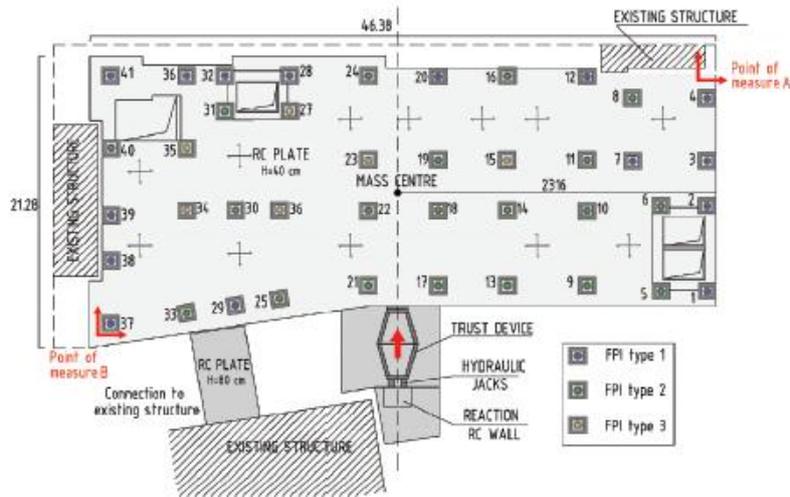


Figura 2.30 Posizionamento sistema di spinta

La forza è applicata attraverso due martinetti idraulici posti in serie con il dispositivo di spinta e viene misurata con l'ausilio di due celle di carico.

Il sistema di spinta (Fig. 2.31) è costituito da sei aste d'acciaio consecutive collegate mediante perni; i due nodi centrali sono collegati da una barra in acciaio (fusibile) disposta ortogonalmente alla direzione di spinta e in posizione baricentrica rispetto al dispositivo di spinta stesso. Durante la fase di carico il fusibile è sollecitato a trazione, la sua rottura permette il rilascio della struttura. Per le prove dinamiche (Snap-back) il fusibile è stato dimensionato per rompersi ad una determinata forza, che corrisponde ad un determinato spostamento della struttura; per le forze statiche è stato sovradimensionato per evitare qualsiasi tipologia di rottura. Il carico sul fusibile può essere determinato dalla configurazione geometrica del sistema.

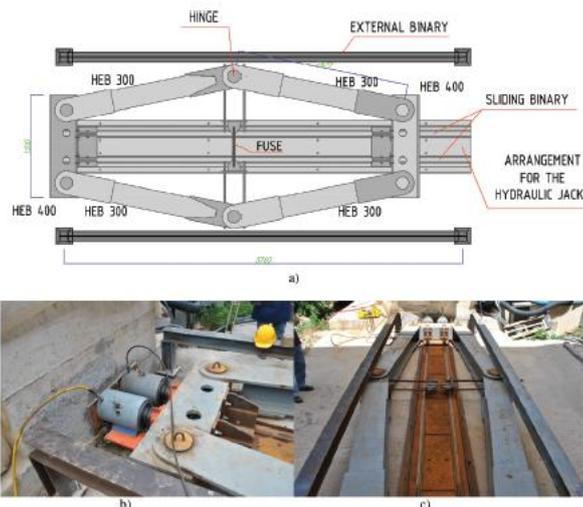


Figura 2.31 Configurazione sistema di spinta

Il contrasto del sistema è costituito da un muro, opportunamente progettato per resistere alla massima forza orizzontale applicata.

La risposta strutturale è stata registrata attraverso trasduttori di spostamento e accelerometri, quest'ultimi disposti per ogni piano.

Le prime prove effettuate sono stati due test quasi statici, imponendo due spostamenti differenti, per valutare:

- L'effettiva massa della sovrastruttura;
- Le caratteristiche meccaniche del sistema di isolamento, in particolare il coefficiente di attrito statico degli isolatori a scorrimento;
- La vera forza da applicare al sistema per arrivare allo spostamento di progetto del sistema di isolamento;
- La sezione del fusibile, che deve essere scelta, basandosi solo sulla forza di spinta.

Vengono riportati i risultati ottenuti dalle prove quasi statiche in Fig. 2.32

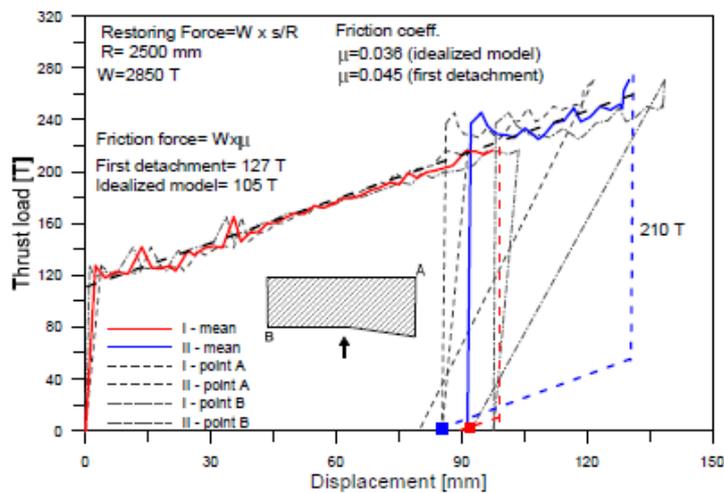


Figure 5: First quasi-static test: two-loading-unloading cycles.

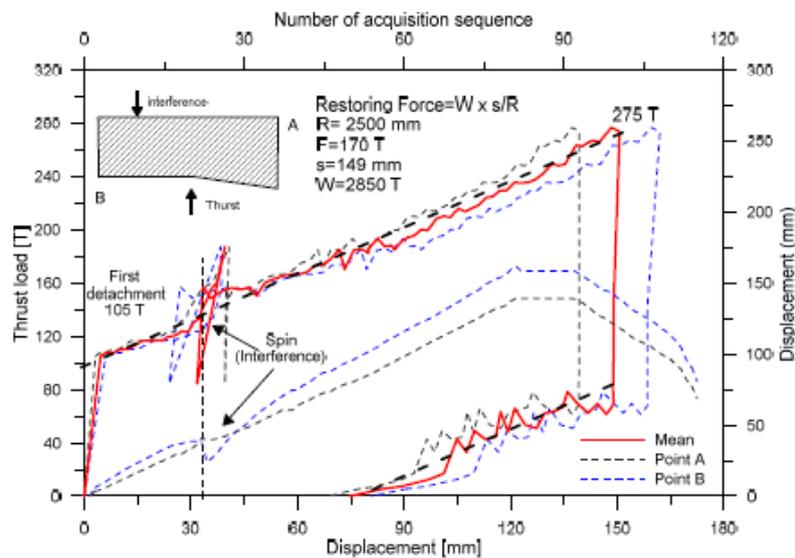


Figure 6: Second quasi-static test: single-loading-unloading cycle.

Figura 2.32 Risultati prove quasi statiche

Successivamente sono state effettuate due prove dinamiche di rilascio per determinare il coefficiente di attrito dinamico e la capacità di ricentraggio del sistema. Sono riportati i risultati delle due prove di rilascio Fig. 2.33

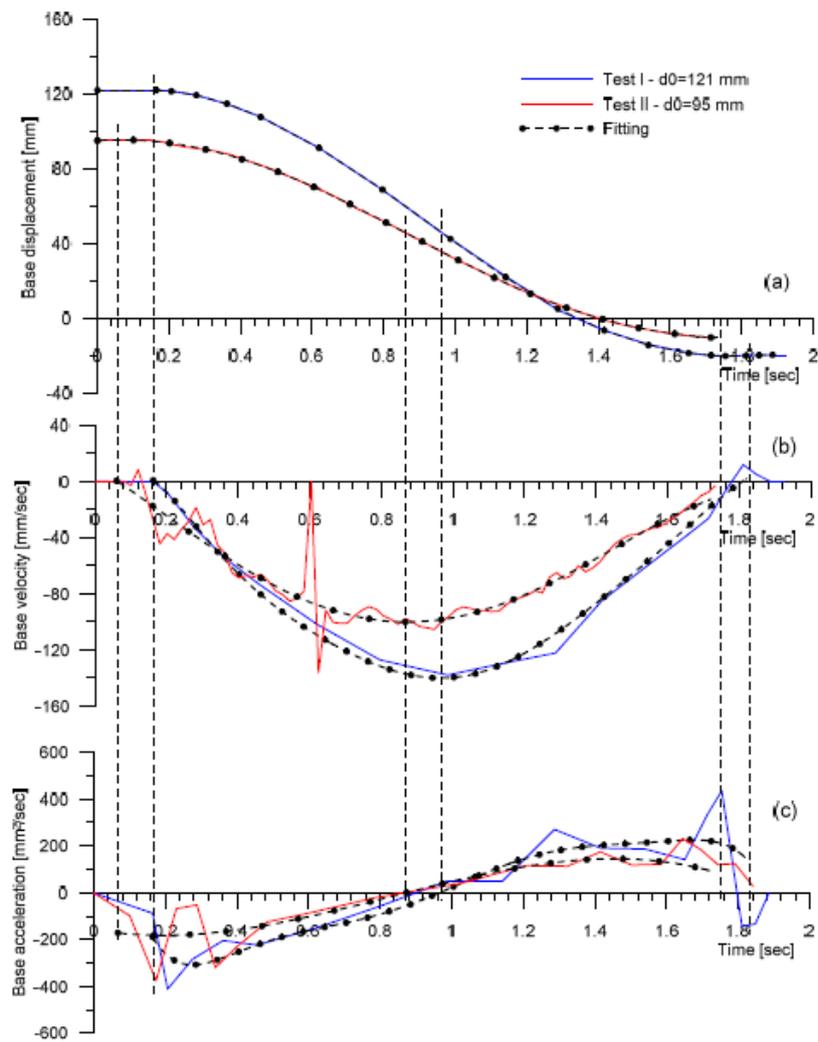


Figura 2.33 Test Snap-back. Misurazioni tempo - spostamento (a), velocità (b), accelerazione (c)

2.5.2 Prova Snap-back a Rapolla (PZ)

In questo studio diverse prove Snap-back sono state effettuate su una struttura residenziale per investigare il diverso comportamento tra un sistema di isolamento ibrido (slitte + isolatori HDRB) e uno composto solo da isolatori in gomma ad alto smorzamento.

La struttura ha una pianta rettangolare (22,6 m x 13,3 m) e risulta regolare in altezza; la distanza di interpiano è di 3 m e l'altezza totale dell'edificio è di 12 m (Fig. 2.34)

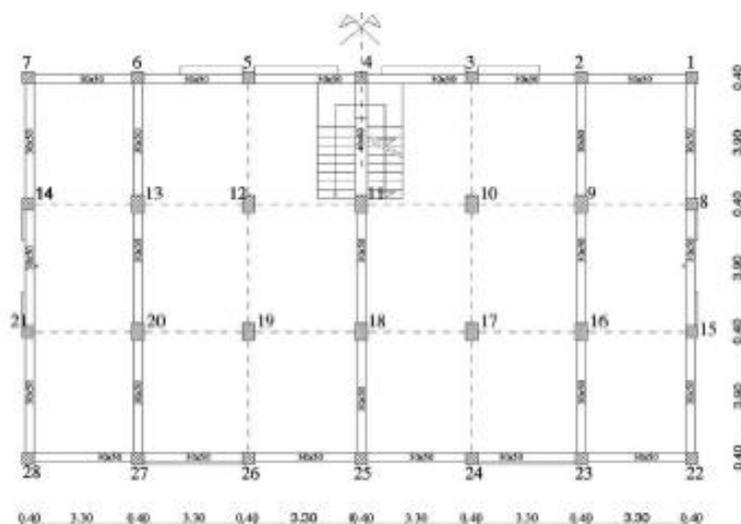


Figura 2.34 Pianta edificio

Il sistema di isolamento è composto da dispositivi HDRN, esso è caratterizzato da un sistema di appoggi speciali, che permette di cambiare configurazione del sistema stesso. Infatti tutti e 28 gli appoggi sono composti da dispositivi di scorrimento montati al di sopra degli HDRN. Ciò permette, a seconda del sistema da testare, di far lavorare in maniera alternata o gli isolatori o i dispositivi a scorrimento bloccando rispettivamente la parte inferiore o la parte superiore. In questo modo sulla stessa struttura è possibile testare i due sistemi.

Il sistema di spinta, costituito da un arco a tre cerniere, è caricato verticalmente sulla cerniera centrale per mezzo di un martinetto idraulico dotato di una cella di carico, allo scopo di misurare la forza impressa alla struttura. Durante la fase di carico l'arco si abbassa fino a raggiungere la sua posizione instabile, tre cerniere allineate, determinando così la sconnesione del dispositivo di spinta e il rilascio della struttura (Fig. 2.35). Il sistema di spinta, oltre ad essere utilizzato per le prove dinamiche, può essere utilizzato anche per realizzare delle prove statiche. Tutto il sistema è completamente recuperabile e permette il ripetersi del test dopo poco tempo.

Il sistema di contrasto è costituito da un solettone, avente come sistema di fondazione 5 pali, e progettato per la massima spinta di progetto.



Figura 2.35 Sistema di spinta durante le fasi di carico e di rilascio

Il sistema di acquisizione dei dati è composto da: sei trasduttori di spostamento, per misurare gli spostamenti del piano di isolamento, del sistema di isolamento rispetto al muro e del muro rispetto al terreno; da accelerometri orizzontali posti sia ad ogni piano che sul sistema di contrasto e da accelerometri verticali posti all'ultimo piano.

Vengono riportate le varie prove di rilascio condotte sulla struttura nella seguente figura (Fig. 2.36).

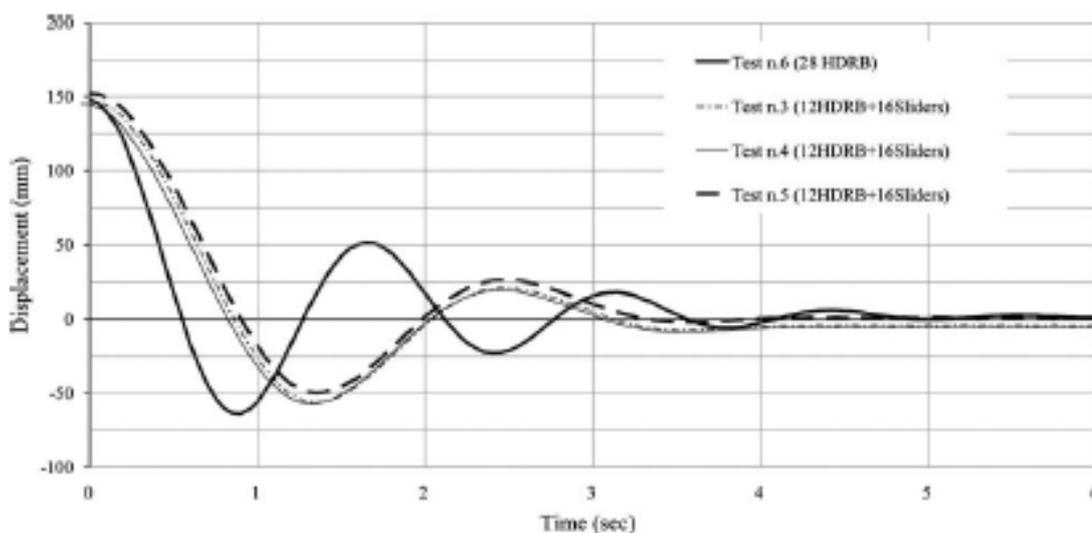


Figura 2.36 Prove di rilascio nelle diverse configurazioni del sistema di isolamento

3.0 NUOVO CENTRO DI RICERCA UNIVERSITARIO DI CAMERINO

Dopo gli eventi sismici del Centro Italia del 2016 che hanno gravemente danneggiato la città di Camerino, molti edifici sono in ricostruzione o sono da ricostruire. Uno di questi è il Centro di Ricerca dell'Università di Camerino; la struttura è stata concepita favorendo soluzioni che garantiscono la velocità di esecuzione e un alto livello di sicurezza, con particolare accorgimento alle azioni sismiche.

La soluzione strutturale consiste in una struttura isolata alla base, in cui la sovrastruttura è in acciaio con controventi dissipativi e la sottostruttura è realizzata con plinti su più pali posti a diverse quote al fine di adattarsi alla complessa morfologia del terreno.

In particolare si è scelto di adottare un sistema di isolamento ibrido composto da isolatori elastomerici ad alto smorzamento (HDR) e da slitte, aventi un ridotto attrito, allo scopo di ottenere un alto periodo di isolamento. La scelta di questo sistema è dovuta principalmente al suo ottimale comportamento sia per terremoti di bassa/media intensità che per quelli elevati. Tale sistema permette inoltre, in relazione alla pericolosità del sito, di affrontare spostamenti non troppo elevati anche con smorzamenti di medie entità. Perciò soluzioni altamente dissipative, come gli isolatori elastomerici con nucleo in piombo (LRB) o isolatori a pendolo (CSS), non risultano necessarie in questo caso; tali soluzioni sono caratterizzate da un alto livello di smorzamento e rigidità per sismi di bassa intensità, che potrebbero portare a delle elevate accelerazioni di piano. Ciò risulta molto pericoloso per il Centro di Ricerca date le attività potenzialmente ad alto rischio nei laboratori di chimica e fisica, che potrebbero ospitare macchinari molto sensibili e sostanze pericolose.

Sono state adottate due soluzioni complementari per garantire un'adeguata resistenza nei confronti delle azioni estreme, maggiori di quelle di progetto. Per entrambe il limite di capacità richiesto è stato assunto maggiore rispetto allo spostamento massimo di progetto (SLC, con periodo di ritorno di $T_r=950$ anni) al fine di evitare per esempio l'uscita delle slitte dal loro piano di scorrimento e/o l'impatto dell'edificio con strutture vicine. La prima consiste nel margine di sicurezza adottato nei confronti della massima capacità di spostamento degli isolatori e dei giunti sismici. La seconda consiste nell'adottare una struttura in acciaio dotata di controventi elasto-plastici, capaci di limitare sproporzionate conseguenze per azioni orizzontali ancora più grandi.

Di seguito verranno descritte le caratteristiche della sovrastruttura, della sottostruttura e del sistema di isolamento; non verranno approfondite le analisi dinamiche lineari e non lineari condotte per la verifica delle azioni sui dispositivi e per la stima del livello di rischio dell'edificio.

3.1 Sottostruttura

Le fondazioni sono progettate al fine di ridurre l'impatto del profilo del suolo, caratterizzato da una notevole pendenza. Le caratteristiche del suolo e lo spessore dello strato deformabile hanno portato alla scelta di utilizzare delle fondazioni profonde. (Fig. 3.1)

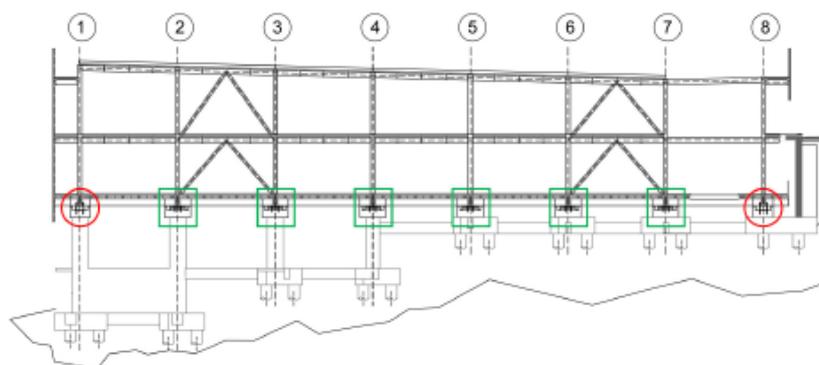


Figura 3.1 Sezione longitudinale della struttura (cerchi in rosso dispositivi HDRB e in verde slitte piane)

Il sistema di fondazione è costituito da plinti su più pali aventi diametro di 0,8 m e lunghezza di 1,4 m. I plinti di forma variabile di altezza pari a 1,2 m sono collegati tra loro da travi 0,4 x 0,8 m in c.a.. Tutti questi elementi sono realizzati in cls C25/30 con barre in acciaio B450C.

Gli elementi che collegano il sistema di isolamento con i plinti sono costituiti da pilastri aventi una sezione circolare di 1,2 m di diametro o una sezione quadrata 1x1 m, quest'ultimi presenti nella parte a valle dell'edificio. Sono realizzati con un cls C28/35 e barre in acciaio B450C.

Alla testa di ogni pilastro, un capitello permette l'alloggio dei dispositivi, costituenti il sistema di isolamento, la loro facile manutenzione e sostituzione. I capitelli (Fig. 3.3) sono di diversa altezza al fine di avere un'allineamento verticale di tutti i dispositivi; inoltre sono dotati, per ogni lato, da supporti di sicurezza, allo scopo di garantire il trasferimento dei carichi verticali in caso di emergenza (perdita di capacità di sostegno di uno o più dispositivi).

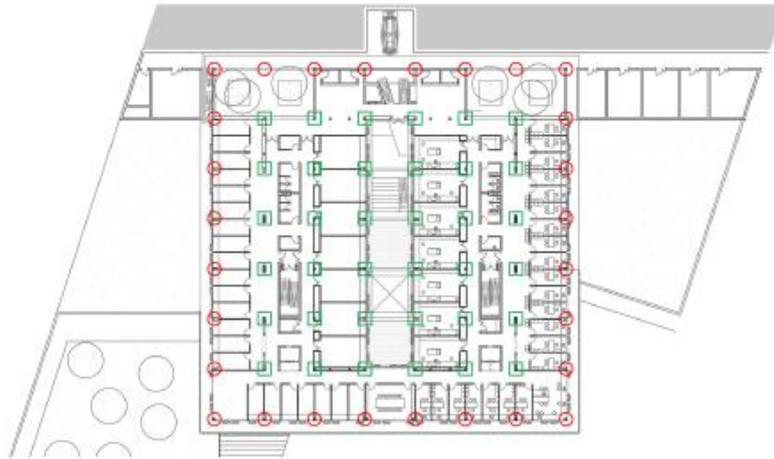


Figura 3.2 Pianta CRU (cerchi in rosso dispositivi HDRB e in verde slitte piane)

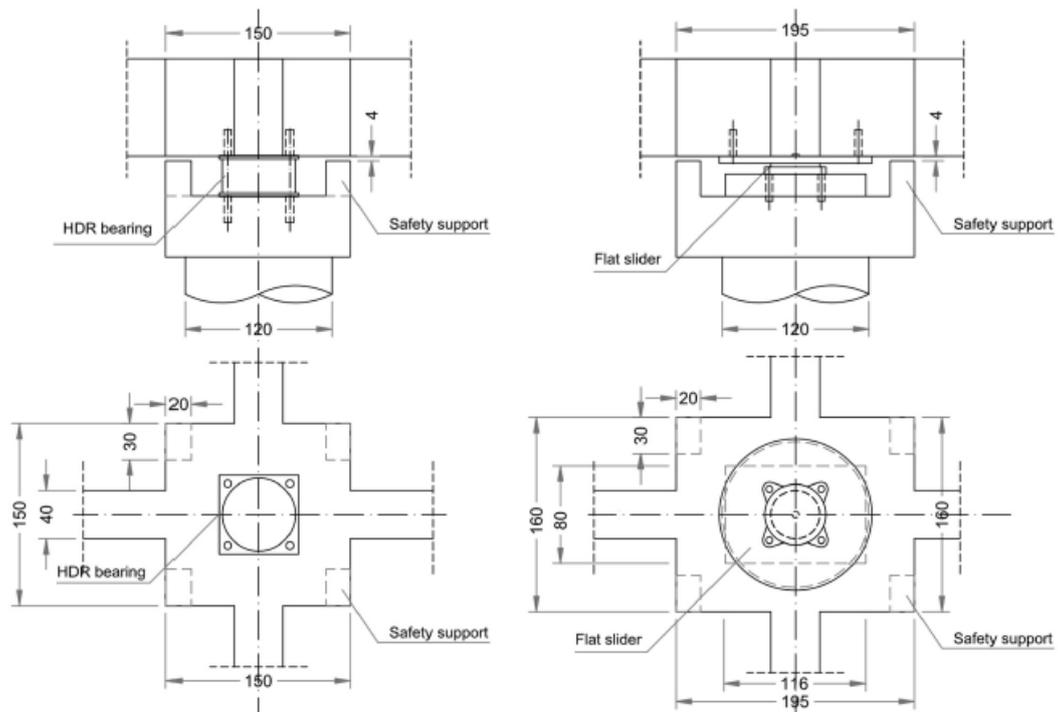


Figura 3.3 Capitelli per i dispositivi dell'isolamento sismico

3.2 Sovrastruttura

La sovrastruttura è in acciaio e articolata su due livelli; il sistema strutturale è costituito da travi e pilastri, portanti dei carichi verticali, e da controventi dissipativi disposti a V inversa, che assicurano la resistenza alle azioni orizzontali.

I pilastri sono costituiti da profili di tipo HE300B per entrambe le elevazioni, mentre le travi hanno diversa sezione a seconda della tipologia: le principali realizzate con profili HE400A e le secondarie con profili IPE360.

Il primo piano al di sopra del sistema di isolamento è costituito da lastre prefabbricate in c.a. e travi di sezione 0,4 x 0,8 m disposte in entrambe le direzioni e progettate considerando i momenti indotti dagli effetti P- Δ dovuti dai grandi spostamenti dei dispositivi di isolamento durante il sisma. Il secondo e il terzo piano sono costituiti da lamiera ondulata e lastre in c.a., sostenute da travi secondarie in acciaio. Per lo sbalzo esterno, presente in tutti e tre i livelli, vengono utilizzati i sistemi strutturali dei rispettivi piani.

Ci sono due scale che collegano verticalmente l'intero l'edificio. Poiché queste attraversano il piano di isolamento, sono stati posizionati dei gap sismici al di sotto del primo piano e la rampa di arrivo è stata tagliata per garantire uno spostamento relativo di 400mm (Fig. 2.4). Ci sono anche altre scale: una in cls che connette la sotto-struttura e il primo piano (dotata di 'tagli' sismici per permettere gli spostamenti relativi) e due in acciaio che connettono i piani della sovrastruttura.

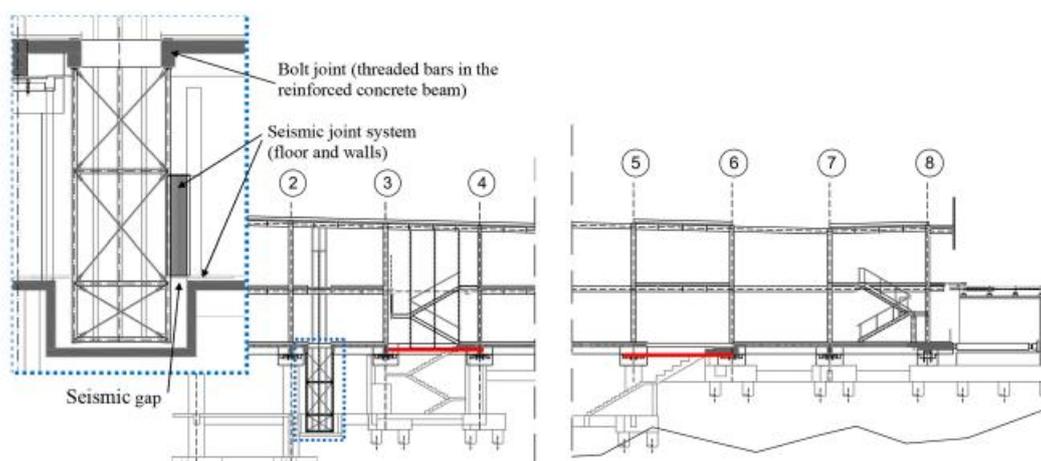


Figura 3.4 Sezione della struttura (in rosso i tagli sismici delle scale mentre l'area in blu evidenzia il telaio dell'ascensore)

Sono presenti tre ascensori, due dei quali raggiungono la sottostruttura. Per quest'ultimi, la parte che si trova sotto il livello di isolamento è appesa al solaio appena sopra al sistema di isolamento, in questo modo è garantita l'assenza di interferenza con il sistema di isolamento o con le parti fisse della sottostruttura. Sono stati utilizzati dei gap sismici per permettere l'accesso agli ascensori ed evitare l'impatto tra la cassa dell'ascensore e la sottostruttura.

3.3 Sistema di isolamento

Il sistema di isolamento è stato progettato considerando un periodo target di progetto di $T_{is}=3,5$ s all'azione sismica di progetto al SLC, in grado di garantire una significativa riduzione delle azioni trasferite alla sovrastruttura in caso di evento sismico.

Come già è stato detto precedentemente la soluzione adottata è ibrida (Fig. 3.2): con isolatori HDR disposti sul perimetro della struttura, al fine di massimizzare la rigidezza torsionale, e slitte piane, collocate nella parte centrale per sostenere i carichi verticali più elevati.

I dispositivi HDRN, usualmente utilizzati in Italia, hanno un coefficiente di smorzamento che va dal 10% al 15%; nella progettazione dell'edificio è stato assunto il limite inferiore allo sforzo di taglio di progetto. La miscela può essere classificata ad alto smorzamento, perché il rapporto di smorzamento è maggiore del limite inferiore del 6% (alla deformazione $\gamma=1$) fissato dalla norma UNI EN 15129. Inoltre, il modulo di rigidezza a taglio G è stato assunto pari a 0,4 MPa alla deformazione a taglio di progetto, tipica di una gomma soft.

Per le slitte è stato scelto un dispositivo con coefficiente di attrito inferiore al 1%.

In fase preliminare, gli isolatori sono stati dimensionati ipotizzando un oscillatore ad 1-DOF, assumendo una sottostruttura e una sovrastruttura rigida, e trascurando l'attrito delle slitte. Sono stati utilizzati gli spettri di risposta elastica, ridotti per tutti i periodi $T \geq 0,8T_{is}$ dallo smorzamento equivalente degli isolatori.

La Fig. 3.5 mostra gli spettri per il sito considerato (Camerino, suolo di tipo B), ai diversi stati limite: lo Stato Limite Operativo (SLO, $T_r=60$ anni), lo Stato Limite di Danno (SLD, $T_r=100$ anni), lo Stato Limite Ultimo (SLU, $T_r=950$ anni), e lo Stato Limite di Collasso (SLC, $T_r=1950$ anni), secondo la norma NTC2018 per la classe d'uso IV. La progettazione è stata effettuata ricavando dallo spettro al SLC il massimo spostamento orizzontale, al periodo target, pari a 0,27 m. A tale spostamento è stata associata una deformazione media a taglio pari a $\gamma=1,5$ garantendo così un adeguato margine di sicurezza in presenza di effetti torsionali accidentali; infatti, assumendo un'amplificazione dello spostamento di 1,2, per gli effetti torsionali, la deformazione massima è pari a $\gamma=1,8$, valore inferiore rispetto al limite scelto dalla norma NTC2018.

Dallo spostamento ottenuto dagli spettri è stata stimata l'altezza totale della gomma

$$h_{is} = \frac{d}{\gamma} = 0.18 \text{ m.}$$

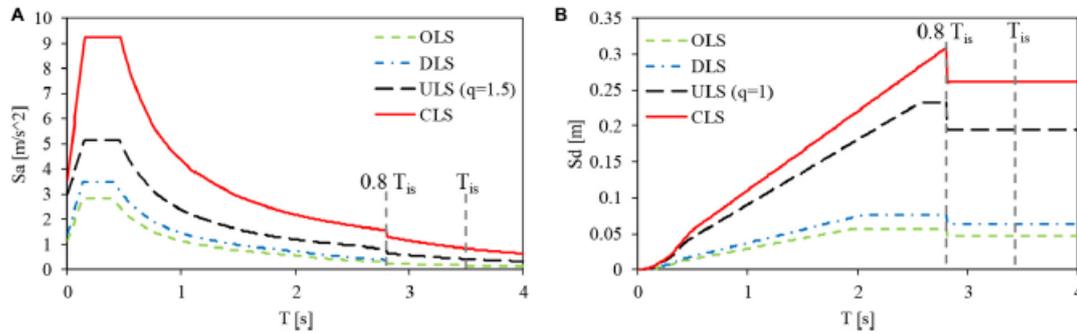


Figura 3.5 Spettri di risposta ai diversi stati limiti

L'area totale della gomma A_{is} in grado di garantire il periodo di isolamento fissato può essere desunta attraverso la seguente relazione:

$$\frac{G A_{is}}{h_{is}} = \left(\frac{2\pi}{T_{is}} \right)^2 M$$

L'area totale di gomma ottenuta è pari $A_{is}=9,087 \text{ m}^2$, sulla base di tale area sono stati scelti i seguenti tipi di dispositivi:

1. TEC IG 600-184 S (isolatori elastomerici HDRB), con spostamento massimo di $d_{ED}=350 \text{ mm}$, rigidezza orizzontale $k_e=620 \text{ kN/m}$, carico massimo in configurazione indeformata $N_{sd}=2100 \text{ kN}$, carico massimo e minimo in configurazione deformata ($\gamma=2$) $N_{edmax/min}=1100/650 \text{ kN}$;
2. TEC-disc-2500-800-800-pr-fpc (slitte piane), con spostamento massimo $d_{SLC}=350\text{mm}$ e $d_{SLV}=290 \text{ mm}$, carico massimo verticale in condizione indeformata $N_{slu}=2500 \text{ kN}$, carico verticale massimo e minimo in condizione sismica $N_{edmax/min}=1700/300 \text{ kN}$, coefficiente di attrito inferiore all' 1%.

È opportuno notare che la capacità di spostamento di entrambi i dispositivi è maggiore dello spostamento massimo al SLC tenendo conto degli effetti torsionali 324 mm. Come già evidenziato nell'introduzione questa assunzione di sicurezza garantisce l'assenza di comportamenti anomali dovuti ad esempio all'uscita delle slitte per azioni superiori a quella di progetto.

Un' adeguata dimensione è stata assunta per i gap sismici posizionati nella parte a monte della struttura che si trovano alla stessa quota della strada. In particolare, nelle

zone di ingresso sono stati installati dei giunti sismici ad alte prestazioni in grado di assorbire l'intero spostamento senza danni e mantenere una superficie orizzontale anche durante il terremoto; nelle altre zone sono stati utilizzati dei giunti standard capaci di assorbire l'intero spostamento con danni. Per entrambe le tipologie la capacità di spostamento è di 350mm.

3.4 Prove di accettazione sui dispositivi elastomerici

In questo capitolo sono riportate le prove di qualifica effettuate sugli isolatori elastomerici ad alto smorzamento adottati per il per il Centro di Ricerca Universitario.

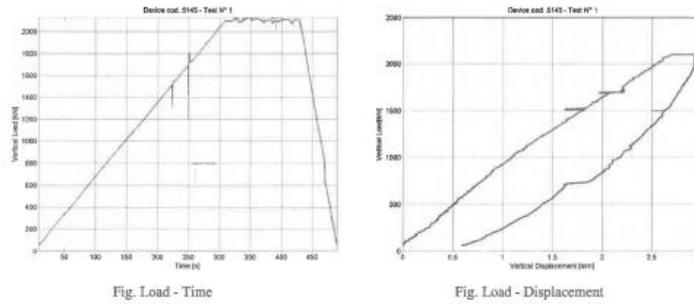
Sono state effettuate:

- 2 prove di capacità verticale per la rigidezza verticale;
- 7 prove cicliche dinamiche per le caratteristiche orizzontali del dispositivo;
- 1 prova quasi statica O.S.R per la rigidezza orizzontale;
- 2 prove di capacità laterale sotto il carico verticale in condizioni sismiche.

3.4.1 Prove di capacità verticale

Questi test sono eseguiti applicando un carico verticale N_{sd} e tenendolo costante per almeno 2 minuti. La rigidezza a compressione K_v è determinata tra il valore $1/3 N_{SD}$ e N_{SD} . Al massimo valore del carico l'isolatore è esaminato per osservare segni di cedimento.

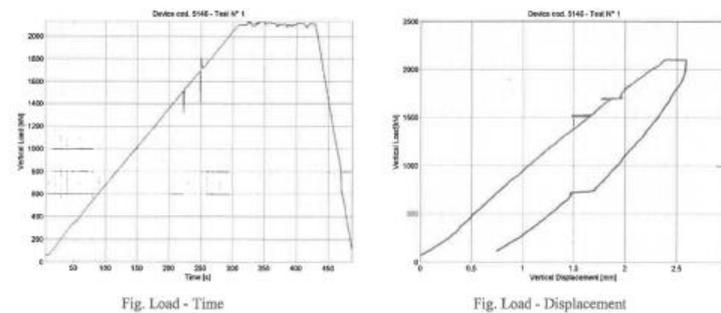
Sono riportate le due prove effettuate e i risultati ottenuti in Fig. 3.6 e in Fig. 3.7.



Results

Displacement corresponding to the maximum load reached	2.7	mm
Displacement corresponding to the 33% of the max. load	0.7	mm
Maximum Force reached	2100	kN
33% of the Maximum load reached	700.5	kN
Vertical Stiffness k_v	713.11	kN/mm

Figura 3.6 Prova di compressione 1



Results

Displacement corresponding to the maximum load reached	2.4	mm
Displacement corresponding to the 33% of the max. load	0.7	mm
Maximum Force reached	2100	kN
33% of the Maximum load reached	700.5	kN
Vertical Stiffness k_v	846.84	kN/mm

Figura 3.7 Prova di compressione 2

3.4.2 Prove cicliche

Sono state effettuate 7 prove cicliche a diversi livelli di deformazione. I test sono stati eseguiti applicando sul dispositivo un carico verticale di 6 MPa e mantenendolo fisso per tutta la durata della prova. Dopo avere applicato il carico verticale, 5 cicli sinusoidali, caratterizzati dall'ampiezza di deformazione scelta, sono applicati con una frequenza di 0,5 Hz. Le caratteristiche orizzontali dell'isolatore sono espresse in termini di effettiva rigidezza orizzontale e di smorzamento equivalente. Le deformazioni imposte per le diverse prove, in accordo con la UNI 15129, sono: $\gamma=5\%$, $\gamma=10\%$, $\gamma=20\%$, $\gamma=50\%$, $\gamma=100\%$, $\gamma=150\%$, $\gamma=200\%$. Vengono riportati, per ogni ampiezza di deformazione, i grafici forza-deformazione dell'intera prova, del terzo ciclo e le caratteristiche orizzontali.

Hcc005($\gamma=5\%$)

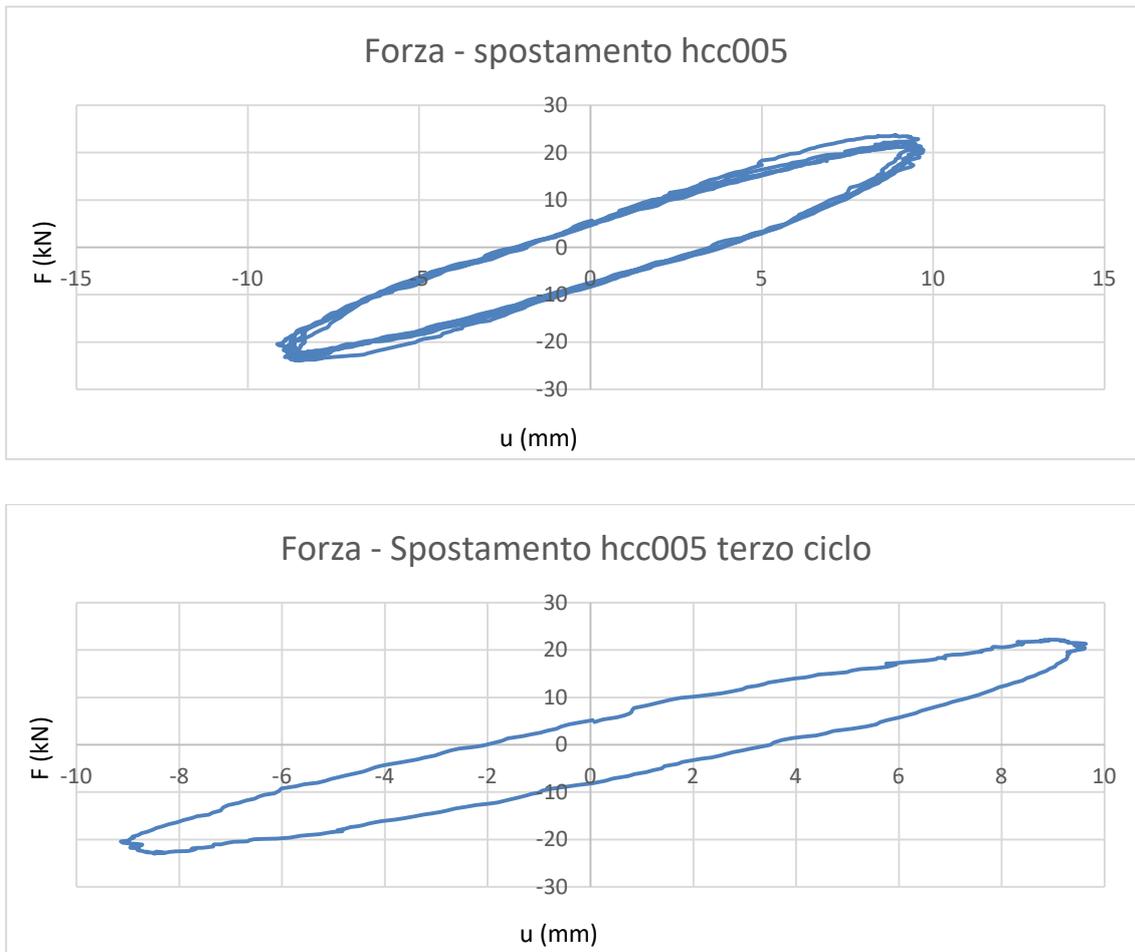


Figura 2.8 Grafici Forza -Spostamento hcc005 dell'intera prova e del terzo ciclo

Results	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	
Maximum displacement	9.4	9.5	9.5	9.4	9.5	mm
Minimum displacement	-8.8	-8.8	-8.9	-8.8	-8.7	mm
Maximum load	23.5	22.3	22	21.4	21.2	kN
Minimum load	-23.8	-23.3	-22.8	-22.6	-22.3	kN
Effective stiffness k_{eff}	2.59	2.48	2.43	2.41	2.38	kN/mm
Dissipated energy	216.4	200.5	197.4	191.6	188.1	J
Damping	15.93	15.25	15.19	15.17	15.15	%
Second branch stiffness k_2	1.53	1.57	1.61	1.61	1.56	kN/mm
Shear Modulus	1.69	1.61	1.58	1.57	1.55	
Load Q_d (Average value)	6.5	6.5	6.2	6.3	6.3	kN
Vertical Load	1699.1	1699	1699	1699.7	1700.1	kN
Maximum Velocity	34.5	34.4	35.9	32.2	32.5	mm/s

Tabella 3.1 Caratteristiche orizzontali isolatore per ogni ciclo di carico

Hcc010 ($\gamma=10\%$)

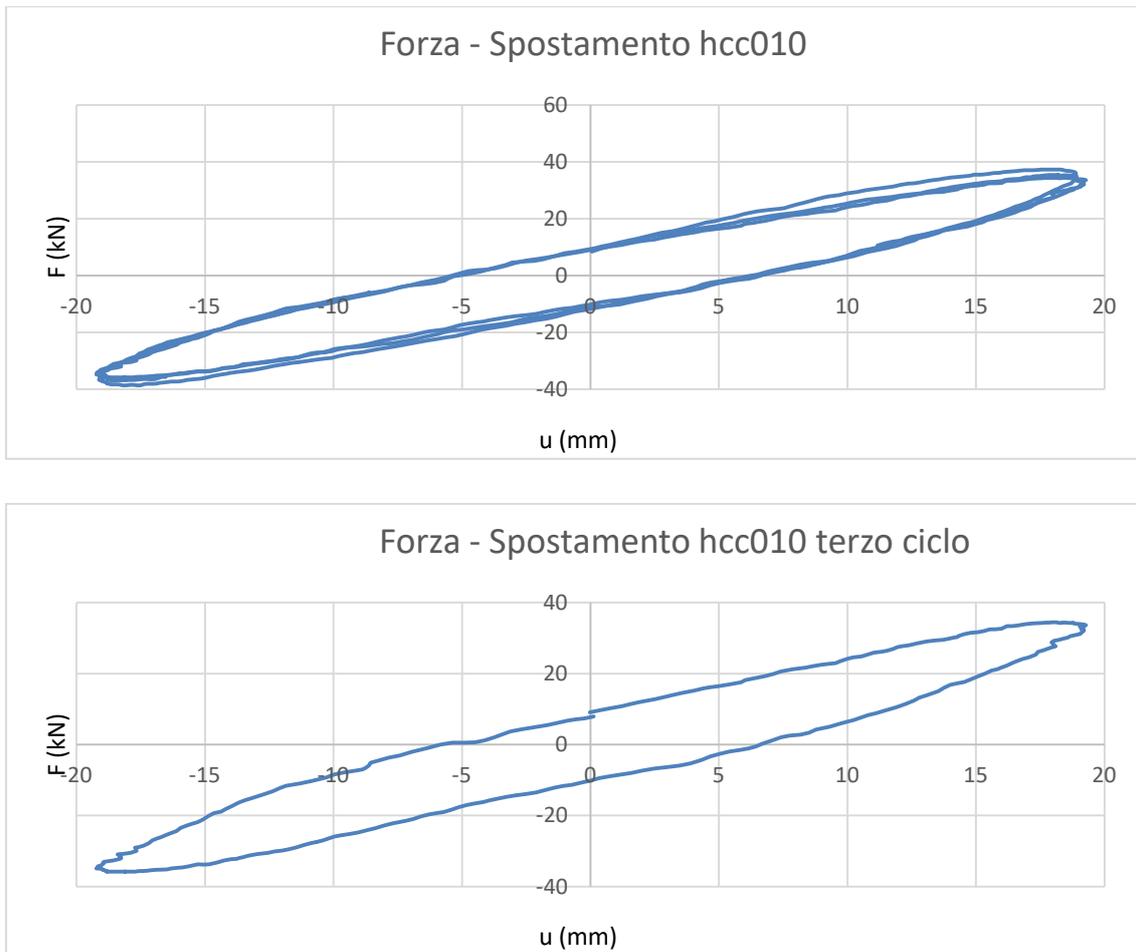


Figura 3.9 Grafici Forza – Spostamento hcc010 dell'intera prova e del terzo ciclo

Results	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	
<i>Maximum displacement</i>	18.9	19	19.2	19	18.7	mm
<i>Minimum displacement</i>	-19	-19.1	-19.1	-18.7	-18.5	mm
<i>Maximum load</i>	37.3	35.3	34.3	33.4	32.7	kN
<i>Minimum load</i>	-38.5	-36.8	-35.8	-34.9	-34.2	kN
<i>Effective stiffness k_{eff_b}</i>	2	1.89	1.83	1.81	1.8	kN/mm
<i>Dissipated energy</i>	685.7	634.3	593.6	583.4	578.1	J
<i>Damping</i>	15.2	14.7	14.08	14.43	14.84	%
<i>Second branch stiffness k_2</i>	1.26	1.34	1.33	1.2	1.15	kN/mm
<i>Shear Modulus</i>	1.3	1.23	1.19	1.18	1.17	
<i>Load Q_d (Average value)</i>	10.4	10.2	9.8	8.7	8.9	kN
<i>Vertical Load</i>	1690.6	1692.6	1694.6	1695.4	1695.8	kN
<i>Maximum Velocity</i>	66.2	69.9	72.2	70.8	66.6	mm/s

Tabella 3.2 Caratteristiche orizzontali isolatore per ogni ciclo di carico

Hcc020 ($\gamma=20\%$)

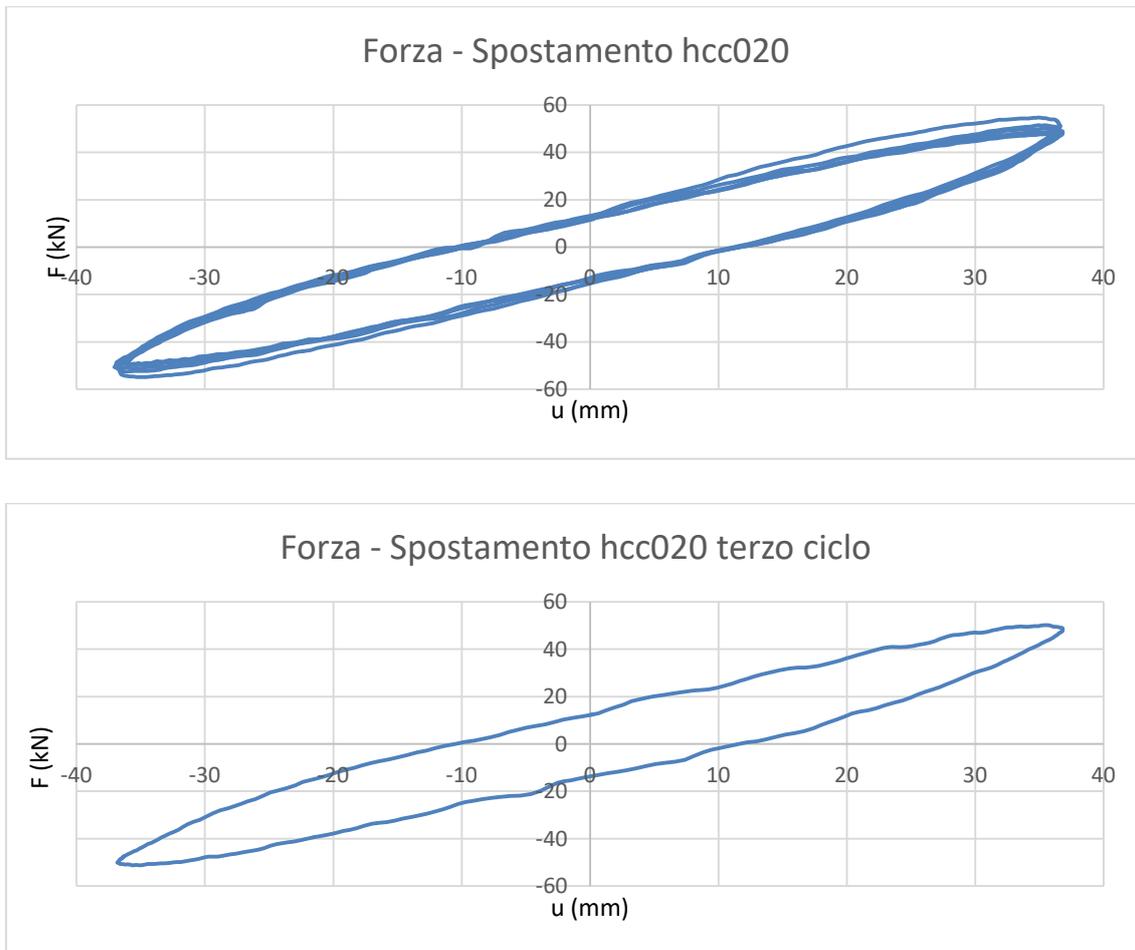


Figura 3.10 Grafico Forza –Spostamento hcc020 dell’intera prova e del terzo ciclo

Results	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	
Maximum displacement	36.5	36.5	36.8	36.2	35.8	mm
Minimum displacement	-36.6	-36.9	-36.7	-36.2	-36.1	mm
Maximum load	54.5	51.3	49.9	48.5	47.7	kN
Minimum load	-54.7	-52.4	-51	-49.8	-49.4	kN
Effective stiffness $keff_0$	1.49	1.41	1.37	1.36	1.35	kN/mm
Dissipated energy	1855.4	1698.4	1644.7	1598.7	1581.6	J
Damping	14.77	14.19	14.12	14.3	14.43	%
Second branch stiffness k_2	0.96	0.97	1	0.93	0.86	kN/mm
Shear Modulus	0.97	0.92	0.89	0.88	0.88	
Load Q_d (Average value)	14.4	14	13.1	12.6	12.2	kN
Vertical Load	1688.7	1692.2	1693.5	1694.4	1694.6	kN
Maximum Velocity	120.5	125.1	124.7	119.8	121.5	mm/s

Tabella 3.3 Caratteristiche orizzontali isolatore per ogni ciclo di carico

Hcc050 ($\gamma=50\%$)

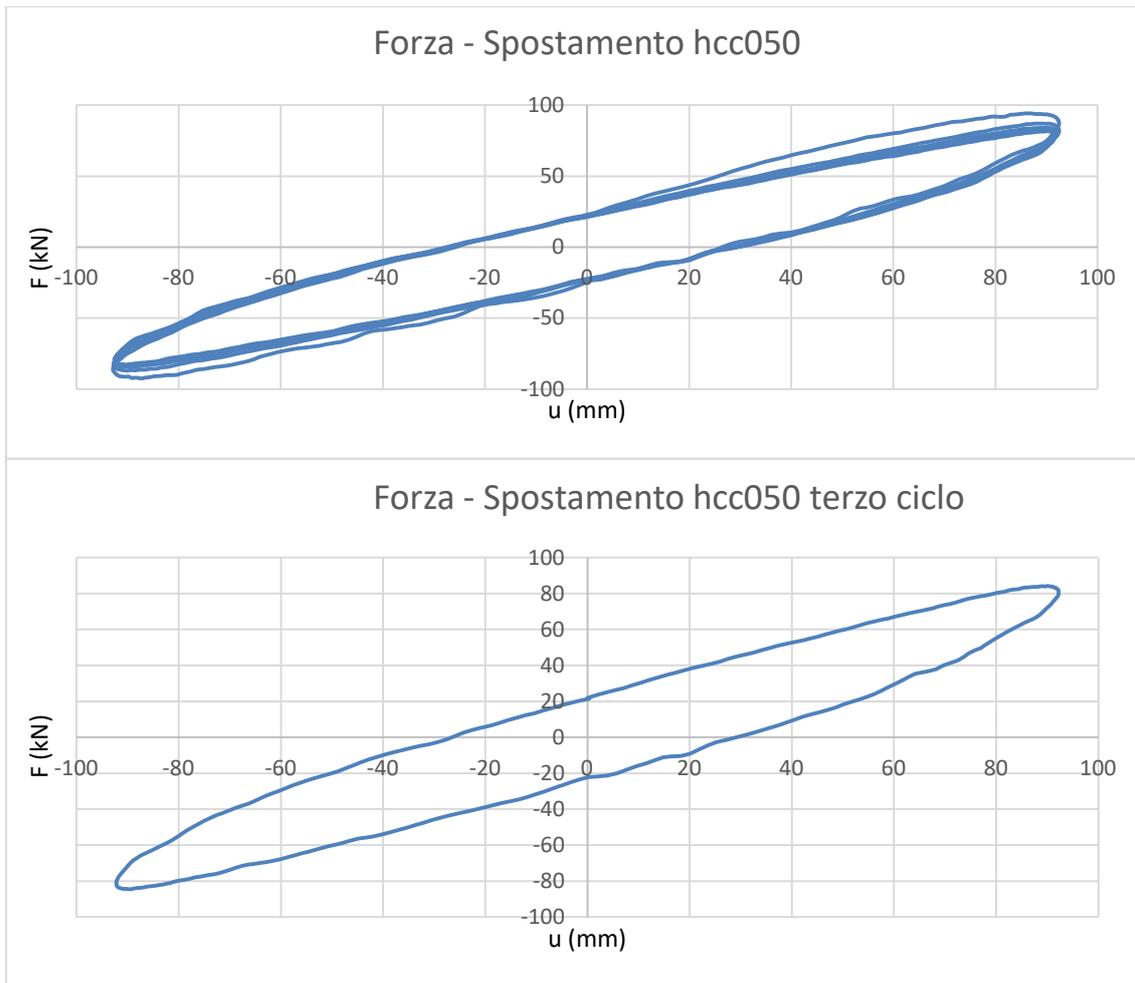


Figura 3.11 Grafico Forza – Spostamento hcc50 dell'intera prove e del terzo ciclo

Results	<i>Cycle 1</i>	<i>Cycle 2</i>	<i>Cycle 3</i>	<i>Cycle 4</i>	<i>Cycle 5</i>	
<i>Maximum displacement</i>	92.3	92.3	92.2	91.8	91.6	<i>mm</i>
<i>Minimum displacement</i>	-92.8	-92.7	-92.2	-92	-92.4	<i>mm</i>
<i>Maximum load</i>	93.9	86.9	83.9	82.4	81.4	<i>kN</i>
<i>Minimum load</i>	-91.8	-86.7	-84.3	-83	-82.4	<i>kN</i>
<i>Effective stiffness $keff_b$</i>	1	0.94	0.91	0.9	0.89	<i>kN/mm</i>
<i>Dissipated energy</i>	8009.2	7202.5	6902.8	6823.8	6761.8	<i>J</i>
<i>Damping</i>	14.83	14.27	14.17	14.29	14.28	<i>%</i>
<i>Second branch stiffness k_2</i>	0.66	0.68	0.66	0.64	0.63	<i>kN/mm</i>
<i>Shear Modulus</i>	0.65	0.61	0.59	0.59	0.58	
<i>Load Q_d (Average value)</i>	24	23.2	23.2	22.2	21.8	<i>kN</i>
<i>Vertical Load</i>	1679.2	1687.5	1690.6	1692	1693.4	<i>kN</i>
<i>Maximum Velocity</i>	300.9	300.8	299.6	297.4	296.3	<i>mm/s</i>

Tabella 3.4 Caratteristiche orizzontali isolatore per ogni ciclo

Hcc100 ($\gamma=100\%$)

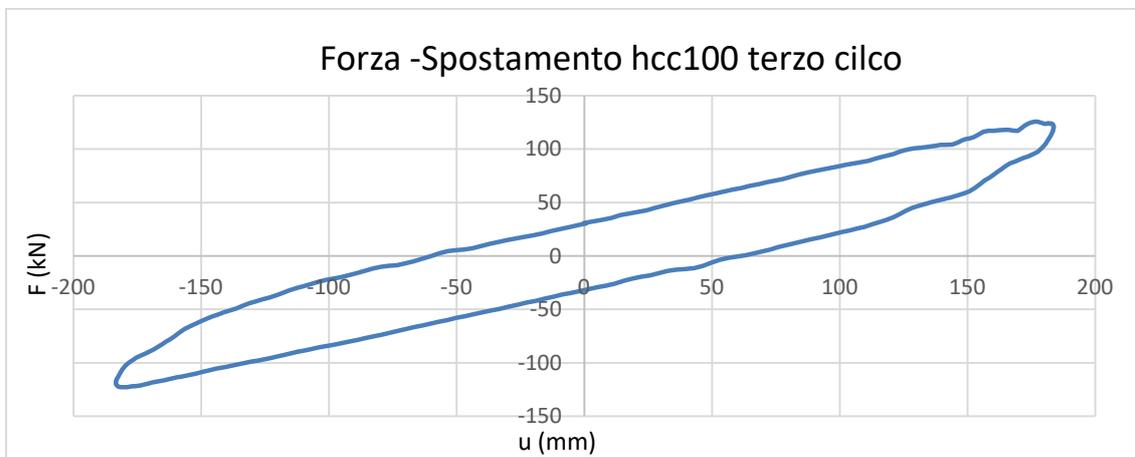
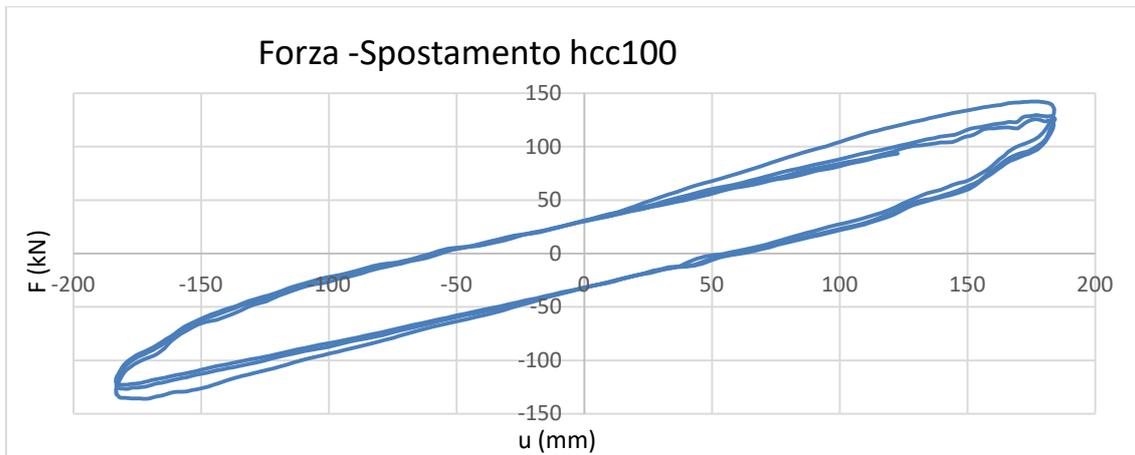


Figura 3.12 Grafico Forza –Spostamento hcc100 dell’intera prova e del terzo ciclo

Results	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	
Maximum displacement	183.8	183.8	183.6	183.5	183.1	mm
Minimum displacement	-183.3	-183.2	-183.3	-183.1	-182.9	mm
Maximum load	142.1	128.8	124.6	122	119.7	kN
Minimum load	-135.6	-126.4	-122.6	-120.1	-118.4	kN
Effective stiffness $keff_b$	0.76	0.7	0.67	0.66	0.65	kN/mm
Dissipated energy	23386.3	20826.7	20314.8	19929.5	19651	J
Damping	14.61	14.16	14.26	14.3	14.35	%
Second branch stiffness k_2	0.57	0.52	0.51	0.5	0.49	kN/mm
Shear Modulus	0.49	0.45	0.44	0.43	0.42	
Load Q_d (Average value)	31	31.8	30.6	30	30.5	kN
Vertical Load	1684.5	1698.6	1702.8	1704.3	1704.2	kN
Maximum Velocity	585.4	583.8	582.1	584.9	580.7	mm/s

Tabella 3.5 Caratteristiche orizzontali isolatore per ogni ciclo

Hcc150 ($\gamma=150\%$)

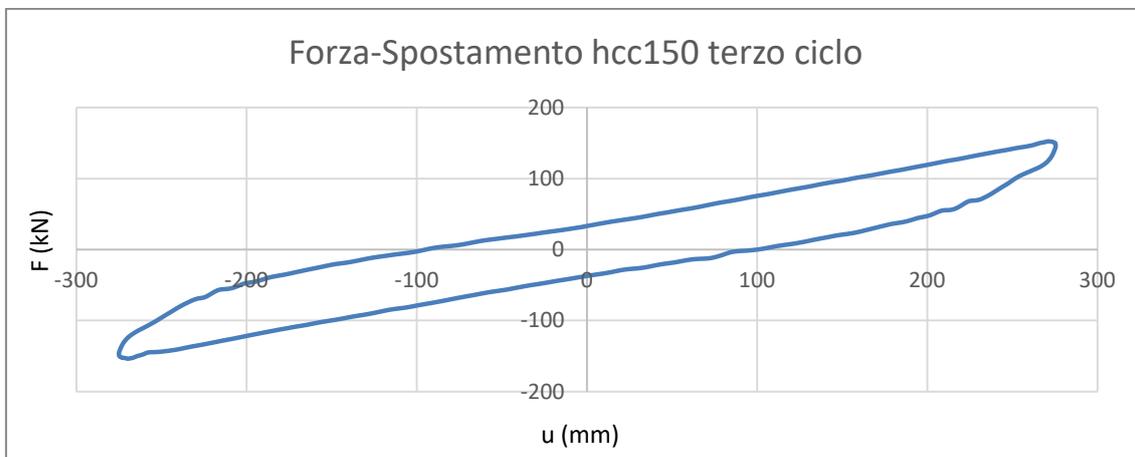
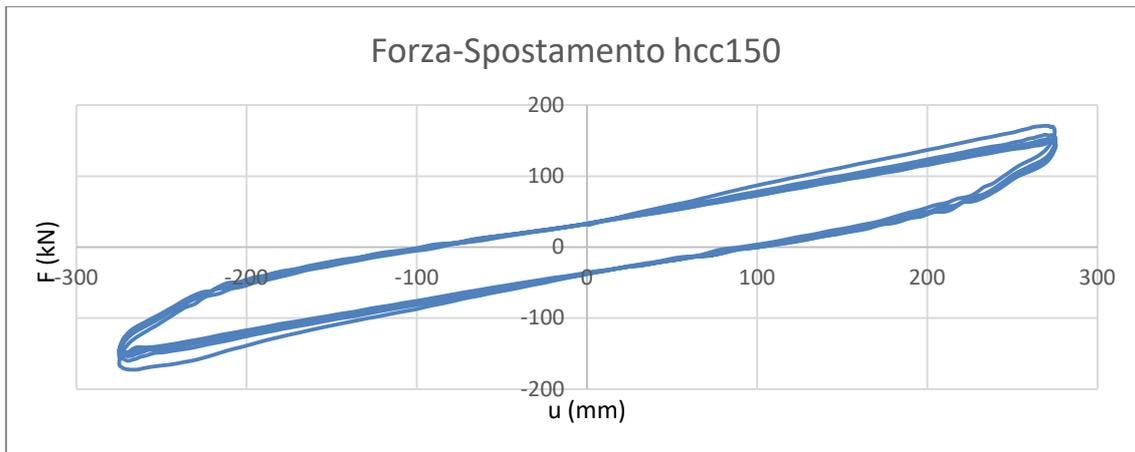


Figura 3.13 Grafico Forza – Spostamento hcc150 dell'intera prova e del terzo ciclo

Results	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	
Maximum displacement	274.8	275.3	275.2	275.3	275.3	mm
Minimum displacement	-274.8	-274.8	-274.9	-274.7	-274.3	mm
Maximum load	170	157	151.5	148.5	146.9	kN
Minimum load	-171.9	-158	-152.5	-149.2	-146.8	kN
Effective stiffness $keff_0$	0.62	0.57	0.55	0.54	0.53	kN/mm
Dissipated energy	41672.3	38679.3	37659.1	36997.2	36559.4	J
Damping	14.12	14.21	14.33	14.39	14.42	%
Second branch stiffness k_2	0.53	0.46	0.44	0.44	0.43	kN/mm
Shear Modulus	0.4	0.37	0.36	0.35	0.35	
Load Q_d (Average value)	34.1	35.2	35.9	35.3	34.9	kN
Vertical Load	1673	1692.7	1695.4	1694.6	1693	kN
Maximum Velocity	809.9	808.1	797.7	794.2	779.3	mm/s

Tabella 3.6 Caratteristiche orizzontali isolatore per ogni ciclo

Hcc200 ($\gamma=200\%$)

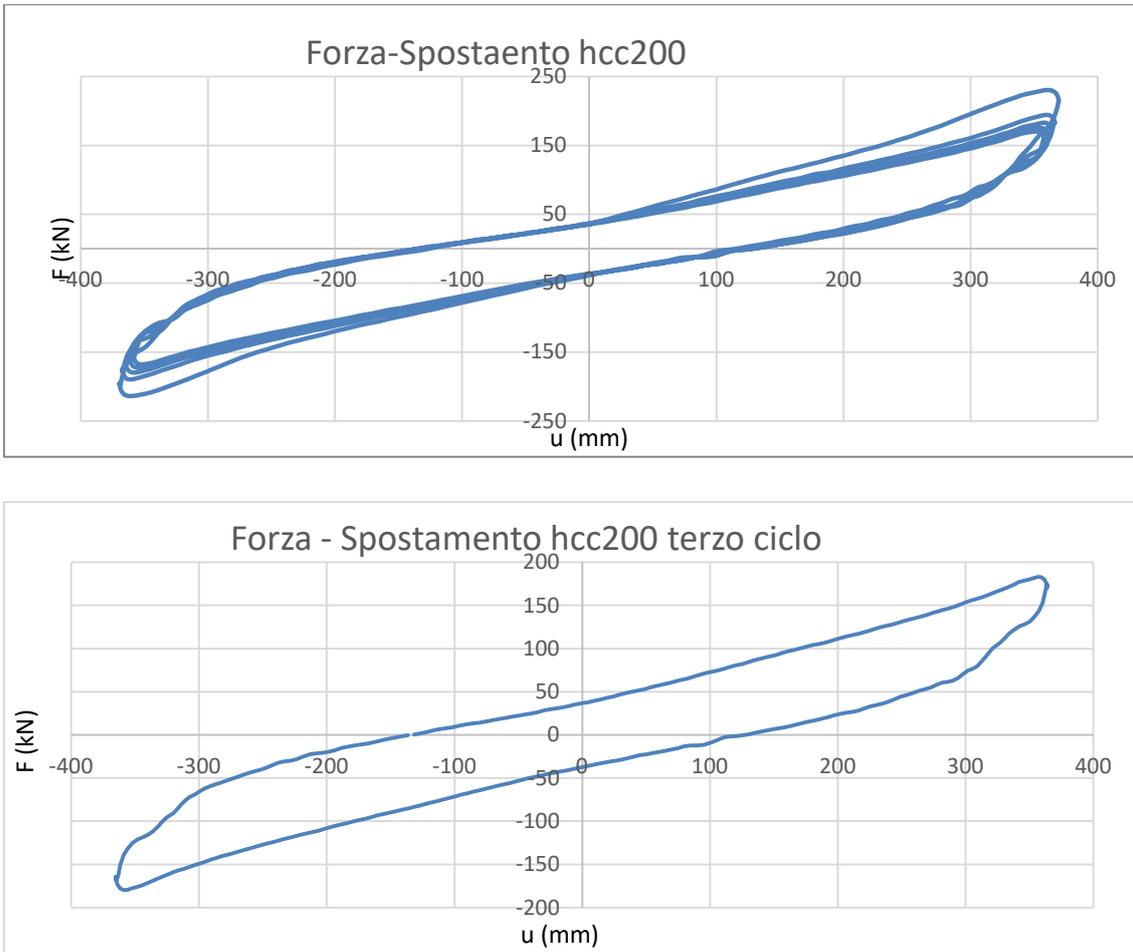


Figura 3.14 Grafico Forza – Spostamento hcc200 dell'intera prova e del terzo ciclo

Results	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	
Maximum displacement	367.5	364	361.4	358	355.5	mm
Minimum displacement	-367.3	-365.4	-362.3	-359.1	-356.1	mm
Maximum load	225.8	188.8	177.7	170.2	165.3	kN
Minimum load	-208.6	-183.2	-173.6	-167	-162.1	kN
Effective stiffness $keff_b$	0.59	0.51	0.49	0.47	0.46	kN/mm
Dissipated energy	67619.2	59541.2	56609.7	54618.5	52896.7	J
Damping	13.48	13.97	14.17	14.38	14.45	%
Second branch stiffness k_2	0.6	0.47	0.43	0.42	0.41	kN/mm
Shear Modulus	0.38	0.33	0.32	0.31	0.3	
Load Q_d (Average value)	38.3	37.5	37.5	35.9	35.9	kN
Vertical Load	1668.3	1701.6	1706.5	1705.1	1703.4	kN
Maximum Velocity	884.6	875.2	864.6	842.8	827.7	mm/s

Tabella 3.7 Caratteristiche orizzontali isolatore per ogni ciclo

Si può notare che in tutte le prove avviene il fenomeno dello 'scragging', e come all'aumentare dell'ampiezza di deformazione la rigidità del dispositivo diminuisce (Fig. 3.15).

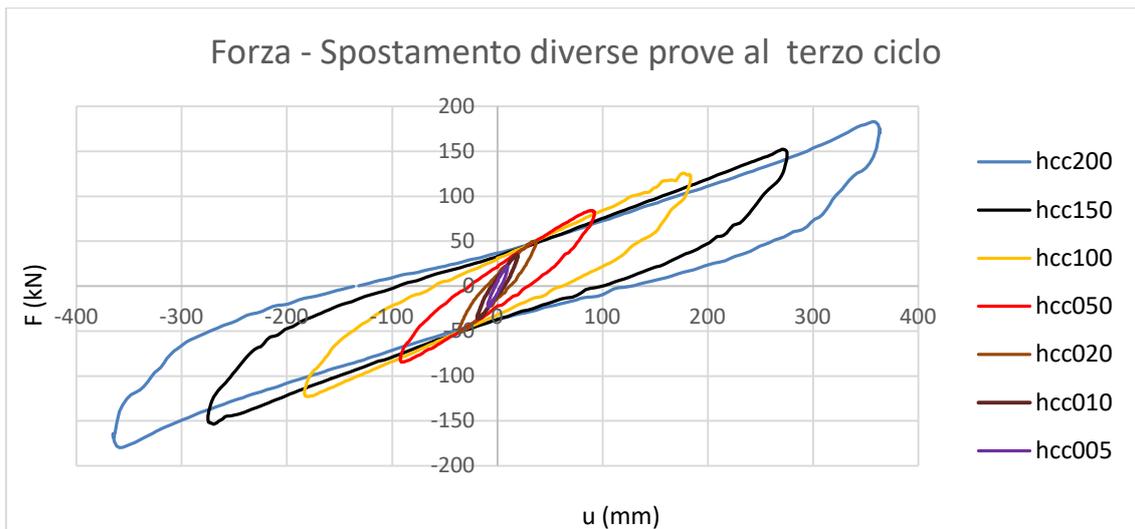


Fig 3.15 Confronto cicli delle diverse prove

È stata effettuata anche una prova quasi - statica (OSR) per le caratteristiche orizzontali in cui la forza è applicata con una funzione rampa sia per il carico che lo scarico. Per tutta la prova un carico verticale è applicato e tenuto costante. Viene riportato il grafico Forza-Spostamento (Fig. 3.16), la tabella delle caratteristiche del dispositivo (Tab. 3.8) e il confronto con la prova dinamica caratterizzata da un'ampiezza di deformazione simile (hcc150) (Fig. 2.17).

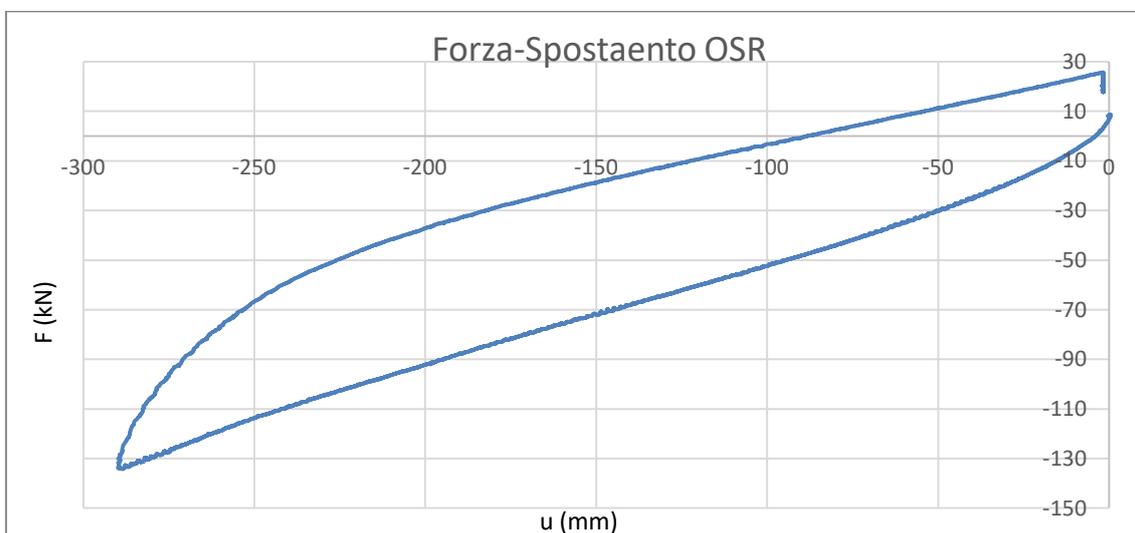


Figura 2.16 Grafico Forza -Spostamento OSR

<i>Maximum load</i>	134.2	kN
<i>Maximum displacement</i>	289.8	mm
<i>Effective stiffness</i>	0.46	kN/mm
<i>vertical load</i>	1700.071	kN
<i>F = f(d_57.7%)</i>	54.9	kN
<i>F = f(d_26.8%)</i>	30.03	kN
<i>d_57.7%</i>	106.73	mm
<i>d_26.8%</i>	49.71	mm
<i>rubber area</i>	282743.3	mm ²
<i>tq value</i>	184	mm
<i>G modulus</i>	0.28	MPa

Tabella 3.8 Caratteristiche orizzontali isolatore OSR

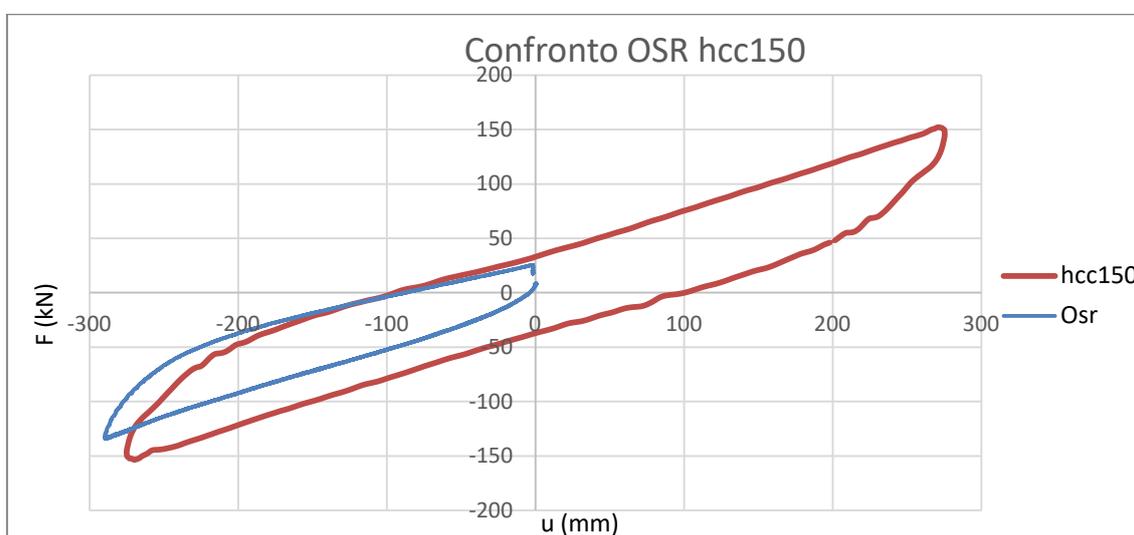


Figura 3.17 Confronto tra hcc150 e OSR

Anche se le due prove non sono contraddistinte dalla stessa ampiezza di deformazione, $\gamma_{hcc150}=1,5$ e $\gamma_{OSR}=1,57$, possono essere comunque confrontabili per osservare la variazione delle caratteristiche orizzontali del dispositivo in funzione della velocità della prova.

Due fattori entrano in gioco nel confronto: l'ampiezza di deformazione e la velocità di carico. Il primo si può osservare nella rotazione del ciclo OSR rispetto al hcc150, caratterizzato da una ampiezza di deformazione inferiore; il secondo va ad incidere sia sulla rigidezza equivalente che sul coefficiente di dissipazione. Il ciclo della prova quasi statica ha una minore ampiezza, infatti calcolando il coefficiente di smorzamento equivalente, attraverso il metodo dei trapezi e riconducendoci ad un ciclo completo,

esso risulta inferiore rispetto a quello della prova hcc150. Inoltre il gap che vi è tra i due rami di carico è dovuto alla dipendenza delle caratteristiche dalla velocità.

3.4.3 Prova di capacità laterale sotto il massimo e il minimo carico verticale in condizione sismica

Questa prova viene effettuata per verificare la massima capacità di deformazione orizzontale dell'isolatore in condizione di massimo e minimo carico verticale applicato. Vengono riportati i risultati ottenuti delle due prove (Fig. 3.18, Fig. 3.19).

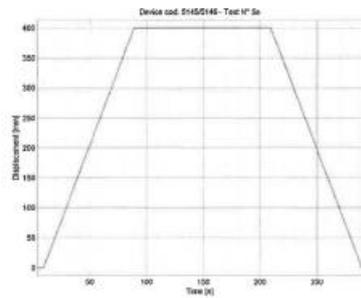


Fig. : Displacement - Time

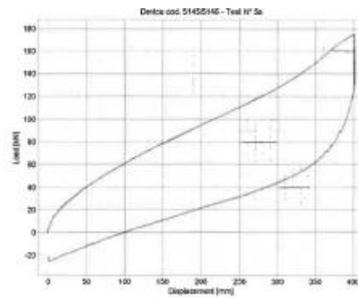


Fig. : Displacement - Load

Results

Maximum horizontal load	175.8	kN
Vertical load	1082	kN
Maximum displacement	401.7	mm

Figura 3.18 Capacità orizzontale sotto carico massimo

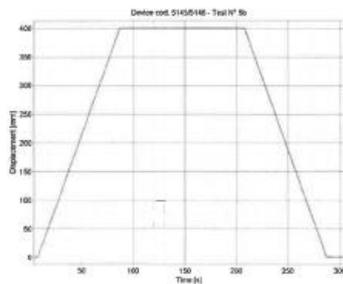


Fig. : Displacement - Time

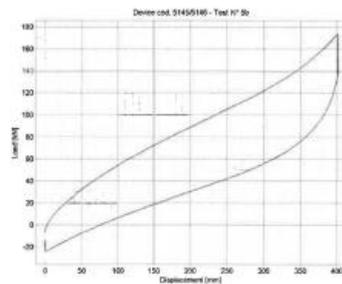


Fig. : Displacement - Load

Results

Maximum horizontal load	173.8	kN
Vertical load	651.0	kN
Maximum displacement	402	mm

Figura 3.19 Capacità laterale sotto carico verticale minimo

4.0 DESCRIZIONE DELLE PROVE IN SITO

Come precedentemente esposto, una prova Snap-back consiste nella messa in carico del sistema di isolamento mediante spostamento della parte superiore della struttura e il successivo rilascio. Sono state effettuate in questo caso studio 5 prove dinamiche e 2 prove statiche. La misura delle forze in fase di carico e il monitoraggio del moto conseguente il rilascio permettono la caratterizzazione dell'effettiva risposta dinamica dell'edificio in condizioni simili a quelle di un evento sismico. L'elaborazione dei dati forniti dalle prove permette, oltre al rilevamento del comportamento dinamico, di ricavare le caratteristiche dei dispositivi del sistema di isolamento al fine di confrontarli con i parametri di progetto, di comprendere il comportamento viscoso degli isolatori elastomerici e il loro ricentraggio dopo la fine di ogni prova.

4.1 Descrizione del sistema di spinta

Il sistema di spinta (Fig. 4.1), concepito allo stesso modo di quello utilizzato nell'esempio dell'Ospedale Policlinico di Palermo. È alloggiato all'interno di un vano realizzato nella parete di monte all'esterno dell'edificio (Fig. 3.2). Il sistema è a controllo di forza in quanto risulta più sicuro a sistemi alternativi in controllo di spostamento.

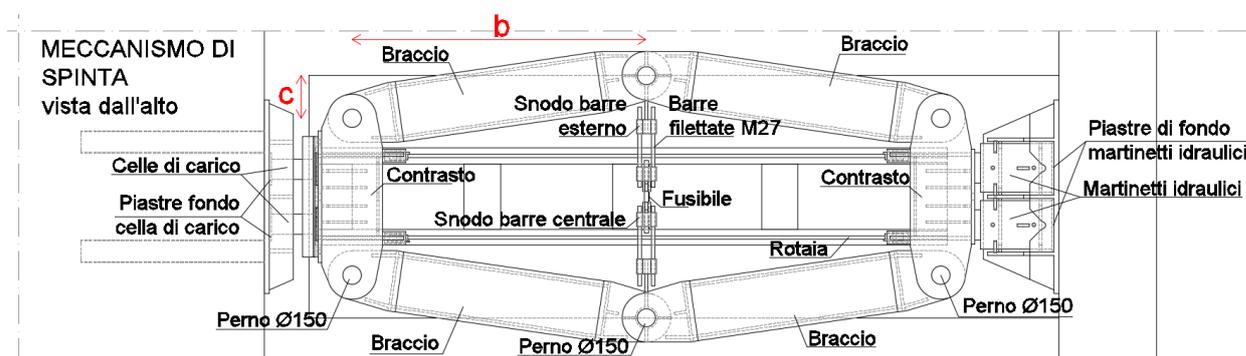


Figura 4.1 Dispositivo di spinta in pianta

Il sistema di spinta è stato dimensionato per una spinta di progetto $F=11000$ kN, pari alla forza da applicare per ottenere il massimo spostamento previsto dalle prove adottando un coefficiente di sicurezza pari a 2. Partendo da tale forza, sono stati dimensionati gli elementi costituenti del sistema di spinta: le traverse di spinta (soggette a taglio e a flessione), i perni di collegamento (soggetti a taglio) e i bracci (soggetti prevalentemente a sollecitazioni di compressione). Il contrasto è costituito da un muro di sostegno, opportunamente dimensionato, e posto a tergo del dispositivo.

L'elemento che governa l'entità della massima forza che è possibile trasmettere alla struttura, quindi dello spostamento, è il fusibile, realizzato mediante lavorazione meccanica di barre filettate ad alta resistenza (classe 10.9, $f_u=1000$ N/mm², resistenza media attesa a temperatura ambientale 1114 N/mm²). Nella fase di spinta il fusibile è caricato a trazione (Fig. 4.2); superata la sua resistenza massima, funzione del diametro

del fusibile, si rompe e avviene perciò il rilascio della struttura. Conoscendo il diametro del fusibile e la geometria del sistema è possibile stimare l'entità della forza massima che si avrà durante ogni singolo prova. Sono stati dimensionati 7 fusibili, uno per ogni prova effettuata.

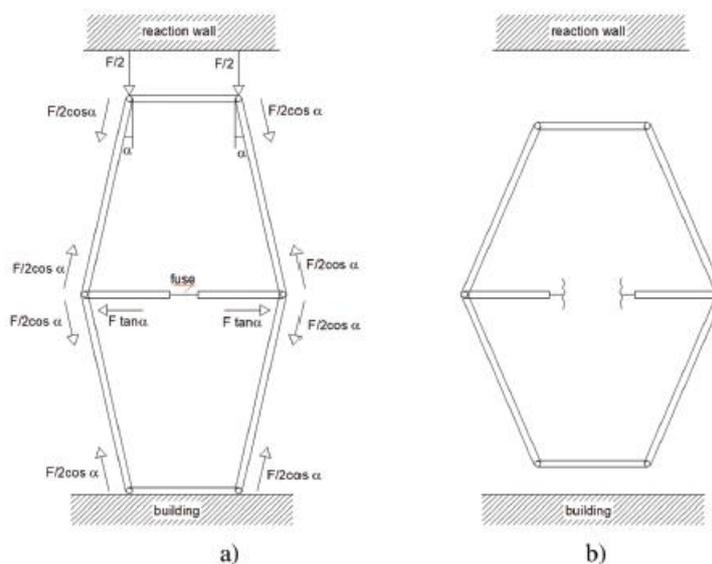


Figura 4.2 Configurazione del sistema di spinta prima e dopo la rottura del fusibile

F calcolata mediante dimensione del fusibile					
1° prova	2° prova	3° prova	4° prova	5° prova	6° prova
d_{fusibile} (mm) 10	d_{fusibile} (mm) 21	d_{fusibile} (mm) 25	d_{fusibile} (mm) 17	d_{fusibile} (mm) 22,5	d_{fusibile} (mm) 17,2
F (kN) 501,71	F (kN) 2630,75	F (kN) 3255,73	F (kN) 1724,01	F (kN) 3019,99	F (kN) 1764,81

Tabella 4.1 Diametri dei diversi fusibili utilizzati

La precedente tabella non contiene l'informazione riguardante il diametro del fusibile utilizzato per la settima prova, poiché per quest'ultima è stato utilizzato un fusibile volontariamente sovrabbondante per scongiurarne la rottura e ottenere così una prova statica.

Attraverso un controllo incrociato delle celle di carico, poste tra il sistema di spinta e la struttura, e dei trasduttori di spostamento si sono monitorati, rispettivamente, la forza trasmessa all'edificio e lo spostamento raggiunto.

La forza concentrata generata dal sistema di spinta viene trasferita al solaio in c.a. mediante una trave orizzontale di ripartizione posizionata negli allineamenti centrali, di spessore 500mm e altezza utile, sul piano flessionale, di 1800 mm.

Tra il sistema di contrasto e i martinetti e tra la cella di carico e la trave di ripartizione sono disposte delle piastre di trasferimento del carico utili a ridurre la tensione di compressione sul calcestruzzo. Le seguenti figure (Fig. 4.3) mostrano lo scomparto in

cui sono state inserite le celle di carico con la piastra di trasferimento posizionata sulla trave di ripartizione e il punto di alloggiamento dei martinetti.



Tabella 4.3 Alloggiamento delle celle di carico e dei martinetti

4.2 Configurazione del sistema di monitoraggio

Il sistema di monitoraggio ha come scopo quello di supportare l'esecuzione della prova in tempo reale e di registrare i dati provenienti da accelerometri e trasduttori per elaborazione successive. La seguente tabella (Tab. 4.2) mostra una ricapitolazione della strumentazione per il sistema di monitoraggio della prova.

n.	strumento
12	accelerometro piezoelettrico monoassiale PCB modello 393B31
4	accelerometro piezoelettrico monoassiale PCB modello 393A03
4	trasduttore di spostamento potenziometrico Gefran PC67-750
2	trasduttore di spostamento induttivo Baumer IR30.D18L-11179028
3	termoigrometri usb PCE-HT71M

Tabella 4.2 Riepilogo della strumentazione utilizzata

Accelerometri piezoelettrici monoassiali

Per la misura delle accelerazioni ai vari livelli della struttura si è fatto uso di due diversi modelli di accelerometro piezoelettrico monoassiale (Fig. 4.4). Gli accelerometri utilizzati sono in grado di misurare valori di accelerazione solamente in una direzione e, in particolare, lungo la direzione dell'asse (essendo di tipo cilindrico).

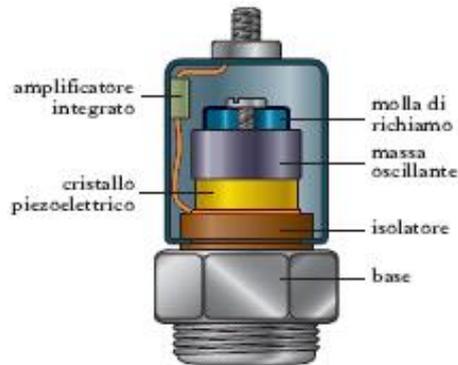


Figura 4.4 Accelerometro piezoelettrico

	Modello 393B31	Modello 393A03
Sensibilità ($\pm 5\%$)	10.0 V/g	1.0 V/g
Range di misurazione	$\pm 0.5g$ pk	$\pm 5g$ pk
Range di frequenza ($\pm 5\%$)	0.1-200 Hz	0.5-2000 Hz
Frequenza di risonanza	≥ 700 Hz	≥ 10000 Hz
Risoluzione minima	0.000001g	0.00001g
Rumore spettrale (1 Hz)	0.06 $\mu g/\sqrt{Hz}$	2 $\mu g/\sqrt{Hz}$
Rumore spettrale (10 Hz)	0.01 $\mu g/\sqrt{Hz}$	0.5 $\mu g/\sqrt{Hz}$
Rumore spettrale (100 Hz)	0.004 $\mu g/\sqrt{Hz}$	0.2 $\mu g/\sqrt{Hz}$

Tabella 4.3 Caratteristiche degli accelerometri utilizzati

La principale differenza tra i due strumenti è il range di misurazione, che definisce l'intervallo entro il quale l'accelerometro è in grado di compiere la misura. Il modello 393B31, caratterizzato da un'elevata sensibilità, è uno strumento ideale per condizioni di monitoraggio in continuo in cui l'obiettivo sono gli input a bassa intensità; tuttavia, per una maggiore sicurezza, essendo la prova di tipo impulsivo, si è deciso di posizionare anche accelerometri Modello 393A03.

Con le registrazioni ottenute dagli strumenti, con range $\pm 0.5g$, è possibile valutare le accelerazioni di picco ai vari piani, condurre le analisi modali sperimentali per la definizione dei modi di vibrare della struttura e dello smorzamento. Con l'altra tipologia di accelerometri è possibile svolgere dei controlli al centro della struttura in caso di impulsi e valutare la rigidità dei solai attraverso il confronto con le accelerazioni registrate con i dispositivi 0.5g collocati sul perimetro della struttura.

Alla scopo di avere una maggior precisione sulle successive elaborazioni numeriche sono stati posizionati 4 accelerometri per piano.

Sensori induttivi

Il sensore induttivo (Fig. 4.5) è uno strumento in grado di rilevare la posizione di un oggetto metallico che si trova all'interno del range di misurazione del sensore. Tale strumento permette di valutare lo stato dell'isolatore nelle condizioni di quiete e misurare gli spostamenti verticali durante la prova, da cui calcolare la rigidità assiale del dispositivo.

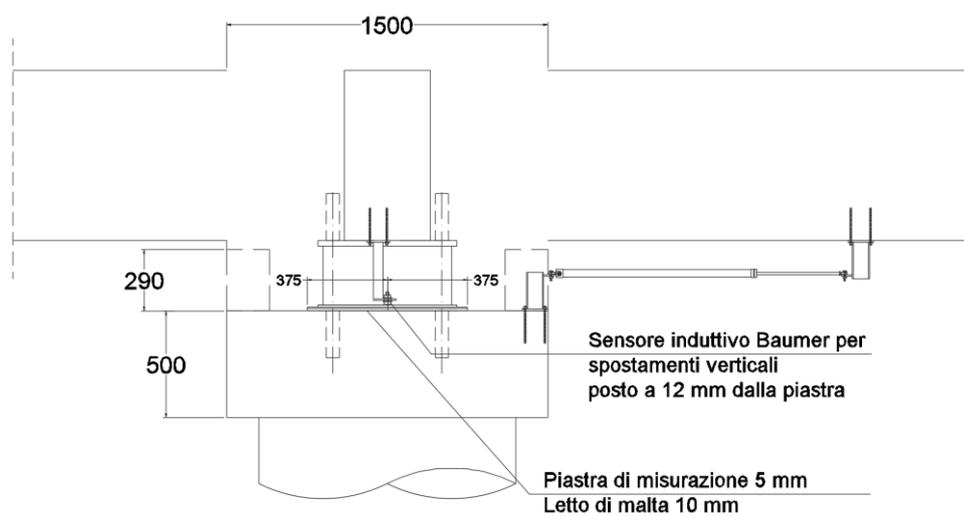


Figura 4.5 Prospetto sensore induttivo

Trasduttori di spostamento

Il trasduttore di spostamento potenziometrico (Fig. 4.6) è lo strumento con cui si effettua la misurazione degli spostamenti orizzontali e il suo principio di funzionamento è basato sulla variazione di resistenza in un circuito elettrico determinata dallo spostamento dell'oggetto di cui si vuole misurare la posizione. Esso consentirà di monitorare in tempo reale lo spostamento del piano di isolamento a partire dalla fase di carico e per tutta la durata della prova in modo da avere sempre il massimo controllo del test.

Tre trasduttori potenziometrici sono posizionati in corrispondenza degli isolatori ed hanno il compito di fornire, in tempo reale, una misura dello spostamento orizzontale (della direzione di spinta) del piano di isolamento rispetto alla struttura fissa (al di sotto degli isolatori), in modo da avere in ogni istante, dall'inizio della fase di carico e per tutta la durata della prova, il massimo controllo del test. È stato posizionato un quarto trasduttore al primo piano, con l'obiettivo di valutare eventuali spostamenti differenziali tra il piano di isolamento e quello superiore.

Il trasduttore potenziometrico è stato posizionato nella configurazione di mezza corsa meccanica pari a $772\text{mm}/2=386\text{ mm}$, in modo da massimizzare la corsa nelle due direzioni positiva e negativa.

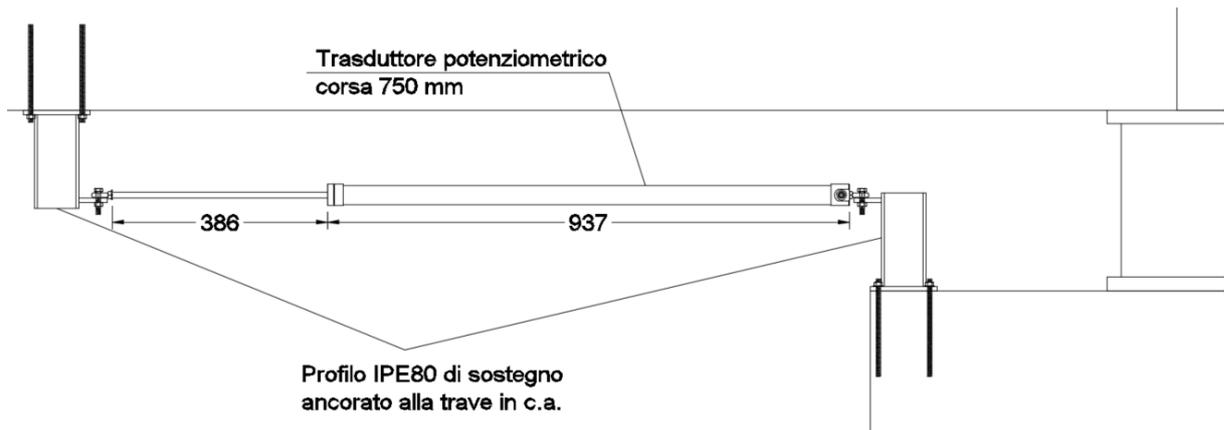


Figura 4.6 Prospetto trasduttore di spostamento

Termoigrometri

I termo igrometri sono dei piccoli registratori climatici per la misura prolungata di temperatura e umidità relativa; sono programmati via USB e possono essere posizionati senza l'utilizzo di cavi.

Cablaggio

Il sistema di acquisizione, posizionato al primo piano, è stato collegato alla strumentazione per mezzo di un sistema di cavi coassiali.

Nelle successive figure sono raffigurate le posizioni dei dispositivi di monitoraggio nei vari piani della struttura (Fig. 4.7/4.10)

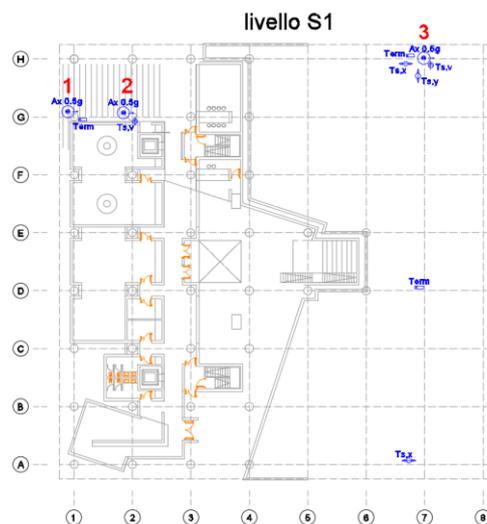


Figura 4.7 Disposizione strumentazione - Pianta livello S1

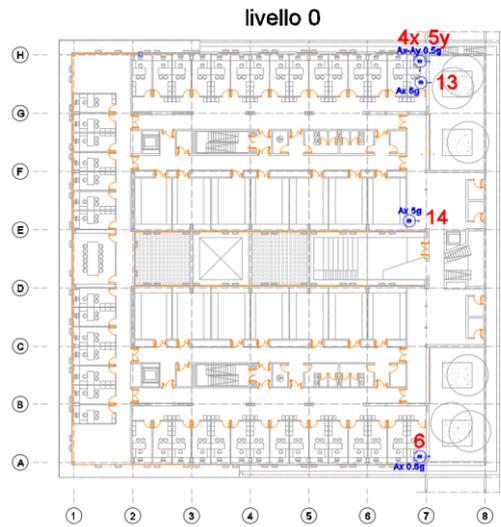


Figura 4.8 Disposizione della strumentazione - Pianta livello 0

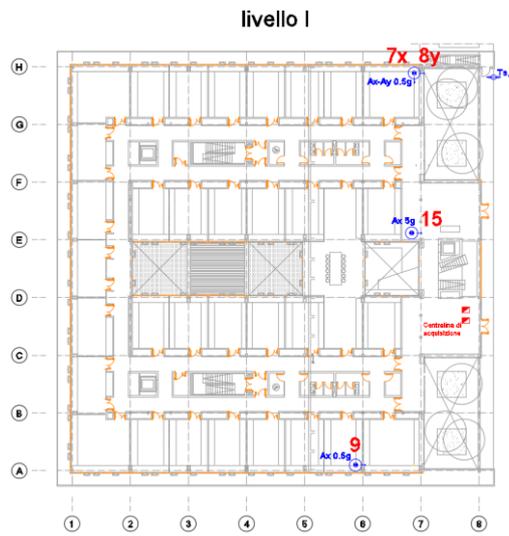


Figura 4.9 Disposizione della strumentazione - Pianta livello 1

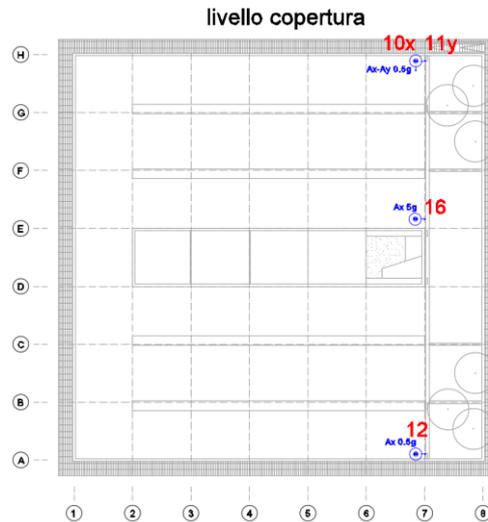


Tabella 4.10 Disposizione della strumentazione - Pianta livello copertura

4.3 Modalità di elaborazione dati prove in sito

Sono state effettuate 7 prove (5 dinamiche e 2 statiche), in cui la struttura è stata portata a differenti livelli di spostamento. Le prove sono state condotte in due giorni distinti: le prime tre il 3/07/2020 e le ultime quattro il 6/07/2020.

Si riportano in successione temporale la nomenclatura delle varie prove:

- Prova dinamica 1;
- Prova dinamica 2;
- Prova statica 3;
- Prova dinamica 4;
- Prova dinamica 5;
- Prova dinamica 6;
- Prova statica 7;

L'unica prova non elaborata è la prima, poiché non ultimata a causa di un problema tecnico sorto durante la fase iniziale. Per le restanti prove sono state calcolate per ogni step temporale:

- F_{celle} , la forza complessiva delle due celle di carico decurtata del rumore di fondo dovuto al sistema di acquisizione;
- $U_{x,relativo}$, spostamento relativo del sistema di isolamento calcolato come differenza tra la misura dello spostamento del trasduttore all'i-esimo step e la posizione iniziale del trasduttore prima dell'esecuzione della prima prova.

$$u_{x,relativo} = u_{x,Tg1} - u_{x,Tg} \text{ posizione iniziale prima prova}$$

Lo spostamento relativo nasce dal fatto che dopo l'esecuzione di una prova il sistema di isolamento ha uno spostamento residuo che recupererà solo in parte, perciò nella successiva prova la struttura si troverà in una configurazione deformata;

- $U_{x, \text{assoluto}}$, spostamento assoluto del sistema di isolamento calcolato come differenza tra la misura dello spostamento del trasduttore all'i-esimo step e lo spostamento iniziale del trasduttore della prova che si sta elaborando

$$u_{x, \text{assoluto}} = u_{x, Tg1} - u_{x, Tg \text{ posizione iniziale prova } i\text{-esima}};$$

- $F_{\text{sistema di isolamento}}$, aliquota della forza delle celle di carico che viene assorbita dall'intero sistema di isolamento. Tale forza si ottiene andando a sottrarre alla F_{celle} la forza d'attrito dovuta alle slitte. F_{slitte} , comprendente sia l'attrito di primo distacco che l'attrito dinamico, è stata ricavata preliminarmente andando ad osservare, nel grafico $F_{\text{celle}} - U_{x, \text{assoluto}}$, la massima forza delle celle di carico prima che il sistema si inizi a muovere.

In seguito verranno riportati le elaborazioni grafiche dei suddetti valori in funzione del tempo t e del legame forza-spostamento.

Inoltre per ogni prova è stato annotato:

- Il tempo impiegato, durante il carico, per arrivare allo spostamento massimo;
- Il periodo di oscillazione della struttura, quindi anche la pulsazione, durante la fase di rilascio;
- Lo spostamento residuo al fine di ogni prova;

Dopo aver calcolato tali valori si è passati, per ogni prova, alla determinazione delle caratteristiche meccaniche del sistema di isolamento:

- K_{eq} , rigidezza equivalente del sistema di isolamento

$$K_{\text{eq}} = \frac{F_{\text{iso, max}}}{u_{x, \text{max}}};$$

- G_{stat} , rigidezza a taglio del sistema di isolamento

$$G_{\text{stat}} = \frac{K_{\text{eq}} * h_{\text{is}}}{A_{\text{is}}};$$

Inoltre, avendo a disposizione le prove statiche, che simulano un ciclo di carico e scarico del sistema, è stato possibile calcolare:

- E_s , massima energia elastica convenzionale

$$E_s = \frac{K_{\text{eq}} * u_{x, \text{max}}^2}{2};$$

- E_d , energia dissipata calcolata come area del ciclo, approssimata con la regola dei trapezi:
durante la fase di carico si calcola l'intera area al di sotto del ramo di carico fino all'asse $Y=0$, mentre al ritorno si decurta l'area calcolata fino a quel momento con i trapezi al di sotto del ramo di scarico. Considerata la presenza della sola zona a spostamento positivo, lo smorzamento si calcola moltiplicando l'area per 2 ed incrementandola del 10% per tenere in conto dell'aliquota di energia non considerata nella transizione tra spostamento positivo e spostamento negativo (le celle di carico non calcolano la forza in senso opposto)

$$E_d = 2 * 1.1 * \text{Somma}(\text{aree dei singoli trapezi});$$

- ξ_{is} , smorzamento del sistema di isolamento

$$\xi_{is} = \frac{E_d}{4 * \pi * E_s};$$

4.4 Risultati delle singole prove

Sono riportati, per ogni singola prova, le elaborazioni grafiche e le caratteristiche del sistema di isolamento che ne derivano considerando solo lo spostamento assoluto. Lo spostamento relativo non viene considerato, poiché l'unica differenza sostanziale sta nel punto di partenza dei grafici. Inoltre imprimere una condizione iniziale al sistema, nella fase di modellazione di una prova, risulta alquanto complicato.

4.4.1 Prova dinamica 2

La prova è stata effettuata il 3/07/2020 alle ore 14, ottenendo uno spostamento del sistema di isolamento di 175,8 mm. La forza massima raggiunta dalle celle di carico è di 2729,4 kN.

Si riportano inizialmente, con le relative considerazioni, i seguenti grafici: $F_{\text{celle}} - t$ (Fig. 4.11), $U_{\text{iso}} - t$ (Fig. 4.12), $F_{\text{celle}} - U_{\text{iso}}$ (Fig. 4.13).

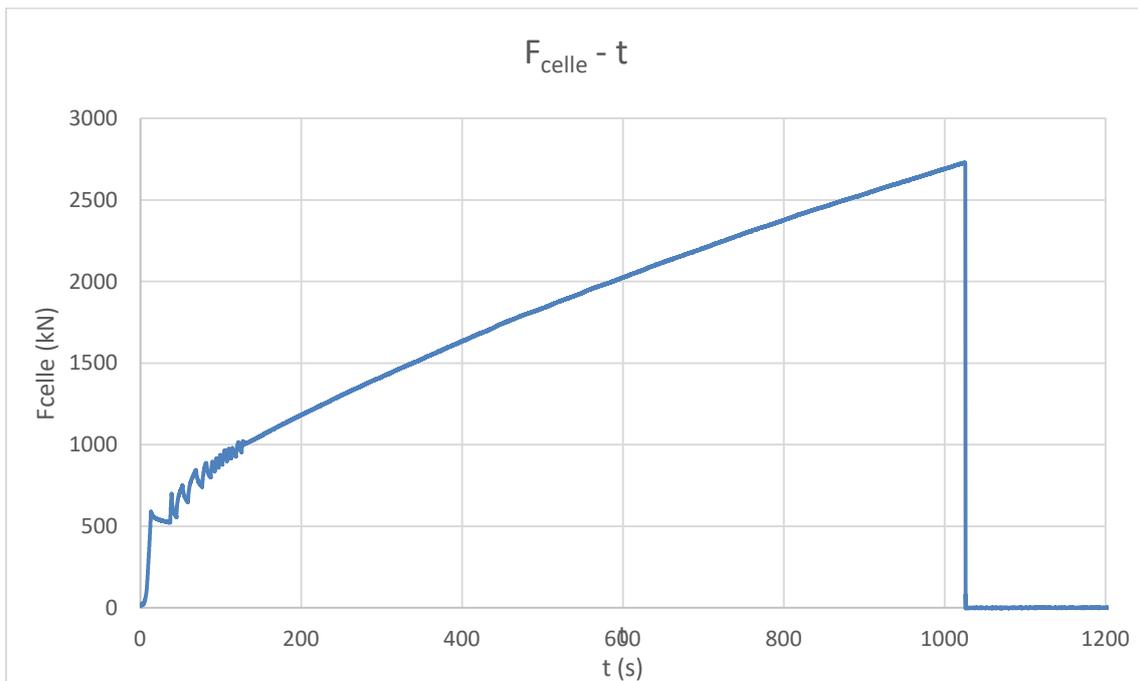


Figura 4.11 Grafico F_celle-t Prova dinamica 2

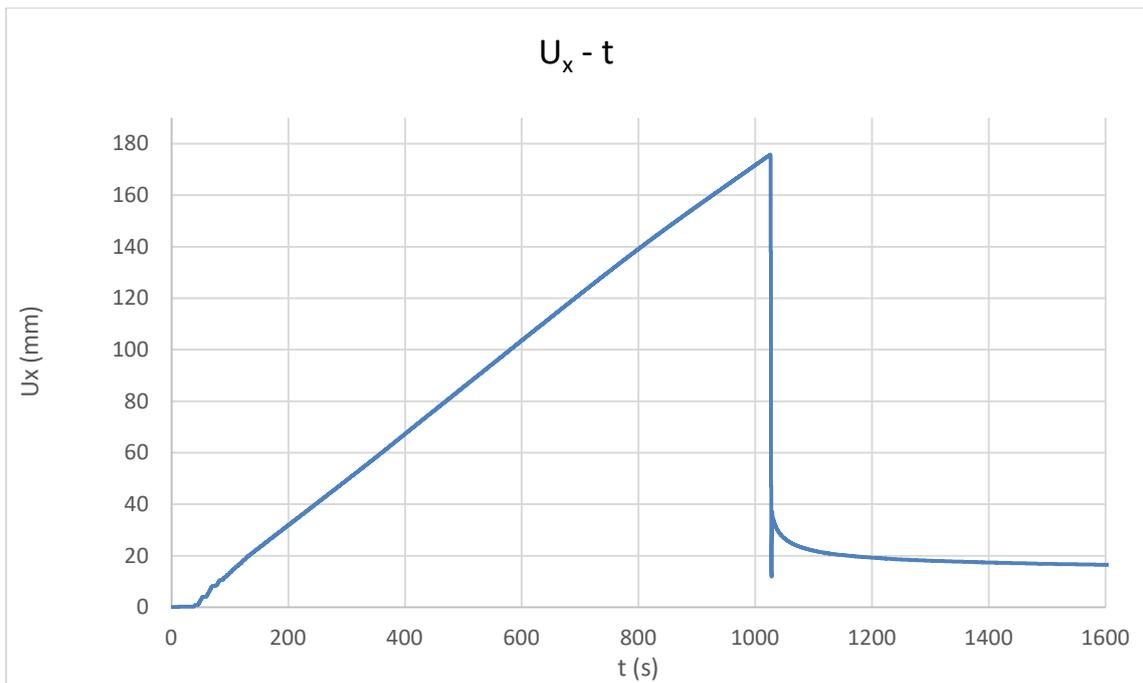


Figura 4.12 Grafico U_x - t Prova dinamica 2

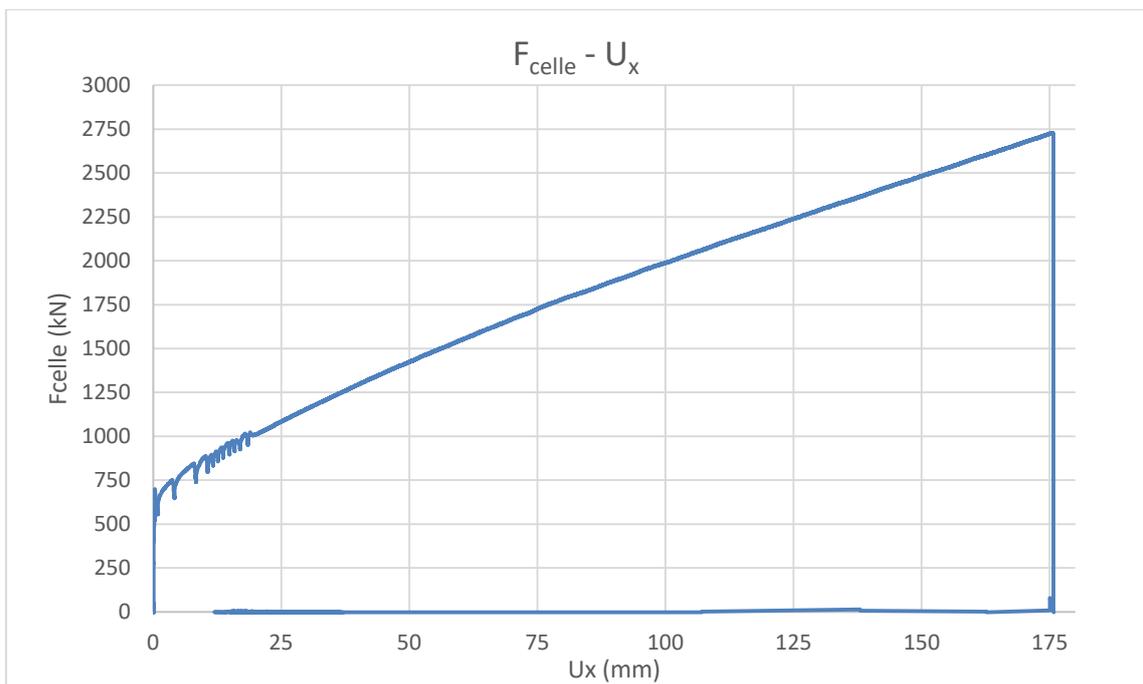


Figura 4.13 Grafico F_{celle} - U_x Prova dinamica 2

Dai precedenti grafici si può ricavare il tempo di carico e di rilascio con le rispettive velocità, che saranno utili per la modellazione della prova:

- $t_{\text{carico}} = 1025$ s, per arrivare ad uno spostamento di 175,8 mm, da cui si ricava $v_{\text{carico}} = 0,171$ mm/s;

- $t_{\text{rilascio}}=2$ s, tempo trascorso tra lo spostamento massimo e lo spostamento minimo del “ramo” di rilascio (11,95 mm), da cui deriva una $v_{\text{rilascio}}=81,91$ mm/s.

È possibile stimare, osservando il grafico $F_{\text{celle}} - U_x$ (Fig. 4.13), la forza di attrito di primo distacco, tale contributo è la forza da vincere affinché il sistema si inizi a muovere. Facendo uno zoom della parte iniziale del grafico $F_{\text{celle}} - U_x$ (Fig. 4.14), la forza di attrito risulta essere di $F_{\text{slitte}}=695$ kN, dalla quale è possibile stimare il coefficiente di attrito (Tab. 4.4):

- $\mu = \frac{F_{\text{attrito}}}{P_{\text{CV,sisma}} * n_{\text{slitte}}}$;
- $P_{\text{CV,sisma}}$, carico verticale in condizioni sismiche gravante sulla singolo slitta e pari a 585 kN;
- n_{slitte} , il numero delle slitte presenti pari a 36.

F_{attrito} (kN)	$P_{\text{CV,sisma}}$ (kN)	n_{slitte}	μ
695	585,00	36	3,3 %

Tabella 4.4 Coefficiente di attrito Prova dinamica 2

Per la prima volta grazie a questa prova il sistema si è mosso e per questo abbiamo una forza di attrito maggiore rispetto al contributo che si osserva nelle seguenti prove. Le oscillazioni della forza, dopo la fase del distacco, sono dovute alla trasformazione dell’attrito statico nel rispettivo contributo dinamico, questo passaggio non è istantaneo, ma graduale; questo fenomeno è osservabile solo in questa prova.

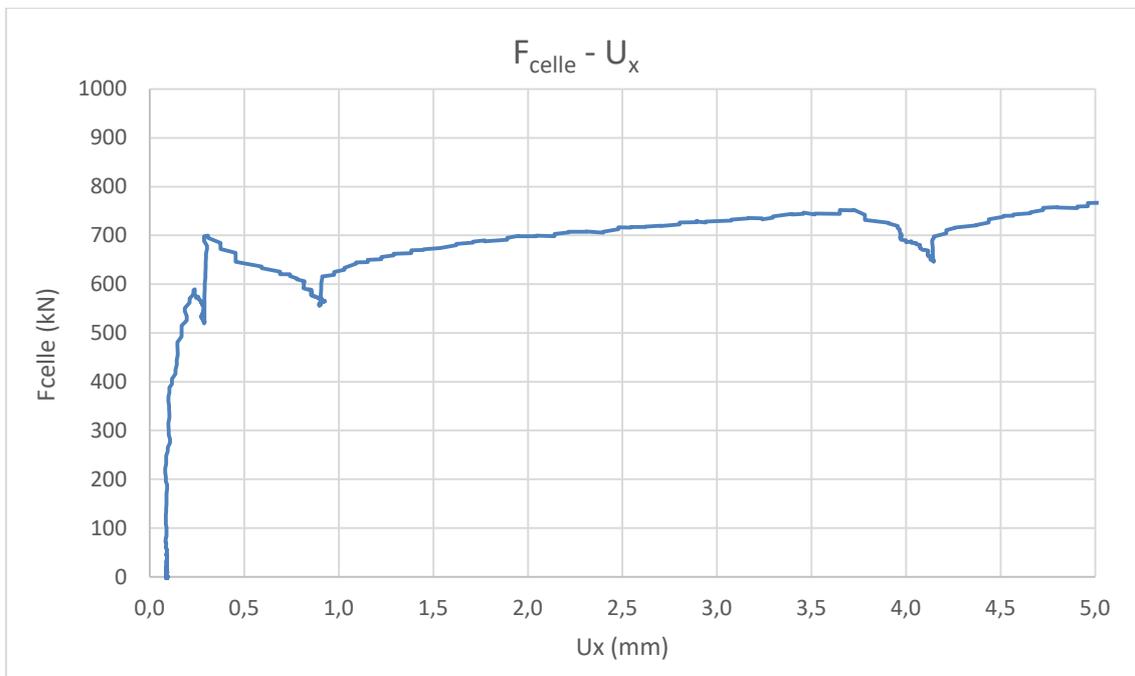


Figura 4.14 Zoom grafico F_{celle} - U_x

Se osserviamo il moto della struttura nella fase di rilascio (Fig. 4.15), notiamo come il sistema di isolamento oscilli compiendo un'intera oscillazione rispetto ad un punto non corrispondente allo 0 (relativo alla sua posizione indeformata). Il periodo di oscillazione misurato dallo spostamento massimo al secondo picco è di $T=2,7$ sec equivalente ad una pulsazione di $\omega=2,33$ s⁻¹. Una volta che il rilascio è avvenuto, la struttura grazie al comportamento viscoso degli isolatori elastomerici recupera parte della deformazione. Lo spostamento residuo del sistema di isolamento, prima di eseguire la prova statica 3, è di $u_{x,residuo}=14,7$ mm. Se la terza prova non si fosse svolta il sistema sarebbe tornato nella posizione iniziale in un determinato periodo di tempo.

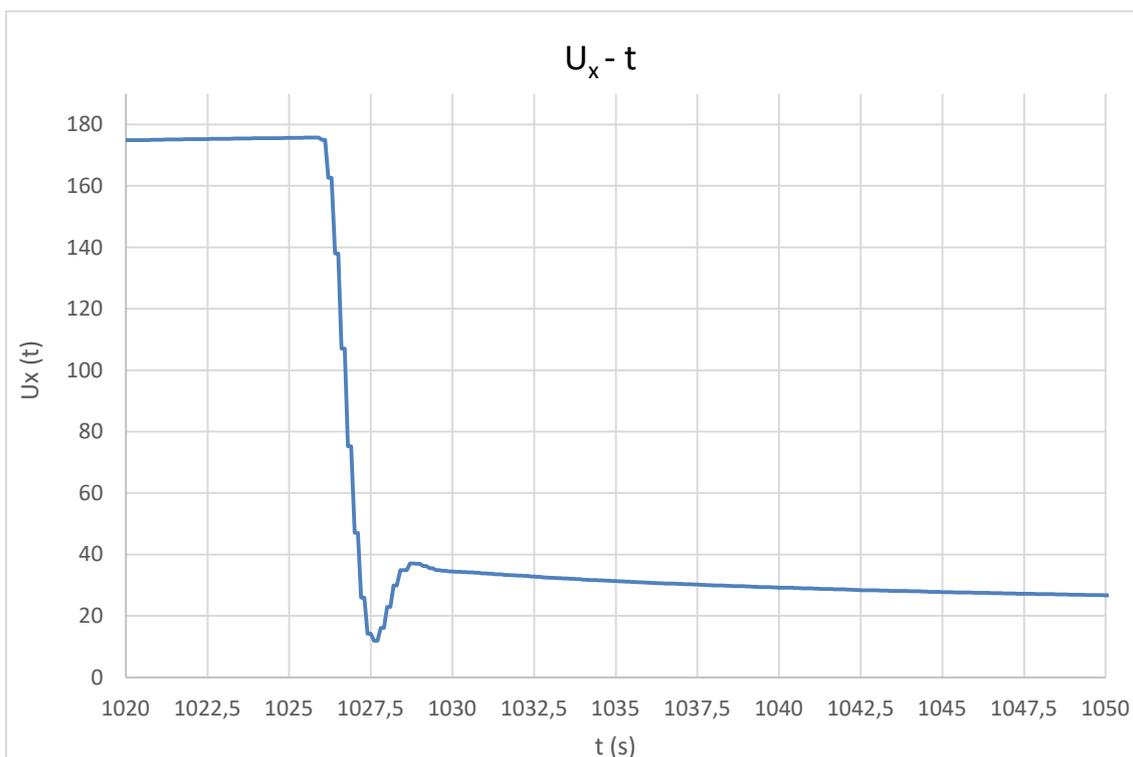


Figura 4.15 Rilascio struttura $U_x - t$

Decurtando alla F_{celle} il contributo offerto dall'attrito si ottiene: la forza massima del sistema di isolamento, le caratteristiche del sistema di isolamento (Tab. 4.5) e l'andamento $F_{iso} - U_x$ (Fig. 4.16).

$u_{x,iso,max}$ [mm]	$F_{iso,max}$ [kN]	K_{eq} [kN/m]	G_{stat} [kN/m ²]	$K_{eq,singolo\ iso}$ [kN/m]	$G_{stat,singolo\ iso}$ [kN/m ²]
175,76	2034,263	11573,98	7533,117	413,36	269,04

Tabella 4.5 Caratteristiche isolatori Prova dinamica 2

Dalla precedente tabella si può vedere come le caratteristiche equivalenti del singolo isolatore sono inferiori rispetto a quelle di progetto, questo perché le caratteristiche degli isolatori sono dipendenti dalla velocità di carico e, essendo la prova lenta, la rigidezza equivalente e la rigidezza a taglio saranno inferiori rispetto a quelle ottenute dalle prove sperimentali di laboratorio. Questo aspetto è osservabile per tutte e 7 le prove, in particolare per quelle statiche, condotte lentamente sia in fase di carico che di scarico. Nonostante la velocità di carico sia bassa nelle prove dinamiche, ciò non

implica che i relativi parametri si equivalgono. Difatti, quest'ultimi differiranno, poiché dipendono sia dall'ampiezza della deformazione e sia dal diverso contributo offerto dall'attrito.

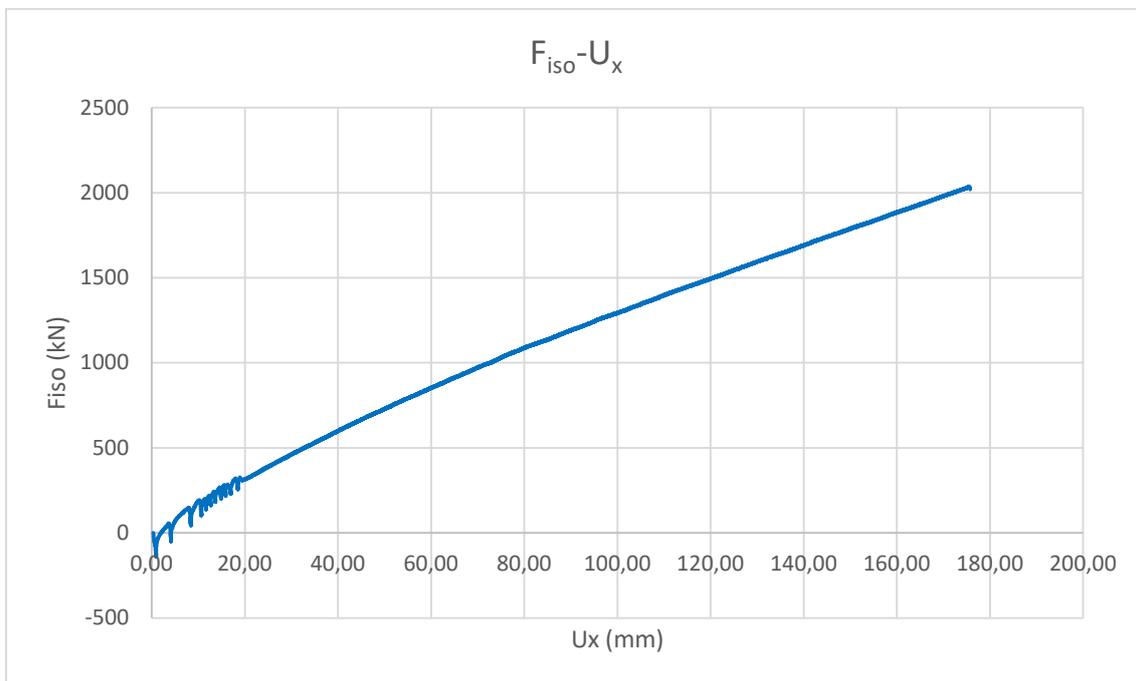


Figura 4.16 Grafico Fiso Ux

4.4.2 Prova statica 3

La Prova statica 3 è stata effettuata il 3/07/2020 alle ore 16, ottenendo uno spostamento assoluto del sistema di $u_{x,ass}=217,2$ mm e una forza massima delle celle di 3205,7 kN.

Il ramo di carico ha una durata di $t_{carico}=1090$ s, corrispondente ad una velocità di carico $v_{carico}=0,199$ mm/s, quello di scarico ha una durata di $t_{scarico}=1710$ s e una velocità di $v_{carico}=0,127$ mm/s.

Si riportano i seguenti grafici: $U_x - t$ (Fig. 4.17), $F_{celle} - t$ (Fig. 4.18), $F_{celle} - U_x$ (Fig. 4.19).

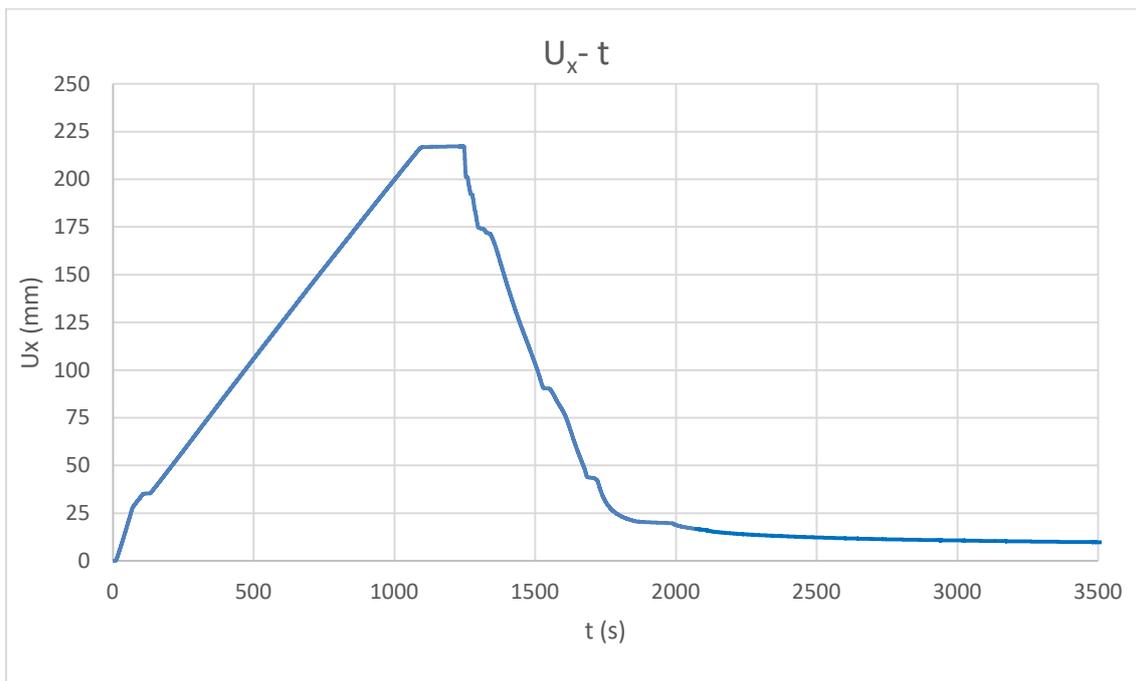


Figura 4.17 Grafico $U_x - t$

Lo spostamento che si ha alla fine della prova statica 3 è di: $u_x = 9,6$ mm.

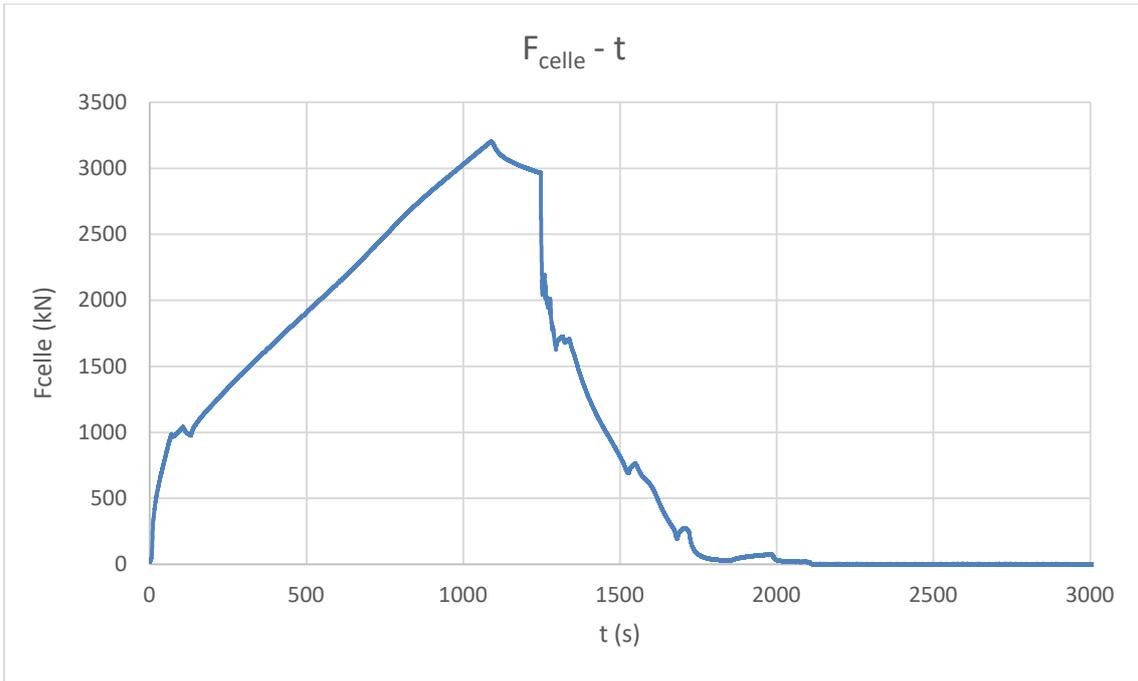


Figura 4.18 Grafico F_{celle} - t

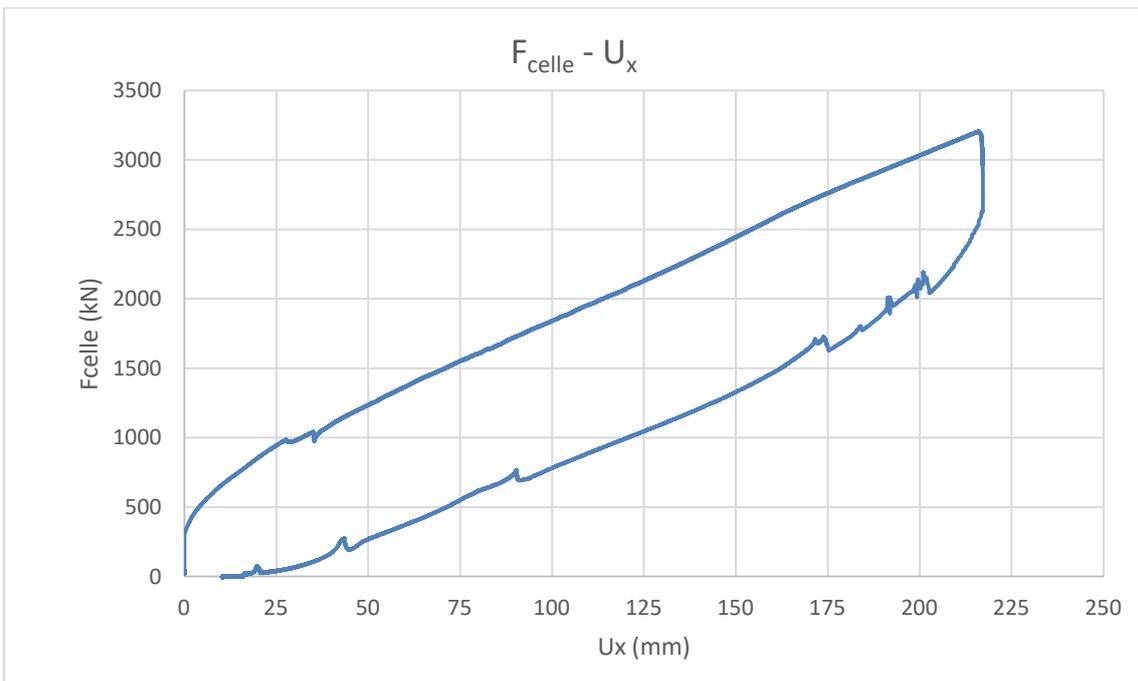


Figura 4.19 Grafico F_{celle} - U_x

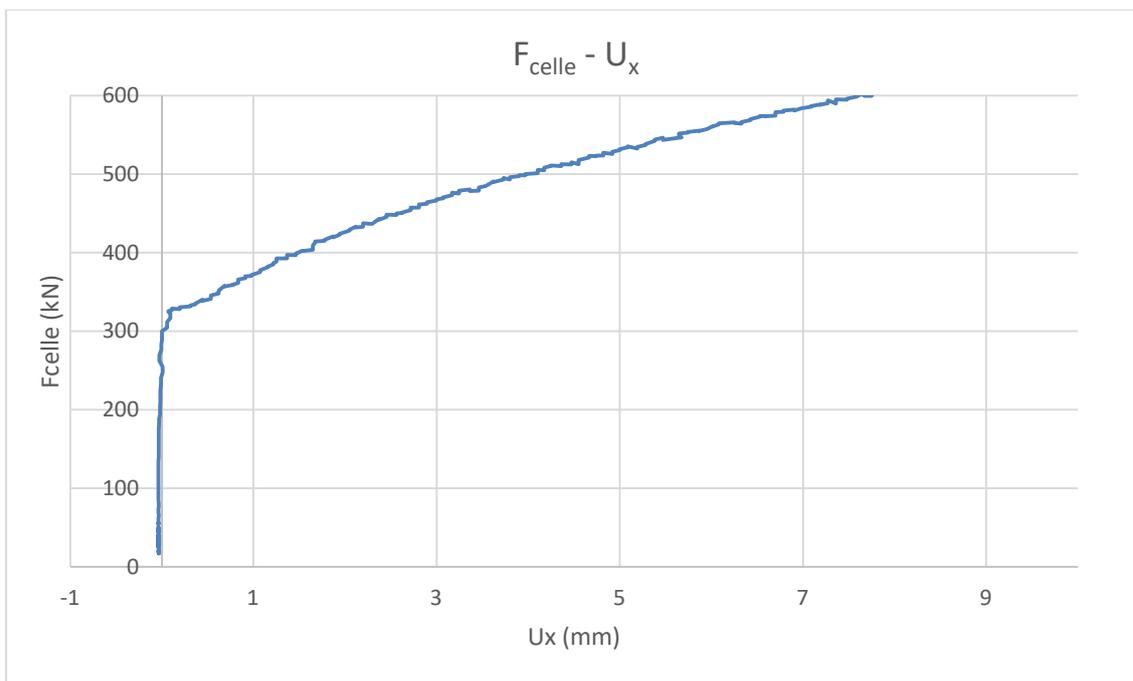


Figura 4.20 Zoom F_{celle} - U_x

Dalla Fig. 3.20 è facile stimare la forza di attrito delle slitte che risulta essere di $F_{slitte}=330$ kN (Tab. 4.6). Rispetto alla prova precedente la forza di attrito, di conseguenza il coefficiente d'attrito, è minore.

$F_{attrito}$ (kN)	$P_{CV,sisma}$ (kN)	n_{slitte}	μ
330	585	36	1,57%

Tabella 4.6 Coefficiente di attrito Prova statica 3

Si riporta il grafico del ciclo di carico/scarico $F_{iso} - U_x$ (Fig. 4.21), e i parametri meccanici del sistema di isolamento (Tab. 4.7). Il ciclo del solo sistema di isolamento è stato ottenuto andando a sottrarre la forza d'attrito nella fase di carico e ad aggiungerla durante alla fase di scarico. La differente considerazione sull'attrito nasce dal fatto che mentre la rigidità degli isolatori rimane di segno continuo, cioè ogni volta che spingo gli isolatori fanno tornare indietro la struttura, le slitte si comportano in maniera differente. Infatti, mentre spingo le slitte si oppongono (la loro reazione ha lo stesso verso degli isolatori), ma quando la struttura torna indietro le slitte continuano ad opporsi al moto, perciò il loro contributo va sottratto nella fase di carico e aggiunto nella fase di scarico. La forza di attrito verrà aggiunta dal momento in cui lo spostamento diminuisce, poiché l'aggiunta viene fatta puntualmente per un determinato step temporale si creerà un "cappio" nel diagramma $F_{iso}-U_x$. Il "cappio" non è considerato nel calcolo delle caratteristiche del sistema di isolamento.

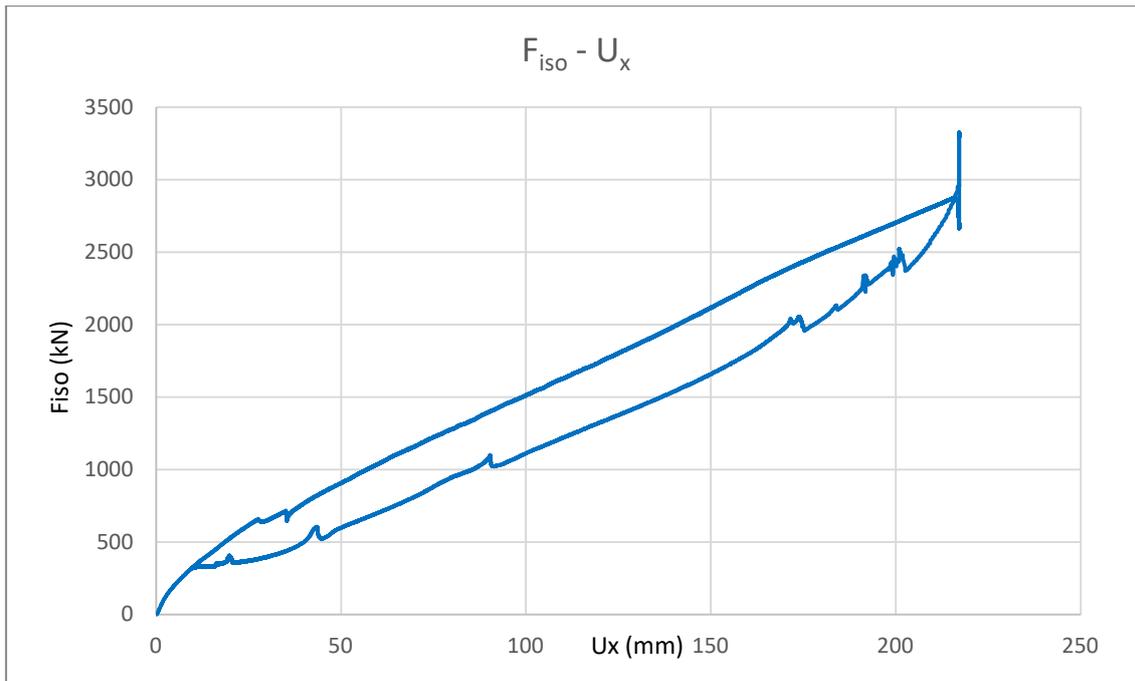


Figura 4.21 Grafico Fiso - Ux

$u_{x,iso,max,ass}$ [mm]	$F_{iso,max}$ [kN]	K_{eq} [kN/m]	G_{stat} [kN/m ²]	$K_{eq,iso\ singolo}$ [kN/m]	$G_{stat,iso\ singolo}$ [kN/m ²]	E_s [kNm]	E_D [kNm]	ξ_{esi}
217,17	2877,00	13247,97	8622,66	473,14	307,95	312,4	161,0	4,1%

Tabella 4.7 Caratteristiche isolatori Prova statica 3

Il discorso fatto sulle caratteristiche equivalenti, della Prova dinamica 2, vale anche in questo caso. Infatti, oltre alla rigidezza equivalente e al modulo di taglio, il coefficiente di smorzamento equivalente risulta essere molto inferiore rispetto a quello di progetto. Ciò è dovuto alla dipendenza della velocità degli isolatori e alla dissipazione prodotta dalle slitte, che non è trascurabile.

3.4.3 Prova dinamica 4

La prova dinamica 4 è stata svolta il giorno 6/06/2020 alle ore 12.30, ottenendo uno spostamento assoluto del sistema di $u_x = 88,13$ mm. La massima forza registrata dalle celle di carico è di 1756,5 kN.

Lo spostamento residuo registrato alla fine della Prova statica 3 era di $u_x = 24,3$, gli isolatori, in questo lasso di tempo hanno recuperato in parte lo spostamento grazie alle sue proprietà viscosi.

Si riportano i seguenti grafici: $U_x - t$ (Fig. 4.22), $F_{\text{celle}} - t$ (Fig. 4.23), $F_{\text{celle}} - U_x$ (Fig. 4.24).

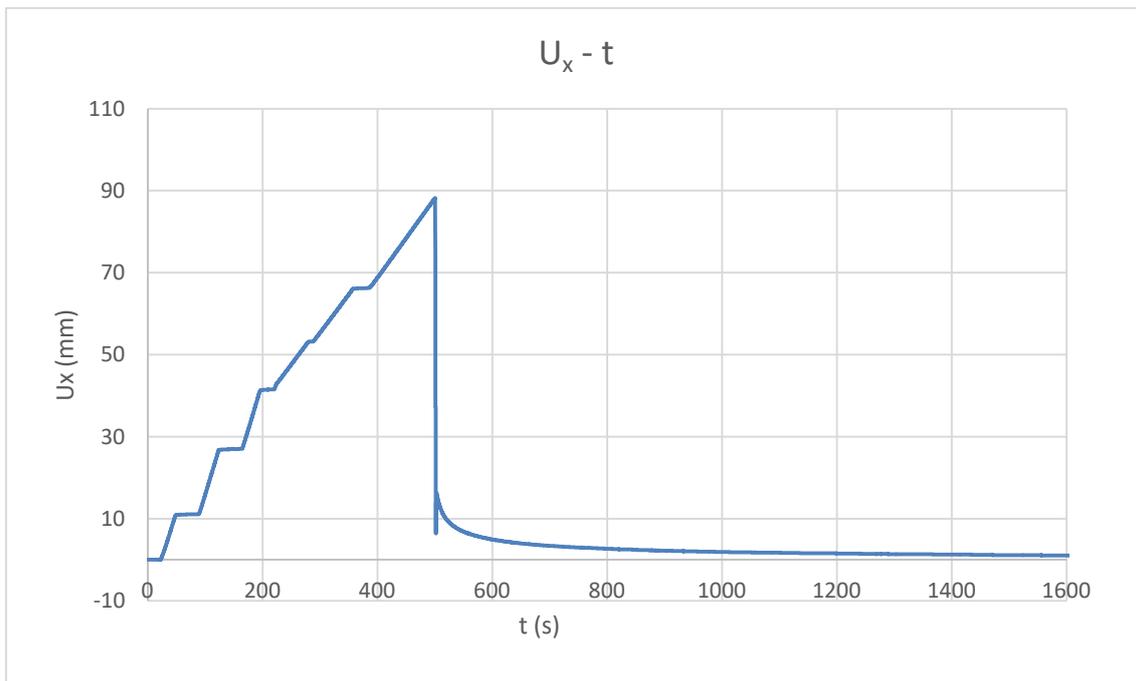


Figura 4.22 Grafico $U_x - t$

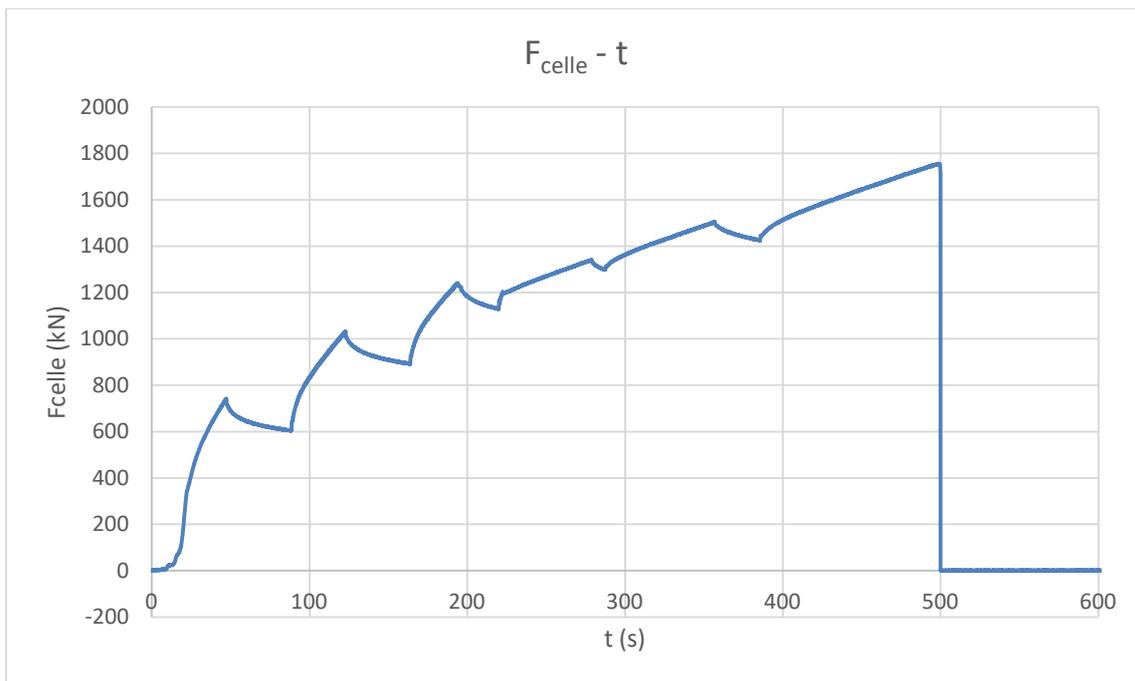


Figura 4.23 Grafico Fcelle - t

La prova è stata condotta per step di carico in cui ad ogni step lo spostamento è tenuto fisso e il sistema di spinta è disattivato. La caduta di tensione misurata dalle celle di carico è dovuta sostanzialmente sia all'effetto viscoso degli isolatori. In seguito tale prova risulterà di notevole utilità per stimare il contributo offerto dalla viscosità durante la fase di carico.

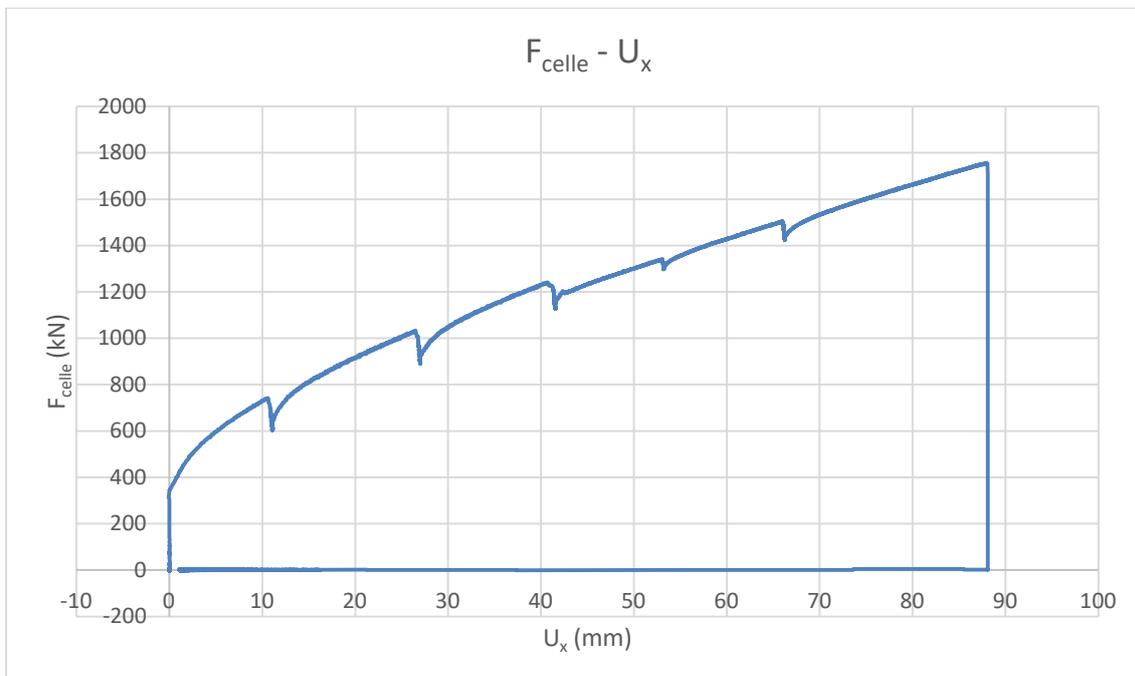


Figura 4.24 Grafico Fcelle - U_x

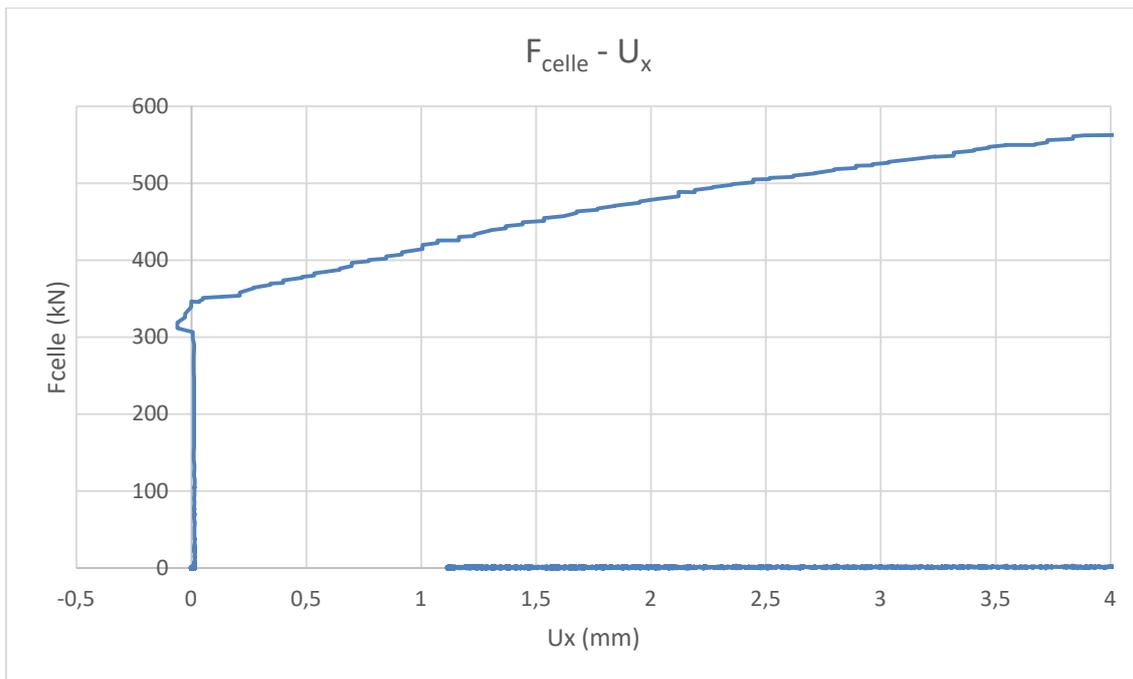


Figura 4.25 Zoom F_{celle} – U_x

La forza di attrito è stata assunta pari a $F_{slitte}=350$ kN (Fig. 4.25) dalla quale è stato calcolato il coefficiente di attrito (Tab. 4.8).

$F_{attrito}$ (kN)	$P_{CV,SISMA}$ (kN)	n_{slitte}	μ
350	585	36	0,017

Tabella 4.8 Coefficiente di attrito Prova dinamica 4

Rispetto alla Prova statica 3, la forza di attrito risulta maggiore, questo è imputabile al tempo trascorso tra le due prove (3giorni).

Il periodo di oscillazione (Fig. 4.26), valutato allo stesso modo della Prova dinamica 2, del sistema durante la fase di rilascio è di $T = 2,4$ s che corrisponde ad una pulsazione di $\omega = 2,618$ s⁻¹.

Lo spostamento residuo del sistema è di: $u_x = 0,57$ mm.

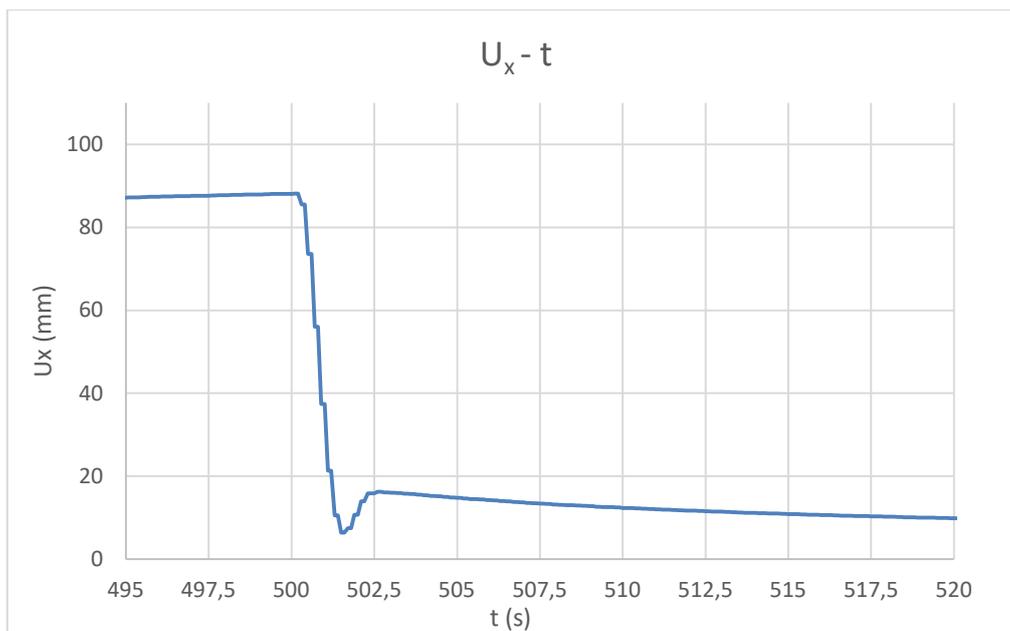


Figura 4.26 Grafico rilascio struttura $U_x - t$

Di seguito sono riportati i grafici $F_{iso} - U_x$ (Fig. 4.27) e le relative caratteristiche del sistema di isolamento (Tab. 4.9).

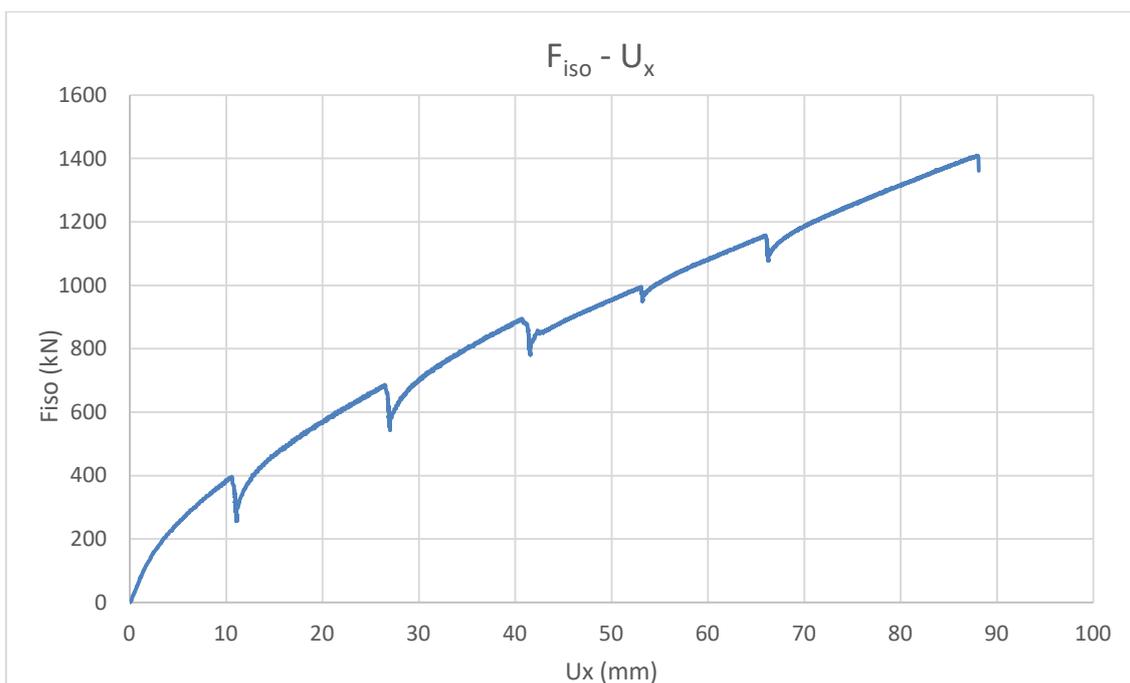


Figura 4.27 Grafico $F_{iso} - U_x$

$u_{x,iso,max,ass}$ [mm]	$F_{iso,max}$ [kN]	K_{eq} [kN/m]	G_{stat} [kN/m ²]	$K_{eq,iso\ singolo}$ [kN/m]	$G_{stat,iso\ singolo}$ [kN/m ²]
88,13	1409,54	15994,25	10410,12	571,22	371,79

Tabella 4.9 Caratteristiche isolatori Prova dinamica 4

3.4.4 Prova dinamica 5

La prova dinamica 5 è stata svolta il giorno 6/06/2020 alle ore 13.40, ottenendo uno spostamento assoluto del sistema di $u_{x,ass}=205,8$ mm. La massima forza registrata dalle celle di carico è di 3156,8 kN.

Il ramo di carico ha una durata di $t_{carico}=1110$ s, corrispondente ad una velocità di carico $v_{carico}=0,188$ mm/s. Il tempo del rilascio è di $t_{rilascio}=2$ s, corrispondente ad una velocità di rilascio di $v_{rilascio}=102,75$ mm/s.

Si riportano i seguenti grafici: $U_x - t$ (Fig. 4.28), $F_{celle} - t$ (Fig. 4.29), $F_{celle} - U_x$ (Fig. 4.30).

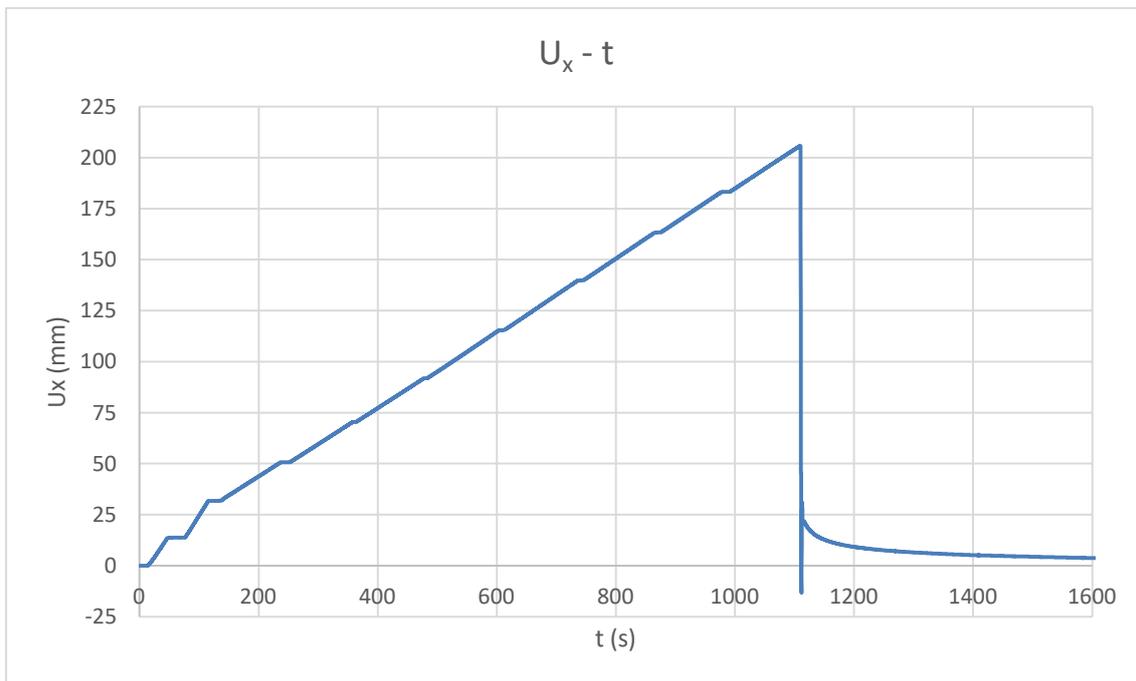


Figura 4.28 Grafico U_x - t

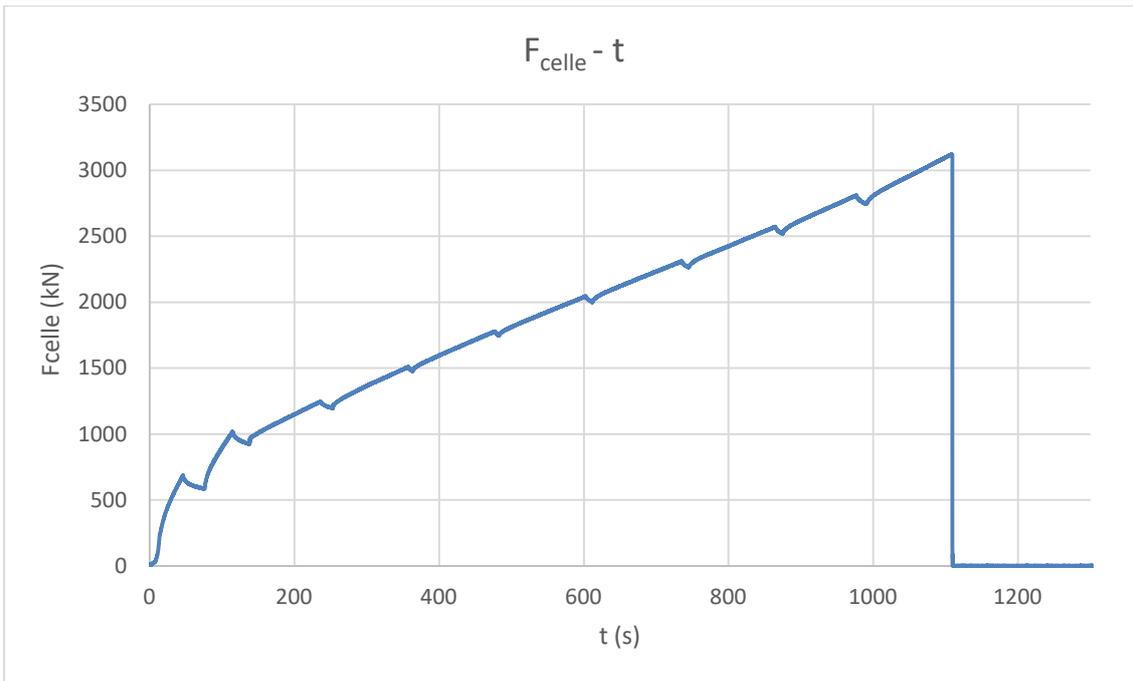


Figura 4.29 Grafico F_{celle} - t

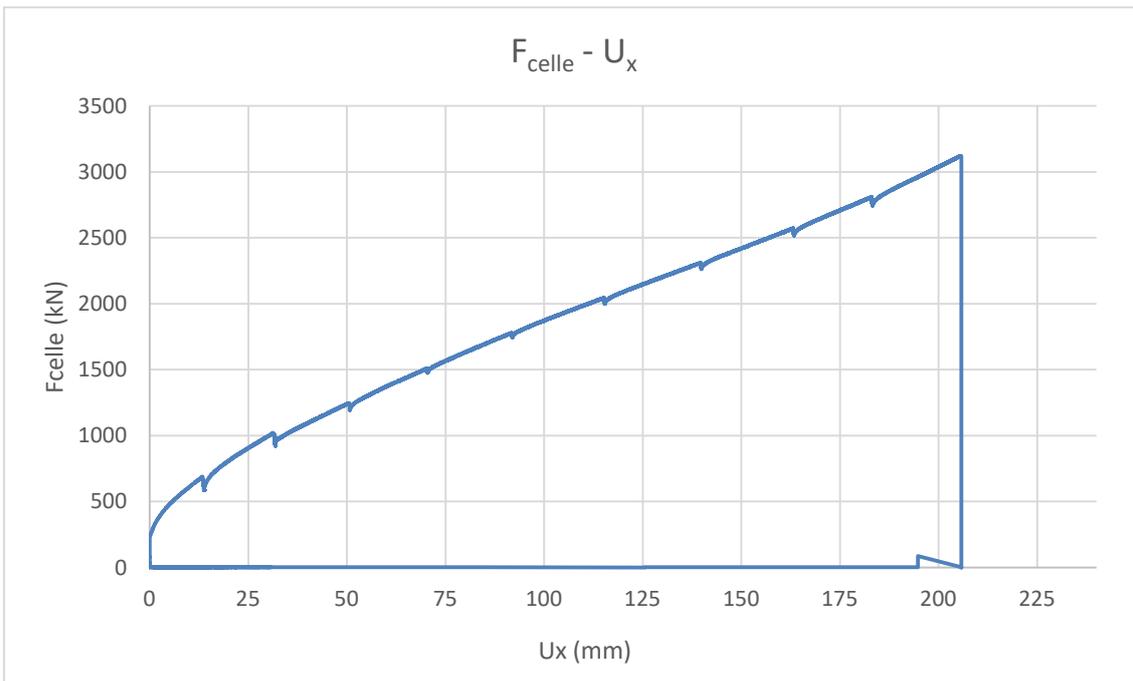


Figura 4.30 Grafico F_{celle} - U_x

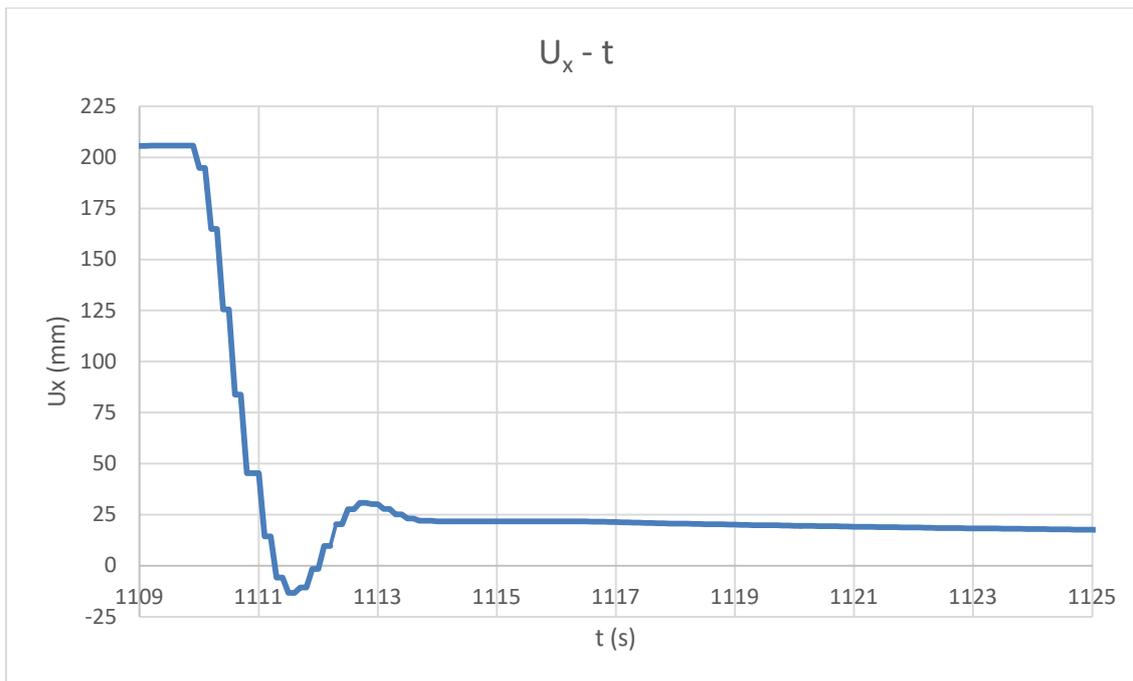


Figura 4.31 Grafico rilascio struttura $U_x - t$

Avvenuto il rilascio (Fig. 4.31), la struttura oscilla con un periodo $T=2,7$ sec corrispondente ad una pulsazione $\omega=2,327 \text{ s}^{-1}$. Rispetto alle prove dinamiche precedenti, il sistema, durante l'oscillazione, arriva a spostamenti negativi, ciò è dovuto al maggior spostamento impresso al sistema.

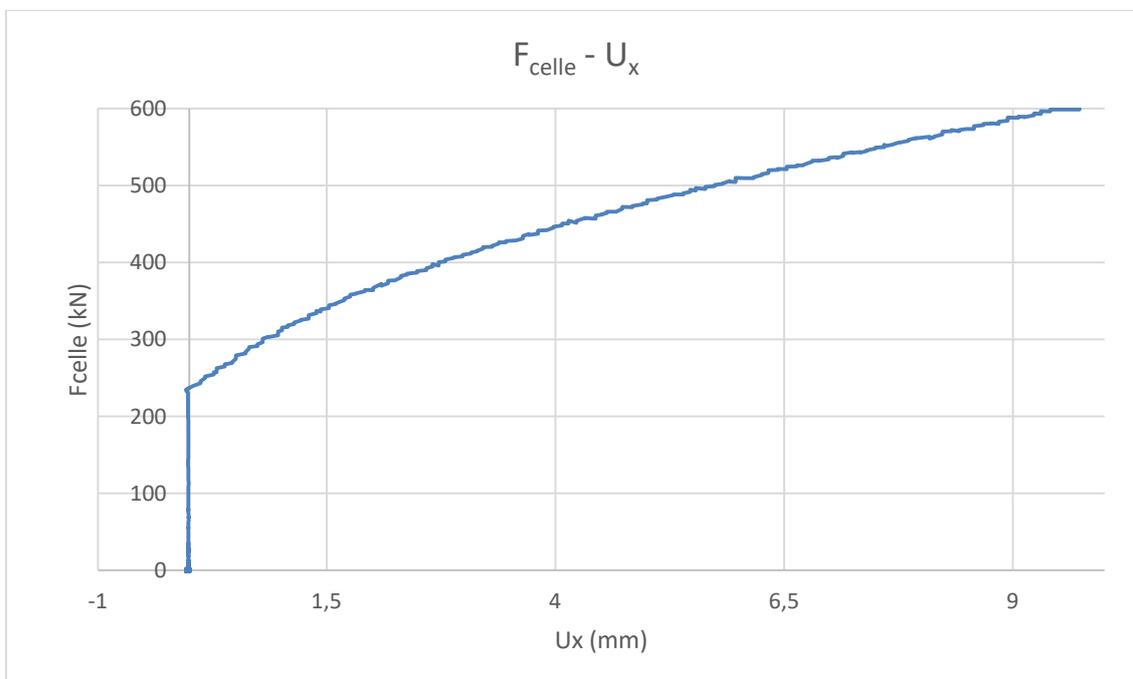


Figura 4.32 Zoom $F_{\text{celle}} - U_x$ per stima attrito

Lo spostamento ultimo del sistema è di: $u_{x,ass} = 1.13 \text{ mm}$.

La forza di attrito è pari a $F_{\text{slitte}} = 240 \text{ kN}$, da come si può vedere in figura Fig. 3.32, per la quale è stato calcolato il coefficiente di attrito (Tab. 4.10)

$F_{\text{attrito,statico}}$ (kN)	P_{CVSISMA} (kN)	n_{slitte}	μ
240	585	36	1,14%

Tabella 4.10 Coefficiente di attrito Prova dinamica 5

Di seguito sono riportati i grafici $F_{\text{iso}} - U_{x,\text{assoluto}}$ (Fig. 4.33) e le relative caratteristiche del sistema di isolamento (Tab. 4.11).

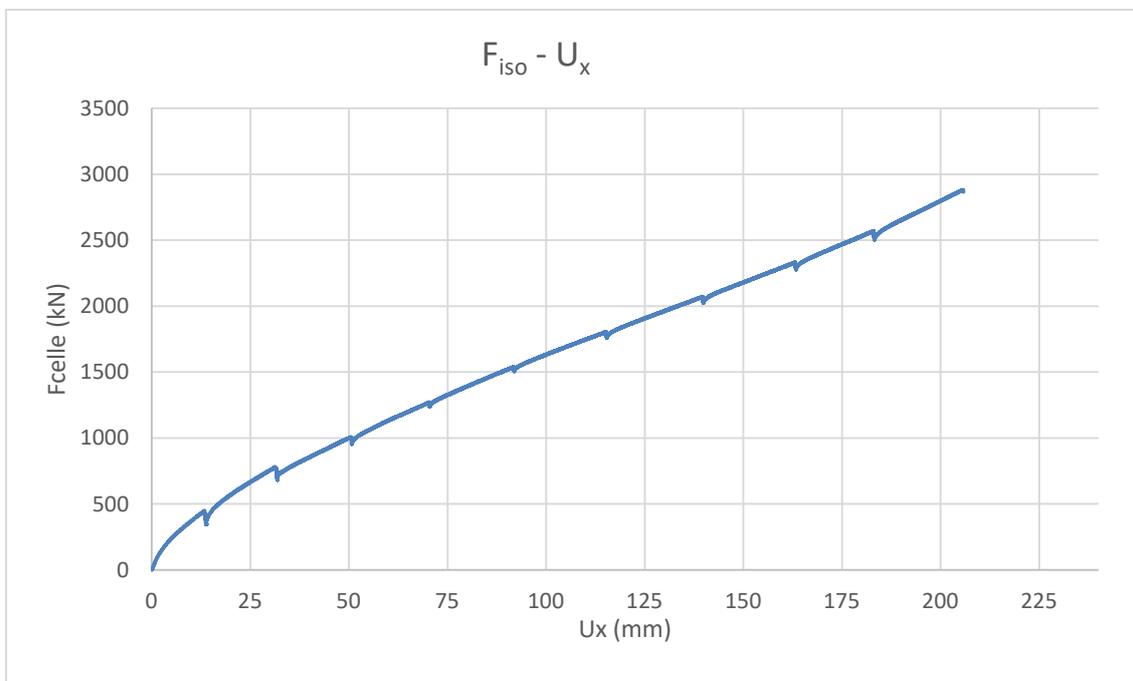


Figura 4.33 Grafico Fiso - Ux

$u_{x,\text{iso,max,ass}}$ [mm]	$F_{\text{iso,max}}$ [kN]	K_{eq} [kN/m]	G_{stat} [kN/m ²]	$K_{\text{eq,iso singolo}}$ [kN/m]	$G_{\text{stat,iso singolo}}$ [kN/m ²]
205,80	2880,28	13995,20	9109,01	499,83	325,32

Tabella 4.11 Caratteristiche isolatori Prova dinamica 5

4.4.5 Prova dinamica 6

La prova dinamica 6 è stata svolta il giorno 6/06/2020, ottenendo uno spostamento assoluto del sistema di $u_{x,ass}=100,7$ mm. La massima Forza registrata dalle celle di carico è di 1829,5 kN.

Di questa prova non si hanno dati nella fase di rilascio, quindi si riporteranno solo i grafici e i dati della fase di carico.

Il ramo di carico ha una durata di $t_{carico}=510$ s, corrispondente ad una velocità di carico $v_{carico}=0,211$ mm/s.

Si riportano i seguenti grafici: $U_x - t$ (Fig. 4.34), $F_{celle} - t$ (Fig. 4.35), $F_{celle} - U_x$ (Fig. 4.36).

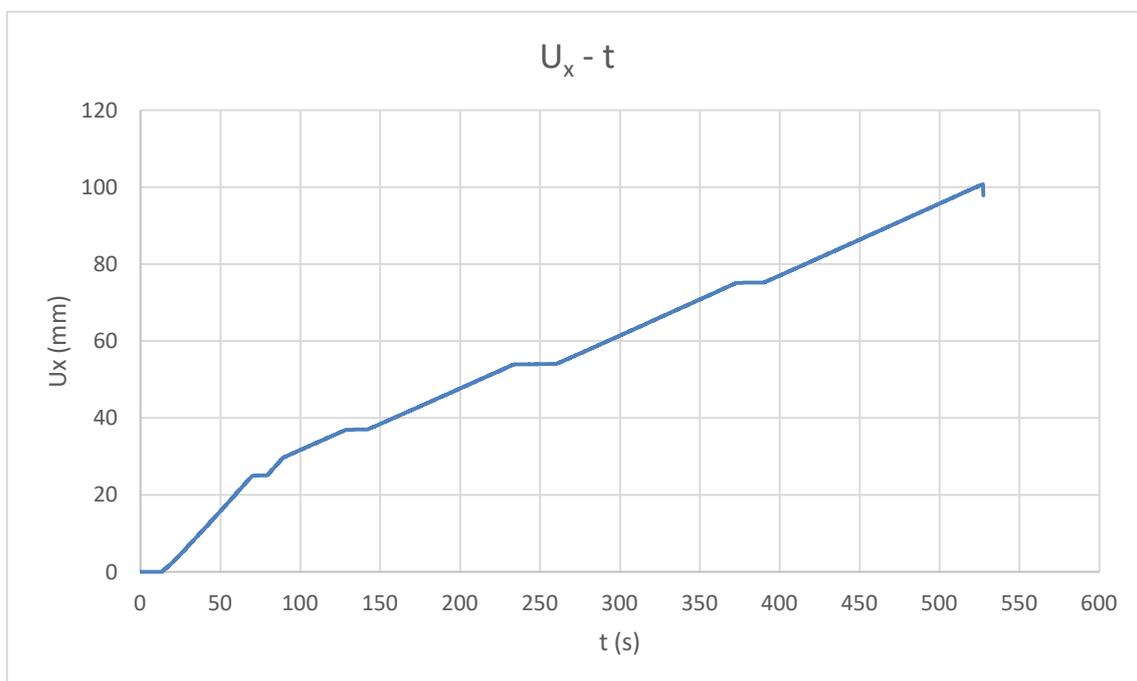


Figura 4.34 Grafico $U_x - t$

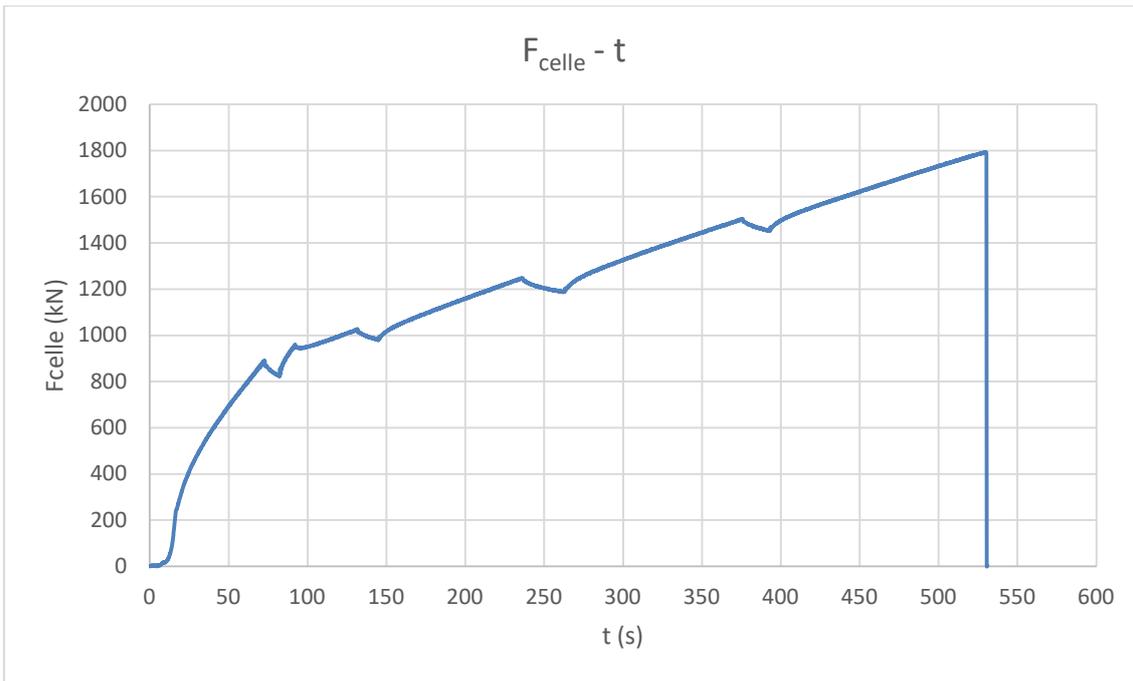


Figura 4.35 Grafico F_{celle} - t

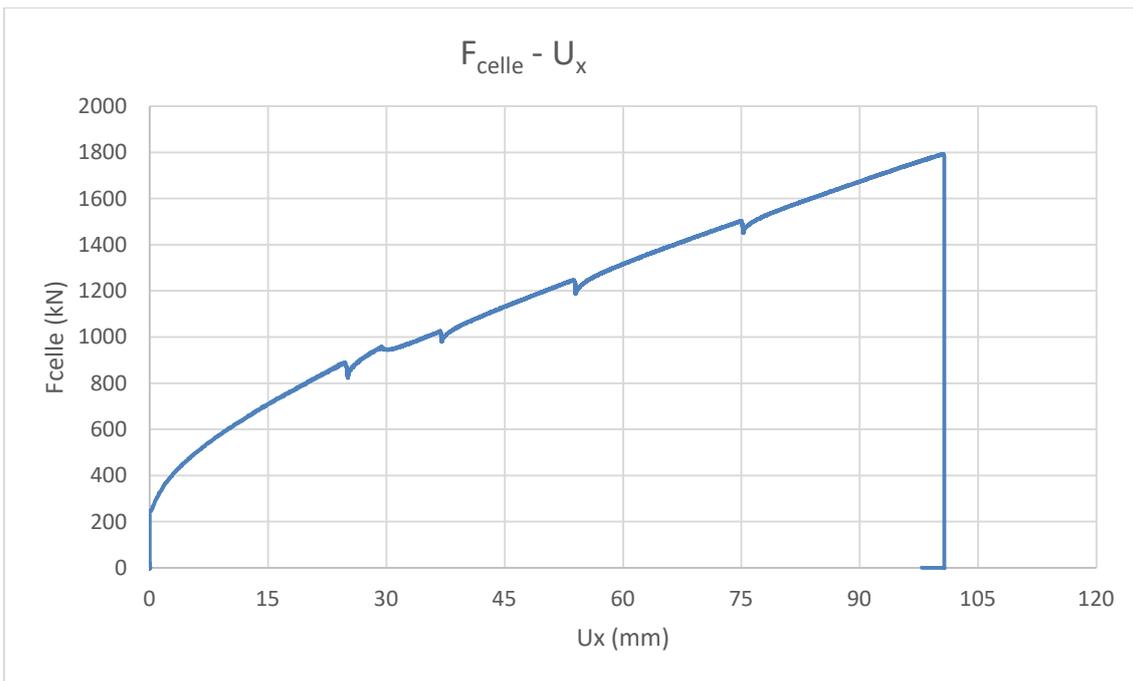


Figura 4.36 Grafico F_{celle} - U_x

La forza di attrito è stata assunta pari a $F_{slitte}=350$ kN (Fig. 4.37) dalla quale è stato calcolato il coefficiente di attrito (Tab. 4.12).

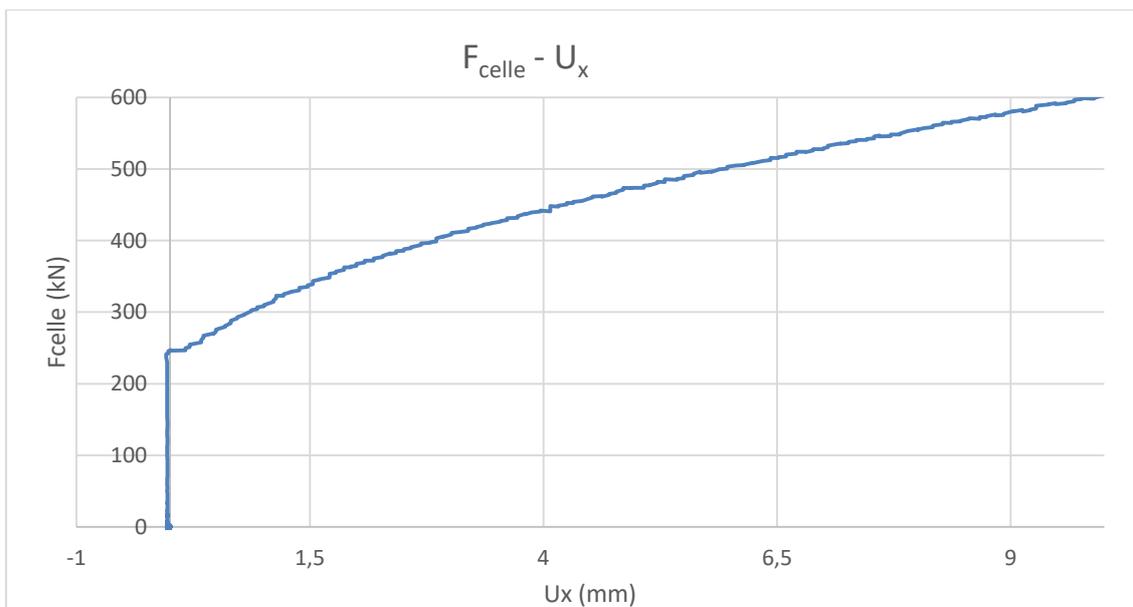


Figura 3437 Zoom F_{celle} – U_x per stima forza di attrito

F _{attrito} (kN)	P _{CV,SISMA} (kN)	n _{slitte}	μ
241	585	36	1,14%

Tabella 4.12 Coefficiente d'attrito

Di seguito sono riportati i grafici F_{iso} – U_x (Fig. 4.38) e le relative caratteristiche del sistema di isolamento (Tab. 4.9).

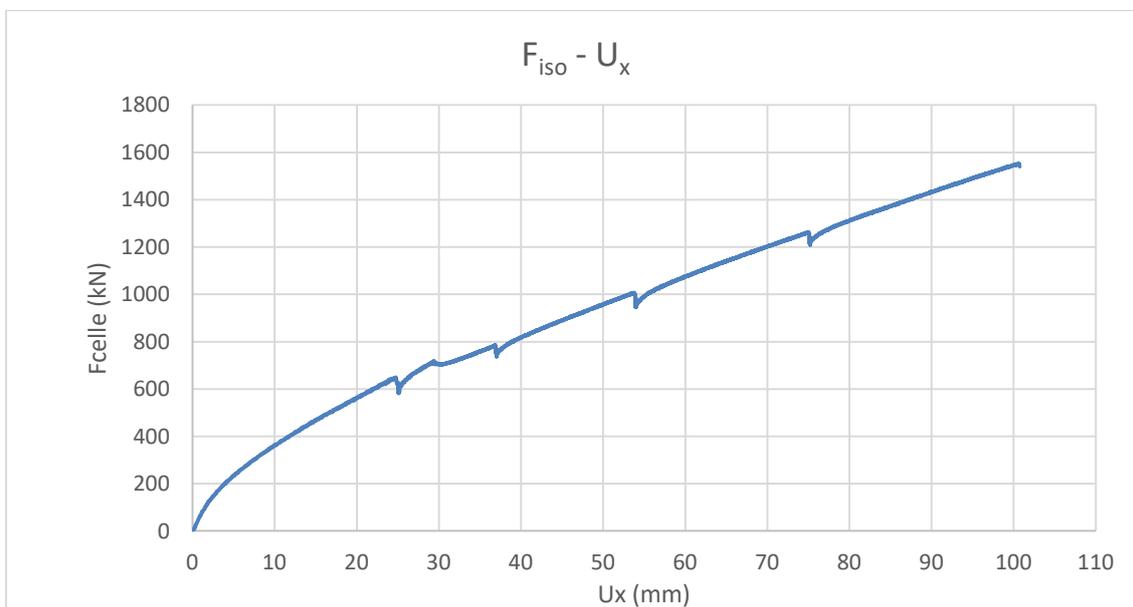


Figura 4.38 Grafico F_{celle} – U_x,

u _{x,iso,max,ass} [mm]	F _{iso,max} [kN]	K _{eq} [kN/m]	G _{stat} [kN/m ²]	K _{eq,iso singolo} [kN/m]	G _{stat,iso singolo} [kN/m ²]
100,72	1551,92	15408,28	10028,73	550,30	358,17

Tabella 4.13 Caratteristiche isolatori Prova dinamica 6

4.4.6 Prova statica 7

La Prova dinamica 7 è stata svolta il giorno 6/06/2020, ottenendo uno spostamento assoluto del sistema di $u_{x,ass}=263,35$ mm. La massima forza registrata dalle celle di carico è di 3868,53 kN.

Il ramo di carico ha una durata di $t_{carico}=1500$ s, corrispondente ad una velocità di $v_{carico}=0,175$ mm/s, mentre il ramo di scarico ha un' estensione di $t_{carico}=1400$ s, coincidente ad una velocità di $v_{carico}=0,178$ mm/s. La Prova statica 7 è la prova più lenta che si è svolta, questa risulterà molto importante nella fase di modellazione quando si cercherà di cogliere la differenza tra il comportamento lento e veloce degli isolatori.

Si riportano i seguenti grafici : $U_x - t$ (Fig. 4.39), $F_{celle} - t$ (Fig. 4.40), $F_{celle} - U_x$ (Fig. 4.41).

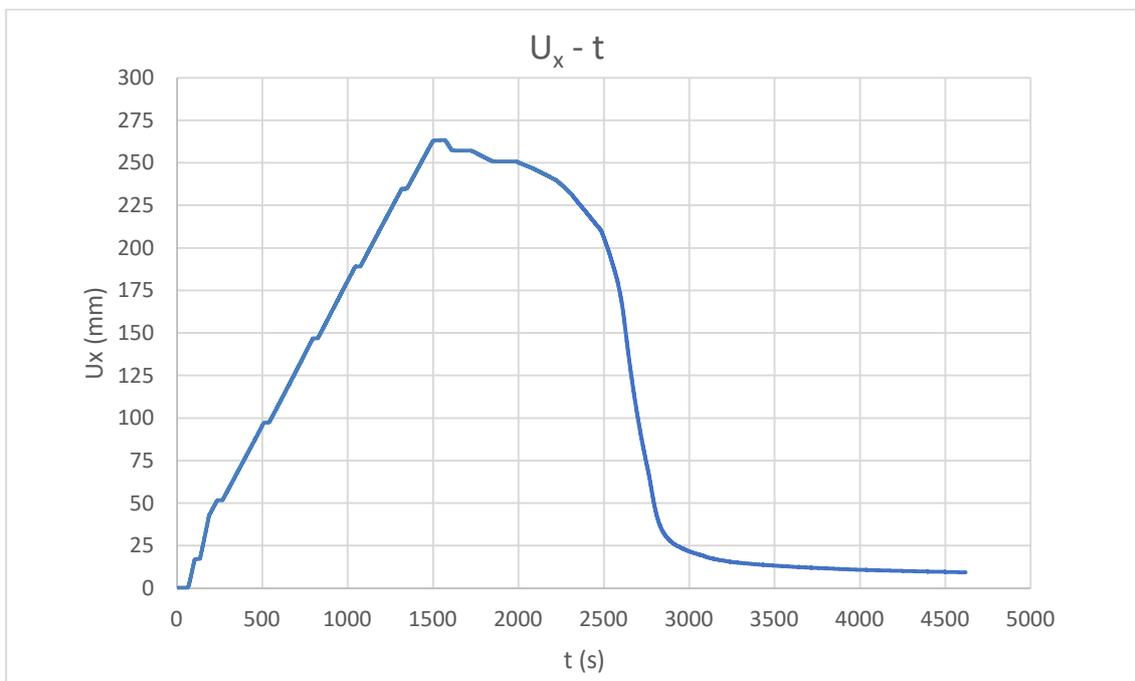


Figura 4.39 Grafico $U_x - t$

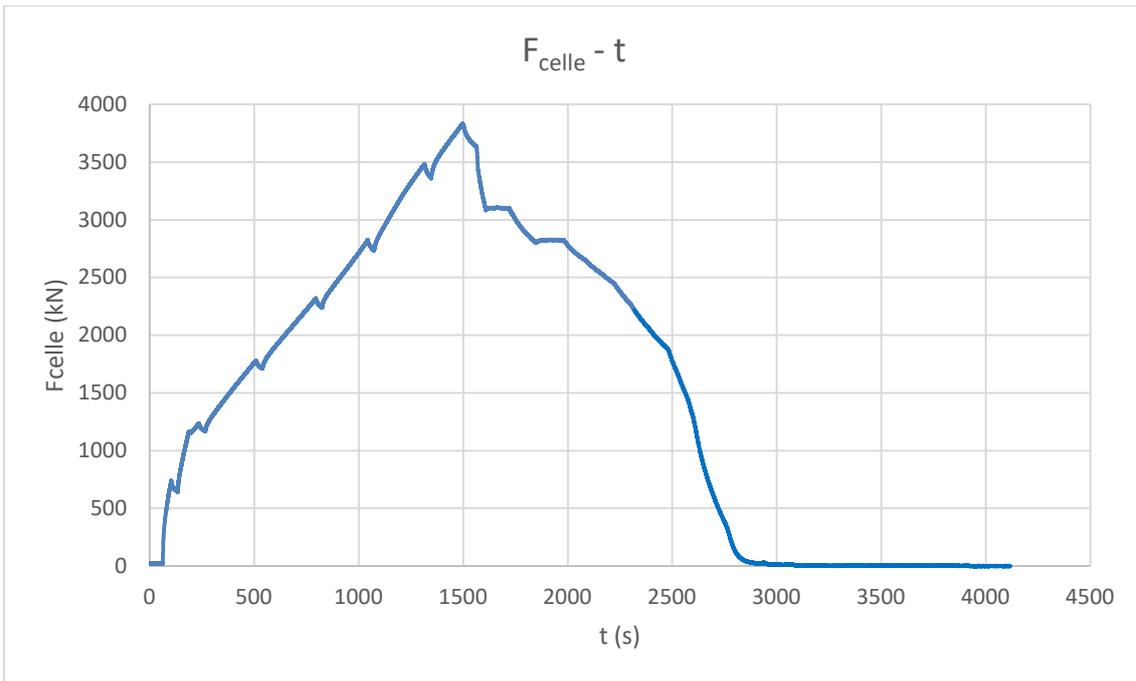


Figura 4.40 Grafico $F_{\text{celle}} - t$

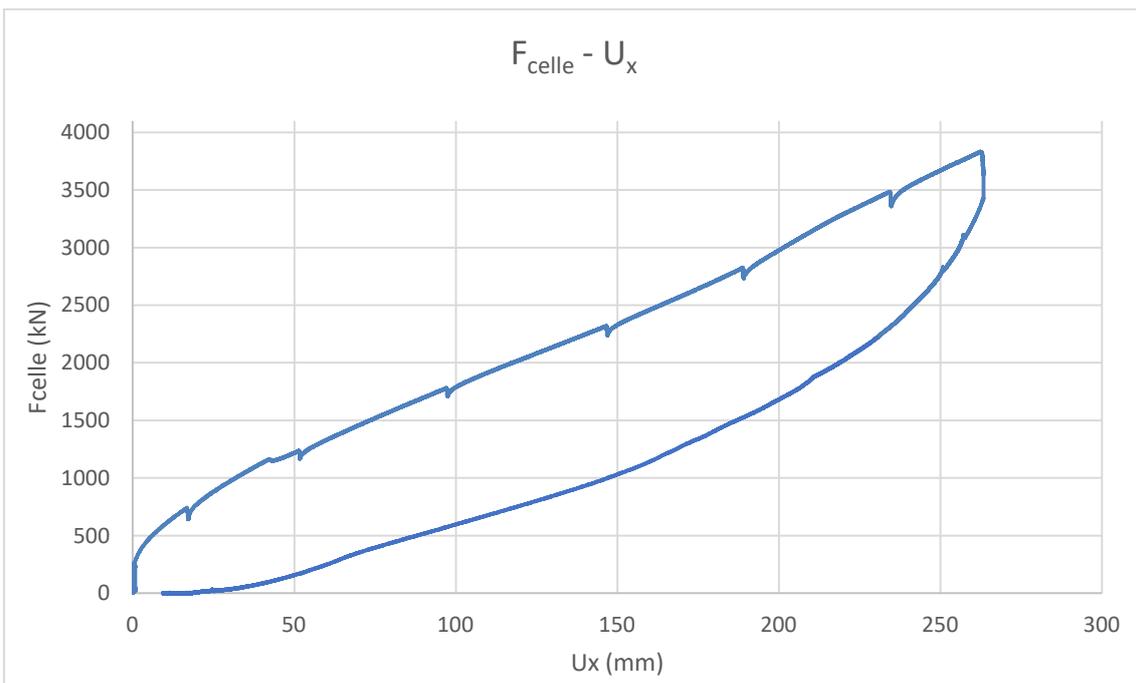


Figura 4.41 Grafico $F_{\text{celle}} - U_x$

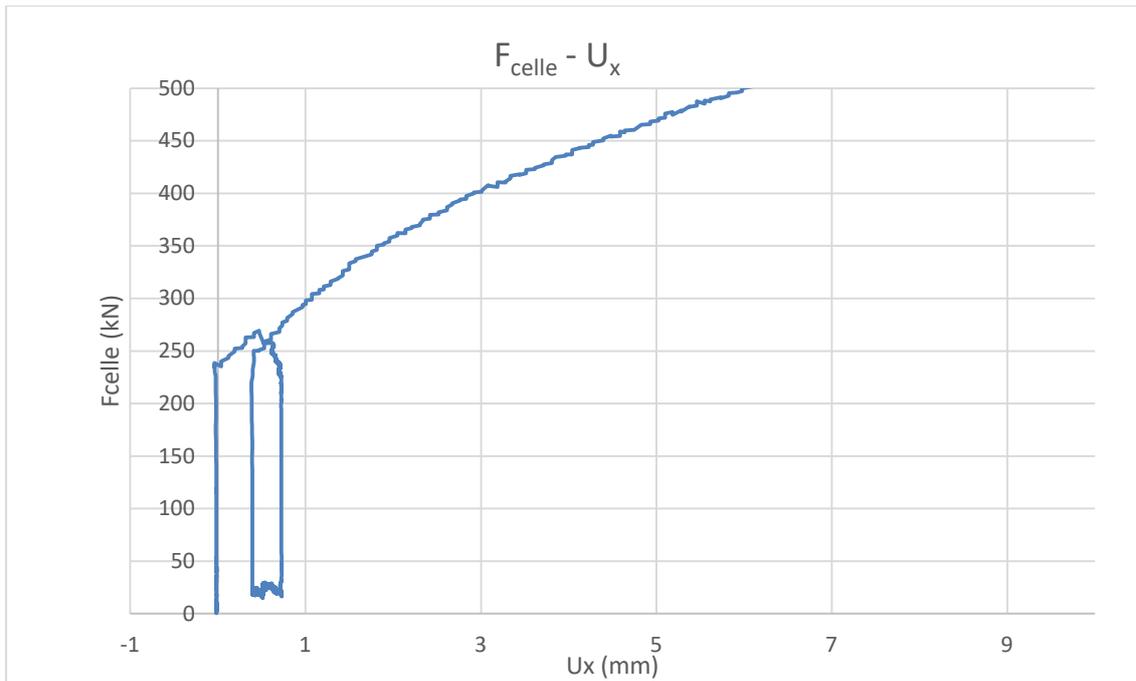


Figura 4.42 Zoom F_{celle} – U_x per stima attrito

Lo spostamento residuo del sistema è di: $u_x = 9.3$ mm.

La forza di attrito è stata assunta pari a $F_{slitte} = 240$ kN (Fig. 4.42) dalla quale è stato calcolato il coefficiente di attrito degli isolatori (Tab. 4.15).

$F_{attrito}$ (kN)	$P_{CVSISMA}$ (kN)	n_{slitte}	μ
240	585	36	0,011

Tabella 4.14 Coefficiente di attrito Prova statica 7

Per lo stessa considerazione fatta per la Prova statica 3 sul come ottenere il ciclo $F_{iso}-U_x$, si riporta il seguente grafico (Fig. 3.43) e la tabella delle caratteristiche degli isolatori (Tab. 3.15).

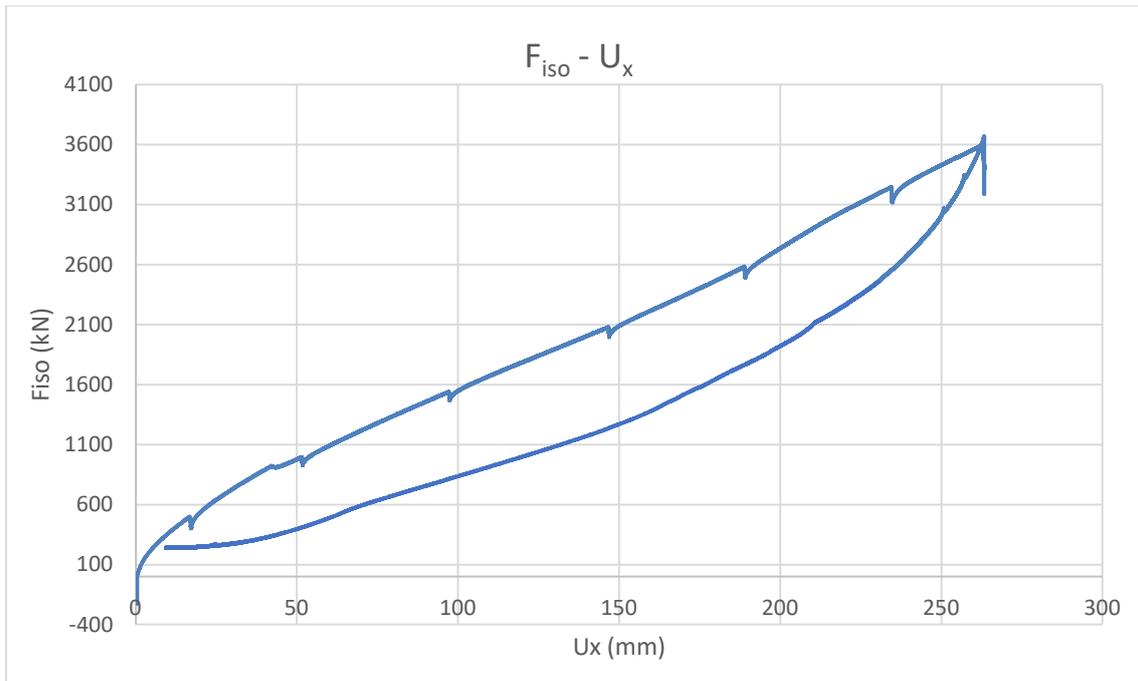


Figura 4.43 Grafico Fiso – Ux

$u_{x,iso,max,ass}$ [mm]	$F_{iso,max}$ [kN]	K_{eq} [kN/m]	G_{stat} [kN/m ²]	$K_{eq,iso\ singolo}$ [kN/m]	$G_{stat,iso\ singolo}$ [kN/m ²]	E_s [kNm]	E_D [kNm]	ξ_{esi}
263,35	3592,60	13641,88	8879,04	487,21	317,11	473,1	374,1	6,3%

Tabella 4.15 Caratteristiche isolatori Prova statica 7

4.5 Considerazioni finali

Si riportano gli andamenti della forza delle celle (Fig. 4.44) e della forza degli isolatori (Fig. 4.45) rispetto allo spostamento:

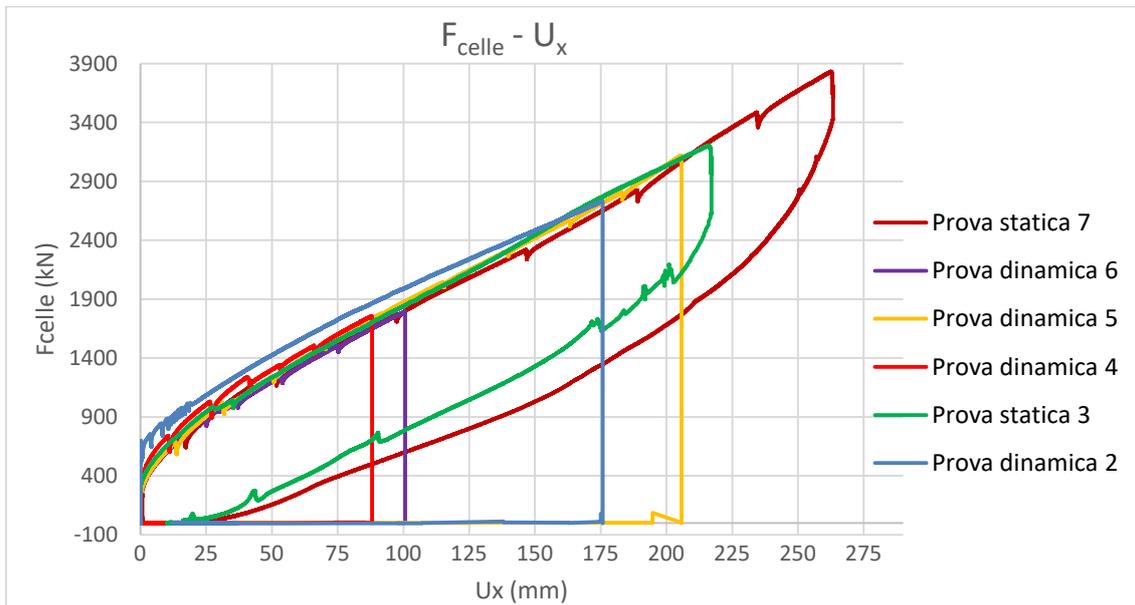


Figura 4.44 Confronto grafici $F_{celle} - U_x$ di tutte le prove

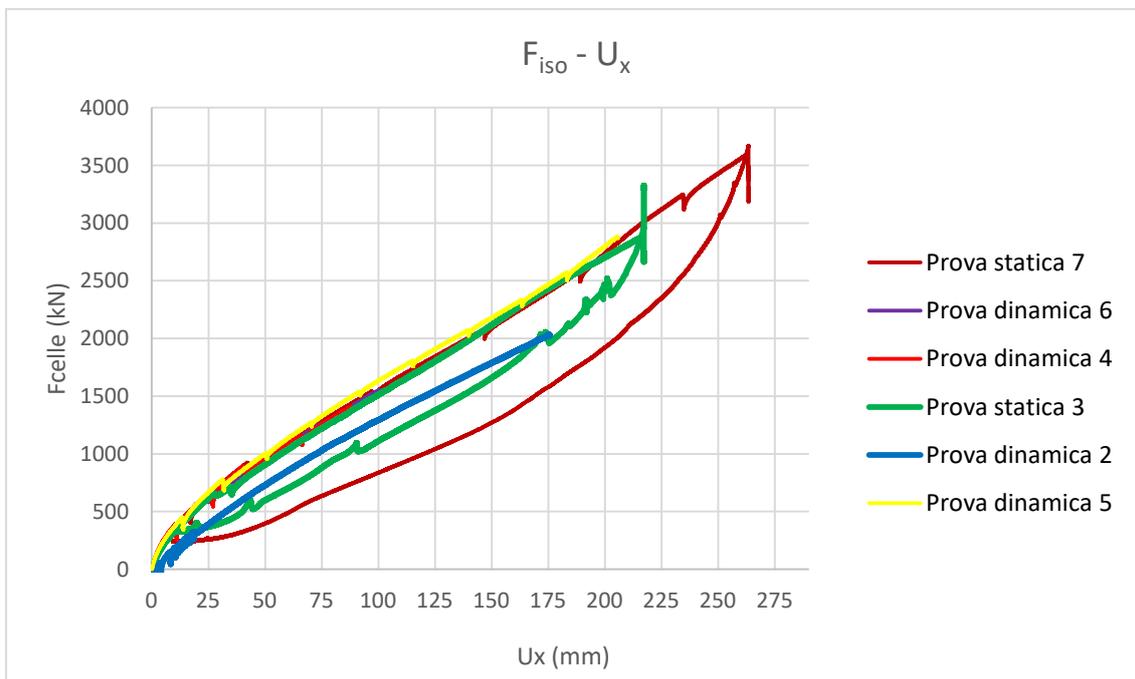


Figura 4.45 Confronto grafici $F_{iso} - U_x$ di tutte le prove

La prova dinamica 2 è l'unica a non avere un ramo post attrito della stessa pendenza, rispetto alle altre. Tutta questa differenza è imputabile all'attrito delle slitte che solo per questa prova ha un valore doppio rispetto a quello riscontrato nelle prove successive; esso infatti si riduce progressivamente fino ad assumere un valore stabile per le ultime tre prove.

Dalla prova statica 3 in poi tutte le curve si sovrappongono e sono caratterizzate dalla stessa pendenza, ciò ci fa pensare che, una volta superata la forza di attrito, la rigidezza del sistema di isolamento nel ramo post elastico sia più o meno costante tra una prova e l'altra. La rigidezza equivalente differisce da prova a prova a causa della diversa forza di attrito e dell'ampiezza di deformazione che contraddistingue le diverse prove.

È comunque necessario sottolineare che, potendo considerare le prove in sito come lente rispetto a quelle in laboratorio (necessarie per l'accettazione e la qualificazione dei dispositivi), le caratteristiche meccaniche degli isolatori, calcolate dalle prime, risulteranno inferiori rispetto a quelle ricavate dalle seconde a causa della dipendenza dalla velocità dei dispositivi.

Se confrontiamo la Prova statica 7 (ciclo del singolo isolatore), prova più lenta effettuata, con le prove OSR e hcc150, che hanno un'ampiezza di deformazione simile (Fig. 4.46) notiamo che vi è una notevole dipendenza dalla velocità.

Se confrontiamo la prova ciclica in laboratorio (hcc150) con la Prova statica 7, notiamo che, a parità di spostamento, ho una notevole perdita di forza in fase di carico e in fase di rilascio. Tutto questo è imputabile al comportamento viscoso, infatti la differenza tra le due prove è la perdita di capacità dell'isolatore dovuta alla dipendenza dalla velocità.

Le due prove quasi statiche invece sono uguali nel ramo di carico, questo ci fa capire come la viscosità, per velocità al di sotto della OSR, non è influente o comunque risulta avere lo stesso contributo. Nel ramo di scarico invece le due curve differiscono, ciò è dovuto all'attrito delle slitte, contributo che non è stato approfondito in questa tesi.

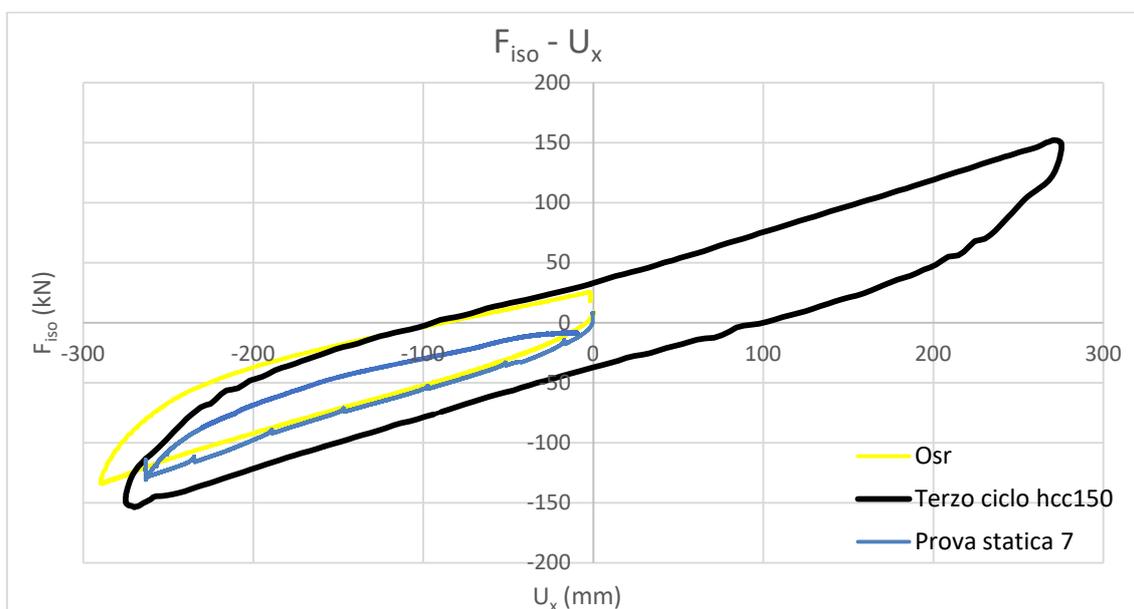


Figura 4.46 Confronto Prova Statica 7, hcc150, OSR

Se fissiamo un limite superiore e inferiore per le caratteristiche dei dispositivi adottati, la prova hcc150 risulterà concorde al primo, mentre la Prova statica 7 con il secondo.

5.0 METODI PER LA MODELLAZIONE E L'ANALISI DELLE PROVE IN SITO

L'obiettivo di tale tesi è di creare un modello, ad 1-SDOF, che sappia rispecchiare il comportamento del sistema di isolamento nelle varie prove e cogliere il più possibile tutte i fattori che sono entrati in gioco. La taratura del modello è basata sulle elaborazioni delle prove in sito e dai dati provenienti dalle prove cicliche effettuate in laboratorio.

L'obiettivo della modellazione è di, per ogni singola prova, arrivare allo spostamento massimo durante il ramo di carico e di cogliere il rilassamento del sistema di isolamento sia nella fase di rilascio e sia nella fase di carico.

Il software di calcolo strutturale utilizzato è il SAP2000 v.22, nel quale sono state svolte analisi Time-history non lineari a integrazione diretta. Nel presente capitolo verrà illustrata, in maniera più dettagliata, sia la tipologia di analisi effettuata, sia la tipologia di link utilizzati.

5.1 Tipologia di analisi effettuata

L'analisi utilizzata per l'elaborazione delle prove in sito è una Time -History non lineare a diretta integrazione.

La Time-History è utilizzata per determinare la risposta dinamica di una struttura sottoposta ad un carico arbitrario. La risposta della struttura è ottenuta andando a risolvere le equazione di equilibrio dinamico:

$$K u(t) + C \dot{u}(t) + M \ddot{u}(t) = r(t)$$

dove: K è la matrice di rigidità; C è la matrice dello smorzamento; M è la matrice diagonale delle masse; u, \dot{u} e \ddot{u} sono gli spostamenti, le velocità e le accelerazioni della struttura; r sono i carichi applicati.

In un'analisi non lineare, la rigidità, lo smorzamento e il carico dipendono dagli spostamenti, dalle velocità e dal tempo, ciò richiede una soluzione iterativa delle equazioni del moto.

Diretta integrazione sta a significare che vi è un'integrazione diretta delle equazioni del modo, senza l'utilizzo della sovrapposizione modale (utilizzata in un' analisi FNA). Un'analisi a integrazione diretta è molto più sensibile al passo temporale utilizzato; questo aspetto è molto fondamentale nell'ottica di voler modellare il comportamento degli isolatori che sono fortemente condizionati dalla velocità.

La non linearità che sono disponibili nel SAP2000 sono:

- Non linearità dei materiali: proprietà non lineari dei Link, limiti di trazione e compressione negli elementi Frame, le cerniere plastiche negli elementi Frame, le non linearità geometriche negli elementi Cable e le non linearità del materiale per gli elementi Shell;

- Non Linearità geometriche: effetti P-delta e gli effetti per i grandi spostamenti.

Nel nostro caso le proprietà non lineari considerate sono le caratteristiche dei Link utilizzati.

Possiamo specificare all'inizio di ogni analisi le condizioni iniziali della struttura:

- Condizione iniziale zero: la struttura non è sottoposta a stress, tutti gli elementi risultano scarichi al tempo $t=0$;
- Proseguire da una precedente analisi non lineare: la struttura parte inizialmente da una condizione di spostamento, velocità, sollecitazione e energia condotta da un'analisi precedente.

Nel nostro caso volendo scorporare la fase di carico dalla fase di rilascio, per analizzare separatamente i due comportamenti aventi differenti velocità, la seconda fase della prova parte da una condizione deformata.

Il carico, $r(t)$, applicato ad una data time-history può essere una funzione arbitraria del tempo e dello spazio. Può essere scritto come una somma finita di vettori di carico spaziali, p_i , moltiplicati da funzioni tempo $f_i(t)$:

$$r(t) = \sum_i f_i(t) p_i.$$

Nel nostro caso il vettore p_i , definito come load pattern, è o un carico o uno spostamento unitario applicato alla struttura. Il vettore verrà poi scalato attraverso il fattore di scala presente nel caso di carico dell'analisi o nelle differenti funzioni della Time-history.

Per definire la funzione tempo, $f_i(t)$, si può specificare:

- La tipologia di funzione utilizzata (func) che definisce la forma della variazione del tempo; nel nostro caso sono state utilizzate tre diverse tipologie di funzione: la funzione rampa utilizzata per definire il ramo di carico (Fig. 5.1) e il ramo di scarico (Fig. 5.2), la funzione seno per modellare le prove cicliche svolte in laboratorio (Fig. 5.3) e la funzione da file per modellare correttamente il ramo di carico delle prove in sito (Fig. 5.4);
- Il fattore di scala, sf , che moltiplica i valori delle ordinate della funzione;
- Il fattore scala del tempo, tf , che moltiplica i valori del tempo nelle ascisse della funzione;
- Il tempo di inizio, at , definisce quando la funzione comincia ad agire sulla struttura (di default è zero).

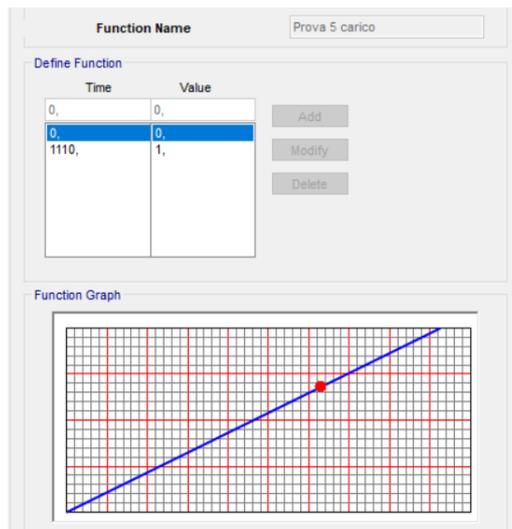


Figura 5.1 Esempio funzione rampa di carico

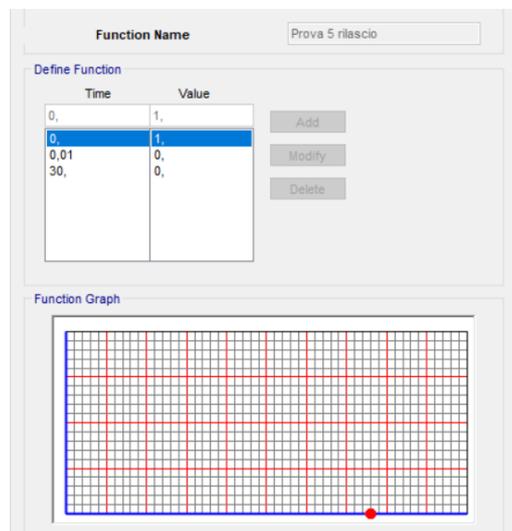


Figura 5.2 Esempio funzione rampo di rilascio

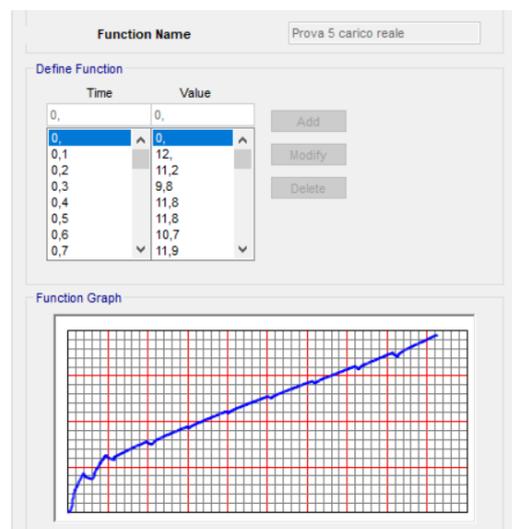


Figura 5.3 Esempio funzione rampa di carico reale

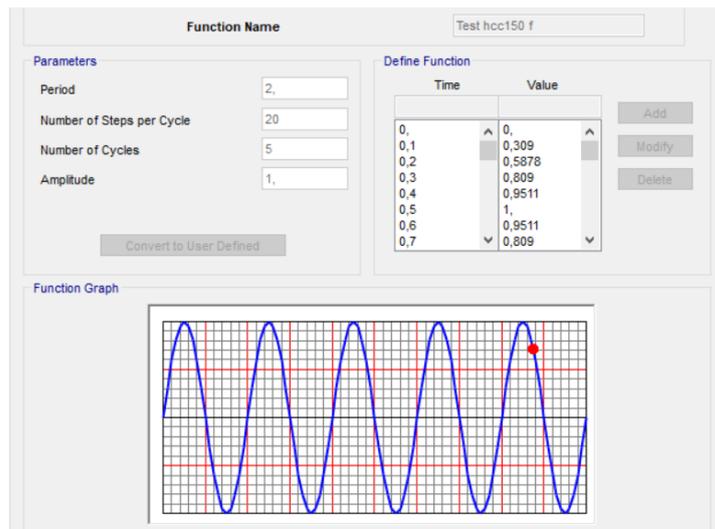


Figura 5.1 esempio funzione delle prove cicliche in laboratorio

La funzione tempo $f_i(t)$ è ottenuta come prodotto tra la funzione $func(t)$ e il fattore di scala.

Un altro aspetto molto importante da tenere in considerazione è la grandezza del time step in output dell'analisi poiché tale parametro definisce la velocità con il quale il carico è applicato alla struttura. Come già è stato detto un'analisi time-history è eseguita in step temporali discreti. Nell'analisi l'utente può specificare: la dimensione dei time step (dt) e il numero dei time step ($nstep$) dell'analisi (funzione del primo termine). La durata dell'analisi, data dal prodotto tra i due termini ($nstep \cdot dt$), dovrà coincidere con l'estensione temporale della funzione.

Avendo gli isolatori un comportamento viscoso, la loro risposta meccanica, funzione anche della tipologia di gomma, è condizionata dalla velocità con cui il carico è applicato ; al fine di descrivere tale aspetto sono stati adottati due differenti time step per il ramo di carico e il ramo di scarico. Durante la fase di carico la forza è applicata molto lentamente, infatti da come è stato riportato nel precedente capitolo la durata media, tra le varie prove, è all'incirca di 15 min, per questo motivo l'ampiezza dei time step utilizzata per le analisi è stata fissata pari a 5 sec. La fase rilascio è stata modellata con una durata di 30 sec, in cui la forza del sistema arriva a zero in 0,1 sec; essendo tale fase veloce, è stato adottato un time step di 0,01 sec che è il minimo step da utilizzare per cogliere questa fase.

5.2 Tipologia di link utilizzati

In questo capitolo sono elencati i vari link utilizzati, il loro comportamento meccanico e la modalità con cui vengono trattati nel software. In questa fase non è presente la parte relativa alla taratura dei vari elementi poiché tale capitolo ha lo scopo di fornire esclusivamente una conoscenza teorica.

Un link, elemento utilizzato per connettere due nodi, può esibire tre differenti tipologie di comportamento a seconda della proprietà assegnate e della tipologia di analisi svolta: lineare, non lineare e dipendente dalla frequenza. L'ultima tipologia non è stata adottata

nella modellazione perché non necessaria. Per tutti i link lineari/non lineari possiamo definire proprietà lineari e non lineari che sono adottate a seconda della tipologia di analisi.

I link utilizzati per la realizzazione del modello sono (vengono riportati i nomi dei vari link in inglese per una maggiore coerenza con la nomenclatura del programma):

- Plastic (Wen);
- Damper (exponential);
- Linear (molla elastica);
- Kelvin.

5.2.1 BoucWen

Il Plastic (Bouc Wen) è un link che presenta un legame elasto-plastico e si basa sul comportamento isteretico (Fig. 5.5) proposto da Wen nel 1976.

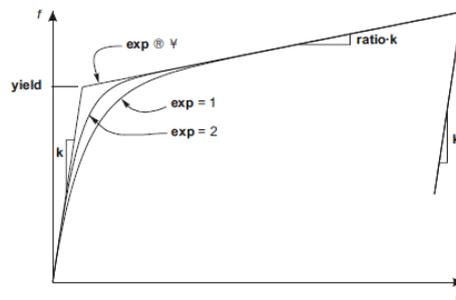


Figura 5.2 Legame isteretico Bouc-Wen

Per ciascun grado di libertà è possibile definire proprietà di plasticità uni assiali indipendenti; tutte le deformazioni interne sono indipendenti e lo snervamento ad un grado di libertà non ha effetti sul comportamento delle altre deformazioni. Se non vengono specificate delle proprietà non lineari per un grado di libertà, questa sarà lineare e caratterizzata da una rigidezza effettiva, che potrebbe essere zero.

La relazione non lineare forza-deformazione è data da:

$$f = ratio * k * d + (1 - ratio)yeld * z$$

Dove:

- K è la rigidezza elastica;
- Yield è la forza di snervamento;
- Ratio è il rapporto tra la rigidezza post-elastica e la rigidezza elastica;
- z è la variabile isteretica interna e vale $|z| \leq 1$. Il suo valore iniziale è zero ed evolve in accordo alla seguente equazione differenziale:

$$\dot{z} = \frac{k}{yeld} \begin{cases} \dot{d}(1 - |z|^{exp}) & \text{se } \dot{d} * z > 0 \\ \dot{d} & \text{negli altri casi} \end{cases}$$

Quando \exp è maggiore o uguale all'unità. Elevati valori dell'esponente aumentano la spigolosità del legame, il suo valore limite è fissato pari a 20.

Questo legame costitutivo è stato utilizzato per modellare il comportamento degli isolatori nelle varie prove; per ricavare le proprietà richieste dal software sono state seguite le indicazioni riportate nell'allegato F della ISO 22762-3-2028, che descrive la modalità con cui ricavare le caratteristiche meccaniche degli isolatori elastomerici ad alto smorzamento. Sarà riportata la stessa nomenclatura presente nello ISO.

Un tipico ciclo forza-deformazione per un isolatore ad alto smorzamento è mostrata nella Fig. 5.6. La rigidezza a taglio equivalente K_h , definita come la pendenza della retta che collega i due picchi di un ciclo e dipendente dalla deformazione del dispositivo, può essere calcolata come:

$$K_h = G_{eq}(\gamma) * \frac{A}{T_r}$$

Dove:

- $G_{eq}(\gamma)$ modulo di rigidezza a taglio, funzione della deformazione a taglio e espresso come per esempio da funzione polinomiale:

$$G_{eq}(\gamma) = a_0 + a_1 * \gamma + a_2 * \gamma^2 + a_3 * \gamma^3 + a_4 * \gamma^4 + a_5 * \gamma^5 + L = \sum_{j=0}^n a_j * \gamma^j$$

- A massima deformazione del dispositivo;
- T_r altezza totale della gomma.

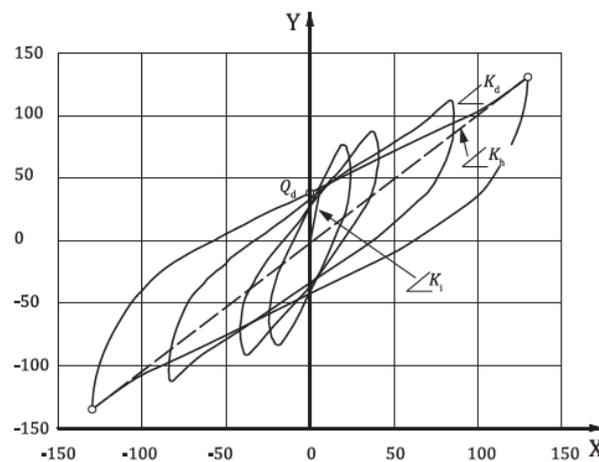


Figura 5.3 Esempio ciclo isteretico forza-deformazione isolatore ad alto smorzamento

Il coefficiente di smorzamento equivalente, h_{eq} , è espressa:

$$h_{eq}(\gamma) = \sum_{j=0}^n b_j * \gamma^j$$

Quando è calcolato da dati sperimentali per una deformazione di taglio γ :

$$h_{eq}(\gamma) = \frac{1}{\pi} * \frac{W_d}{2K_h(T_r * \gamma)^2}$$

La resistenza caratteristica di un HDR è funzione dell'ampiezza del ciclo ed è definita come :

$$U(\gamma) = \frac{Q_d}{K_{eq}(T_r * \gamma)}$$

Come per $G_{eq}(\gamma), h_{eq}(\gamma)$ anche $U(\gamma)$ è espressa empiricamente come funzione della deformazione di taglio:

$$U(\gamma) = \sum_{j=0}^n c_j * \gamma^j$$

La rigidezza iniziale, K_i , e la rigidezza post-elastica, K_d , per un HDR, assumendo il suo comportamento in un ciclo isteretico, possono essere calcolate come:

$$K_d = [1 - U(\gamma)] * K_{eq}$$

$$K_i = \frac{2U(\gamma) - \pi * h_{eq}(\gamma) * [1 - U(\gamma)]}{2U(\gamma) - \pi * h_{eq}(\gamma)} * K_{eq}$$

Il Bouc-Wen è stato utilizzato anche per modellare le slitte allo scopo di avere un maggior velocità in fase di analisi rispetto al caso in cui venga utilizzato il link Friction Isolator. Per le slitte, nota la forza di attrito (Q_d) basta impostare: una rigidezza iniziale molto grande affinché esse si attivino per piccoli spostamenti e un rapporto tra la rigidezza post-elastica ed elastica molto piccolo, allo scopo di non avere un incrudimento e quindi avere un comportamento elasto-plastico perfetto.

5.2.2 *Damper exponential*

Tale elemento è caratterizzato da un legame costitutivo dipendente dalla velocità. Infatti, è stato utilizzato, nei modelli seguenti, per modellare il comportamento viscoso degli isolatori elastomeri.

Il sap permette di definire proprietà indipendenti per ogni grado di libertà. Se per le analisi non lineari non sono specificate proprietà non lineari, i gradi di libertà assumono le caratteristiche lineari (rigidezza effettiva), che possono essere zero.

Le proprietà di questo elemento si basano sul modello visco-elastico non lineare proposto da Maxwell ed è costituito da uno stantuffo (dashpot) posto in serie con una molla in serie Fig. 5.7.

Per rappresentare uno smorzamento “puro” è possibile introdurre una rigidezza molto elevata della molla, ma ciò può rappresentare un comportamento non conservativo e

non realistico; perciò è consigliato non introdurre una rigidità non confrontabile la costante viscosa dello stantuffo.



Figura 5.4 Modello di Maxwell

La relazione forza-deformazione è data da:

$$f = k * x_e = c \dot{x}_v^\alpha$$

Dove:

- K , rigidità della molla;
- c , costante viscosa dello stantuffo;
- α , esponente che controlla il comportamento non lineare;
- x_e , spostamento della molla;
- x_v , velocità dello stantuffo.

Anche se il comportamento viscoso dei dispositivi in gomma non è lineare, in questa tesi il comportamento viscoso è stato assunto lineare perciò l'esponente è stato fissato pari ad 1.

In questo modello la deformazione totale x è somma della deformazione presente nella molla x_e e della deformazione dello stantuffo x_v , mentre la forza che agisce sui due componenti è la stessa. Il sistema è completamente definito da due parametri caratteristici: la rigidità K_1 della molla e la costante c_v dello stantuffo. È necessario adottare due variabili per descrivere la situazione di deformazione presente nel sistema (variabili di stato); ad esempio si possono scegliere la deformazione totale x e quella dello stantuffo x_v , deducendo quella elastica per sottrazione.

La forza può essere ricavata in base ai valori istantanei della coppia x , x_v e della rigidità K_1 della molla:

$$F_d = K_1(x - x_v)$$

È opportuno osservare che generalmente solo la deformazione totale x è misurabile dall'esterno mentre la sua componente viscosa x_v , non è accessibile (variabile interna) ed è legata alla schematizzazione fatta del comportamento interno del dispositivo. Per conoscere la forza è necessario ricostruire le variazioni della deformazione viscosa a partire dalla deformazione totale. La velocità di deformazione viscosa può essere ottenuta risolvendo l'equazione differenziale che esprime l'uguaglianza delle forze agenti su molla e stantuffo:

$$c_c \dot{x}_v = K_1(x - x_v)$$

Nel nostro caso la velocità di deformazione viscosa è nota sia per le prove in laboratorio (velocità di esecuzione della prova), sia per le prove in sito (velocità di carico e velocità del rilascio).

Lo studio della risposta ciclica del sistema sottoposto alla storia di deformazione esterna $x(t) = A \sin(\omega t)$ può essere condotto sulla base delle due precedenti relazioni costitutive che forniscono forza e componente viscosa della deformazione. Risolvendo la precedente relazione differenziale si ottiene l'evoluzione della deformazione viscosa:

$$x_v = A[(1 - a) \sin(\omega t) + b \cos(\omega t)] \quad a = K_1 \frac{K_1}{K_1^2 + \omega^2 c_v^2} \quad b = K_1 \frac{\omega c_v}{K_1^2 + \omega^2 c_v^2}$$

e la forza può essere indifferentemente dedotta dalla relazione costitutiva della molla o da quella dello stantuffo:

$$F_d = K_1[(1 - a) \sin(\omega t) + b \cos(\omega t)] = A \omega c_v [b \sin(\omega t) + a \cos(\omega t)]$$

Si possono anche ricavare informazioni energetiche:

- energia di deformazione elastica $E_d = \frac{1}{2} K_1 A^2 [(1 - a) \sin(\omega t) + b \cos(\omega t)]^2$;
- energia dissipata di un ciclo $W_d^1 = \pi \omega c_v A^2 a$.

I parametri a e b sono parametri che variano al variare della pulsazione e possono essere calcolati come:

- $a = K_1 \frac{K_1}{K_1^2 + \omega^2 c_v^2}$;
- $b = K_1 \frac{\omega c_v}{K_1^2 + \omega^2 c_v^2}$.

Il ciclo forza-spostamento, descritto in Fig. 5.8, ha forma ellittica e la forza del sistema allo spostamento massimo è pari a $F_d = AK_1(1 - a)$.

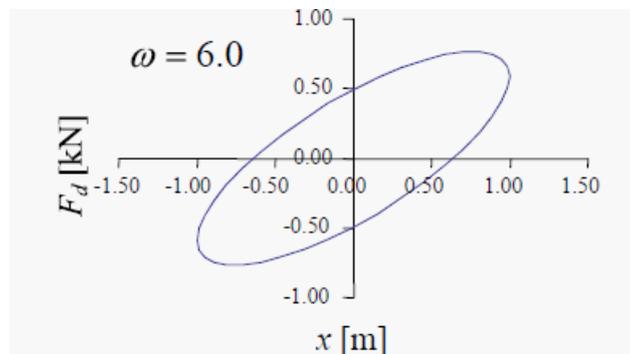


Figura 5.5 Esempio ciclo forza-deformazione ad una prefissata pulsazione

Si possono definire i due parametri caratteristici del comportamento ciclico:

- Rigidezza equivalente $K_{d,eq} = K_1(1 - a)$;

- Coefficiente di smorzamento equivalente $\xi_{d,eq} = \frac{K_1}{2\omega C_V}$.

Entrambi i precedenti parametri sono influenzati dalla pulsazione (Fig. 5.9)

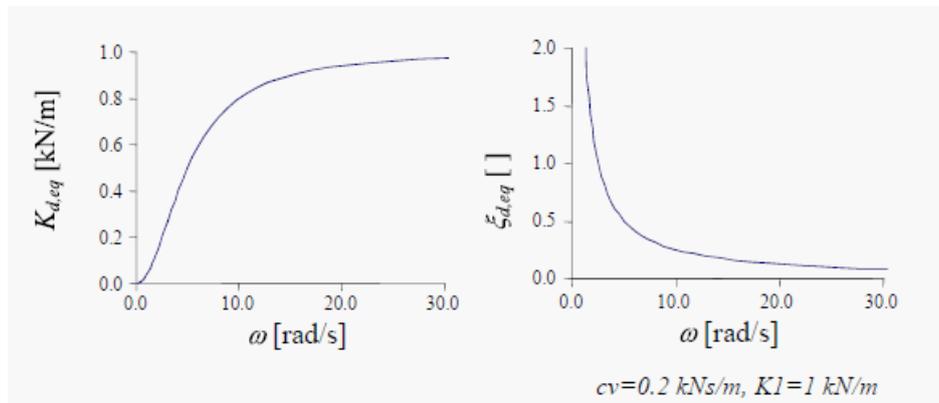


Figura 5.6 Esempio variazione caratteristiche equivalenti

5.2.3 Kelvin

È il modello viscoelastico più semplice capace di recuperare la posizione iniziale dopo la fine dell'applicazione del carico. Questo modello non è presente come link nel sap, ma può essere ottenuto ponendo in parallelo una molla e un Maxwell caratterizzato una rigidità infinitivamente grande per avere un comportamento solo viscoso (Fig. 5.10). Il suo utilizzo è stato verrà spiegato successivamente.

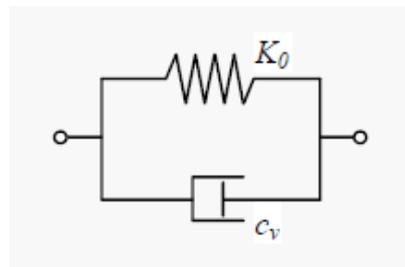


Figura 5.7 Schema Kelvin

I due componenti presentano la stessa deformazione e la forza si ottiene dalla somma dei due contributi:

$$F_d = K_0 x + c_v \dot{x}$$

Dove:

- K_0 , rigidezza della molla;
- c_v , costante viscosa dello stantuffo;
- x e \dot{x} rappresentano rispettivamente la deformazione e la velocità del sistema.

La risposta ciclica comprende un contributo di forza in fase con gli spostamenti e ed un contributo fuori fase di $\pi/2$:

$$F_d = A[K_0 \text{sen}(\omega t) + \omega c_v \text{cos}(\omega t)]$$

L'energia elastica e dissipata in un ciclo assumono le seguenti espressioni:

- $E_d = \frac{1}{2}K_0A^2\sin^2(\omega t)$;
- $W_d^1 = \pi\omega c_vA^2$.

Anche in questo caso il ciclo forza-spostamento conserva forma ellittica e i due parametri caratteristici del comportamento ciclico sono:

- $K_{d,eq} = K_0$;
- $\xi_{d,eq} = \frac{\omega c_v}{2K_0}$.

In questo caso solo il coefficiente di smorzamento varia con la pulsazione (Fig. 5.11)

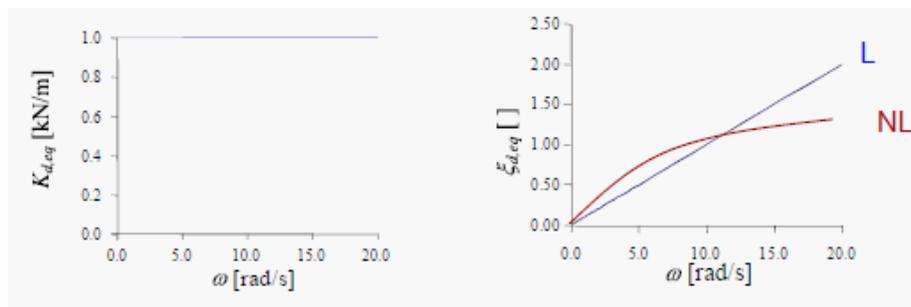


Figura 5.8 Esempio variazione caratteristiche equivalenti

5.2.4 Linear

Il Linear Link è sostanzialmente una molla elastica avente comportamento lineare. Le caratteristiche dei gradi di libertà (rigidezza e coefficiente viscoso) possono essere accoppiati o non accoppiati. Nel nostro caso i gradi di libertà sono indipendenti tra loro e, allo scopo di modellare una molla elastica, è stata inserita solo la rigidezza per le direzioni interessate.

Non viene riportato il legame costitutivo di questo link per la semplicità che esso rappresenta.

6.0 MODELLAZIONE DELLE PROVE IN SITO

Nell'ipotesi di struttura perfettamente isolata alla base (rigidezza della struttura K_s , infinitamente rigida) è stato adottato, anche per semplicità, un modello ad 1- SDOF in cui la sovrastruttura è stata condensata come massa ($M=5079$ tonn) in un unico nodo.

Sono stati concepiti due modelli differenti: il primo elastoplastico e il secondo viscoelastico.

L'idea dei due modelli risiede principalmente nella modalità con cui si può schematizzare un ciclo isteretico di un isolatore che (Fig. 2.13) può essere studiato attraverso i parametri equivalenti (K_{eff} e ξ_{eff}) o attraverso un legame elastoplastico (Bouc-Wen).

Il primo modello, elastoplastico, ha lo scopo di ricreare il comportamento della struttura sulla base delle prove in sito e in laboratorio.

Il secondo, viscoelastico, si basa solo sulle prove dinamiche svolte. Il suo scopo è quello di creare un modellino 'semplice' capace di ricreare una prova dinamica a partire dalle elaborazioni dei dati delle prove in sito.

6.1 Modello elasto-plastico

Il modello elasto-plastico nasce dall'idea di voler creare un modello che riesca a cogliere il comportamento del sistema di isolamento, al variare della velocità di prova, sulla base delle prove in sito e di laboratorio disponibili.

Il modello finale (Fig. 6.1) è stata raggiunto per step, andando a osservare volta per volta i risultati derivati dall'analisi con quelli ottenuti dalle prove in sito.

La concezione del modello è nata osservando il confronto, proposto in Fig. 3.46, tra la Prova statica 7, la OSR e la prova dinamica hcc150. In questo grafico si può vedere chiaramente come il comportamento del singolo isolatore cambi a seconda della velocità della prova. La differenza tra il ciclo della Prova statica 7 e la prova dinamica in laboratorio è sostanzialmente dovuta alla dipendenza dalla velocità. Si sono fissati quelli che sono gli estremi superiori e inferiori delle caratteristiche degli isolatori per i quali è stato assunto un comportamento elastoplastico, modellato attraverso un Bouc-Wen.

La dipendenza dalla velocità è stata modellata inserendo uno stantuffo, opportunamente tarato, in serie con gli elementi che devono descrivere il rilassamento degli isolatori sia in fase di carico che in fase di rilascio.

Il comportamento plastico perfetto delle slitte è stato modellato con un BoucWen posto in parallelo con gli altri link che descrivono gli isolatori elastomerici.

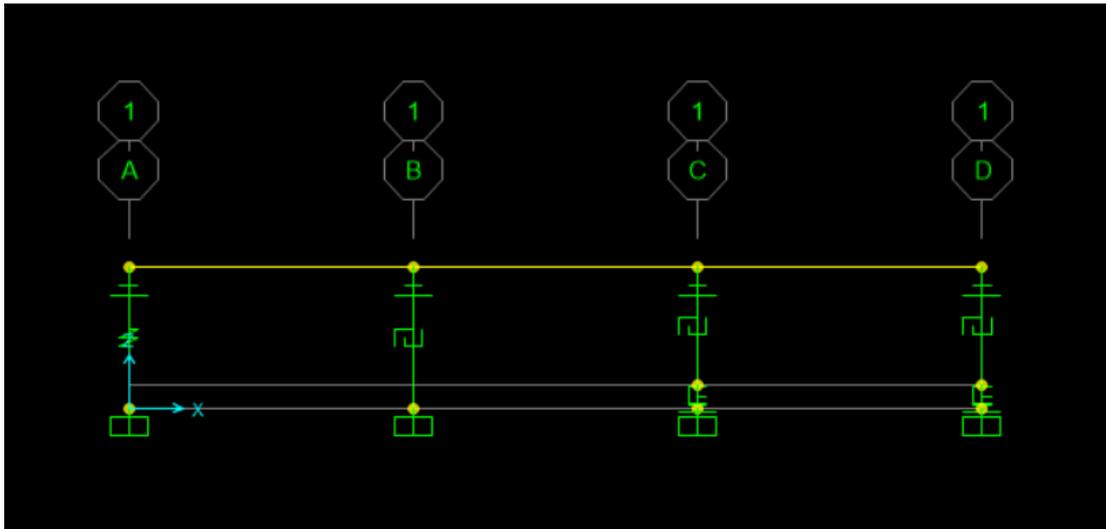


Figura 6.1 Schema modello elasto-plastico finale sap

6.1.1 Taratura BoucWen per Prova statica 7

Questa prova, oltre ad essere caratterizzata dallo spostamento più grande raggiunto in sito, è la più lenta effettuata e può essere intesa come statica. Infatti, le caratteristiche degli isolatori, desunte da questa, sono il limite inferiore del comportamento del sistema di isolamento e possono essere assunte come dipendenti esclusivamente dalla deformazione a taglio.

Le caratteristiche del Bouc-Wen, riferite al singolo isolatore, sono state ricavate seguendo ciò che è indicato nel paragrafo 4.2.1 dopo aver decurtato alle forze delle celle l'aliquota corrispondente all'attrito e dividendo per il numero degli isolatori.

Si riportano sottoforma di tabella le caratteristiche del sistema di isolamento (Tab. 6.1) desunte dalla prova e i parametri del Bouc-Wen derivati dalla taratura (Tab. 6.2).

Max U (mm)	263,351
Max Fiso (kN)	131
Keff (kN/mm)	0,497
Aiso (m ²)	0,283
Tr (m)	0,184
G (kN/m ²)	323,764
Ed (kNm)	13,362
Es (kNm)	17,249
ξ	0,062

Tabella 6.1 Riassunto caratteristiche singolo isolatore Prova statica 7

Bouc Wen	
γ	1,431
heq (γ)	0,062
U (γ)	0,099
Qy (kN)	13
Kd (kN/m)	448,072
Ki (kN/m)	2481,047
Rapporto di rigidezza	0,181
K_{el} (kN/m)	448,072
K'_i (kN/m)	2032,975
K'_p (kN/m)	0

Tabella 6.2 Parametri Bouc-Wen derivati dalla taratura del singolo isolatore

Il legame elasto-plastico è stato semplificato (Fig. 6.2) in uno equivalente, formato da una parte elastica (K_{el}), modellata con una semplice molla, e una parte elasto-plastica perfetta (K'_i , K'_p) al fine di scindere e controllare meglio le caratteristiche elastiche e plastiche durante la simulazione delle prove.

Viene riportato il ciclo che si ottiene dal Sap200 della Prova statica 7 confrontandolo con quello ottenuto in sito Fig. 6.2. L'analisi è stata effettuata a controllo di forza e la Time History utilizzata è una funzione rampa di stessa durata della prova in sito.

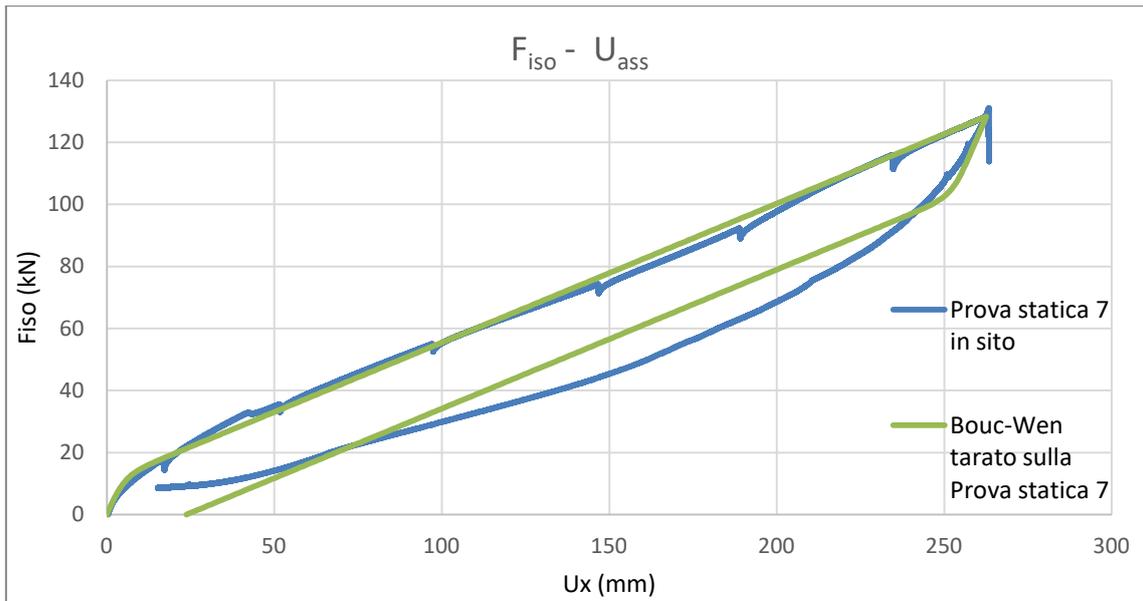


Figura 6.2 Confronto ciclo Bouc – Wen e ciclo singolo isolatore

Da come si può vedere il modello si adatta bene al comportamento del singolo isolatore in sito. Il ramo di rilascio non viene preso a pieno perché il comportamento dell'isolatore è assunto elasto-plastico.

6.1.2 Taratura BoucWen per hcc150

Questa prova è stata scelta come estremo superiore delle caratteristiche degli isolatori elastomerici perché oltre ad essere una prova veloce è contraddistinta da uno spostamento simile. Per la taratura del BoucWen sono state prese le caratteristiche relative al terzo ciclo della prova dinamica.

Terzo ciclo hcc150	
γ	1,5
U _{max} (mm)	275,2
k _{effb} (kN/m)	550
W _d (kJ)	37,6
G (kN/m)	360
Q _d (kN)	35,9
K ₂ (kN/m)	440
V _{max} (mm/s)	797,7

Tabella 6.3 Caratteristiche isolatore de terzo ciclo della prova hcc150

BoucWen	
K _h (Kn/m)	553,1
Q _d (kN)	35,9
U (γ)	0,236
h _{eq} (γ)	0,143
K _d (kN/m)	440
K _i (Kn/m)	3036,33
Rapporto tra rigidezze	0,145

Tabella 6.4 Parametri Bouc Wen derivati dalla taratura della prova dinamica hcc150

L'analisi nel software è stata effettuata a controllo di forza, utilizzando una funzione sinusoidale avente lo stesso periodo utilizzato in laboratorio. Viene riportato il ciclo ottenuto dall'analisi Fig. 6.3.

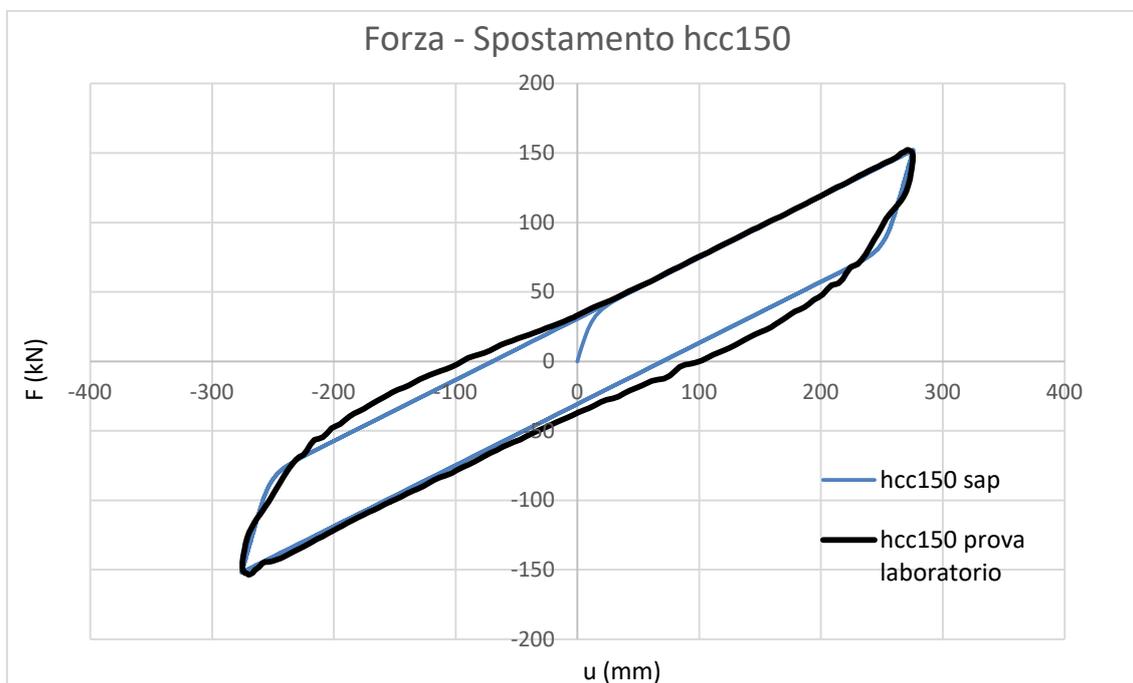


Figura 6.3 Confronto ciclo BoucWen hcc150 e terzo ciclo prova laboratorio

6.1.3 Funzione e calibrazione del Dashpot

Dopo aver tarato i BoucWen relativi all'estremo inferiore e superiore del comportamento degli isolatori elastomerici, è opportuno capire come concepire il modello nella sua interezza.

Se fissiamo i parametri relativi al BoucWen tarato per la Prova statica 7 come caratteristiche degli isolatori dipendenti solo dalla deformazione a taglio e non dal tempo (quindi sempre presenti sia nel caso di prova veloce e lenta), ciò che è dipendente dalla velocità è il gap che vi è tra i parametri della Prova statica 7 e la prova dinamica hcc150 (Fig. 4.46).

L'obiettivo è quello di, a seconda della velocità della prova, avere un diverso comportamento degli isolatori elastomerici. Infatti, se la prova sarà lenta, per esempio nel caso di prove statiche o nel ramo di carico di quelle dinamiche, gli unici parametri che entreranno in gioco saranno quelli dipendenti dalla deformazione a taglio, mentre nel caso veloce, per esempio nelle prove di laboratorio o durante la fase di rilascio, si attiveranno anche i parametri dipendenti dal tempo.

L'elemento, che serve a separare il comportamento viscoso da quello dipendente solo dalla deformazione a taglio, è un dashpot (stantuffo) che viene posto in serie con il BoucWen dipendente dal tempo. Questo smorzatore sarà caratterizzato da un coefficiente viscoso c e una rigidezza k tarati in maniera tale da avere un dashpot con rigidezza nulla nella fase di carico e abbastanza rigido nella fase di rilascio. Per

semplicità l'esponente del legame costitutivo di questo elemento è stato assunto pari a 1, così da avere, per semplicità, un comportamento viscoso lineare.

Il parametro fondamentale che governa il comportamento viscoso è la c , che verrà tarata a seconda delle velocità delle due prove prese come riferimento. Infatti, la c sarà fissata in modo tale da avere una forza nulla per velocità con cui carichiamo le varie prove in sito e una forza capace di sfruttare il contributo dinamico degli isolatori per la fase di rilascio. Si hanno due velocità con cui lavorare: una velocità di carico v_1 tale per cui $v_1 * c$ sia zero e una di rilascio (o quella delle prove cicliche in laboratorio) tale per cui $v_2 * c$ sia 1/2 due ordini di grandezza superiore alla forza viscosa in fase di rilascio, in modo tale da sfruttare tutto il contributo offerto dal BoucWen posto in serie.

La rigidità dello stantuffo non è una k reale, ma un parametro che devo definire per questioni di convergenza dell'analisi. Infatti definire uno smorzatore privo di rigidità porterebbe a forze infinite per analisi contraddistinte da velocità elevate. Quindi la definisco come un parametro che è 100 / 1000 volte più grande della rigidità associata alla c pura, cioè derivante dall'equazione del damper.

Fissato lo spostamento massimo della Prova statica 7 $u_x=263,35$ mm, si ricava, per questo spostamento, la forza associata al singolo isolatore a tale prova $F_{statica\ 7}$ e alla prova hcc150 F_{hcc150} . La differenza tra le due forze è la componente viscosa per cui deve lavorare il dashpot.

Una volta calcolata la differenza di velocità tra le due prove, si determina il coefficiente viscoso del dashpot (Tab. 6.5):

$$c = \frac{\Delta F}{\Delta v}$$

U (mm)	263
$F_{statica\ 7}$ (kN)	131,0
F_{hcc150} (kN)	150
ΔF (kN)	19,00
$v_{statica7}$ (mm/s)	0,17
v_{hcc150} (mm/s)	797,7
Δv (mm/s)	797,53
c (kN*s/m)	23,82

Tabella 6.5 Calcolo coefficiente di viscoso

La c come vista nella precedente tabella verrà aumentata di 1/2 grandezza le motivazioni dette precedentemente (Tab. 6.6). Verrà riportata la rigidezza del link e il confronto tra le forze nel caso di prova lenta e veloce.

c (kN*s/m)	3000
$F_{statica\ 7}$ (kN)	0,51
F_{hcc150} (kN)	2393,10
k (kN/m)	722448,63

Tabella 6.6 Parametri definitivi del damper

Il coefficiente viscoso c e la rigidezza k si riferiscono ad un singolo isolatore, quindi per ottenere i parametri dell'intero sistema basta moltiplicare per il numero di isolatori che costituiscono il piano di isolamento.

Se si assembla il modello, privo di slitte, questo sarà costituito da (Fig. 6.4):

- Una molla e un BoucWen (chiamato BW_1) che derivano dalla scomposizione del Bouc-Wen elastoplastico dipendente dalla deformazione a taglio γ ;
- Un BoucWen (chiamato BW_2), funzione del tempo e della $\dot{\gamma}$ che deriva dalla differenza tra i parametri calibrati dalla prova hcc150 e i parametri della Prova statica 7;
- Un Dashpot (soprannominato C_2) posto in serie con il BW_2 .

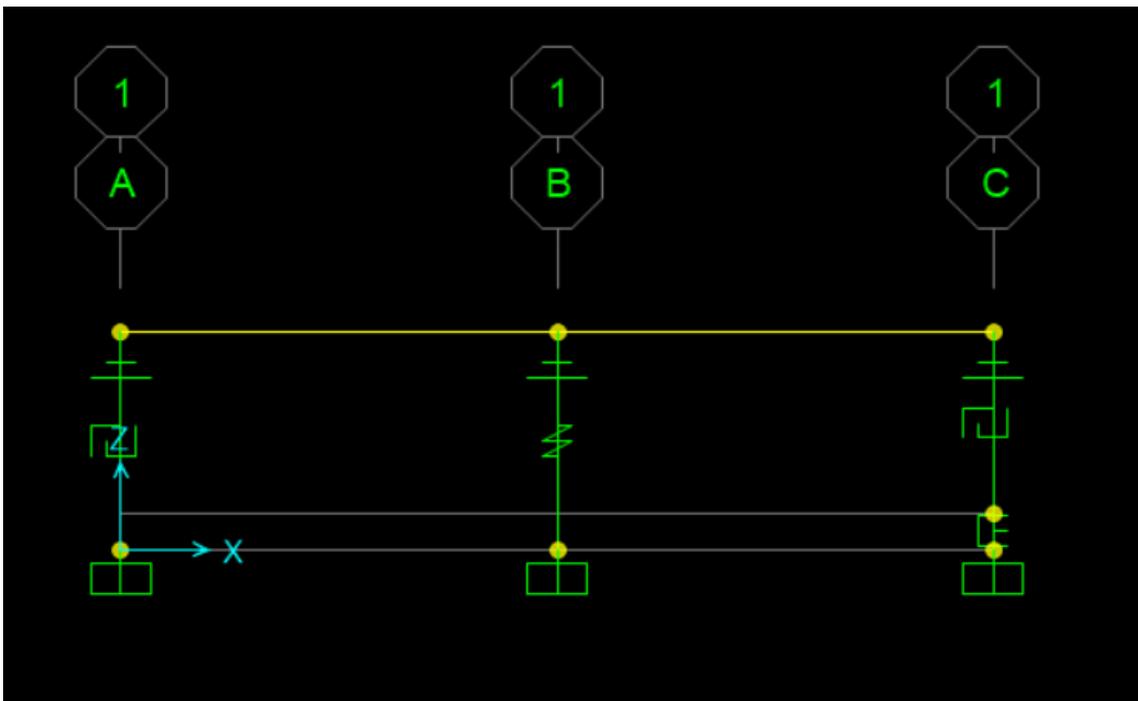


Figura 6.4 Schematizzazione modello elastoplastico senza slitte

Nei modelli e quindi nelle elaborazioni che seguiranno il BoucWen dipendente dalla deformazione verrà scomposto o meno a seconda della necessità dettata dall'interpretazione dei risultati.

I parametri del modello, considerando il BW_1 non scomposto, del singolo isolatore e dell'intero sistema di isolamento verranno riportati nelle successive tabelle Tab. 6.7 e Tab. 6.8.

Singolo isolatore			
Bouc Wen $f(\gamma)$		Bouc Wen $f(\gamma,t)$	
Kd (kN/m)	448,070	Kd (kN/m)	/
Ki (kN/m)	2481,045	Ki (Kn/m)	555,289
Qy (kN)	13	Qd (kN)	22,9
Stress ratio	0,181	Stress ratio	/

Tabella 6.7 Parametri dei due BW relativi al singolo isolatore

Sistema isolamento			
Bouc Wen $f(\gamma)$		Bouc Wen $f(\gamma,t)$	
Kd (kN/m)	12545,960	Kd (kN/m)	/
Ki (kN/m)	69469,268	Ki (Kn/m)	15548,092
Qy (kN)	364	Qd (kN)	641,2
Stress ratio	0,181	Stress ratio	/

Tabella 6.8 Parametri dei due BW relativi al sistema di isolamento

Da come si può vedere dalle precedenti tabelle il BW_2 ha un legame elastoplastico perfetto, questo perché la differenza tra i parametri hcc150 e Prova statica 7 per la rigidità post-elastica risulta negativa.

Se il BoucWen dipendente solo dalla deformazione viene scomposto i parametri del modello sono:

Singolo isolatore					
Parte elastica $f(\gamma)$		Bouc Wen $f(\gamma)$		Bouc Wen $f(\gamma,t)$	
Ki (kN/m)	448,070	Ki (Kn/m)	2032,975	Kd (kN/m)	0
Kd (kN/m)	/	Kd (kN/m)	0	Ki (Kn/m)	555,289
Qy (kN)	/	Qd (kN)	13	Qd (kN)	22,9
Stress ratio	/	Stress ratio	0	Stress ratio	0

Tabella 6.9 Parametri modello singolo isolatore nel caso di BW_1 scomposto

Sistema di isolamento					
Parte elastica f(γ)		Buoc Wen f(γ)		Bouc Wen f(γ ,t)	
Ki (kN/m)	12545,960	Ki (Kn/m)	56923,307	Kd (kN/m)	0
Kd (kN/m)	/	Kd (kN/m)	0	Ki (Kn/m)	15548,092
Qy (kN)	/	Qd (kN)	364	Qd (kN)	641,2
Stress ratio	/	Stress ratio	0	Stress ratio	0

Tabella 6.10 Parametri modello sistema isolamento nel caso di BW1 scomposto

Se con questo modello svolgiamo l'analisi della Prova statica 7 e della hcc150 otteniamo gli stessi cicli visti in Fig.6.2 e Fig. 6.3. In particolare verranno inserite anche l'andamento delle forze dei vari link in funzione del tempo, allo scopo di far vedere come al variare della velocità della prova il BW2 si attiva o meno. Non verrà inserita come varia la forza del dashpot perché, essendo posto in serie con il BW2, risulta essere contraddistinto dalla stessa forza.

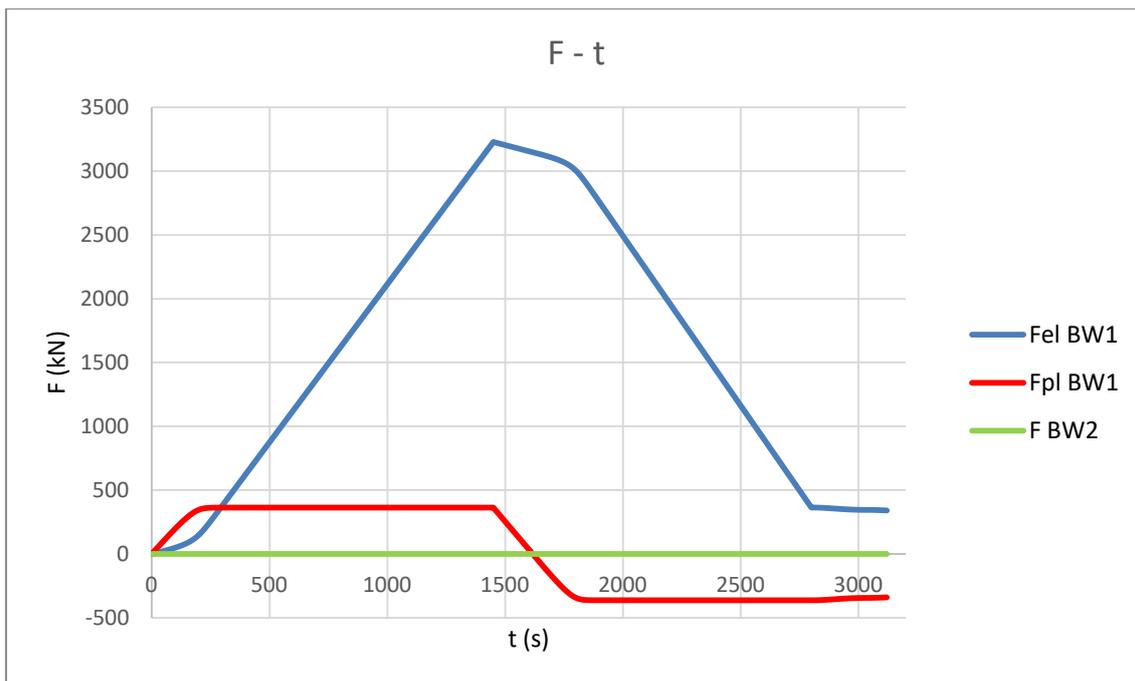


Figura 6.5 Sistema di isolamento Prova statica 7, andamento della forza in funzione del tempo

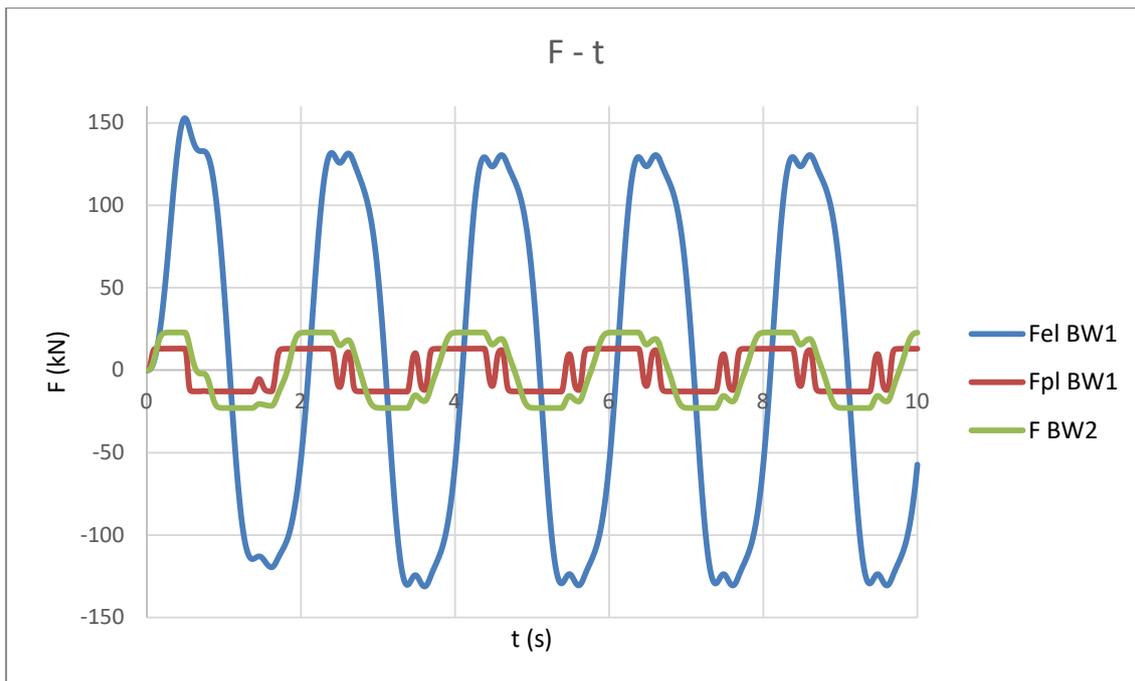


Figura 6.6 Singolo isolatore prova hcc150 , andamento delle forze dei vari link in funzione del tempo

Verranno nei successivi paragrafi modellate le prove dinamiche utilizzando gli stessi parametri ottenuti precedentemente e aggiungendo il contributo offerto dalle slitte.

6.1.4 Prova dinamica 5

La prima prova che è stata modellata è la Prova dinamica 5, perché è caratterizzata dallo contributo offerto dall'attrito della Prova statica 7.

L'analisi è stata effettuata a controllo di forza, utilizzando come Time History una rampa lineare (Fig. 6.7) avente la stessa durata della fase di carico della prova in sito. Il rilascio (Fig. 6.8), come per tutte le altre prove, è stato modellato facendo arrivare la forza al valore 0 in 0,1 sec e facendo continuare l'analisi per 30 sec in modo tale da poter osservare la fase del rilascio.



Figura 6.7 Rampa di carico Prova dinamica 5

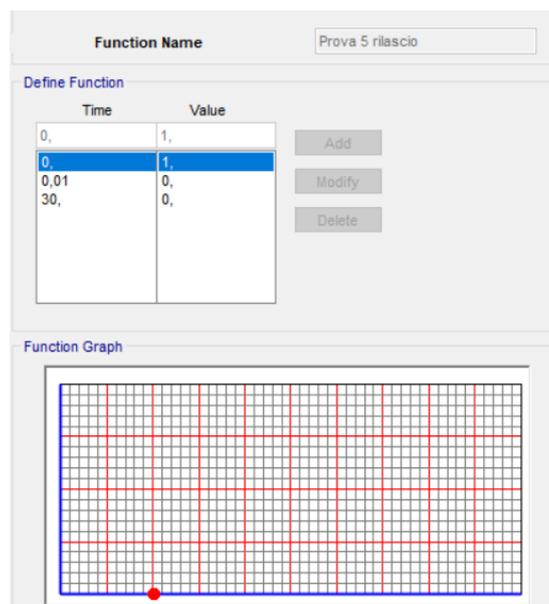


Figura 6.8 Rilascio Prova dinamica 5

Se si stima, nello stesso modo del paragrafo precedente, il coefficiente viscoso, prendendo in considerazione la velocità del ramo di carico e scarico della prova e della

hcc150, al fine di controllare se il precedente parametro è adeguato. Da come si può vedere dalla Tab. 6.12 il coefficiente viscoso calcolato in Tab. 6.6 è accettabile per la Prova dinamica 5, per questo si continuerà ad adottare tale stima.

U (mm)	205,5
F _{prova 5} (kN)	102,86
F _{hcc 150} (kN)	124,22
ΔF (kN)	21,36
V _{carico Prova 5} (mm/s)	0,188
V _{rilascio Prova 5} (mm/s)	102,75
V _{hcc150} (mm/s)	797,7
ΔV _{carico} (mm/s)	797,512
ΔV _{scarico} (mm/s)	694,950
C _{carico} (Kn*s/m)	26,783
C _{scarico} (Kn*s/m)	30,736

Tabella 6.11 Calcolo coefficiente viscoso

c (Kn*s/m)	3000
F _{carico Prova5} (kN)	0,565
F _{scarico Prova5} (kN)	308,25
F _{hcc150} (kN)	2393,10
k (kN/m)	103941,606

Tabella 6.12 Parametri del damper

Utilizzando i parametri degli isolatori, presenti in Tab. 6.7, e aggiungendo a questi il contributo offerto dalle slitte otteniamo i seguenti grafici.

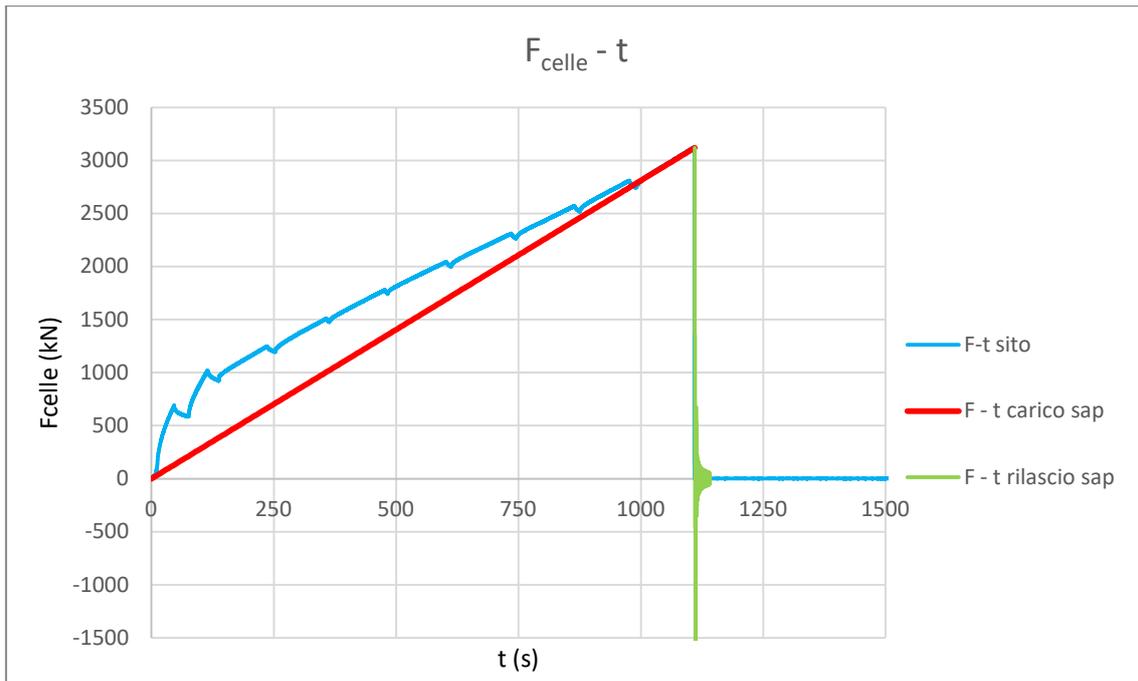


Figura 6.9 Confronto tra $F_{\text{celle}} - t$ tra sap e sito

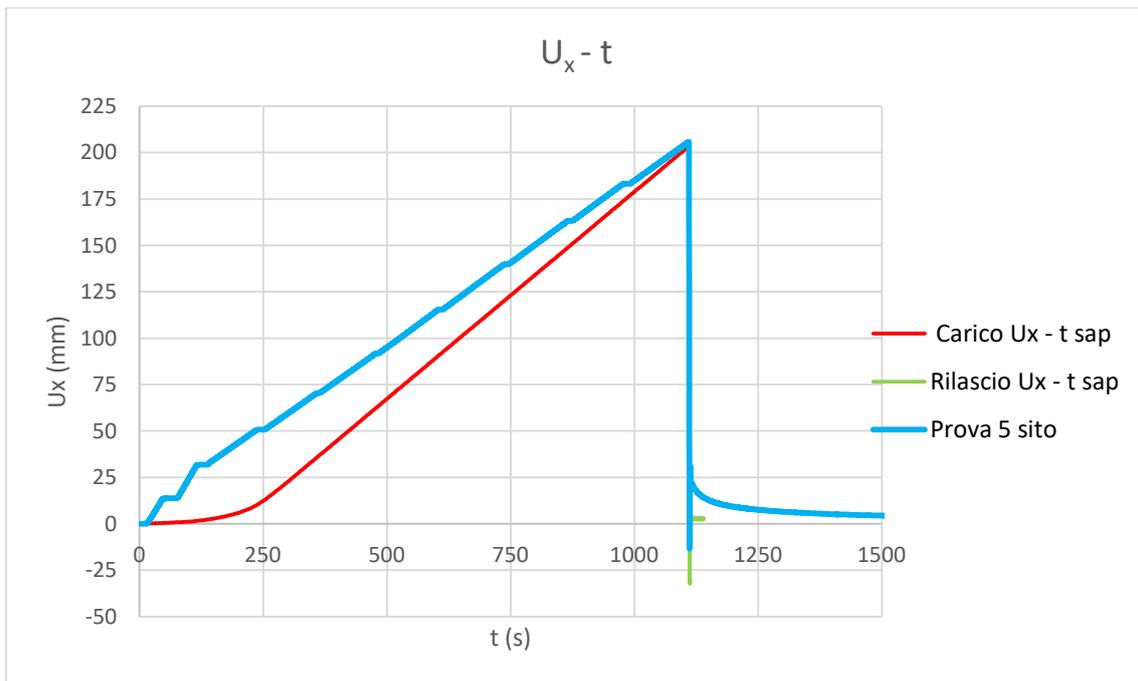


Figura 6.10 $U_x - t$ confronto tra sito e modello

Da come si può vedere il ramo di carico U_x-t non coincide con quello in sito poiché la Time-history utilizzata non è una funzione non lineare, ma lineare. Per questo la struttura nel modello impiega maggior tempo a muoversi, anche a causa del contributo dell'attrito che non viene vinto immediatamente. Comunque lo spostamento ultimo del modello $u_x=203,4\text{mm}$ è simile con quello monitorato dalla prova reale. Questa cosa non succede nel grafico $F_{\text{celle}} - U_x$ (Fig. 6.11) e nel $F_{\text{iso}} - U_x$ (Fig. 6.12) perché comunque il modello è stato tarato dal ciclo forza deformazione della Prova statica 7 che coincide con il ramo di carico della Prova 5.

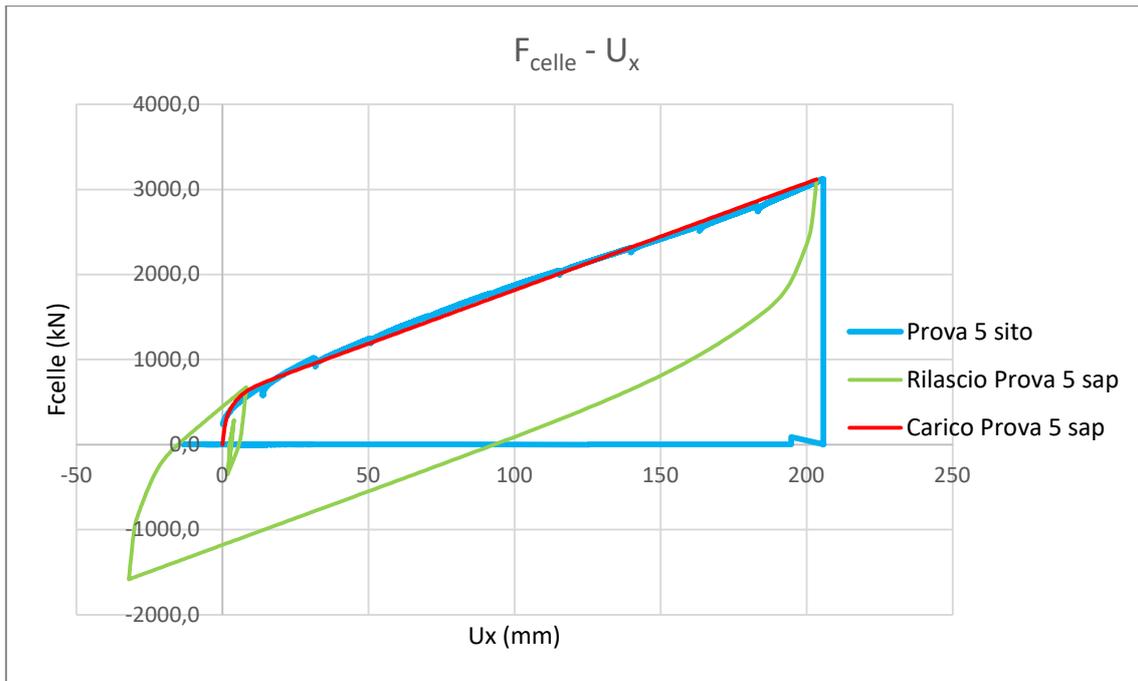


Figura 6.10 Confronto $F_{celle} - U_x$ sito e modello

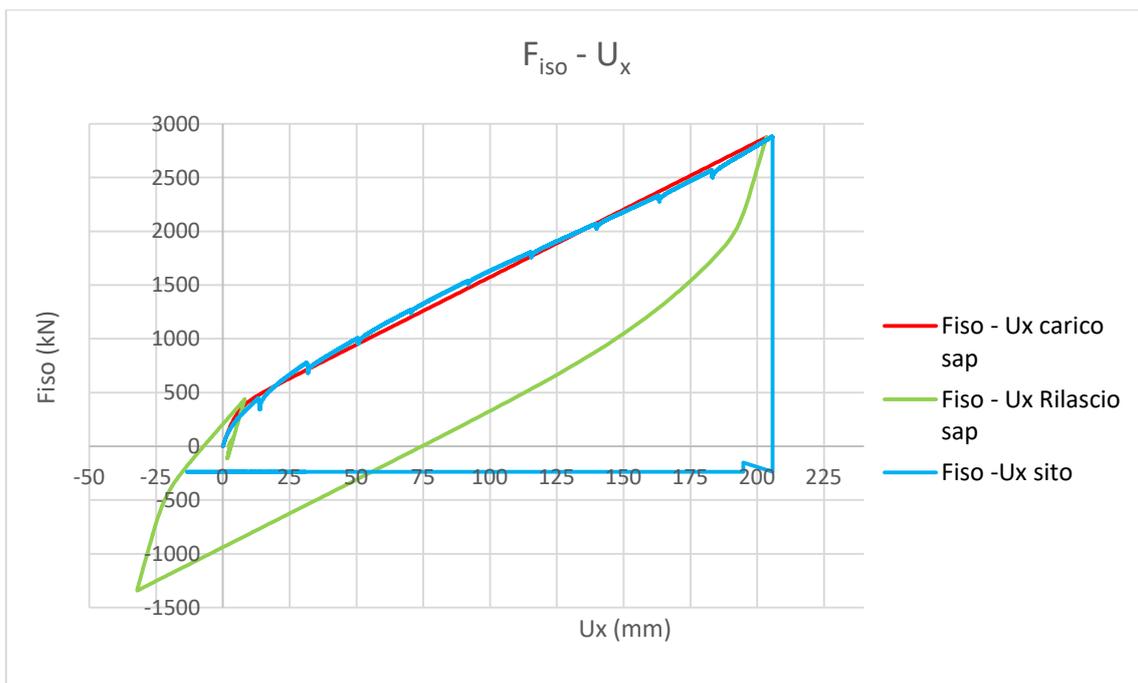


Figura 6.11 Confronto $F_{iso} - U_x$ sito e modello

Si inserisce l'analisi svolta utilizzando la rampa reale (Fig. 6.12), con la quale ci focalizzeremo maggiormente nella fase del rilascio.

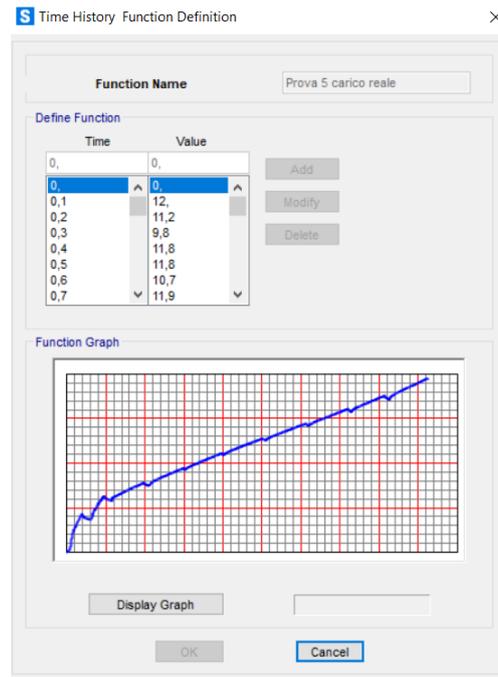


Figura 6.12 Rampa reale Prova dinamica 5

Si riportano inizialmente i grafici derivati dall'analisi: $F_{\text{celle}} - t$ (Fig. 6.13), $U_x - t$ (Fig. 6.14). L'andamento della forza impressa al modello è la stessa perché la prova è condotta a controllo di forza, però, diversamente dall'analisi precedente, nella figura Fig. 5.14 possiamo osservare come utilizzando la rampa reale gli spostamenti della struttura nel modello coincidano, o comunque sono simili, a quelli misurati in sito. Lo spostamento ultimo del modello è di $u_x=204$ mm.

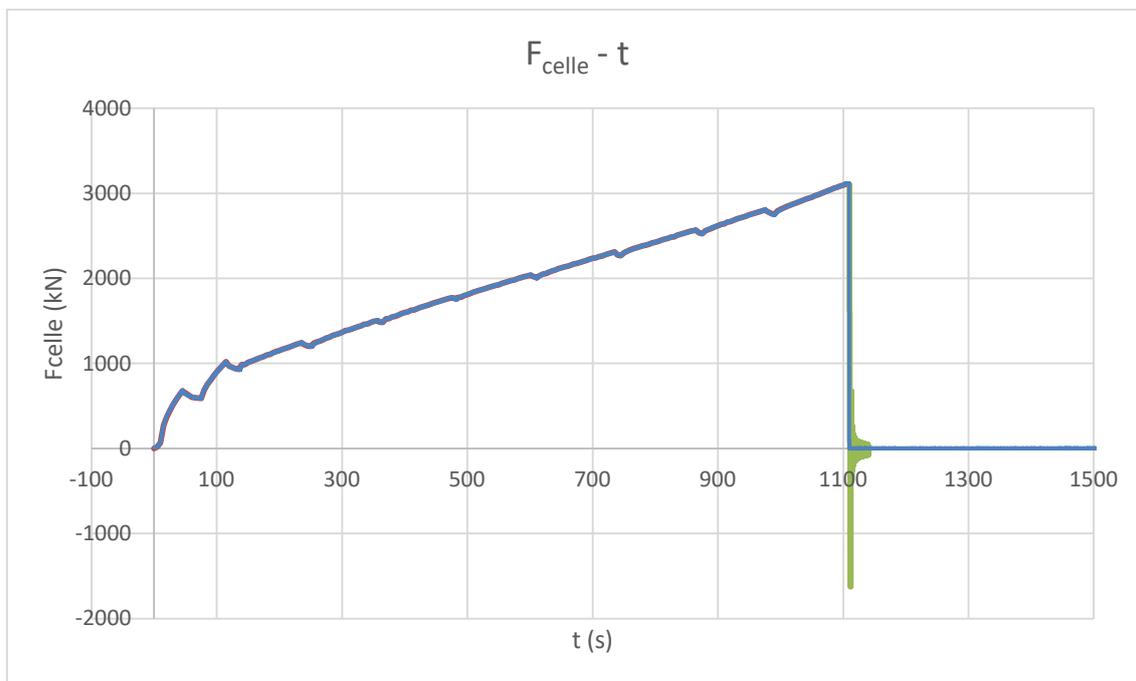


Figura 6.13 Confronto $F_{\text{celle}} - t$ tra sito e modello

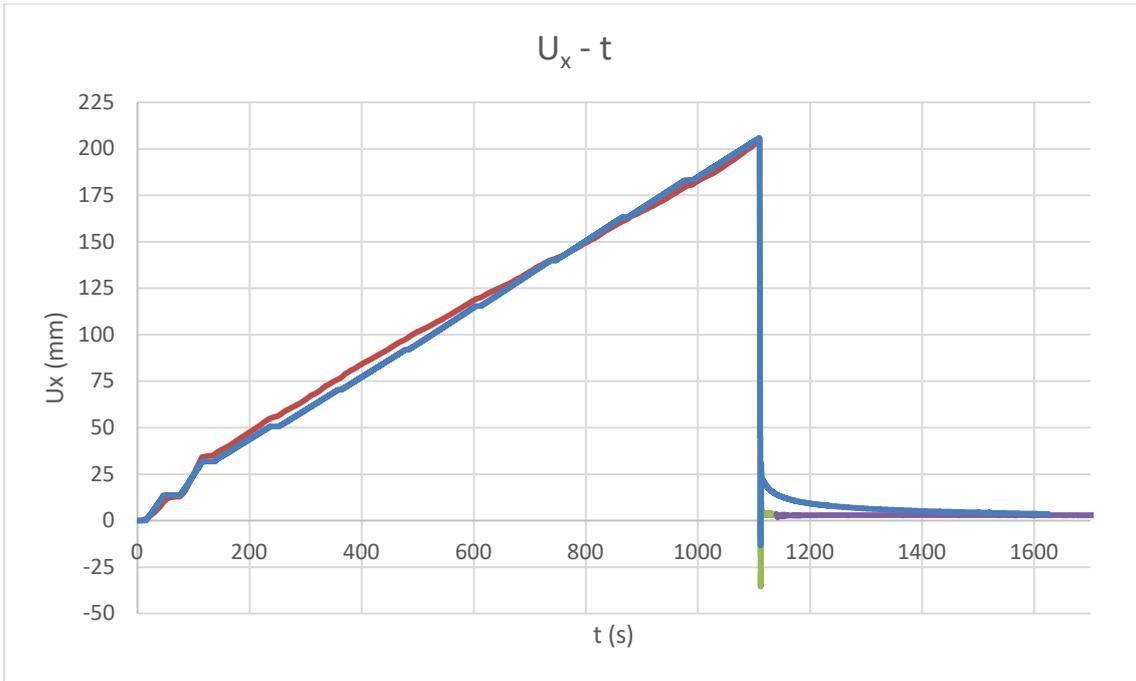


Figura 6.14 Confronto $U_x - t$ tra modello e sito

Si riportano i grafici: $F_{\text{celle}} - U_x$ (Fig. 6.15), $F_{\text{iso}} - U_x$ (Fig. 6.16) e l'andamento delle forze dei vari link in funzione del tempo nel ramo di carico (Fig. 6.17).

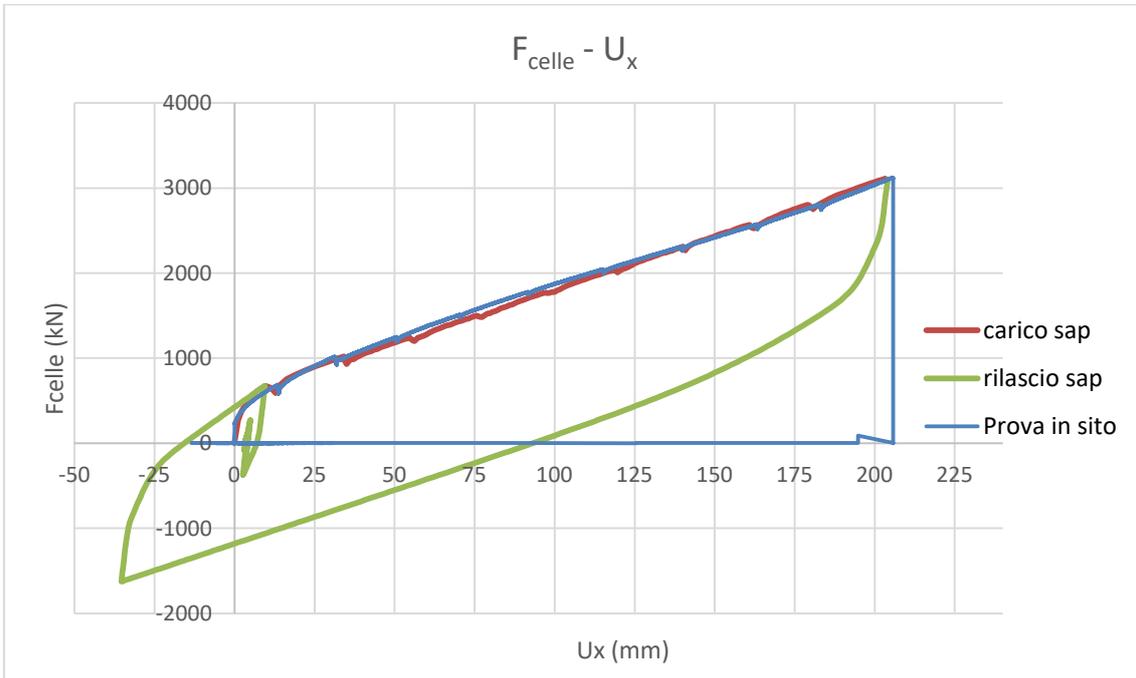


Figura 6.15 $F_{\text{celle}} - U_x$ confronto tra modello e sito

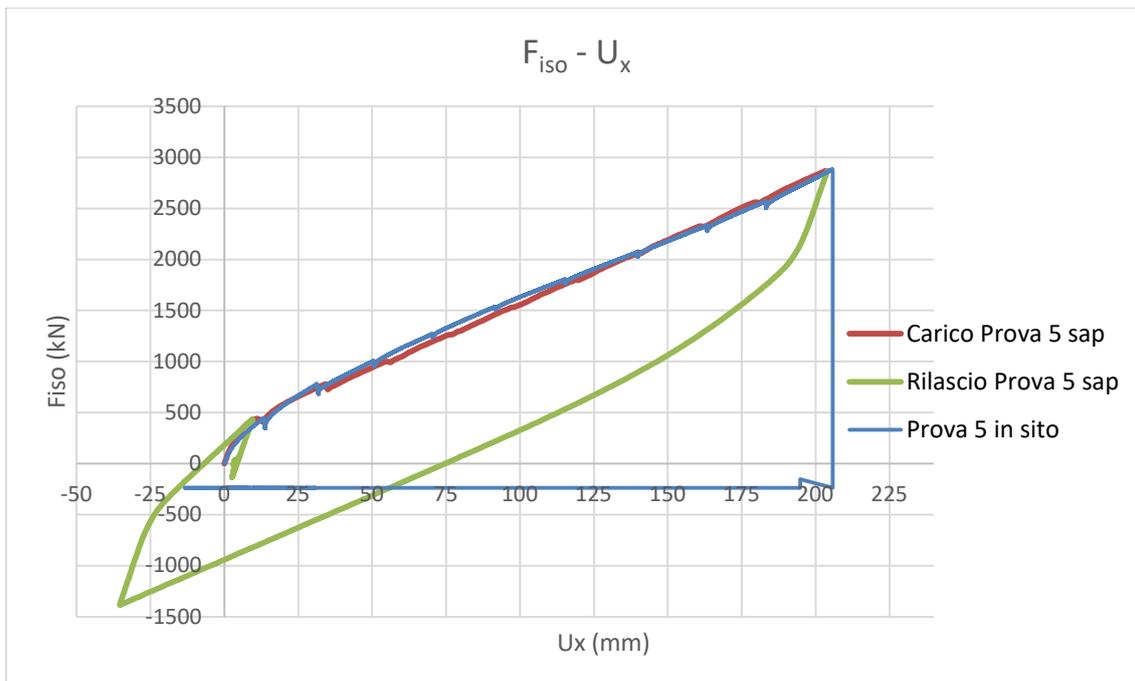


Figura 6.16 Fiso – U_x confronto tra modello e sito

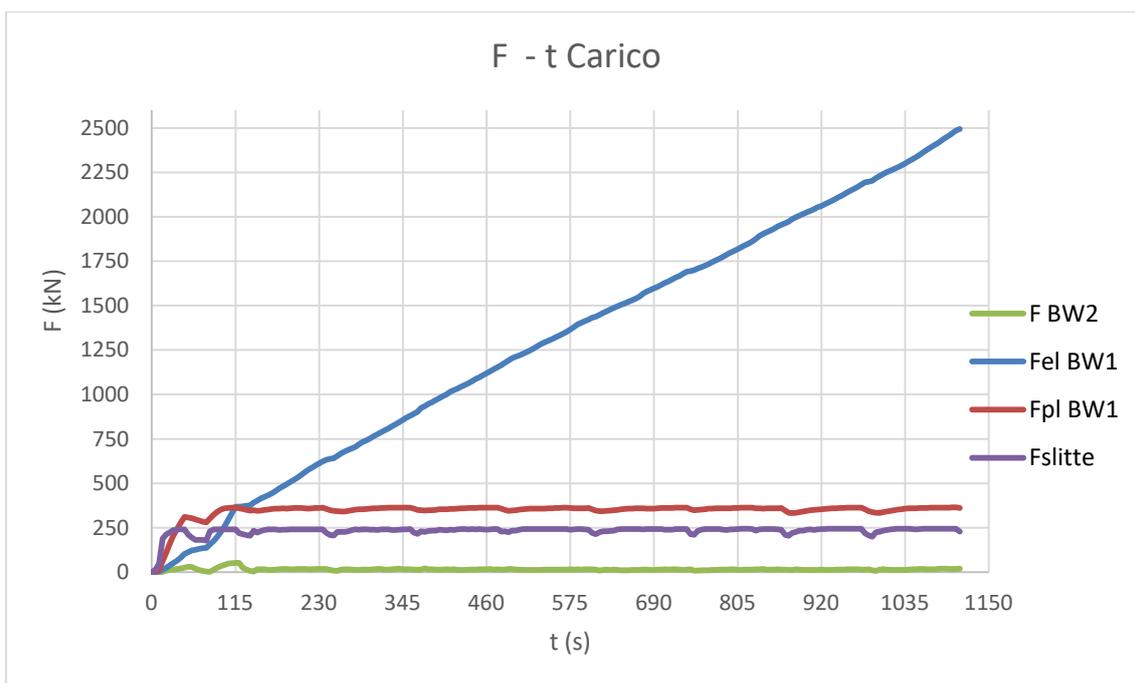


Figura 6.17 Andamento delle forze dei vari link in durante la fase di carico

Possiamo vedere come nella Fig. 6.17 la forza relativa al BW_2 è pari a 0 per tutta la fase di carico.

Se ci focalizziamo nella fase del rilascio Fig. 6.18, notiamo come il periodo di oscillazione della struttura è pressoché uguale al comportamento reale della struttura. Gli spostamenti del modello risultano inferiori rispetto a quelli monitorati durante la prova, inoltre dopo la seconda oscillazione gli spostamenti si stabilizzano intorno allo zero. Questo comportamento è possibile motivarlo osservando l'andamento delle forze

(Fig. 6.19), in funzione del tempo, dei vari link durante la fase del rilascio. Dopo 2,5 s tutte le forze tendono allo zero, infatti anche lo spostamento del modello al tempo $t=1112,5$ s tende allo zero. Per aumentare l'affidabilità del modello in fase di rilascio si è provato ad aumentare il contributo fornito dal dashpot, in termini di c , al fine di incrementare il comportamento viscoso del sistema.

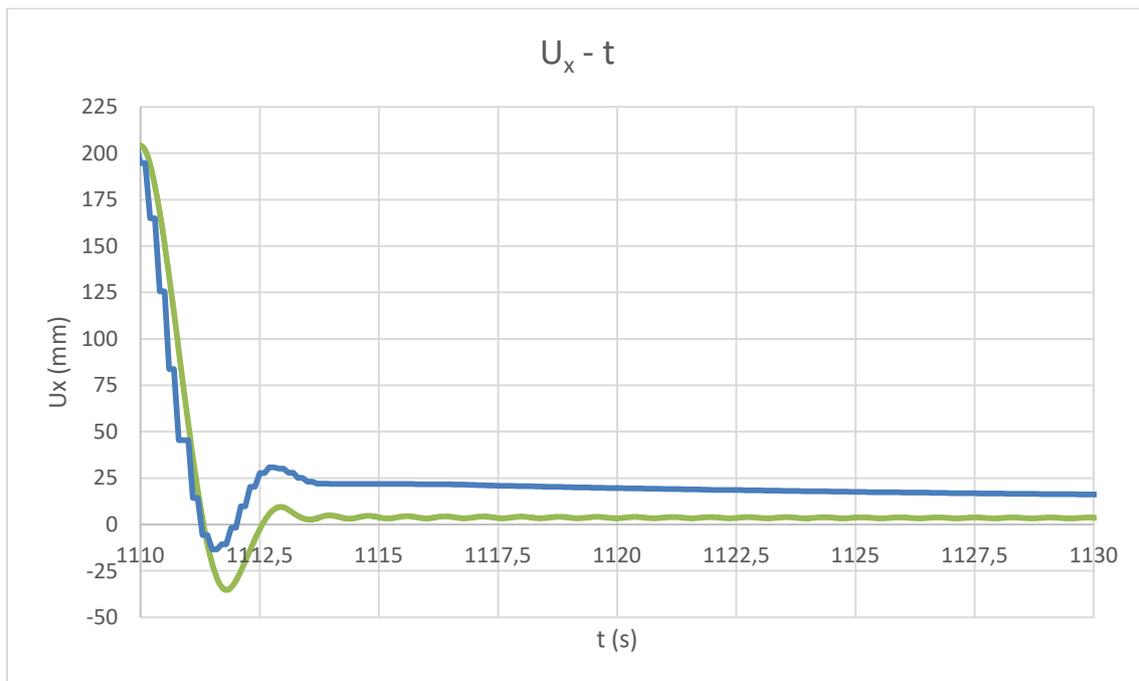


Figura 6.18 Confronto rilascio $U_x - t$ tra modello e sito

Le oscillazioni che si notano in Fig. 6.18 sono dovute alle oscillazioni della forza delle slitte (Fig. 6.19). Infatti, essendo modellate come un BoucWen, quando la forza è al di sotto della forza di snervamento essa ha un comportamento elastico e perciò non vi è una dissipazione di energia. Questo problema può essere risolto andando ad inserire nell'analisi uno smorzamento aggiuntivo alla Rayleigh.

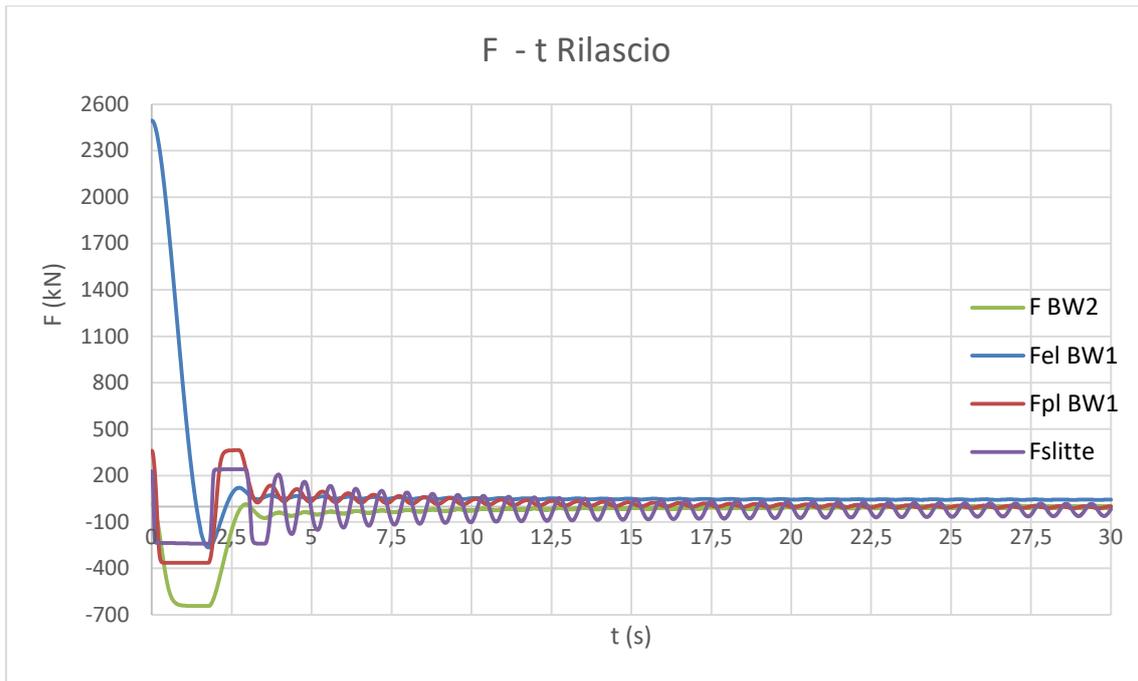


Figura 6.19 Andamento delle forze dei vari link durante la fase di rilascio

Per far vedere come varia il comportamento del modello all'aumentare della c del damper posto in serie con il BW_2 , sarà inserita un'analisi effettuata ponendo, per il singolo isolatore una $c=30000 \text{ kN*s/m}$. La prima cosa da notare sono le forze che può raggiungere il damper in funzione della velocità della prova (Tab. 6.13)

c (Kn*s/m)	30000
$F_{\text{carico Prova5}}$ (kN)	5,648
$F_{\text{scarico Prova5}}$ (kN)	3082,50
F_{hcc150} (kN)	23931,00
k (kN/m)	103941,606

Tabella 6.13 Massime forze del damper $c=30000$ possibili a seconda della velocità di carico e di rilascio

Aumentando il coefficiente viscoso c è un aumento della rigidità del sistema. Inoltre il damper si attiva anche nella fase di carico andando ad aumentare la rigidità del modello. Si riportano i risultati dell'analisi svolta.

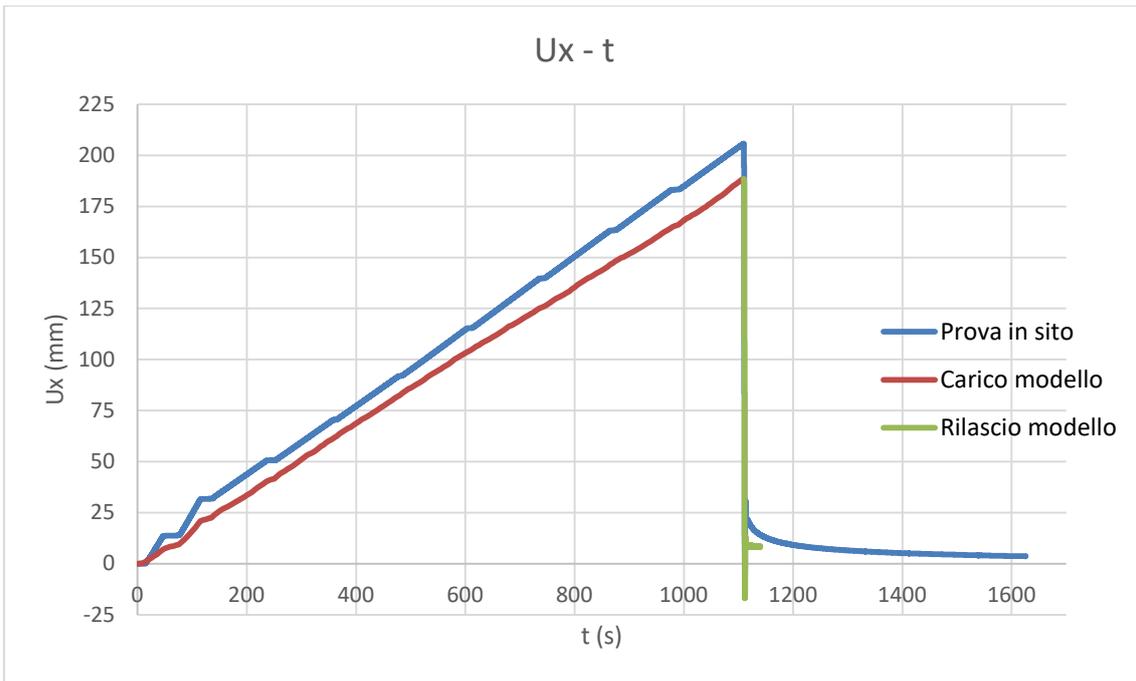


Figura 6.20 Confronto $U_x - t$ tra modello ($c=30000$) e sito

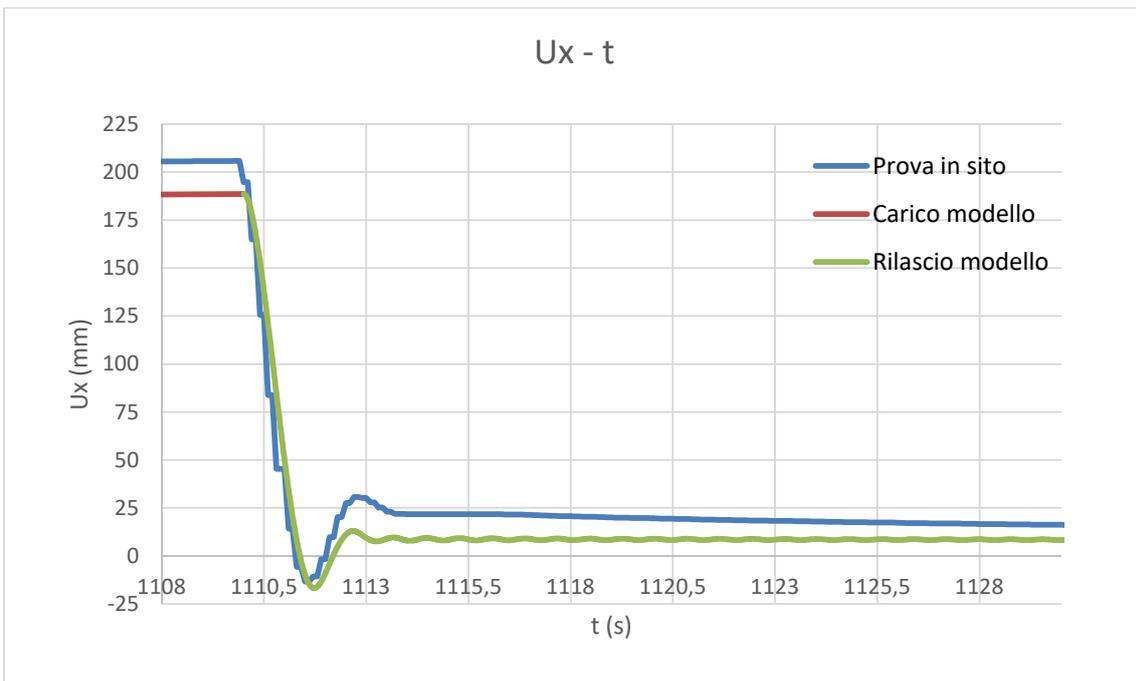


Figura 6.21 Confronto rilascio $U_x - t$ tra modello ($c=30000$) e sito

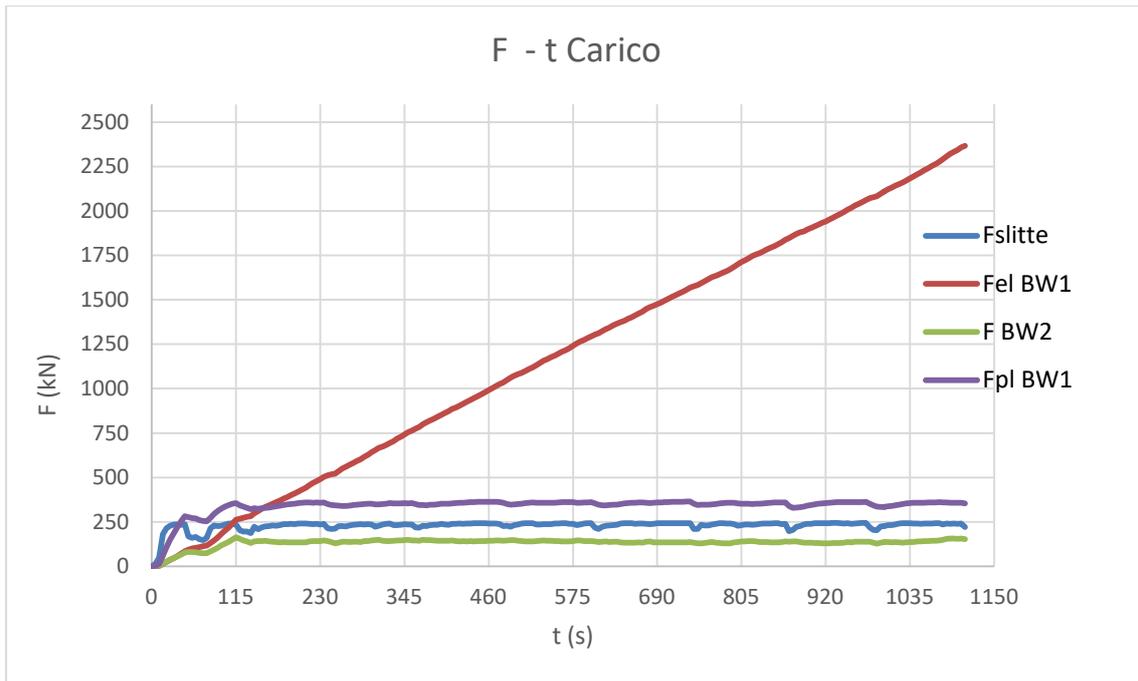


Figura 6.22 Andamento delle forze nella fase di carico ($c=30000$)

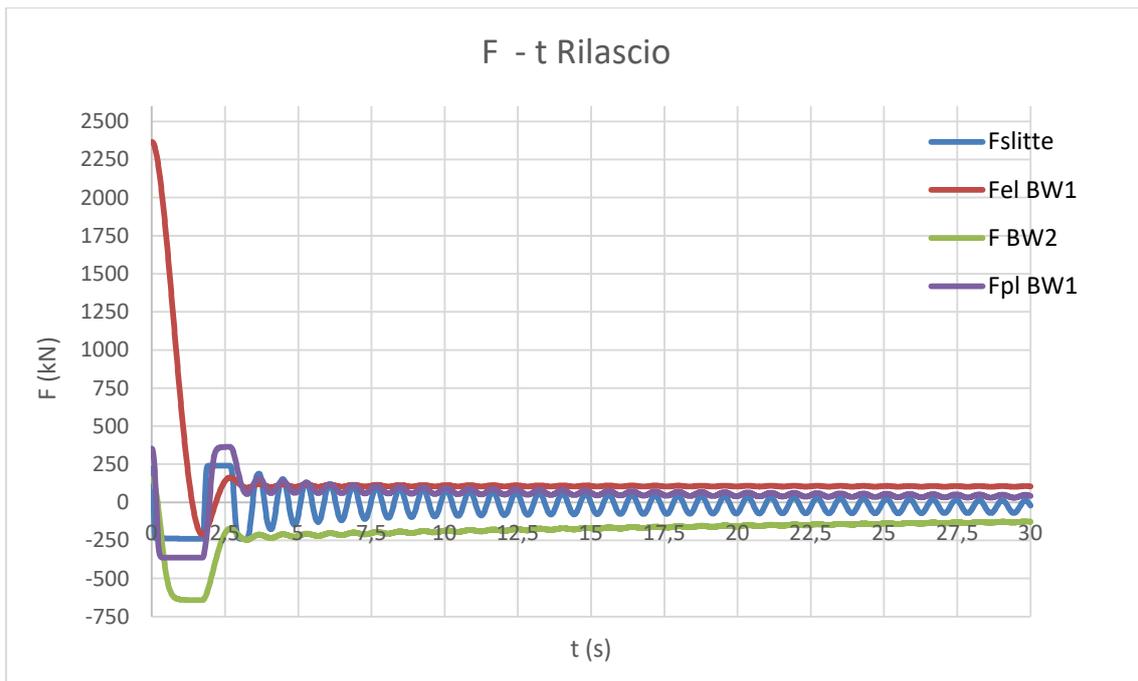


Figura 6.23 Andamento delle forze nella fase di rilascio ($c=30000$)

Come si può vedere nel grafico Fig. 6.22, durante la fase di carico il BW2 insieme al damper si attivano e questo produce un aumento di rigidità del sistema. Ciò porta ad avere un spostamento massimo inferiore rispetto all'analisi precedente (Fig. 6.14) e alla prova in sito. In fase di rilascio la massima forza che viene raggiunta dal BW2 è la medesima rispetto a quella che si vede nel grafico Fig. 6.19, questo perché anche se aumentando la c del damper ho un incremento della massima forza che può raggiungere questo link, il massimo contributo offerto dal sistema BW2 più damper equivale alla forza di snervamento del BW2, poiché ha un legame elastoplastico perfetto. L'unica

differenza con il grafico precedente sta nella velocità con cui la forza del BW2 tende a zero, infatti aumentando la c ho un aumento del contributo viscoso.

Questo porta ad avere un fase di rilascio più simile ai risultati in sito in termini di spostamento (Fig. 6.21).

Aumentando ancora di più il coefficiente viscoso avrò uno spostamento massimo ancora più piccolo e una fase di rilascio sempre più simile a quella in sito.

Al fine di avere un comportamento simile a quello in sito si può pensare di utilizzare le staged construction, ponendo un damper che si attivi solo nella fase di rilascio e avente una c simile a questa (Tab. 6.13), ma poiché l'obiettivo è quello di creare un modello semplice questa soluzione non è stata presa in considerazione.

6.1.5 Prova dinamica 2

L'analisi è stata effettuata a controllo di forza utilizzando la funzione reale della forza che si è registrata in sito. È stato ricavato il seguente comportamento che viene descritto dai seguenti grafici..

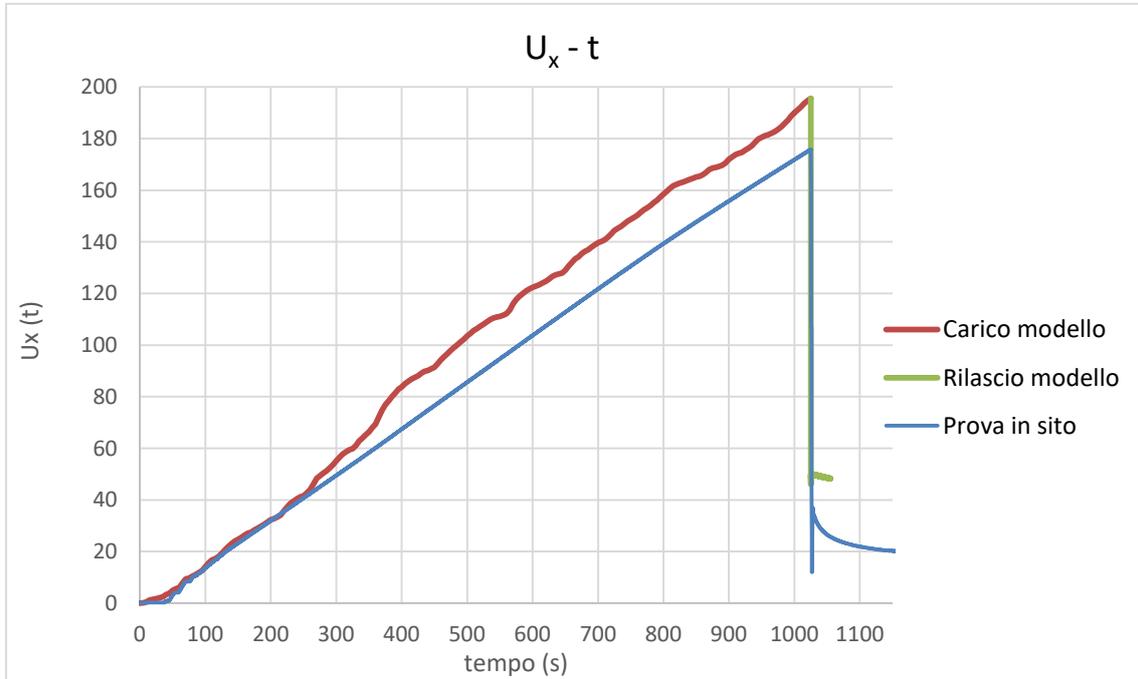


Figura 6.24 Confronto $U_x - t$ tra modello e sito

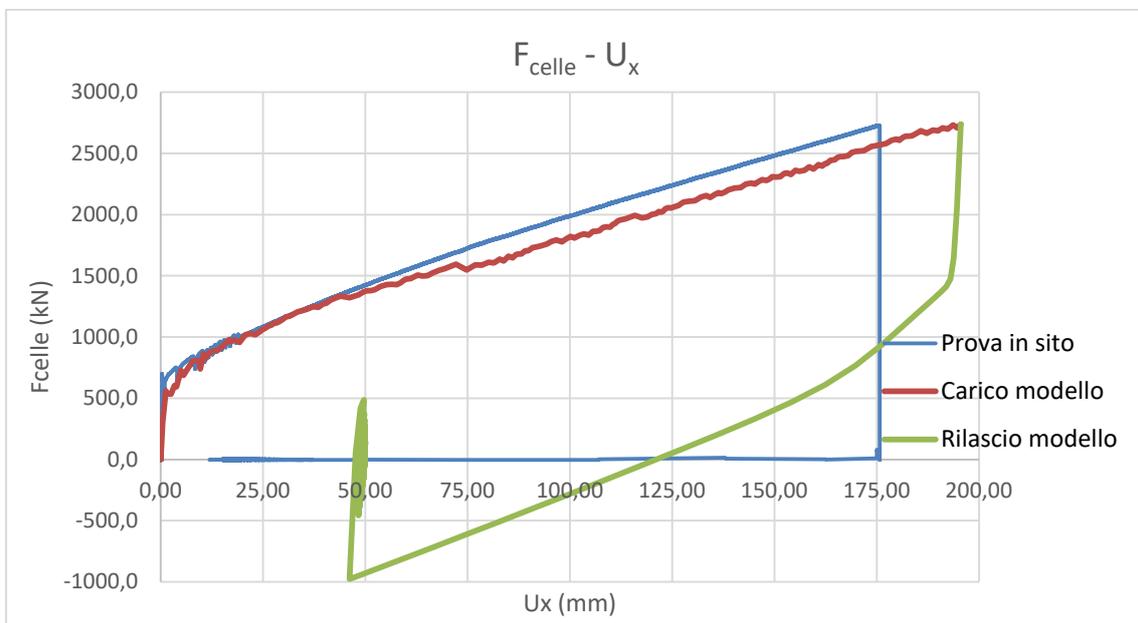


Figura 6.25 Confronto $F_{\text{celle}} - U_x$ tra modello e sito

Come si può vedere dalla Fig. 6.24 il modello non ha lo stesso comportamento in termini di spostamento rispetto alla prova svolta in sito. Il modello risulta essere meno rigido rispetto al sistema di isolamento reale, per questo motivo gli spostamenti che determiniamo dall'analisi sono maggiori. Ciò può essere spiegato riguardando la Fig.

4.45, nella quale si può vedere come la pendenza della curva $F_{iso} - U_x$, per la Prova dinamica 2, abbia una pendenza diversa rispetto alle altre curve a causa dell'elevato attrito caratterizzante tale prova. Poiché, questo modello è stato tarato basandosi sulle caratteristiche degli isolatori nella Prova statica 7, esso risulta non utilizzabile per la modellazione della Prova dinamica 2.

Il modello, inoltre, non riesce a far avvenire completamente il rilascio, infatti il sistema si blocca ad uno spostamento di 50 mm. Questo può essere motivato andando ad osservare l'andamento delle forze dei vari link durante la fase di rilascio.

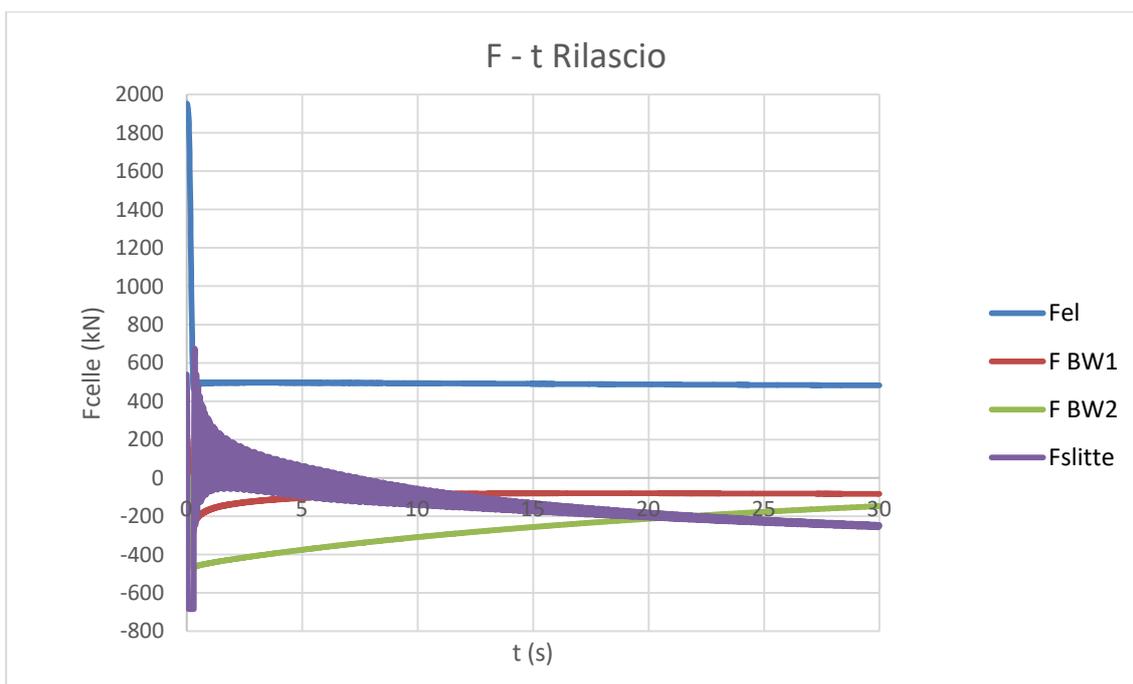


Figura 6.26 Andamento delle forze dei vari link in fase di rilascio

Dalla Fig. 6.26 si nota come la forza elastica rimanga costante, mentre l'attrito oscilla molto velocemente a causa del suo notevole contributo. Il mancato rilascio risiede essenzialmente nel modo in cui è stato semplificato il contributo dell'attrito. Infatti per semplicità, la sua aliquota è stata assunta fissa a quella osservata dalle elaborazioni grafiche e non è stato né sdoppiato nel contributo dinamico e statico e né è stato assunto dipendente dalla velocità. Ciò risulta essere una notevole limitazione di questo modello.

6.1.6 Prova dinamica 4

L'unica cosa che cambia dal modello precedente non sono i parametri degli isolatori, ma il contributo offerto dalle slitte che è stato assunto pari a quello calcolato nel paragrafo 3.4.3.

Svolgendo un'analisi a controllo di forza utilizzando la rampa reale si ottengono i seguenti elaborati grafici.

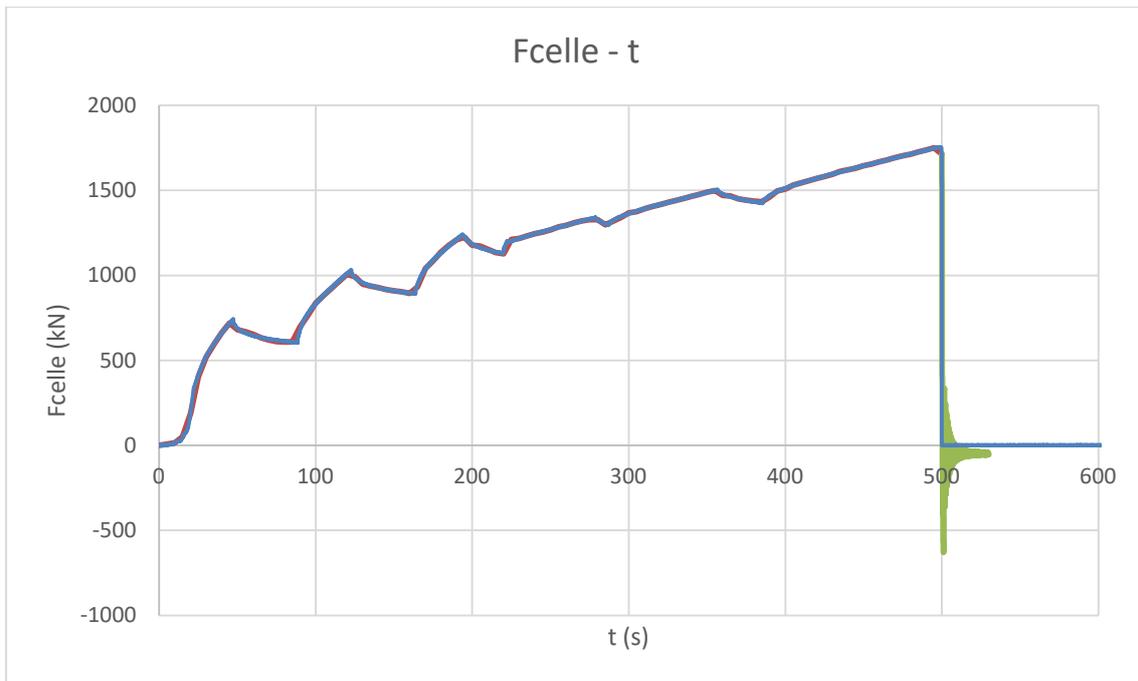


Figura 6.27 Andamento delle forze in input al modello

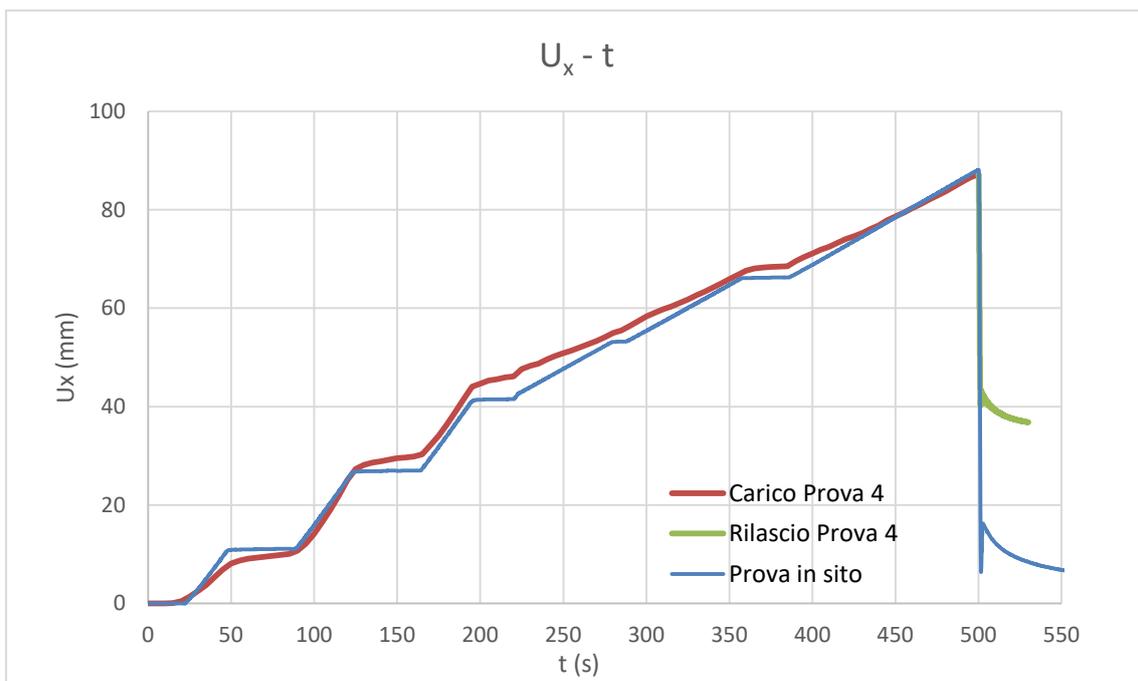


Figura 6.28 Confronto $U_x - t$ tra modello e sito

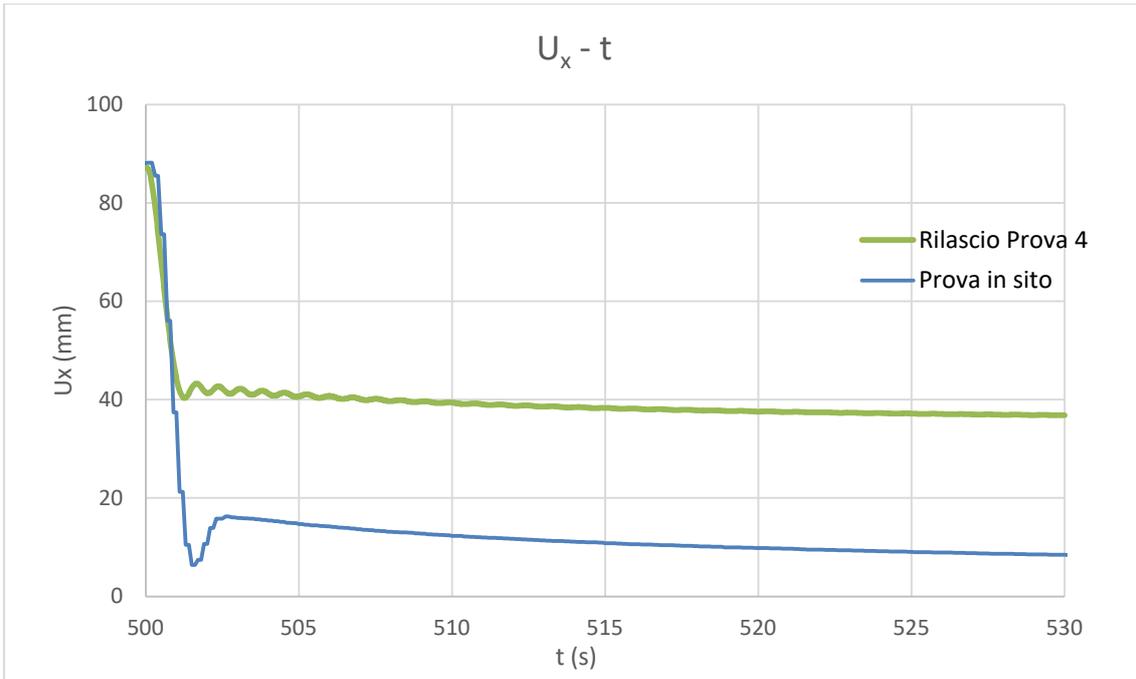


Figura 6.29 Confronto rilascio modello e sito

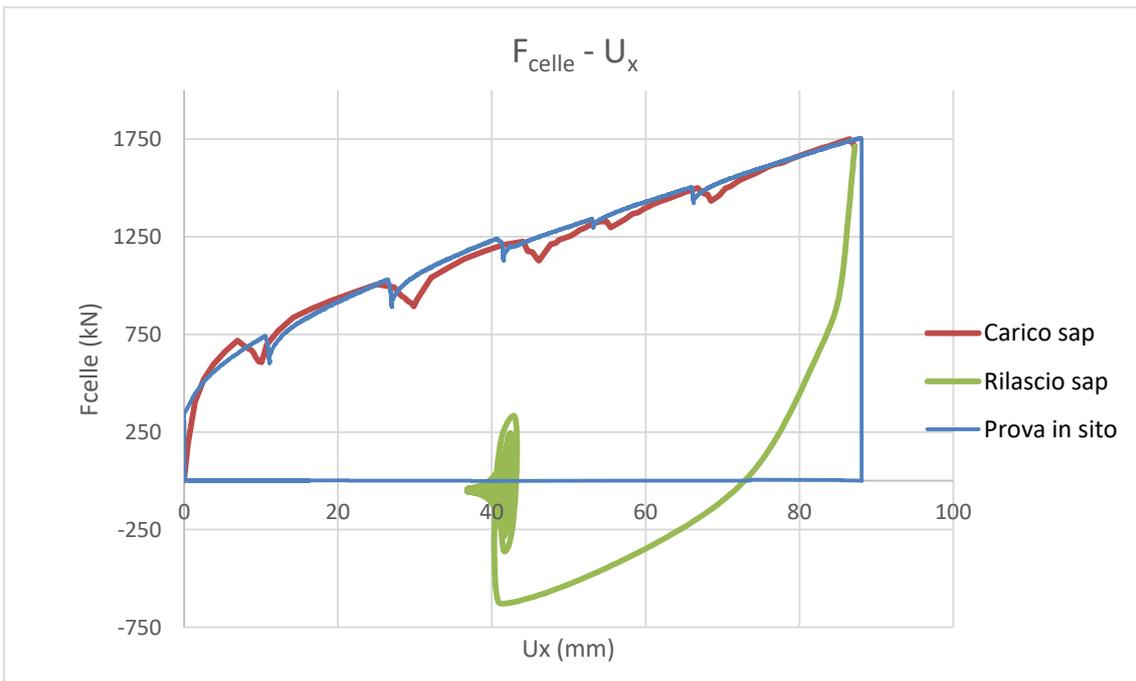


Figura 6.30 Confronto $F_{\text{celle}} - U_x$ tra modello e sito

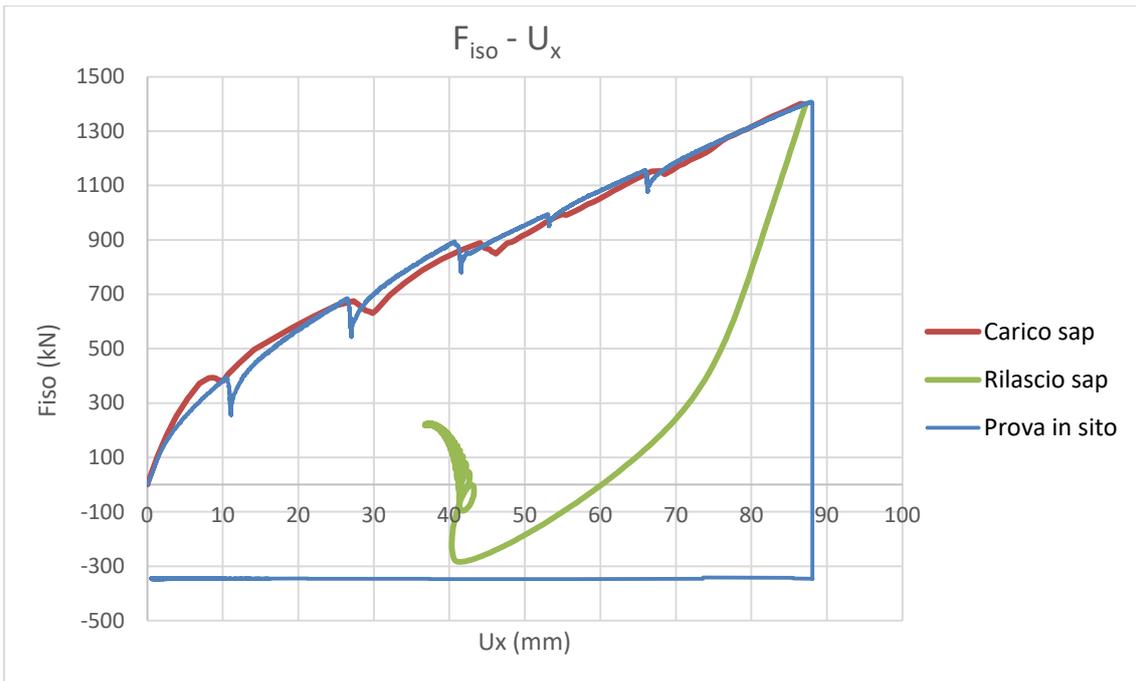


Figura 6.31 Confronto F_{iso} – U_x tra modello e sito

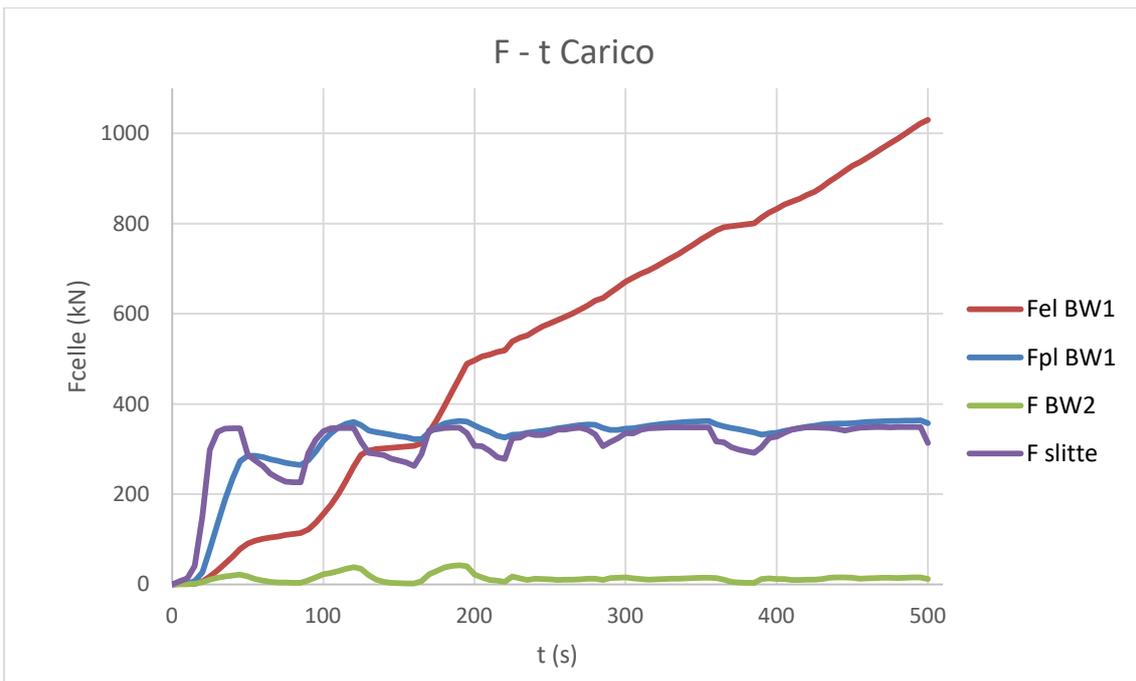


Figura 6.32 Andamento delle forze dei vari link durante la fase di carico

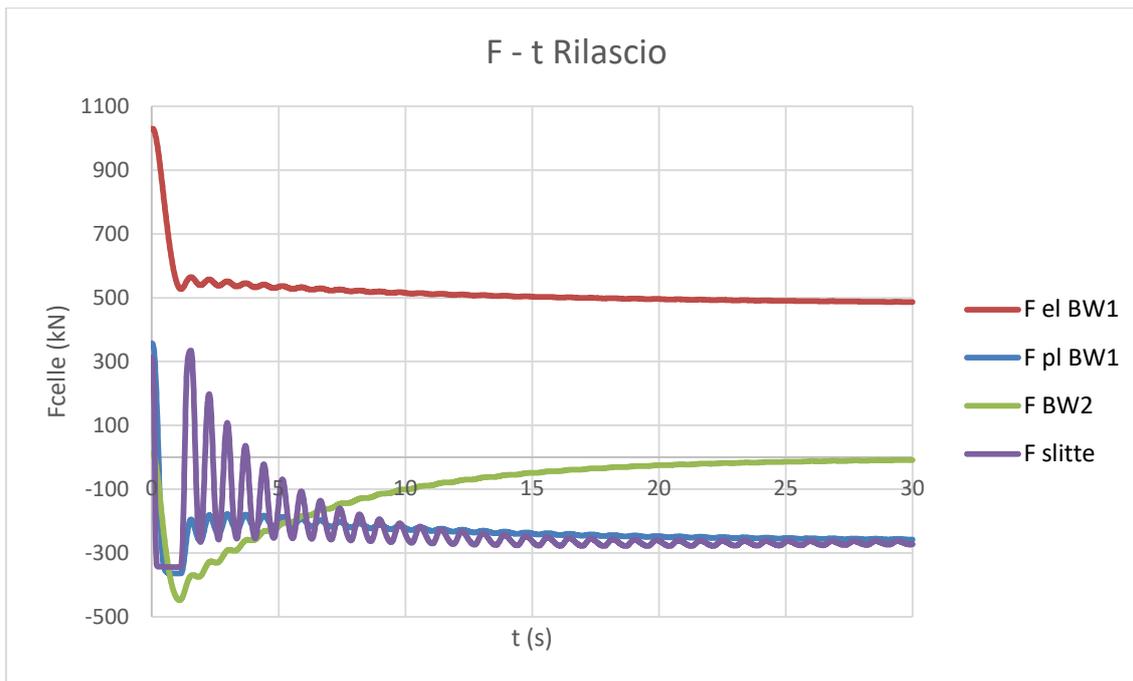


Figura 6.33 Andamento delle forze dei vari link durante la fase di rilascio

Dai precedenti grafici è possibile fare diverse osservazioni sia per la fase di carico che per la fase di rilascio.

Il modello nella fase di carico raggiunge uno spostamento simile a quello in sito $u_{x,modello}=87,2\text{mm}$, ma non riesce a descrivere fedelmente il ramo di carico. Osservando gli spostamenti nelle Fig. 6.28 e 6.30 si vede come il modello non riesca a descrivere fedelmente il comportamento della struttura in sito. Infatti, notiamo come gli spostamenti durante la fase di carico non hanno la stessa pendenza della prova in sito sia negli step che nell'andamento. Per questo sono state condotte delle analisi a controllo di spostamento per capire se il modello riesca a descrivere il più fedelmente possibile il rilassamento del sistema anche nella fase di carico.

Se osserviamo la fase di rilascio notiamo come il modello non riesca a descrivere la fase dinamica della prova. Infatti, da come si può vedere dalla Fig. 6.26 il modello si "blocca" ad uno spostamento di 40 mm senza riuscire a descrivere il comportamento dinamico. La risposta a questo comportamento risiede nell'andamento delle forze dei vari elementi nella fase di rilascio Fig. 6.33. Se osserviamo il grafico notiamo come le forze degli elementi degli isolatori, non dipendenti del tempo, e delle slitte non tendono a zero, ma si stabilizzano ad un valore costante. Per questo motivo il modello non rilascia.

A differenza della Prova dinamica 5, il contributo offerto dalle slitte è confrontabile con quello degli altri link, ciò influenza enormemente la fase di rilascio. Anche se la forza di attrito è inferiore rispetto alla Prova dinamica 2, il suo effetto è comunque importante. Poiché essendo la Prova dinamica 4 caratterizzata da uno spostamento massimo inferiore rispetto alle prove precedenti, il contributo dei link relativi agli isolatori è inferiore.

Perciò questo modello, così concepito, non si adatta per spostamenti bassi a causa di diversi fattori:

- Il contributo offerto dalle slitte non è trascurabile quando le forze dei link degli isolatori sono relativi a prove con bassi spostamenti. Inoltre, il modo in cui le slitte sono state modellate risulta alquanto limitata, perché in realtà sono dipendenti dalla velocità e questo non è stato preso in considerazione;
- Il numero di prove su cui si basa la taratura del modello è esiguo, infatti non si riesce a descrivere perfettamente il comportamento del sistema per tutte le prove. Non si hanno per esempio delle prove statiche con spostamenti simili alle Prove dinamiche 4 e 6;
- Il modo in cui è stato semplificato il comportamento degli isolatori elastomerici, legame elastoplastico, risulta limitato per la complessità del loro legame costitutivo. Infatti l'influenza dalla velocità (comportamento viscoso) è stata introdotta ponendo in serie un dashpot al legame elastoplastico. Ciò comporta ad avere un'approssimazione e a degli errori in fase di analisi dovuti al software, sarebbe più consono passare a software che hanno all'interno dei legami viscoplastici;
- Il contributo offerto dalla viscosità non è lineare come supposto inizialmente.

Nel successivo paragrafo vengono riportate le analisi svolte aggiungendo al modello un dashpot in serie con BW1 per avere un comportamento viscoso anche in fase di carico. Questo contributo dipendente dalla velocità dovrebbe migliorare anche il comportamento in fase di rilascio, poiché è presente anche nella seconda fase delle varie prove dinamiche.

6.1.7 Aggiunta del secondo Dashpot

Come detto precedentemente sono state condotte delle analisi a controllo di spostamento per vedere se il modello sia capace, anche nella fase di carico, di descrivere il rilassamento. Le analisi a controllo di spostamento sono state effettuate solo per la fase di carico della prove dinamiche perché il software non permette di modellare la fase del rilascio a causa della presenza del dashpot.

Si riportano i grafici ricavato dall'analisi: $F_{\text{celle}} - t$ (Fig. 6.34), $F_{\text{celle}} - U_x$ (Fig. 6.35), $F - t$ dei vari elementi (Fig. 6.36).

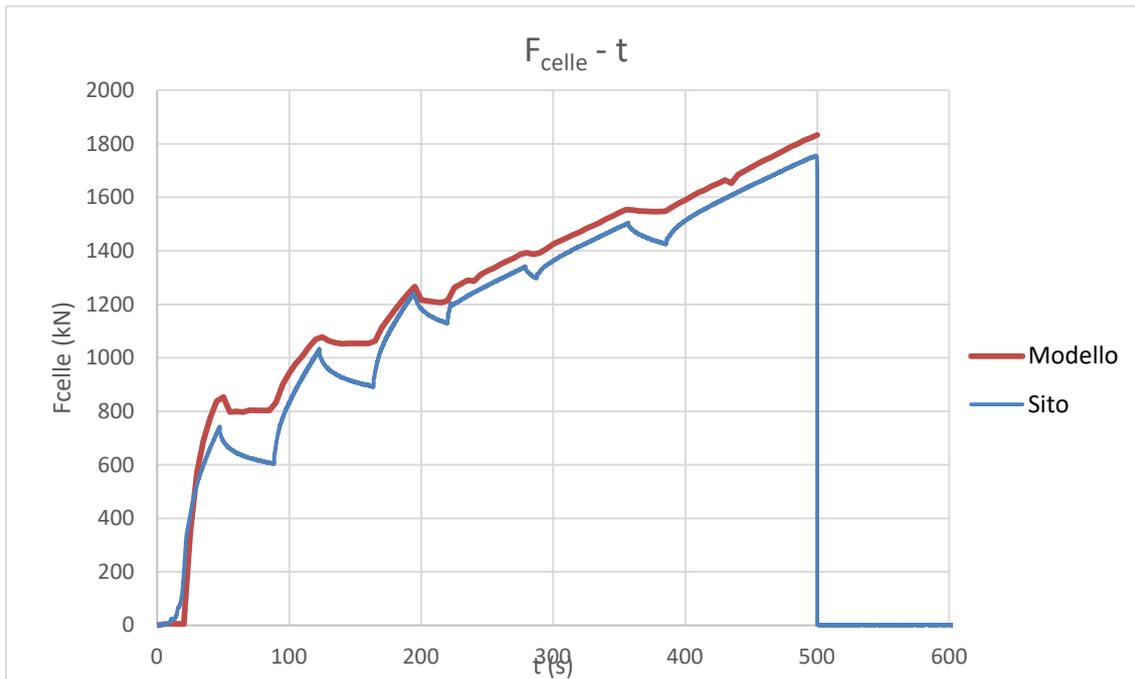


Figura 6.34 $F_{\text{celle}} - t$ confronto modello e sito

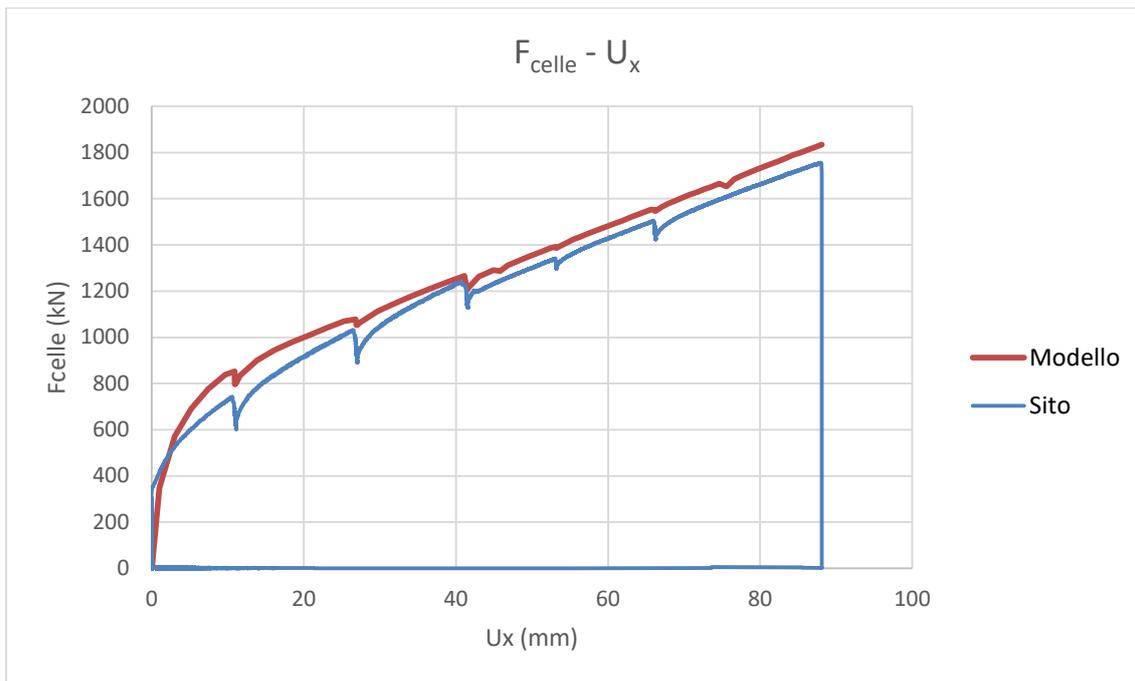


Figura 6.35 $F_{\text{celle}} - U_x$ tra modello e sito

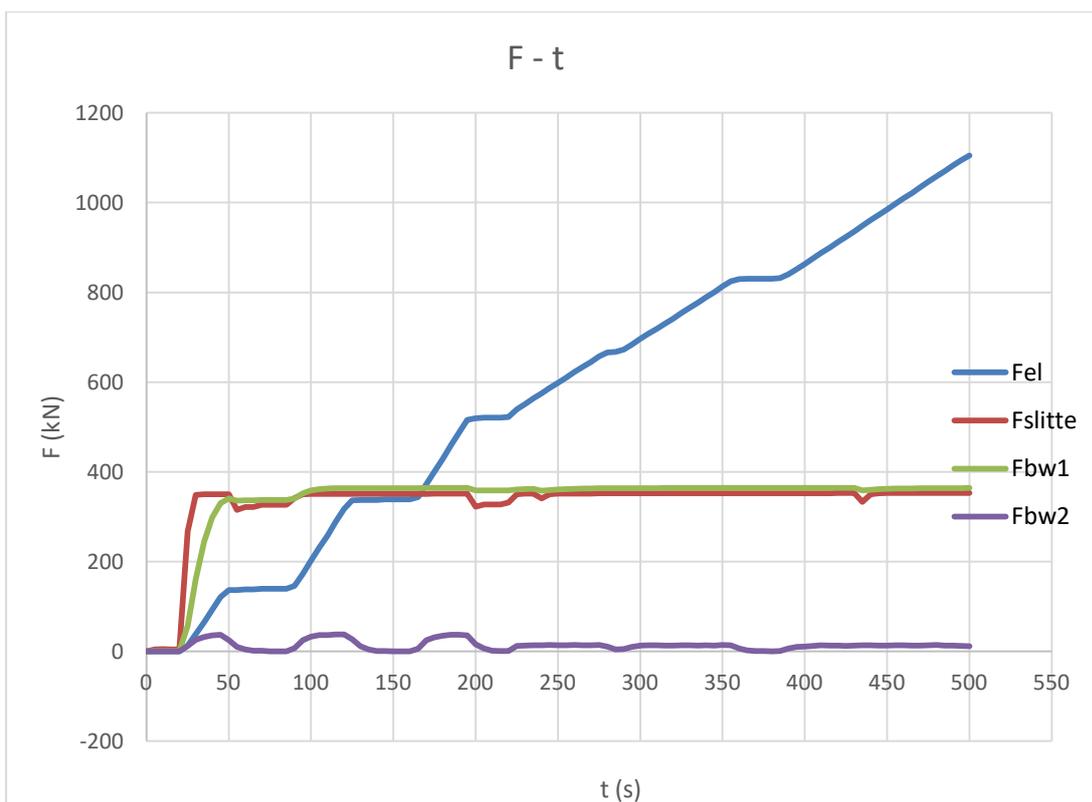


Figura 6.36 Andamento dei vari elementi durante la fase di carico

Da come si può vedere nella Fig.6.34 non vi è un rilassamento delle forze quando lo spostamento rimane costante. Infatti, non avviene una caduta di tensione negli elementi che si attivano durante la fase di carico. Per questo si è scelto di aggiungere al modello un damper posto in serie con il BW1 così da poter avere un comportamento dipendente dalla velocità anche nella fase di carico.

Mentre il coefficiente viscoso relativo al BW2 è stato tarato in base alla velocità, il contributo viscoso in serie con il BW1 è stato tarato andando a testare diversi coefficienti per trovare il più opportuno. Ci si aspetta che il coefficiente viscoso relativo alla fase di carico, da ora in poi chiamato c_1 , sia almeno di due/tre ordini di grandezza maggiore rispetto a c_2 , così da poter esplicitare un contributo, in termini di forza, per la velocità di carico.

Inoltre, per i diversi coefficienti viscosi si è andata a variare quella che è la forza di snervamento del BW1, per vedere cosa cambia nel modello al variare di questo valore. Ogni qual volta che si varia la forza di snervamento il modello dovrebbe essere riaggiornato sia della componente elastica che nella componente elastoplastica della fase di rilascio, ma ciò non è stato fatto perché l'obbiettivo di queste analisi è quello di studiare solo la variazione del comportamento del modello al variare di questi due coefficienti. L'analisi parametrica è stata condotta sulla Prova di carica 4 perché in questa gli step di carico sono più lunghi rispetto alle altre prove, in questo modo è possibile comprendere visivamente meglio il confronto tra il modello e i risultati in sito. In ogni analisi si è confrontato il grafico $F_{celle} - t$ del modello con quello del sito andando controllare le pendenze.

Una volta che sono stati scelti i due parametri (c_1 e F_y del BW1) sono state rieseguite le analisi per la Prova dinamica 4 e 5. Si riportano i coefficienti c_1 testati (relativi al sistema di isolamento) e i vari comportamenti derivati dall'analisi.

Sistema di isolamento	
Analisi parametrica C1	
$V_{Prova\ 4}$ (mm/s)	0,176
$c_{1,1}$ (kN*s/m)	84000
$F_{1,dashpot}$ (kN)	14,78
K (kN/m)	167809,31

Tabella 6.14 Valori del dashpot $c_{1,1}$

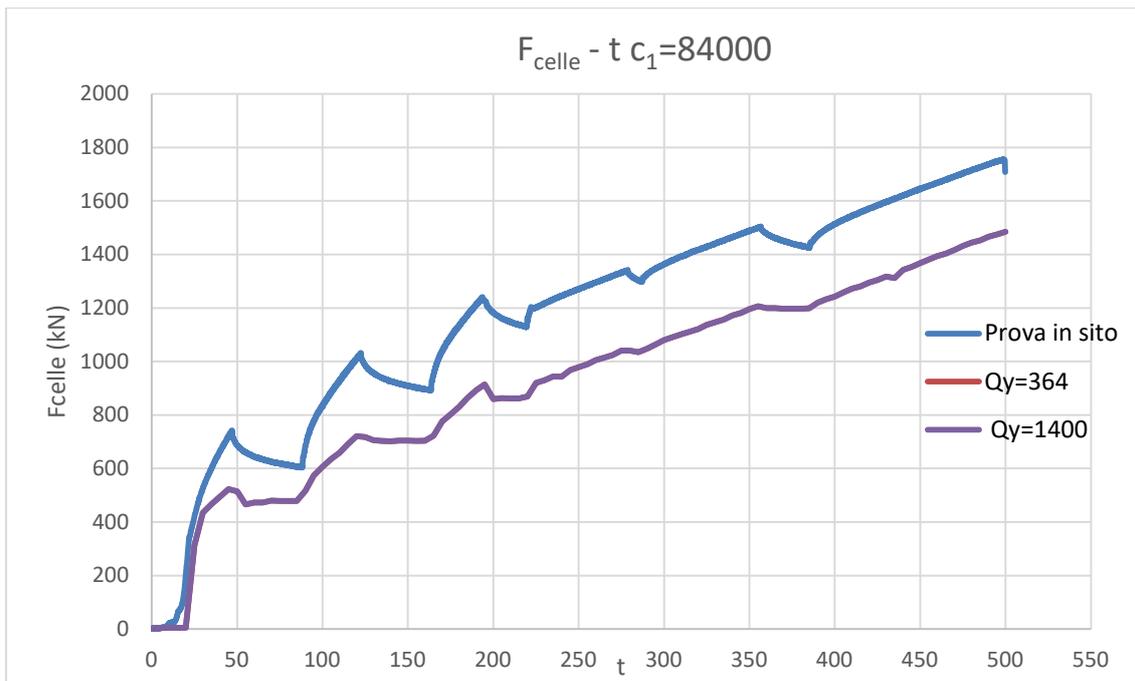


Figura 6.37 F_{celle} - t c₁=84000

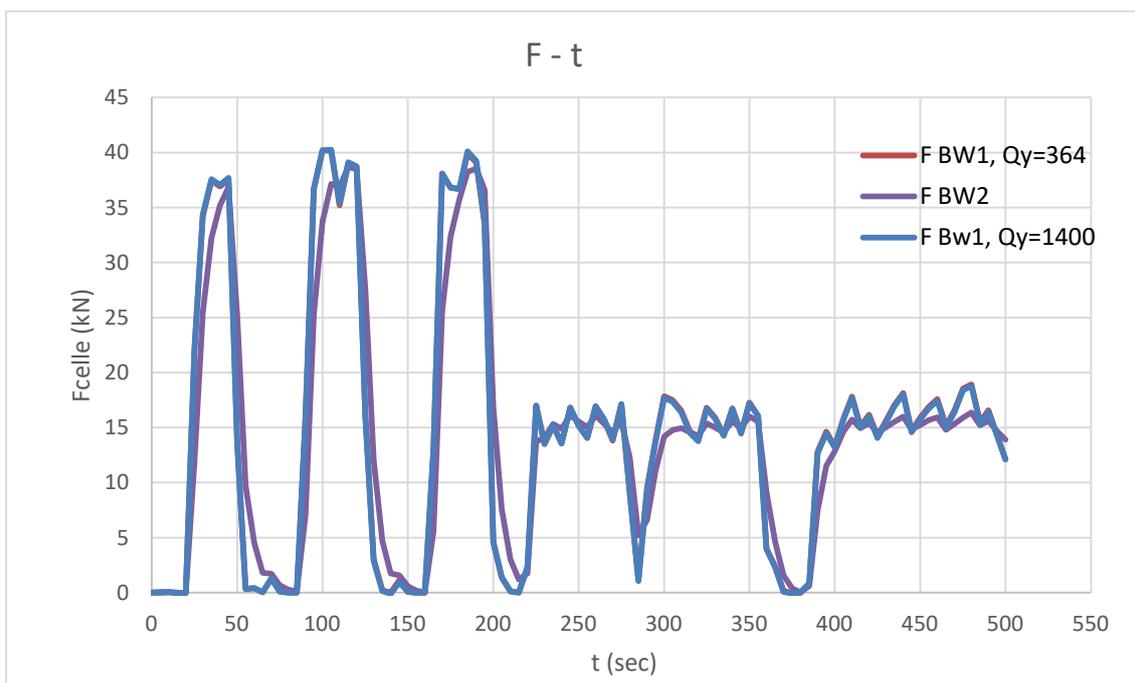


Figura 6.38 Andamento forza BW1 e BW2 con c₁=84000

Un primo commento si può fare già da questi grafici; infatti, utilizzando per c_1 lo stesso valore di c_2 non si “attiva” o per lo meno il suo contributo è molto basso (Fig.5.38). Inoltre, qualsiasi valore io vari per la Q_y il contributo offerto dal sistema BW1 più c_1 è sempre lo stesso, perché la massima forza che può esplicitare il dashpot è quella contenuta in Tab. 5.14.

Sistema di isolamento	
Analisi parametrica C1	
$V_{Prova\ 4}$ (mm/s)	0,176
$C_{1,2}$ (kN*s/m)	980000
$F_{1,dashpot}$ (kN)	172,48
K (kN/m)	1957775,26

Tabella 6.15 Valori del dashpot c1,2

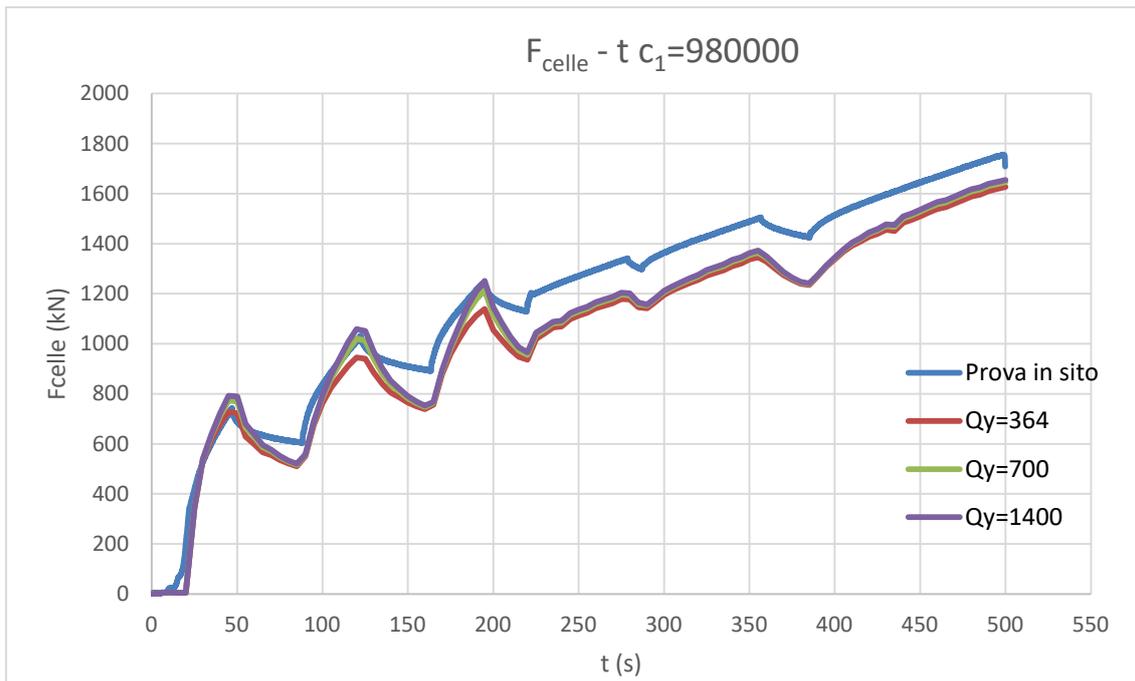


Figura 6.38 Fcelle – t c1=980000

Sistema di isolamento	
Analisi parametrica C1	
$V_{Prova\ 4}$ (mm/s)	0,176
$C_{1,3}$ (kN*s/m)	2100000
$F_{1,dashpot}$ (kN)	369,60
K (kN/m)	4195232,69

Tabella 6.16 Valori del dashpot c1,3

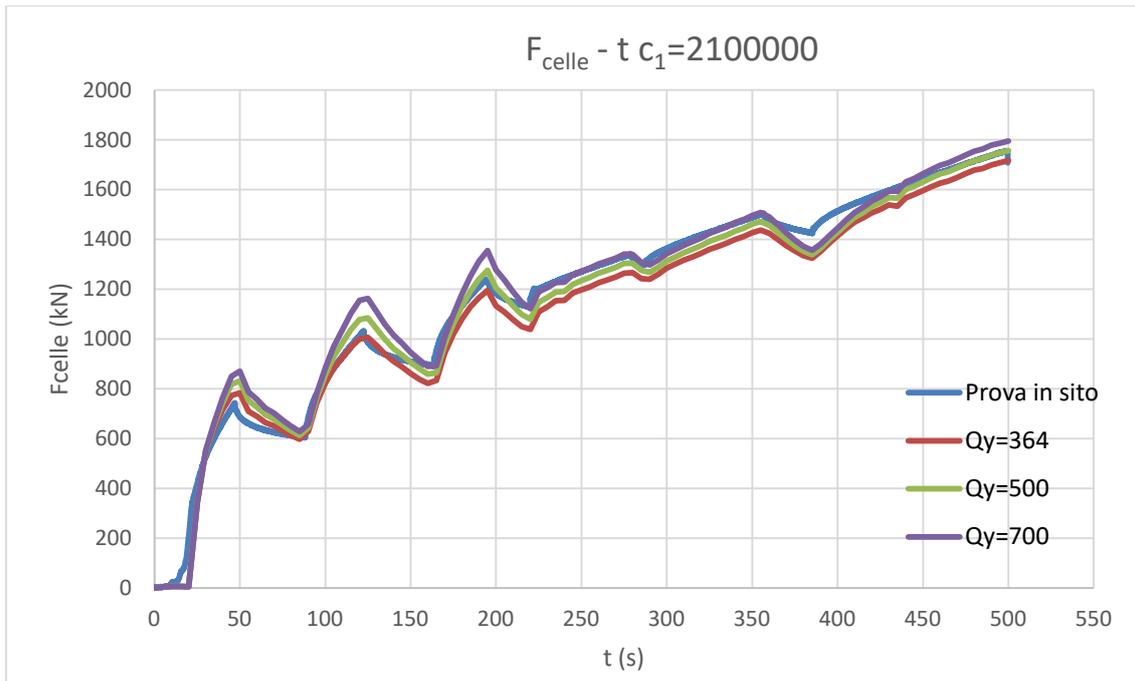


Figura 6.39 $F_{\text{celle}} - t \ c_1=2100000$

Sistema di isolamento	
Analisi parametrica C1	
$V_{\text{Prova 4}}$ (mm/s)	0,176
$C_{1,4}$ (kN*s/m)	3500000
$F_{1,\text{dashpot}}$ (kN)	616,00
K (kN/m)	6992054,48

Tabella 6.17 Valori del dashpot

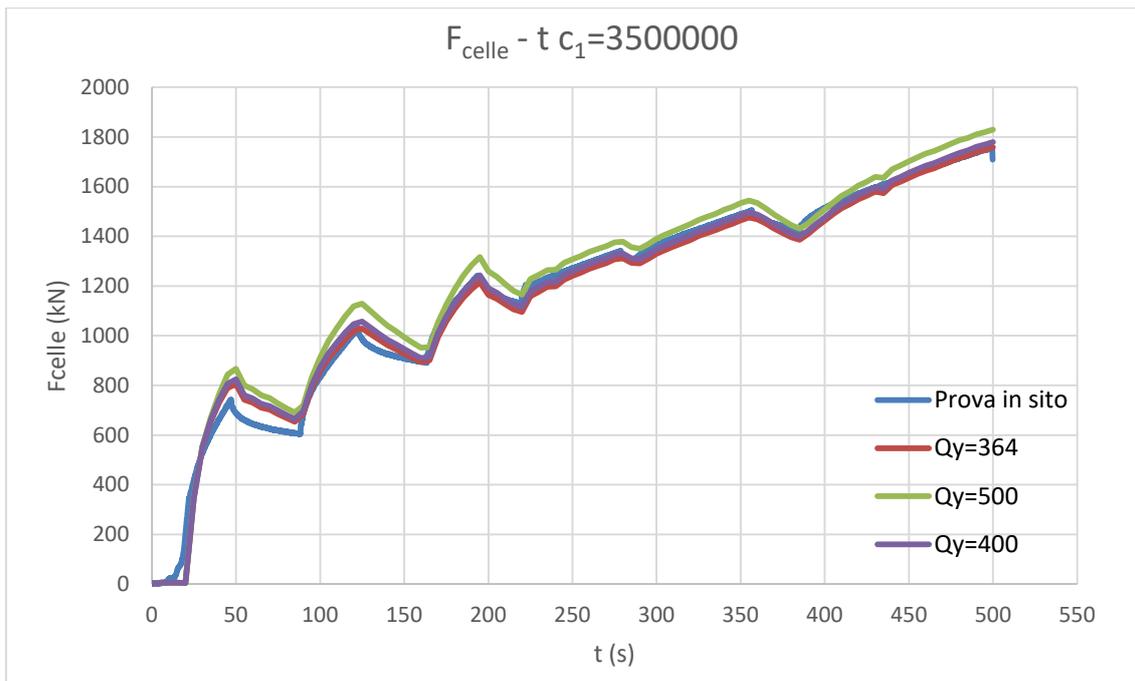


Figura 6.40 F_{celle} – t c₁=3500000

Sistema di isolamento	
Analisi parametrica C1	
$V_{Prova\ 4}$ (mm/s)	0,176
$C_{1,5}$ (kN*s/m)	5040000
$F_{1,dashpot}$ (kN)	887,04
K (kN/m)	10068558,5

Tabella 6.18 Valori del dashpot c_{1,5}

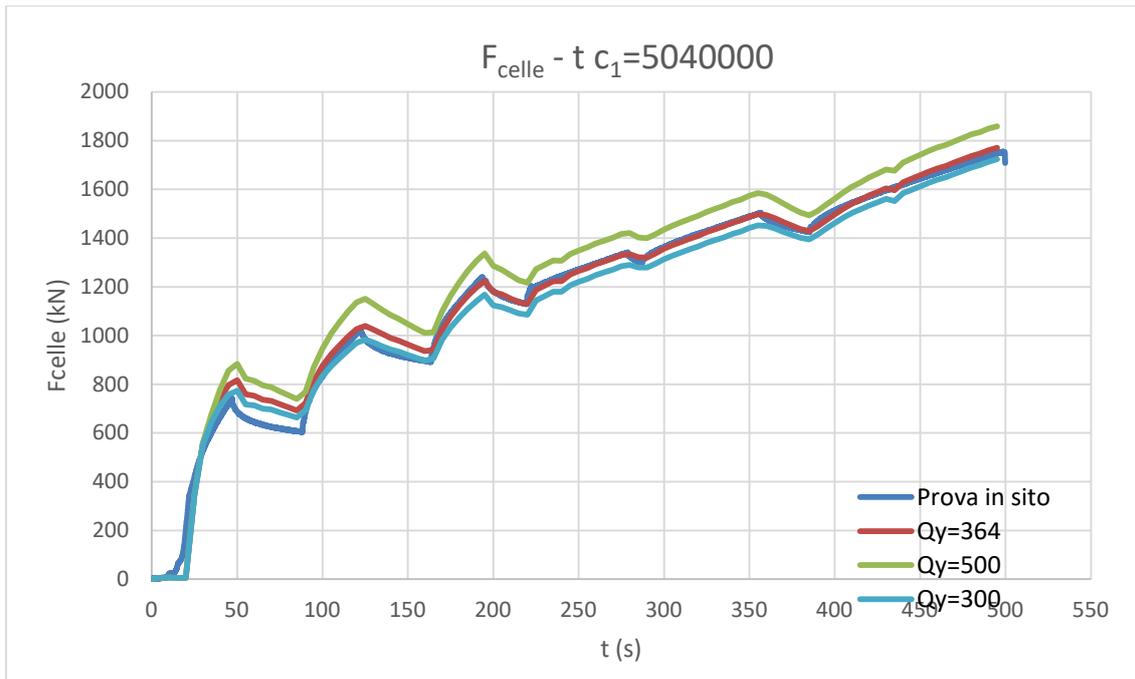


Figura 6.41 F_{celle} – t c₁=5040000

Sistema di isolamento	
Analisi parametrica C1	
$v_{Prova\ 4}$ (mm/s)	0,176
$c_{1,6}$ (kN*s/m)	7000000
$F_{1,dashpot}$ (kN)	1232,0
K (kN/m)	13984109

Tabella 6.19 Valori del dashpot c_{1,6}

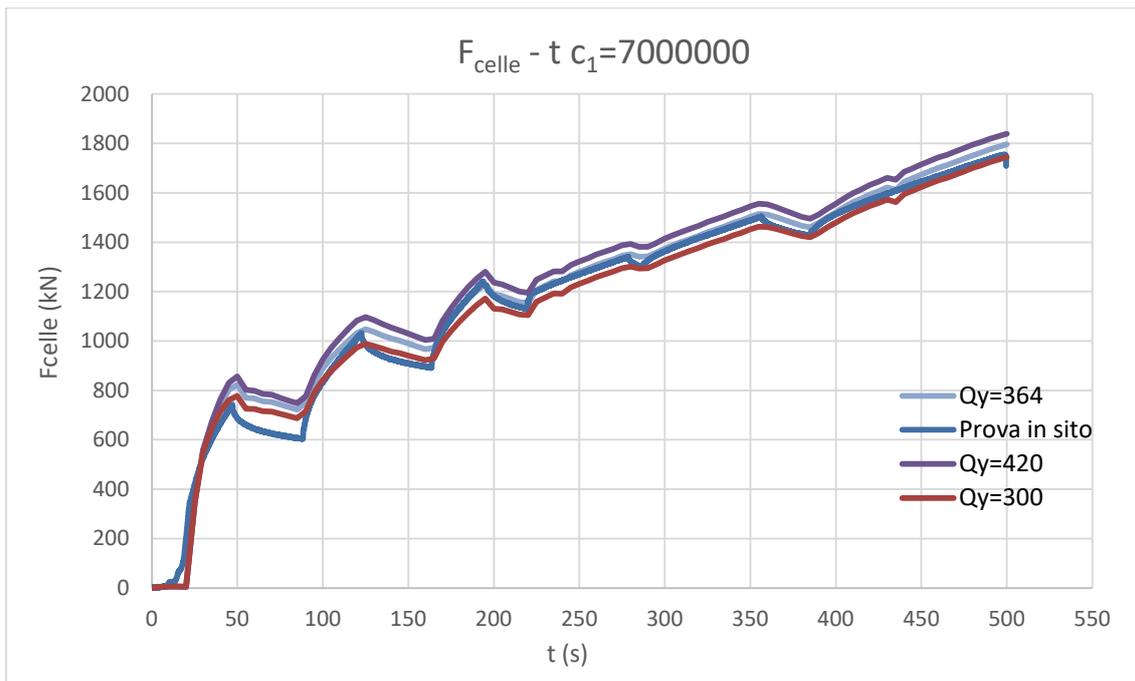


Figura 6.42 $F_{celle} - t c_1=7000000$

Sistema di isolamento	
Analisi parametrica C1	
$V_{Prova\ 4}$ (mm/s)	0,176
$C_{1,7}$ (kN*s/m)	9800000
$F_{1,dashpot}$ (kN)	1724,8
K (kN/m)	19577753

Tabella 6.20 Valori del dashpot $c_{1,7}$

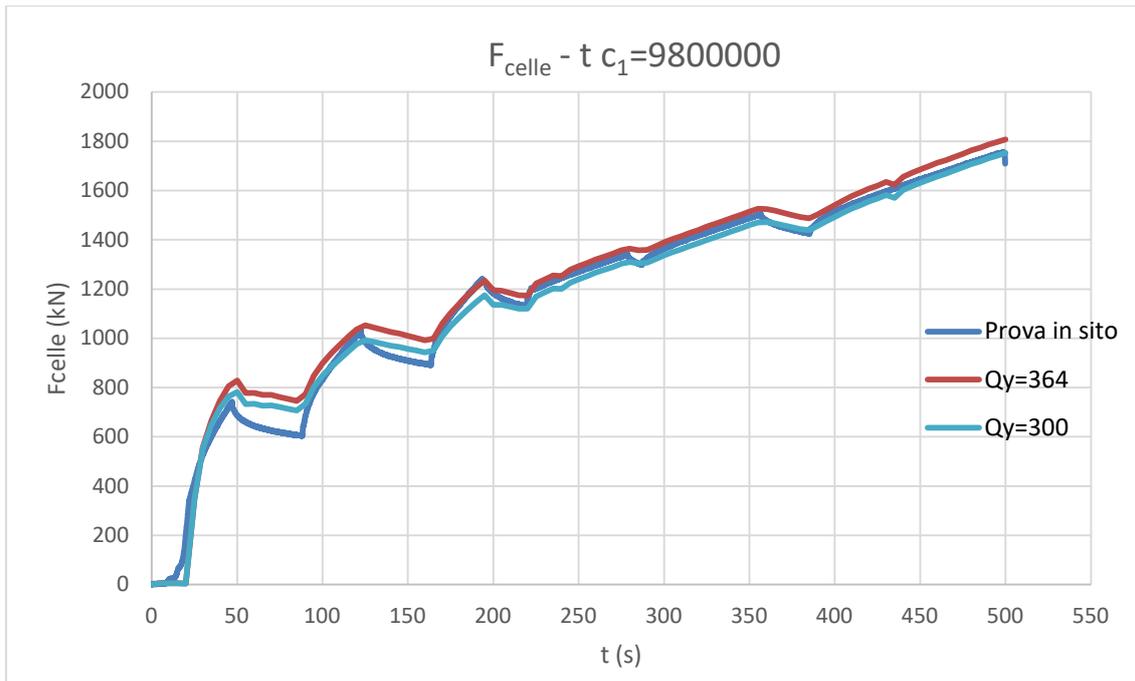


Figura 6.43 $F_{celle} - t c_1=9800000$

Sistema di isolamento	
Analisi parametrica C1	
$v_{Prova\ 4}$ (mm/s)	0,176
$c_{1,8}$ (kN*s/m)	14000000
$F_{1,dashpot}$ (kN)	2464,0
K (kN/m)	27968218

Tabella 6.21 Valori del dashpot $c_{1,8}$

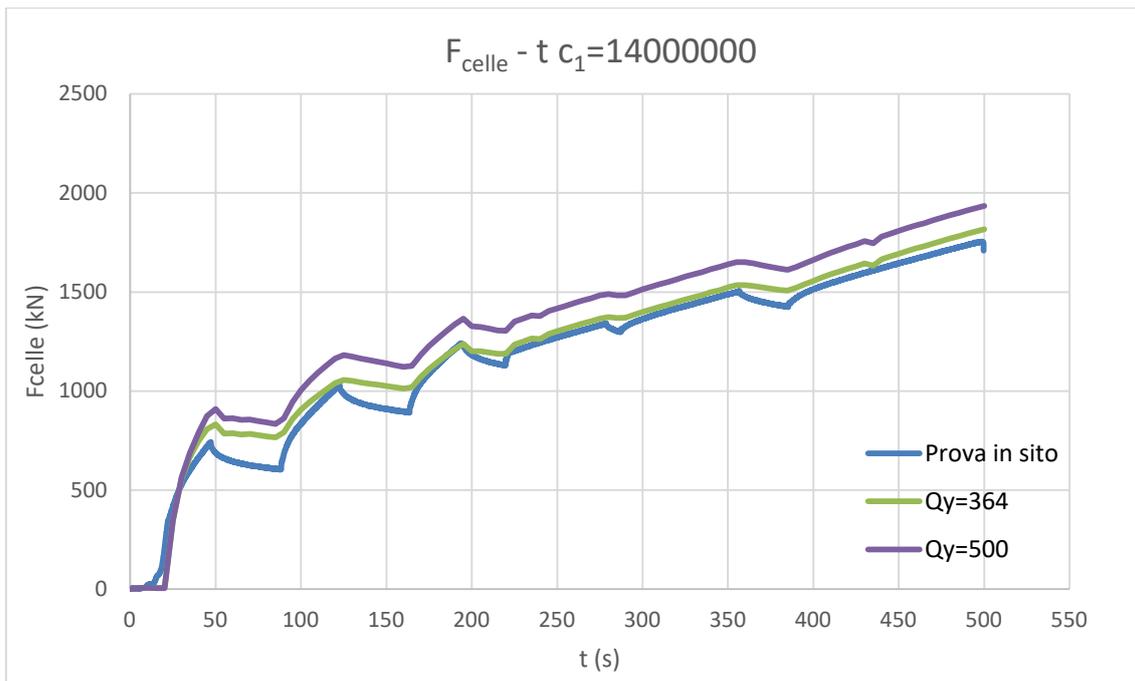


Figura 6.43 $F_{\text{celle}} - t$ $c_1=14000000$

Sono state individuate due possibili combinazioni tra i due coefficienti che descrivevano più fedelmente possibile il comportamento del sistema di isolamento (Fig. 6.44). È opportuno sottolineare che anche con un approccio iterativo è impossibile avere lo stesso comportamento in sito, poiché ciò che entra in gioco nel rilassamento delle forze durante la fase di carico è la viscosità delle slitte, fattore trascurato in queste analisi.

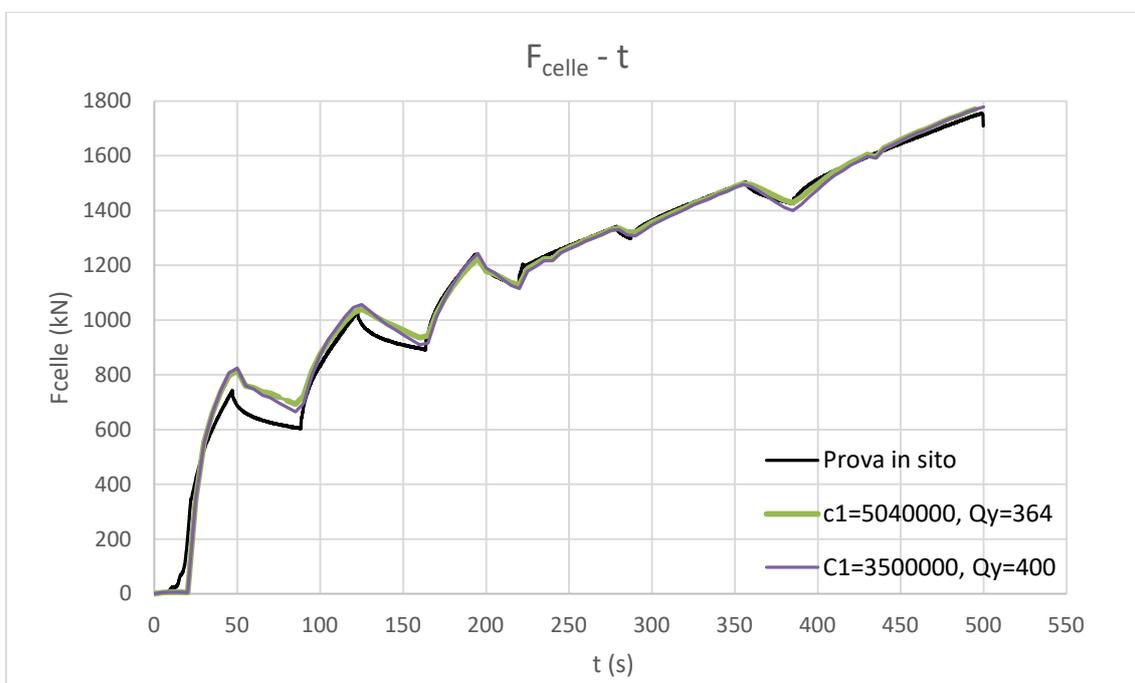


Figura 6.44 Combinazioni di valori presa come riferimento

Passando all'analisi a controllo di forza per la Prova dinamica 4, inizialmente sono state effettuate delle analisi con le coppie di valori precedentemente ritenute più consone, ma

si è osservato un comportamento differente tra le analisi a controllo di spostamento e a controllo di forza a causa dei problemi connessi al programma utilizzato. Infatti se osserviamo il grafico $U_x - t$ per la coppia dei valori $c_1=5040000 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$, $Q_y=364 \text{ kN}$ (Fig. 6.45) notiamo come il modello, oltre a non avere lo stesso spostamento massimo, anche se questa differenza è bassa se si considera lo spostamento totale, non ha la stessa pendenza/andamento dei risultati in sito. Per questo a partire dal valore precedentemente utilizzato, sono stati “provati”, tenendo fissa la forza di snervamento, coefficienti viscosi aventi 1/2 ordini di grandezza maggiori (Fig. 6.46). Nella Fig. 6.46 sono riportati in didascalia i coefficienti viscosi relativi al singolo isolatore.

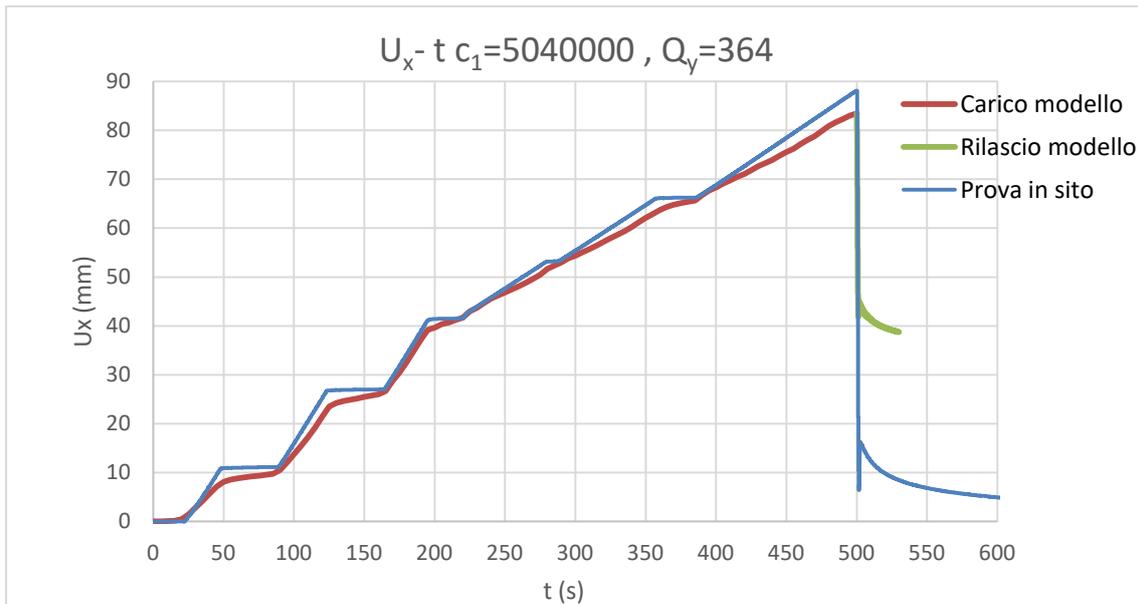


Figura 6.45 Prova dinamica 4 confronto tra modello e sito

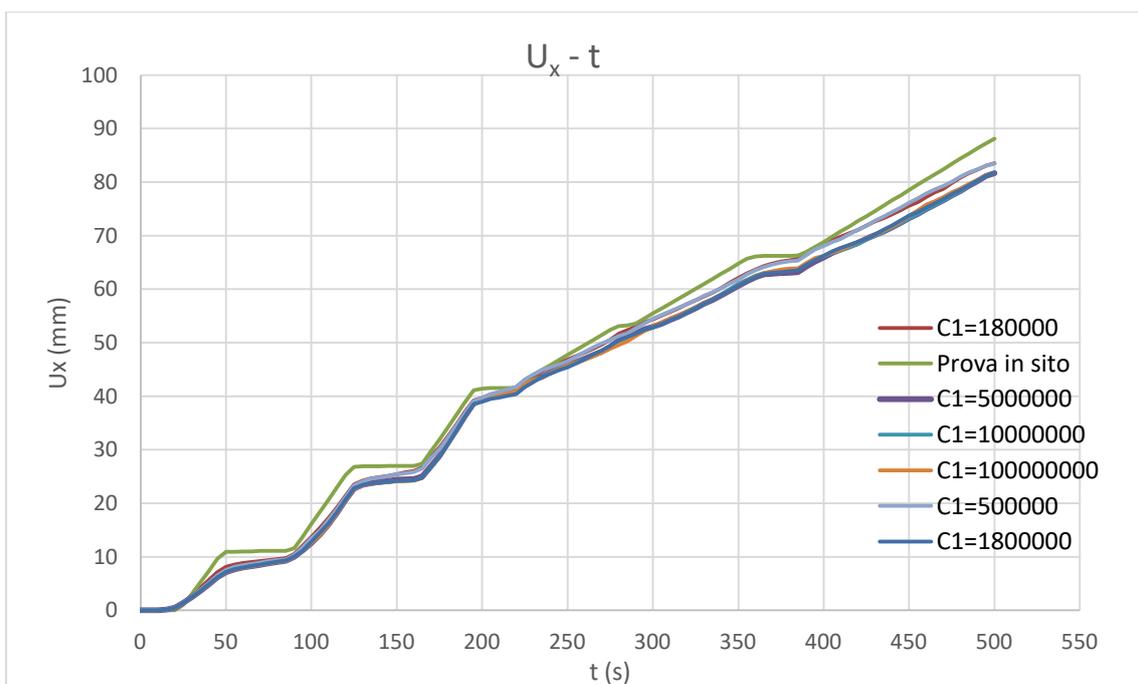


Figura 6.46 Ramo di carico Prova dinamica 4 al variare della c_1

Si osserva in Fig. 6.46 che aumentando di un solo ordine di grandezza il valore di c_1 , rispetto a quello utilizzato per il grafico Fig. 6.45, il comportamento del modello rimane invariato e ciò rappresenta un limite.

Comunque nella Fig. 6.45 si vede come il modello non riesca a far avvenire il rilascio, anche dopo l'aggiunta di un'altra componente viscosa. Anche in questo caso le cause sono le stesse espresse nel paragrafo 6.1.6 e possono essere viste, in parte, nell'andamento delle forze dei vari link durante la fase del rilascio (Fig. 6.47). Aumentando a dismisura c_1 , non ho un miglioramento del modello.

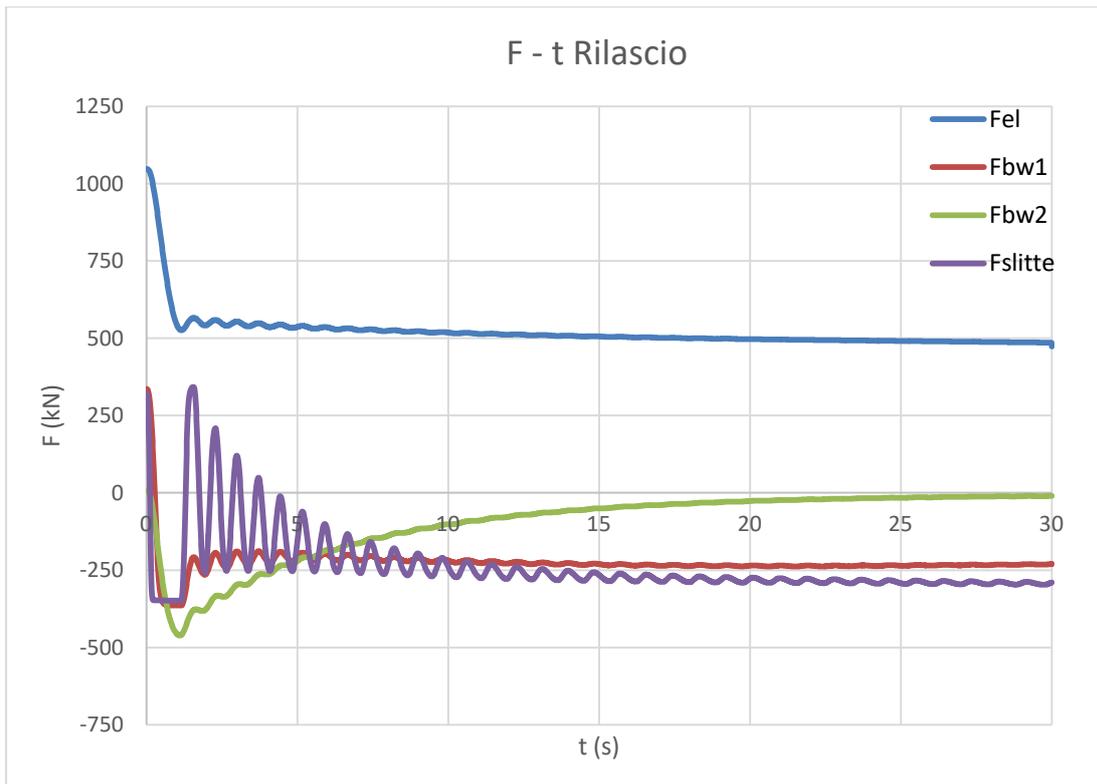


Figura 6.47 Andamento delle forze dei vari link durante la fase di rilascio, modello con c_1 e c_2

Passando alla Prova dinamica 5, si riportano i risultati ottenuti utilizzando la coppia di parametri $c_1=5040000$ kN*s/m e $Q_y=364$ kN.

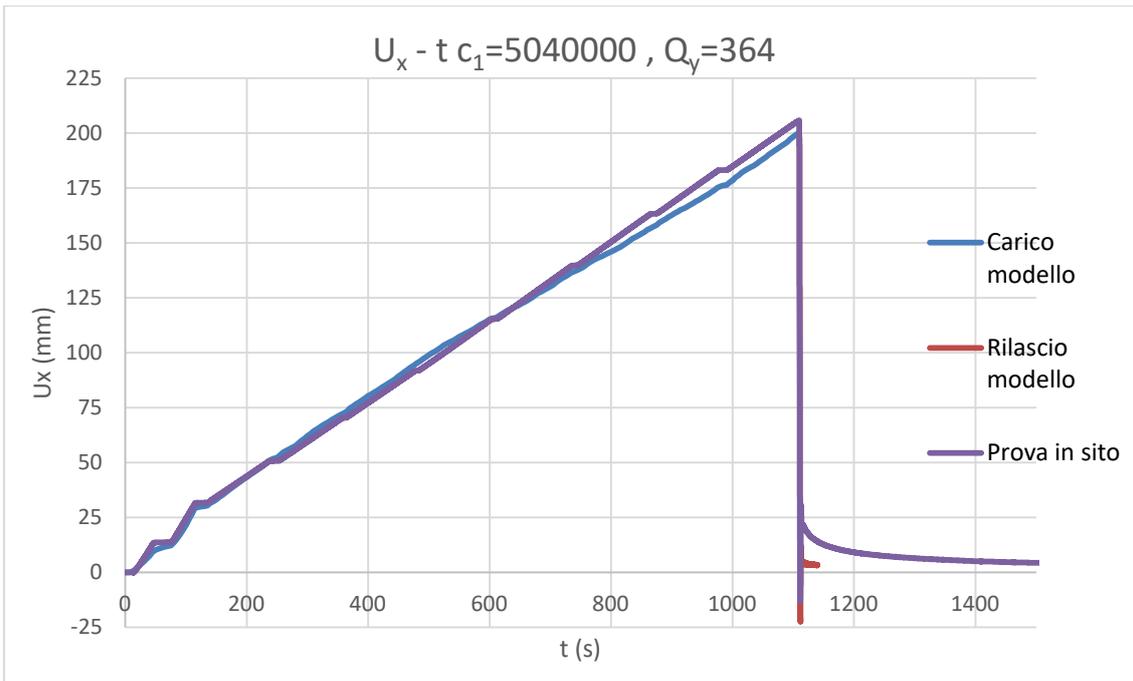


Figura 6.48 Confronto $U_x - t$ modello e sito

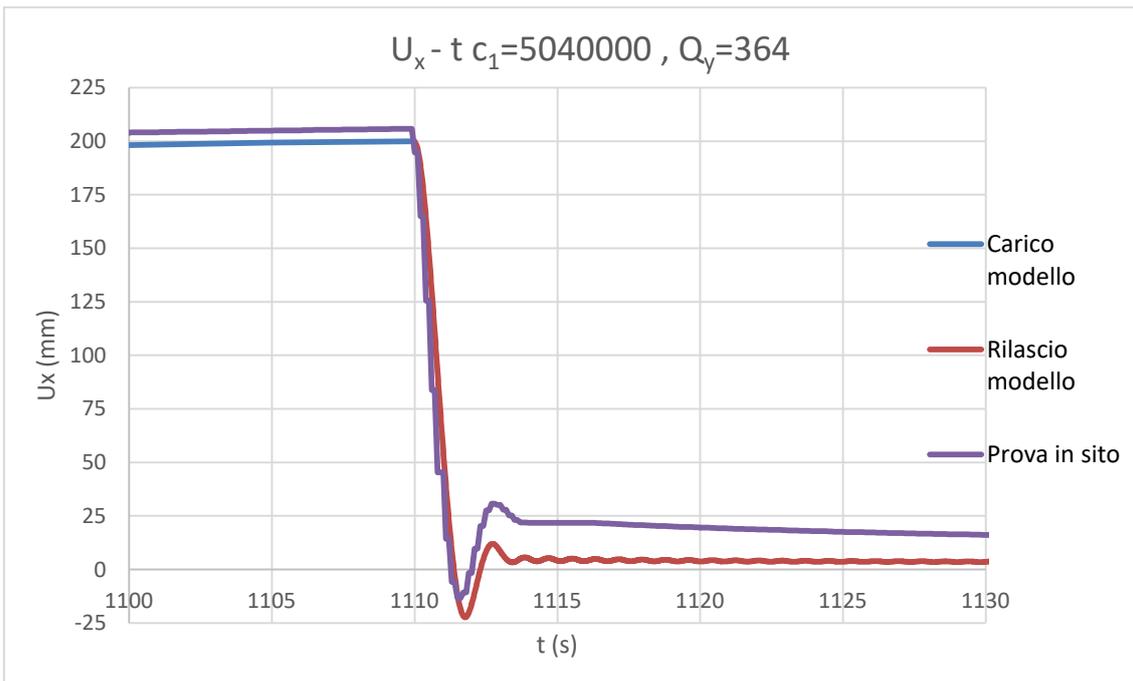


Figura 6.49 Confronto rilascio modello e sito

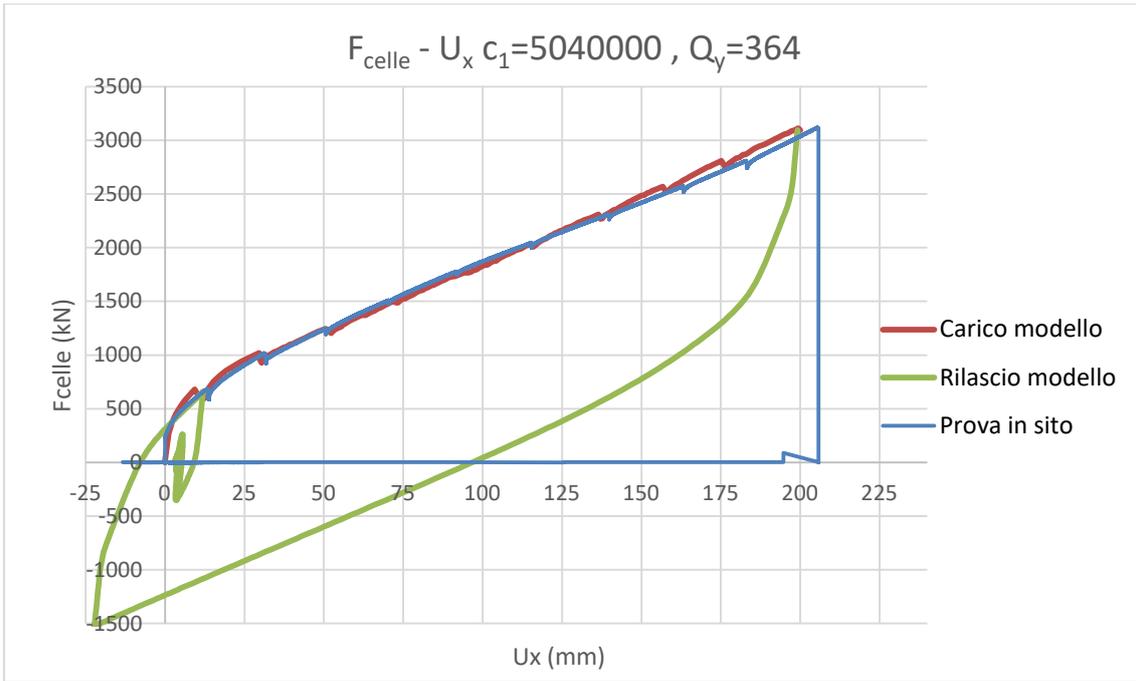


Figura 6.50 Confronto Fiso – U_x modello e sito

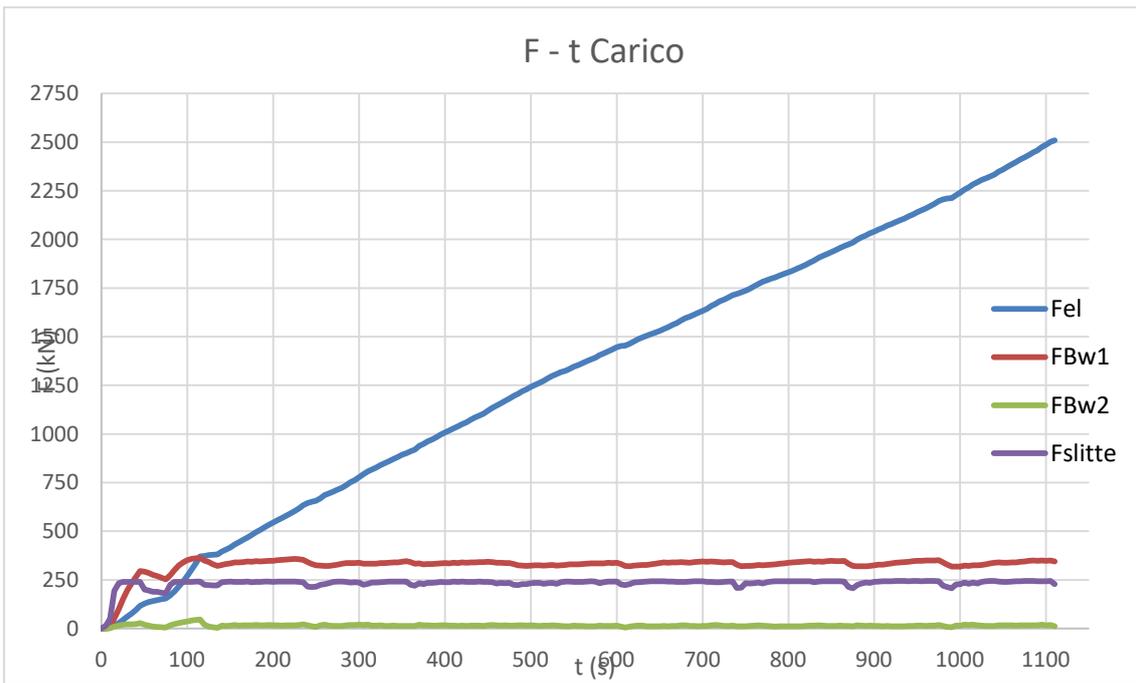


Figura 6.51 Andamento dei vari link durante la fasi di carico

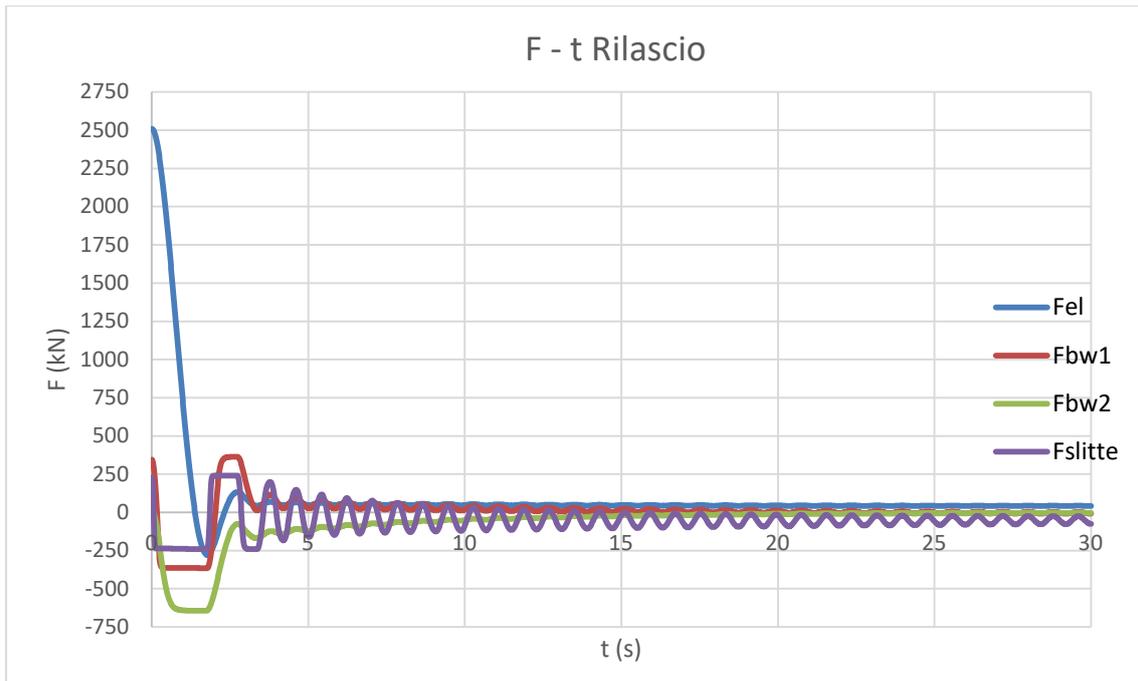


Figura 6.52 Andamento dei vari link durante la fase di rilascio

Si nota dalla Fig. 6.49 che vi è un miglioramento in fase di rilascio della struttura rispetto al modello precedente privo di C_1 . Se si aumenta la forza di snervamento Q_y del BW1, tenendo fisso il coefficiente viscoso, vi è un ulteriore miglioramento in fase di rilascio (Fig. 5.53) perché il modello risulta più rigido. Questo provoca però un minor spostamento massimo in fase di carico.

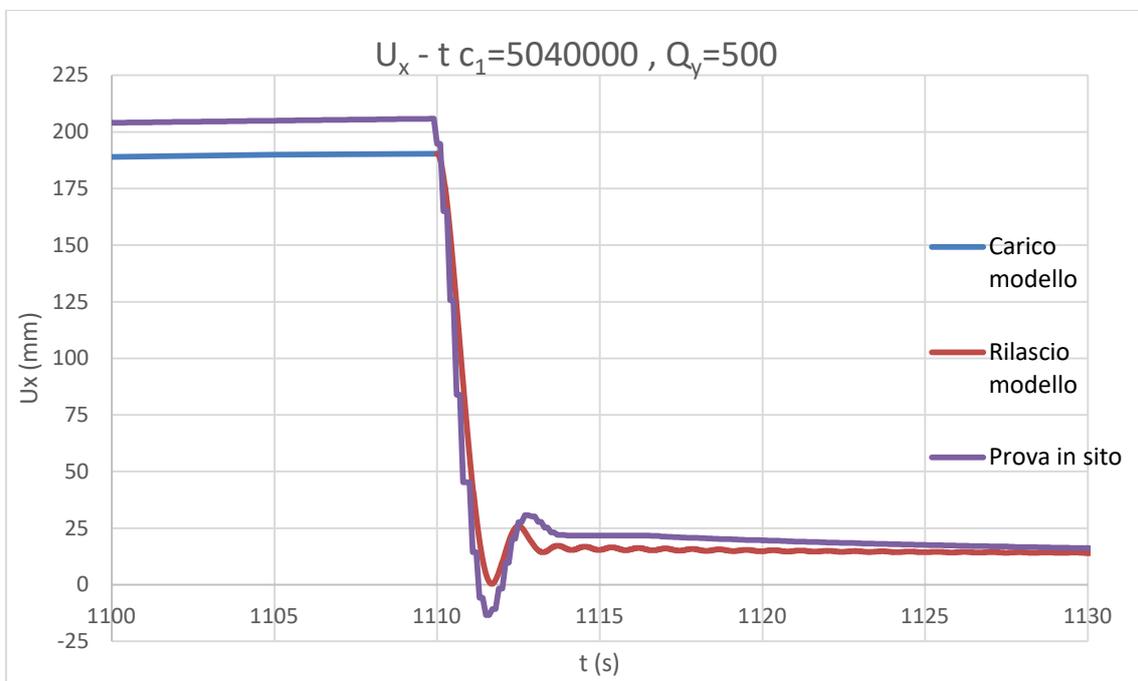


Figura 6.53 Variazione del rilascio del modello in base al valore della forza di snervamento Q_y

Tutto ciò rappresenta il massimo comportamento che è possibile esprimere con tale modello.

6.1.8 Limiti del modello

Il modello elastoplastico, così concepito, non riesce a cogliere la totalità del comportamento della struttura nelle diverse prove dinamiche svolte in sito. Infatti, il modello riesce a cogliere:

- il comportamento della struttura nella fase di carico sia come spostamento assoluto che come rilassamento delle forze quando il dispositivo di spinta viene fermato;
- le differenti velocità di prova;
- il rilascio della struttura nella Prova dinamica 5.

I limiti osservati fin'ora sono dovuti alla:

- Semplificazione fatta sul comportamento degli isolatori elastomerici, che è stato inteso come legame elastoplastico e non come viscoplastico. Infatti, l'influenza della velocità è stata introdotta aggiungendo, in maniera semplificata, un dashpot in serie con la parte dipendente dal tempo;
- Viscosità degli isolatori che è stata assunta lineare;
- Semplificazione assunta per le slitte. Infatti, non è stato differenziato il contributo fornito dall'attrito dinamico e dall'attrito statico e non si tiene conto del loro comportamento viscoso;
- Limitazioni dovute al software di calcolo utilizzato;
- Numero di prove utilizzato per tarare il modello, che risulta basso per descrivere un problema così complicato.

Il passo successivo sarebbe quello di approfondire lo studio delle slitte, utilizzare un legame viscoelastico e passare ad un software più completo.

6.2 Modello viscoelastico

Uno dei modi per descrivere il comportamento di un isolatore è l'utilizzo dei parametri equivalenti che permettono di descrivere i dispositivi attraverso un comportamento elastico equivalente.

Il modello in questione, avente come base tale ipotesi, nasce dall'idea di voler creare un modello diretto ad 1 – SDOF capace di descrivere il comportamento del sistema di isolamento durante l'esecuzione delle varie prove dinamiche. La taratura del modello è effettuata solo esclusivamente dalle elaborazioni dei dati provenienti dalle diverse Prove dinamiche effettuate.

L'unica prova che non è stata modellata è la Prova dinamica 6 perché non si hanno dati in fase di rilascio.

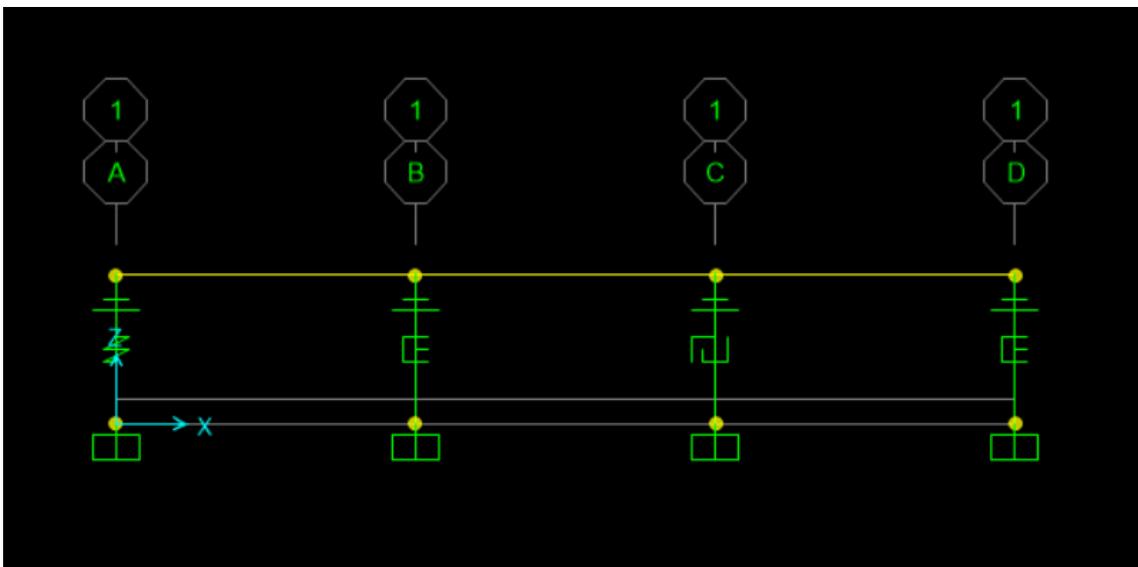


Figura 6.54 Modello visco-elastico

È formato (Fig. 6.54) dalla messa in parallelo di: un Kelvin (link A molla elastica e link B stantuffo), un Maxwell (link D) e un BoucWen (link C).

Il Kelvin (Fig. 5.10) simula le caratteristiche del sistema di isolamento in termini di rigidità effettiva e coefficiente di smorzamento effettivo. La prima è stata assunta pari alla rigidità equivalente del ramo di carico ricavato da ogni singola prova, mentre la seconda è stata adottata pari allo smorzamento equivalente dei dispositivi $\xi=15\%$. A partire da questi valori sono stati imposti, per ogni prova dinamica, i parametri da inserire all'interno del programma:

- $K_0=K_{d,eq}$ del ramo di carico della prova;
- $C_0= \frac{2 \cdot K_0}{\xi_{d,eq} \omega}$ coefficiente viscoso dello stantuffo che costituisce il Kelvin.

Dove:

- $\xi_{d,eq}$, è il coefficiente di smorzamento di progetto equivalente degli isolatori posto pari al 15%;
- ω , pulsazione del sistema in fase di rilascio, calcolato tra lo spostamento massimo A della prova e il primo picco dell'oscillazione A_{fine} ;

Il Maxwell è elemento che serve a simulare il comportamento dei dispositivi elastomerici in fase di rilascio. Infatti, essendo questo link un elemento dipendente dalla velocità ed essendo tarato per la fase di rilascio della struttura, non si attiva nella fase di carico, cioè il suo contributo in termini di forza è trascurabile. Da solo il Kelvin non riuscirebbe a far tornare “indietro” la struttura perché simula esclusivamente le caratteristiche degli isolatori in fase di carico.

Poiché il suo contributo non è osservabile direttamente durante la prova, una stima della sua rigidezza equivalente durante la fase di rilascio può essere effettuata svolgendo un equilibrio delle forze dei vari contributi che ci sono durante la seconda parte della prova:

$$F_0 + F_1 + F_{slitte} = 0$$

Dove:

- $F_0 = K_0 * A_{fine}$, contributo offerto dal Kelvin;
- $F_1 = K_{d,eq,Maxwell} * (A - A_{fine})$, contributo del Maxwell è calcolato tra i due spostamenti perché durante la fase di carico non si attiva;
- F_{slitte} , forza delle slitte.

Ricavando dalla precedente equazione $K_{ed,Maxwell}$ otteniamo:

$$K_{ed,Maxwell} = \frac{K_0 u_x + F_{slitte}}{A - A_{fine}}$$

Il valore che ricaviamo è comunque una stima, cioè un ordine di grandezza e un valore di riferimento. I contributi, che devono essere inseriti come input nel programma, sono K_1 e c_1 e vengono calcolati (seguendo le formule presenti nel paragrafo 5.2.2) in via iterativa al fine di avere la rigidezza precedentemente calcolata.

I parametri equivalenti del sistema Kelvin più Maxwell sono ricavati in questo modo:

- $K_{d,eq,totale} = K_{d,eq,Kelvin} + K_{d,eq,Maxwell}$;
- $W_{d,eq,totale} = W_{d,eq,Kelvin} + W_{d,eq,Maxwell}$;
- $\xi_{d,eq,totale} = \frac{1}{2\pi} * \frac{W_{d,eq,totale}}{K_{d,eq} * A^2}$.

Il BoucWen è stato tarato a partire della forza di attrito delle slitte che si è osservata per ogni singola prova. La rigidezza iniziale del link è stata calcolata dividendo la forza di attrito per uno spostamento di 1 mm, allo scopo di farlo attivare per spostamenti bassi e

di avere un comportamento rigido. La rigidezza post elastica invece è stata posta pari a 0 così da avere un comportamento perfettamente plastico.

6.2.1 Prova dinamica 5

La prova è stata simulata in controllo di forza andando ad inserire nella time-history la funzione reale della fase di carico.

I parametri del modello sono presenti in Tab.6.22

A (m)	0,205
A _{fine} (m)	0,025
Kelvin	
K ₀ (kN/m)	13995,2
c (kNs/m)	1804,20
ω	2,327
$\xi_{d,eq}$ Kelvin (%)	0,15
Maxwell	
K _{d,eq} (kN/m)	3277,112
K ₁ (kN/m)	10000
c ₁ (kN*s/m)	10000
$\xi_{d,eq}$ Maxwell (%)	0,214859
a	0,155874
b	0,362736
W _d	478,9041
Tot	
W _{d,eq}	1033,221
k _{d,eq}	22436,46
$\xi_{d,eq}$	0,174402
F _{slitte} (kN)	240

Tabella 6.22 Parametri di progetto del modello per Prova dinamica 5

Sono riportati i grafici u_x-t (Fig. 6.45), $F_{celle}-u_x$ (Fig. 6.46), $F_{iso}-u_x$ (Fig. 6.47) che confrontano i risultati ottenuti dall'analisi effettuata con il software e il vero comportamento della struttura in sito.

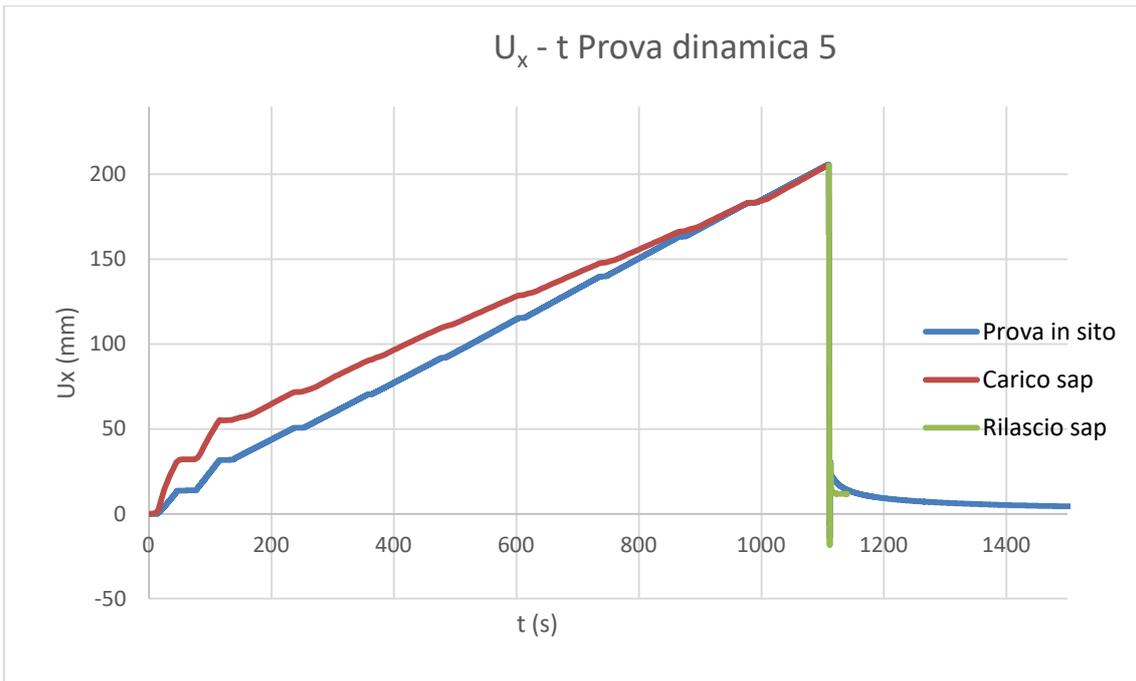


Figura 6.45 Confronto U_x -t tra sap e prova in sito

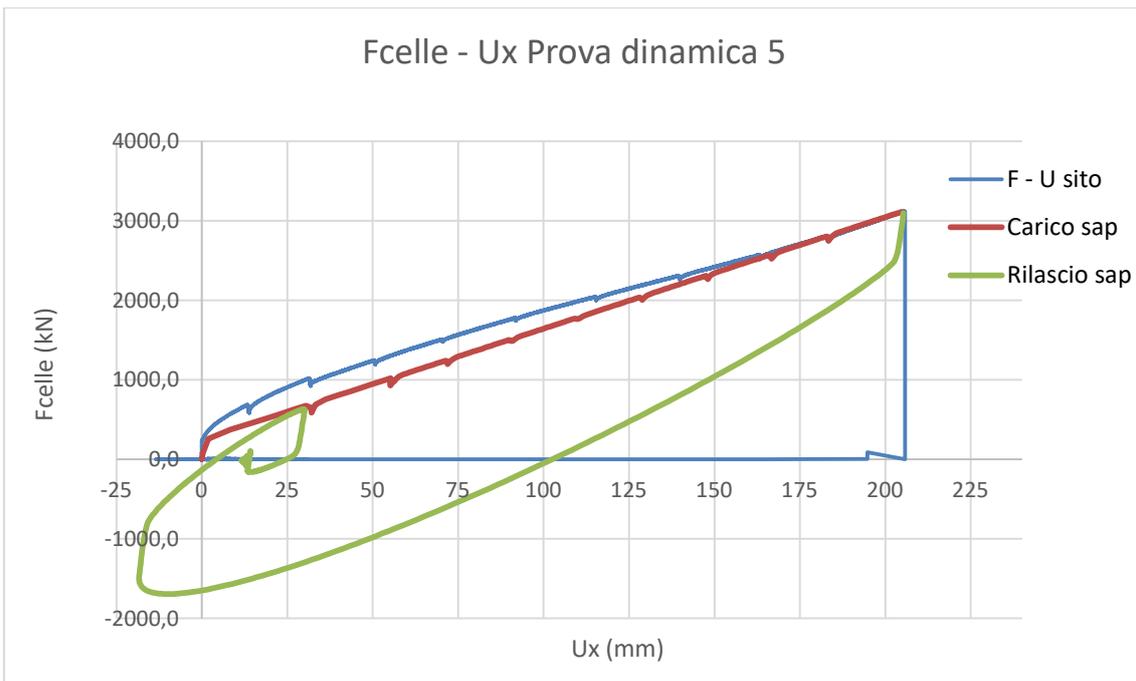


Figura 6.46 Confronto F_{celle} - U_x tra sap e prova in sito

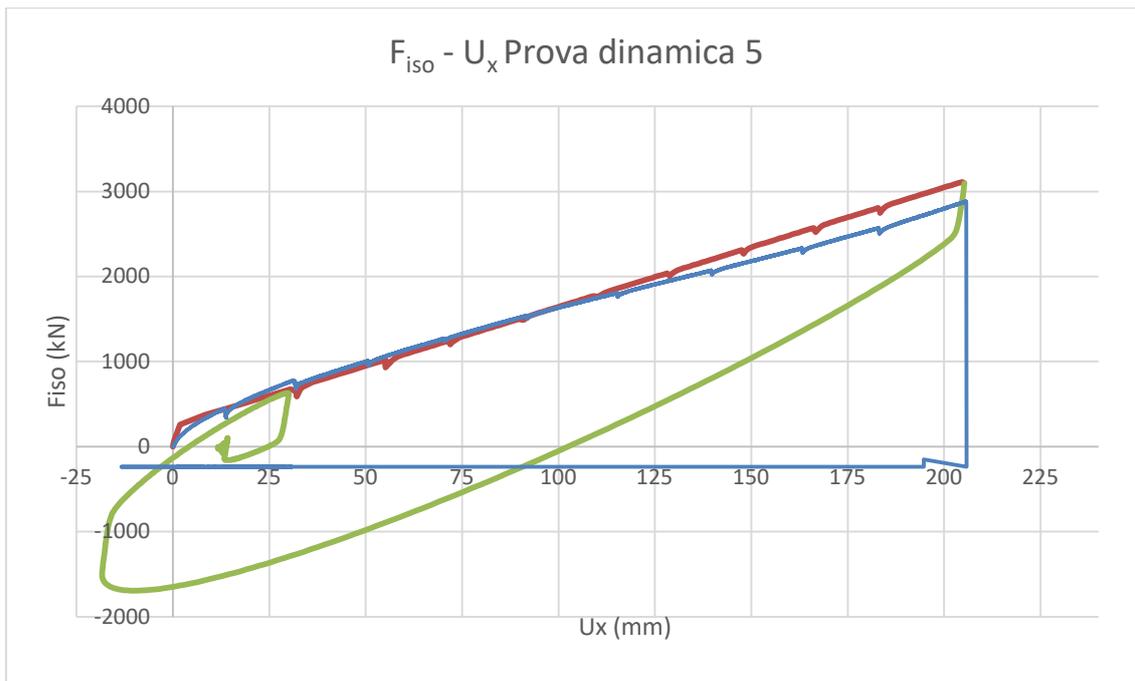


Figura 6.47 Confronto Fiso-Ux tra sap e prova in sito

Dal grafico sovrastante si nota come il ramo di carico ottenuto dal Sap sia lineare, questo perché l'unico link che dà un contributo in termini di rigidità agli isolatori durante questa fase è la molla del Kelvin (Fig. 6.47). Infatti, il link che simula la c del Kelvin deve dare un contributo solo in termini di smorzamento, mentre il Maxwell è stato tarato in maniera tale da non attivarsi in fase di carico.

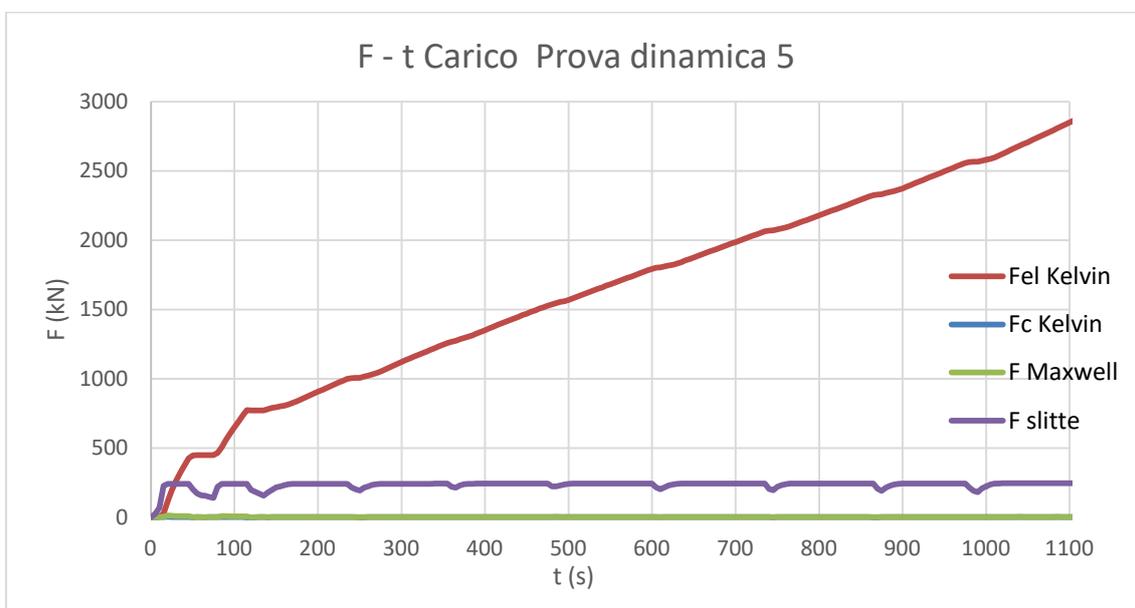


Figura 6.48 Andamento delle forze dei vari link durante la fase di carico in funzione del tempo

Si può osservare che, utilizzando come rigidità del Kelvin quella equivalente del ramo di carico, lo spostamento massimo che si ottiene dall'analisi coincide con quello osservato in sito. La differenza nel ramo di carico rispetto alla prova in sito è visibile in

maniera più marcata nella parte iniziale, questo perché il sistema ha una rigidezza ,durante le fasi iniziali e durante la prova, maggiore rispetto alla rigidezza equivalente

Se ci focalizziamo nel rilascio (Fig. 6.49) si può vedere come, per questa prova, la concezione del modello e la modalità di taratura riportano risultati accettabili. Coincidono in fatti sia il valore dei picchi che la loro posizione, cioè il periodo di oscillazione.

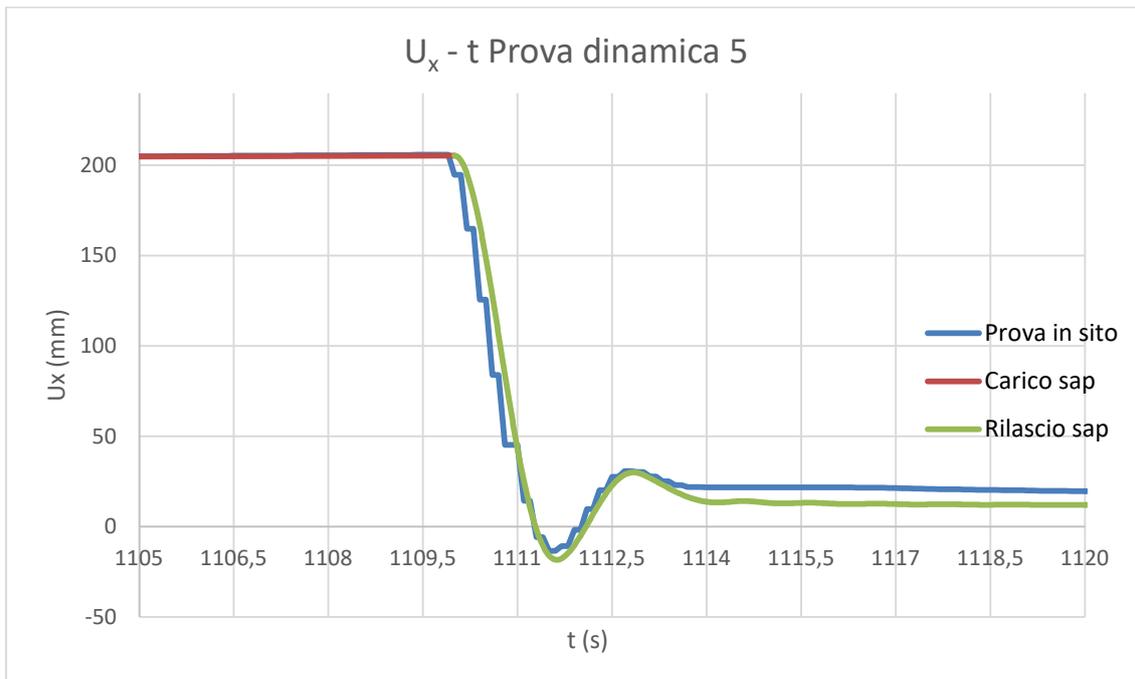


Figura 6.49 Confronto rilascio tra analisi sap e risultati in sito

Vengono riportati gli andamenti delle forze in funzione del tempo dei singoli link sia nella fase di rilascio (Fig. 6.50).

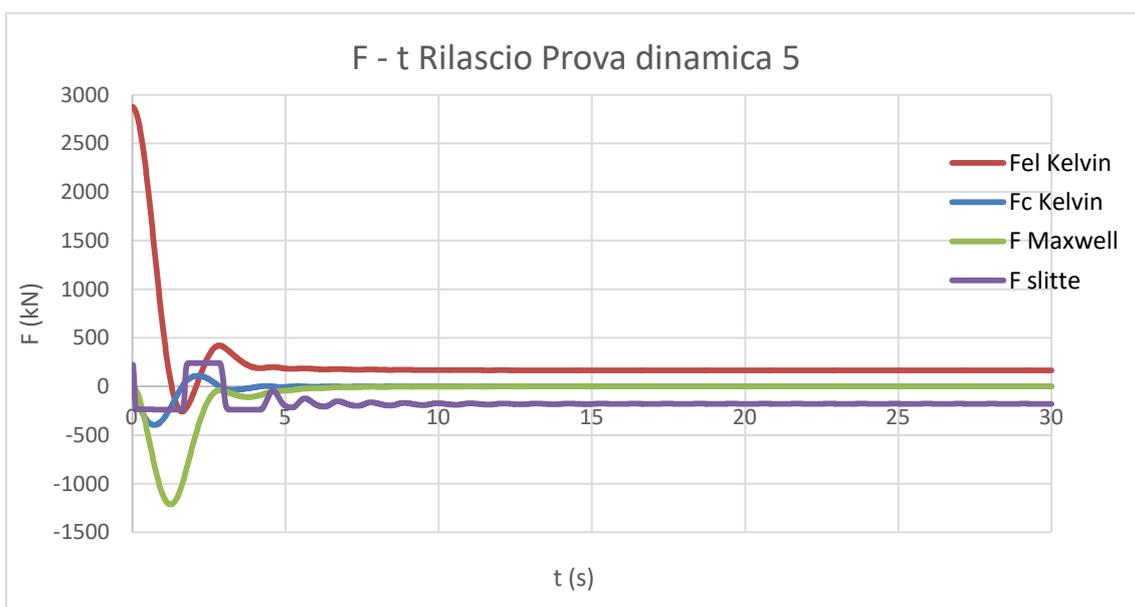


Figura 6.50 Andamento delle forze durante il rilascio dei vari link del modello in funzione del tempo

Al variare di K_1 e C_1 il comportamento della struttura in rilascio varia, per esempio andando ad aumentare la rigidità ($K_1=13000$ kN/m) (Fig. 6.51) il sistema di isolamento risulterà più rigido in fase di rilascio e quindi avrà una diminuzione del periodo di oscillazione. Questo porta ad avere una diminuzione dell'entità degli spostamenti dei picchi e una traslazione verso sinistra della loro posizione.

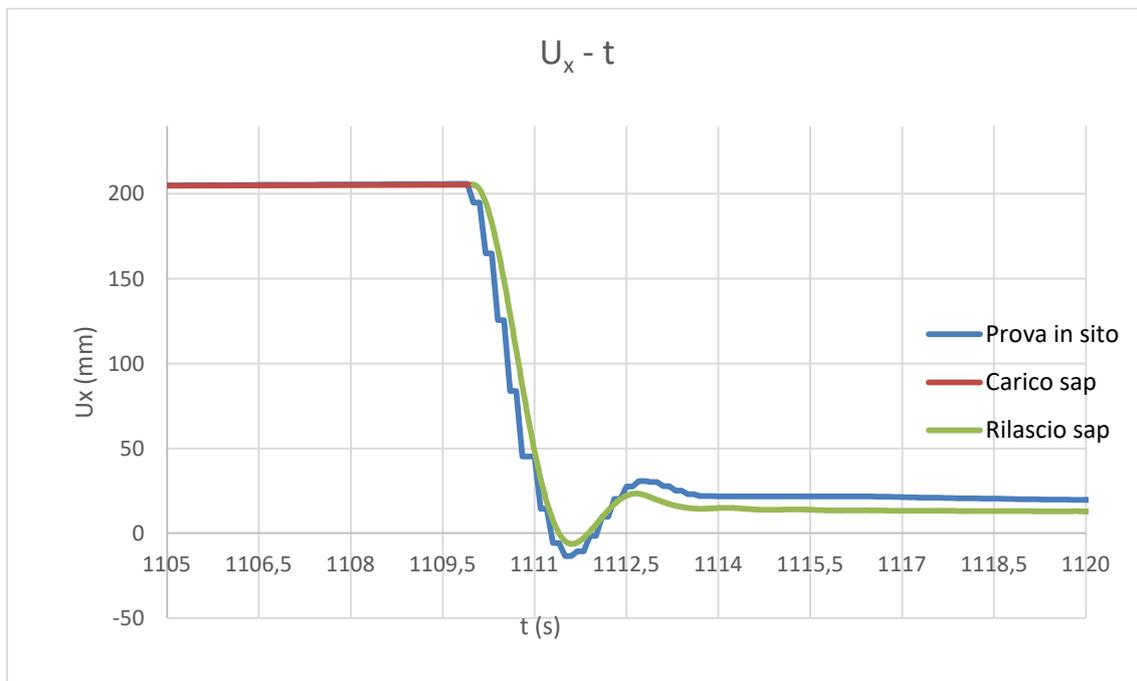


Figura 6.51 Come cambia il comportamento al variare dei parametri del Maxwell

Se con gli stessi parametri adottati simuliamo un'altra prova dinamica per esempio la 4 (Fig. 6.52 e Fig. 6.53) osserviamo che il comportamento è differente rispetto a quello in sito sia in fase di carico che in quella di scarico. Questo perché ogni volta che si simula una differente prova dinamica è opportuno ricalibrare questo modello in termini di rigidità del ramo di carico, di comportamento nel rilascio e di attrito.

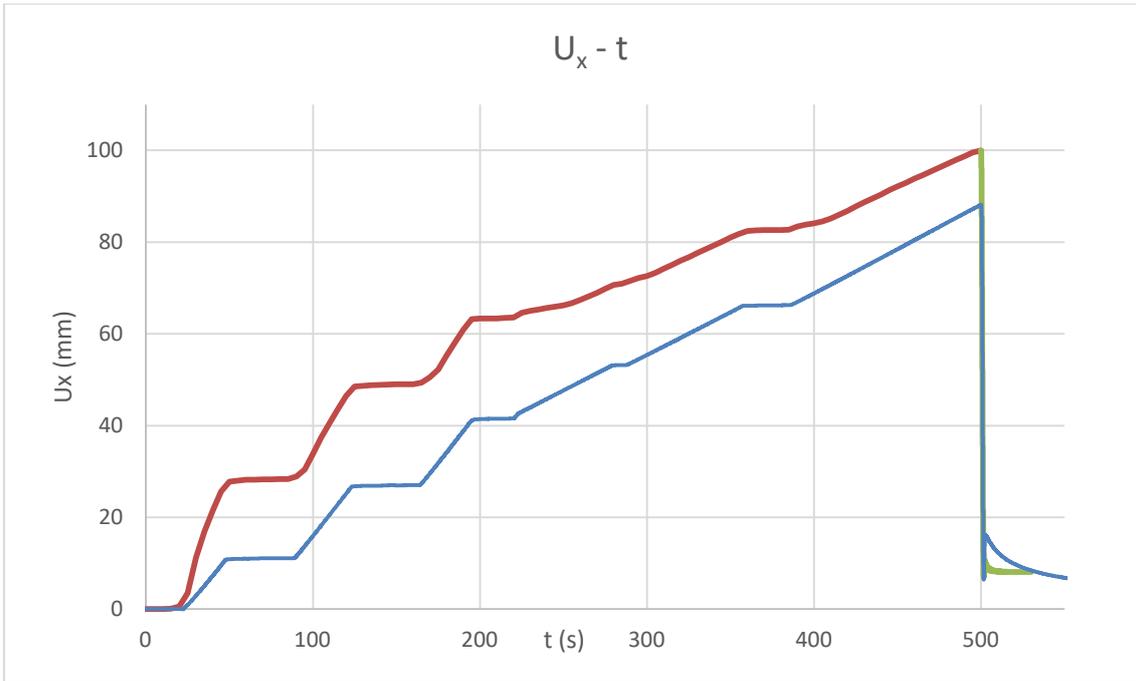


Figura 6.52 Prova dinamica 4 confronto tra sap e sito con gli stessi parametri della Prova dinamica 5

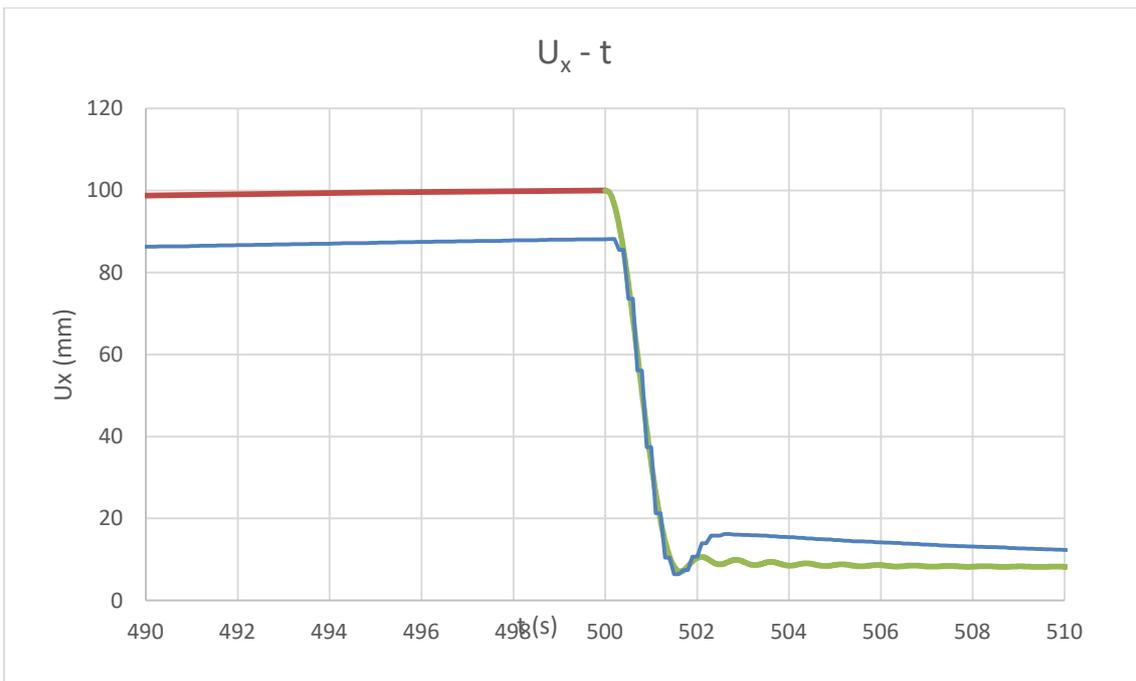


Figura 6.53 Rilascio Prova 4 confronto tra sap e sito con gli stessi parametri della Prova 5

6.2.2 Prova Dinamica 4

Allo stesso modo della precedente prova, sono stati tarati i parametri del modello (Tab. 6.23):

A (m)	0,088
A _{fine} (m)	0,016
Kelvin	
Ko (kN/m)	15994,246
c (kNs/m)	1832,81
ω	2,618
$\xi_{d,eq}$ Kelvin (%)	0,15
Maxwell	
K _{d,eq} (kN/m)	8400,221
K ₁ (kN/m)	12000
c ₁ (kN*s/m)	10000
$\xi_{d,eq}$ Maxwell (%)	0,229
a	0,174
b	0,379
W _d	110,910
Tot	
W _{d,eq}	227,990
k _{d,eq}	25910,785
$\xi_{d,eq}$	0,180
F _{slitte} (kN)	350

Tabella 6.23 Parametri di progetto del modello per Prova dinamica 4

Sono riportati i grafici u_x-t (Fig. 6.54), $F_{celle}-u_x$ (Fig. 6.55), $F_{iso}-u_x$ (Fig. 6.56) che confrontano i risultati ottenuti dall'analisi effettuata con il software e il vero comportamento della struttura in sito.

Come per la prova precedente il modello coincide con la prova in sito solo nello spostamento massimo, la curva rossa, in termini di spostamento, si posiziona al di sopra della curva celeste perché si è adottata la rigidità equivalente.

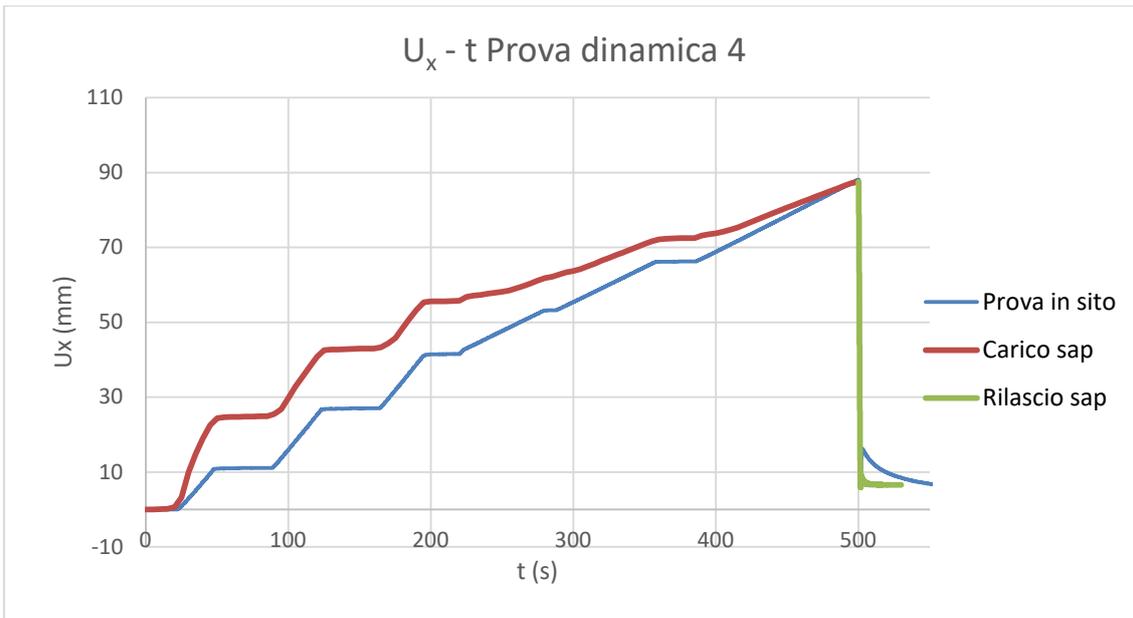


Figura 6.54 Prova dinamica 4 $U_x - t$ confronto tra risultati sap e sito

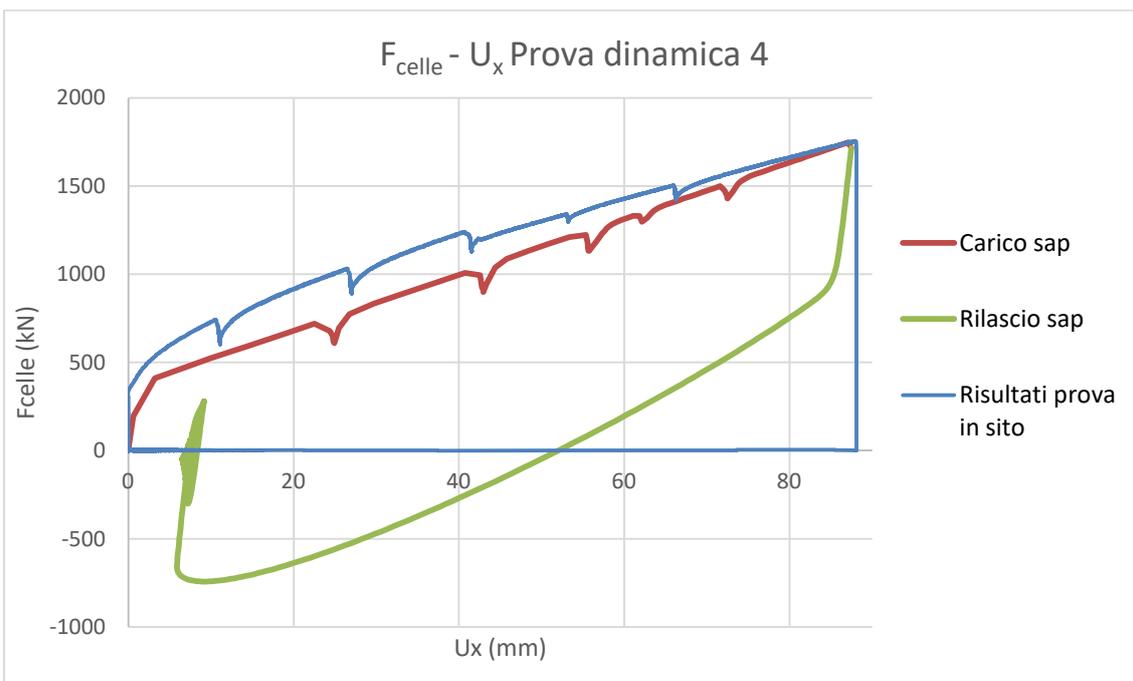


Figura 6.55 Prova dinamica 4 $F_{celle} - U_x$ confronto tra risultati sap e sito

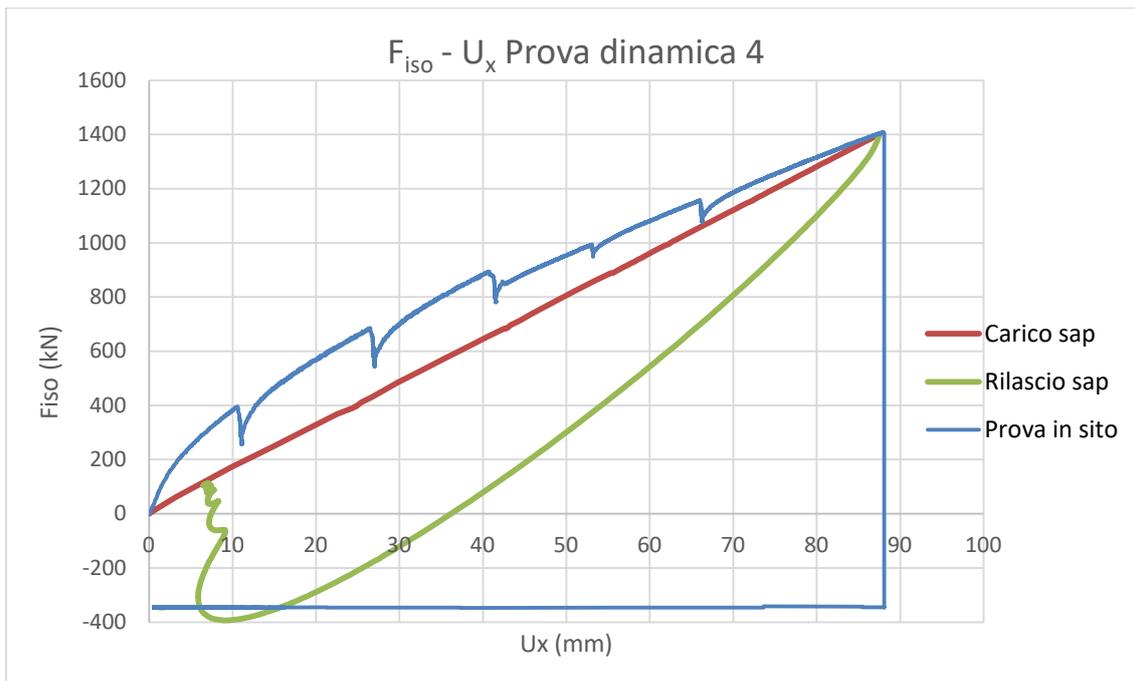


Figura 6.56 Prova dinamica 4 Fiso – U_x confronto tra risultati sap e sito

Sono restituiti gli andamenti delle forze dei link in funzione del tempo del ramo di carico Fig. 6.57.

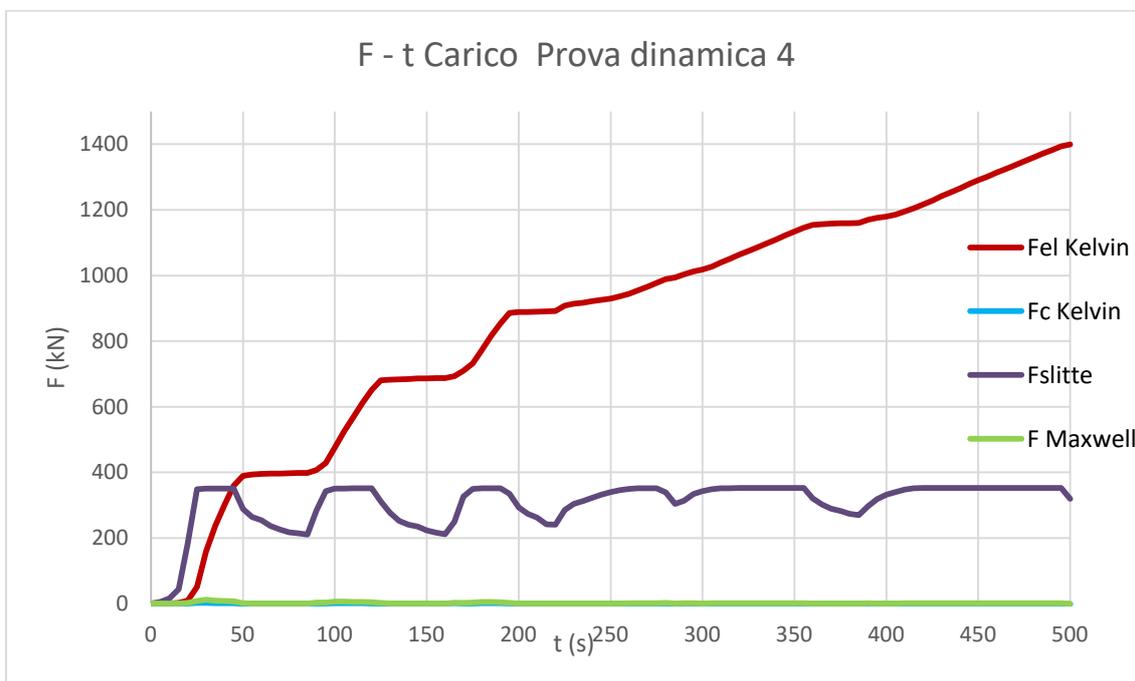


Figura 6.57 Andamento delle forze durante il carico dei vari link in funzione del tempo

Si riporta il grafico u_x - t del ramo di rilascio Fig. 6.58.

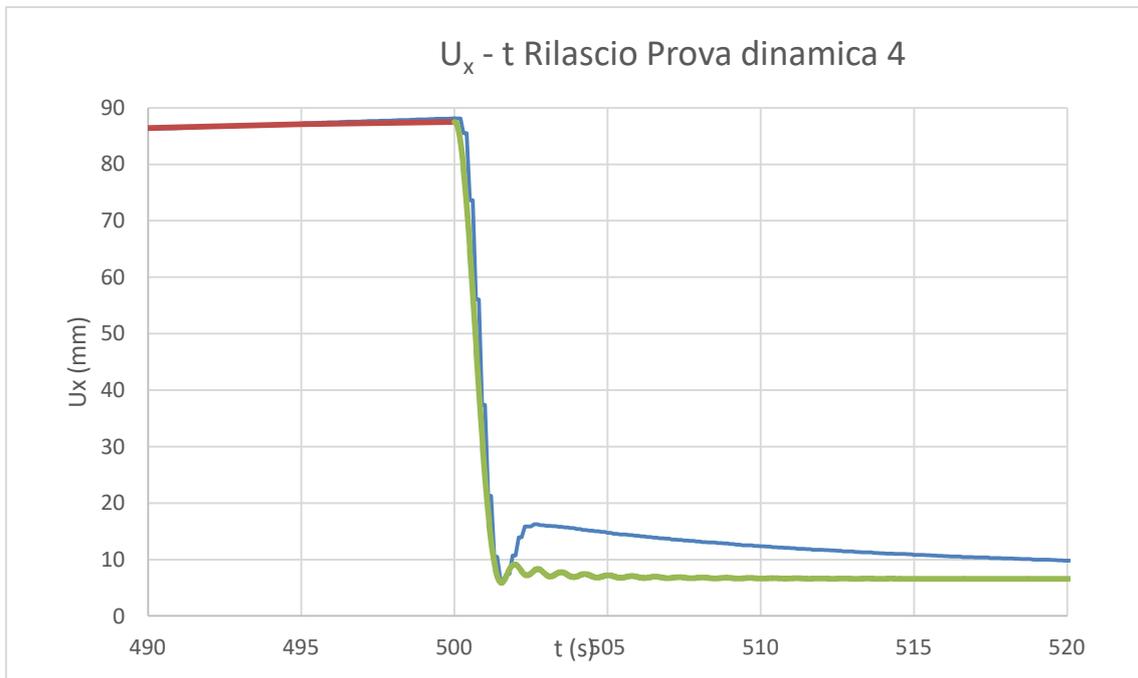


Figura 6.58 Prova dinamica 4 grafico U_x - t Rilascio

Rispetto alla prova precedente il modello non riesce a cogliere a pieno il comportamento della struttura, infatti una volta che è avvenuto il primo picco, il modello non riesce a compiere un'oscillazione, come se il sistema si blocchi immediatamente.

Andando ad osservare l'andamento delle forze dei singoli link in funzione del tempo (Fig.6.59) notiamo che a differenza del grafico in Fig. 6.50 la forza elastica non oscilla, ma dopo il primo picco rimane costante. Ecco perché la struttura durante l'analisi non riesce a raggiungere il secondo picco. Questo comportamento dipende dalla forza di attrito che risulta essere più grande e confrontabile sia con la forza del Maxwell e sia con la forza elastica. Quindi come nel precedente modello abbiamo lo stesso problema, anche se in questo almeno il rilascio avviene.

In questa tesi l'attrito non è elaborato, cioè il suo contributo non cambia al variare della velocità della prova; in realtà ci si aspetta che in fase di rilascio il peso dell'attrito sia inferiore a quello preso in considerazione. Per questo, mentre nella Prova 5 l'attrito risulta essere meno importante rispetto agli altri contributi, e il modello riesce a descrivere il comportamento nella struttura in sito, in questa prova si rileva un fattore non più trascurabile. In questo modo durante la fase di rilascio della Prova 4 il modello non ha abbastanza forza per eseguire un'altra oscillazione e infatti risulta fermarsi dopo il picco inferiore.

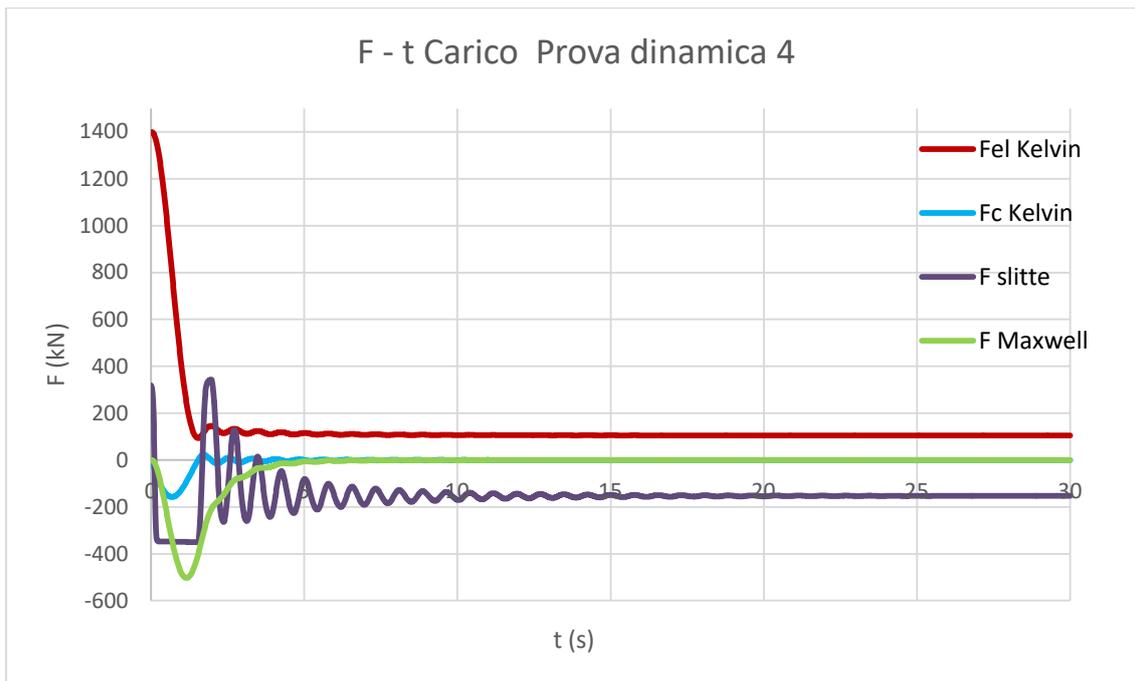


Figura 6.59 Andamento delle forze durante il rilascio dei vari link in funzione del tempo

Il modello perciò, per come concepito, risulta limitato per le prove dinamiche che hanno uno spostamento inferiore della 5.

6.2.3 Prova dinamica 2

Vengono i parametri utilizzati nel modello per simulare la Prova dinamica 2 (Tab. 6.24).

A (m)	0,176
A _{fine} (m)	0,035
Kelvin	
Ko (kN/m)	11573,980
c (kNs/m)	1492,065
ω	2,327
$\xi_{d,eq}$ Kelvin (%)	0,150
Maxwell	
K _{d,eq} (kN/m)	4582,902
K ₁ (kN/m)	4000
c ₁ (kN*s/m)	10000
$\xi_{d,eq}$ Maxwell (%)	0,086
a	0,029
b	0,167
W _d	64,811
Tot	
W _{d,eq}	401,783
kd,eq	15459,190
$\xi_{d,eq}$	0,134
F _{slitte} (kN)	695,1

Tabella 6.24 Parametri di progetto del modello per Prova dinamica 2

Sono riportati i grafici u_x-t (Fig. 6.60), $F_{celle}-u_x$ (Fig. 6.61), $F_{iso}-u_x$ (Fig. 6.62) che confrontano i risultati ottenuti dall'analisi effettuata con il software e il vero comportamento della struttura in sito.

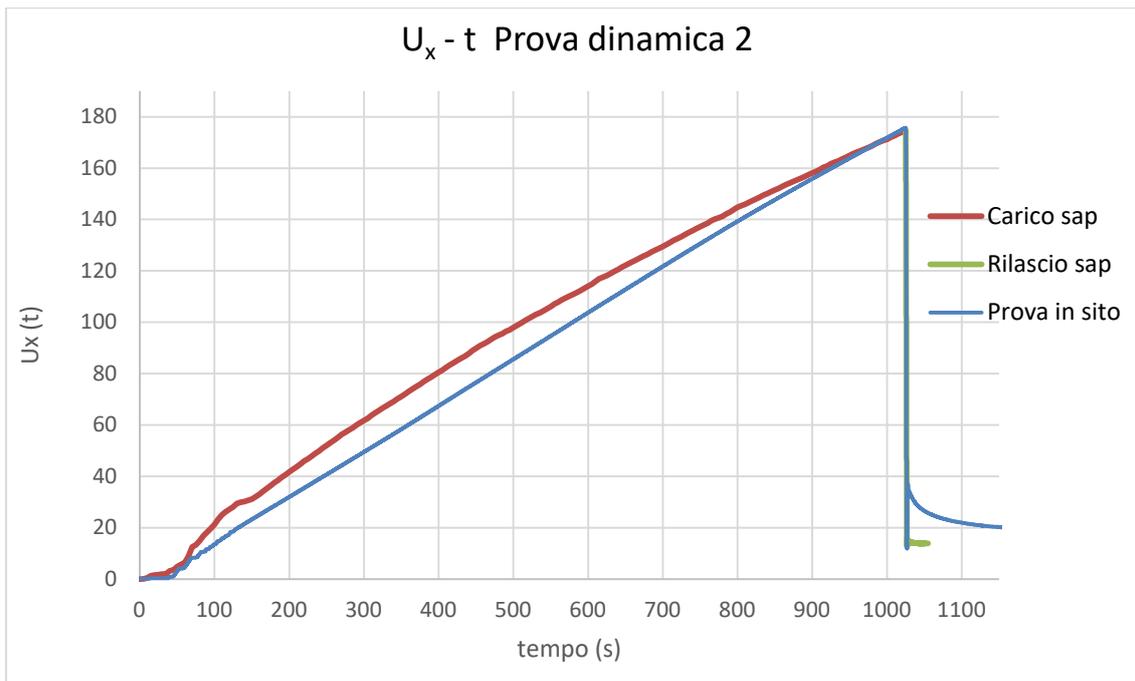


Figura 6.60 Prova dinamica 2 $U_x - t$ confronto risultati tra prova in sito e modello

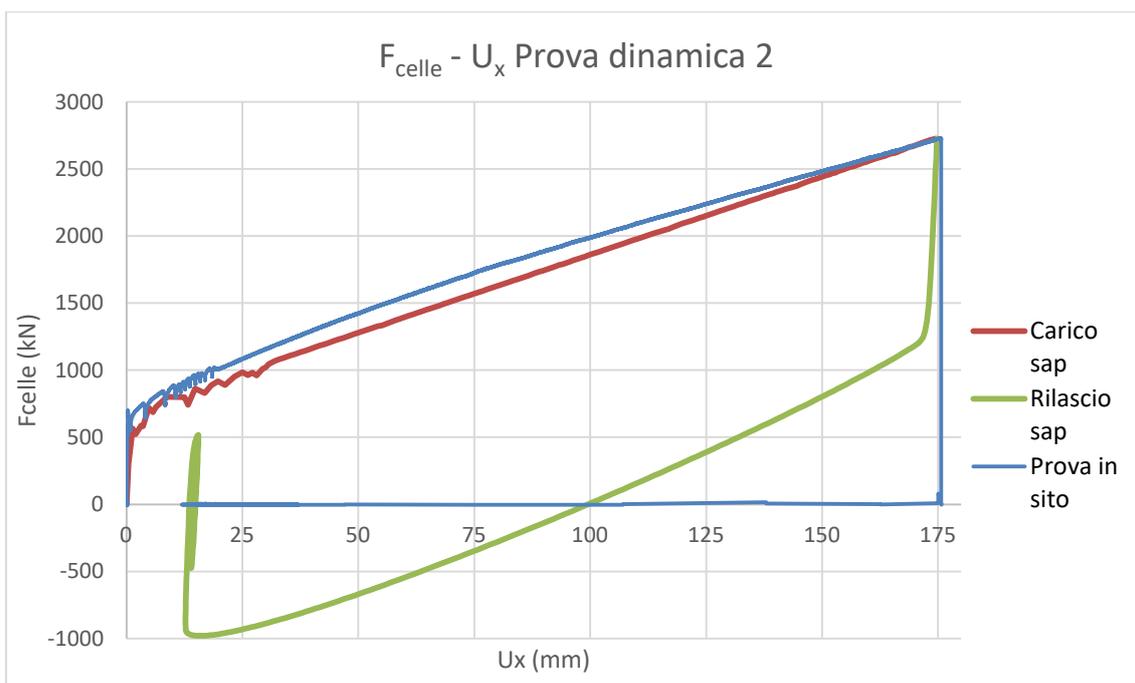


Figura 6.61 Prova dinamica 2 $F_{celle} - U_x$ confronto tra prova in sito e modello

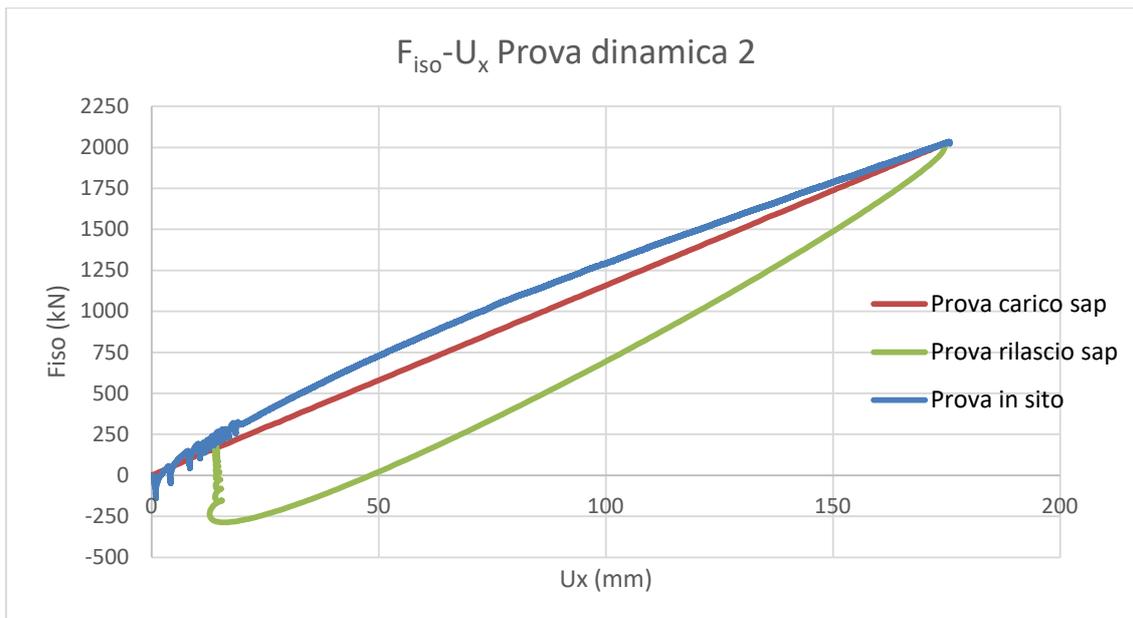


Figura 6.62 Prova dinamica 2 Fiso – U_x confronto tra prova in sito e modello

Si allega l'andamento delle forze dei vari link in funzione del tempo Fig. 6.19.

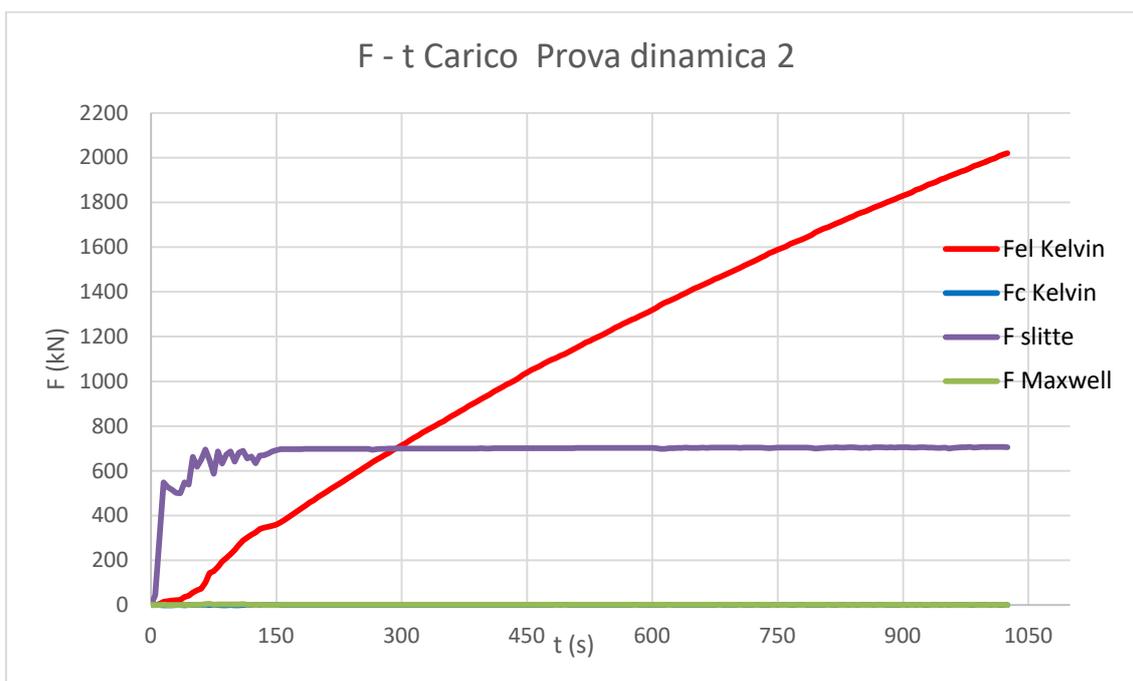


Figura 6.63 Andamento forze durante la fase di carico in funzione del tempo

In questa prova il modello, nella fase di carico, coincide più fedelmente rispetto alle altre prove con i risultati in sito. Come nelle prove precedenti, se osserviamo la Fig. 6.60 il modello si pone al di sopra dell'andamento in sito perché la rigidità del sistema di isolamento è stata presa pari alla rigidità equivalente.

Viene riportato il grafico (Fig. 6.64) che confronta il rilascio del modello con il comportamento reale della struttura.

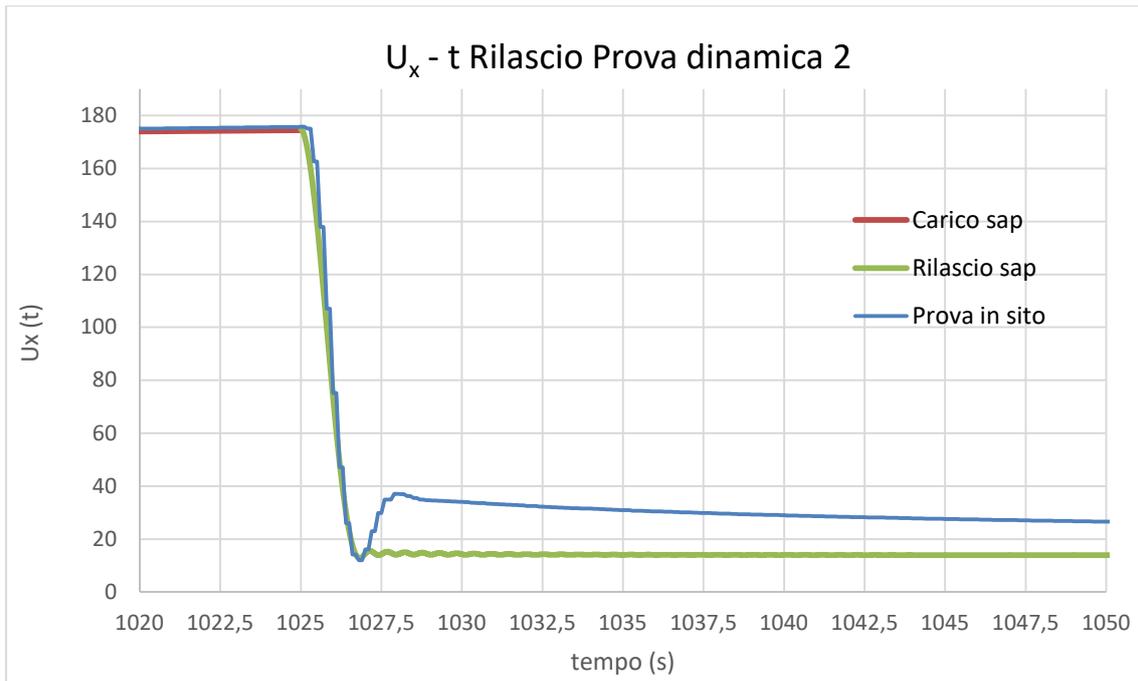


Figura 6.64 Prova dinamica 2 grafico $U_x - t$ rilascio

Come per la Prova dinamica 4, anche in questa il modello non riesce a cogliere totalmente il rilascio della struttura in sito. Infatti, successivamente allo spostamento più piccolo del rilascio il modello non compie la seconda oscillazione e risulta fermarsi. La causa è imputabile alle stesse considerazioni fatte nella prova precedente. Se andiamo ad osservare l'andamento delle forze in fase di rilascio (Fig. 6.65) notiamo come la forza di attrito in questo caso superi sia il contributo offerto dal Maxwell e dalla forza elastica. Quest'ultima infatti, dopo che viene superata dalla forza d'attrito rimane fissa al valore in cui si trova.

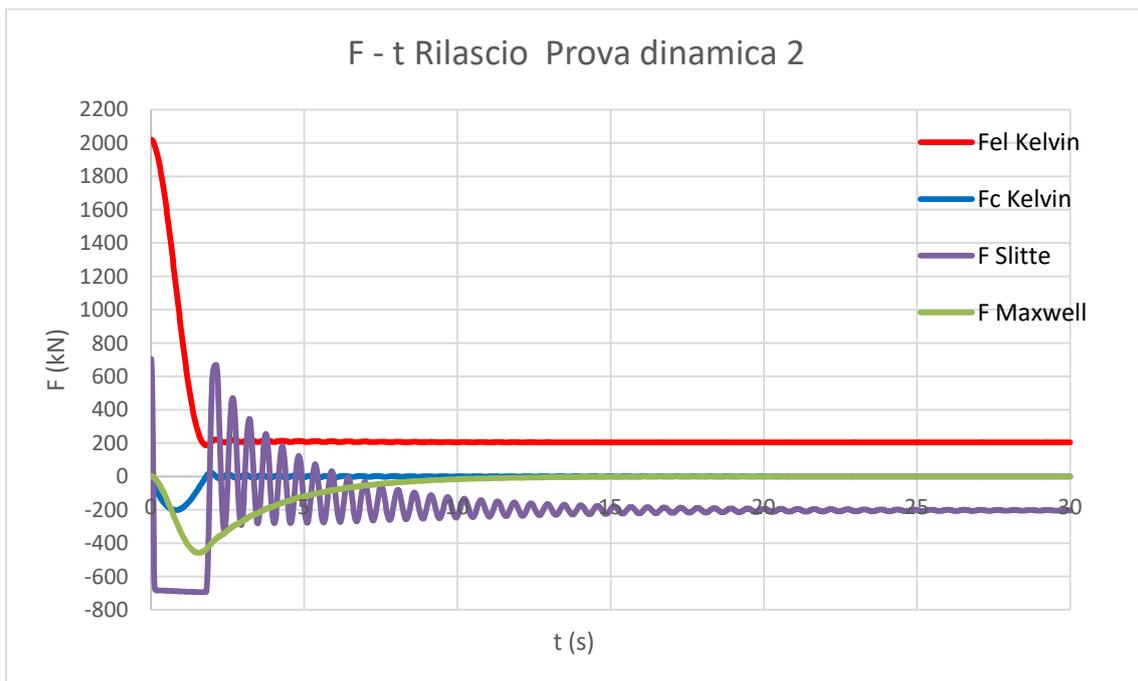


Figura 6.65 Andamento delle forze durante la fase di rilascio in funzione del tempo

7.0 CONCLUSIONI

Nella presente tesi sono state descritte nel dettaglio le prove statiche e dinamiche eseguite sul nuovo Centro di Ricerca dell'Università di Camerino e sono stati creati diversi modelli numerici al fine di simulare al meglio i dati sperimentali ricavati.

Il primo modello, ottenuto dall'adozione di un legame elastoplastico per gli isolatori, risulta descrivere con buona accuratezza il ramo di carico delle varie prove dinamiche, riuscendo a descrivere con l'aggiunta del coefficiente viscoso, che si attiva nella prima fase della prova, il fenomeno del rilassamento delle forze, ma non riesce a simulare, in tutte, il comportamento dinamico degli isolatori durante la fase del rilascio. Infatti, risulta essere funzionante solo per la Prova dinamica 5. I limiti di questo modello sono imputabili a diversi fattori:

- La modalità con cui è stato tarato il modello è limitata in quanto la ripartizione tra il contributo elastico e il contributo viscoso del ramo di carico e la reale ripartizione tra il contenuto dipendente e non dipendente dalla velocità coefficienti viscosi adottati non stati ipotizzati senza dati sufficienti a supportare tali ipotesi;
- Il numero di prove utilizzate per la taratura del modello risulta essere esiguo, anche perché non si hanno delle prove statiche o caratterizzate da spostamenti confrontabili con le Prova Dinamica 4 e 6;
- Il contributo offerto dalla viscosità, per semplicità, è stato assunto lineare;
- Il contributo fornito dalle slitte risulta essere semplificato.;
- Il modo con cui è stato semplificato il comportamento degli isolatori elastomerici è parziale rispetto alla complessità del loro comportamento che dipende significativamente ad esempio dall'ampiezza di deformazione a taglio;

Il secondo, basato sul comportamento elastico equivalente degli isolatori, è stato ideato con la volontà di creare un modello capace di essere tarato direttamente dai parametri equivalenti degli isolatori e, a differenza del precedente, riesce a descrivere la fase di rilascio di tutte le prove dinamiche. Tuttavia presenta il limite che deve essere tarato da prova a prova. Anche in questo caso però risultano presenti alcune problematiche riscontrate nel precedente come ad esempio la simulazione semplificata del contributo delle slitte e del legame costitutivo degli isolatori elastomerici.

Al fine di migliorare la simulazione delle prove e quindi la loro interpretazione sarebbe necessario passare a software che dispongono di modelli più avanti sia per gli isolatori che per le slitte, considerando per queste ultime la variabilità dell'attrito sia con la velocità che con l'avanzamento delle diverse prove.

BIBLIOGRAFIA E RIFERIMENTI NORAMATIVI

- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. *DM 17.01.2018 - Norme Tecniche per le Costruzioni*, Italia, 2018;
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. *Circolare 21 gennaio 2019*, Italia, 2019;
- European Committee for Standardization. *UNI-EN 15129 - Anti-seismic devices*. 2018;
- Franco Braga, Michelangelo Laterza. *Field testing of low-rise base isolated building*. Elsevier, 2004;
- M.F. Ferrotto, L. Cavalieri, F. Di Trapani, P. Castaldo. *Full scale tests of the base-isolation system for an emergency hospital*. 7th ECCOMAS Thematic Conference on Computation Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Crete 2019;
- BS ISO 22762-3:2018 Part 3: Applications for buildings;
- Enrico Tubaldi, Laura Ragni, Andrea Dall'Asta, Hamid Ahmadi, Alan Muhr. *Stress softening behaviour of HDNR bearings: modelling and influence on the seismic response of isolated structures*. Earthquake Engineering Structural Dynamics, 2017;
- Andrea Dall'Asta, Graziano Leoni, Fabio Micozzi, Laura Gioiella and Laura Ragni. *A Resilience and Robustness Oriented Design of Base – Isolated Structures: The New Camerino University Research Center*. Frontiers in Built Environment, 2020;
- Franco Braga, Federica Buttarazzi, Andrea Dall'Asta, Walter Salvatore. *Protezione sismica di edifici esistenti in c.a. con controventi dissipativi in acciaio*. Fondazione Promozione Acciaio, 2015;
- M. Dolce, G. Arleo, F. C. Ponzo, A. Di Cesare. *Progetto di edifici con Isolamento Sismico*. IUSS Press, 2010;
- Keri L. Ryan, M. ASCE, Jose Polanco. *Problems with Rayleigh Damping In Base – Isolated Buildings*. Journal of Structural Engineering, ASCE, November 2008;
- Giuseppe Oliveto, Athanasios A. Markkou. *The dynamics of a pushing and quick release device for dynamic testing of seismic isolated buildings*. Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, AUh. 25-29, 2014;

- *CSI Analysis Reference Manual For SAP2000, ETABS, SAFE, and CSiBridge.*
2017.