

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE**

*D.I.C.A.M.*

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali*

**TESI DI LAUREA**

in

**TECNICA DELLE COSTRUZIONI M**

**ANALISI NUMERICA NON-LINEARE DI UN PILASTRO  
PREFABBRICATO SOTTOPOSTO AD AZIONE CICLICA**

CANDIDATO

**Giuseppe Tassinari**

RELATORE:

Chiar.mo Prof. Ing. **Claudio Mazzotti**

CORRELATORE:

Dott. Ing. **Nicola Buratti**

Sessione III

Anno Accademico 2010/11



## Indice

1	Introduzione Generale .....	5
1.1	Sistema Costruttivo Integrato Pluripiano della ditta APE s.p.a .....	8
1.2	Composizione dell'elaborato.....	11
2	Descrizione dell'attività sperimentale .....	13
2.1	Introduzione alla prova.....	13
2.2	Schema della prova .....	15
2.3	Prova sul pilastro .....	25
2.4	Risultati della prova.....	34
2.4.1	Grafici Forza – Spostamento .....	34
2.4.2	Grafici Momento – Rotazione .....	38
2.4.3	Grafici Momento – Curvatura .....	41
2.4.4	Valutazione dei contributi per lo spostamento in sommità ....	51
3	Presentazione dei modelli utilizzati.....	55
3.1	Presentazione del software .....	55
3.2	Materiali .....	57
3.2.1	Concrete01 Material – Zero Tensile Strength .....	59
3.2.2	Concrete04 Material – Popovics Concrete Material .....	60
3.2.3	Concrete06 Material .....	61
3.2.4	Concrete07 Material – Chang & Mander's Concrete Model .....	62
3.2.5	Confronto tra i modelli di calcestruzzo analizzati.....	63
3.2.6	Steel 01 Material .....	72
3.2.7	Steel 02 Material .....	73
3.2.8	Reinforcing Steel Material .....	75
3.2.9	Confronto tra i modelli di acciaio analizzati .....	76

3.2.10	Bond SP01 - - Strain Penetration Model for Fully Anchored Steel Reinforcing Bars analizzati .....	83
3.2.11	BARSLIP Material .....	85
3.2.12	Elastic Uniaxial Material .....	85
3.2.13	Hysteretic Material .....	86
3.2.14	Hardening Material.....	86
3.3	Elementi impiegati .....	88
3.3.1	Displacement-Based element .....	88
3.3.1	Force-Based element .....	89
3.3.2	Beam with hinges .....	90
3.4	Algoritmo di analisi.....	95
3.4.1	Algoritmo Newton-Raphson .....	97
3.4.2	Algoritmo Broyden.....	99
3.4.3	NewtonLineSearch .....	100
4	Modellazione del pilastro prefabbricato.....	101
4.1	Lunghezza della cerniera plastica.....	101
4.2	Definizione delle caratteristiche del calcestruzzo armato in base agli spostamenti dedotti dalla curvatura.....	104
4.2.1	Modello di Mander per il Calcestruzzo.....	104
4.2.2	Calibrazione del modello del Calcestruzzo .....	108
5	Modellazione dello scalino di Emaco come molla rotazionale.....	115
5.1	Definizione delle caratteristiche della molla rotazionale .....	115
5.2	Applicazione di una molla rotazionale alla base .....	117
5.3	Introduzione di una seconda molla rotazionale.....	119
5.4	Esempio di analisi per la modellazione del legame Momento Rotazione per collegamenti Duttile.....	122
5.4.1	Schema della procedura.....	123

5.4.2	Applicazione allo schema in esame.....	128
5.5	Modellazione dell'interfaccia Plinto – Pavimentazione con un letto di molle.....	132
5.6	Valutazione della deformabilità a taglio del pilastro.....	135
6	Modellazione dell'Emaco con un letto di molle .....	139
6.1	Calibrazione del modello per le barre d'armatura inghisate negli scatolari .....	139
6.2	Definizione del letto di molle .....	142
6.3	Confronto dei risultati in termini di rotazioni alla base del pilastro	143
6.4	Confronto dei risultati in termini di Forze - Spostamenti in sommità del pilastro .....	144
6.5	Applicazione della molla rotazionale alla base .....	147
6.6	Confronto in termini di energia .....	149
	Bibliografia.....	153

APPENDICE	A
APPENDICE	B
APPENDICE	C
APPENDICE	D
APPENDICE	E



## 1 Introduzione Generale

Negli ultimi anni vi è stata un'ampia diffusione delle costruzioni prefabbricate, in particolar modo per determinate tipologie di edifici quali quelli industriali (l'80% di tali edifici è oggi realizzato con struttura prefabbricata) e, in maniera sempre crescente, quelli commerciali ad uno o più piani.

Questo è dovuto al fatto che la prefabbricazione spesso riesce a rispondere meglio e più velocemente alle richieste di un mercato, quello dell'edilizia, dove i costi della posa in opera e le tempistiche di cantiere rappresentano due elementi fondamentali per la buona gestione d'impresa.

La realizzazione di un elemento prefabbricato avviene interamente in stabilimento, questo garantisce un preciso controllo della resistenza del calcestruzzo impiegato e una migliore finitura della superficie.

Fino ad una decina di anni fa, il dimensionamento e le verifiche in campo elasto-plastico degli elementi e dei particolari utilizzati nella prefabbricazione consideravano i carichi e i sovraccarichi verticali come azioni di riferimento; inoltre nelle zone dichiarate sismiche, le sollecitazioni provocate dalle azioni orizzontali di progetto venivano utilizzate al più per analisi delle resistenze in campo elastico.

Con l'ordinanza n° 3274 del 20 marzo 2003 si è posto l'accento anche e soprattutto sulla resistenza, sulle risorse di duttilità, e quindi sulle capacità dissipative delle strutture prefabbricate soggette all'azione orizzontale provocata da un evento sismico. Sono state quindi intraprese tutta una serie di indagini teorico-sperimentali che hanno permesso di comprendere il comportamento dell'insieme strutturale sottoposto all'azione sismica, consentendo la valutazione delle sue risorse di duttilità, della conseguente capacità dissipativa ed il corretto calcolo dei principali elementi (travi, pilastri ecc.).

Resta invece non ancora completamente concluso lo studio relativo ai collegamenti tra gli elementi prefabbricati. L'assemblaggio di elementi prefabbricati a costituire una struttura a telaio pone infatti il problema di come collegare i vari elementi nei nodi e soprattutto di capire quale tipologia di vincolo riproduce il collegamento ottimale. Quest'ultima questione di notevole importanza per il calcolo delle sollecitazioni che nascono nei vari elementi strutturali per effetto di diverse combinazioni di carico, rimane ancora del tutto aperta. Si è quindi sentita la necessità di avviare un'indagine approfondita e generalizzata relativa all'analisi dei collegamenti tra elementi prefabbricati di strutture soggette a sisma, che sia in grado di condurre ad una serie di indicazioni progettuali e realizzative, scientificamente corrette, complete e sperimentalmente testate, dei nodi e delle unioni nelle strutture prefabbricate.

Nell'ottica delle problematiche appena discusse, con il presente lavoro di tesi, ci si è posti come obiettivo quello di studiare il comportamento di un particolare tipo di collegamento pilastro prefabbricato-fondazione proposto e utilizzato dalla ditta APE di Montecchio Emilia (RE), specializzata nella produzione di manufatti per la realizzazione di telai prefabbricati in calcestruzzo armato. Il particolare collegamento pilastro-fondazione che viene indagato in questo elaborato fa parte di un sistema costruttivo di prefabbricazione innovativo in quanto nonostante il montaggio e l'assemblaggio degli elementi prefabbricati avvenga completamente "a secco", mediante getti ed armature integrative è possibile conferire alla struttura le stesse caratteristiche prestazionali di una struttura spaziale iperstatica. Questo sistema prevede un procedimento costruttivo ad ampio raggio di operatività ed è capace di ridurre sia l'impiego di risorse e che i tempi di costruzione.

Per analizzare il comportamento del collegamento in questione, sono state effettuate delle prove di pressoflessione ciclica su un pilastro prefabbricato ancorato in fondazione mediante tale sistema. Questo è stato realizzato inserendo le barre di armatura del pilastro all'interno di scatolari metallici



affogati nella fondazione e intasando i fori mediante malta a ritiro controllato.

La malta utilizzata nello specifico è di tipo EMACO S55, questa è particolarmente indicata per ancoraggi di precisione come, per esempio, quelli relative a turbine a gas o a vapore, alternatori, compressori, piattatrici, gru, pale eoliche e ovviamente per ancoraggi di pilastri in acciaio o in calcestruzzo armato prefabbricato.

Questa campagna di prove è stata intrapresa al fine di investigare se le sollecitazioni cicliche orizzontali che i ferri di ripresa dei pilastri assorbono quando questi ultimi sono soggetti ad azione sismica, possano pregiudicare o meno il corretto funzionamento del sistema di collegamento tra il pilastro e la fondazione. Le prove in questione sono state interamente preparate ed eseguite presso il Laboratorio di Prove su Strutture (La.P.S) dell'Università di Bologna con la quale la ditta APE collabora per la sperimentazione di nuovi sistemi e tecnologie.

Le problematiche principali legate allo sviluppo del presente elaborato sono legate all'assenza di prove sui singoli materiali che compongono il sistema analizzato. Per definire le loro caratteristiche, sono stati analizzati diversi modelli per ogni materiale, la finale è stata effettuata considerando tutti i dati empirici a disposizione.

## **1.1 Sistema Costruttivo Integrato Pluripiano della ditta**

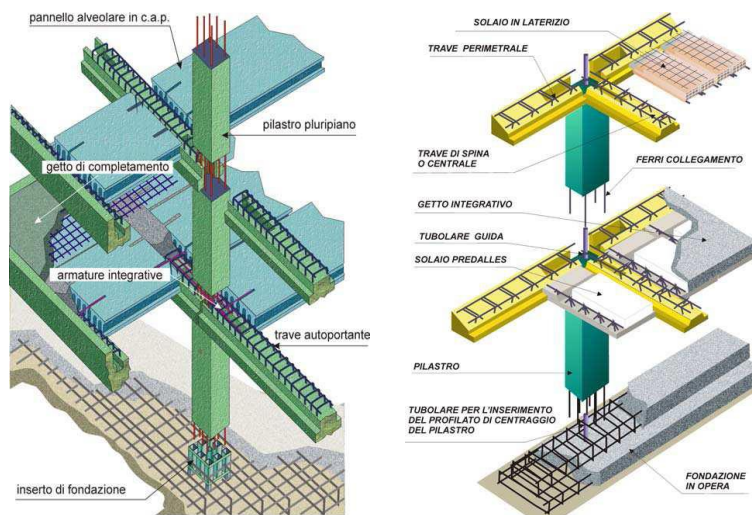
### **APE s.p.a**

Il collegamento pilastro prefabbricato-fondazione oggetto del presente lavoro di tesi costituisce un particolare strutturale appartenente allo schema costruttivo di prefabbricazione in calcestruzzo armato normale utilizzato dalla ditta APE s.p.a. di Montecchio Emilia (RE). Questo è denominato “Sistema Costruttivo Integrato Pluripiano” e rappresenta nel settore dell’edilizia terziaria-industriale un’alternativa alla prefabbricazione in calcestruzzo armato precompresso.

Prima di illustrare le prove sperimentali effettuate si è ritenuto opportuno descrivere brevemente in che cosa consiste questo nuovo sistema costruttivo mettendo in rilievo le caratteristiche che lo differenziano dai sistemi di prefabbricazione classici.

Tale sistema costruttivo è nato per risolvere le problematiche tipiche dei sistemi di prefabbricazione classici. Questi ultimi ricorrono ad elementi prefabbricati interamente realizzati in stabilimento ed assemblati quasi ed esclusivamente a secco in schemi a funzionamento isostatico e si contraddistinguono pertanto per le elevate capacità prestazionali dei singoli componenti. Essi garantiscono notevoli resistenze ai sovraccarichi verticali con ampie luci di carico ma nello stesso tempo presentano notevoli problematiche connesse sia alla progettazione per le sollecitazioni indotte dalle azioni orizzontali sismiche, sia alla scelta del tipo di fondazione.

Il sistema costruttivo pluriplano integrato introdotto per ovviare alle limitazioni appena elencate, rappresenta l’evoluzione del precedente sistema costruttivo “K avanzato” nato con l’obiettivo di realizzare strutture ad uso civile-residenziale sfruttando l’assemblaggio in opera di semiprefabbricati leggeri. In Figura 1 sono riportate le schematizzazioni sia del sistema costruttivo pluriplano che del precedente sistema costruttivo K avanzato.



*Figura 1 - Schematizzazione del sistema costruttivo pluriplano e del precedente sistema costruttivo K.*

L'obiettivo del moderno sistema costruttivo pluriplano integrato è quello di realizzare una struttura pluriplano iperstatica tradizionale caratterizzata da un montaggio "tutto a secco" e da una organizzazione di cantiere tipica dei prefabbricati industriali. Questo sistema è quindi formato da un sottosistema composto da semiprefabbricati leggeri da assemblare in opera con getti ed armature di completamento, per la realizzazione di un complesso strutturale monolitico, staticamente idoneo all'assorbimento di sollecitazioni sia verticali che orizzontali.

I principali elementi che costituiscono il sistema in questione, riportati anche in Figura 2, sono:

- Pilastri pluriplano con interruzioni del getto
- Travi tralicciate di ampia luce dotate di tasche di completamento ed ali di supporto per gli orizzontamenti
- Pannelli alveolari precompressi autoportanti dotati di armature d'innesto o asole di alloggiamento per armature di completamento

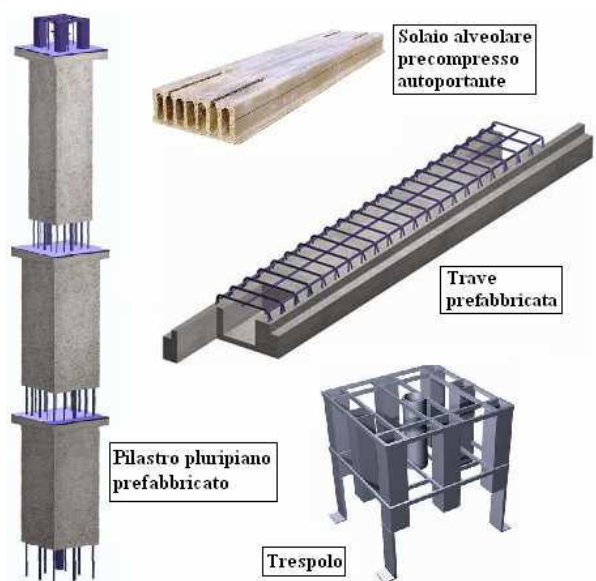


Figura 2 - Elementi prefabbricati costituenti il sistema costruttivo integrato.

L'assemblaggio degli elementi sopra elencati in schemi isostatici fedeli alla disposizione definitiva ed in grado di supportare il peso proprio ed il peso dei getti integrativi, fa sì che le uniche attività di getto in opera richieste siano:

- L'esecuzione della struttura di fondazione
- L'esecuzione del getto di seconda fase della fondazione mediante malte
- Antiritiro grazie alle quali il pilastro viene reso solidale all'inserto di fondazione;
- La disposizione delle armature integrative, fornite a corredo, di nodi strutturali e solai;
- La bagnatura delle superfici e l'esecuzione, in un'unica fase, del getto di completamento.

L'avvenuta maturazione dei getti integrativi conferisce al sistema la capacità portante di un sistema strutturale spaziale iperstatico.

Una delle innovazioni principali apportata dal sistema costruttivo integrato, attorno alla quale ruotano la maggior parte dei contenuti di questo lavoro di tesi, è rappresentata dai trespoli metallici che vengono utilizzati per il collegamento dei pilastri alle fondazioni. Nel getto di queste ultime viene

infatti annegato un dispositivo in acciaio, denominato trespolo. Tale dispositivo ha lo scopo di sostenere il pilastro in fase di montaggio e di consentirne l'inghisaggio con la fondazione stessa. Il trespolo è costituito da un telaio metallico che collega una serie di scatolari chiusi alla base, aventi la funzione di creare nella fondazione dei vani entro cui saranno inseriti i ferri di ripresa del pilastro. Un apposito innesto posizionato al centro del trespolo consente, tramite l'inserimento di un tubolare metallico, che fuoriesce dal pilastro prefabbricato, alla precisa "centratura" ed al sostegno provvisorio del pilastro prima del getto di inghisaggio. Quest'ultimo viene effettuato mediante una malta ad elevata resistenza e a ritiro compensato (EMACO). Si riporta in Figura 3 un'immagine del trespolo.



*Figura 3 -Trespolo in acciaio che viene annegato nella fondazione.*

### **1.2 Composizione dell'elaborato**

Nel capitolo 2 viene descritta la prova nel suo complesso. Di conseguenza è stato specificato il sistema di prova, la strumentazione a disposizione, lo svolgimento della prova ed infine sono stati mostrati i risultati ottenuti.

Nel capitolo 3 vengono descritti tutti i modelli analizzati e gli algoritmi di risoluzione. Poiché non sono state effettuate prove specifiche sui materiali, si è data particolare importanza nel confronto fra le possibili schematizzazioni di questi.

Nel capitolo 4 ci si è soffermati nello studio del modello che rappresenti al meglio le caratteristiche meccaniche del pilastro prefabbricato, in funzione

degli spostamenti dedotti dai grafici Momento – Curvatura, ottenuti sperimentalmente.

Infine nel capitolo 5 e nel capitolo 6 sono state analizzate due modellazioni differenti, utilizzate per rappresentare la struttura nel suo complesso. Nel primo caso sono state introdotte prima una, e poi due molle rotazionali alla base del pilastro. Nel secondo caso invece, lo scalino di Emaco è stato schematizzato come un letto di molle con rigidità traslazionale verticale, e le barre inghisate all'interno degli scatolari sono state analizzate sfruttando i risultati ottenuti in prove di Pull-Out, effettuate sempre presso il Laboratorio di Prove su Strutture dell'Università di Bologna.

## **2 Descrizione dell'attività sperimentale**

### **2.1 Introduzione alla prova**

In questo primo capitolo si riporta l'attività sperimentale, svolta presso il laboratorio di prove strutturali dell'Università di Bologna nell'estate 2011, relativa alla sperimentazione del sistema di ancoraggio in fondazione, usualmente impiegato dall'azienda APE. Questo si realizza inserendo le barre di armatura dei pilastri all'interno di scatolari metallici affogati nella fondazione e intasando i fori mediante malta a ritiro controllato tipo EMACO.

Nel corso della prova è stato utilizzato un pilastro di calcestruzzo armato prefabbricato con sezione trasversale  $40 \times 40 \text{ cm}$  e altezza  $233 \text{ cm}$ ; l'armatura longitudinale è composta da n°8 ferri longitudinali  $\phi 26$ , mentre quella trasversale da staffe  $\phi 8/5 \text{ cm}$ . I ferri longitudinali escono dalla base attraverso fori  $\phi 30$  di una piastra in acciaio  $40 \times 40 \times 0.4 \text{ cm}$ . Dalla stessa piastra esce per  $37 \text{ cm}$  un tubo in acciaio  $\phi 114$  spesso  $16 \text{ mm}$  lungo complessivamente  $75 \text{ cm}$ , inserito quindi nel pilastro per altri  $38 \text{ cm}$ . Questo tubo facilita l'assemblaggio con la corrispondente fondazione come riportato nella seguente figura:

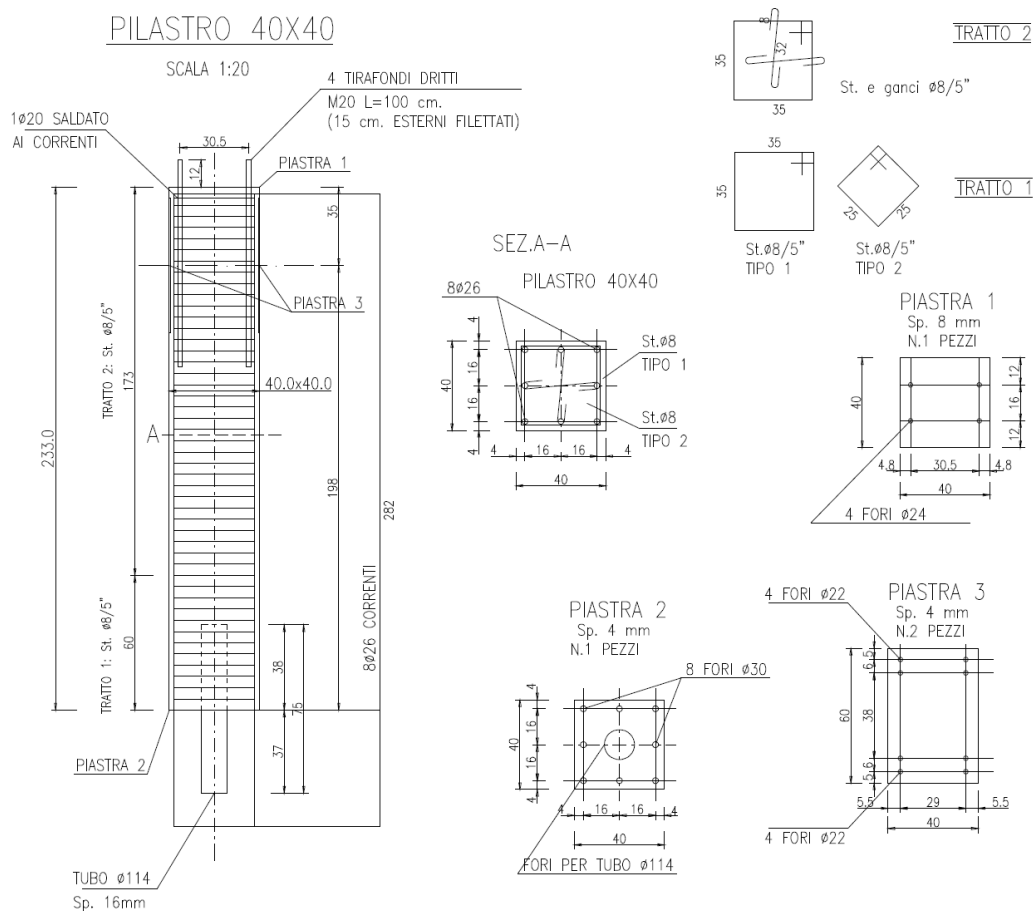


Figura 4 - Pilastro 40X40: geometria e armatura

Il pilastro prefabbricato con questo metodo è stato studiato in modo da poter essere posizionato direttamente sul relativo plinto di fondazione in cemento armato, nel quale è stato preventivamente affogato un apposito sistema di vincolo. Quest'ultimo è costituito da n°8 scatolari 8x8 cm disposti a formare un quadrato di 40 cm di lato, al cui centro è presente un tubo  $\phi 133$  come si può vedere in Figura 5:



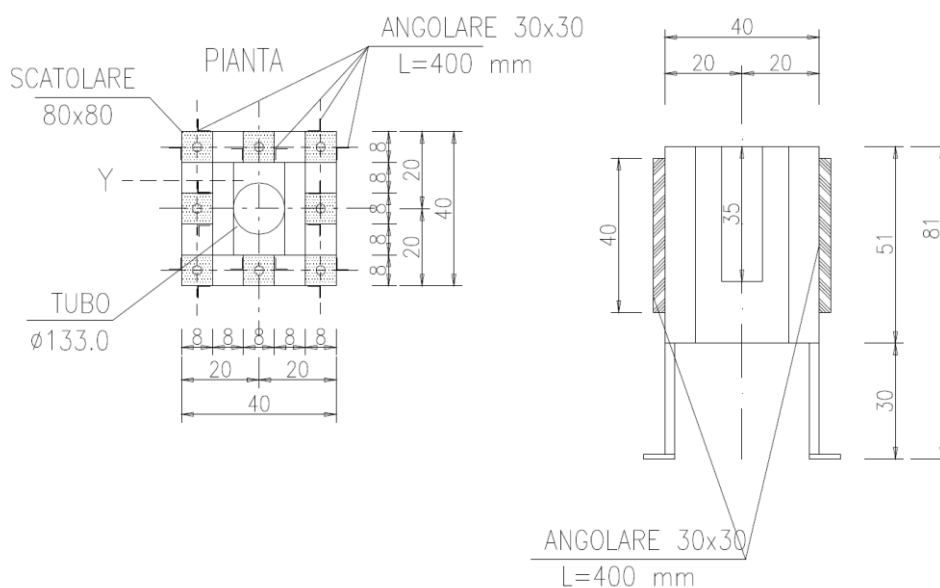


Figura 5 - Dima metallica

Negli scatolari e nel tubo al centro sono stati infilati rispettivamente i ferri e il tubo uscenti dalla piastra alla base del pilastro. Una volta posizionato il pilastro sul sistema metallico si realizza un getto di completamento con malta cementizia espansiva tipo EMACO per riempire gli scatolari e formare un colletto alto 7 cm sopra l'intradosso del plinto. Con questa operazione si intende realizzare un vincolo di incastro perfetto.

Mediante le prove effettuate è stato valutato il momento resistente del collegamento pilastro-fondazione in seguito a sollecitazioni cicliche di pressoflessione

## 2.2 Schema della prova

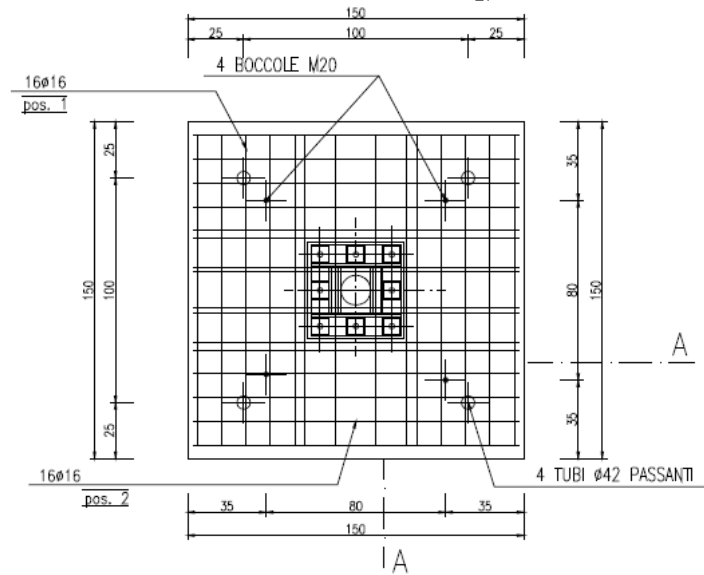
Il sistema di fondazione del pilastro è costituito da un plinto in calcestruzzo, opportunamente armato, avente dimensioni in pianta di 150x150 cm, e altezza pari a 80 cm .

Come riportato in Figura 6, nel plinto sono stati predisposti degli elementi di ancoraggio per poter applicare lo sforzo normale al pilastro. Nella fase successiva è stato messo in opera il pilastro, realizzando il getto di malta

## Capitolo 2 - Descrizione dell'attività sperimentale

cementizia espansiva tipo "Emaco S55" a riempire la scatola metallica con la formazione del colletto di spessore circa 7 cm.

PIANTA : ARMATURA PLINTO n° 1 Pezzi  
SCALA 1:20 [peso manufatto: 4500 kg]



SEZ. A-A : ARMATURA PLINTO

SCALA 1:20

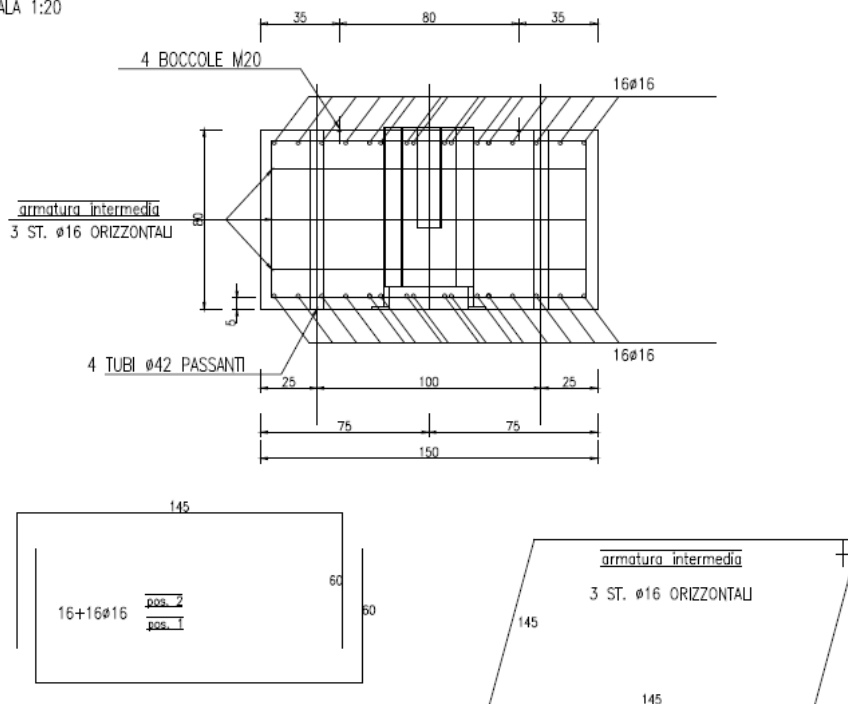


Figura 6 - Geometria ed armatura del plinto

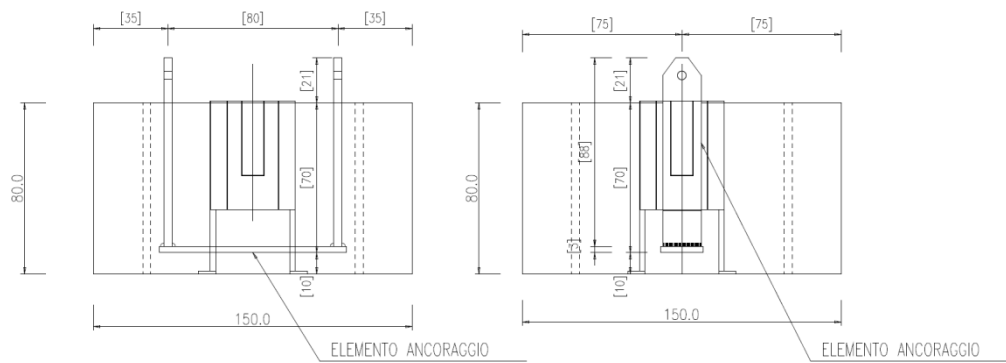


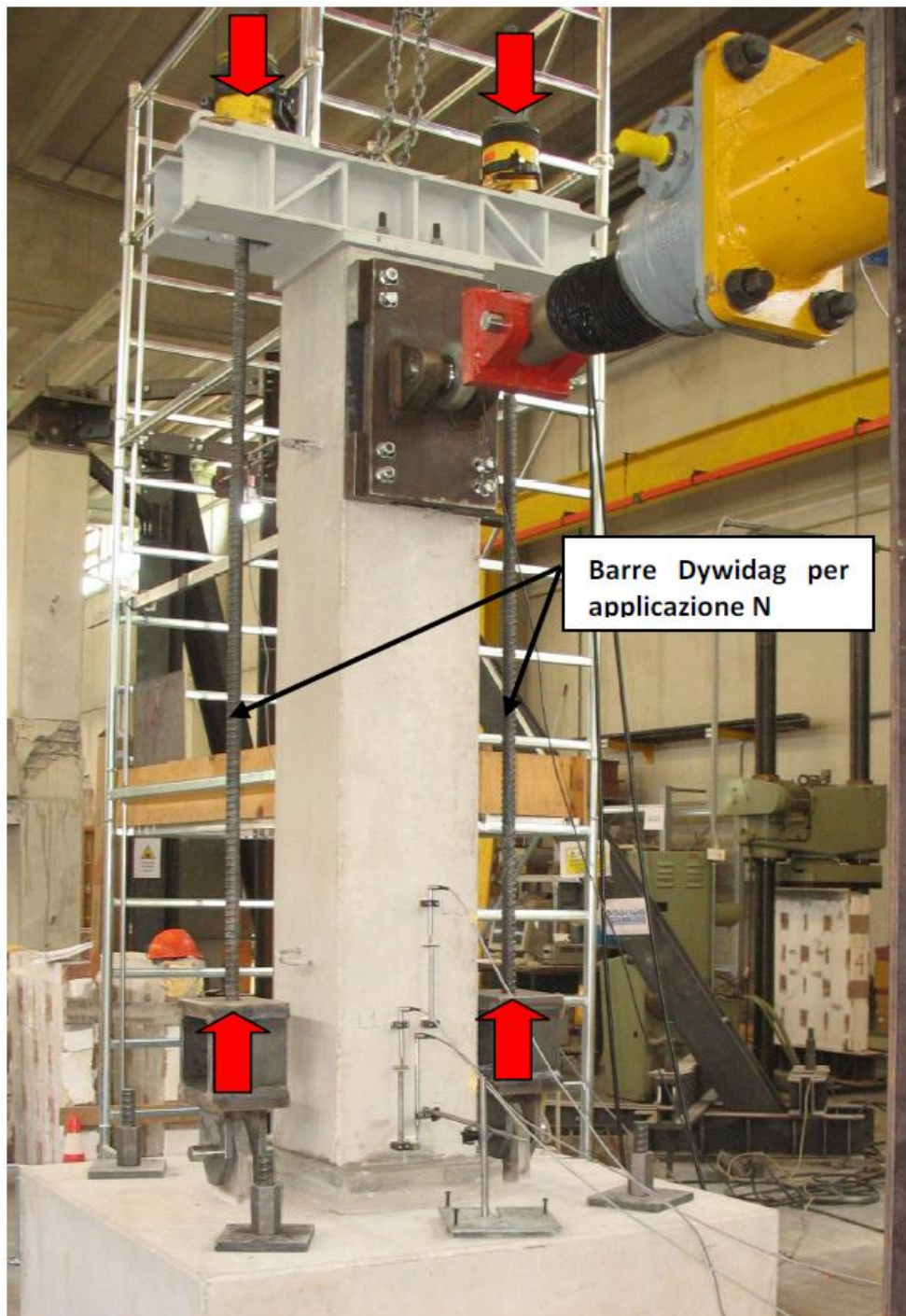
Figura 7 - Sistema di ancoraggio dal plinto per l'applicazione dello sforzo normale

Il sistema di contrasto per l'applicazione della forza orizzontale è costituito da due profili verticali HE B 260 in acciaio S235 di altezza 4.00 m e da due HE B 260 acciaio S235 di controvento. Sul contrasto precedentemente descritto è stato montato un martinetto oleodinamico a vite traslante SEP 500A per la trasmissione della forza orizzontale. Sia il sistema di contrasto per l'applicazione della forza, che l'elemento di prova costituito da pilastro e plinto, sono stati ancorati a terra mediante quattro barre DYWIDAG  $\phi 36$ , ogni barra trasmette una precompressione pari a 10 t.



*Figura 8 - Sistema di contrasto*

Per trasmettere lo sforzo assiale di progetto sono state predisposte due barre  $\phi 36$ . Queste barre sono state fissate alla sommità del pilastro mediante un elemento formato da due profili HE B 200 e nell'estremità inferiore attraverso scatole metalliche collegate con due perni agli inserti di ancoraggio predisposti all'interno del plinto. L'azione assiale è stata esercitata da due martinetti cavi, ciascuno di capacità 60 t a 700 bar.



*Figura 9 - Sistema di applicazione dello sforzo normale*

Sul pilastro, ad un'altezza di 198 cm dalla base del pilastro stesso, è stata montata, su una piastra di ancoraggio, la flangia di attacco della cella di carico. Sul lato opposto è presente un'altra piastra di ancoraggio alla quale sono collegati due sensori per misurare la freccia in sommità, ovvero un trasduttore di spostamento di corsa 100 mm ed un potenziometro a filo di corsa 250 mm come riportato nella seguente figura:



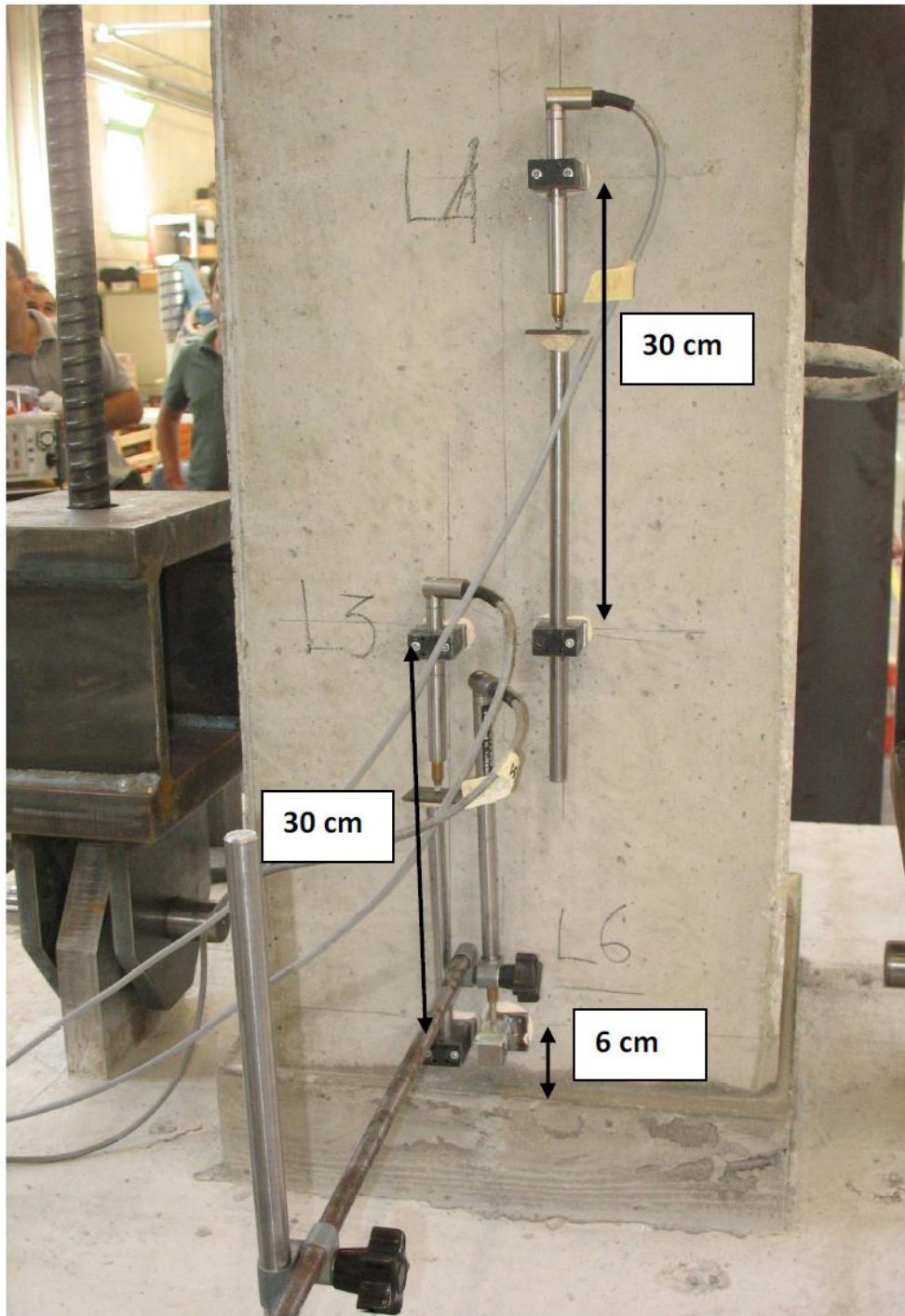


*Figura 10 - Cella di carico in testa al pilastro*



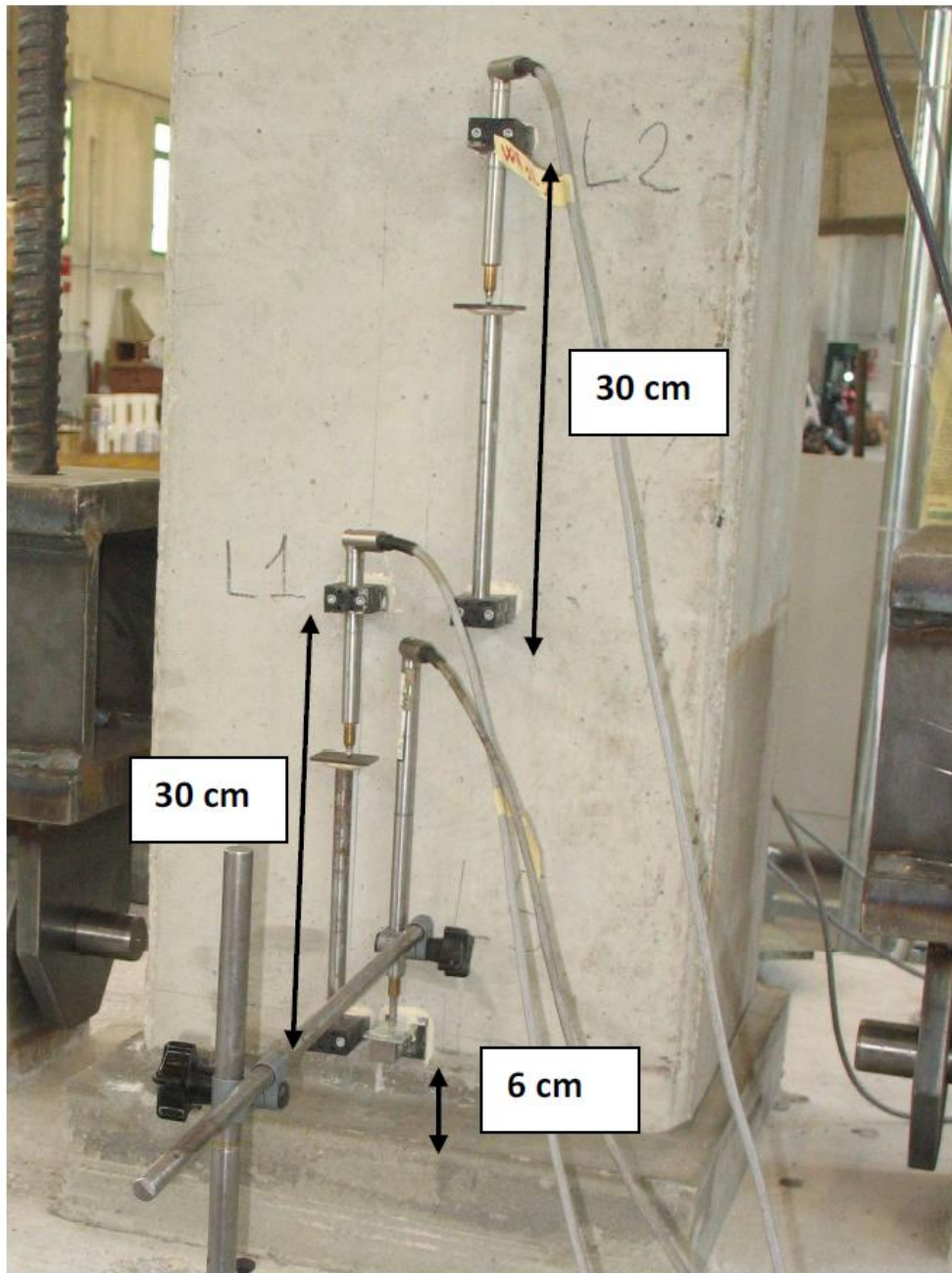
*Figura 11 - Sistema di misurazione degli spostamenti in testa al pilastro*

Il sistema di misurazione è completato da trasduttori di spostamento disposti sulla base del pilastro e sul plinto. Come riportato in Figura 12 e Figura 13 sulla faccia che fronteggia il contrasto sono disposti i trasduttori di spostamento  $L2 - L1 - L5$  mentre sulla faccia opposta sono disposti i trasduttori denominati  $L4 - L3 - L6$ . Tali trasduttori misurano la rotazione e la curvatura alla base del pilastro durante la prova, le posizioni e le distanze relative a cui sono stati disposti sono riportate nelle seguenti figure:



*Figura 12 - Strumenti di misurazione alla base del pilastro sulla faccia opposta al contrasto*





*Figura 13 - Strumento di misurazione alla base del pilastro sulla faccia davanti al contrasto*

E' stato infine disposto un trasduttore di spostamento sul plinto per misurare eventuali spostamenti:



*Figura 14 - Strumento di misurazione degli spostamenti del plinto*

### 2.3 Prova sul pilastro

La prova è stata svolta applicando cicli orizzontali in controllo di spostamento. Sono stati effettuati tre cicli per ogni livello di spostamento raggiunto. Un ciclo si considera terminato quando la posizione del pilastro è tornata nella configurazione a spostamento orizzontale nullo. Lo sforzo assiale applicato tramite i due martinetti posizionati in sommità del pilastro è rimasto costante durante lo svolgimento della prova pari a 50 t.

Di seguito si presenta la tabella che illustra i diversi cicli effettuati:

Serie n°	Spostamento MAX imposto [mm]	Velocità
1	5	200 $\mu\text{m/s}$
2	10	250 $\mu\text{m/s}$
3	20	1° ciclo 250 $\mu\text{m/s}$ 2° ciclo 300 $\mu\text{m/s}$ 3° ciclo 350 $\mu\text{m/s}$
4	40	1° ciclo 400 $\mu\text{m/s}$ 2°/3° ciclo 450 $\mu\text{m/s}$
5	60	500 $\mu\text{m/s}$
6	100	600 $\mu\text{m/s}$
7	140	"
8	170	125 $\mu\text{m/s}$

In corrispondenza della serie di cicli di spostamento a 20 mm si sono formate le prime fessurazioni significative. Durante il secondo della serie di spostamenti a 40mm si è osservato il distacco dello scalino di Emaco.

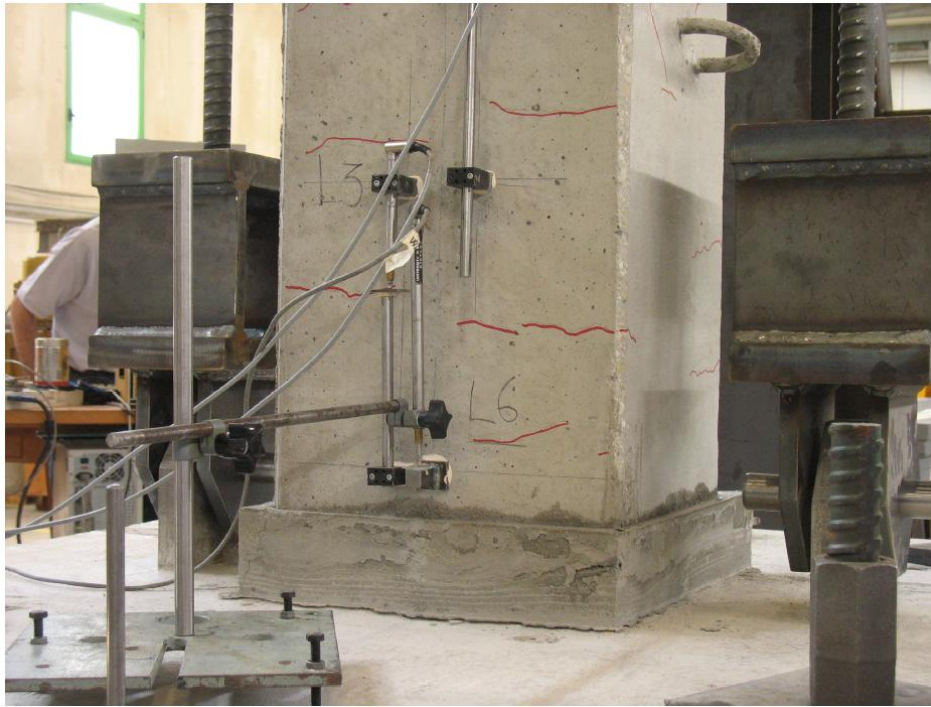
Al secondo ciclo della serie di spostamenti a  $60\text{ mm}$  la prova è stata interrotta per uno slittamento del plinto, è stato quindi necessario fissare nuovamente le barre di ancoraggio del plinto. Per quanto riguarda i cicli di spostamento a  $140\text{ mm}$ , ne sono stati realizzati due e non tre.

Per il livello di spostamento a  $170\text{ mm}$  è stato realizzato un solo ciclo. Durante questo ciclo, nella fase di spinta verso il contrasto, sono stati raggiunti i  $170\text{ mm}$ , mentre nella fase di spinta verso la parte opposta sono stati raggiunti  $150\text{ mm}$  circa per il raggiungimento del fine corsa del pistone in estensione. Successivamente chiudendo il pistone si è proceduto fino a alla sua fine corsa, raggiungendo uno spostamento ultimo di circa  $270\text{ mm}$ . Nelle foto riportate di seguito si ripercorrono le fasi salienti della prova eseguita.



*Figura 15 - Inizio della prova, primi cicli di carico a bassi livelli di spostamento*





*Figura 16 - comparsa delle prime fessure alla base del pilastro*



*Figura 17 - Fessurazione del colletto di base di emaco*



*Figura 18 - Distacco di uno degli strumenti per la misurazione della rotazione alla base in corrispondenza del primo ciclo a 40 mm*



*Figura 19 - Distacco del colletto di emaco e comparsa di fessurazioni estese sull'altezza del pilastro in corrispondenza del secondo ciclo a 40 mm*





*Figura 20 - Distacco del colletto di emaco - particolare lato fronte contrasto*



*Figura 21 - Distacco del colletto di emaco - Particolare lato opposto*



*Figura 22- Particolare della rotazione alla base del pilastro*



*Figura 23 - Cicli di spostamento a 100 mm*





*Figura 24 - Evoluzione della fessurazione alla base*



*Figura 25 - Cicli di spostamento a 140 mm*



*Figura 26 - Daneggiamento alla base del pilastro all'aumentare dei cicli di spostamento*





*Figura 27 - Fine prova*



*Figura 28 - Danneggiamenti finali alla base del pilastro*

## 2.4 Risultati della prova

Grazie alla particolare disposizione degli strumenti e alla contemporanea acquisizione dei valori della forza attraverso la cella di carico sono stati realizzati dei grafici che mettono in relazione un'entità sollecitante (forza o momento) con una caratteristica dello spostamento (freccia, rotazione curvatura, etc.).

I grafici elaborati sono:

- Forza-Spostamento Orizzontale nel punto di applicazione del carico;
- Momento-Rotazione alla base del pilastro;
- Momento-Curvatura Media a 21 *cm* dal colletto di Emaco alla base del pilastro;
- Momento-Curvatura Media a 51 *cm* dal colletto di Emaco alla base del pilastro;

Ciascun grafico fa riferimento alle acquisizioni effettuate durante i cicli in cui è stato assegnato al pilastro lo stesso carico o la stessa deformazione, per cui in ogni diagramma saranno solitamente presenti tre cicli, ma non mancano le eccezioni. Si è optato per questa soluzione per rendere subito evidente il comportamento del provino in seguito al ripetersi di sollecitazioni analoghe.

Un ciclo si considera concluso quando la freccia in sommità è tornata allo zero iniziale. Questo criterio è stato adottato in tutti i grafici.

### 2.4.1 Grafici Forza – Spostamento

Grazie ai trasduttori di spostamento montati sulla piastra posta in testa al pilastro (ovvero l'induttivo LVDT 100 e lo strumento a filo), è stato possibile misurare istante per istante la freccia del pilastro in corrispondenza del punto di applicazione del carico.

In questo paragrafo verranno riportati per ogni serie di cicli i grafici Forza-Spostamento dei due strumenti: sull'asse delle ascisse è riportato lo spostamento (in mm), mentre su quello delle ordinate il carico (in kN) applicato al pilastro.

I cicli inizialmente procedono verso un carico positivo con spostamento positivo (I quadrante, che significa inflessione verso lato contrasto), per poi proseguire verso un carico negativo con spostamento negativo (III quadrante, e inflessione verso lato esterno) in senso orario.

Nel redigere i grafici, allo scopo di ridurre le oscillazioni dei valori dei due strumenti (in particolare nei primi cicli caratterizzati da valori molto piccoli di spostamento) si è fatto uso della media mobile, ovvero ad ogni valore di carico corrisponde un valore di spostamento mediato sui precedenti.

Nel seguito si riportano i grafici forza spostamento divisi per livelli di spostamento raggiunti che rappresentano l'evoluzione della prova:

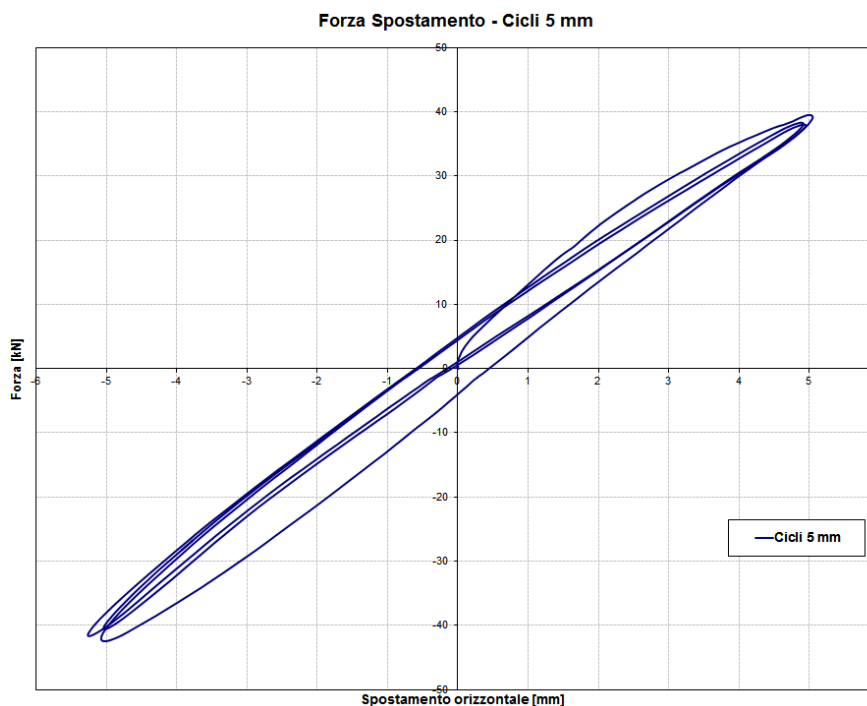
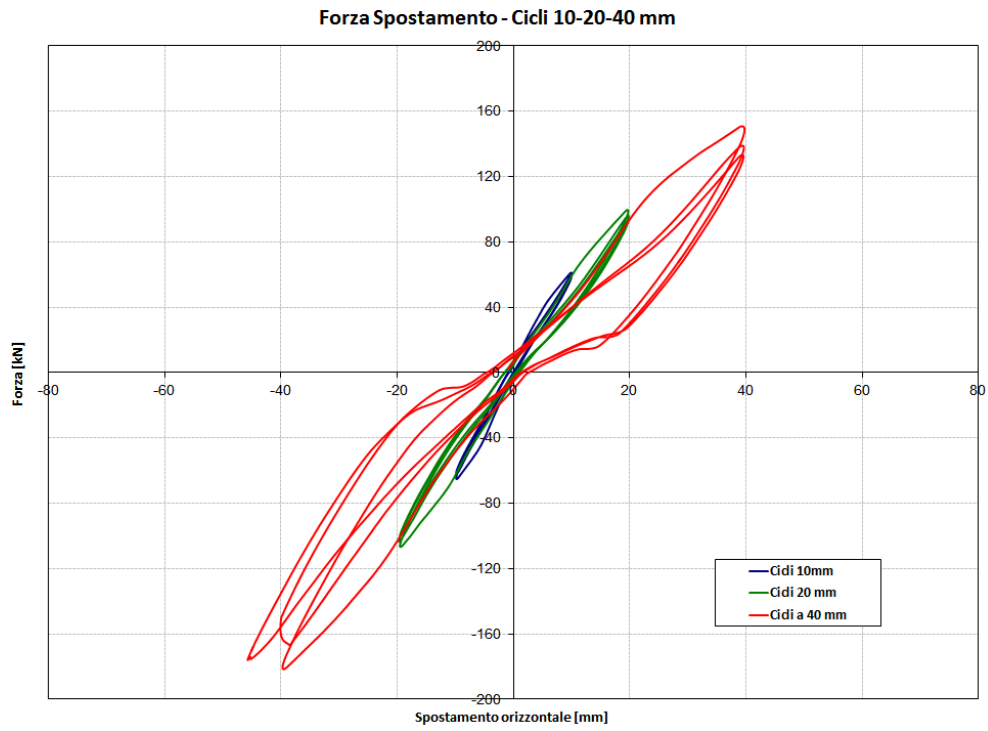
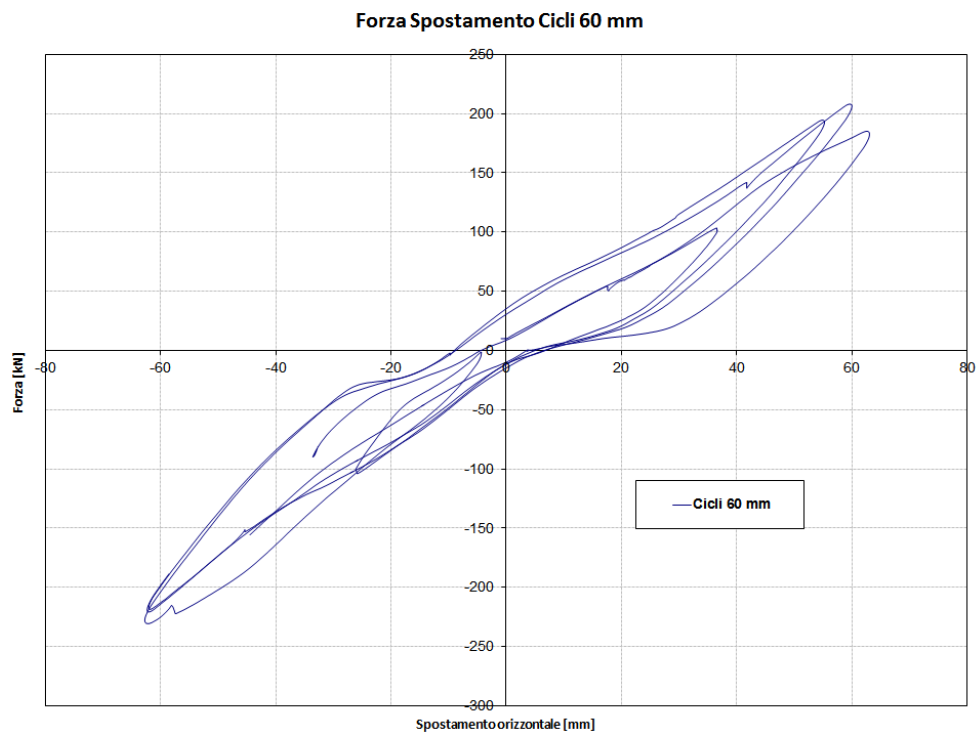


Figura 29 - Cicli Forza Spostamento a 5 mm



*Figura 30 - Cicli forza spostamento a 10 - 20 - 40 mm*



*Figura 31 - Cicli Forza Spostamento a 60 mm*

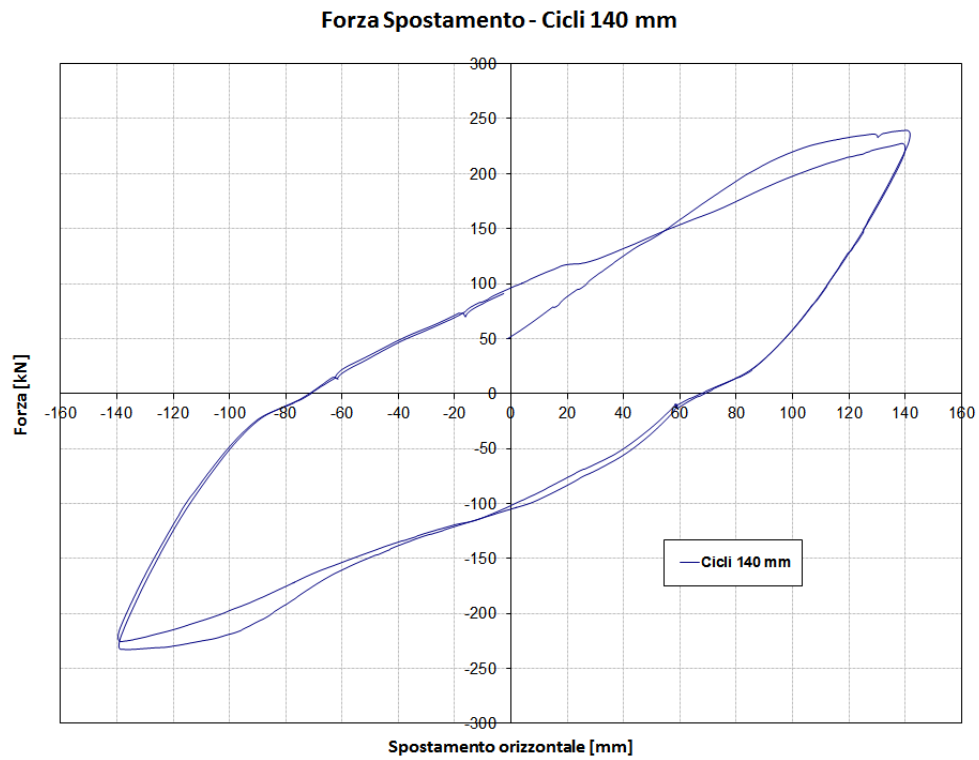


Figura 32 - Cicli Forza Spostamento a 140 mm

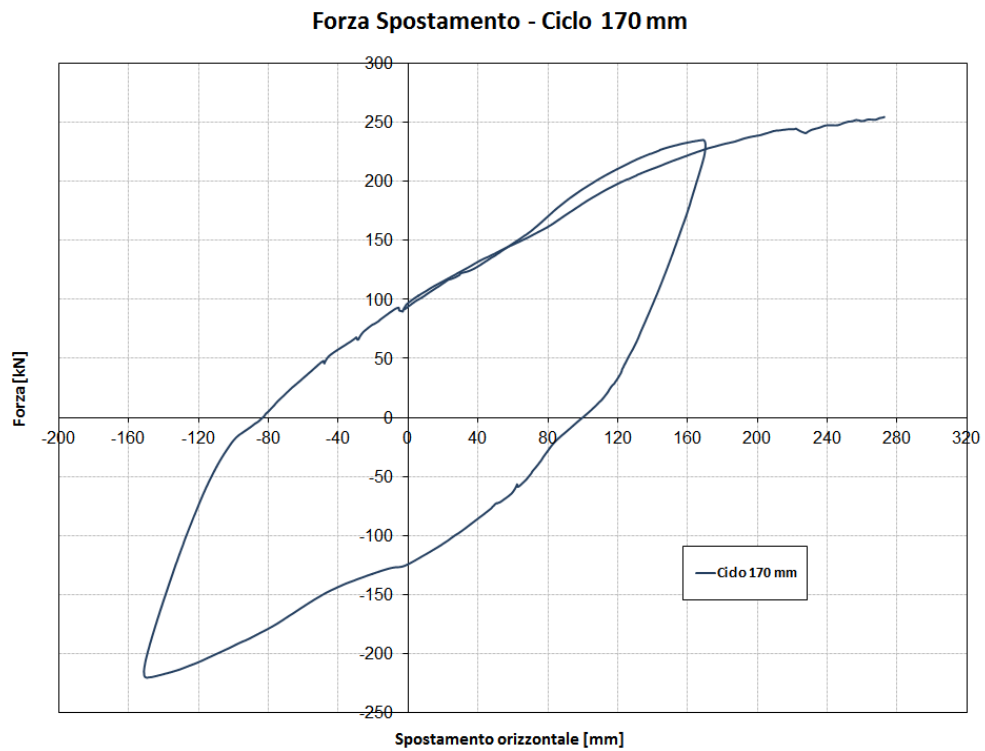


Figura 33 - Cicli Forza Spostamento a 170 mm

### 2.4.2 Grafici Momento - Rotazione

Il momento misurato è dato dalla forza applicata (variabile nel tempo) moltiplicata per il braccio (considerato costante durante la prova). Nei grafici seguenti ci si riferisce alla rotazione impressa alla base del pilastro, di conseguenza il braccio della forza è pari alla distanza tra la superficie del plinto e il punto di applicazione del carico.

La rotazione alla base del pilastro è stata calcolata a partire dalle misure dei due induttivi L5 e L6: detto  $\Delta x^+$  lo spostamento misurato da L5 e  $\Delta x^-$  lo spostamento misurato da L6 e sia  $\Delta l$  la distanza tra i due induttivi, la rotazione  $\varphi$  sarà data da:

$$\varphi = \frac{\Delta x^+ - \Delta x^-}{\Delta l}$$

La distanza  $\Delta l$  risulta essere pari a 450 mm.

In questo capitolo verranno riportati per ogni serie di cicli i grafici Momento-Rotazione: sull'asse delle ascisse è riportata la rotazione (in *rad*), mentre su quello delle ordinate il momento (in *kNm*) alla base del pilastro.

Anche per questi grafici, così come per quelli precedenti, i cicli procedono in senso orario partendo dal I quadrante per poi proseguire nel III quadrante. Analogamente a quanto fatto per i grafici Forza - Spostamento, anche in questo caso si è fatto uso della media mobile allo scopo di ridurre le oscillazioni presenti nelle misure (in particolare nei primi cicli). La media mobile sulle rotazioni è stata effettuata su 8 valori.

Di seguito si riporta il diagramma Momento-Rotazione, relativo all'intero svolgimento della prova.



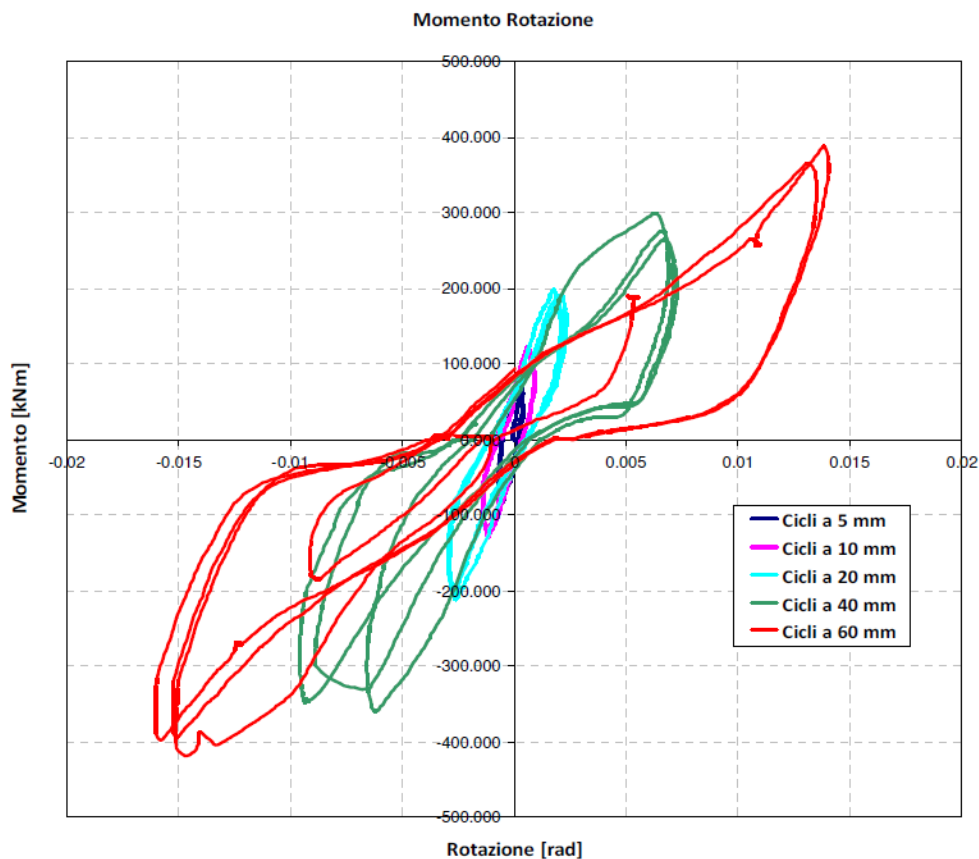


Figura 34 - Grafico momento Rotazione

Il grafico momento rotazione è leggibile sino al ciclo a 60 mm, oltre il distacco degli strumenti dovuto all'aumentare delle deformazioni del pilastro ha reso impossibile riportare i dati.

In Figura 35 è possibile vedere il primo ciclo ( corrispondente ad uno spostamento in sommità di 5 mm ) al quale è stato sottoposto il pilastro. Si noti come la rotazione in entrambe le direzioni sia molto piccola, dell'ordine di  $10^{-4} \text{ rad}$ , e quindi sebbene l'ipotesi di collegamento a incastro perfetto tra pilastro e fondazione non sia verificata, essa rimane tuttavia accettabile per carichi analoghi, proprio in virtù dei piccoli valori di rotazione che sono stati misurati. Il comportamento del pilastro è visibilmente elastico.

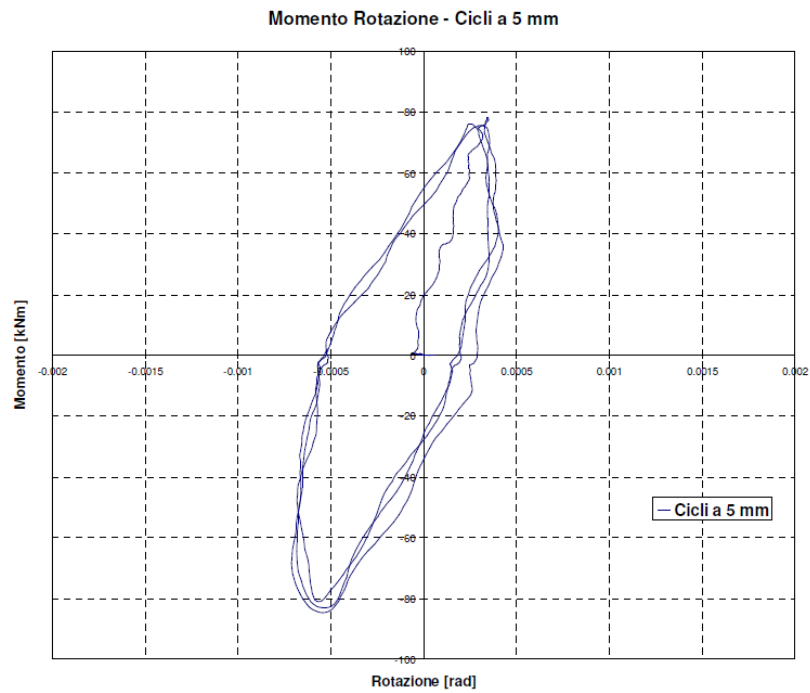


Figura 35 - Grafico Momento Rotazione – Ciclo 5 mm

A cominciare dai cicli a 10 mm, inizia a notarsi nei grafici un comportamento isteretico, tuttavia il pilastro può considerarsi ancora in campo elastico.

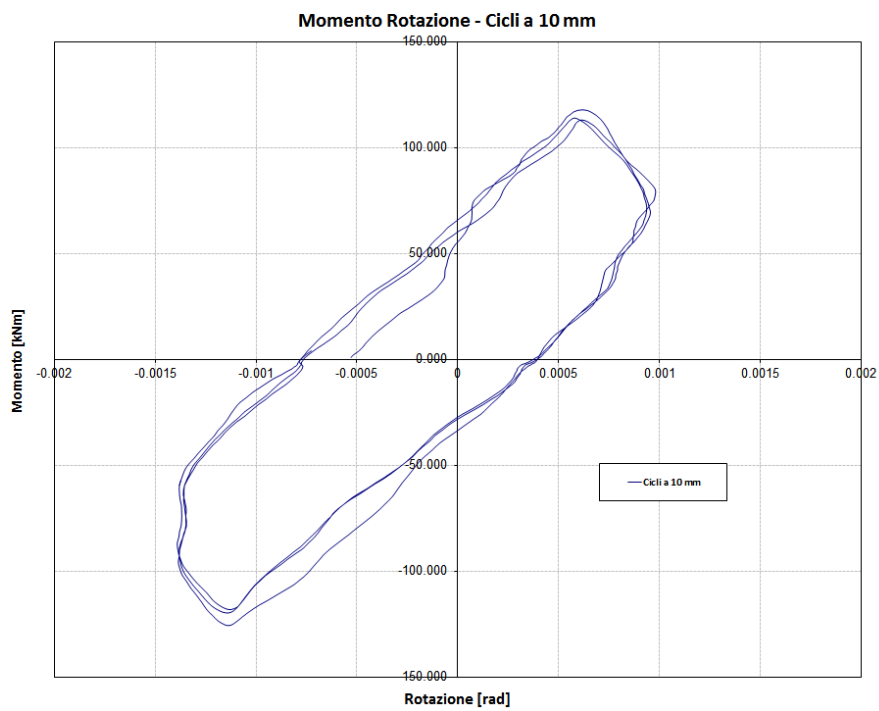


Figura 36 - Grafico Momento Rotazione – Ciclo 5 mm

### 2.4.3 Grafici Momento - Curvatura

Nel seguito si riportano i grafici Momento-Curvatura ottenuti dall'elaborazione dei dati raccolti attraverso gli altri quattro trasduttori di spostamento, ovvero L1, L2, L3 e L4. Mediante l'uso di questi sensori è stato possibile valutare la curvatura in due diversi punti sul provino, ai quali si è fatto riferimento anche per il calcolo del momento.

Gli induttori utilizzati sono stati montati in modo da avere una base di misura di 30 cm in direzione parallela all'asse verticale del pilastro. Come linea di riferimento per valutare il braccio della forza applicata, si è dunque considerata una linea orizzontale passante per il punto medio della base di misura. Con queste considerazioni, il braccio relativo ai trasduttori L1 e L3 è pari a 177 cm, mentre per gli strumenti L2 e L4 risulta essere 147 cm.

La curvatura media in queste posizioni notevoli è stata calcolata a partire dalle misure degli induttivi L1 e L3 per quanto riguarda il livello più basso, e dalle misure degli induttivi L2 e L4 relativamente al livello più alto.

Detto  $\Delta x^+$  lo spostamento misurato da un induttivo lato interno e  $\Delta x^-$  lo spostamento misurato da un induttivo sul lato opposto e siano  $\Delta l$  la distanza tra i due (sempre pari a 450 mm) e  $\Delta y$  la base di misurazione ( $\Delta y = 300 \text{ mm}$ ), la curvatura media  $\chi$  sarà data da:

$$\chi = \frac{\varphi}{\Delta y} = \frac{\Delta x^+ - \Delta x^-}{\Delta l \Delta y}$$

Di seguito è stato riportato i grafici momento-curvatura relativi ai due livelli di misura. Sull'asse delle ascisse è riportata la curvatura (in  $m^{-1}$ ), mentre su quello delle ordinate il momento (in  $kNm$ ).

I trasduttori L1 e L3, corrispondenti ad una distanza di 1.77 m dalla sommità del pilastro, forniscono risultati fino ai cicli a 100 mm, durante i quali si è verificato un distacco degli strumenti.

Dall'elaborazione dei risultati dei dati relativi ai trasduttori L1 e L3, sono stati ottenuti i seguenti grafici momento curvatura:

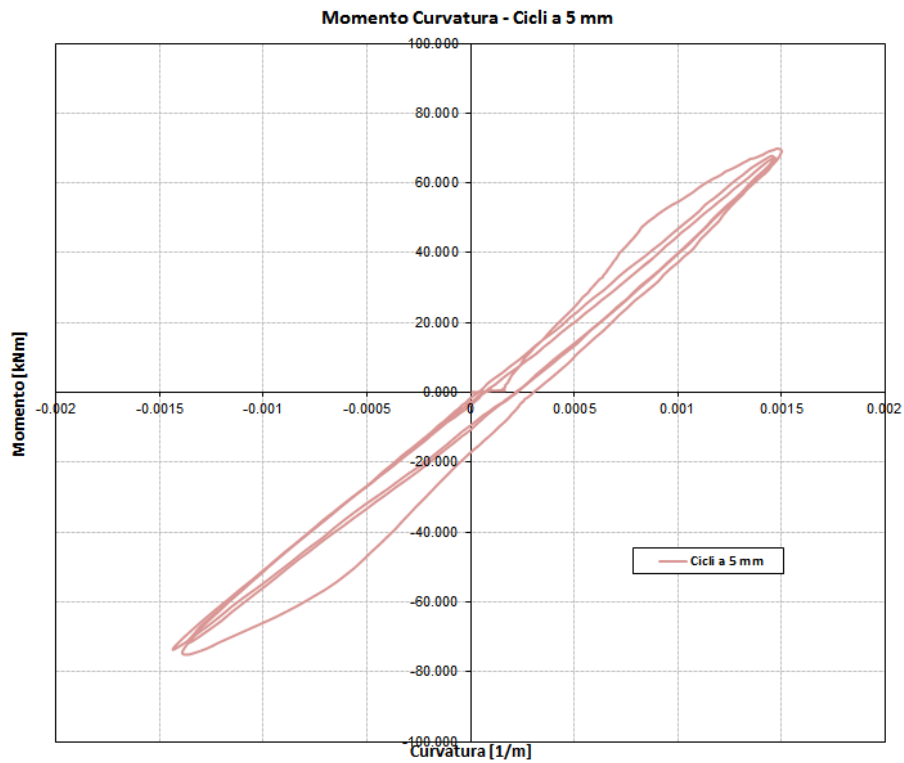


Figura 37 - Momento Curvatura - Ciclo a 5 mm - trasduttori L1 e L3

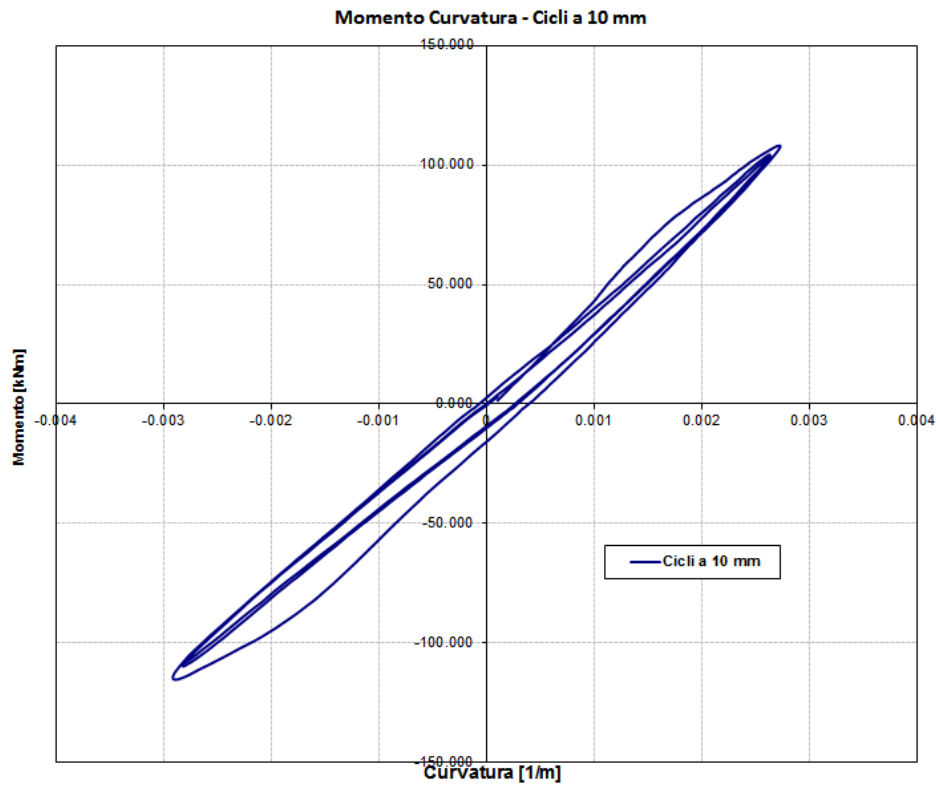


Figura 38 - Momento Curvatura - Ciclo a 10 mm - Trasduttori L1 e L3

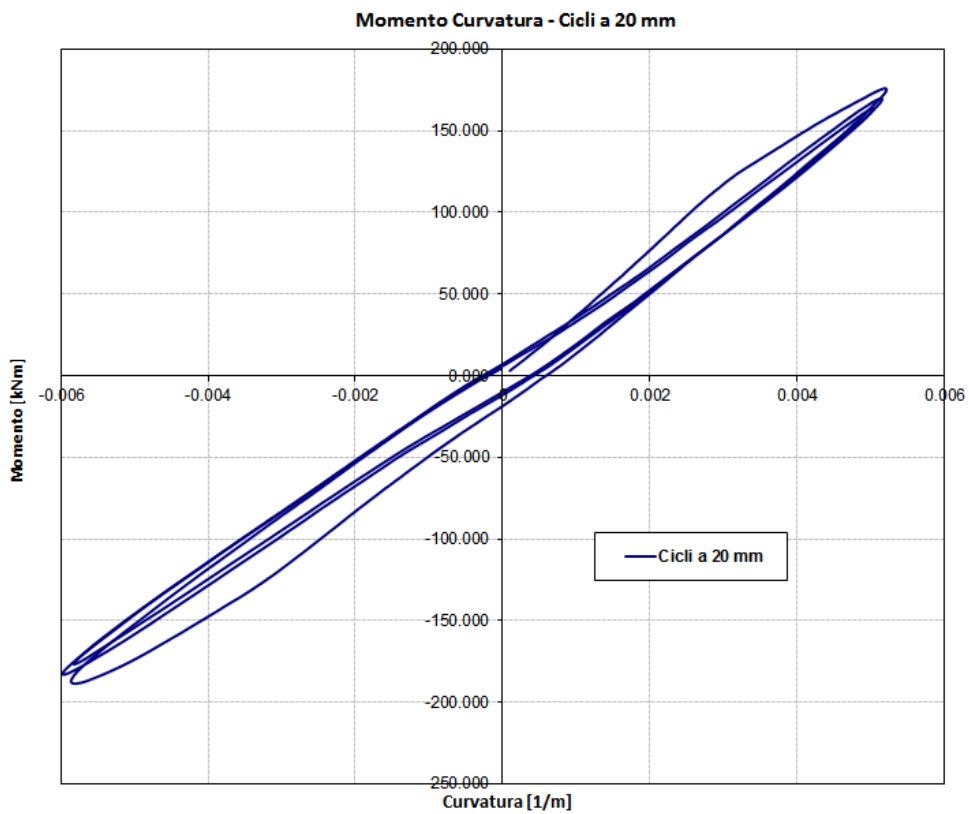


Figura 39 - Momento Curvatura - Ciclo a 20 mm - Trasduttori L1 e L3

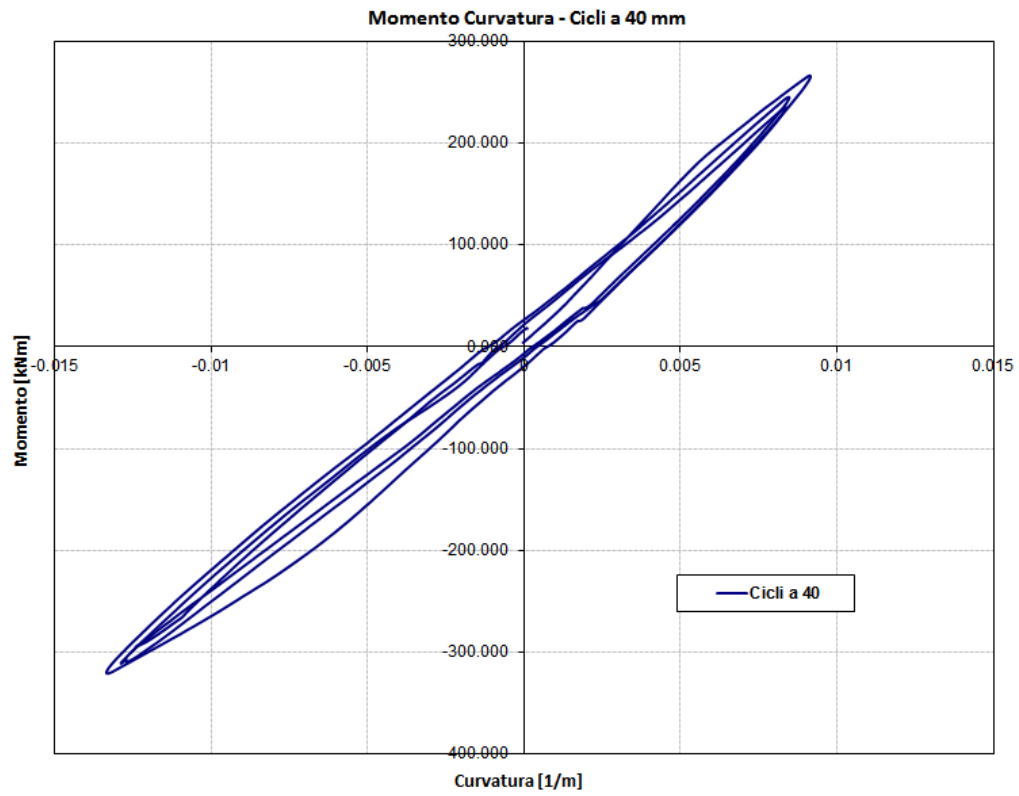


Figura 40 - Momento Curvatura - Ciclo a 40 mm - Trasduttori L1 e L3

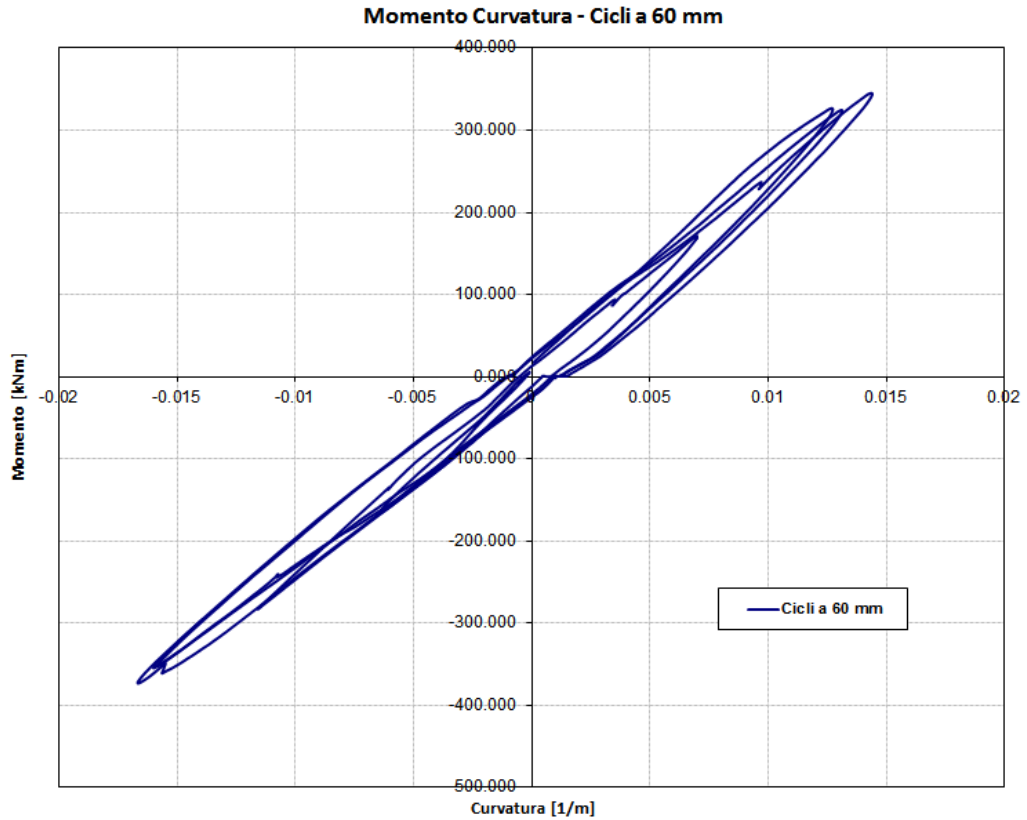


Figura 41 - Momento Curvatura - Ciclo a 60 mm - Trasduttori L1 e L3



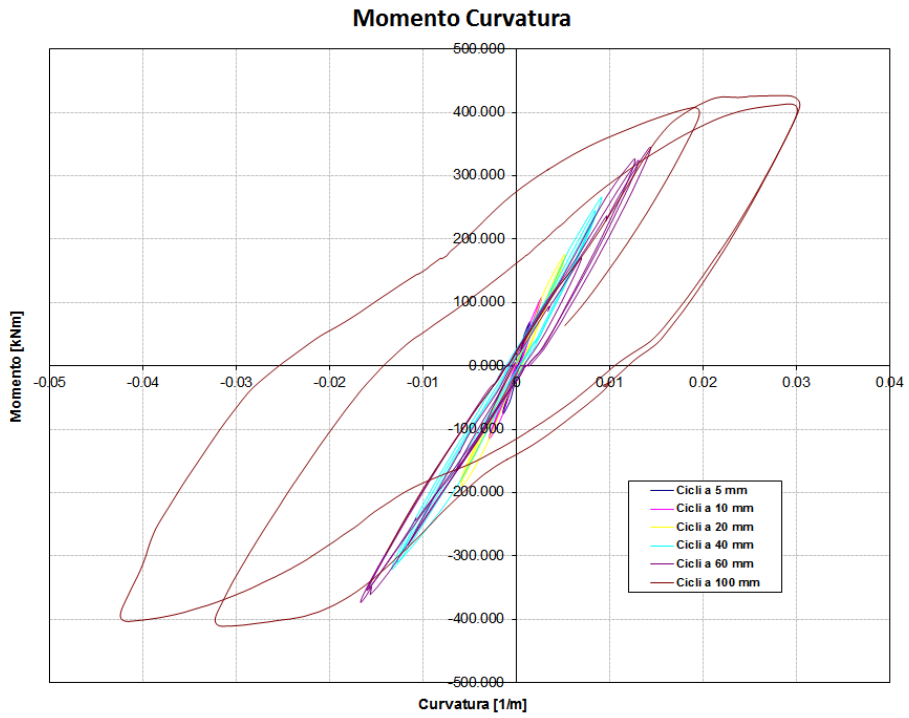


Figura 42 - Momento Curvatura – Tutti i cicli - Trasduttori L1 e L3

Dai dati ottenuti con i trasduttori L2 e L4, corrispondenti una distanza di 1.47 m dalla sommità del pilastro, sono stati ottenuti i seguenti grafici momenti curvatura:

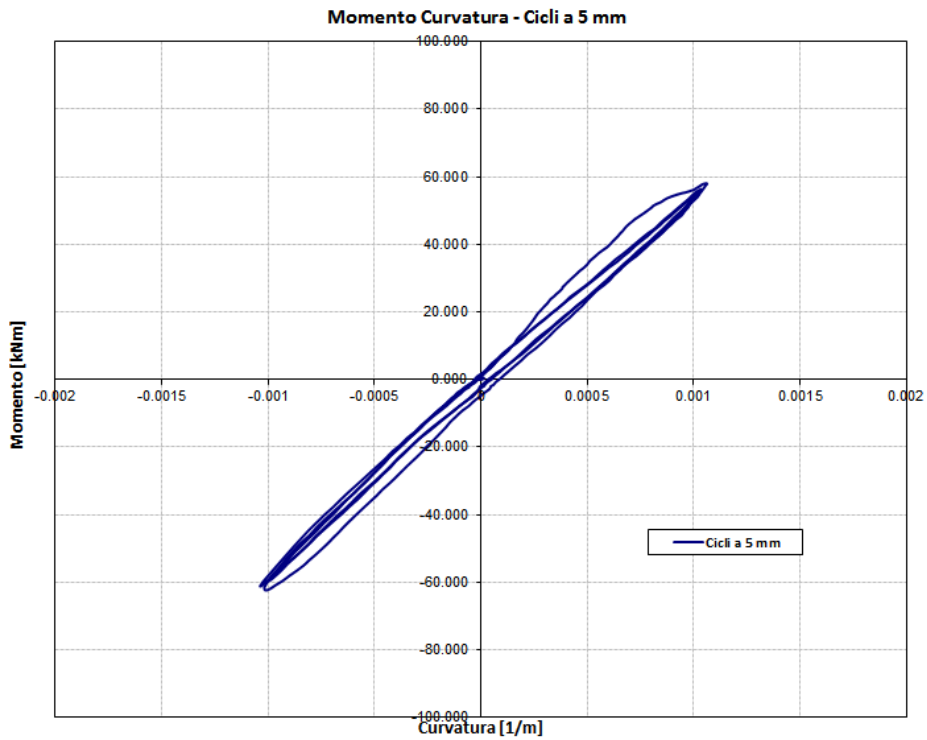


Figura 43 - Momento Curvatura - Ciclo a 5 mm - Trasduttori L1 e L3

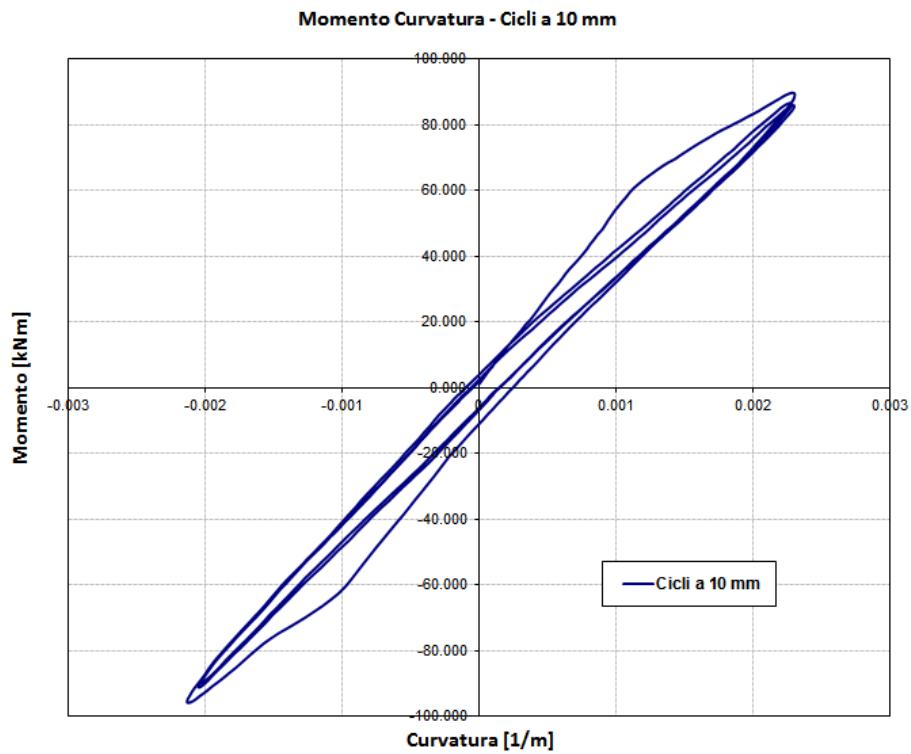


Figura 44 - Momento Curvatura - Ciclo a 10 mm - Trasduttori L1 e L3

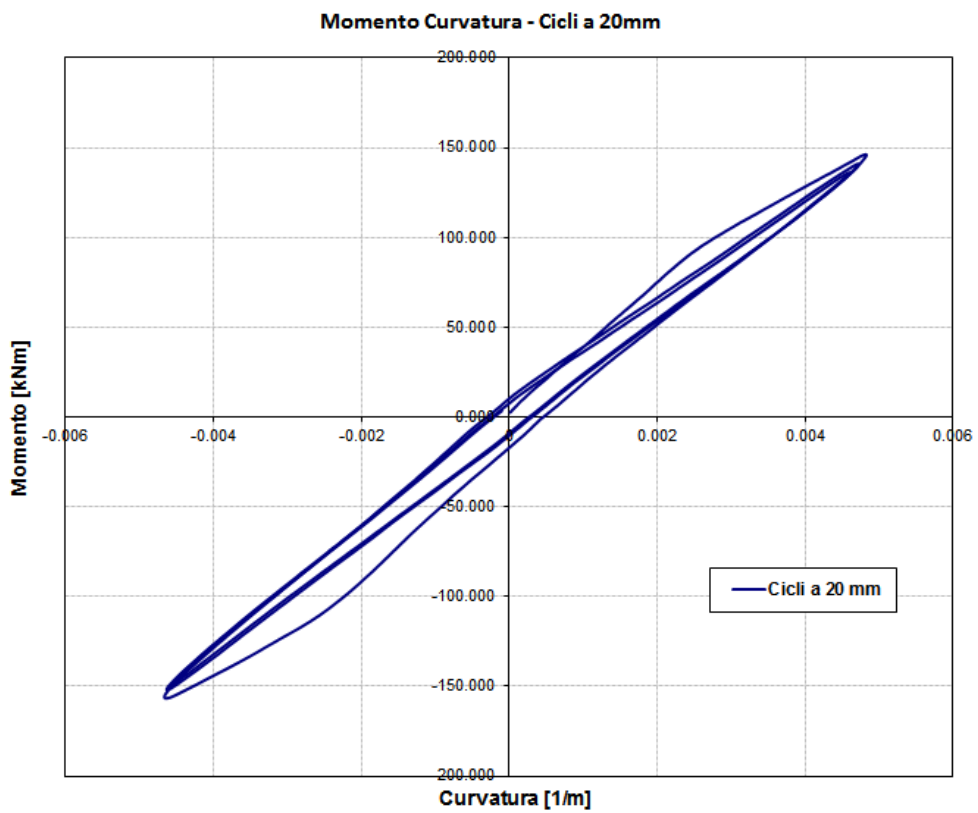


Figura 45 - Momento Curvatura - Ciclo a 20 mm - Trasduttori L1 e L3

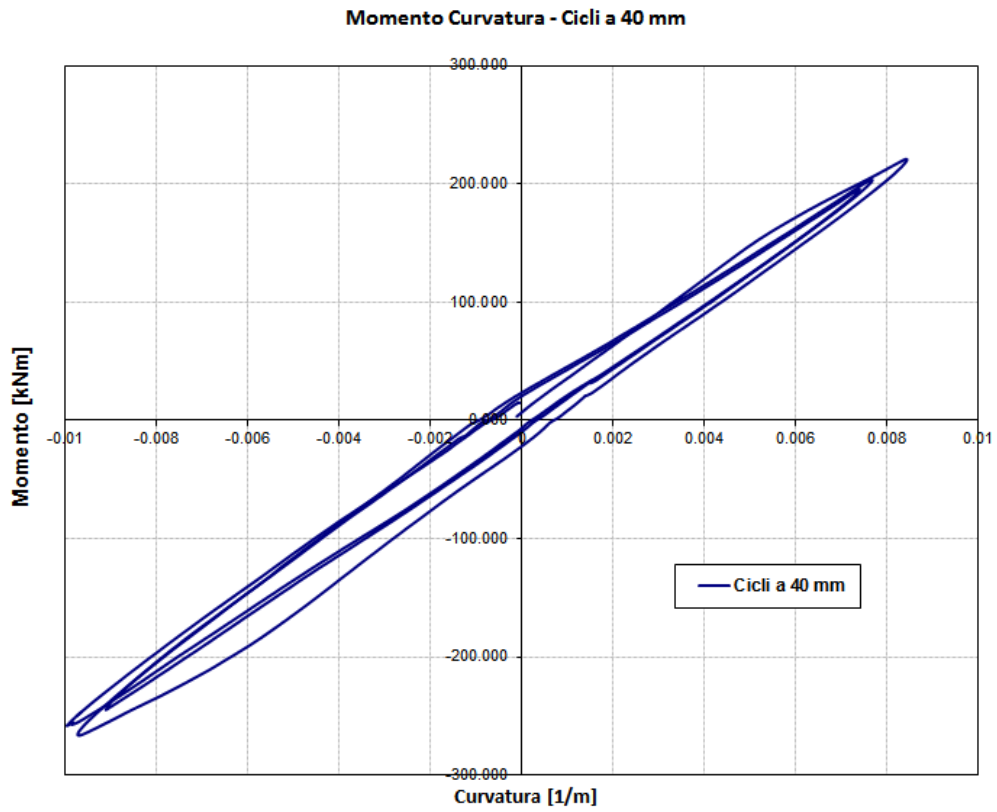


Figura 46 - Momento Curvatura - Ciclo a 40 mm - Trasduttori L1 e L3

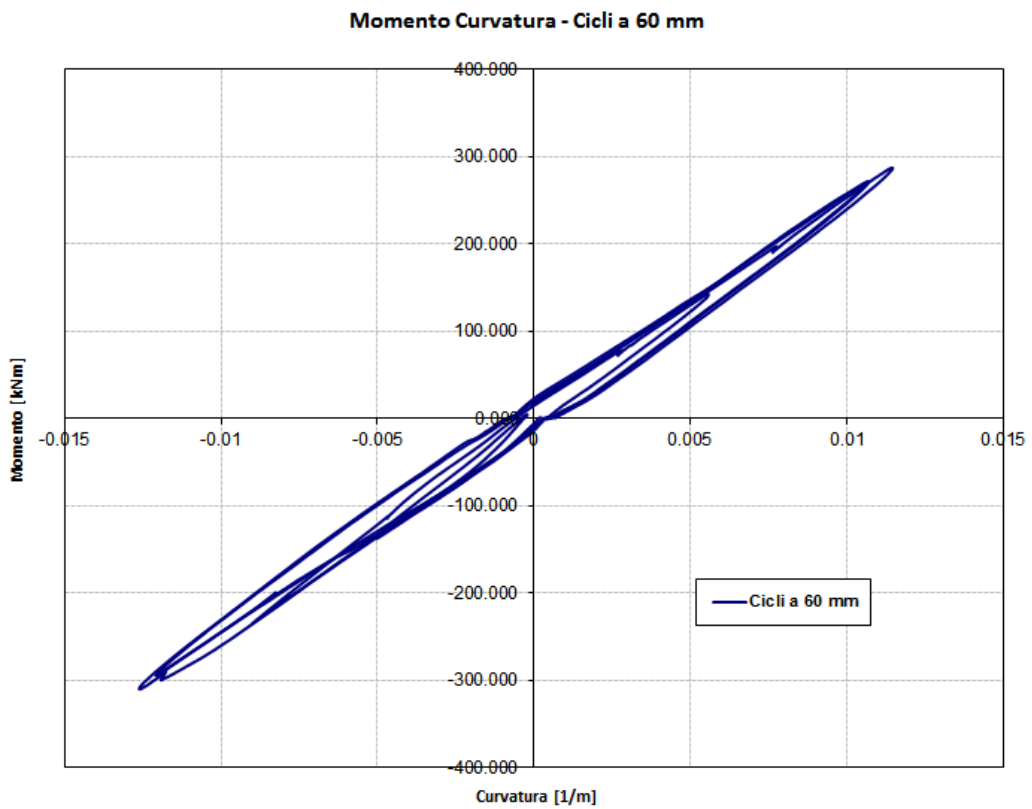


Figura 47 - Momento Curvatura - Ciclo a 60 mm - Trasduttori L1 e L3

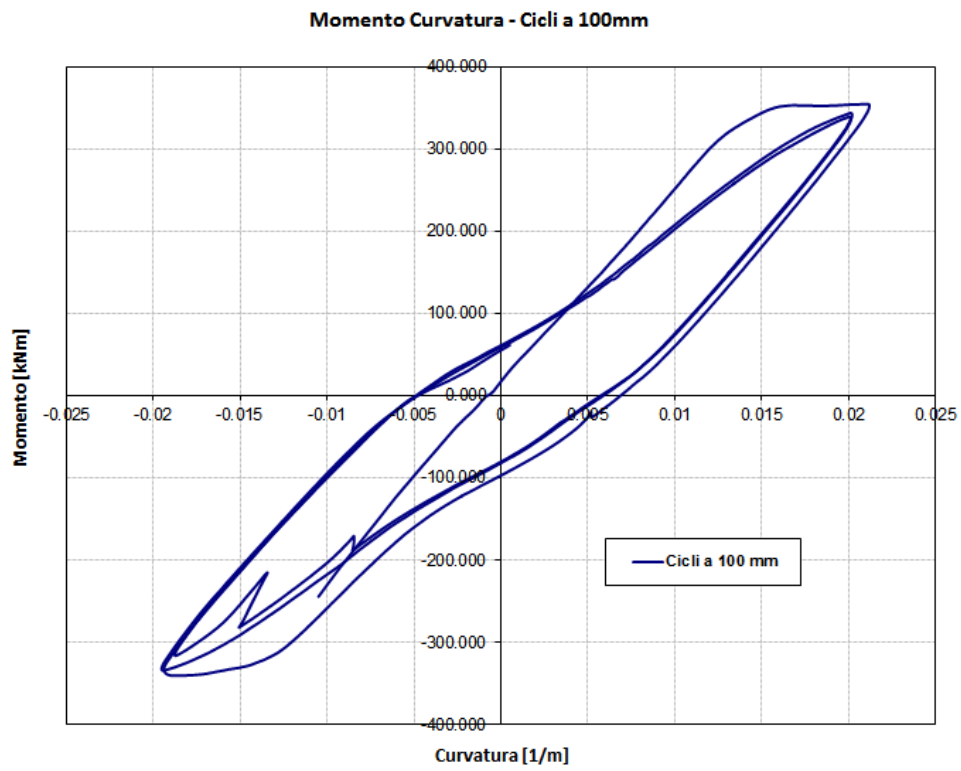


Figura 48 - Momento Curvatura - Ciclo a 100 mm - Trasduttori L1 e L3

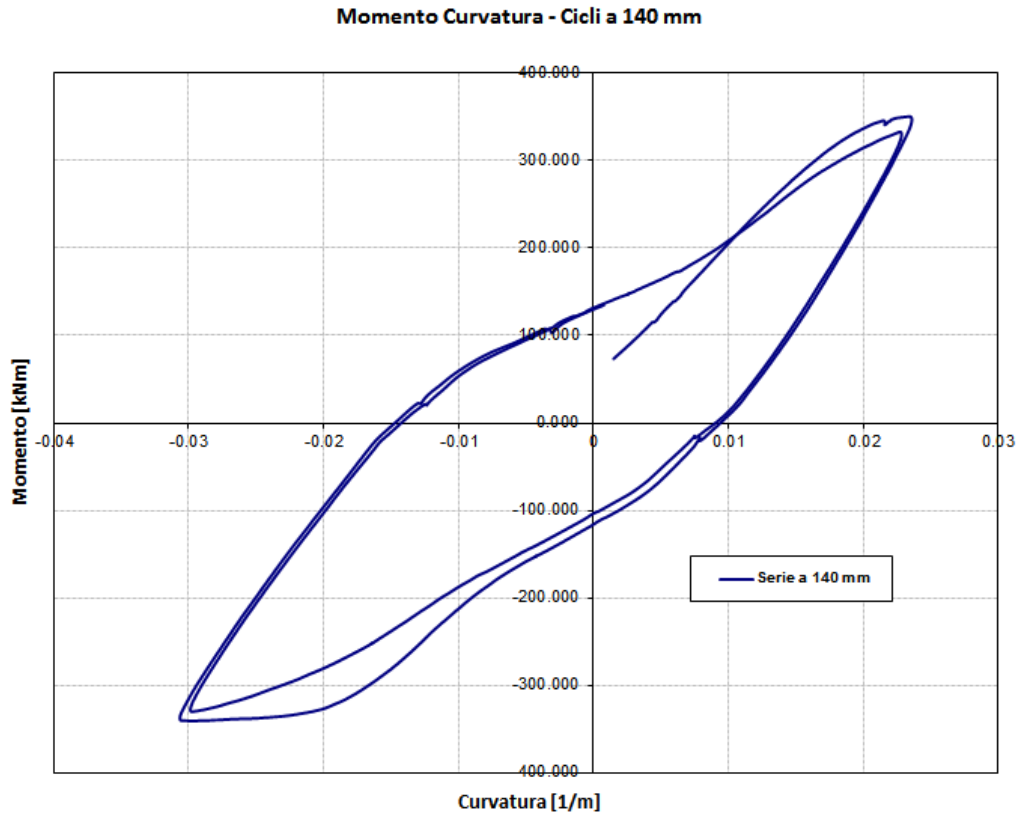


Figura 49 - Momento Curvatura - Ciclo a 140 mm - Trasduttori L1 e L3

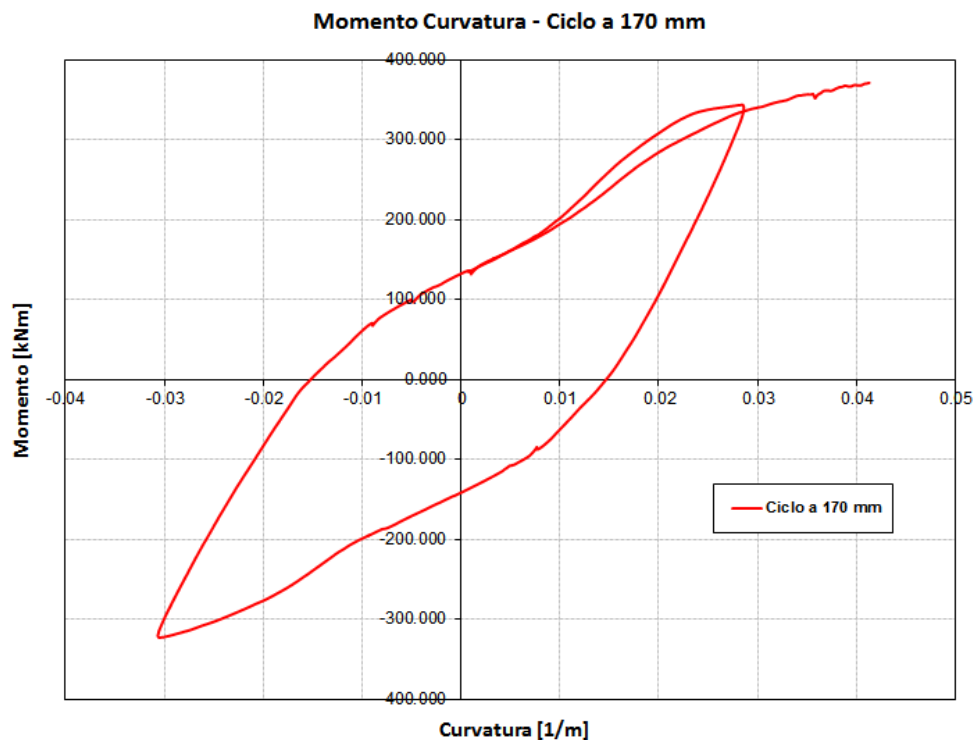


Figura 50 - Momento Curvatura - Ciclo a 170 mm - Trasduttori L1 e L3

Nel grafico di Figura 51 si riassumono i cicli Momento - Curvatura registrati al livello alto dagli induttivi L2 ed L4, si osserva come la plasticizzazione abbia inizio, manifestando cicli di isteresi sempre più ampi dal ciclo a 100 mm di spostamento massimo.

Il confronto con i grafici Momento - Curvatura registrati al livello inferiore mostra come i valori di curvatura crescano man mano che ci si avvicina alla base del pilastro. Tuttavia il fatto che il pilastro riesca a sviluppare deformazioni anelastiche lungo la sua altezza è una dimostrazione del fatto che il collegamento in fondazione è efficace nel ripristinare la continuità materiale.

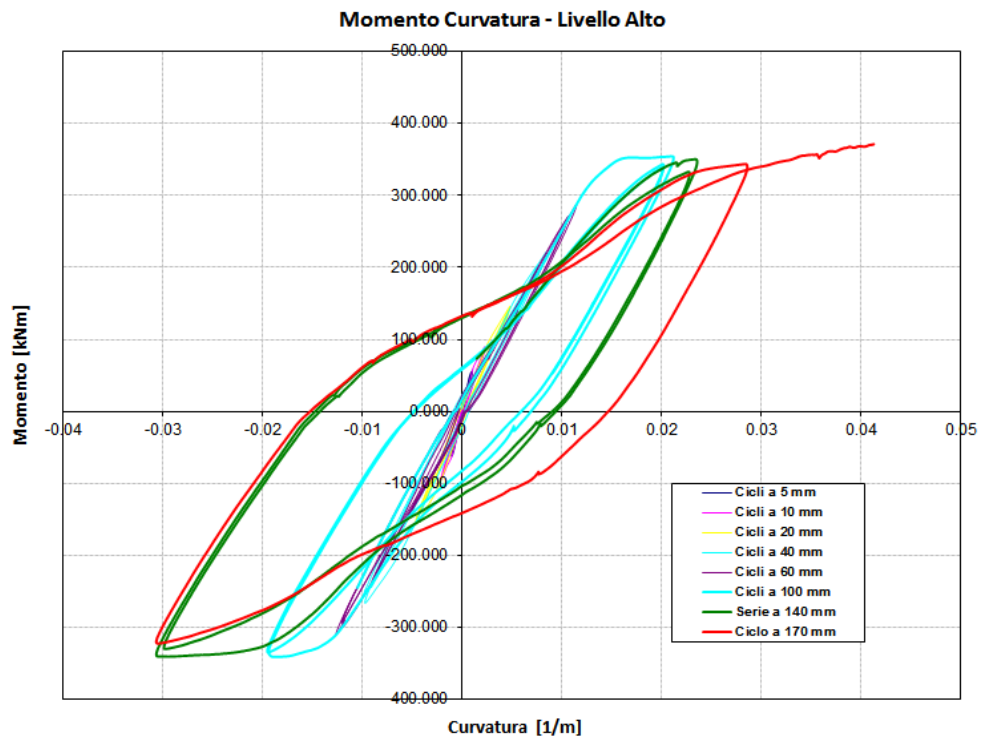


Figura 51 - Momento Curvatura –Tutti i cicli -Trasduttori L1 e L3



## 2.4.4 Valutazione dei contributi per lo spostamento in sommità

### 2.4.4.1 Contributo ricavato dai grafici Momento - Curvatura

Il primo contributo calcolato, per quanto riguarda gli spostamenti in sommità, è quello dedotto dai grafici delle curvature. L'andamento della curvatura è stato schematizzato come bilineare lungo il pilastro. Allo scopo di ricavare lo spostamento in sommità, per ogni step di carico è stato calcolato il momento statico di questo andamento.

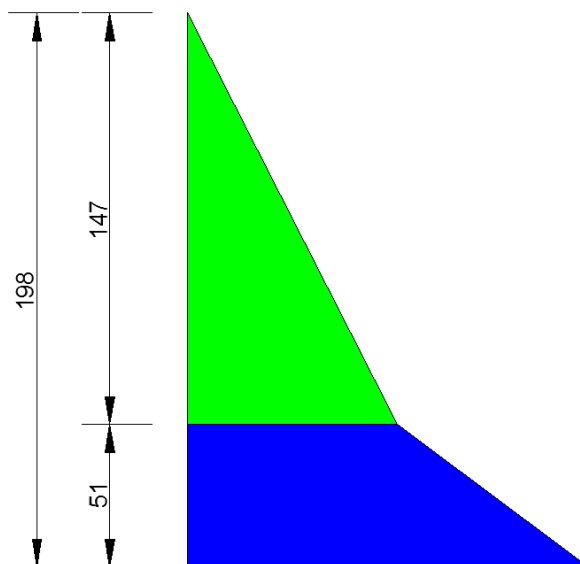


Figura 52 - Andamento della curvatura

Come detto in precedenza i trasduttori L1 e L3 si sono distaccati durante i cicli a 100 mm; di conseguenza gli spostamenti ricavati dall'andamento della curvatura sono stati calcolati come descritto in precedenza solo fino ai cicli a 60 mm. Di conseguenza gli spostamenti nei cicli finali sono stati assunti come una quota parte di quelli misurati sperimentalmente. Il rapporto fra spostamenti calcolati e misurati nei cicli finali è stato assunto pari alla media di quello ottenuto per i cicli iniziali.

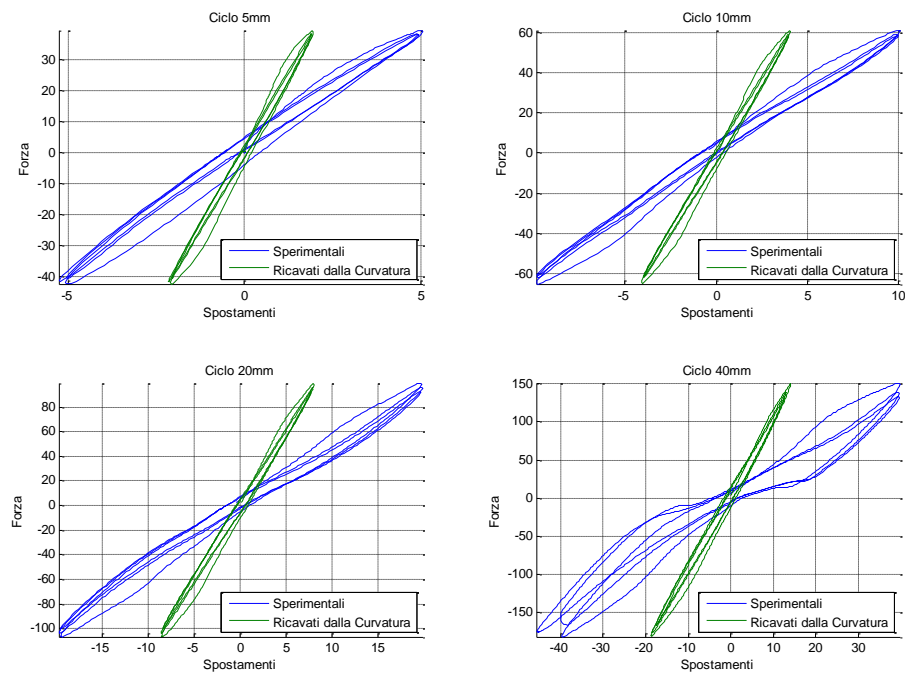


Figura 53 - Confronto spostamenti calcolati da grafici Momento - Curvatura con quelli sperimentali – Cicli Iniziali

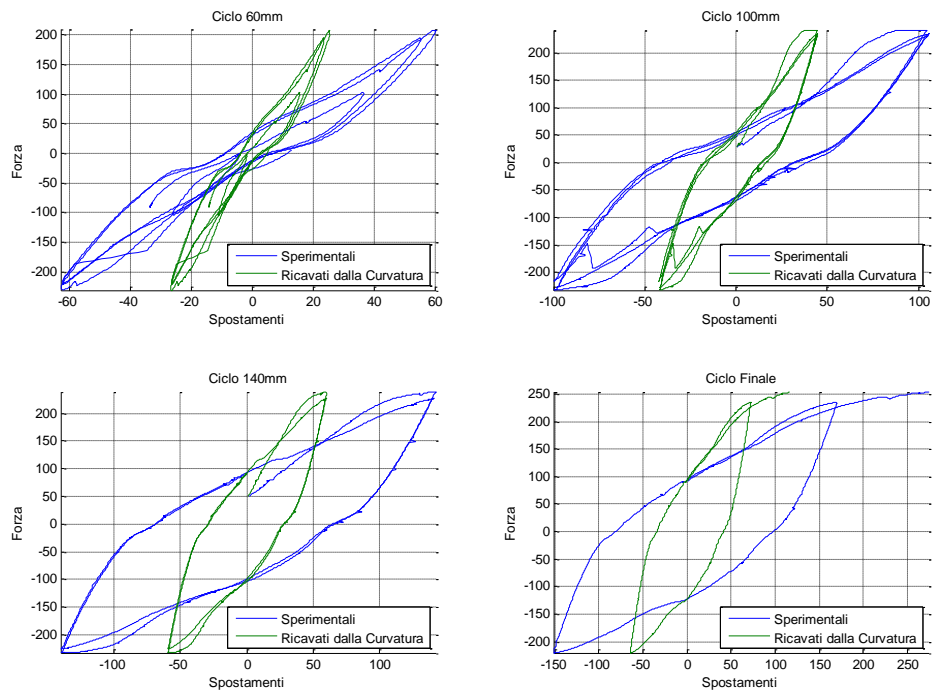


Figura 54 - Confronto spostamenti calcolati da grafici Momento - Curvatura con quelli sperimentali - Cicli Finali

### 2.4.4.2 Contributo ricavato dai grafici Momento - Rotazione

Il contributo agli spostamenti in sommità, dovuto alla rotazione alla base, è stato ricavato semplicemente moltiplicando la rotazione misurata con l'altezza del pilastro pari a 1.98 cm.

Di seguito viene mostrato il confronto fra i contributi appena calcolati e i dati sperimentali per le prime fasi di carico:

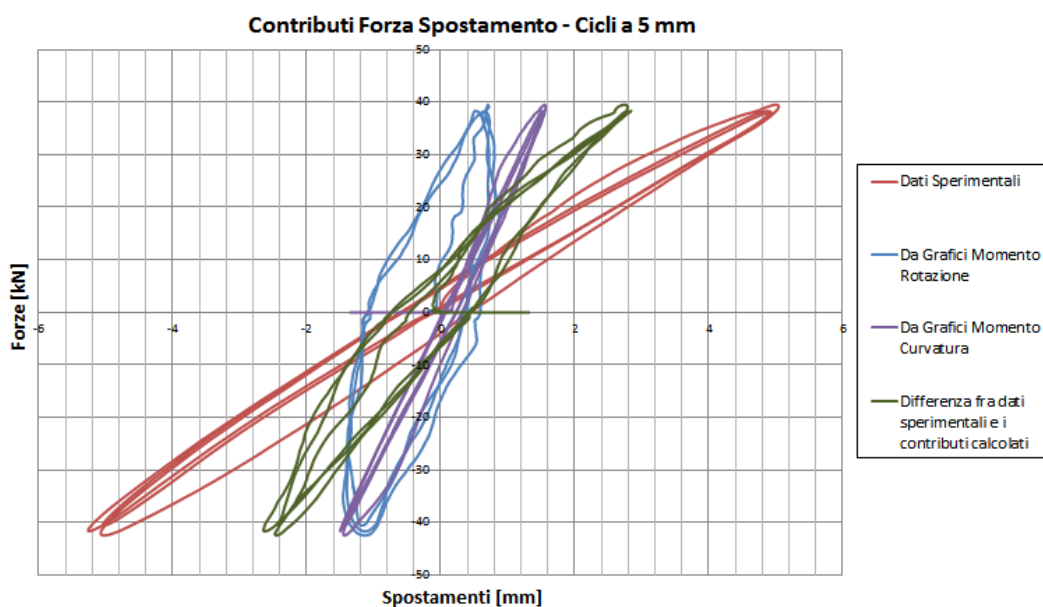


Figura 55 - Confronto fra i contributi per lo spostamento in sommità - Cicli a 5mm

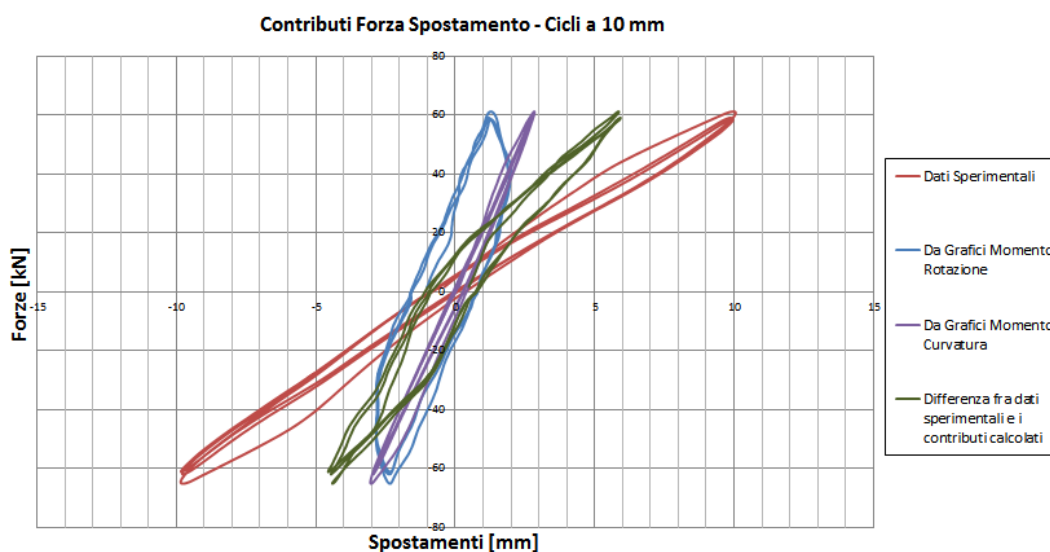


Figura 56 - Confronto fra i contributi per lo spostamento in sommità - Cicli a 10mm

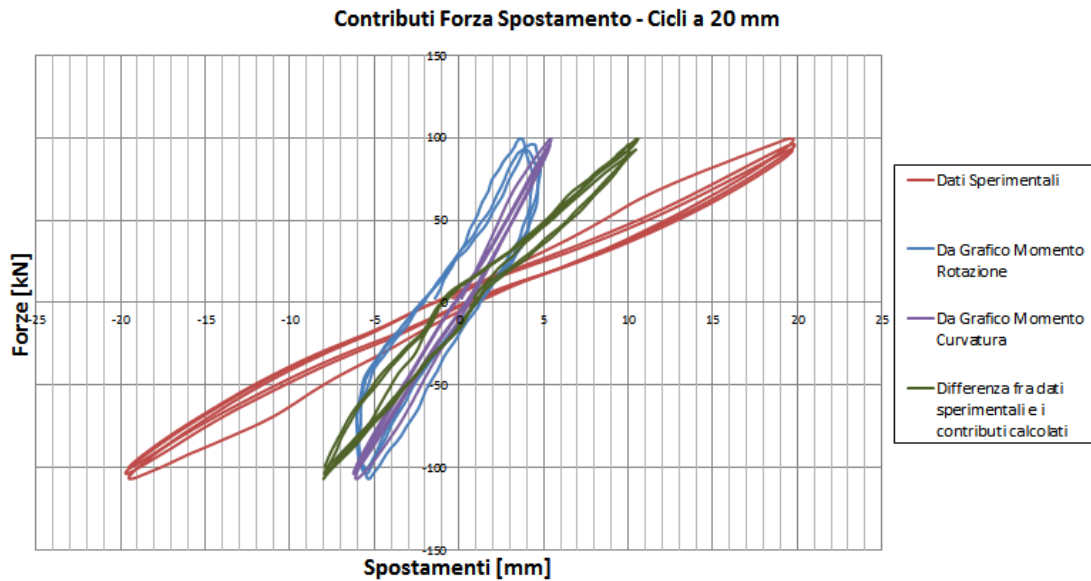


Figura 57 - Confronto fra i contributi per lo spostamento in sommità - Cicli a 20mm

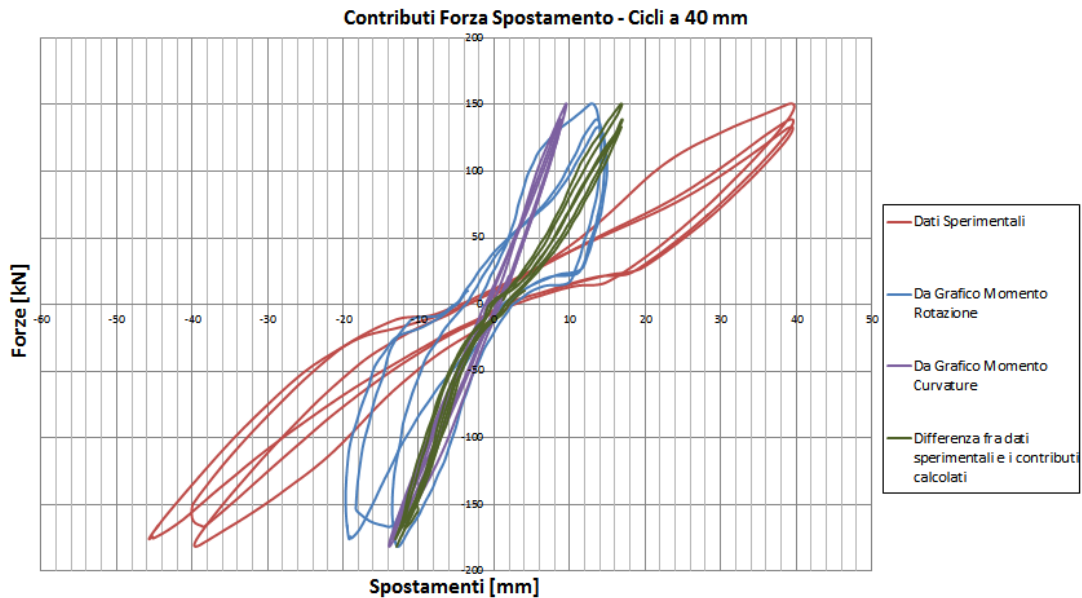


Figura 58 - Confronto fra i contributi per lo spostamento in sommità - Cicli a 40mm

Come si può notare i contributi calcolati dai grafici Momento- Curvatura e Momento – Rotazione giustificano solo una parte degli spostamenti misurati in sommità.

Durante lo svolgimento della tesi questo divario è stato giustificato ipotizzando una rotazione rigida del plinto. In realtà le cause effettive possono essere diverse, come per esempio un getto di malta non ottimale o un ancoraggio alla pavimentazione inadeguato.

## **3 Presentazione dei modelli utilizzati**

### **3.1 Presentazione del software**

Il programma utilizzato è OpenSees (The Open System for Earthquake Engineering Simulation), è un software per la simulazione del comportamento strutturale non lineare e geotecnico di elementi sottoposti ad azione sismica. L'applicazione è stata sviluppata originariamente per essere impiegata come strumento computazionale per ricerche di ingegneria sismica presso il Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) e dal 2004 viene utilizzato anche dal Network for Earthquake Engineering Simulation (NEES), i quali sono due tra i più importanti centri di ricerca sui terremoti a livello mondiale.

Il grande successo di questo software deriva da alcuni aspetti, come la grande quantità di modelli, sia di analisi che sui materiali, già implementati, ma soprattutto la sua distribuzione di tipo “open-source” e la possibilità di modificare a proprio piacimento il codice di calcolo.

Il primo aspetto è di fondamentale importanza in quanto grazie alla vasta libreria di modelli già disponibili è possibile eseguire simulazioni estremamente precise, eliminando quindi gran parte delle approssimazioni che si trovano nei software commerciali, che quindi risultano meno validi nel campo della mera ricerca. E' possibile quindi modellare il comportamento di un elemento realizzato con un certo materiale introducendo gradi di complessità sempre maggiori. Allo stesso modo il modello matematico applicato alla schematizzazione dell'elemento stesso, può essere variato nella sua complessità, valutandone il comportamento anche qui con l'obiettivo di raggiungere la massima precisione possibile, compatibilmente con i tempi e le intrinseche condizioni numeriche.

La distribuzione “*open-source*” del software, quindi a licenza gratuita, insieme alla possibilità di modificarne il codice, ne ha permesso una rapida diffusione. Il sito di riferimento fornisce tutte le informazioni necessarie sull’architettura del programma, l’accesso al codice sorgente e lo sviluppo dello stesso, in modo da permettere a tutti gli utenti qualificati, che siano studenti, ricercatori o docenti, di poter modificare e finalizzare a scopi specifici il codice, migliorando il lavoro precedentemente sviluppato da altri. Questo ovviamente permette di avere un programma in continua evoluzione e sempre al passo con le nuove teorie formulate.



## 3.2 Materiali

Per la realizzazione del modello oggetto dello studio sono stati utilizzati una serie di materiali scelti tra quelli presenti nella libreria di OpenSees. Ognuno di questi deriva dall'implementazione di una specifica teoria che, in relazione al suo grado di complessità, è in grado di simulare meglio di altri un certo aspetto del comportamento del materiale in questione. Ovviamente all'aumentare della complessità e della precisione attesa dal modello che descrive il comportamento del materiale, cresce il numero di parametri necessari a definirlo compiutamente. Questo aspetto è particolarmente importante in quanto va accuratamente considerato in riferimento al comportamento che si intende simulare di un elemento strutturale. Solo nella misura in cui le proprietà dei materiali siano adeguatamente conosciute l'utilizzo di teorie particolarmente sofisticate è indicato; viceversa ove non tutti i parametri costitutivi siano noti con un buon grado di approssimazione il rischio di ottenere risultati che si discostano molto dalla realtà non compensa le maggiori informazioni che se ne potrebbero trarre.

Posto che il modello di studio può solo tentare di cogliere una visione riduttiva del reale comportamento del materiale studiato e ogni teoria tende a cogliere al meglio alcuni specifici aspetti del problema piuttosto di altri, risulta determinante la scelta del modello da impiegare nei confronti del comportamento più interessante ai fini dello studio.

Per quanto riguarda il calcestruzzo sono stati analizzati i seguenti modelli di materiali:

1. Concrete01 Material -- Zero Tensile Strength;
2. Concrete04 Material -- Popovics Concrete Material;
3. Concrete06 Material
4. Concrete07 – Chang & Mander's 1994 Concrete Model;

Per l'acciaio si ha invece:

1. Steel 01 Material;

2. Steel 02 Material--Giuffré-Menegotto-Pinto
3. Reinforcing Steel Material;

Infine per lo studio del comportamento del nodo alla base sono stati analizzati i seguenti materiali:

1. Bond SP01 – Strain Penetration Model for Fully Anchored Steel Reinforcing Bars
2. BARSLIP Material
3. Elastic Uniaxial Material
4. Hysteretic Material

### 3.2.1 Concrete01 Material - Zero Tensile Strength

Il concrete01 è stato impiegato nella fase iniziale della modellazione per rappresentare il comportamento del calcestruzzo non confinato. Questo fa riferimento al modello di Kent, Scott e Park di calcestruzzo con degrado lineare della rigidezza nei rami di scarico e ricarico in accordo con i lavori di Karsan e Jirsa,(1969) e senza tenere in conto della resistenza a trazione.

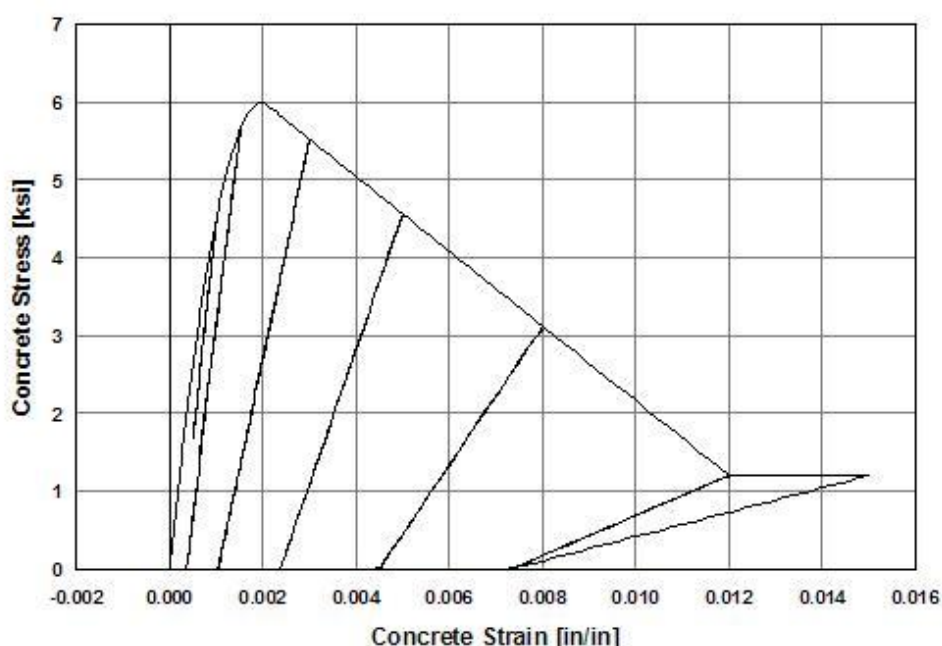


Figura 59 – Esempio di legame costitutivo per il Concrete01

Il modello in questione, che per la sua semplicità richiede solo quattro parametri (tensione e deformazione di picco e tensione e deformazione ultime) è stato tuttavia accantonato nelle successive modellazioni in quanto non è in grado di rappresentare i cicli di isteresi che si osservano sperimentalmente ad ogni scarico/ricarico e che sono fondamentali per rappresentare il degrado di resistenza e rigidezza, tipico delle prove cicliche.

### 3.2.2 Concrete04 Material – Popovics Concrete Material

Il concrete04 fa riferimento al modello di calcestruzzo proposto da Popovics (1973). Questo per certi aspetti è simile al modello precedentemente descritto in quanto anche per questo non si hanno cicli isteretici nei rami di scarico/ricarico, tuttavia non viene trascurata la resistenza a trazione del calcestruzzo (Figura 60).

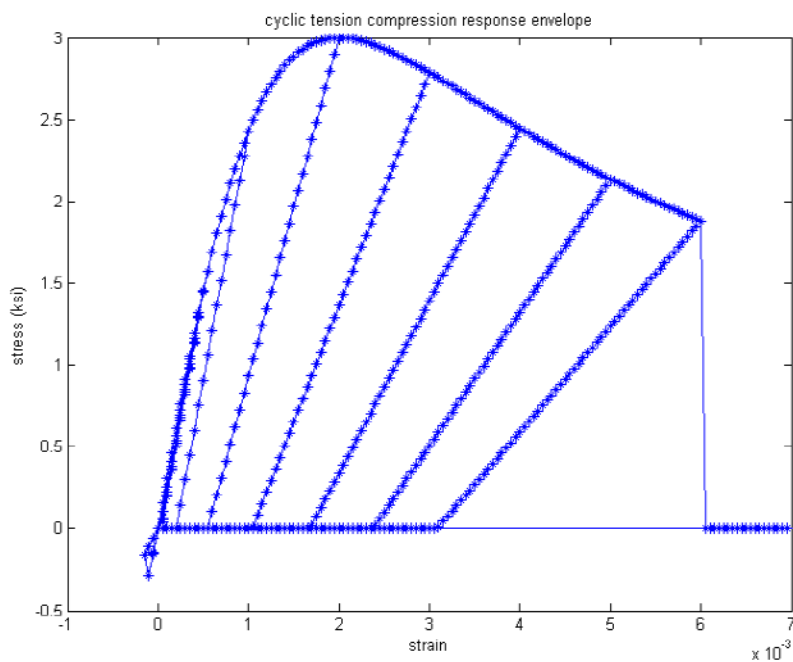


Figura 60 - Esempio di legame costitutivo per il Concrete04

Il numero di parametri richiesti per il modello in questione è maggiore rispetto al caso precedente ed in particolare è possibile modificare l'andamento e quindi la forma del ramo di softening e il punto in corrispondenza del quale lo si interrompe. Tale modello è stato impiegato nelle prime fasi dell'analisi per modellare il calcestruzzo del nucleo confinato le cui caratteristiche sono state calcolate con la teoria di Mander, Priestley e Park (1988).

### 3.2.3 Concrete06 Material

Il Concrete06 è stato sviluppato sulla base dei primi modelli trattati, in modo da essere abbastanza semplice, modificandone, però, il comportamento in condizione di scarico/ricarico in maniera tale da permettere la formazione di un piccolo ciclo isteretico che permette al modello di guadagnarne in precisione, necessaria nei comportamenti ciclici ed in più considera anche la resistenza a trazione.

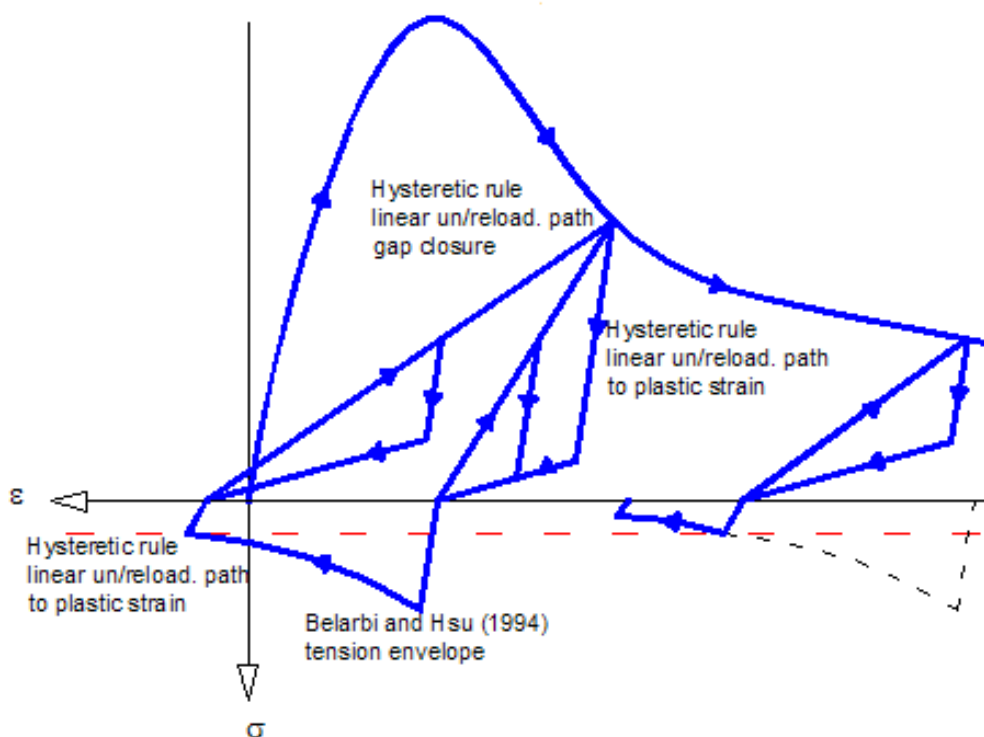


Figura 61 - Esempio di legame costitutivo per il Concrete06

I parametri necessari a definire il modello sono complessivamente nove, di cui cinque definiscono la forma del ramo di softening e del comportamento isteretico. Questo aspetto potrebbe costituire un problema in assenza di prove specifiche, tuttavia i parametri di correlazione raccomandati dal manuale di OpenSees permettono di ottenere ottimi risultati.





### 3.2.5 Confronto tra i modelli di calcestruzzo analizzati

Di seguito vengono mostrati e commentati i grafici Forza in Sommità – Spostamento e Tensione – Deformazione dei vari modelli di calcestruzzo analizzati.

Gli spostamenti impressi sono quelli dedotti dai grafici Momento – Curvatura, come descritto nel Paragrafo 2.4.4.1.

Il modello utilizzato per l'acciaio è invece il Reinforcing Steel Material.

#### 3.2.5.1 Concrete01 Material – Zero Tensile Strength

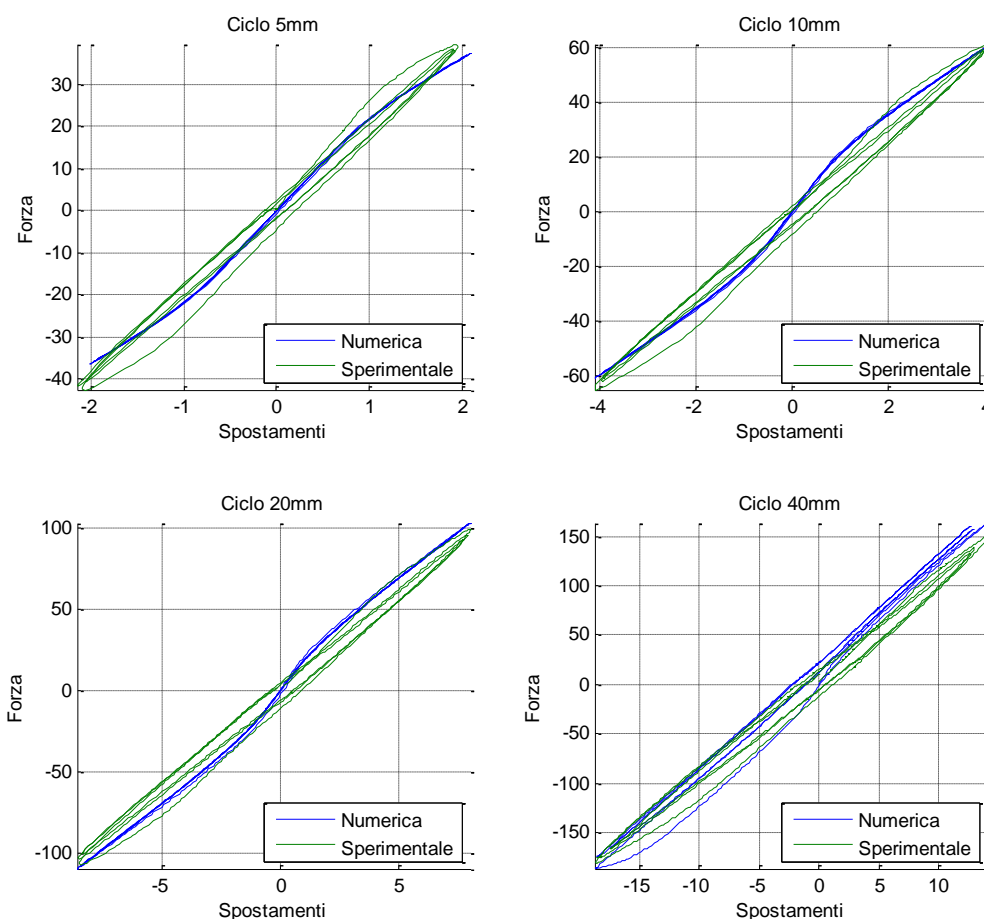


Figura 63 – Grafico Forza - Spostamenti – Concrete01 – Cicli Iniziali

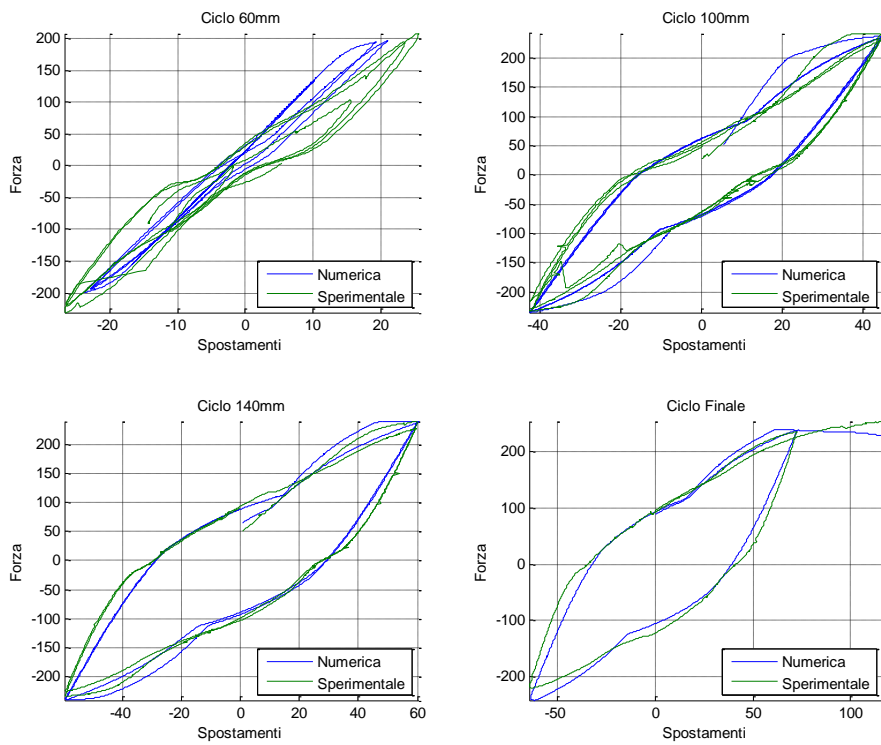


Figura 64 – Grafico Forza - Spostamenti – Concrete01 – Cicli Finali

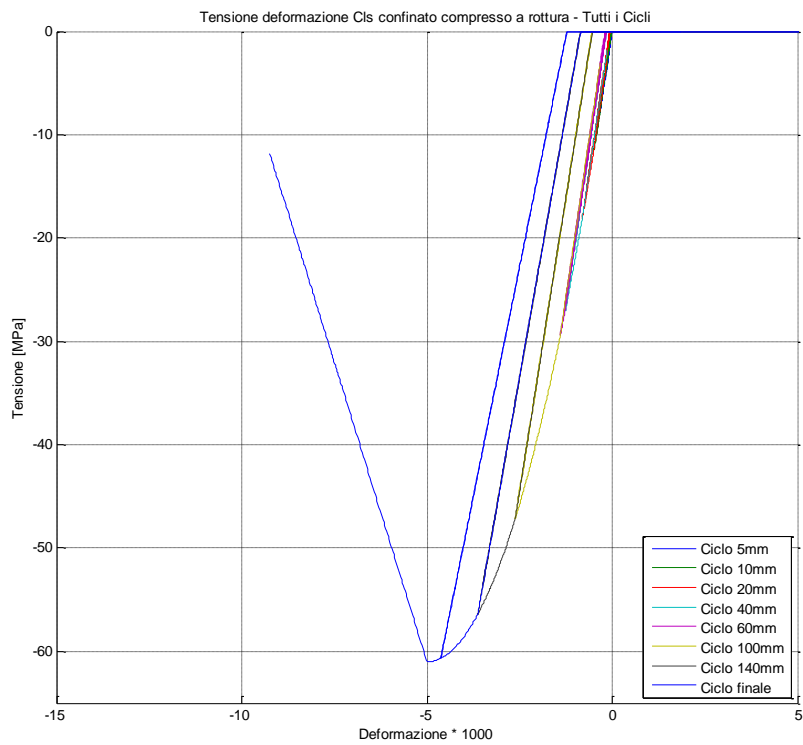


Figura 65 – Grafico Tensione- Deformazione – Concrete01 a livello del copriferro

Come si può notare dai primi tre grafici in Figura 63, questo modello non è in grado di rappresentare i cicli di isteresi, inoltre in Figura 65 i cicli di ricarico per piccoli spostamenti della Tensione – Deformazione sono sovrapposti a quelli di carico.

Come detto al paragrafo 3.2.1 questo modello non fornisce alcuna resistenza a trazione del calcestruzzo.

### 3.2.5.2 Concrete04 Material – Popovic Concrete Material

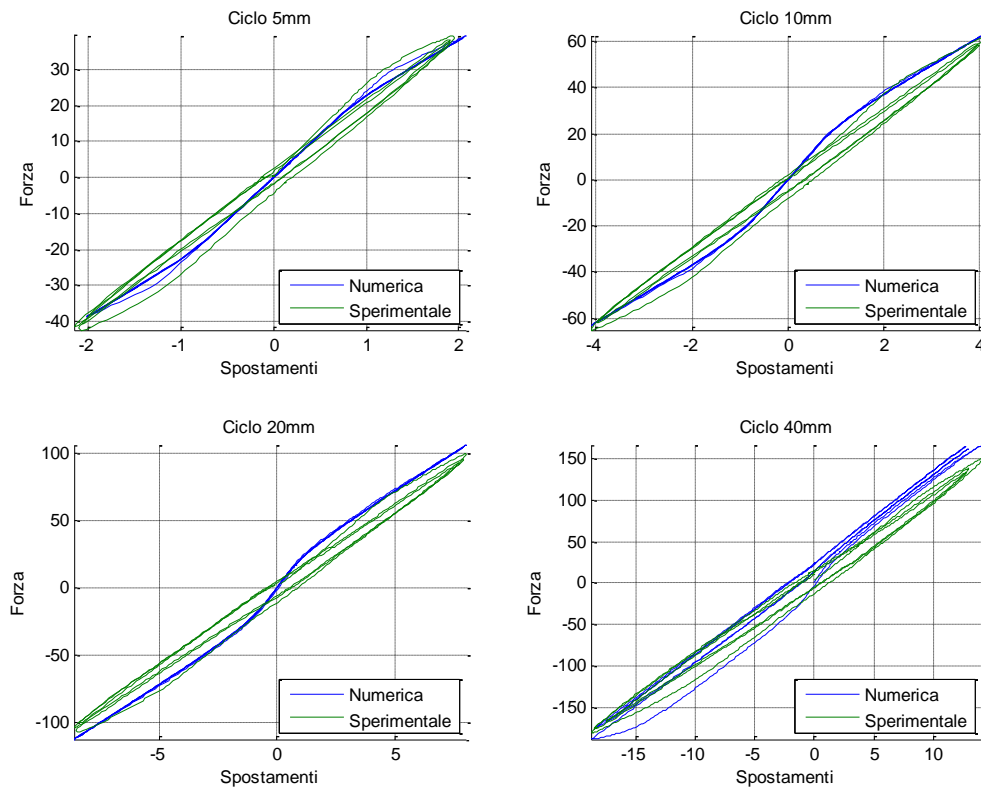


Figura 66 – Grafico Forza - Spostamenti – Concrete04 – Cicli Iniziali

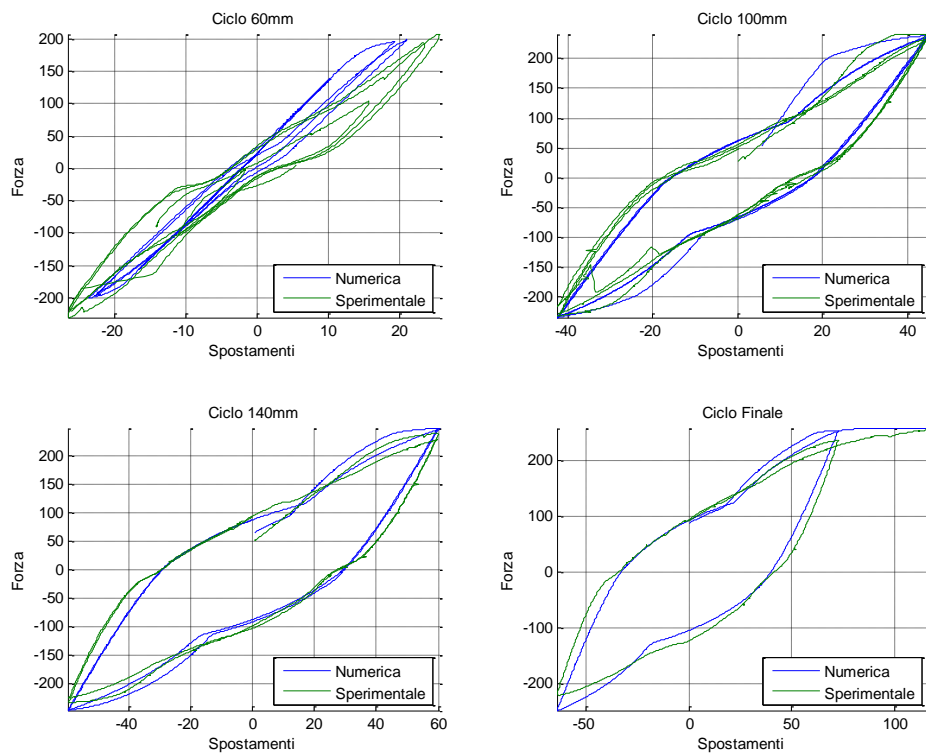


Figura 67 – Grafico Forza - Spostamenti – Concrete04 – Cicli Finali

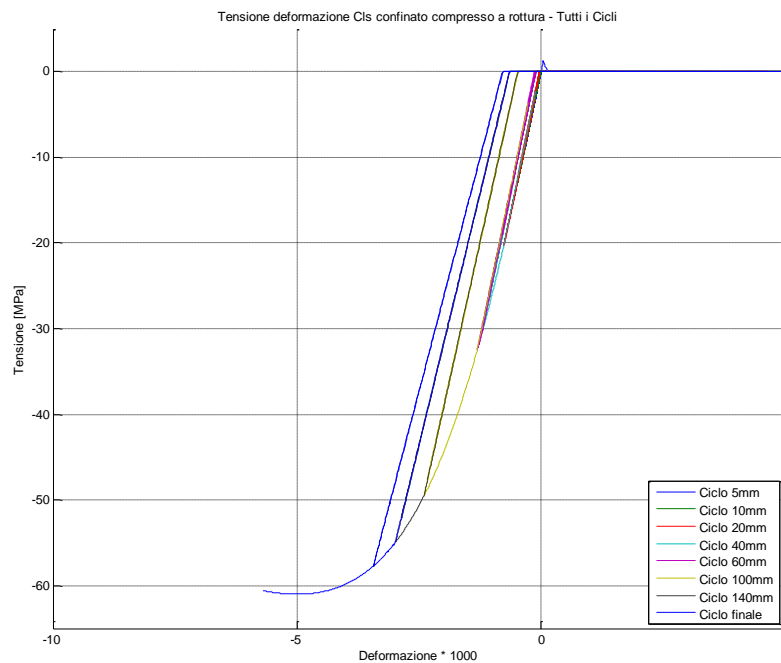


Figura 68 – Grafico Tensione- Deformazione – Concrete04 a livello del copriferro

Come per il modello precedente non si riescono a rappresentare i cicli di isteresi, in questo caso però si ha una resistenza a trazione del calcestruzzo diversa da zero.

### 3.2.5.3 Concrete06 Material

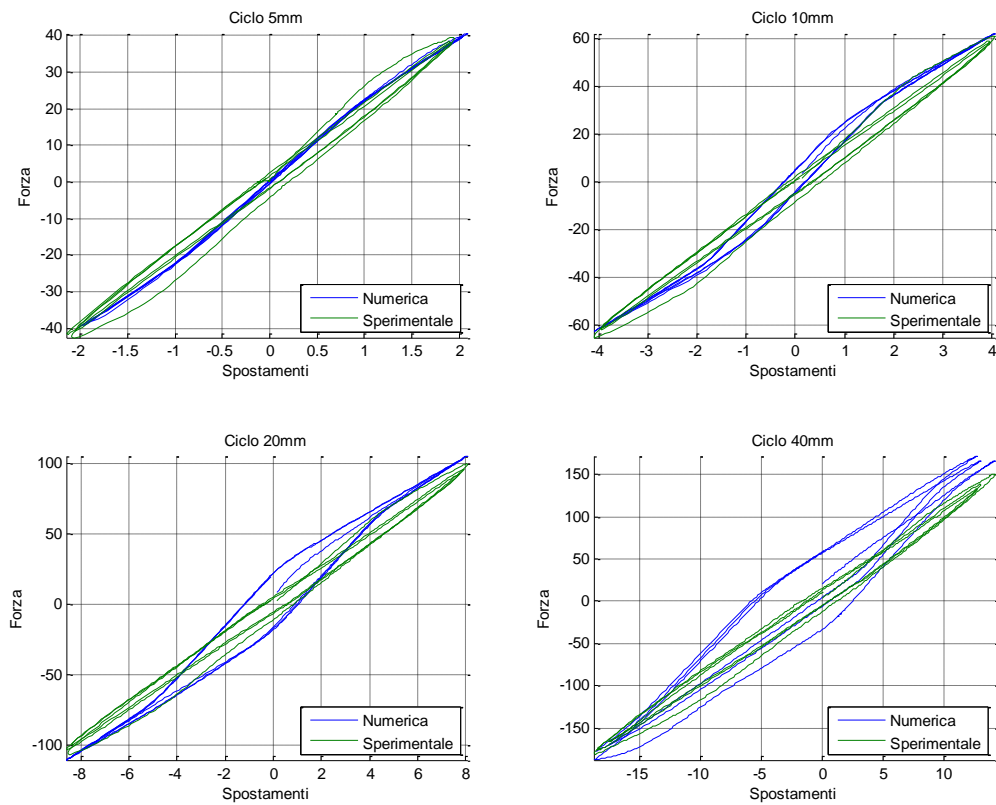


Figura 69 – Grafico Forza - Spostamenti – Concrete06 – Cicli Iniziali

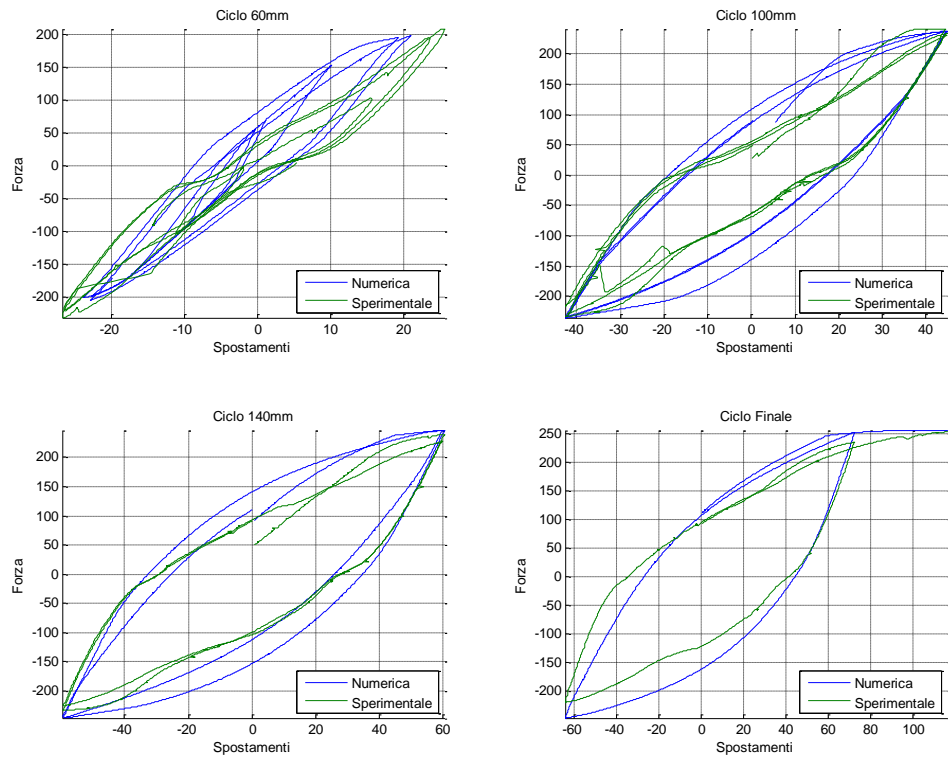


Figura 70 – Grafico Forza - Spostamenti – Concrete06 – Cicli Finali

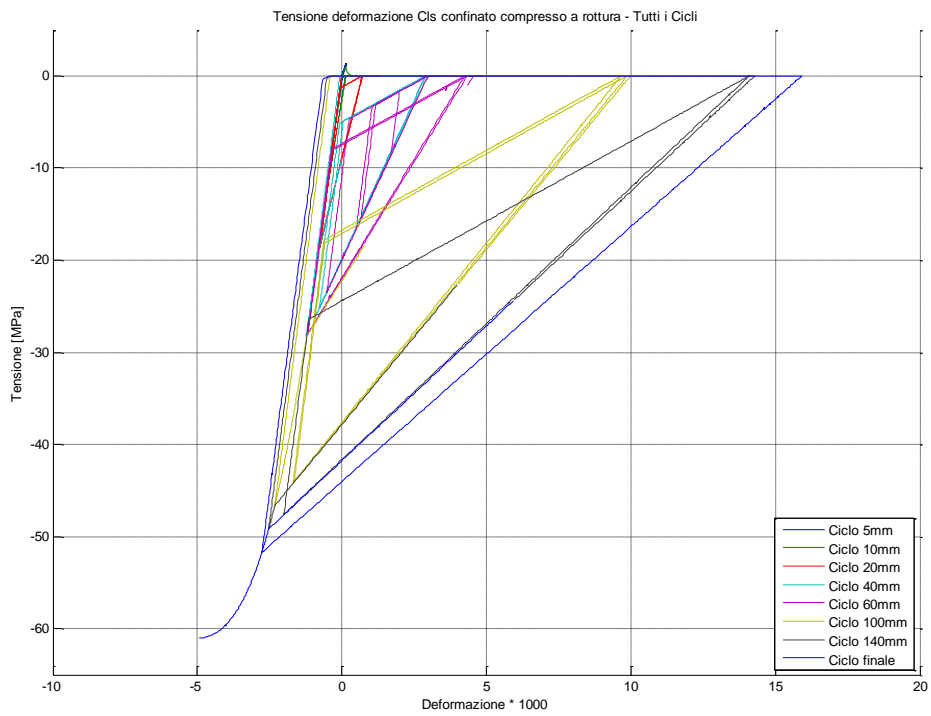


Figura 71 - Grafico Tensione- Deformazione – Concrete06 a livello del copriferro



In questo caso i cicli di isteresi sono ben evidenti in quasi tutte le fasi di carico. Il motivo per cui è stato abbandonato questo tipo di modellazione è visibile in Figura 71, dove si hanno delle tensioni di trazione diverse da zero per elevati valori di deformazioni positive.

### 3.2.5.4 Concrete07 Material – Chang & Mander’s Concrete Model

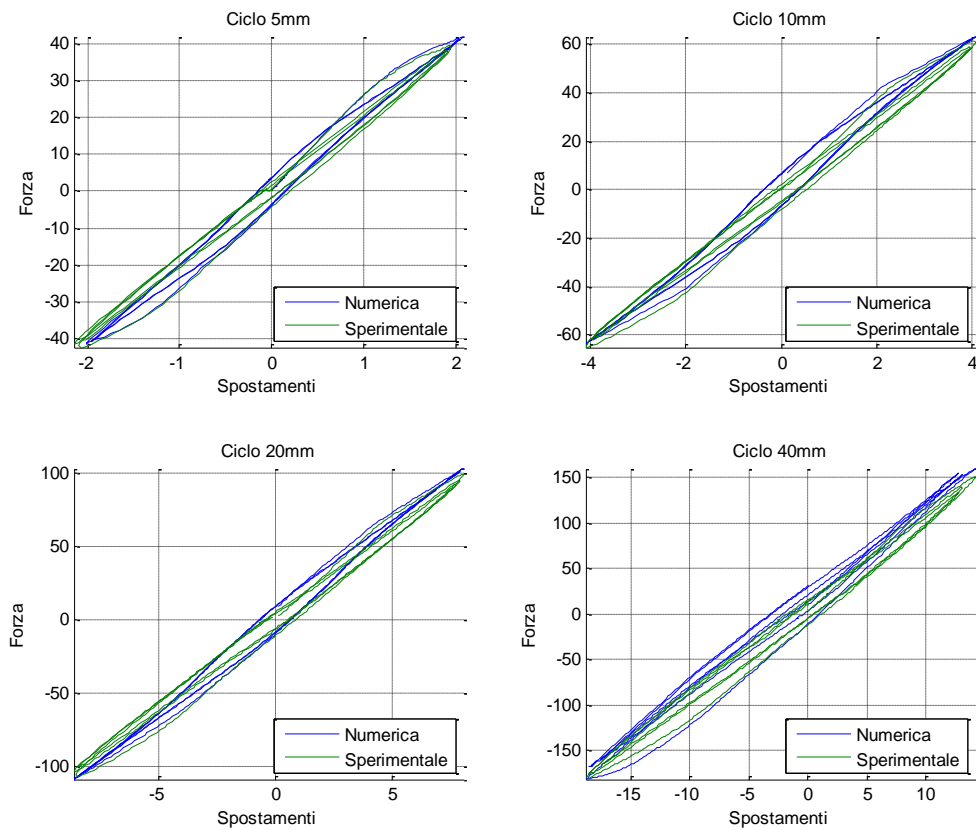


Figura 72 - Grafico Forza - Spostamenti – Concrete07 – Cicli Iniziali

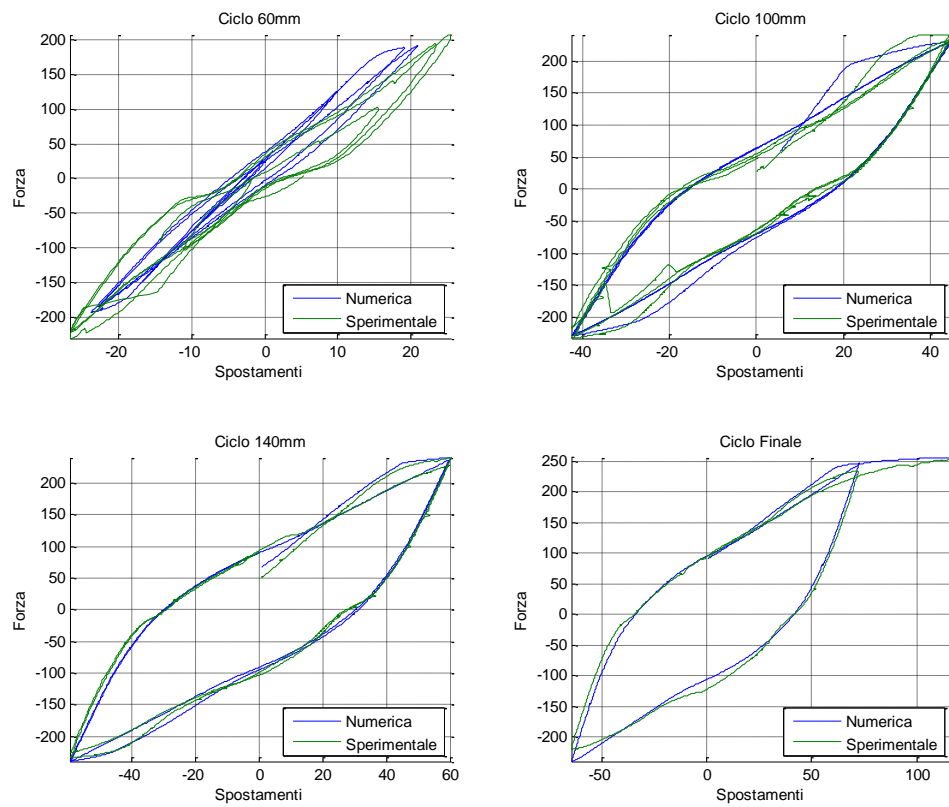


Figura 73 - - Grafico Forza - Spostamenti – Concrete07 – Cicli Finali

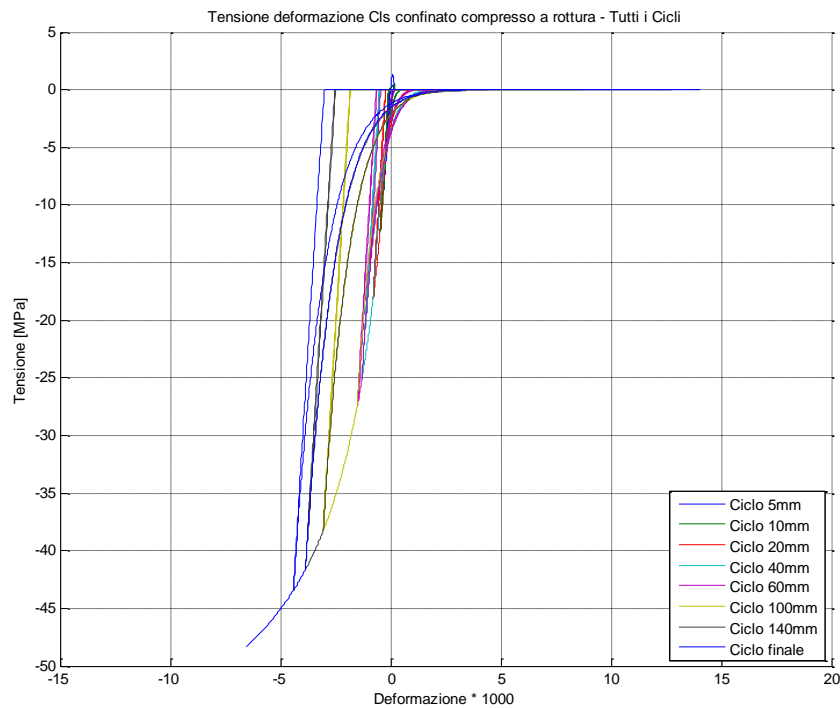


Figura 74 - Grafico Tensione- Deformazione – Concrete07 a livello del copriferro

Il concrete07 material è il modello di calcestruzzo che verrà utilizzato in tutte le modellazioni successive, in quanto fornisce la migliore rappresentazione del comportamento ciclico del calcestruzzo rispetto agli altri modelli visti.

### 3.2.5.5 Confronto in termini di Tensione Deformazione

Nella seguente figura sono stati riportati i risultati ottenuti in termini di Tensione Deformazioni per tutti i modelli di calcestruzzo analizzati.

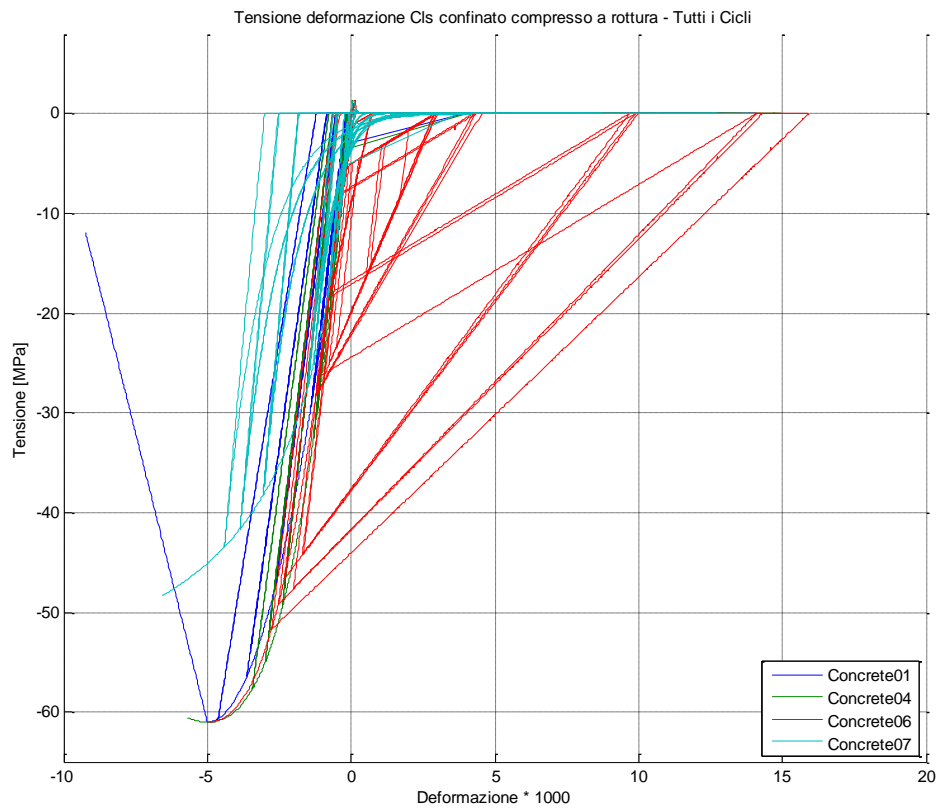


Figura 75 - Confronto fra i vari modelli di calcestruzzo del legame Tensione Deformazione – Tutti i cicli

### 3.2.6 Steel 01 Material

Il materiale Steel 01 è il più semplice e per il suo utilizzo è necessario introdurre solamente 3 parametri, tensione di snervamento, modulo elastico e strain-hardening ratio. Pur non essendo mai stato preso in considerazione ed impiegato nelle simulazioni di questo studio a causa della sua scarsa capacità di simulare fenomeni di danneggiamento e degrado (molto importanti nei comportamenti ciclici) viene riportato per mettere in risalto le differenze con altri modelli più raffinati.

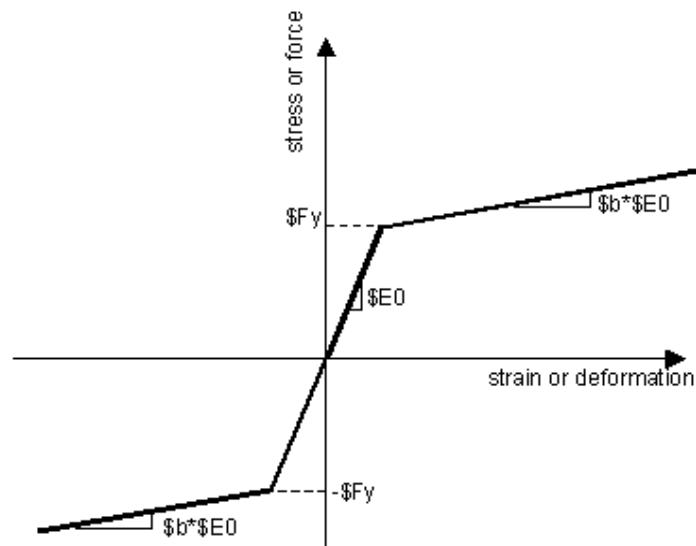
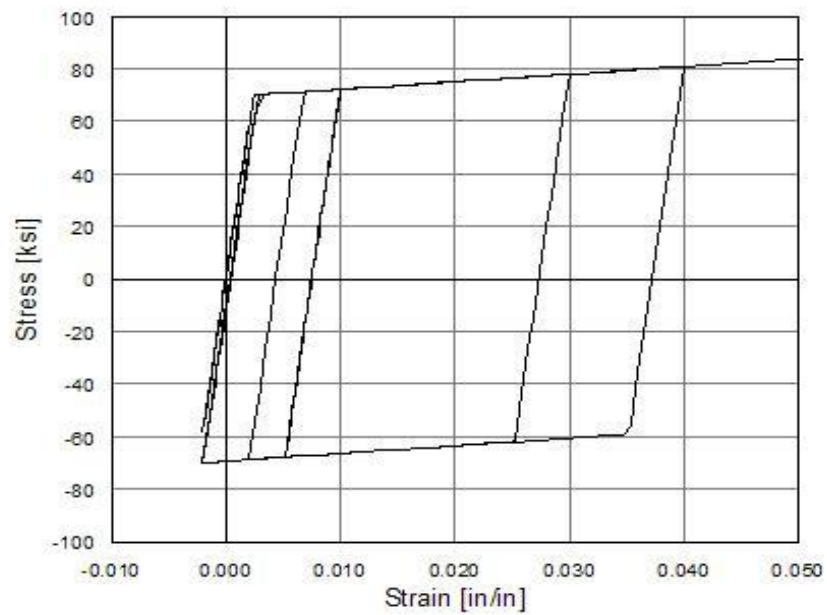


Figura 76 - Legame costitutivo per il materiale Steel 01

Il comportamento bilineare perfettamente elastico con incrudimento cinematico del modello crea cicli di isteresi tutti di ugual forma e quindi non permette di simulare danneggiamento, instabilità o fatica delle barre di armatura mostrando un comportamento molto regolare nelle analisi cicliche.



*Figura 77 - Comportamento ciclico del materiale Steel 01*

### **3.2.7 Steel 02 Material**

Il materiale Steel 02 deriva da quello di Giuffré, Menegotto e Pinto. Questo è abbastanza simile allo Steel 01 in maniera tale da possedere i requisiti di semplicità richiesti, ma se ne differenzia per quanto concerne il comportamento ciclico.

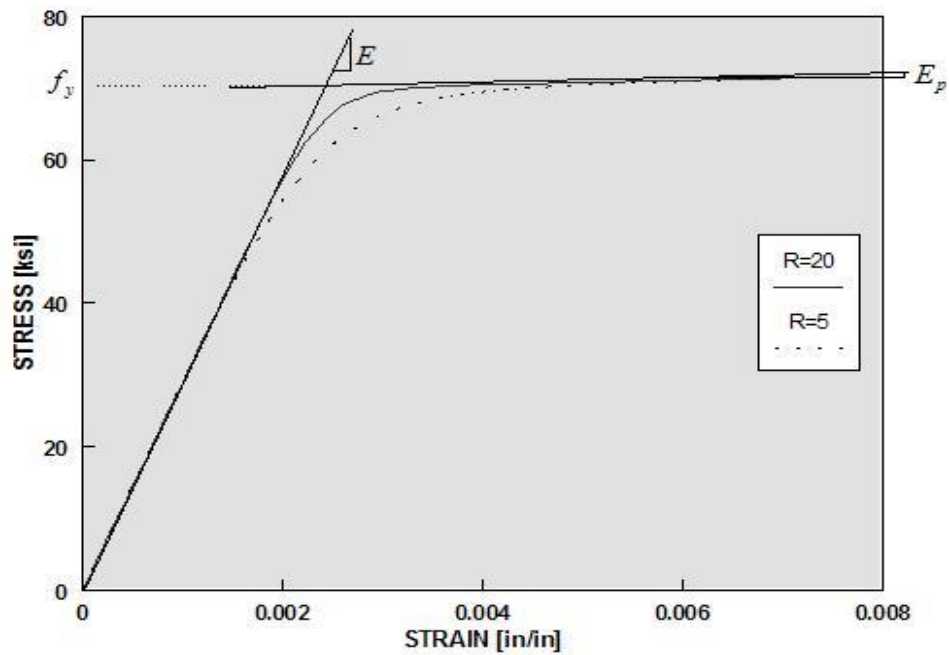


Figura 78 - Legame costitutivo del materiale Steel 02

In Figura 78 si può notare come scompare il “ginocchio” tra il ramo elastico e quello plastico e lo si sostituisca con un raccordo, la cui ampiezza dipende da un parametro modificabile dall’utente. Per quanto riguarda il comportamento ciclico (Figura 79), questo è più realistico rispetto al modello presentato in precedenza.

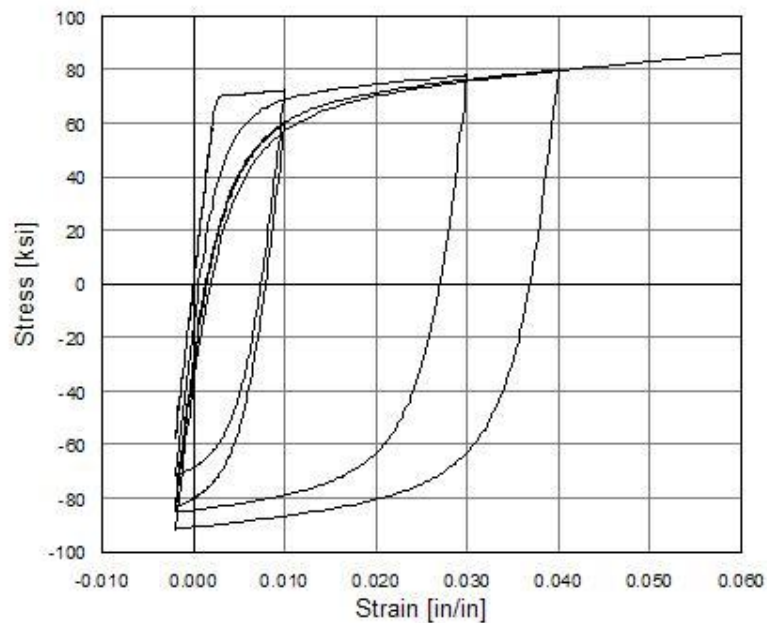


Figura 79 - Comportamento ciclico del materiale Steel 02

Si può notare infatti una riduzione della rigidità e un differente percorso di ricarica nei vari cicli. Questi due aspetti permettono quindi al modello di cogliere in parte il comportamento degradante che si verifica nei casi reali. Tale modello, alla luce dei buoni risultati che è in grado di fornire pur nella semplicità dei dati richiesti, è stato largamente impiegato nella prima fase di analisi, in cui proprio la semplicità era un requisito fondamentale.

### 3.2.8 Reinforcing Steel Material

Il materiale Reinforcing Steel è quello che meglio interpreta il comportamento delle barre d'armatura soggette a carichi ciclici. La curva di caricamento monotono del modello viene mostrata in Figura 80:

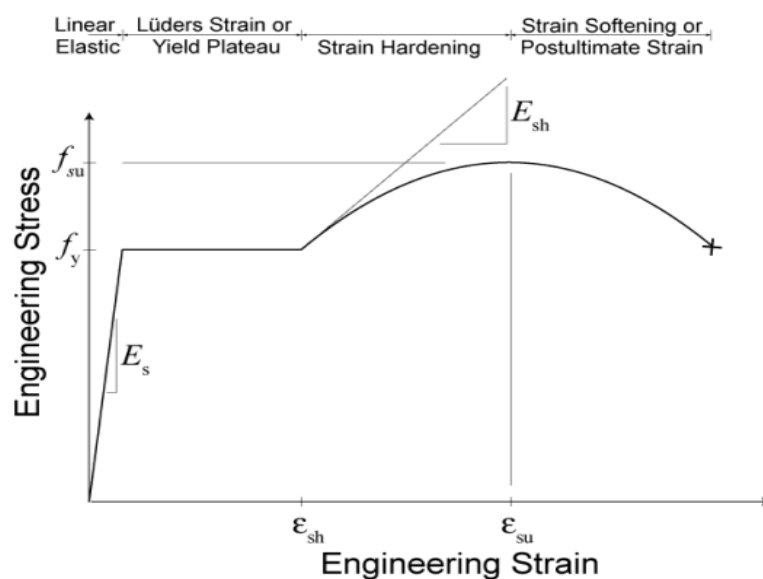


Figura 80 - Legame costitutivo del materiale Reinforcing Steel

Questo materiale è stato utilizzato per la modellazione effettiva dell'acciaio delle barre di armatura, infatti permette una buona definizione del ramo di hardening nell'acciaio, fondamentale per la calibrazione del modello complessivo negli ultimi cicli di carico.



### 3.2.9 Confronto tra i modelli di acciaio analizzati

Di seguito vengono mostrati e commentati i grafici Forza in Sommità – Spostamento e Tensione – Deformazione dei vari modelli di acciaio analizzati.

Come operato per il calcestruzzo gli spostamenti impressi sono quelli calcolati al paragrafo 2.4.4.1, utilizzati appunto per la calibrazione delle caratteristiche del calcestruzzo.

Il modello utilizzato per il calcestruzzo è, invece, il Concrete07.

#### 3.2.9.1 Steel 01 Material

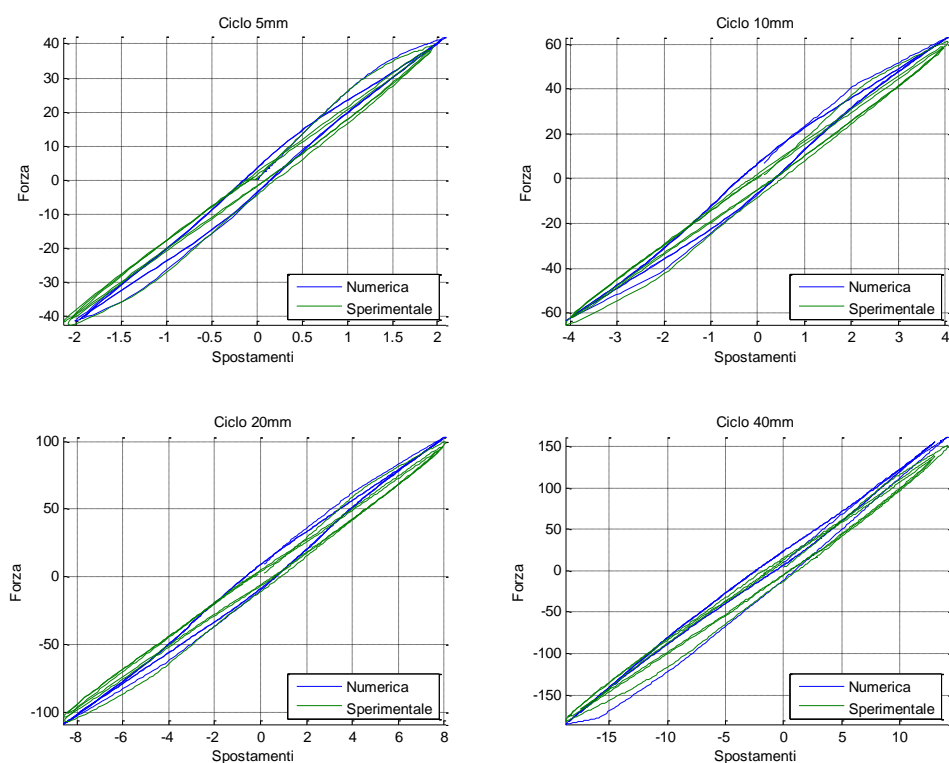


Figura 81 - Grafico Forza - Spostamenti – Steel01 – Cicli Iniziali

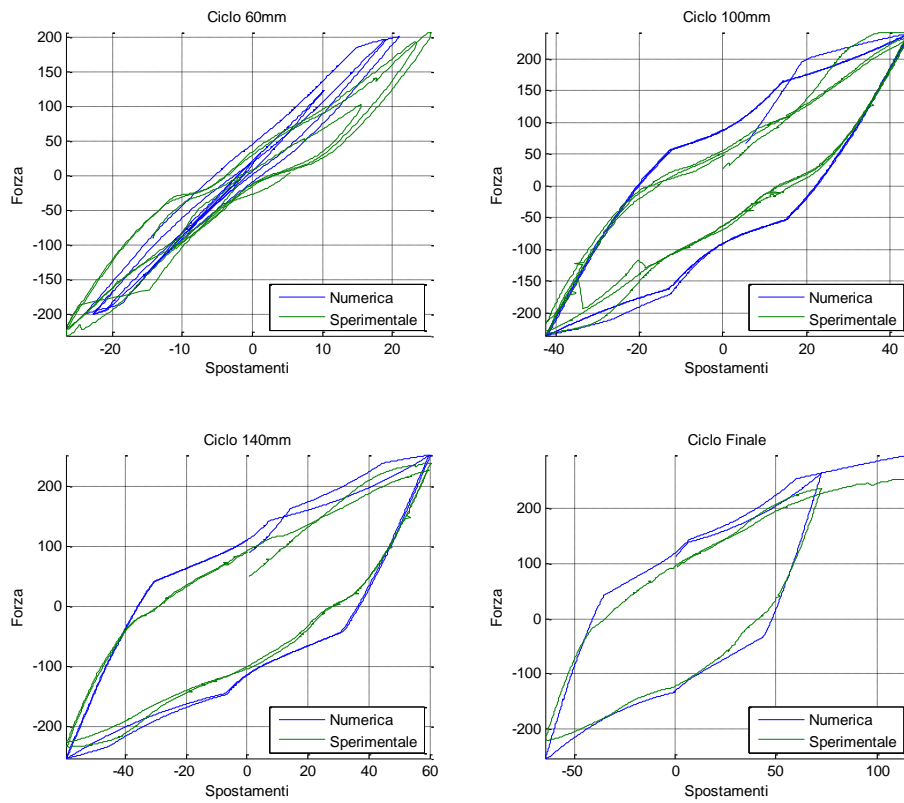


Figura 82 - Grafico Forza - Spostamenti – Steel01 – Cicli Finali

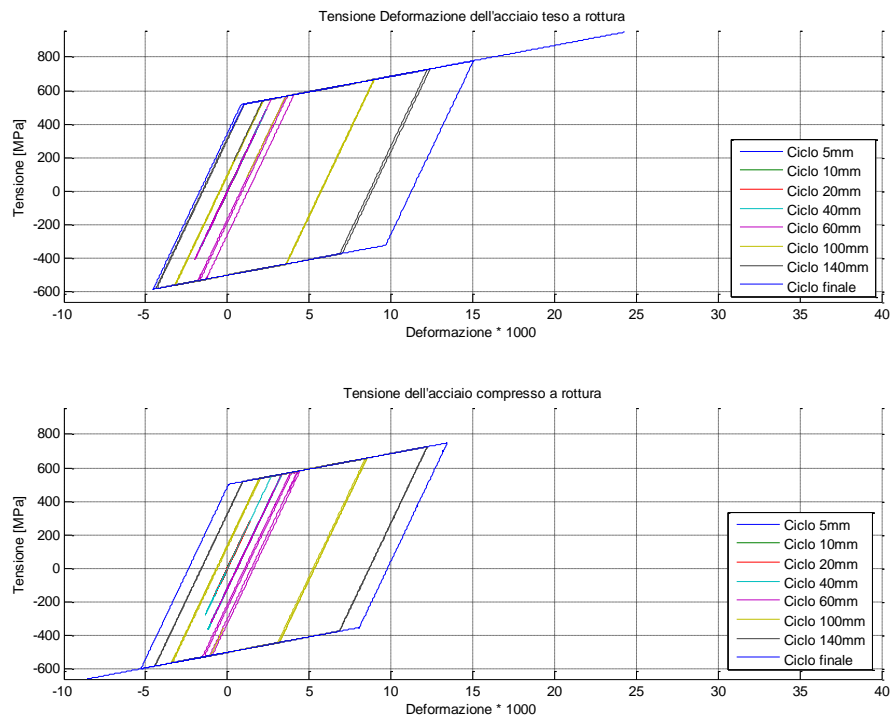


Figura 83 - Grafico Tensione- Deformazione - Steel01

Come detto al paragrafo 3.2.6 questo modello non fornisce una buona rappresentazione dei fenomeni di danneggiamento e di degrado, fondamentali per l'analisi di prove cicliche.

### 3.2.9.2 Steel 02 Material

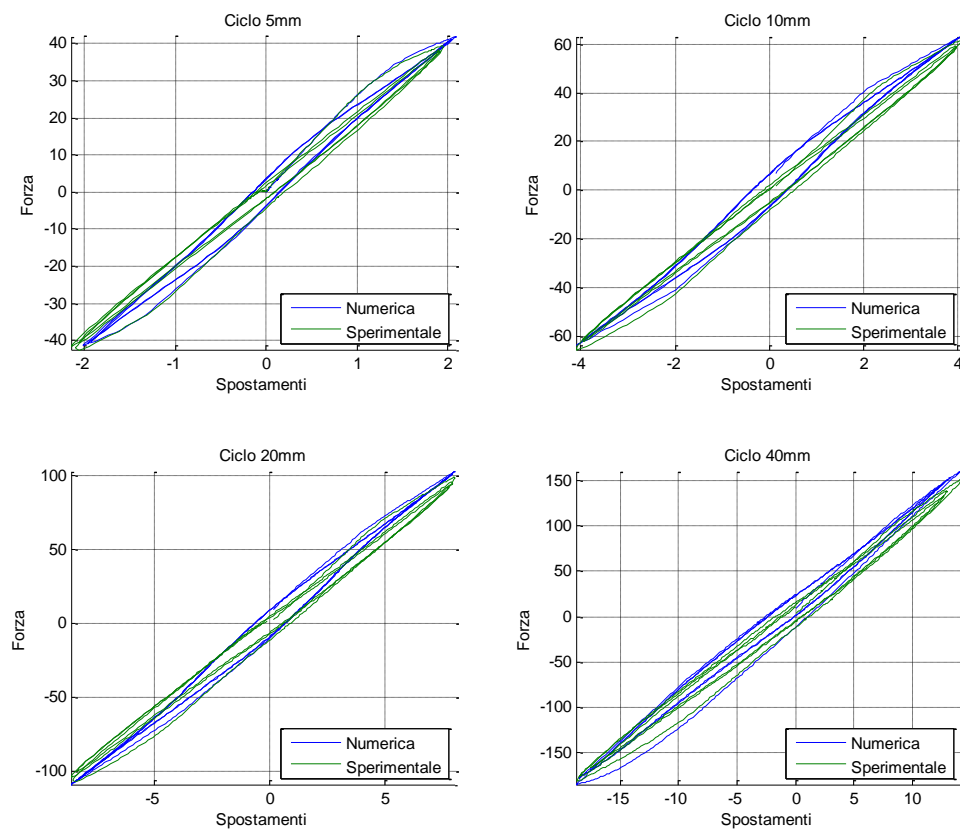


Figura 84 - Grafico Forza - Spostamenti – Steel02 – Cicli Iniziali

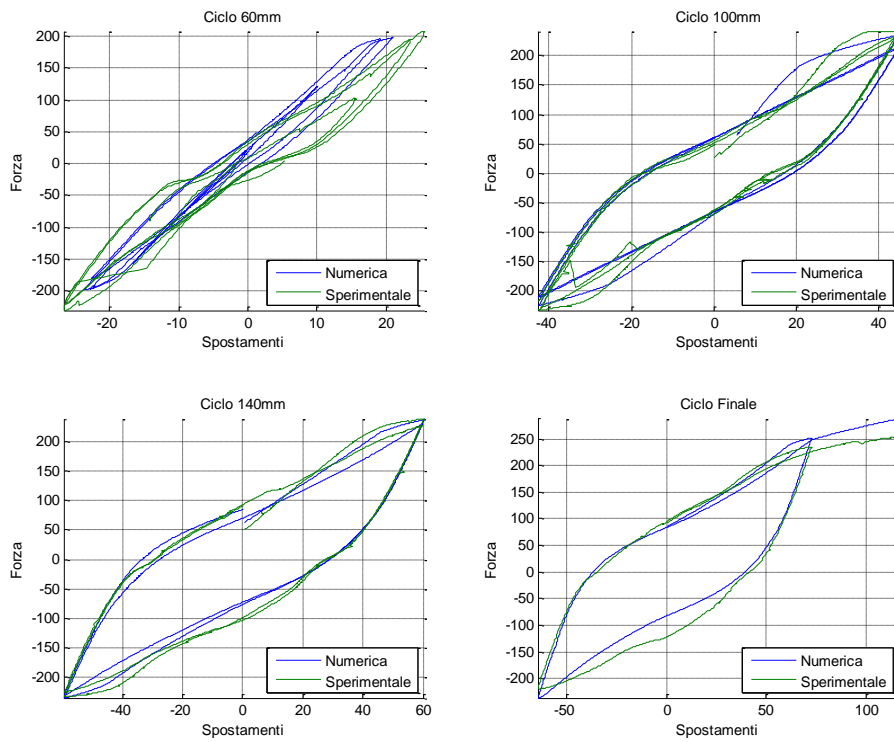


Figura 85 - Grafico Forza - Spostamenti – Steel02 – Cicli Finali

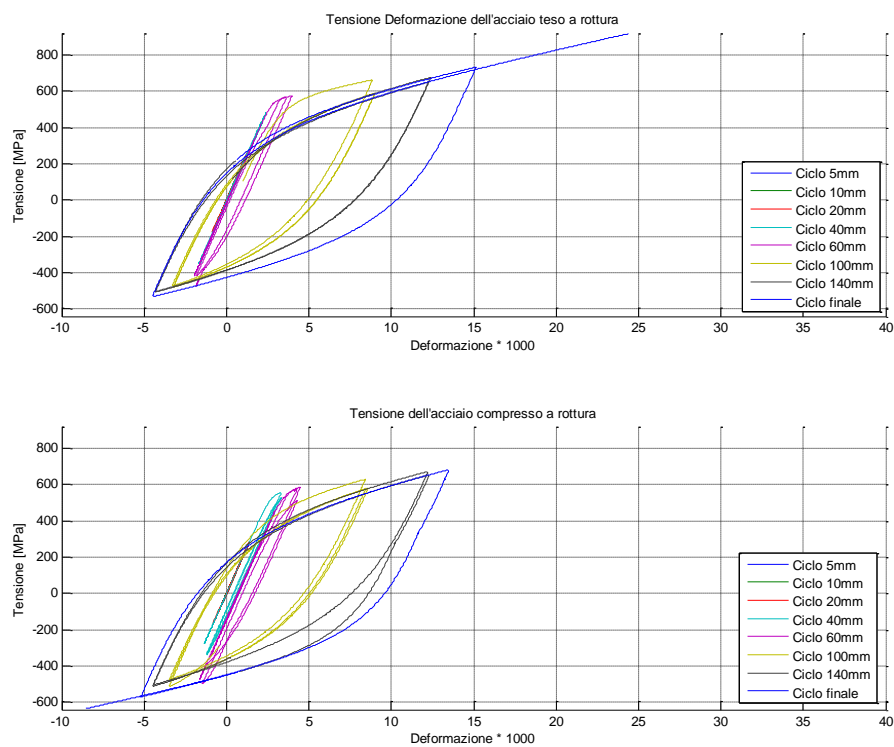


Figura 86 - Grafico Tensione- Deformazione - Steel02

In prossimità della tensione di snervamento si ha un andamento non lineare per quanto riguarda il legame Tensione – Deformazione, come riportato in Figura 86. Questo fenomeno non è presente nel caso di Steel01, motivo per il quale è stato utilizzato il materiale Steel02 nelle prime fasi di studio del modello globale.

### 3.2.9.3 Reinforcing Steel Material

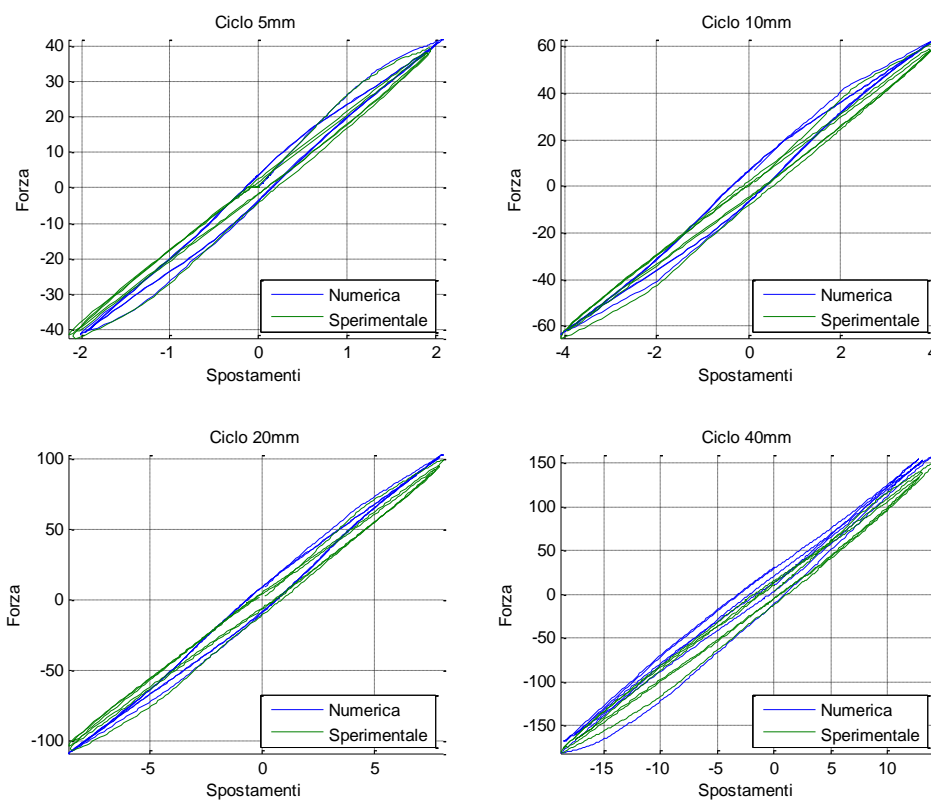


Figura 87 - Grafico Forza - Spostamenti – Reinforcing Steel Material – Cicli Iniziali

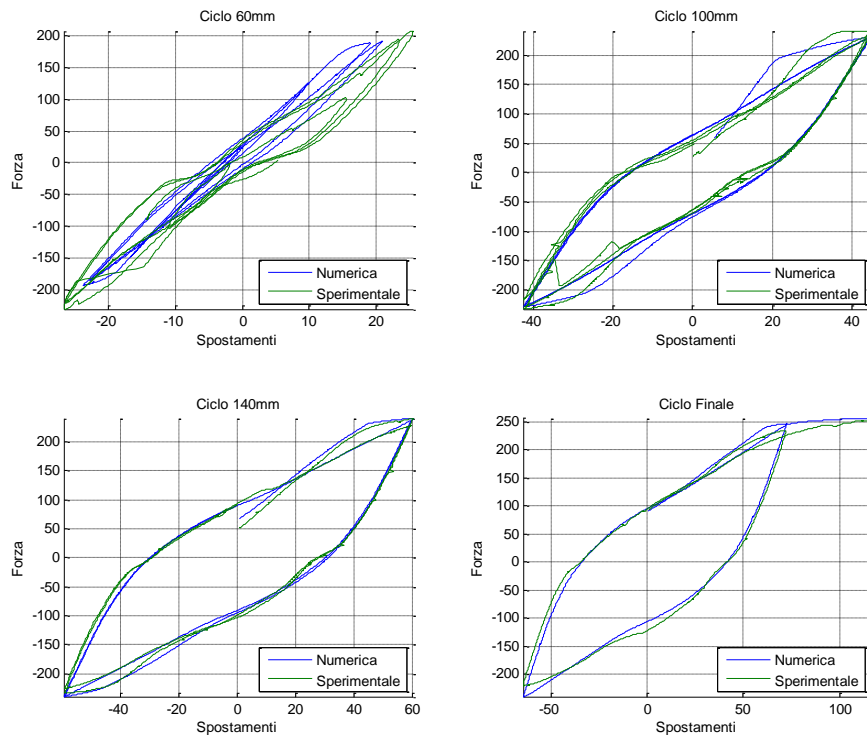


Figura 88 - Grafico Forza - Spostamenti – Reinforcing Steel – Cicli Iniziali

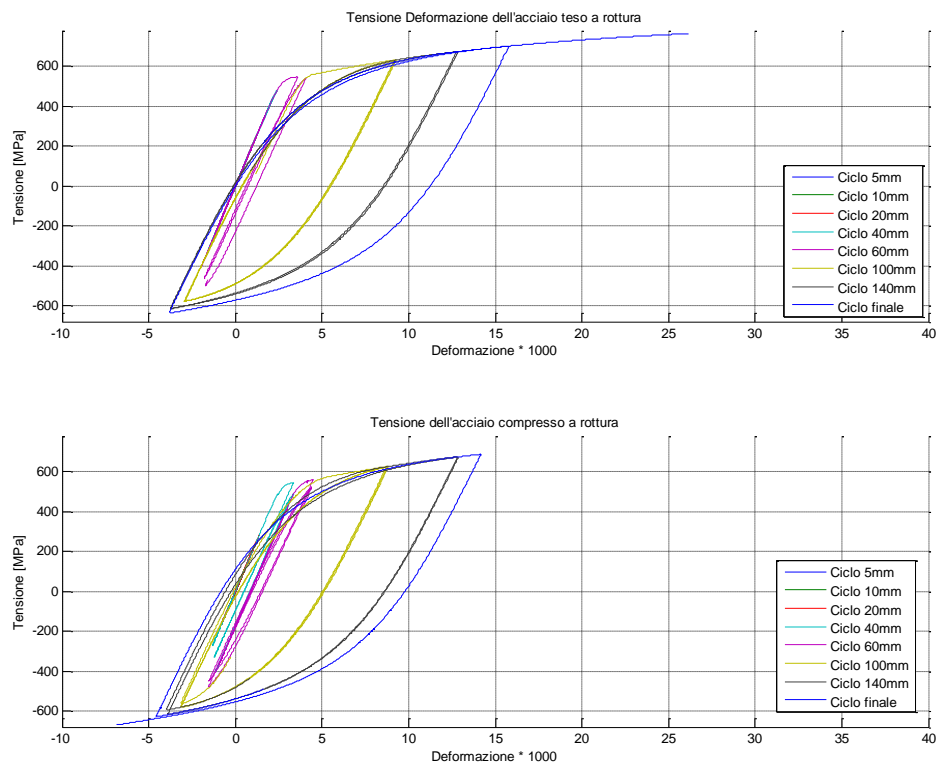


Figura 89 - Grafico Tensione- Deformazione - Reinforcing Steel

I risultati ottenuti in termini di Forza in sommità – Spostamento, sono molto simili fra loro per tutti i modelli di acciaio analizzati, questo è dovuto al fatto che per queste prime fasi di carico l'acciaio ha un comportamento ancora pressoché elastico lineare. Il motivo per cui nelle modellazioni successive è stato utilizzato il materiale Reinforcing Steel per l'acciaio è dovuto al fatto che questo tipo di modello fornisce una migliore approssimazione del comportamento dell'acciaio per deformazioni superiori allo snervamento.

### 3.2.9.4 Confronto in termini di Tensione Deformazione

Nella seguente figura sono stati riportati i risultati ottenuti in termini di Tensione Deformazioni per tutti i modelli di calcestruzzo analizzati.

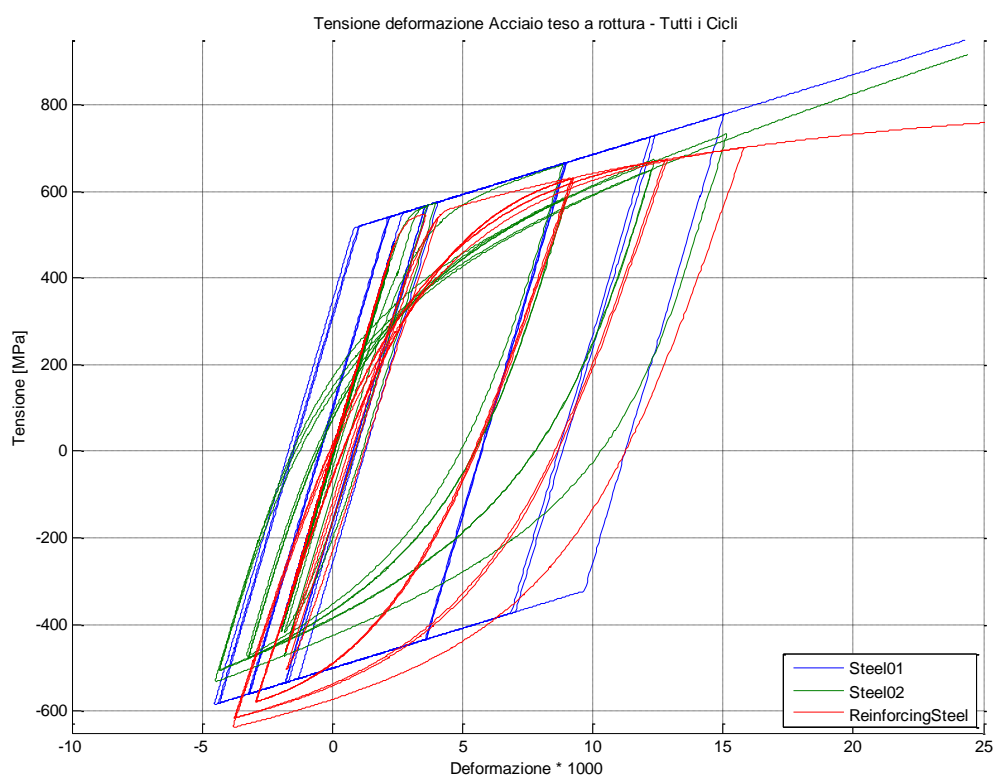


Figura 90 - Confronto fra i vari modelli di acciaio del legame Tensione Deformazione – Tutti i cicli



### 3.2.10 Bond SP01 - - Strain Penetration Model for Fully Anchored Steel Reinforcing Bars analizzati

Il materiale Bond SP01 viene utilizzato per modellare le barre di armatura dove si vogliono tenere in conto degli effetti dello scorrimento che si può riscontrare al piede dei pilastri, nel collegamento fra pilastri ed impalcati da ponte o nel collegamento fra setti e fondazioni. Tipicamente in questi casi, la penetrazione è associata ad una porzione della lunghezza di ancoraggio. Con un'accurata scelta dei parametri, questo tipo di materiale può essere applicato anche alle zone di estremità delle travi, dove si può verificare uno slittamento per l'intera lunghezza di ancoraggio.

In Figura 91 è stato riportato la tensione in funzione dello scorrimento per quanto concerne il materiale in questione:

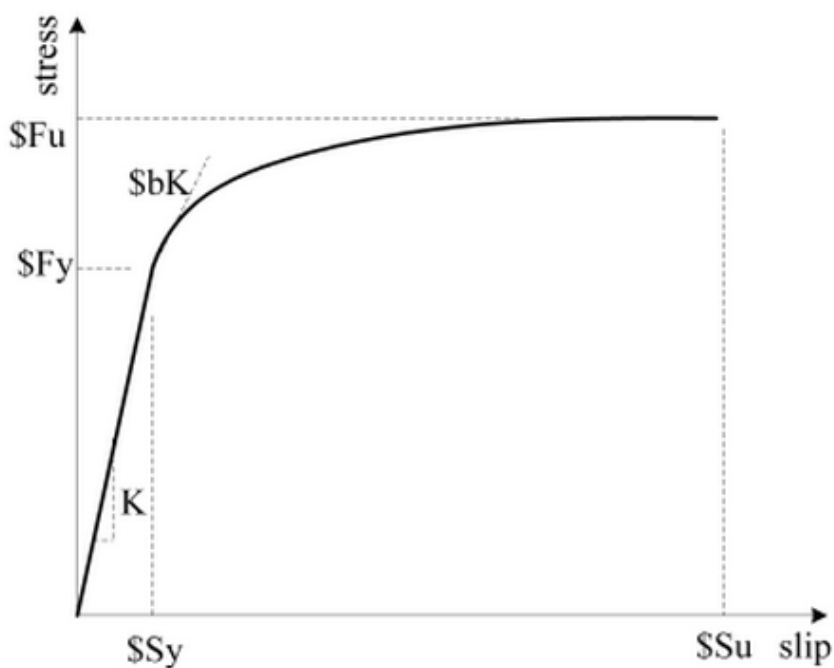


Figura 91 - Grafico Tensione- Scorrimento per il materiale Bond SP01

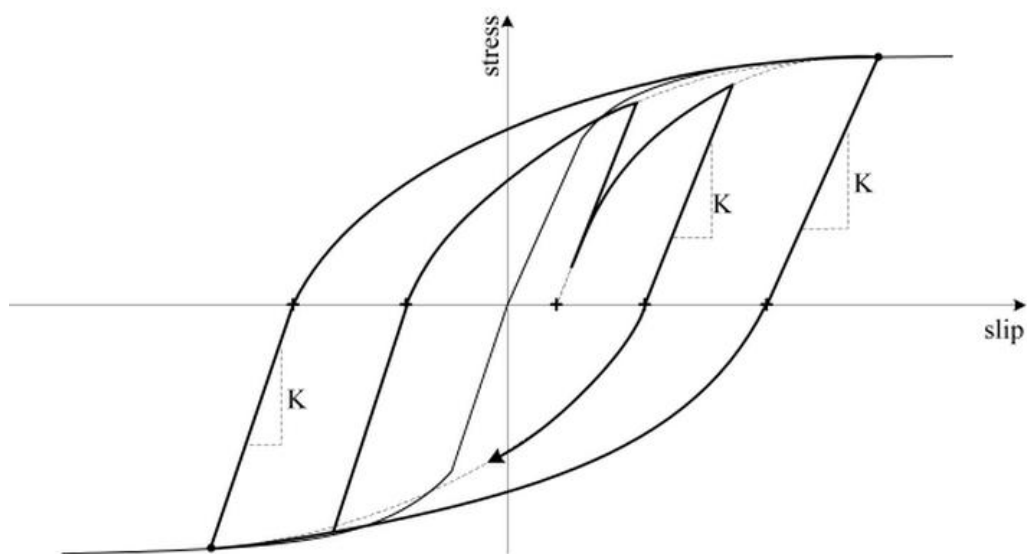


Figura 92 - Comportamento del materiale Bond SP01 nei confronti di un'azione ciclica

Per utilizzare questo tipo di materiale è necessario definire sei parametri, i quali dipendono in buona parte dalle caratteristiche dell'acciaio delle barre di armatura. Il comportamento del materiale per un'azione ciclica è legato al parametro  $R$  che corrisponde al fattore di pinching come evidenziato in Figura 93.

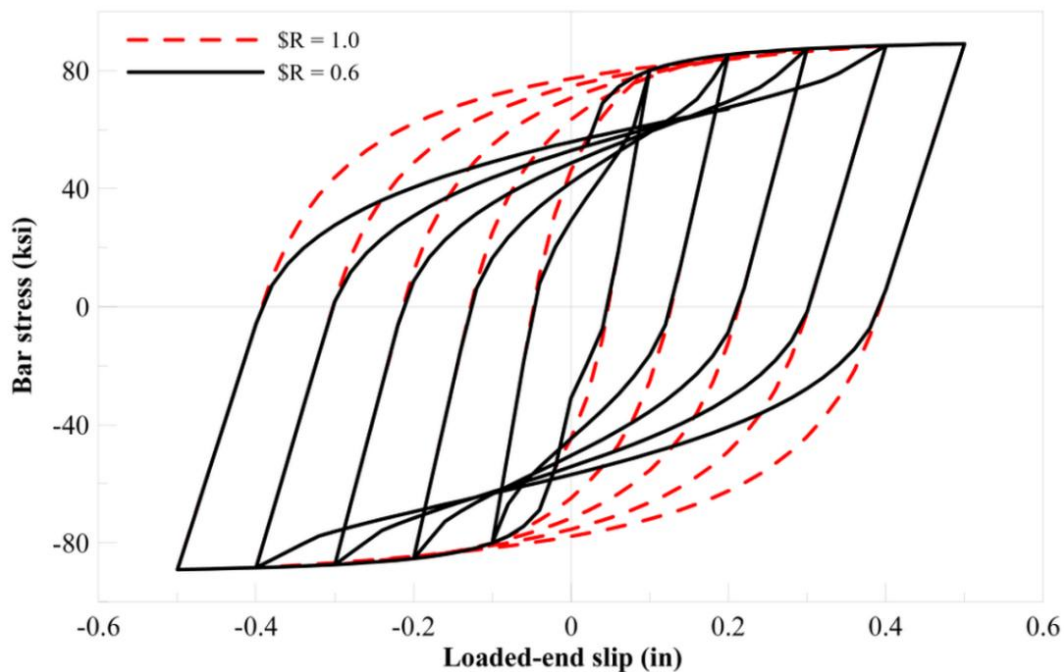


Figura 93 - Effetto del parametro  $R$  nei confronti dell'azione ciclica

### 3.2.11 BARSLIP Material

Il materiale BARSLIP viene utilizzato per simulare il comportamento delle barre di armatura ancorate in un nodo trave pilastro. Il modello presenta degrado sotto azione ciclica. Il degrado ciclico della resistenza e della rigidezza si sviluppa in tre modi: degrado della rigidezza durante lo scarico, degrado della rigidezza durante il ri-carico, degrado della resistenza.

In questo caso i parametri da inserire nel modello sono quindici; la maggior parte riguardano le caratteristiche geometriche e meccaniche dell'acciaio e dell'elemento strutturale in cui verrà introdotto il materiale

### 3.2.12 Elastic Uniaxial Material

Il materiale Elastic è stato utilizzato per l'analisi preliminare del collegamento pilastro-plinto durante la quale si è considerata una molla con legame costitutivo elastico lineare. In Figura 94 è stato riportato il grafico sollecitazione-spostamento:

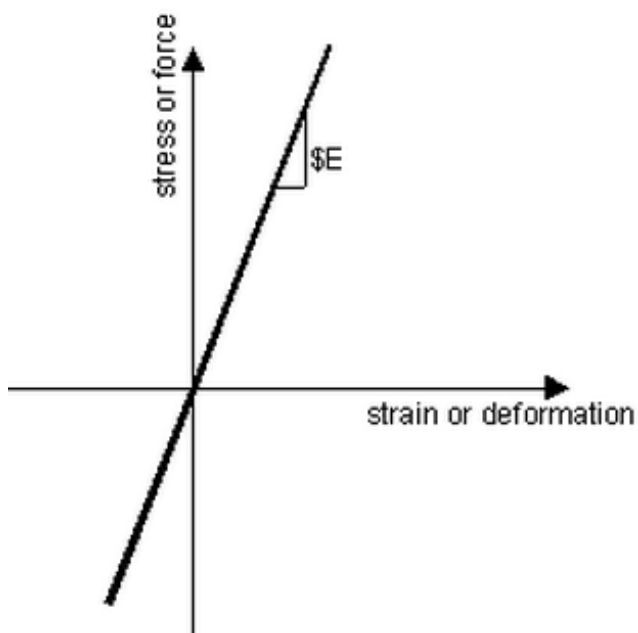


Figura 94 - Grafico Tensione/Forza - Deformazione/Spostamento per il materiale Elastic

### 3.2.13 Hysteretic Material

Il materiale Hysteretic viene utilizzato per definire un comportamento bilineare isteretico all'interno del quale è possibile introdurre le caratteristiche di pinching di forza o di deformazione, di degrado dovuto alla duttilità e di degrado della rigidità dei rami di scarico sulla base della duttilità.

In questo caso quindi è necessario introdurre i valori per i quali il modello modifica la propria rigidità, i parametri riferiti al pinching e al degrado.

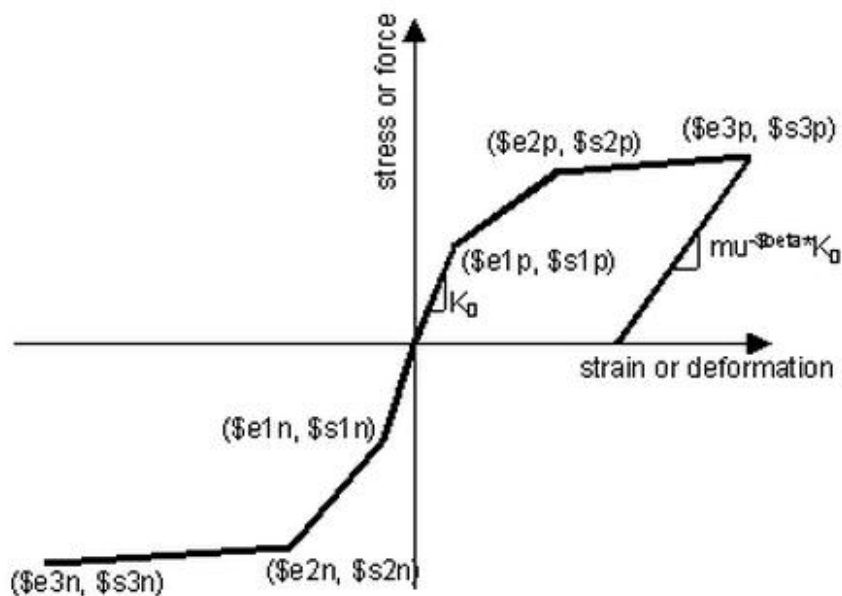


Figura 95 - Legame costitutivo del materiale Hysteretic

Anche questo tipo di materiale è stato utilizzato per definire il legame costitutivo la cerniera alla base del pilastro.

### 3.2.14 Hardening Material

Il materiale Hardening viene utilizzato per definire un materiale con un comportamento incrudente. L'incrudimento viene preso come una combinazione lineare fra l'incrudimento cinematico e isotropo. Questo

modello fornisce la possibilità di utilizzare anche la formulazione visco-plastica di tipo Peryna. In Figura 96 è mostrato il suo legame costitutivo

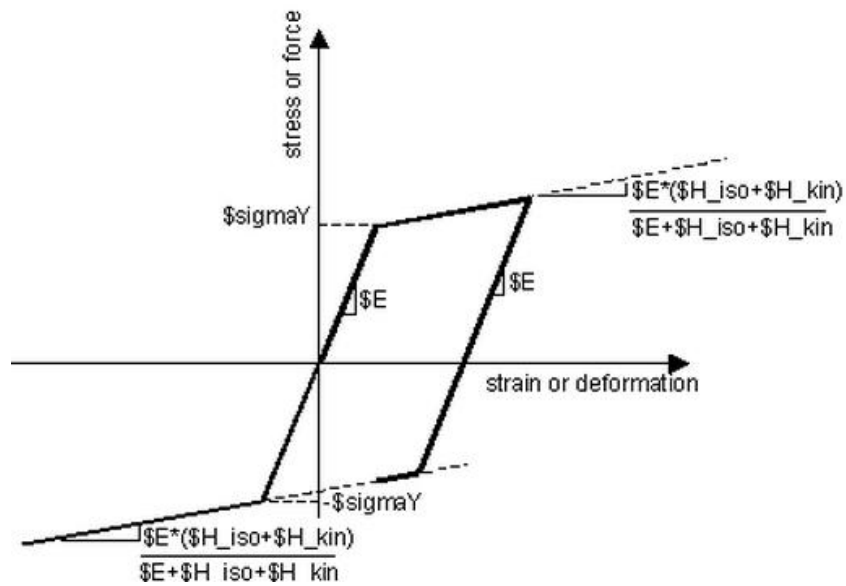


Figura 96 - Legame costitutivo del materiale Hardening

### 3.3 Elementi impiegati

L'analisi non lineare di singoli elementi strutturali richiede l'utilizzo di un modello numerico nell'ambito di un programma agli elementi finiti che sia in grado di garantire un buon livello di accuratezza senza richiedere un onere computazionale troppo elevato. Un aspetto fondamentale diventa quindi la scelta della metodologia di modellazione delle inelasticità. Esistono essenzialmente due grandi categorie di modelli, quelli che distribuiscono le inelasticità lungo l'elemento e quelli che invece le concentrano in specifiche zone. I primi sono definiti modelli a "plasticità diffusa", mentre i secondi sono detti modelli a "plasticità concentrata".

OpenSees è in grado di lavorare con entrambe queste categorie di modelli e propone, per i modelli a plasticità diffusa, diversi tipi di elementi finiti da impiegare, quelli utilizzati sono:

1. Displacement-Based element (formulazione in rigidità);
2. Force-Based element (formulazione in flessibilità);

mentre per quelli a plasticità concentrata propongono la formulazione:

1. Beam with Hinges ( basata sul modello *force-based element*);

Oltre a queste tipologie, è stato utilizzato anche un elemento finito di lunghezza infinitesima chiamato *zeroLengthSection*, in modo tale da introdurre nel modello delle molle con rigidità rotazionale o traslazionale concentrata in singoli nodi.

#### 3.3.1 Displacement-Based element

Rappresenta la metodologia più comunemente utilizzata, in cui il campo delle deformazioni sull'elemento viene ottenuto dagli spostamenti dei nodi di estremità attraverso opportune funzioni interpolanti. In questo tipo di

elemento finito la compatibilità delle deformazioni è dunque assicurata, mentre l'equilibrio delle forze lungo di esso è soddisfatto soltanto quando viene discretizzato in un numero adeguato di elementi finiti. La limitazione fondamentale di un tale approccio è legata alla scarsa precisione nel descrivere comportamenti altamente non-lineari, senza dover raffittire eccessivamente la mesh, a causa dell'inadeguatezza nella rappresentazione dell'andamento delle curvature lungo l'elemento.

### 3.3.1 Force-Based element

In questo tipo di formulazione le funzioni di forma vengono impiegate per descrivere l'andamento delle sollecitazioni sull'elemento strutturale in base alle forze nodali, il che equivale a imporre l'equilibrio nell'elemento. Per quanto riguarda invece le funzioni di forma che descrivono il campo di spostamenti, queste si modificano durante l'analisi al diffondersi delle deformazioni inelastiche nell'elemento; in altre parole, la congruenza è soddisfatta per via integrale. Tale tipo di modello, pur con un onere computazionale maggiore, è in grado di assicurare, anche per elementi con comportamento fortemente non-lineare, una soluzione accurata.

In questo caso si hanno delle problematiche legate alla presenza di comportamenti sezionali di tipo "softening". Infatti mentre per il comportamento "hardening" della sezione la risposta dell'elemento converge ad un'unica soluzione, per sezioni con comportamento "softening", in cui le deformazioni si localizzano in una sezione di dimensioni ridotte, la soluzione risulta funzione della lunghezza di tale zona. In particolare tutte le non-linearità tendono a concentrarsi nell'ultimo punto di integrazione, motivo per cui la soluzione sarà funzione del "*peso*" - nell'algoritmo di integrazione numerica - di quel punto, perdendo così di obiettività.



### 3.3.2 Beam with hinges

Questo tipo di modello a plasticità concentrata, in realtà rappresenta una tipologia ibrida tra quelli a plasticità concentrata e a plasticità diffusa in quanto in esso vengono raggruppati in un unico modello i punti di forza di entrambe le formulazioni. Ciò è possibile mediante l'impiego, nella formulazione dell'elemento strutturale, di due tipologie di sottoelementi: una di queste viene impiegata per rappresentare la zona nella quale vengono concentrate le inelasticità, nota con il nome di cerniera plastica ed un'altra che viene impiegata per descrivere il comportamento della parte di elemento che resta in campo elastico. Quest'ultima viene analizzata impiegandone la relativa matrice di flessibilità elastica, mentre la parte inelastica viene studiata trattandola come un elemento finito a plasticità distribuita di tipo Force-Based.

Supponendo di avere un elemento strutturale alle cui estremità si formano due cerniere plastiche di lunghezza  $l_{pI}$  e  $l_{pJ}$ , la generica relazione di compatibilità per l'intero elemento sarà:

$$\mathbf{v} = \int_0^L \mathbf{b}^T \mathbf{e} dx$$

Dove  $\mathbf{b}$  è la matrice delle funzioni di interpolazione ed  $\mathbf{e}$  è il vettore che esprime le componenti di deformazione della sezione.

La formulazione di  $\mathbf{v}$  può essere rivista per il caso in questione mettendo in evidenza i contributi dei vari termini:

$$\mathbf{v} = \int_0^{l_{pI}} \mathbf{b}^T \mathbf{e} dx + \int_{l_{pI}}^{L-l_{pJ}} \mathbf{b}^T \mathbf{e} dx + \int_{L-l_{pJ}}^L \mathbf{b}^T \mathbf{e} dx$$

Da questa relazione si può notare subito come tale metodo sia in stretto rapporto con il relativo modello a fibre in quanto per:

$$l_{pI} + l_{pJ} = L$$

si ritorna ad avere il solo metodo a fibre.

Le deformazioni sezionali nelle cerniere plastiche vengono integrate numericamente, mentre il contributo dell'elemento elastico viene valutato tramite la propria flessibilità. Si perviene quindi alla relazione:

$$\mathbf{v} = \sum_{i=1}^{N_p} (\mathbf{b}^T \mathbf{e}|_{x=\xi_i}) \omega_i + \mathbf{f}_{int}^e \mathbf{q}$$

Dove  $\xi$  e  $\omega$  sono rispettivamente le posizioni dei punti di integrazione e i pesi localizzati relativi ai punti stessi, mentre  $\mathbf{f}$  è proprio la matrice di flessibilità dell'elemento elastico.

Per rappresentare il comportamento degradante bisogna scegliere una legge di integrazione delle cerniere plastiche come quella appena riportata, in grado di soddisfare i seguenti criteri:

1. Per ogni campione delle forza di sezione alle estremità dell'elemento, il momento flettente è maggiore in assenza di carichi distribuiti;
2. Integrare esattamente i polinomi quadratici per fornire la soluzione esatta per la distribuzione della curvatura;
3. Integrare le deformazioni sulle lunghezze definite  $l_{pI}$  e  $l_{pJ}$  usando una singola sezione in ogni zona delle cerniere plastiche.

Il modello Gauss-Lobatto che viene impiegato abitualmente per l'integrazione di elementi finiti force-based e soddisfa solo i punti 1 e 2 mostrati in precedenza, ma non il terzo in quanto la lunghezza della cerniera plastica è implicita nel numero di punti impiegati e nel peso attribuito agli stessi. Per poter impiegare il metodo è stato quindi necessario utilizzare un altro modello di integrazione. Tale modello è stato identificato nella legge di quadratura di Gauss-Radau modificata.

La legge di quadratura dei due punti di Gauss-Radau è molto simile a quella di Gauss-Lobatto in quanto, come nel primo vengono impiegati due punti di integrazione, ma nel secondo metodo solo uno dei due è posizionato ad un'estremità dell'elemento, mentre l'altro si trova in un punto interno. Ciò dona alla legge di quadratura una precisione  $2N_p - 2$ , di un grado superiore al Gauss-Lobatto con la capacità quindi di integrare in maniera esatta una

distribuzione lineare di curvatura. I punti di integrazione saranno disposti nelle sezioni posizionate a  $[0, 2/3]$  dalla sezione iniziale dell'elemento, per cui facendo riferimento al caso in cui si hanno due cerniere plastiche alle estremità dell'elemento strutturale, la mappatura dei punti di integrazione lungo l'ascissa dell'elemento sarà:

$$\xi = \left\{ 0, \frac{2l_{pI}}{3}, \frac{L - 2l_{pJ}}{3}, L \right\}$$

Con i rispettivi pesi:

$$\omega = \left\{ \frac{l_{pI}}{4}, \frac{3l_{pI}}{4}, \frac{3l_{pJ}}{4}, \frac{l_{pJ}}{4} \right\}$$

In Figura 97 viene illustrato lo schema appena presentato.

Il metodo di quadratura appena presentato ha due proprietà interessanti che vale la pena di evidenziare:

1. Quando la somma delle lunghezze delle cerniere plastiche diventa uguale alla lunghezza dell'elemento strutturale si torna ad avere un metodo a plasticità diffusa a 4 punti di integrazione.
2. Quando si ha la condizione  $l_{pI} = l_{pJ} = L/2$  il metodo di Gauss-Radau coincide con quello 3/8 di Simpson che ha un grado di precisione in più rispetto a Gauss-Radau permettendo l'integrazione esatta di polinomi cubici.

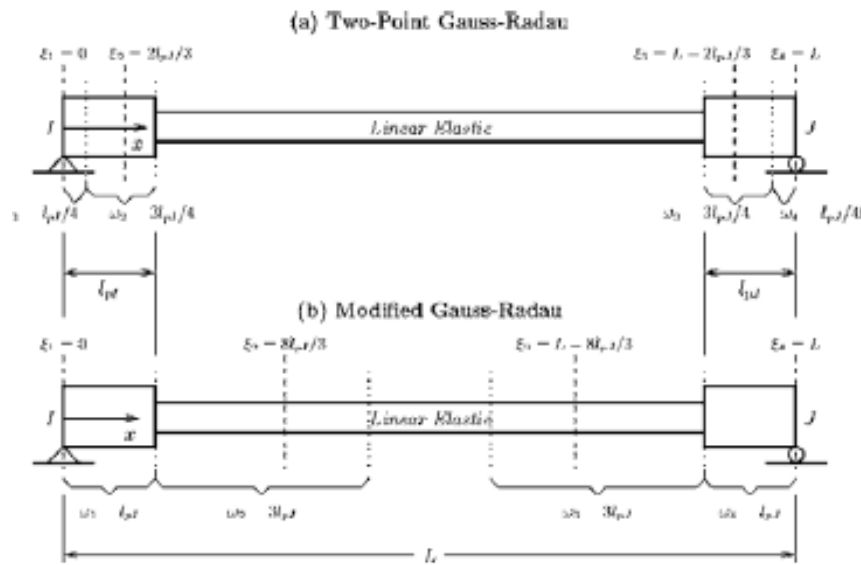


Figura 97 - Schema del modello di quadratura dei due punti di Gauss-Radau (a) e Gauss-Radau modificato (b)

Pur soddisfacendo i criteri 1 e 2 presentati in precedenza, come per il metodo Gauss-Lobatto non si riesce a soddisfare anche il terzo in quanto, poiché la deformazione degradante si concentrerà nell'ultimo elemento, al quale come abbiamo visto precedentemente è assegnato un peso di  $l_p/4$ , le inelasticità si concentreranno su questa lunghezza, ovviamente inferiore rispetto a  $l_p$ . Ciò comporterà che l'elemento si scaricherà più velocemente rispetto al dovuto per mantenere l'equilibrio.

Per garantire che la lunghezza sulla quale si concentreranno le inelasticità coincida con la lunghezza della cerniera plastica, è necessario modificare il metodo appena illustrato in modo tale da far coincidere i pesi di integrazione dei punti di estremità con  $l_p$ . Per far ciò si applica il metodo di Gauss-Radau su un lunghezza di  $4l_p$ . piuttosto che  $l_p$ . generando così un nuovo schema di posizioni e pesi come mostrato in Figura 97 (b)

$$\xi = \left\{ 0, \frac{8 l_{pI}}{3}, \frac{L - 8 l_{pJ}}{3}, L \right\}$$

$$\omega = \{ l_{pI}, 3l_{pI}, 3l_{pJ}, l_{pJ} \}$$

In questo modo la lunghezza caratteristica sarà uguale alla lunghezza specifica della cerniera plastica quando si ha il comportamento degradante della sezione per cui anche il punto 3 della lista precedentemente mostrata è soddisfatto.

Poiché le simulazioni svolte nel corso di questo studio hanno avuto tutte ad oggetto elementi strutturali con comportamento “*softening*” è stato necessario scegliere un elemento finito del tipo Beam with Hinges per l’elemento in calcestruzzo armato prefabbricato e di tipo displacement-based per l’elemento in malta Emaco.

### 3.4 Algoritmo di analisi

Una volta realizzato il modello, definiti i materiali e gli elementi finiti da impiegare per la simulazione è necessario definire il tipo di analisi che il software dovrà sviluppare.

E' stato scritto uno script ad hoc in modo tale da applicare al pilastro lo sforzo assiale a controllo di forza e in nella seconda fase si ha la possibilità di scegliere se utilizzare un controllo di spostamenti o di forze orizzontali.

In sede di sperimentazione è stata eseguita una prova a controllo di spostamento, ma, allo scopo di calibrare il modello, è stato necessario eseguire anche delle analisi a controllo di forza e quindi implementare nello script questo tipo di risoluzione.

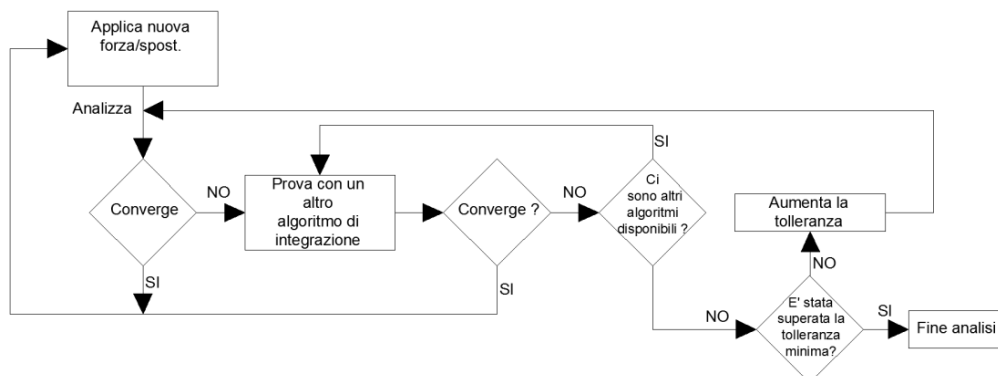


Figura 98 - Diagramma di flusso dell'algoritmo di controllo di forza/ spostamento

Operativamente l'algoritmo segue il percorso mostrato in Figura 98.

Per prima cosa è necessario scegliere il tipo di indagine si ha intenzione di utilizzare per quanto riguarda la seconda fase dell'analisi.

Nel caso in cui si utilizzi con controllo di spostamento OpenSees calcola la forza necessaria per ottenere lo spostamento impresso e risolve la struttura definendo tutte le componenti di deformazione e sforzo all'interno dell'elemento. Nel caso di controllo di forza, viene assegnato come input un vettore di forze e non un vettore di spostamenti, mentre i risultati vengono riportati allo stesso modo del caso precedente.

Di seguito (Figura 99 e Figura 100 ) sono stati riportati i risultati, in termini di Forza-Spostamento, ottenuti durante le prime analisi effettuate.

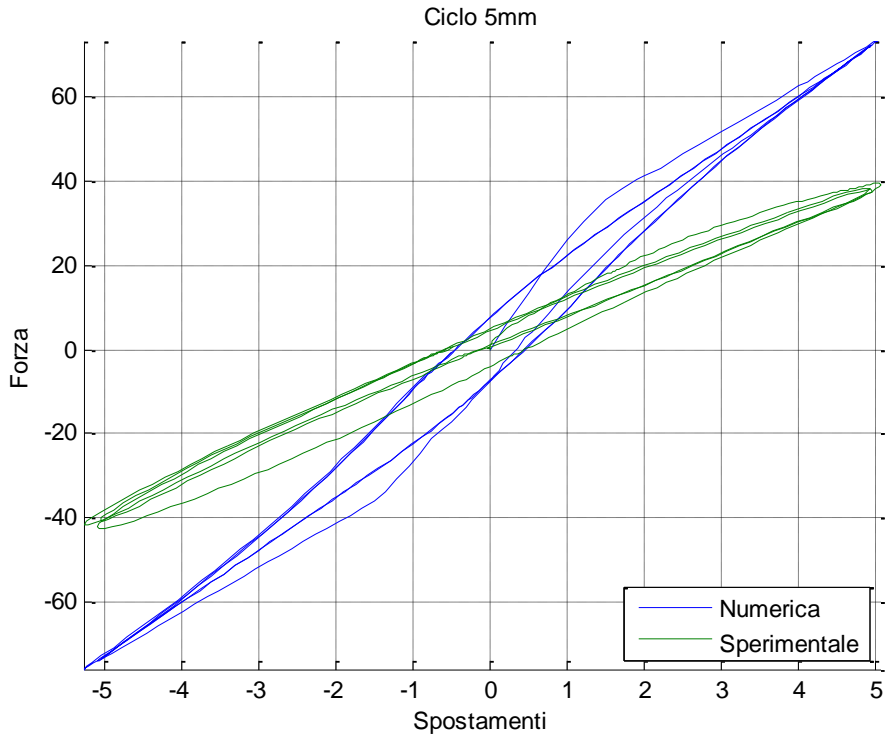


Figura 99 - Grafico Forza – Spostamento a controllo di spostamento

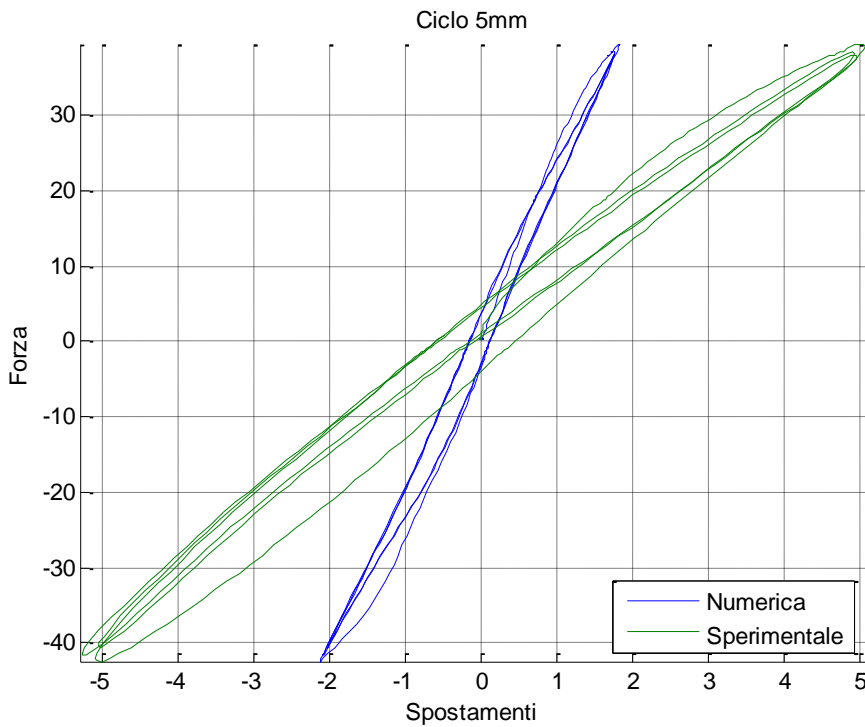


Figura 100 - Grafico Forza – Spostamento a controllo di forza



Si può osservare come nel primo caso il valore massimo delle ascisse, a cui corrispondono gli spostamenti, coincide perfettamente, mentre nel secondo caso è il valore massimo delle ordinate, e quindi delle forze in sommità, a combaciare.

L'algoritmo di integrazione di partenza è di tipo Newton Raphson. Nel caso in cui la procedura di integrazione con un errore inferiore rispetto al valore di tolleranza scelto non dovesse riuscire a convergere, vengono impiegati altri algoritmi di integrazione quali Broyden e NewtonWithLineSearch.

Se anche in questo caso non si riesce ad ottenere la convergenza, la tolleranza viene aumentata di un ordine di grandezza e si ripete il procedimento sopracitato fino al raggiungimento della convergenza o di una tolleranza limite oltre la quale l'analisi viene terminata per evitare di ottenere soluzioni affette da errori troppo considerevoli.

Nei seguenti paragrafi sono stati riportati degli accenni alle teorie su cui si basano gli algoritmi di integrazione utilizzati.

### 3.4.1 Algoritmo Newton-Raphson

L'algoritmo Newton-Raphson è il metodo più utilizzato e più "robusto" per la risoluzione di equazioni algebriche non lineari.

Il metodo utilizzato nell'analisi agli elementi finiti è lo stesso che viene insegnato nei corsi di calcolo di base. E' stato semplicemente esteso per un numero  $n$  di gradi di incognite corrispondenti ai gradi di libertà. Il metodo insegnato nei corsi di calcolo di base, è un algoritmo di ricerca delle soluzioni di una funzione  $f(x)$ , che utilizza i primi termini dello sviluppo in serie di Taylor della funzione, nell'intorno di una radice attesa  $x_n$  per trovare la radice  $x_{n+1}$ .

Lo sviluppo in serie di  $f(x)$  attorno al punto  $x = x_n + \Delta x$  è dato da:

$$f(x_n + \Delta x) = f(x_n) + r'(x_n)\Delta x + 1/2r''(x_n)\Delta x^2 + \dots$$

Considerando i termini solo del primo ordine si ha:

$$f(x_n + \Delta x) \approx f(x_n) + r'(x_n)\Delta x = f(x_n) + \frac{df(x_n)}{dx}\Delta x$$

E dato che in corrispondenza di  $x_n + \Delta x$ , ci si aspetta di ottenere un valore della funzione pari a zero ( $f(x_n + \Delta x) = 0$ ), si può risolvere per un valore approssimato di  $\Delta x$ :

$$\Delta x \approx -\frac{f(x_n)}{f'(x_n)} = -\frac{df(x_n)^{-1}}{dx} f(x_n)$$

Il metodo di Newmark è quindi un metodo iterativo nel quale, a partire da un valore iniziale  $x_0$ , si continua a iterare fino al raggiungimento del criterio di convergenza così da ottenere;

$$\Delta x = -\frac{df(x_n)^{-1}}{dx} f(x_n)$$

$$x_{n+1} = x_n + \Delta x$$

Il metodo è stato generalizzato a  $n$  incognite, attraverso la sostituzione dell'equazione scalare precedentemente con una equazione matriciale:

$$R(U_n + \Delta x) = R(U_n) + \frac{\partial R(U_n)}{\partial U}\Delta U + O(\Delta U^2)$$

La matrice  $\frac{\partial R(U_n)}{\partial U}$  è chiamata matrice Jacobiana e viene definita come  $K$ :

$$K = \frac{\partial R(U_n)}{\partial U}$$

Il risultato della procedura iterativa corrisponde al soddisfacimento del criterio di convergenza e delle seguenti equazioni:

$$\Delta U = -K^{-1}R(U_n),$$

$$U_{n+1} = U_n + \Delta U$$

### 3.4.2 Algoritmo Broyden

L'algoritmo Broyden (1965) è un metodo simile a quello di Newton per la soluzione numerica di sistemi non lineari di equazioni a  $n$  incognite. Come visto nel paragrafo precedente il metodo di Newton per la risoluzione di una equazione  $f(x) = 0$  utilizza la matrice Jacobiana ad ogni iterazione. Tuttavia computare la jacobiana è un'operazione difficile e dispendiosa. L'idea alla base del metodo di Broyden è di computare l'intera jacobiana alla prima iterazione, ma di utilizzare un aggiornamento di rango uno nelle iterazioni successive.

Il metodo di Broyden è una generalizzazione del metodo secante per un  $n$  gradi di libertà. Il metodo della secante sostituisce la prima derivata  $f'(x_n)$  con l'approssimazione a differenze finite:

$$f'(x_n) \simeq \frac{f(x_n) - f(x_{n-1})}{x_n - x_{n-1}},$$

E procede nella direzione descritta dall'algoritmo di Newton:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{1}{f'(x_n)} f(x_n).$$

L'algoritmo Broyden fornisce una generalizzazione di questa formula per un sistema di equazioni  $F(x) = 0$ , sostituendo la derivata  $f'$  con la Jacobiana  $J$ . La Jacobiana è definita utilizzando l'equazione secante:

$$J_n \cdot (x_n - x_{n-1}) \simeq F(x_n) - F(x_{n-1}).$$

Tuttavia questa equazione è definita per più gradi di libertà. Broyden suggerisce l'utilizzo della stima corrente del Jacobiano  $J_{n-1}$  e migliorarla utilizzando la soluzione dell'equazione secante che corrisponde ad una modifica minima di  $J_{n-1}$ :

$$J_n = J_{n-1} + \frac{\Delta F_n - J_{n-1} \Delta x_n}{\|\Delta x_n\|^2} \Delta x_n^T$$

E procede nella direzione descritta dall'algoritmo di Newton:

$$x_{n+1} = x_n - J_n^{-1} F(x_n).$$

Nella formula precedente  $x_n = (x_1[n], \dots, x_n[n], )$  e  $F_n(x) = (f_1(x_1[n], \dots, x_n[n], ), \dots, f_n(x_1[n], \dots, x_n[n], ))$  sono vettori colonna con n elementi per un sistema a n gradi di libertà. Si ha:

$$\Delta x_n = \begin{bmatrix} x_1[n] - x_1[n-1] \\ \dots \\ x_k[n] - x_k[n-1] \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad \Delta F_n = \begin{bmatrix} f_1(x_1[n], \dots, x_k[n]) - f_1(x_1[n-1], \dots, x_k[n-1]) \\ \dots \\ f_k(x_1[n], \dots, x_k[n]) - f_k(x_1[n-1], \dots, x_k[n-1]) \end{bmatrix}.$$

### 3.4.3 NewtonLineSearch

Questo algoritmo introduce una ricerca lineare all'algoritmo di Newton-Raphson per risolvere equazioni differenziali non lineari. La ricerca lineare aumenta l'efficienza del metodo di Newton quando la convergenza è lenta a causa delle dimensioni del residuo.

La logica dietro alla ricerca lineare è la seguente:

- La direzione  $\Delta U$  trovata con il metodo Newton-Raphson è spesso una buona direzione, ma la norma  $\|\Delta U\|$  non lo è.
- E' meno costoso computare il residuo per diversi punti lungo  $\Delta U$  piuttosto che la forma e il fattore di un nuovo sistema Jacobiano

All'interno dell'algoritmo NewtonLineSearch il metodo di Newton-Raphson viene utilizzato per definire  $\Delta U$ , ma il processo di aggiornamento di esso è modificato.

Il passo successivo in questo caso è:

$$U_{n+1} = U_n + \eta \Delta U s(\eta) = \Delta U R(U_n + \eta \Delta U)$$

## 4 Modellazione del pilastro prefabbricato

### 4.1 Lunghezza della cerniera plastica

Tutti i modelli impiegati richiedono, tra i dati in ingresso, la lunghezza del tratto di cerniera plastica, o comunque della zona nella quale vengono concentrate le inelasticità.

Tra le varie relazioni a disposizione si è scelto di impiegare quella di Priestley, Seible e Calvi (1996), largamente conosciuta ed impiegata sia in ambito accademico che professionale.

La distribuzione di curvatura lungo la colonna viene assunta lineare in accordo con la schematizzazione bilineare del diagramma momento-curvatura per il tratto non interessato dalle deformazioni plastiche mentre nel tratto di sviluppo della cerniera plastica, si considera la curvatura costante e pari al suo valore massimo alla base della colonna.

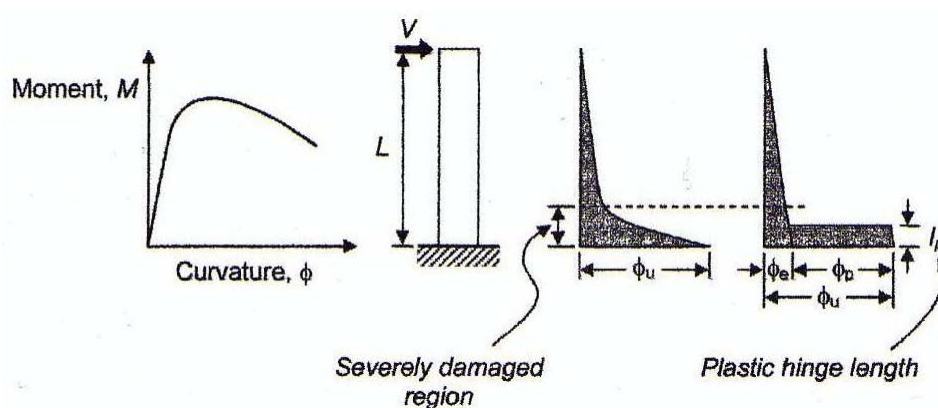


Figura 101 - - Semplificazione progressiva e schematizzazione del modello

La lunghezza complessiva della cerniera plastica ( $L_p$ ) ottenuta con il presente modello deriva dalla somma di due contributi; uno di questi è relativo alla concentrazione delle curvature alla base, l'altro è dovuto alla presenza delle barre di armatura del pilastro che si ancorano in fondazione e tale contributo è detto "strain penetration length" ( $L_{sp}$ ).

In Figura 102 si può notare la schematizzazione dell'andamento delle curvature rispetto all'andamento reale e i due contributi della  $L_p$ .

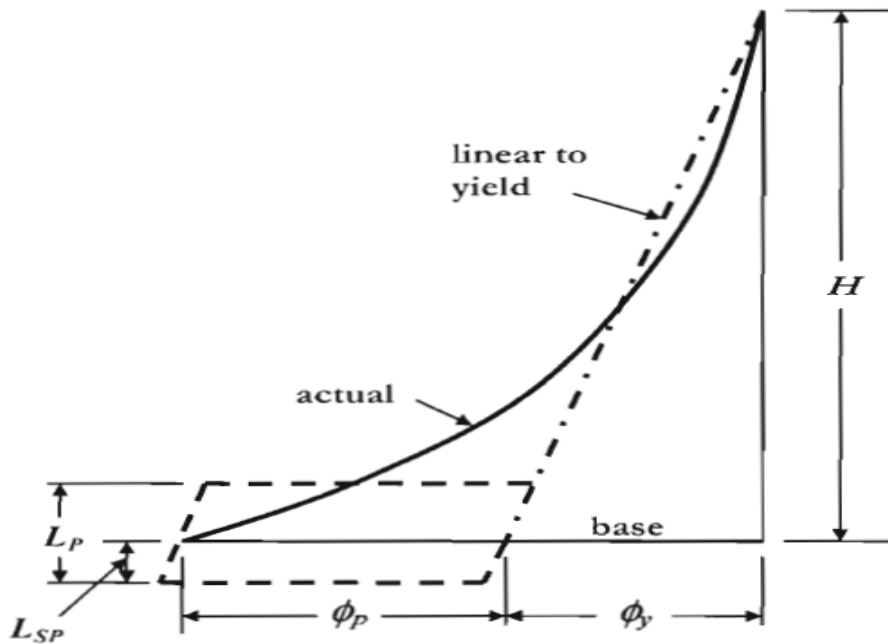


Figura 102 - - Approssimazione sulle curvature

Scendendo nel dettaglio delle relazioni che definiscono tali grandezze, la  $L_p$  è data da:

$$L_p = kL_c + L_{SP} \geq 2L_{SP}$$

ove  $L_c$  rappresenta la distanza dal punto di inversione del segno del diagramma del momento flettente e  $k$  risulta pari a:

$$k = 0.2 \left( \frac{f_u}{f_y} - 1 \right) \leq 0.08$$

La strain penetration length viene definita:

$$L_{SP} = 0.022 f_{ye} d_{bl} \quad (f_{ye} \text{ in MPa});$$

Funzione del diametro  $d_{bl}$  e della tensione di snervamento  $f_{ye}$  delle barre longitudinali.

Utilizzando le caratteristiche geometriche e meccaniche dei materiali ed elementi impiegati si ha:

$$f_{ye} = 550 \text{ MPa}$$

$$f_u = 1.5 * f_{ye} = 825 \text{ MPa}$$

$$k = 0.08$$

$$d_{bl} = 26 \text{ mm}$$

$$L_{sp} = 31.5 \text{ cm}$$

$$L_c = 197 \text{ cm}$$

$$L_p = k * L_c + L_{sp} = 63 \text{ cm}$$

## **4.2 Definizione delle caratteristiche del calcestruzzo armato in base agli spostamenti dedotti dalla curvatura**

Dal momento che non sono state effettuate le prove di resistenza sui materiali, come la prova a compressione del calcestruzzo e a trazione dell'acciaio, le caratteristiche di questi materiali sono state calibrate in base agli spostamenti dedotti dai grafici Momento – Curvatura nel Paragrafo 2.4.4.1.

Tramite OpenSees è stato possibile definire una sezione a fibre corrispondente a quella del pilastro prefabbricato, la quale presenta una sezione quadrata di lato 40 *cm* e un totale di  $8\phi 26$ .

Per quanto riguarda la modellazione di partenza del calcestruzzo è stata utilizzata la teoria di Mander, esposta nel seguente paragrafo.

### **4.2.1 Modello di Mander per il Calcestruzzo**

Nella modellazione a fibre della sezione dell'elemento strutturale è stata operata una distinzione tra due regioni della sezione di calcestruzzo con comportamento meccanico molto differente. La zona relativa al copriferro è più debole per la mancanza di confinamento da parte delle barre e, a causa della vicinanza con le casseforme nella fase di getto, sono presenti delle impurità che ne limitano molto le capacità meccaniche. La zona interna alla gabbia di armature (detta nucleo), proprio grazie alla presenza di queste, beneficia dell'effetto del confinamento che ha un effetto positivo sulle caratteristiche di resistenza e deformazione del calcestruzzo



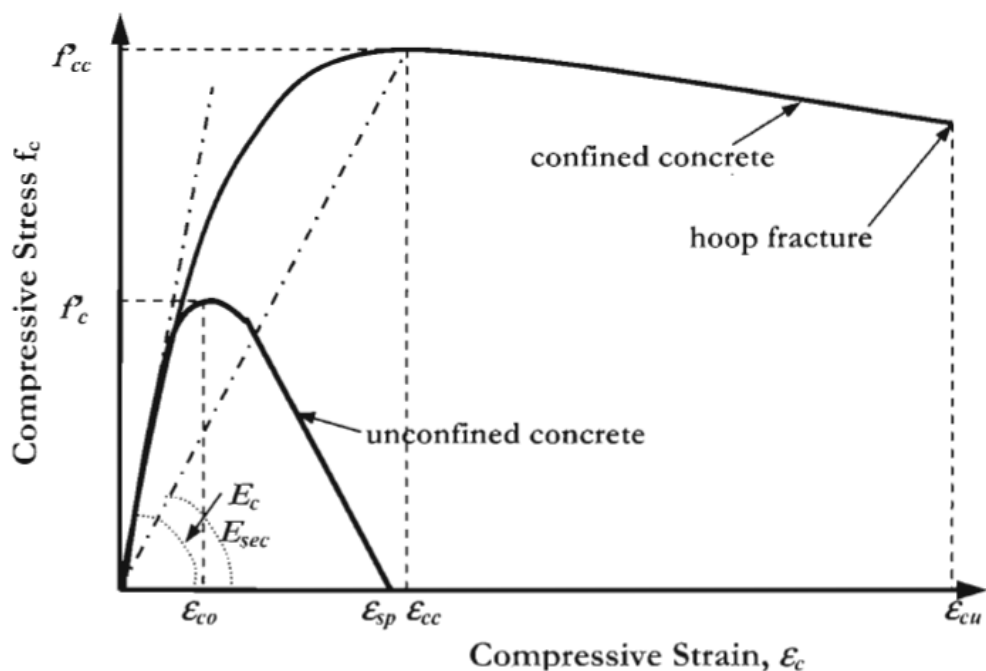


Figura 103 - Diagramma tensione-deformazione del calcestruzzo confinato e non

Tra i vari modelli esistenti per stimare le proprietà del calcestruzzo confinato uno dei più validi e utilizzati è quello che fa riferimento alla teoria di Mander, Priestley e Park (1988).

Tale teoria si basa sul calcolo dell'effettiva tensione laterale di confinamento. E' necessario parlare di tensione effettiva in quanto in base alla geometria della sezione e alla disposizione delle armature solo una parte di calcestruzzo risulta effettivamente confinata, motivo per cui la massima tensione di confinamento si riduce in base alla quota parte di calcestruzzo confinata rispetto al totale. Questo fenomeno è dovuto alla presenza di archi di scarico tra una barra di armatura (cui è impedito lo spostamento) e l'altra, nonché tra due staffe adiacenti, riducendo ovviamente l'efficacia del confinamento.

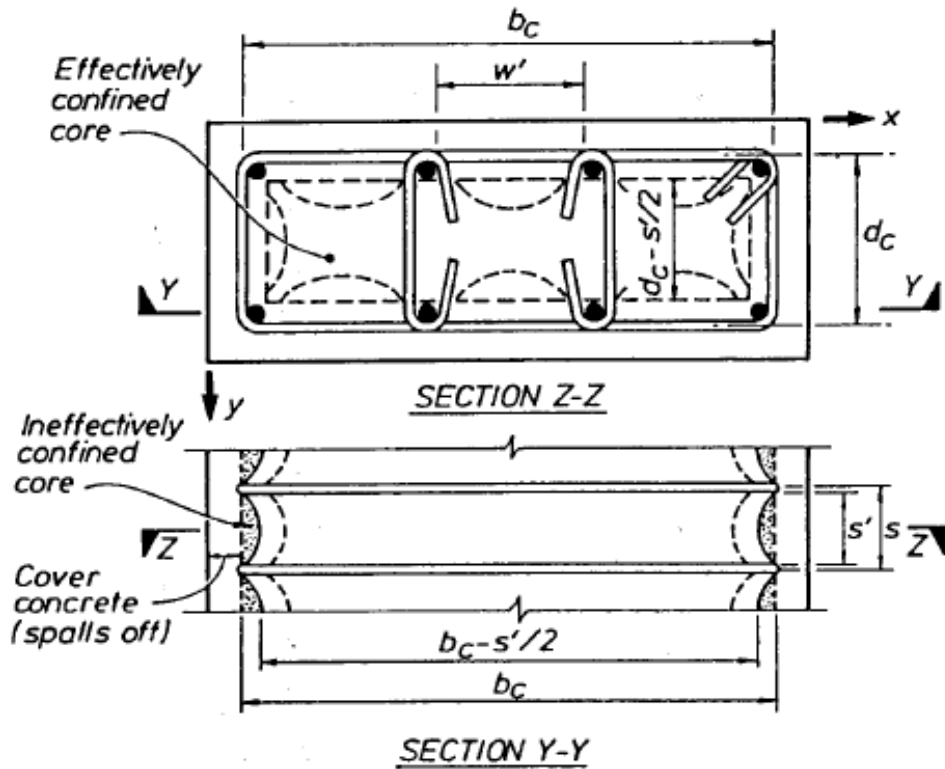


Figura 104 - Schema delle zone confinate e non in una sezione rettangolare

In linea teorica infatti, se il rinforzo fosse continuo sia nel piano della sezione che in altezza il confinamento sarebbe massimo e la tensione laterale di confinamento andrebbe calcolata con la formula di Mariotte:

$$f_l = \frac{2f_{ys}t}{D}$$

La tensione laterale effettiva è data dalla relazione:

$$f_l = 0.5K_e\rho_v f_{yh}$$

Dove  $f_{yh}$  è la tensione di snervamento delle staffe,  $\rho_v$  rappresenta la quantità di rinforzo in relazione alla dimensione del nucleo e  $K_e$  la parte di calcestruzzo confinato rispetto al totale. Per colonne rettangolari o quadrate  $\rho_v$  è dato da:

$$\rho_v = \rho_x + \rho_y$$

$$\rho_x = \frac{A_{sx}}{sd_c}$$

$$\rho_y = \frac{A_{sy}}{s d_c}$$

Dove  $s$  è il passo delle staffe e  $b_c$  e  $d_c$  sono le dimensioni del nucleo.

Il termine  $K_e$  tiene in conto il volume di calcestruzzo confinato rispetto al totale ed è funzione del numero di barre di armatura e della loro distanza, nonché del passo delle staffe.

$$k_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i')^2}{6b_c d_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2b_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2d_c}\right)}{(1 - \rho_{cc})}$$

Una volta calcolati questi parametri la relazione che definisce il legame tensione-deformazione per il calcestruzzo confinato vale:

$$f_c = \frac{f'_{cc} x \cdot r}{r - 1 + x^r}$$

Dove  $f'_{cc}$  rappresenta la tensione di picco del calcestruzzo confinato ed  $r$  è il rapporto dei moduli elastici.

$f'_{cc}$  è dato dalla relazione:

$$f'_{cc} = f'_{co} \left( -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_i}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_i}{f'_{co}} \right)$$

Dove  $f'_{co}$  è la tensione ultima del calcestruzzo non confinato e  $f'_i$  tensione laterale efficace precedentemente illustrata.

Per quanto riguarda  $r$  questo vale:

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}$$

Con  $E_{sec}$  pari al modulo secante del calcestruzzo confinato che può essere calcolato una volta nota la deformazione in corrispondenza del picco, che vale:

$$\varepsilon_{cc} = 0.002 \left( 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right)$$

#### 4.2.2 Calibrazione del modello del Calcestruzzo

Il calcestruzzo utilizzato nel pilastro prefabbricato è stato previsto con una resistenza media circa pari a  $48 \text{ MPa}$ . Considerando questo valore come la resistenza del calcestruzzo non confinato presente nella zona di copriferro, e tenendo in considerazione le caratteristiche geometriche del pilastro e della gabbia di armatura, è stata dedotta una resistenza del calcestruzzo confinato pari a  $72 \text{ MPa}$ .

Imponendo queste caratteristiche al calcestruzzo del pilastro prefabbricato sono stati ottenuti i seguenti risultati:

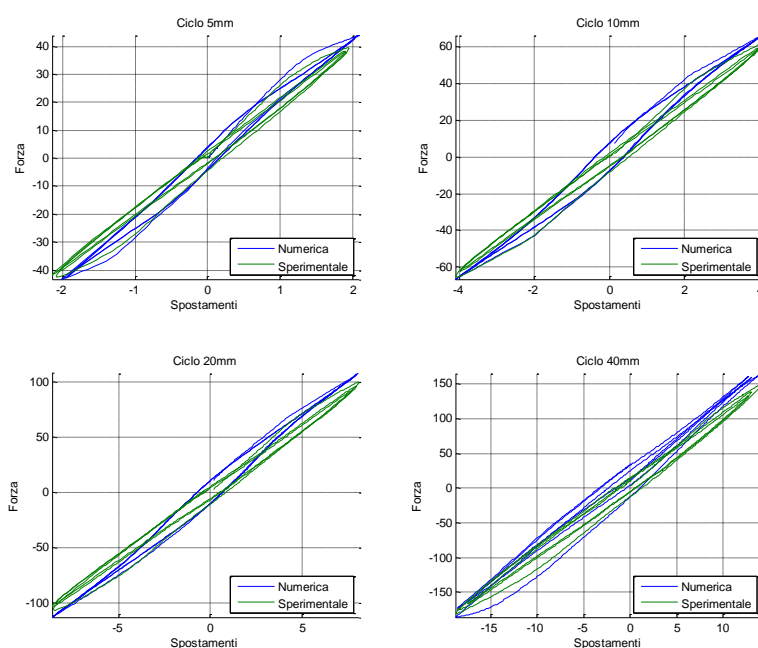


Figura 105 - Grafico Forza Spostamento per spostamenti dedotti dalla curvatura con modello di Mander per il calcestruzzo – Cicli Iniziali

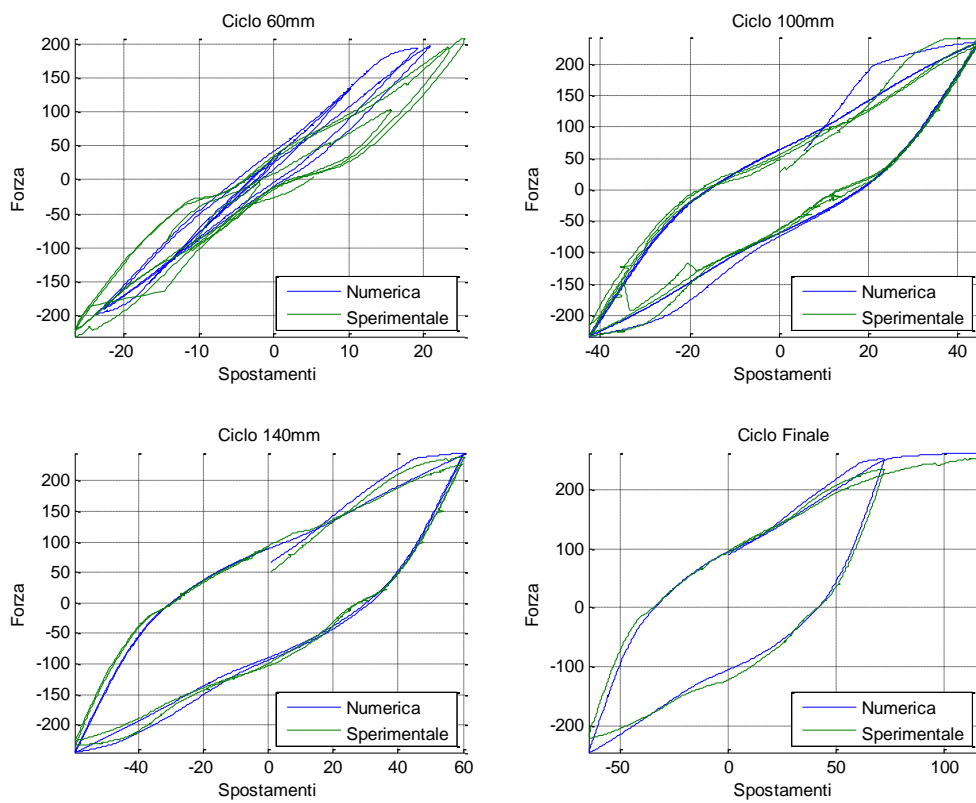


Figura 106 - Grafico Forza Spostamento per spostamenti dedotti dalla curvatura con modello di Mander per il calcestruzzo – Cicli Finali

Andando a diminuire la resistenza del calcestruzzo non confinato fino a  $38\text{ MPa}$  e quello confinato a  $61\text{ MPa}$ , è stato possibile ottenere dei risultati numerici molto simili a quelli dedotti dalla curvatura:

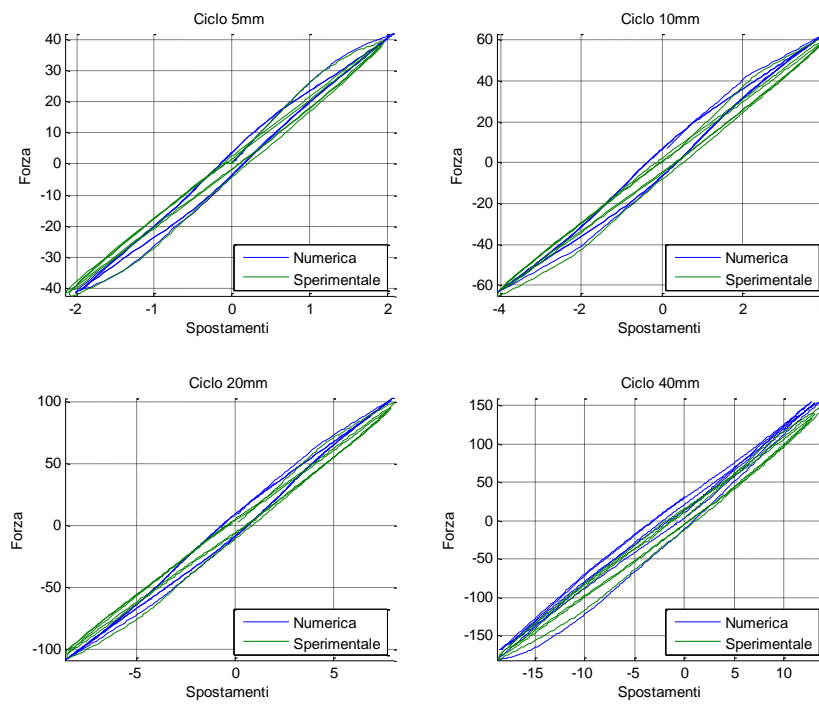


Figura 107 - Grafico Forza Spostamento per spostamenti dedotti dalla curvatura con modello calcestruzzo calibrato – Cicli Iniziali

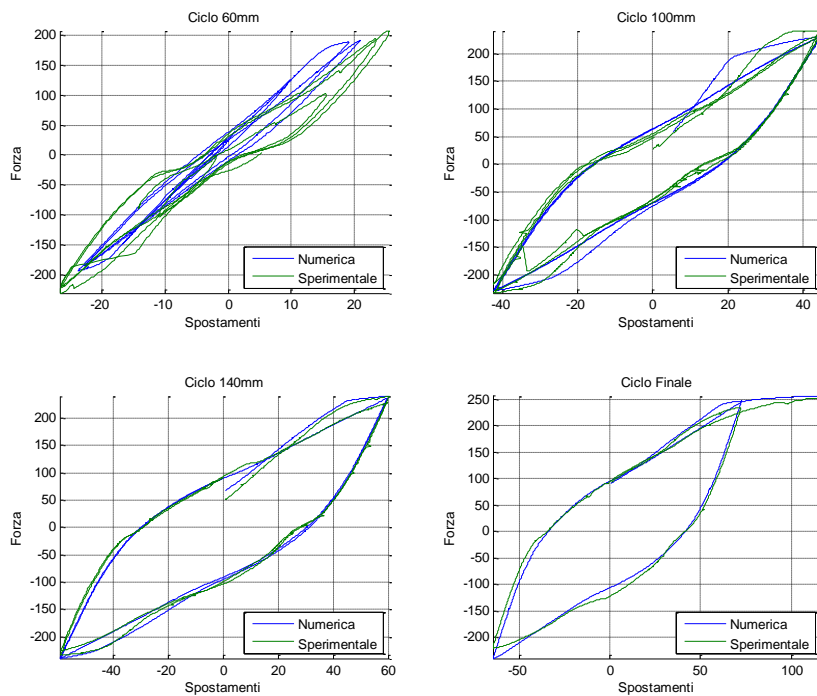


Figura 108 - Grafico Forza Spostamento per spostamenti dedotti dalla curvatura con modello calcestruzzo calibrato – Cicli Finali

Andando ad imporre gli spostamenti ottenuti sperimentalmente si ottengono i seguenti risultati in termini di Forza – Spostamento:

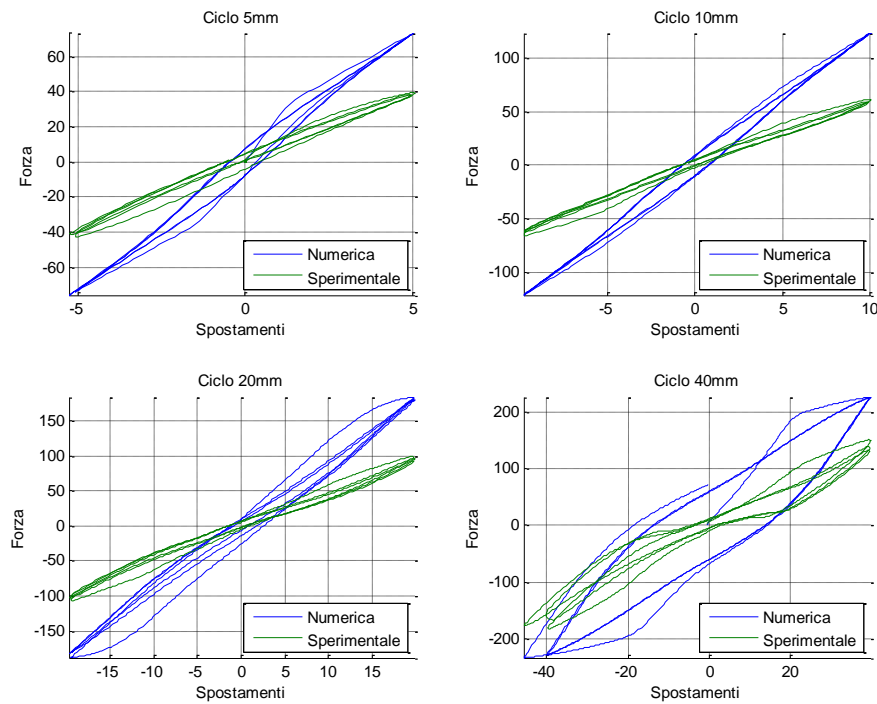


Figura 109 - Grafico Forza - Spostamenti con spostamenti sperimentali – Cicli Iniziali

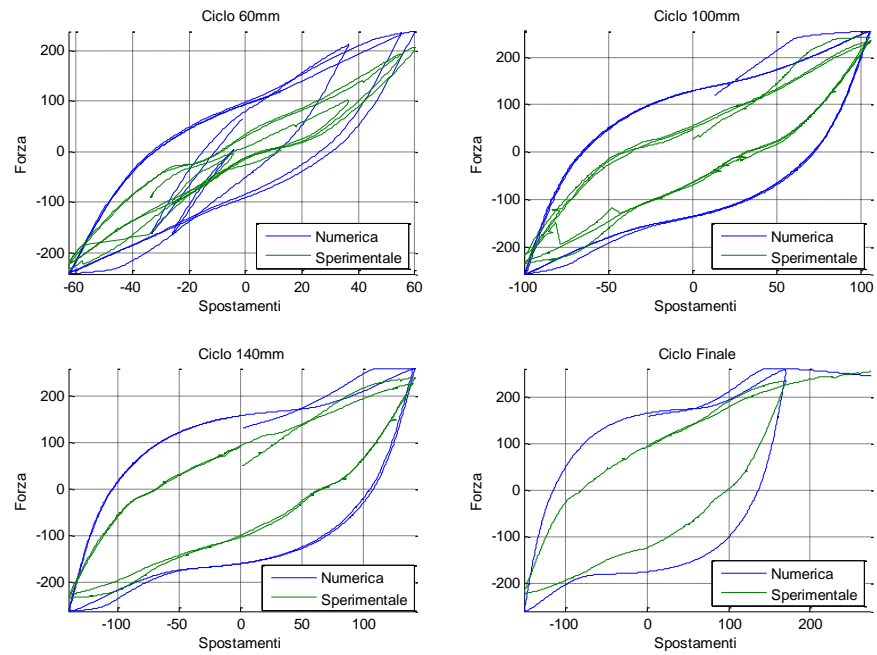


Figura 110 - Grafico Forza - Spostamenti con spostamenti sperimentali – Cicli Finali

Dalle figure appena mostrate si può notare come il modello utilizzato è più rigido rispetto al sistema reale. Questa caratteristica è molto evidente nei cicli iniziali per i quali è stata ottenuta, a parità di spostamento, una forza in sommità doppia rispetto a quella sperimentale. Nei cicli finali, dal momento che il calcestruzzo raggiunge la rottura e lo snervamento dell'acciaio è il fenomeno dominante in queste fasi di carico, si hanno dei valori della forza in sommità simili a quelli ottenuti sperimentalmente. Di seguito sono stati riportati i grafici Tensione - Deformazione del calcestruzzo confinato e non, e delle barre di armatura.

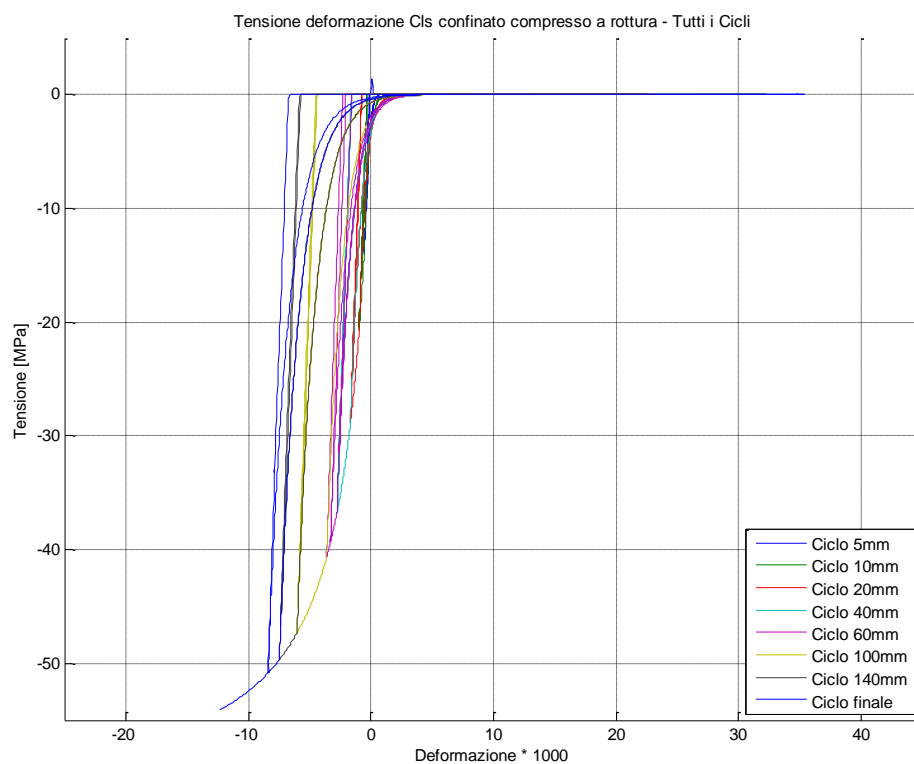


Figura 111 - Grafico Tensione - Deformazione calcestruzzo Confinato a livello del copriferro



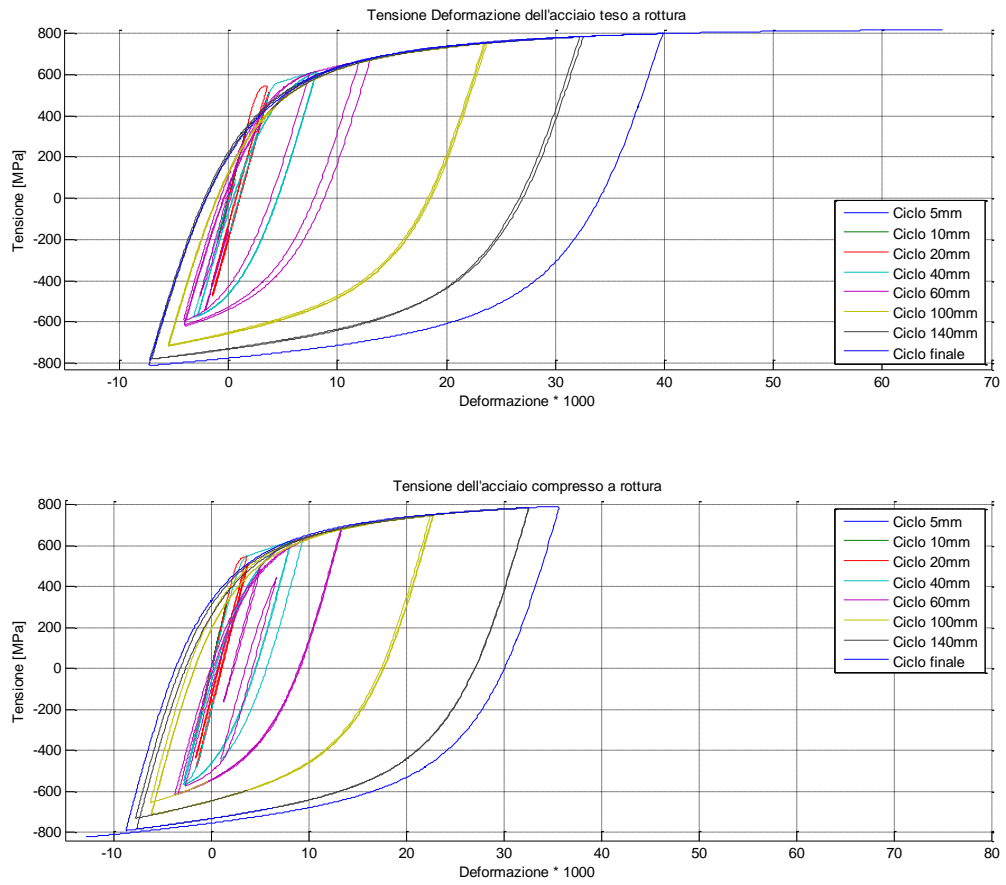


Figura 112 - Grafico Tensione - Deformazione dell'acciaio delle barre d'armatura



## **5 Modellazione dello scalino di Emaco come molla rotazionale**

### **5.1 Definizione delle caratteristiche della molla rotazionale**

Come visto al paragrafo 2.4.4.1 gli spostamenti dedotti dall'andamento della curvatura, i quali si suppone siano gli unici che vadano a deformare e quindi a sollecitare il pilastro prefabbricato, giustificano solo una quota parte di quelli misurati sperimentalmente.

Basandosi sulle misurazioni delle rotazioni alla base del pilastro, è stata inserita una molla rotazionale alla base. Il comportamento assegnato alla molla, per quanto concerne la relazione Momento – Rotazione, corrisponde a quello del materiale Hysteretic.

La molla rotazionale in questione è stata inserita allo scopo di rappresentare le rotazioni avvenute a causa della presenza dello strato di Emaco alla base del pilastro prefabbricato.

Imponendo le rotazioni misurate durante la prova sperimentale all'elemento ZeroLength, che all'interno di OpenSees rappresenta una molla rotazionale, sono stati ottenuti i risultati mostrati in Figura 113:

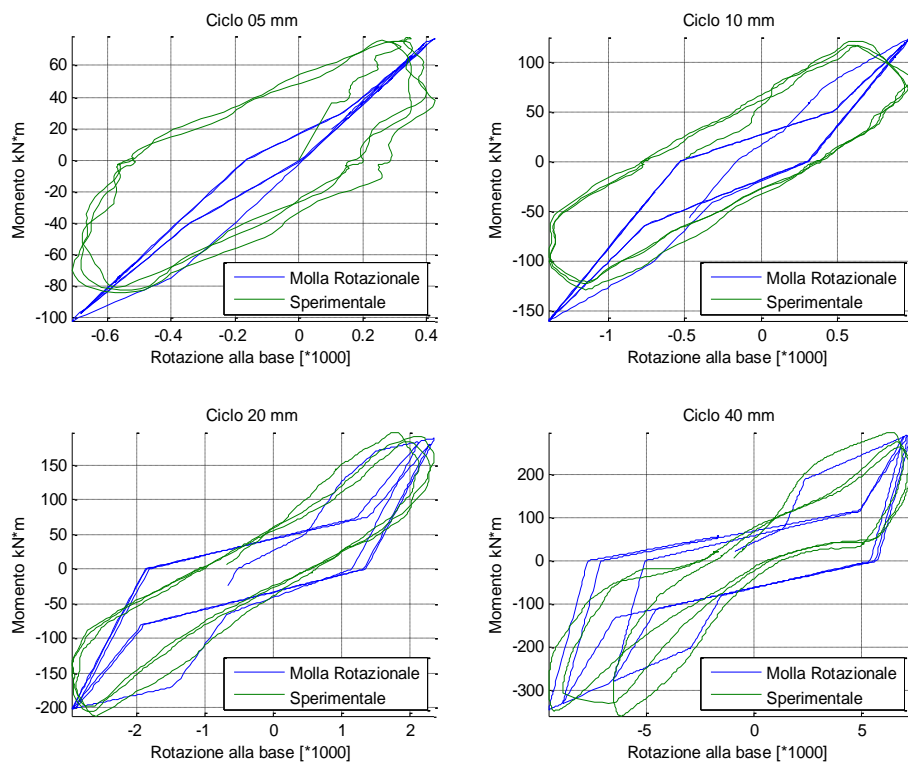


Figura 113 - Grafici Momento – Rotazione alla base – Cicli Iniziali

Per la molla rotazionale si ottiene complessivamente il seguente andamento del rapporto Momento – Rotazione:

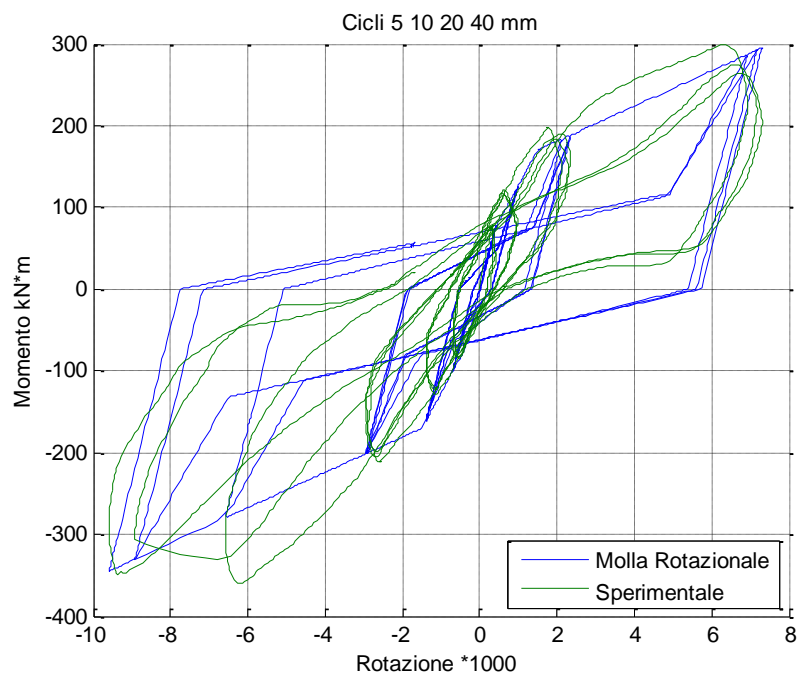
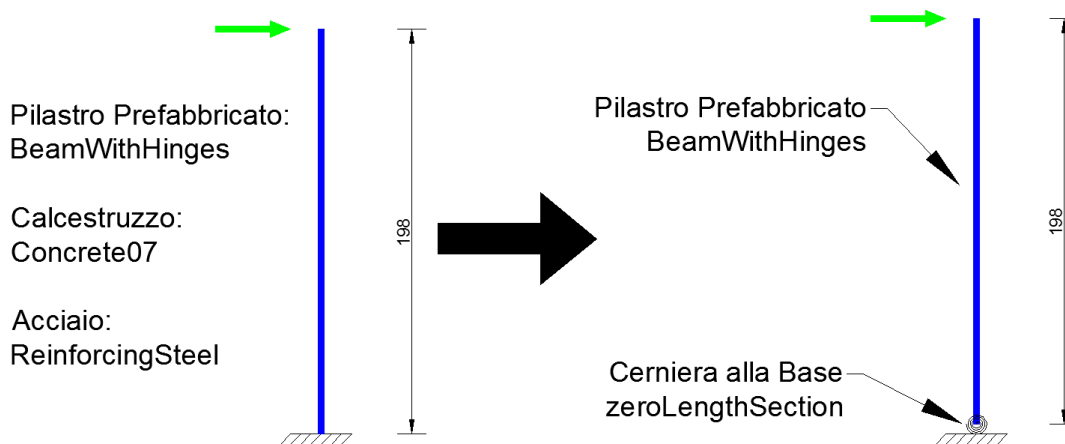


Figura 114 - Grafico Momento Rotazione - Molla rotazionale - Cicli Iniziali

Visto il particolare sviluppo delle rotazioni misurate alla base del pilastro rispetto ai momenti flettenti, tramite la molla rotazionale non è stato possibile riprodurre in maniera esatta l'evoluzione della suddetta relazione, si è cercato, pertanto, di rappresentare al meglio solamente la rigidezza complessiva di ogni fase di carico.

## 5.2 Applicazione di una molla rotazionale alla base

Una volta definite le caratteristiche della molla è stata inserita all'interno del modello globale come mostrato nella seguente figura:



*Figura 115 – Modello con pilastro incastrato – Modello con molla rotazionale*

Di seguito sono stati riportati i risultati in termini di Forza – Spostamento in sommità.

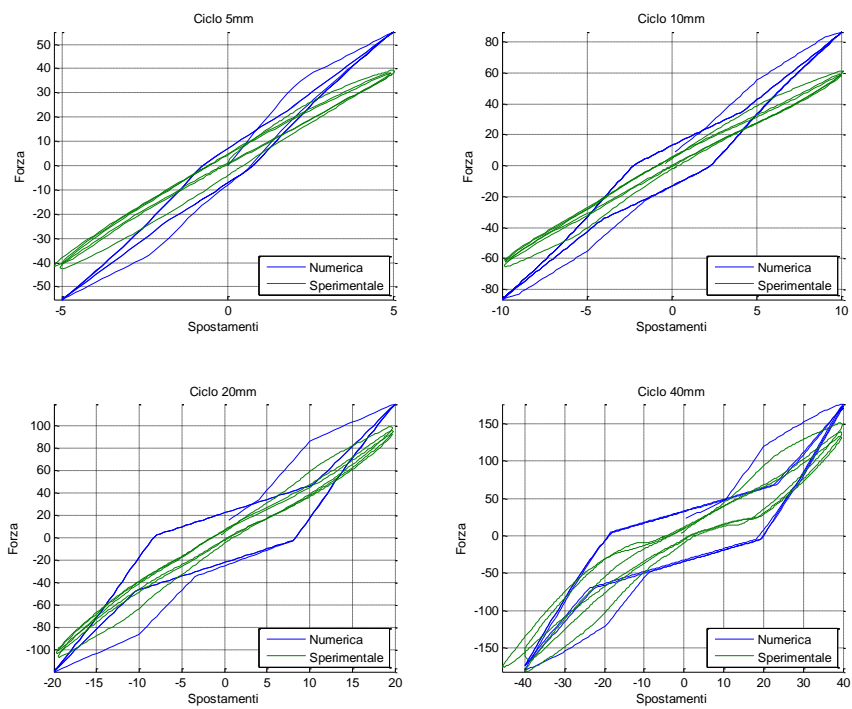


Figura 116 - Grafici Forza – Spostamento - Modello con cerniera alla base - Cicli Iniziali

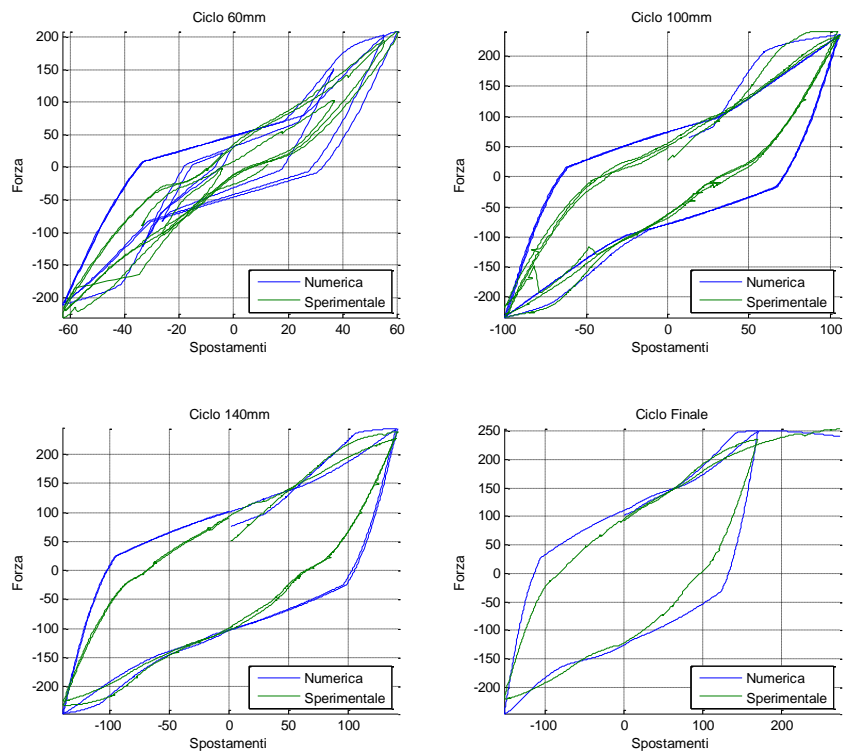


Figura 117 - Grafici Forza – Spostamento - Modello con cerniera alla base - Cicli Finali

Come si può notare, nei cicli iniziali la soluzione numerica rispetto al caso sperimentale risulta ancora troppo rigida. Nelle fasi finali, invece, poiché il comportamento è legato soprattutto allo snervamento delle barre di armatura, la differenza principale fra i due risultati è legata al comportamento troppo isteretico della soluzione numerica.

La più probabile motivazione di questo divario fra le due soluzioni consiste nel fatto che nel modello non è stata presa in considerazione una eventuale rotazione rigida del plinto di fondazione rispetto alla pavimentazione del laboratorio.

Al fine di rappresentare tale fenomeno nel modello è stata aggiunta una seconda molla rotazionale alla base del pilastro, come descritto nel paragrafo seguente.

### **5.3 Introduzione di una seconda molla rotazionale**

Come detto precedentemente è stata inserita una seconda molla rotazionale al fine di tenere in considerazione l'eventuale rotazione rigida del plinto rispetto alla pavimentazione, questa giustifica il divario residuo fra gli spostamenti ottenuti sperimentalmente rispetto a quelli numerici.

In questo caso il legame costitutivo della molla, in termini di Momento-Rotazione, è di tipo elastico lineare; questo è stato calibrato in base ai diagrammi Forza – Spostamento in sommità, poiché al contrario di quello che è avvenuto per lo scalino di Emaco, non sono state effettuate misurazioni che riguardano le rotazioni del plinto di fondazione.

Il modello è stato aggiornato nel seguente modo:

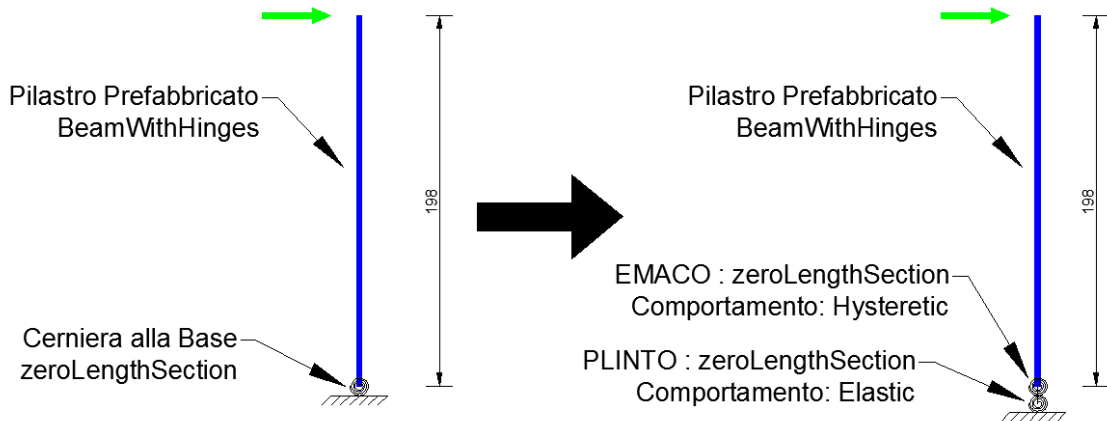


Figura 118 - Modello con molla rotazionale – Modello con due molle rotazionali

La rigidezza della suddetta molla è di:

$$K_{rot\ plinto} = 67000 \frac{kN * m}{rad}$$

Di conseguenza sono stati ottenuti i seguenti grafici Forza – Spostamento in sommità:

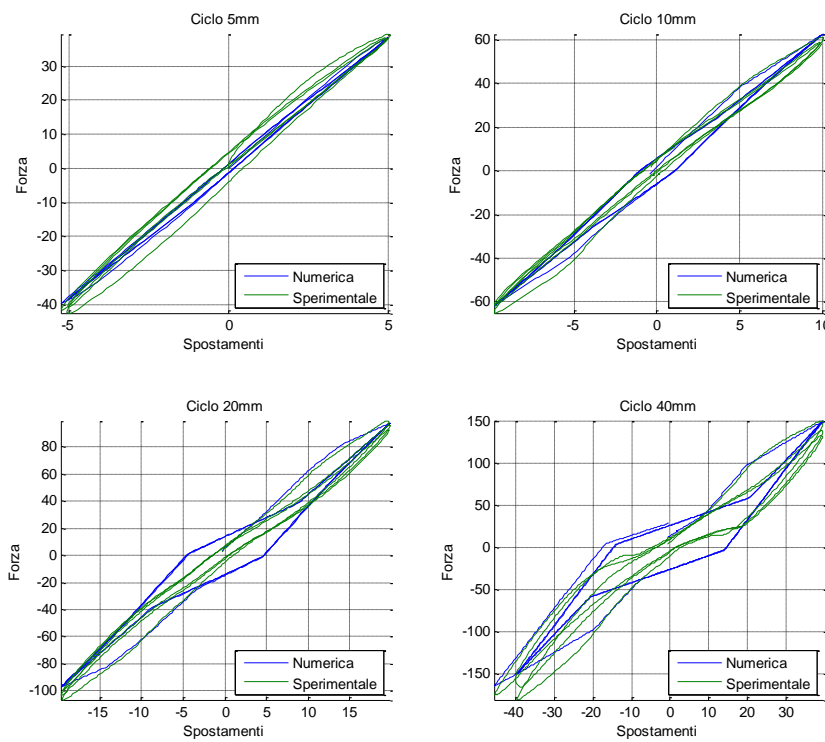


Figura 119 - Grafici Forza – Spostamento - Modello con due cerniere alla base - Cicli Iniziali



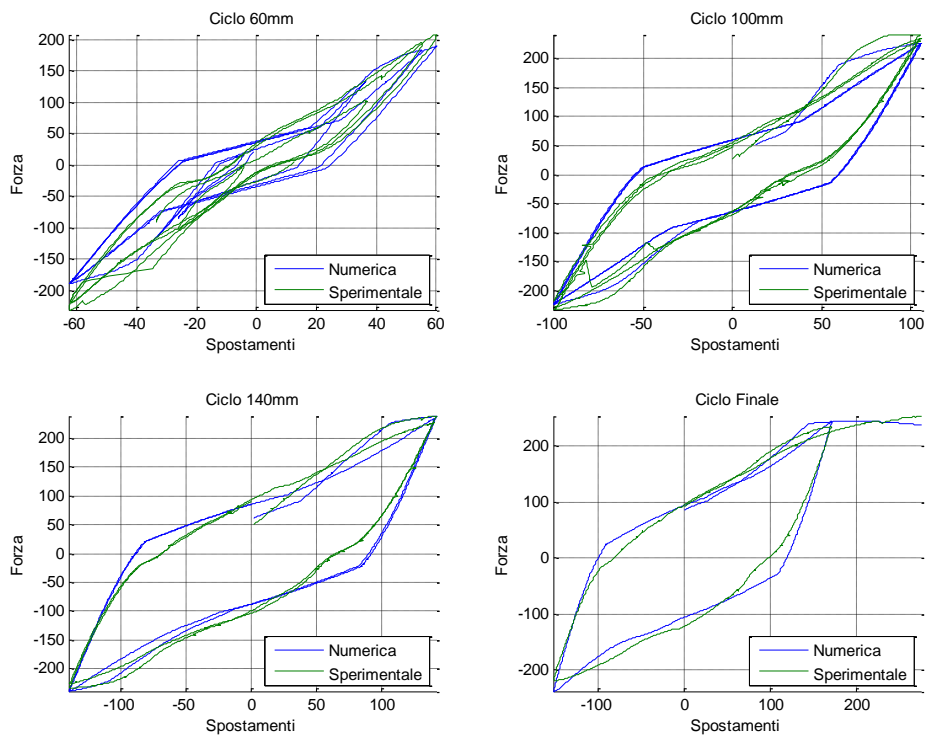


Figura 120 - Grafici Forza – Spostamento - Modello con due cerniere alla base - Cicli Finali

In questo caso le forze ottenute, associate agli spostamenti impressi, sono molto simili a quelle ottenute sperimentalmente. Questi ultimi risultati confermano la teoria che, durante tutto lo svolgimento della prova, è molto probabile che si sia verificata una rotazione rigida del sistema plinto-pilastro.

Una possibile giustificazione di questo fenomeno è stata analizzata nei paragrafi seguenti.

## 5.4 Esempio di analisi per la modellazione del legame

### Momento Rotazione per collegamenti Duttili

Di seguito è stata riportata la procedura utilizzata per stimare il comportamento alla base del plinto prefabbricato. Come descritto nel primo capitolo, il plinto è stato ancorato alla pavimentazione attraverso quattro barre DYWIDAG  $\phi 36$ ; ogni singola barra è stata sottoposta ad una precompressione di  $10t$ .

Le difficoltà principali nella modellazione del comportamento di armature non confinate, che violano la compatibilità delle deformazioni nella sezione fra acciaio e calcestruzzo, riguardano la definizione della posizione dell'asse neutro attraverso un'equazione in forma chiusa. E' quindi necessario andare a utilizzare un procedimento di iterazione, che soddisfi sia l'equilibrio che la compatibilità dell'elemento.

Mentre l'equazione di equilibrio può essere formulata a livello della sezione critica, la relazione che riguarda la compatibilità delle deformazioni, deve tenere in conto del comportamento globale della connessione e degli elementi collegati.

Il procedimento mostrato in seguito è stato concepito per essere valido per ogni tipologia di connessione caratterizzata da:

- Barre parzialmente confinate o non confinate
- Segmenti di acciaio lento non confinato.
- Connessione ibrida dei due casi precedenti.

Lo schema generale farà riferimento ad una connessione ibrida con la presenza di cavi non confinati (assunti a metà dell'altezza della sezione) e di acciaio dolce non confinato per una breve segmento a livello del collegamento degli elementi. L'applicazione allo schema in esame è stata ottenuta modificando il procedimento generale mostrato in seguito.

### 5.4.1 Schema della procedura

Il procedimento mostrato fa riferimento ad un collegamento fra colonna-pilastro non confinato. Dopo la descrizione di tutti i passaggi, verranno esposti gli accorgimenti utilizzati per ricondursi allo schema in esame.

#### Passo 1 – Fissare la rotazione $\theta$

L'effettiva rotazione  $\theta_b$  che si sviluppa nell'interfaccia trave-colonna, a causa dell'apertura delle fessure, può essere riferita allo spostamento del sistema con semplici considerazioni geometriche:

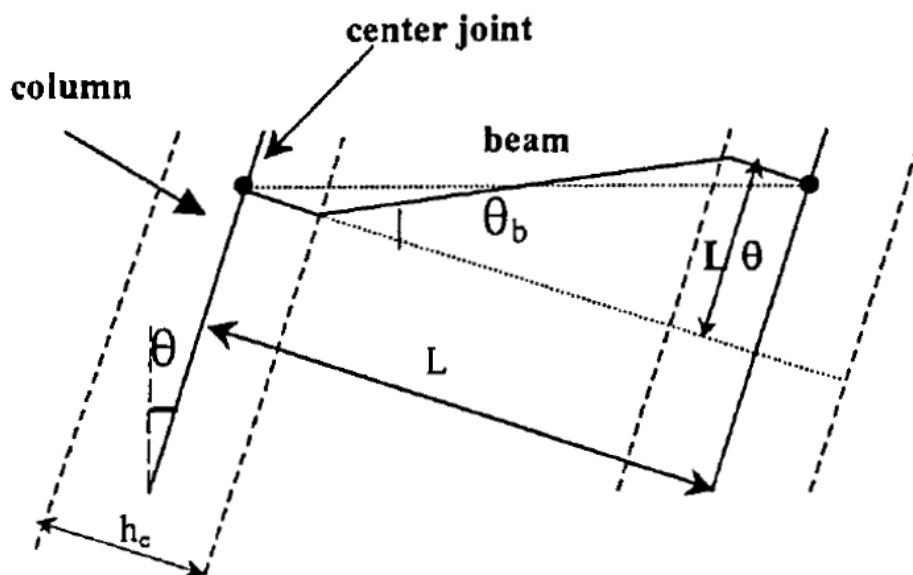


Figura 121 - Relazione geometrica fra lo spostamento interpiano e la rotazione della trave

$$\theta_b = \frac{\theta}{1 - \frac{h_c}{L}}$$

Dove:

- $h_c$  : larghezza della colonna
- $\theta$  : rotazione della colonna ( media fra lo spostamento sopra e sotto il livello del piano )
- $L$  : lunghezza di calcolo della trave ( misurata fra i centri dei due nodi)

**Passo 2 – Ipotizzare la posizione iniziale dell'asse neutro  $c$  per la trave**

**Passo 3 – Valutazione della deformazione nei cavi di precompressione**

L'aumento della deformazione nei cavi da precompressione a causa della deformazione della trave viene preso in considerazione in questo modo:

$$\varepsilon_{pt} = \frac{n\Delta_{pt}}{l_{ub}}$$

Dove:

- $n$  : numero totale di aperture lungo la trave ( nell'interfaccia trave-pilastro)
- $l_{ub}$  . lunghezza non confinata dei cavi
- $\Delta_{pt}$  : allungamento ( elastico e plastico) a livello dei cavi:

$$\Delta_{pt} = \theta_b \left( \frac{h}{2} - c \right)$$

- $h/2 - c$  : è la posizione relativa dei cavi precompressi ( considerati a metà altezza della sezione )
- $h$  : altezza della sezione

**Passo 4 – Valutazione della deformazione dell'acciaio lento e del calcestruzzo**

Come detto in precedenza è stata ignorata la compatibilità delle deformazioni nella sezione, allo scopo di mettere in relazione la deformazione dell'acciaio lento e quella dei cavi di precompressione, che dovrebbe essere valutata separatamente in accordo alla deformazione di tutti gli elementi a trave.

In questo caso la concentrazione della rotazione nell'interfaccia trave-colonna a causa dell'apertura delle fessure semplifica la procedura.

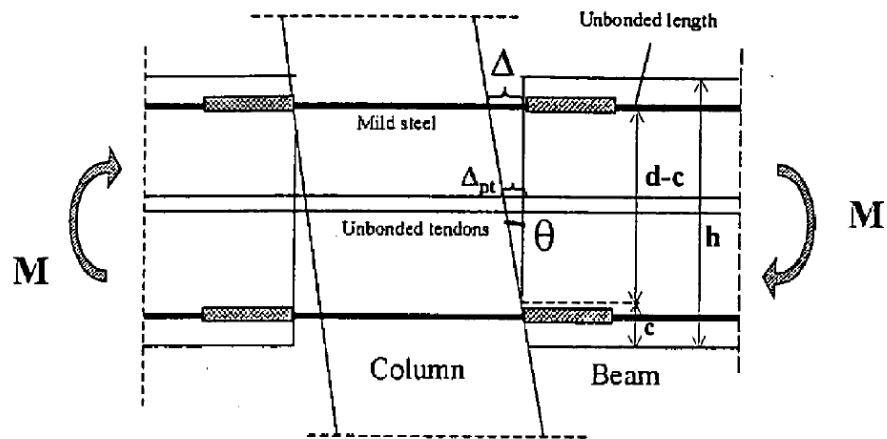


Fig. 4. Gap opening mechanism.

Figura 122 - Meccanismo di apertura delle fessure

La deformazione dell'acciaio può essere calcolata come:

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta - 2\Delta_{sp}}{l'_{ub}}$$

Dove:

- $l'_{ub}$  : lunghezza non confinata dell'acciaio lento
- $\Delta$  : allungamento a livello dell'acciaio lento, a causa dell'apertura delle fessure
- $\Delta_{sp}$  : spostamento a causa dello scorrimento

Per l'acciaio lento è stato assunto che si verifichi uno scorrimento delle barre in entrambi i nodi nelle zone non confinate

L'estensione totale delle barre di armatura nelle aperture è di:

$$\Delta_{sp} = \frac{2}{3}l_{sp}\varepsilon_e + l_{sp}\varepsilon_p$$

Dove:

- $l_{sp}$  : deformazione dovuta allo scorrimento presa pari a  $0.15f_y d_{bl}$
- $f_y$  : tensione di snervamento delle bare di armatura
- $d_{bl}$  : diametro delle barre di armatura
- $\varepsilon_e$  : deformazione elastica delle barre di armatura

- $\varepsilon_p$  : deformazione elastica delle barre di armatura

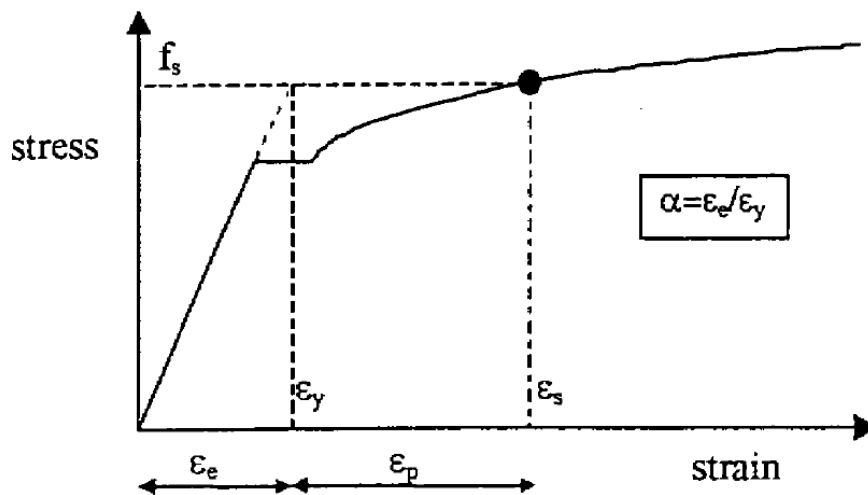


Figura 123 – Componenti di deformazione elastiche e plastiche dell'acciaio

Sostituendo  $\varepsilon_p = \varepsilon_s - \varepsilon_e$  e  $\varepsilon_e = \alpha * \varepsilon_y$  si ottiene:

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta - (4/3l_{sp}\alpha\varepsilon_y - 2l_{sp}\alpha\varepsilon_y)}{l'_{ub} + 2l_{sp}}$$

Che può essere semplificata in:

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta + 2/3l_{sp}\alpha\varepsilon_y}{l'_{ub} + 2l_{sp}}$$

La deformazione del calcestruzzo dovrebbe essere dedotta da un'accurata relazione che però non può più essere riferita alla classica ipotesi di distribuzione lineare. Se si assume un legame tensione-deformazione corretto per il calcestruzzo, il problema consisterebbe nel risolvere un sistema a due incognite, cioè l'asse neutro  $c$  e la deformazione del calcestruzzo  $\varepsilon_c$ . Quindi devono essere introdotte due equazioni: l'equilibrio della sezione e una sorta di compatibilità dell'elemento. A questo punto l'assunzione di un andamento triangolare o rettangolare ( tipo stress block) può fornire un'approssimazione accettabile. Introducendo questo tipo di schematizzazione delle tensioni, il calcolo di  $\varepsilon_c$  non è più necessario, e la procedura si riduce in un procedimento iterativo in un'unica variabile  $c$ .

### **Passo 5 – Equilibrio della sezione: correzione della variabile $c'$**

La risultante della compressione nel calcestruzzo è calcolata considerando l'equazione di equilibrio nella sezione:

$$C + T_S + C'_S = T_{pt}$$

Dove la forza di precompressione  $T_{pt}$ , agendo come forza esterna, è pari alla somma della precompressione iniziale  $T_{in}$  e dall'incremento dovuto alla deformazione della trave:

$$T_{pt} = T_{in} + f(\varepsilon_{pt})A_{pt}$$

Dove:

- $\varepsilon_{pt}$  : allungamento dei cavi da precompressione
- $f(\varepsilon_{pt})$  : tensione di trazione nel cavo da precompressione a causa della loro deformazione

La posizione dell'asse neutro  $c'$  deriva quindi dalla risultate delle compressioni nel calcestruzzo  $C$ , in funzione del legame tensione-deformazione scelto. Un approccio semplificato può essere utilizzato assumendo uno stress-block equivalente per rappresentare la distribuzione della tensione nel calcestruzzo.

### **Passo 6 – Procedimento iterativo fino alla convergenza**

Viene eseguita un'iterazione nella modifica della posizione dell'asse neutro  $c$  fino al raggiungimento della convergenza. A rigore dovrebbe essere effettuato anche un controllo incrociato sull'ipotesi iniziale riguardante la relazione fra le componenti di deformazione elastiche e plastiche nei cavi da precompressione. Di conseguenza dovrebbero essere eseguite alcune "doppie" iterazioni, su  $c$  e  $\alpha$ , fino al raggiungimento della convergenza per entrambi i parametri. Si può notare come l'aggiornamento di  $\alpha$  è importante per piccoli livelli di deformazione ( quindi a bassi livelli di rotazione-spostamento) e diventa trascurabile per livelli più alti, dove si entra nel dominio plastico.

### **Passo 7 – Calcolo della capacità in termini di momento**

Come passo finale, la capacità resistente in termini di momento flettente della sezione, corrispondente alla rotazione fissata  $\theta_b$ , può essere ottenuta calcolando il momento rispetto ad un asse ( per esempio rispetto all'asse centrale).

#### **5.4.2 Applicazione allo schema in esame**

La procedura appena descritta è stata utilizzata per la modellazione del contatto fra plinto e pavimentazione della prova in esame. Come citato in precedenza, il plinto è collegato alla pavimentazione attraverso quattro barre DYWIDAG  $\phi 36$ ; ogni singola barra è stata sottoposta ad una precompressione pari a 10 t.

Poiché in questo caso il modello è composto dal sistema plinto-pavimentazione e non trave-pilastro come nella procedura generale, per il calcolo della deformazione dei cavi da precompressione  $\varepsilon_{pt}$  è stata considerata direttamente la rotazione della sezione di base del plinto rispetto alla pavimentazione:

$$\varepsilon_{pt} = \frac{\theta(d - c)}{L_{ub}}$$

Essendo  $\varepsilon_{pt} = \Delta_{pt}/L_{ub}$  la deformazione a livello dei cavi da precompressione e  $\Delta_{pt} = \theta(d - c)$  l'allungamento dei cavi da precompressione.

Inoltre, vista l'assenza di barre in acciaio lento che colleghino il plinto alla fondazione, risulterà nulla la componente  $T_s$  nell'equazione di equilibrio.

Lo sforzo di precompressione totale, introdotto tramite le barre DYWIDAG, è stato quindi considerato come un carico esterno pari a:

$$P = 40 t$$

Per quanto riguarda la compressione del calcestruzzo si è scelto un andamento rettangolare delle tensioni (tipo stress block):



$$C = 0.8 * c * b * f_c$$

Dove:

- $b$  : larghezza del plinto,
- $f_c$  : resistenza a compressione del calcestruzzo

Per quanto concerne i cavi da precompressione si ha:

$$T = f(\varepsilon_{pt})A_{pt}$$

Dove:

- $\varepsilon_{pt}$  : allungamento dei cavi da precompressione
- $f(\varepsilon_{pt})$  : tensione di trazione nel cavo da precompressione a causa della loro deformazione.

Il legame tensione-deformazione, che andrà a definire lo sforzo di trazione  $f(\varepsilon_{pt})$ , è stato scelto di tipo bilineare.

Ricordando che la tensione di snervamento per le barre DYWIDAG è circa pari a  $950 \text{ MPa}$ , si ha:

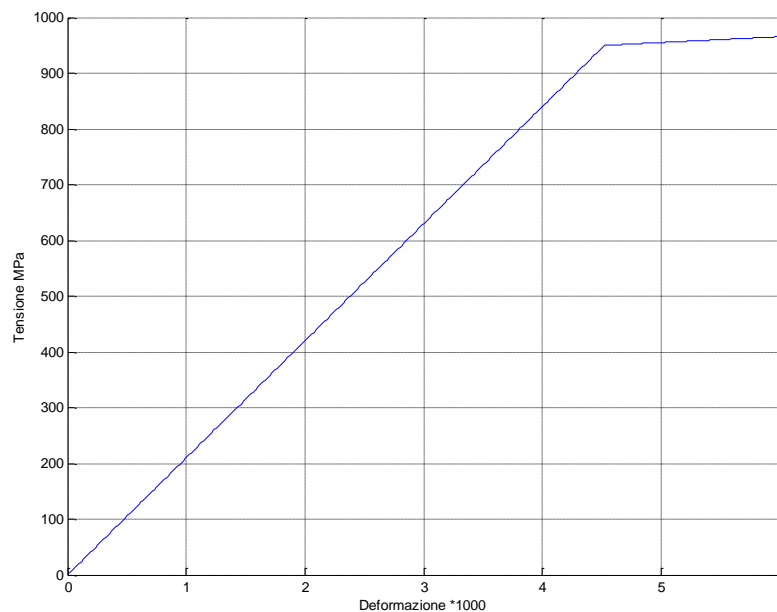


Figura 124 – Legame costitutivo dell'acciaio per barre DYWIDAG

A questo punto è stato possibile definire l'equazione di equilibrio da soddisfare:

$$0.8 * c * b * f_c + f(\varepsilon_{pt})A_{pt} = P$$

L'area  $A_{pt}$  corrisponde all'area di due barre DYWIDAG che subiranno una deformazione di trazione a causa della rotazione del plinto.

Le altre due barre presenti, invece, nella zona compressa non forniscono alcun contributo di compressione, a causa del sistema di fissaggio utilizzato.

Trascurando la resistenza a trazione del calcestruzzo, sono stati ottenuti i seguenti andamenti della risultate a trazione e a compressione:

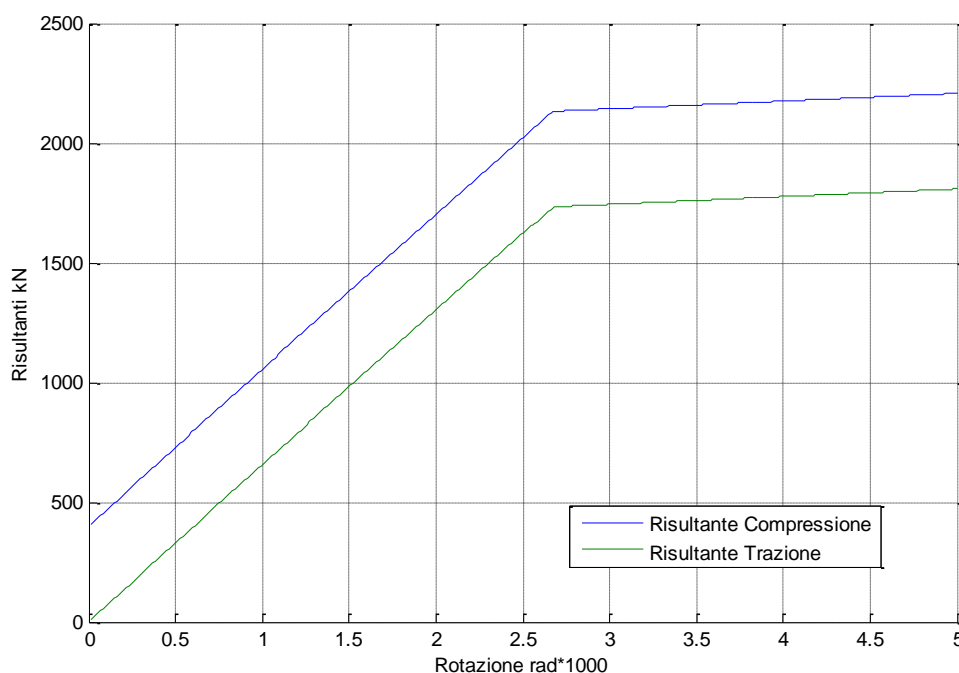
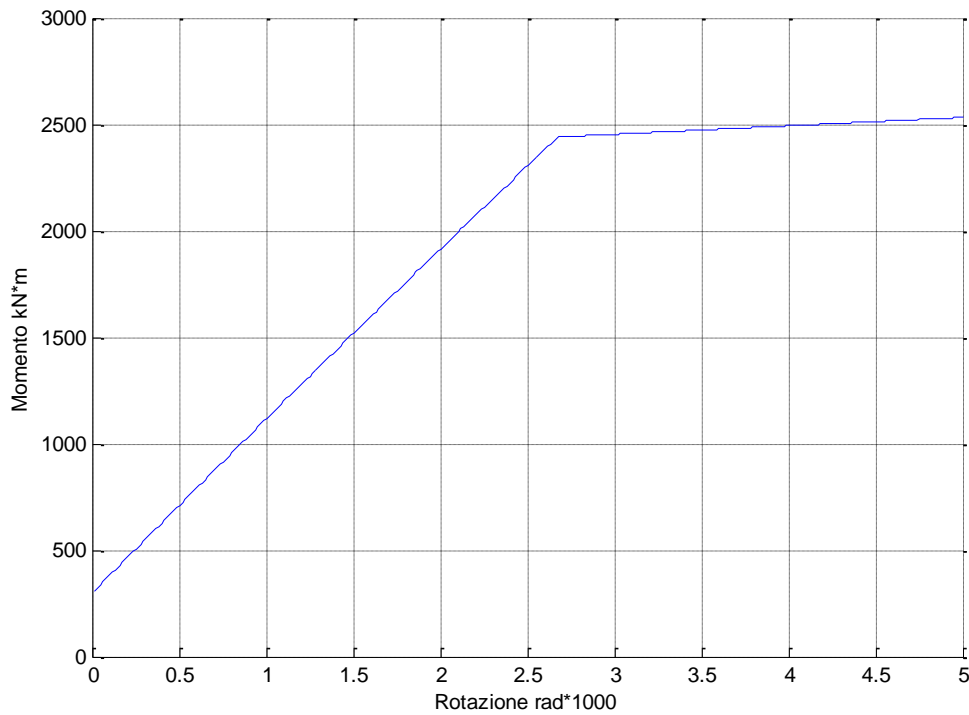


Figura 125 - Andamento della risultante a compressione e trazione

Come si può notare dalla Figura 125 si è ottenuta una differenza costante fra le due risultanti, pari alla precompressione introdotta inizialmente.

Andando a calcolare il momento rispetto l'asse centrale, è stato definito il seguente rapporto Momento-Rotazione:



*Figura 126 – Grafico Momento-Rotazione*

Andando a confrontare i risultati appena mostrati, con i valori dedotti dall'esperimento, è possibile affermare che durante lo svolgimento della prova si sono verificate, a parità di momento alla base del plinto, delle rotazioni rigide del pilastro ben maggiori rispetto a quelle appena calcolate.

La rigidezza ottenuta per quanto riguarda il range di momenti flettenti che si sono misurati nella prova, quindi quella corrispondente al tratto con barre non snervate, è di  $K_{rocking} = 800000 \text{ kN} * \text{m}/\text{rad}$ . Questo valore è, infatti, molto al di sopra della rigidezza ottenuta al paragrafo 5.3 la quale è pari a  $K_{rot \text{ plinto}} = 67000 \text{ kN} * \text{m}/\text{rad}$ .

## 5.5 Modellazione dell'interfaccia Plinto – Pavimentazione con un letto di molle

In questo caso è stato scelto di schematizzare la pavimentazione al di sotto del plinto come un insieme di molle con rigidità traslazionale verticale, ognuna delle quali rappresenta una fibra di Calcestruzzo di larghezza 15 cm e lunghezza 150 cm, per un totale di 10 molle. Il legame costitutivo associato a queste molle è di tipo Concrete01 ( Paragrafo 3.2.1 ) in quanto non fornisce alcuna resistenza a trazione.

Le barre di precompressione sono state inserite come quattro bielle ( elementi Truss in OpenSees) precomprese di lunghezza 160 cm, 80 cm all'interno del plinto e 80 cm all'interno della pavimentazione.

Tutti gli elementi appena citati sono stati collegati con elementi infinitamente rigidi al nodo centrale della pavimentazione come mostrato in Figura 127

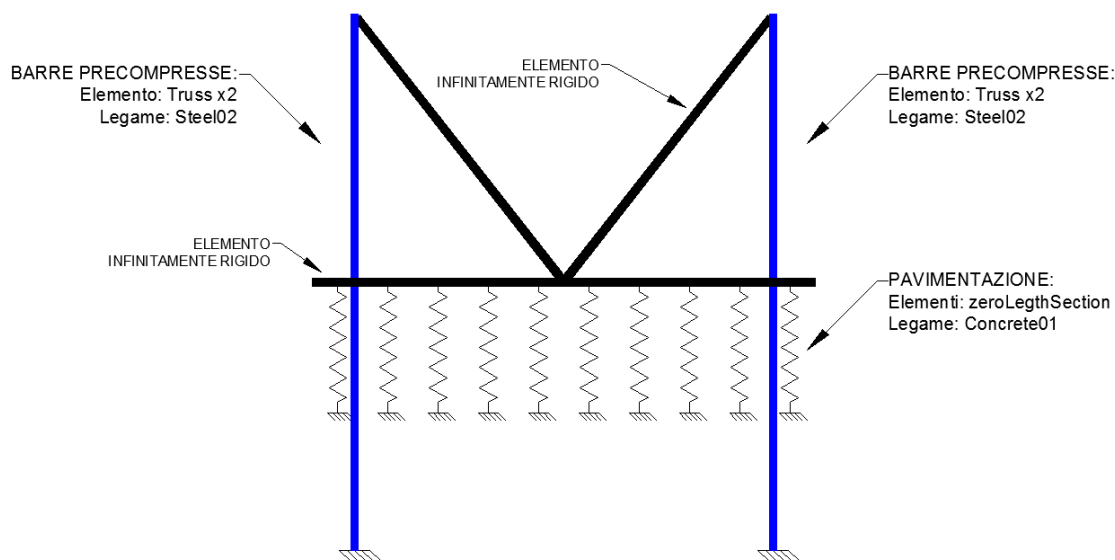
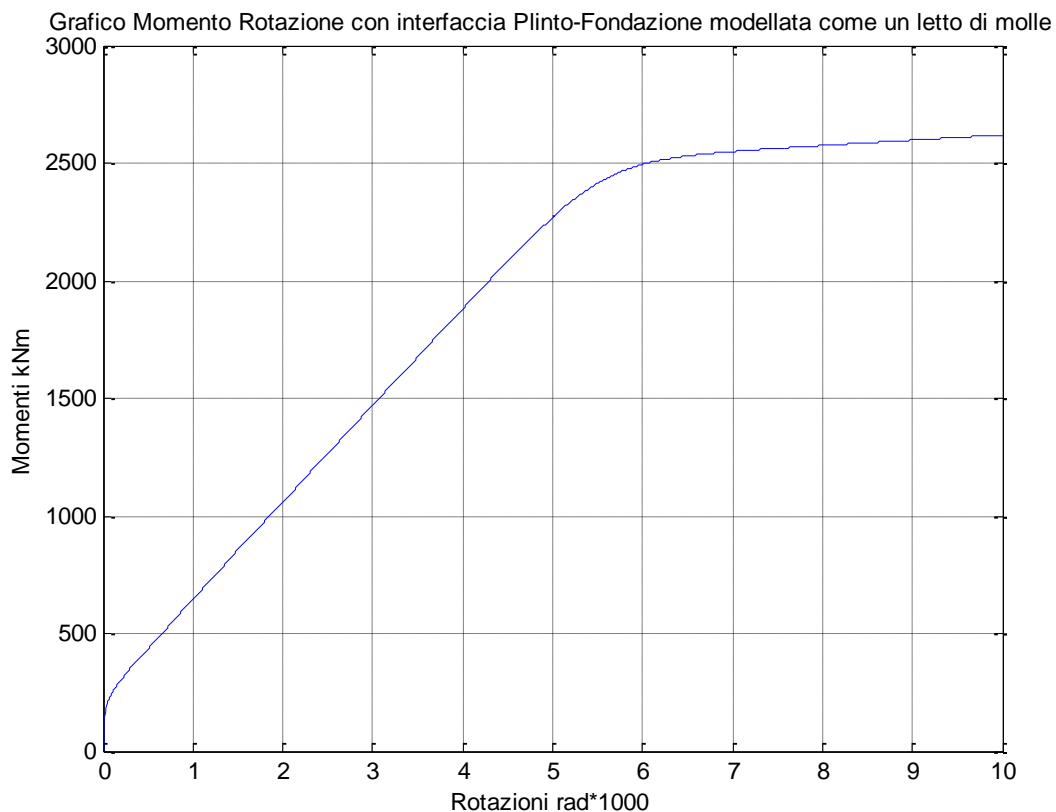


Figura 127 - Modellazione dell'interfaccia Plinto - Pavimentazione con un letto di molle

Per il modello appena mostrato è stato ottenuto il seguente grafico Momento – Rotazione che fa riferimento alla base del plinto:



*Figura 128 - Grafico Momento - Rotazione alla base del plinto modellando l'interfaccia plinto fondazione con un letto di molle*

Per rotazioni molto piccole si è ottenuta una rigidezza molto elevata poiché la sezione è ancora interamente reagente, dopo di che ( a livello di  $200\text{ kN}$  circa ) si ha una rigidezza dell'ordine di grandezza di quella calcolata in precedenza, ed infine un tratto di hardening.

Andando a confrontare le rotazioni del grafico precedente con le quelle attribuite alla rotazione rigida del plinto, si ottiene una rigidezza di  $412000\text{ kN} * m$ , che è pari alla metà di quella calcolata nel paragrafo precedente, ma ancora molto maggiore rispetto a quella necessaria.

Gli spostamenti in sommità attribuiti alla rotazione del plinto sono stati calcolati sottraendo a quelli sperimentali i contributi della curvatura e della rotazione nello scalino di Emaco, calcolati nei paragrafi 2.4.4.1 e 2.4.4.2.

Le rotazioni sono state ottenute dividendo questi spostamenti per la distanza fra la sommità del pilastro e la base del plinto che risulta pari a 2.85 m.

Di seguito è stato riportato il confronto fra il grafico Momento – Rotazioni ottenuto con la modellazione appena definita e la molla con comportamento elastico utilizzata nel modello numerico.

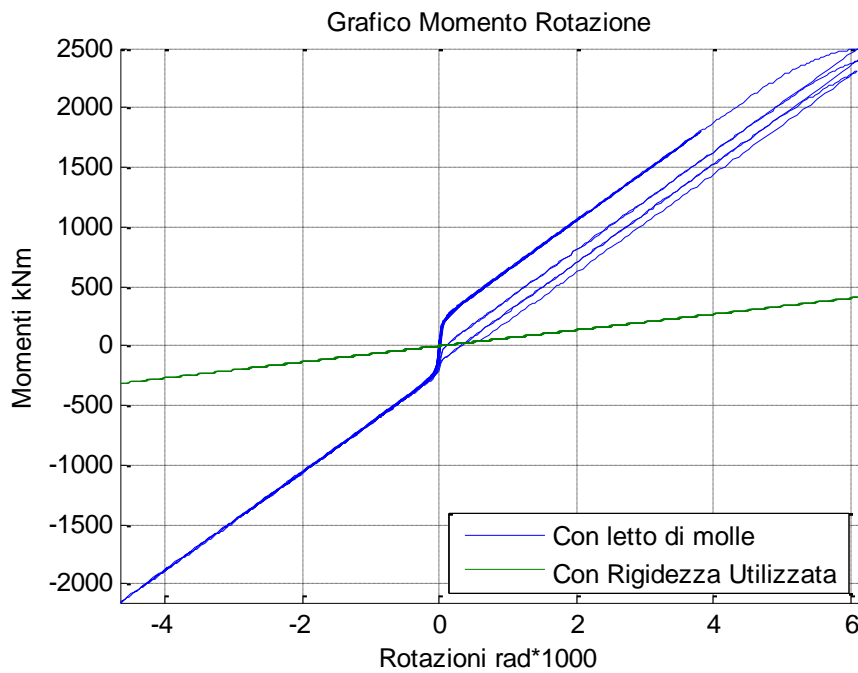


Figura 129 - Grafico Momento - Rotazione alla base del plinto modellando l'interfaccia plinto fondazione con un letto di molle per deformazioni cicliche

## 5.6 Valutazione della deformabilità a taglio del pilastro

Il programma di calcolo utilizza dei modelli a fibre che non tengono in conto della deformabilità a taglio del pilastro. Un elemento deformabile solo a taglio viene caratterizzato nel seguente modo:

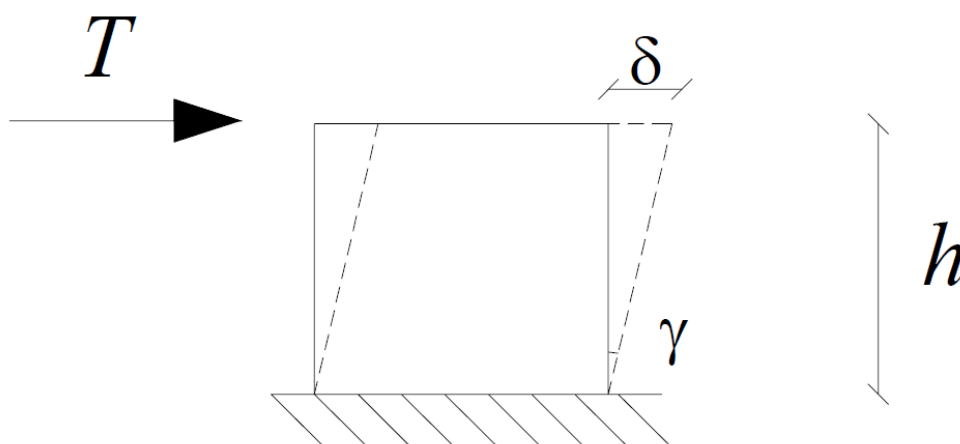


Figura 130 - Elemento deformabile solo a Taglio

Lo spostamento dovuto ad una forza  $T$  è funzione della rigidità a taglio:

$$\delta = \gamma h = \frac{Th}{GA'}$$

Dove:

- $\gamma$  : rotazione dell'elemento.
- $h$  : altezza dell'elemento.
- $\delta$  : spostamento in sommità.
- $T$  : forza in sommità.

Al paragrafo 5.3 la differenza fra gli spostamenti ottenuti sperimentalmente e quelli ottenuti dal modello sono stati imputati alla rotazione del plinto di fondazione. Per questo motivo, nel modello di calcolo, è stata introdotta una molla rotazionale alla base con un comportamento elastico.

Allo scopo di confrontare il contributo allo spostamento in sommità della deformabilità a taglio e la rigidità della molla rotazionale introdotta nel modello, è stato eseguito il seguente confronto semplificato.

Per ricavare la rigidezza equivalente, in termini di momento rotazione, sono stati svolti i seguenti passaggi:

Ricordando che la rigidezza rotazionale elastica può essere ricavata in questo modo:

$$K_{rot} = \frac{M}{\gamma}$$

Lo spostamento in sommità, per un elemento infinitamente rigido con una molla rotazionale alla base è pari a:

$$\delta = \gamma h = \frac{M}{K_{rot}} h$$

Nel caso di forza  $T$  applicata in sommità si ha  $M = T * h$  quindi:

$$\delta = \frac{Th}{K_{rot}} h$$

Andando ad eguagliare lo spostamento in sommità con quello definito per un elemento deformabile solo a taglio si ha:

$$\frac{Th}{K_{rot}} h = \frac{Th}{GA'}$$

E' quindi possibile ricavare la rigidezza rotazionale equivalente:

$$K_{rot,equiv} = GA'h$$

Il pilastro è stato modellato con un calcestruzzo con modulo elastico  $E = 30000 MPa$ ; con un coefficiente di Poisson  $\nu = 0.2$  si ricava il seguente modulo di elasticità tangenziale:

$$G = \frac{E}{2(1 - \nu)} = 18750 MPa$$

L'area della sezione trasversale è:

$$A = 400^2 = 160000 mm^2$$



Per le sezioni rettangolari si ha:

$$GA' = GA\chi = 18750 * 160000 * 1.2 = 3600000 \text{ kN}$$

Si ricava quindi la seguente rigidezza rotazionale equivalente:

$$K_{rot,equiv} = GA'h = 3600000 * 1.97 = 7092000 \frac{\text{kN} * \text{m}}{\text{rad}}$$

Al paragrafo 5.3 è stato necessario introdurre una molla con rigidezza

$$K_{rot\ plinto} = 67000 \frac{\text{kN} * \text{m}}{\text{rad}}$$

Quindi anche in questo caso è stato ricavato un valore della rigidezza molto maggiore rispetto a quello necessario per giustificare un divario così grande fra i risultati sperimentali e numerici.

Questo gap è quindi imputabile ad una rotazione rigida del plinto dovuta probabilmente ad un ancoraggio non ottimale alla pavimentazione.

Durante la sperimentazione era presente uno strumento di misurazione degli spostamenti orizzontali del plinto come mostrato in Figura 131. Questi spostamenti sono stati depurati da quelli misurati in sommità, per questo motivo si è sempre fatto riferimento a dei contributi riconducibili alla rotazione del plinto e non alla sua traslazione orizzontale.



Figura 131 - Strumento di misurazione degli spostamenti del plinto



## **6 Modellazione dell'Emaco con un letto di molle**

In questo capitolo è stata proposta una modellazione alternativa per quanto riguarda l'interfaccia calcestruzzo-Emaco.

Per prima cosa viene descritta la modellazione adottata per le barre di armatura ancorate all'interno degli scatolari riempiti di malta, dopo di che ci si è soffermati sulla schematizzazione del giunto di malta; infine vengono mostrati i risultati ottenuti considerando la struttura nel suo complesso.

### **6.1 Calibrazione del modello per le barre d'armatura inghisate negli scatolari**

Per le barre ancorate all'interno degli scatolari riempiti di malta, si è fatto riferimento ad una campagna sperimentale effettuata nel 2011. Durante la quale sono state effettuate delle prove di estrazione monotona di barre di diametro  $\phi 26$ , inghisate all'interno di scatolari quadrati di lato  $85\text{mm}$ , di lunghezza pari a  $400\text{mm}$ .

In tal caso si è verificato un parziale sfilamento al raggiungimento di una tensione tangenziale media, lungo la superficie laterale dello scatolare, pari a  $\tau_m = 2.5\text{MPa}$ .

Di seguito è stato riportato il diagramma Forza Spostamento ottenuti per la campagna sperimentale nel 2011:

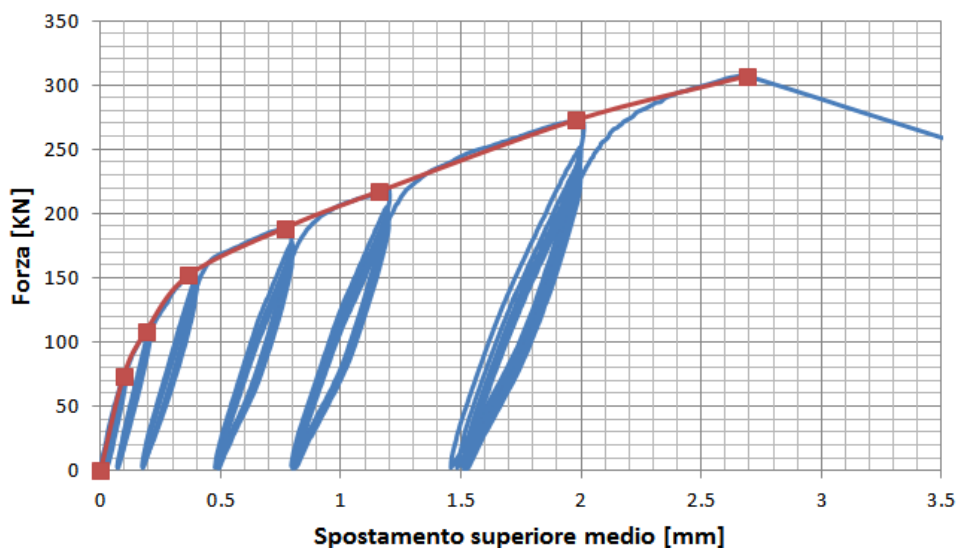


Figura – Diagramma Forza Spostamento per le prove di pull Out effettuate nel 2011

Nel caso del pilastro prefabbricato in esame, si hanno degli scatolari quadrati di lato  $80\text{mm}$ , lunghi circa  $500\text{mm}$ . Si suppone, quindi, di ottenere uno sfilamento della barra al raggiungimento di una forza pari a:

$$F_{sfilam} = A_{lat,scatolare} * \tau_m = 4 * 80 * 5000 * 2.5 = 400\text{ kN}$$

In OpenSees per rappresentare il contributo delle barre ancorate, sono stati utilizzati un numero di elementi zeroLength, pari al numero dei ferri che continuano in fondazione.

Il legame costitutivo, in termini di Forza Spostamento, anche in questo caso è stato descritto utilizzando un materiale di tipo Hysteretic ( paragrafo 3.2.13). Il modello è stato calibrato imponendo gli spostamenti della campagna sperimentale del 2010, e confrontando le forze ottenute.

Per le ragioni descritte in precedenza è stato modificato solamente il valore di spostamento per il quale si ha perdita di aderenza delle barre con la malta,

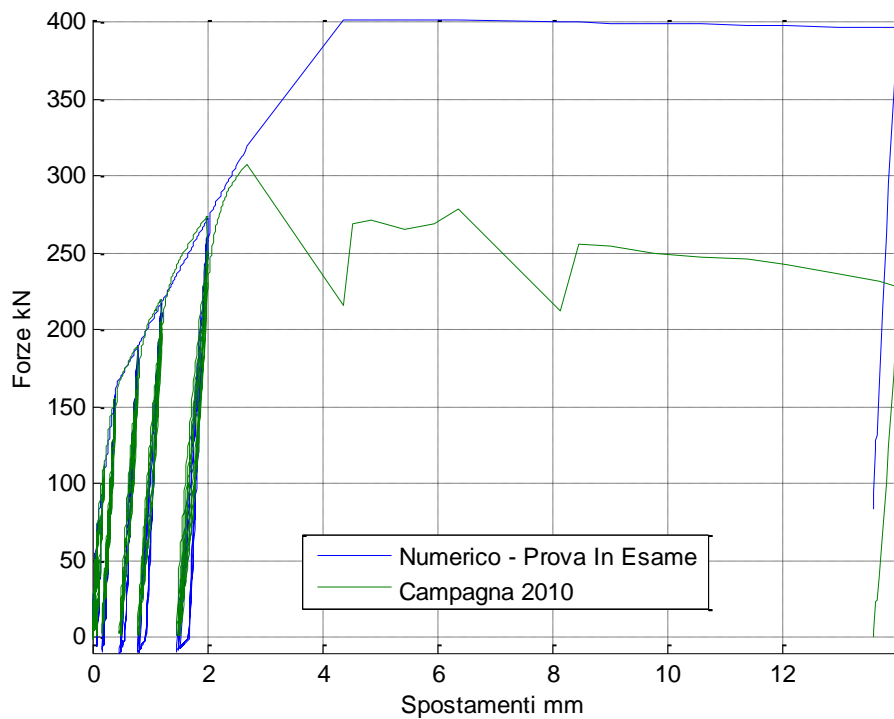


Figura 132 - Grafico Forza Spostamento- Modello per la prova in esame e Campagna del 2010

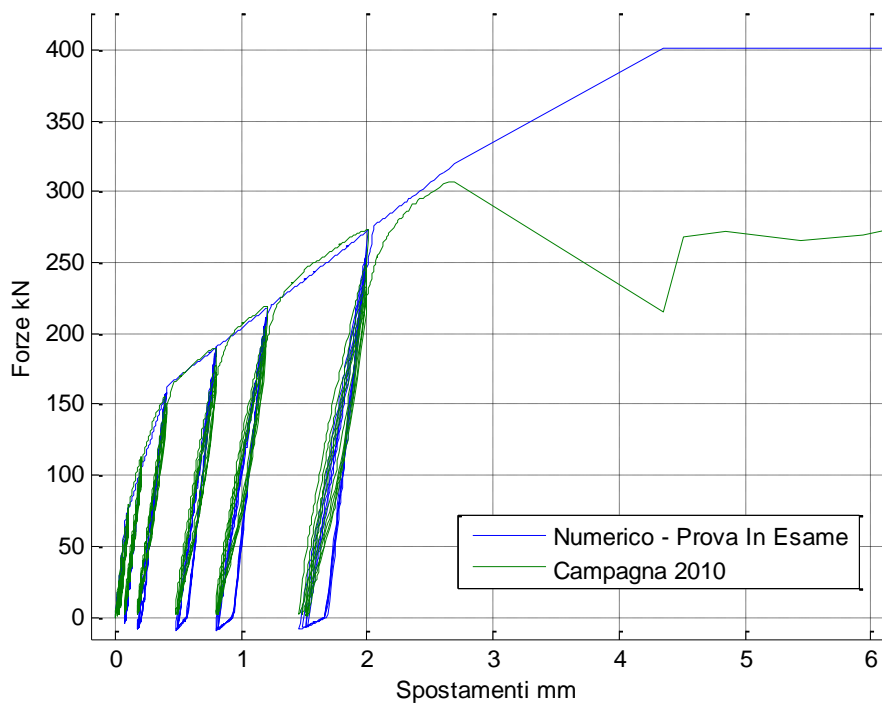


Figura 133 - Grafico Forza Spostamento- Modello per la prova in esame e Campagna del 2010 – Primi valori di spostamento

## 6.2 Definizione del letto di molle

Una volta definito il comportamento delle barre è stato possibile concentrarsi sulla modellazione dell'Emaco.

Si è scelto di schematizzare lo scalino di malta come un insieme di molle con rigidezza traslazionale verticale, ognuna delle quali rappresenta una fibra di Emaco di larghezza 4 cm e lunghezza 40 cm, per un totale di 10 molle.

Per tenere in conto della reazione del calcestruzzo del plinto di fondazione sono state inserite, al seguito delle molle di Emaco, un'altra serie di molle con caratteristiche diverse. L'area di ogni singola fibra di calcestruzzo è la stessa del caso precedente, ma la resistenza del materiale e la lunghezza collaborante del materiale sono differenti.

Per l'Emaco si è scelta una lunghezza collaborante di 7 cm ed una resistenza di 75 MPa, mentre per il plinto si ha rispettivamente 40 cm e 38 MPa. Per entrambi i materiali è stato utilizzato un legame costitutivo del tipo Concrete01 Material ( paragrafo 3.2.1), in quanto non fornisce alcuna resistenza a trazione.

Di seguito è stato riportato lo schema utilizzato per modellare il contatto con l'interfaccia di Emaco:

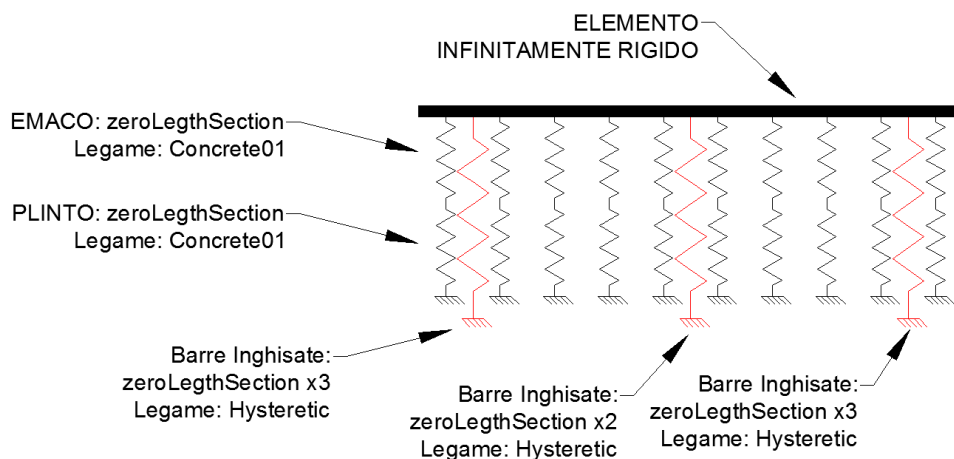


Figura 134 - Modello utilizzato per l'interfaccia di Emaco

### 6.3 Confronto dei risultati in termini di rotazioni alla base del pilastro

Allo scopo di verificare la validità della schematizzazione proposta, sono state imposte al nodo centrale dell'elemento rigido mostrato in Figura 134, le rotazioni stimate durante lo svolgimento della prova, e precedentemente descritte al paragrafo

Di seguito sono stati riportati i risultati ottenuti per i primi cicli di carico:

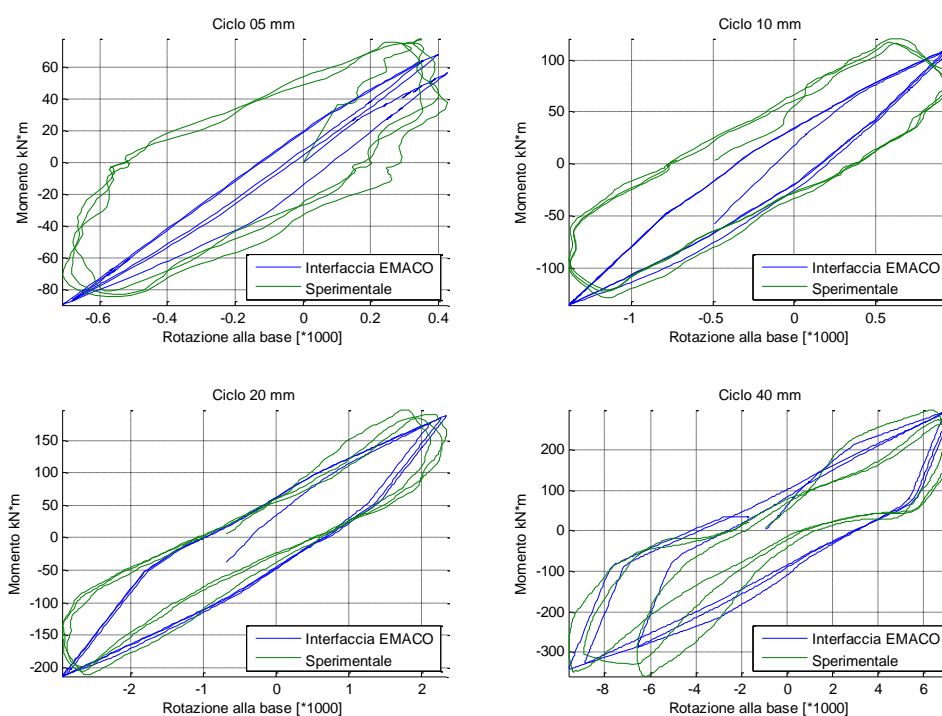


Figura 135 - Confronto Momento Rotazione fra numerico e sperimentale - Cicli Iniziali

Come detto in precedenza, visto il particolare andamento delle rotazioni misurate alla base del pilastro, non è stato possibile riprodurre in maniera esatta lo sviluppo della suddetta relazione, ma ci si è soffermati a riprodurre solamente l'ordine di grandezza dei dati misurati

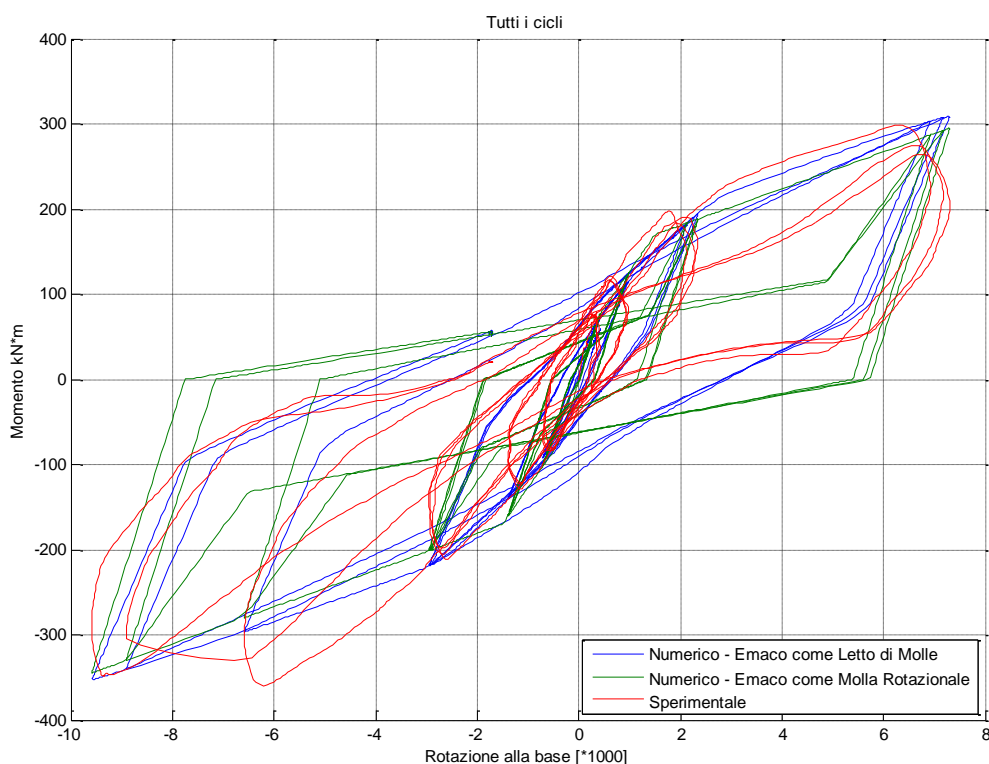


Figura 136 - Confronto Momento Rotazione fra numerico e sperimentale - Cicli Iniziali

Dalla Figura 136 si può osservare come il modello appena definito riproduca i dati sperimentali, in termini di Momento – Rotazione, in modo leggermente migliore rispetto al caso di una molla rotazionale con comportamento del tipo Hysteretic Material, come nel caso del Paragrafo 5.2.

#### 6.4 Confronto dei risultati in termini di Forze - Spostamenti in sommità del pilastro

A questo punto è stato inserito all'interno del modello, l'elemento Beam with Hinges che rappresenta il pilastro prefabbricato, le cui caratteristiche sono state precedentemente determinate al paragrafo 4.2.2:



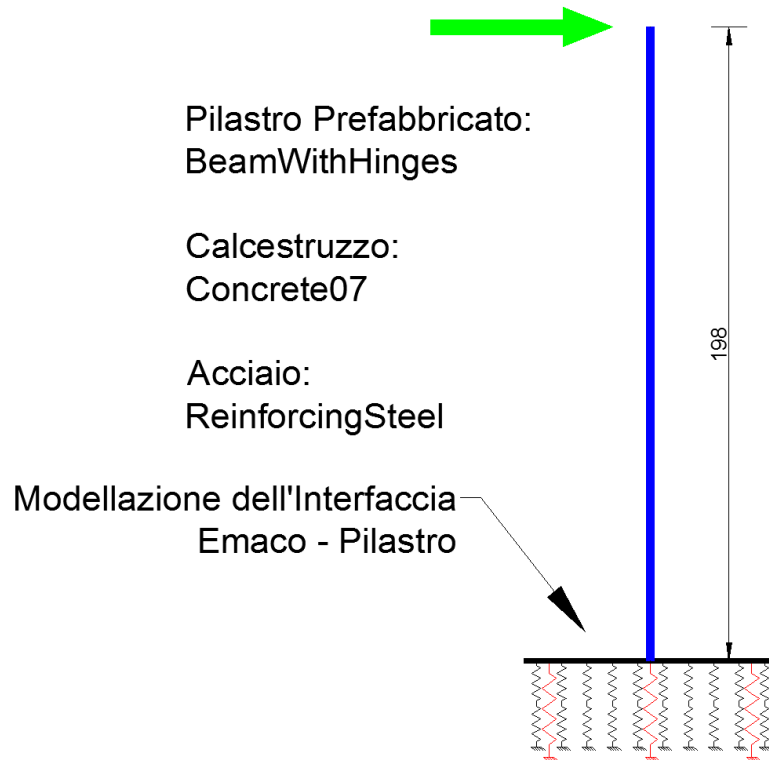


Figura 137 – Modellazione alternativa sistema Pilastro – Emaco

Andando ad imporre gli spostamenti in sommità, sono stati ottenuti i seguenti grafici:

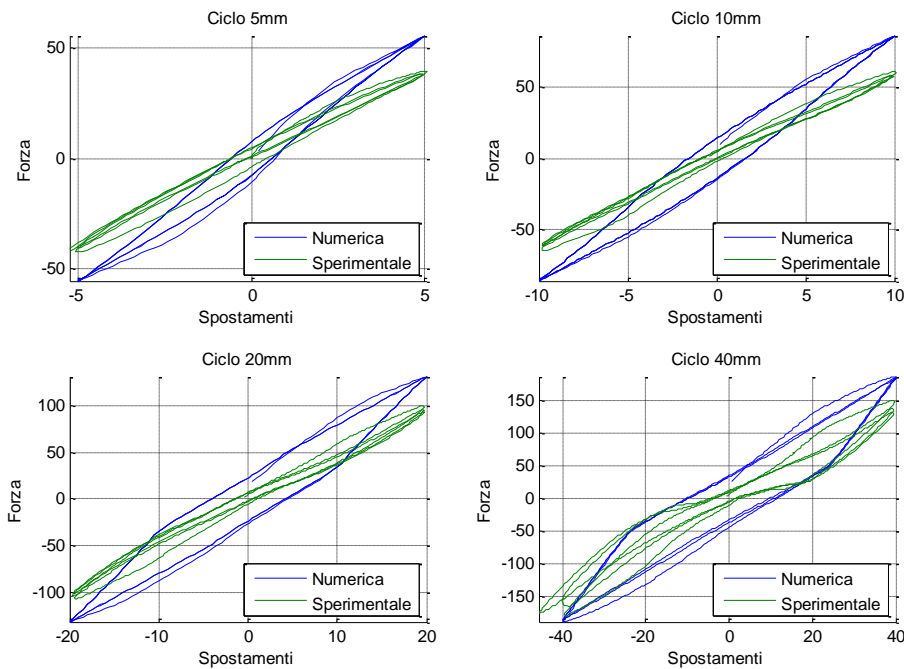
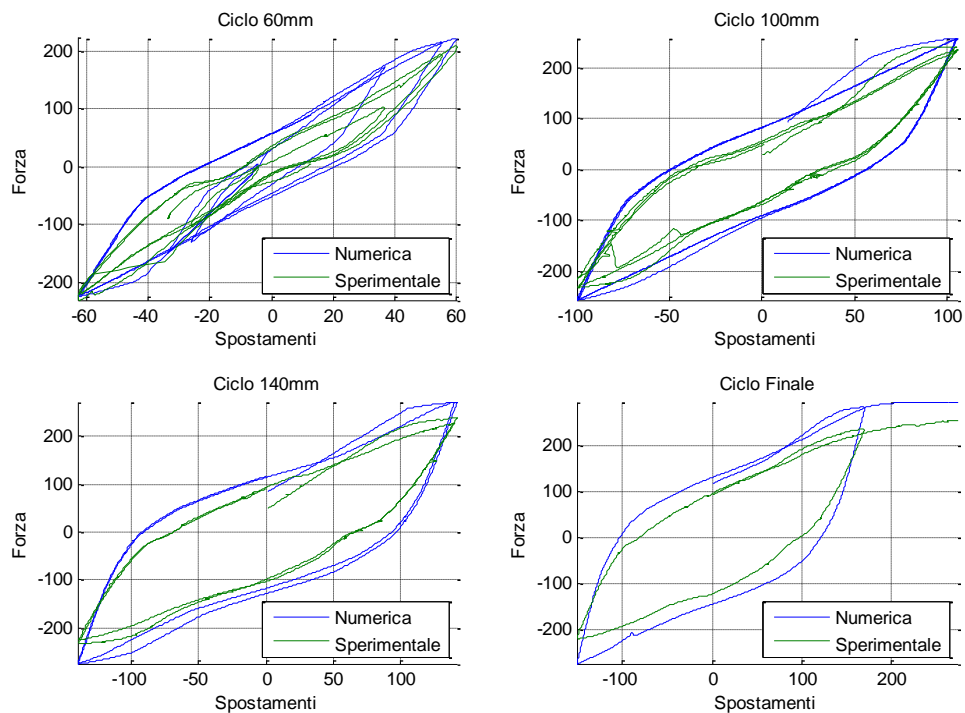


Figura 138 - Grafici Forza Spostamento - Modellazione dell'Emaco con letto di molle - Cicli Iniziali



*Figura 139 - Grafici Forza Spostamento - Modellazione dell'Emaco con letto di molle - Cicli Iniziali*

Parallelamente a ciò che è accaduto nel caso della modellazione con una singola molla rotazione alla base del pilastro, si può osservare come i risultati numerici denotino una maggiore rigidezza del modello rispetto al caso reale, e, anche in questo caso, si ha un'isteresi troppo accentuata.

Come descritto nel seguente paragrafo, anche per questa modellazione è stata inserita una molla rotazionale in maniera tale da tenere in conto della rotazione rigida del plinto.

## 6.5 Applicazione della molla rotazionale alla base

Andando ad inserire alla base del modello una molla rotazionale con legame costitutivo elastico lineare di rigidezza  $K_{rot\ pilinto} = 67000 \frac{kN*m}{rad}$ , si è passati alla seguente schematizzazione:

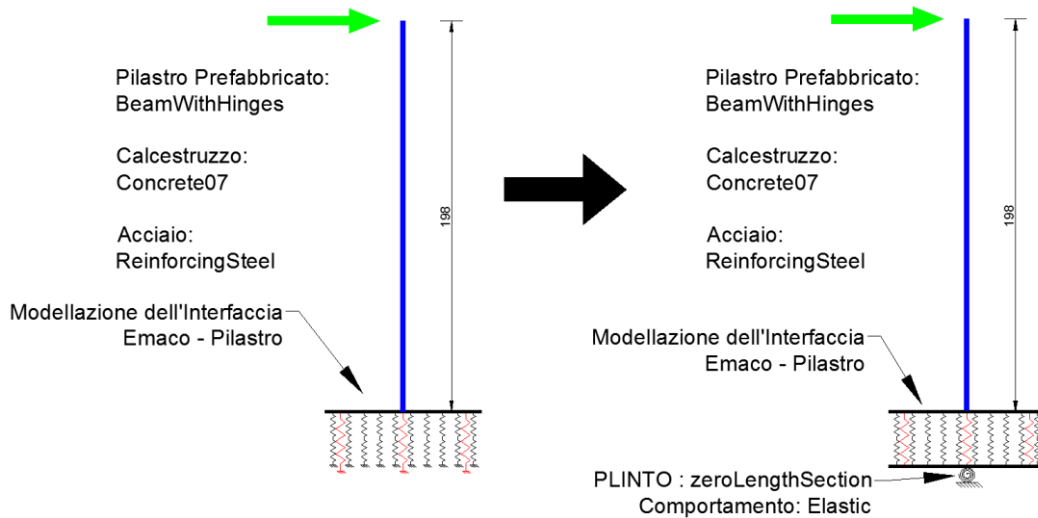


Figura 140 - Modello con letto di molle traslazionali e Molla Rotazionale

Per questo modello sono stati ricavati i seguenti risultati:

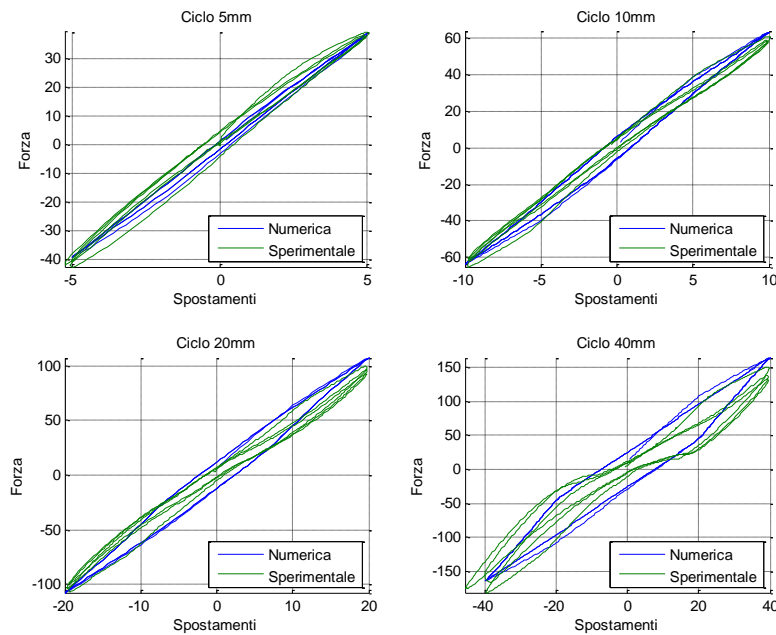


Figura 141 - Grafici Forza Spostamento - Modellazione con letto di molle traslazionali e Molla Rotazionale - Cicli Iniziali

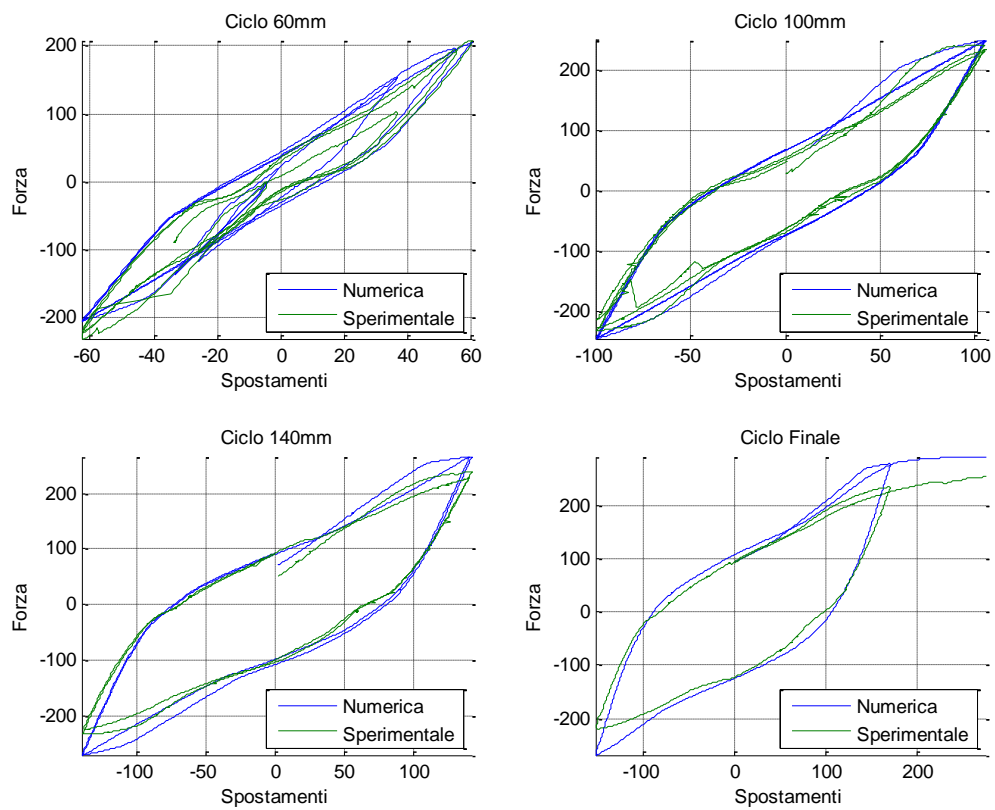


Figura 142 - Grafici Forza Spostamento - Modellazione con letto di molle traslazionali e Molla Rotazionale - Cicli Iniziali

Anche in questo caso con l'introduzione della molla rotazionale, con legame elastico lineare e rigidezza pari a  $K_{rot\ plinto}$ , è stato ricavato un modello con rigidezza paragonabile al caso reale per le prime fasi di carico, mentre negli ultimi cicli di carico l'isteresi è diminuita rispetto al caso precedente, allineandosi ai dati sperimentali.

## 6.6 Confronto in termini di energia

In questo paragrafo viene comparata l'energia dissipata, calcolata dai grafici Forza - Spostamento sperimentali rispetto alle due modellazioni precedentemente analizzate.

L'energia corrisponde all'area racchiusa dai cicli, questa è stata calcolata considerando l'integrale cumulativo della forza, mediante il metodo dei trapezi.

Per quanto riguarda i modelli utilizzati si fa riferimento al Paragrafo 5.4.2, nel quale si hanno due molle rotazionali alla base del pilastro, e quello del Paragrafo 6.5 dove si ha l'Emaco schematizzato come un letto di molle e il plinto come molla rotazionale.

Di seguito sono state comparate le energie per i cicli a 10 mm , 140 mm e l'energia complessiva considerando tutti i cicli di carico.

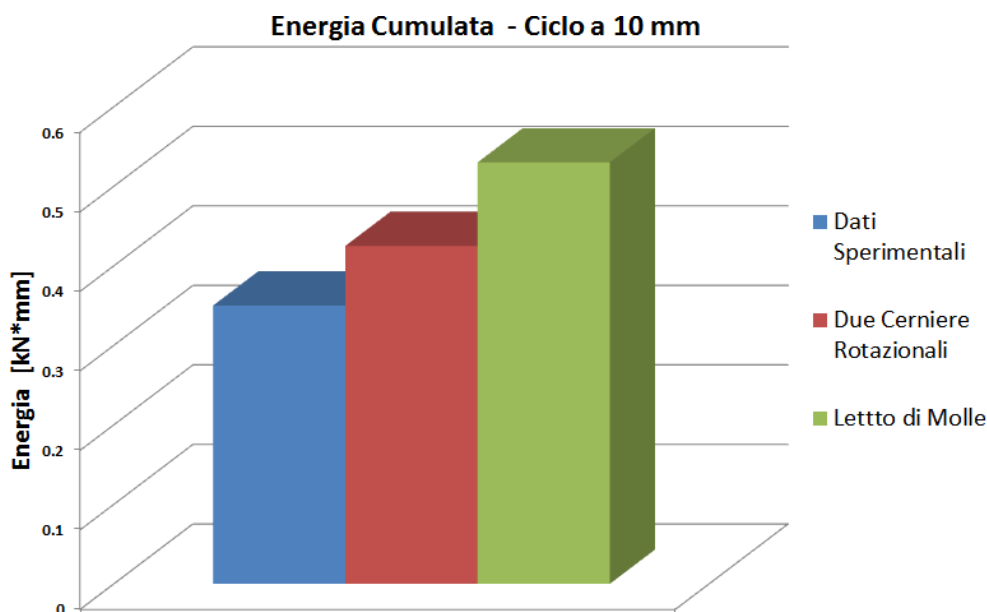


Figura 143 - Confronto energetico per ciclo a 10 mm

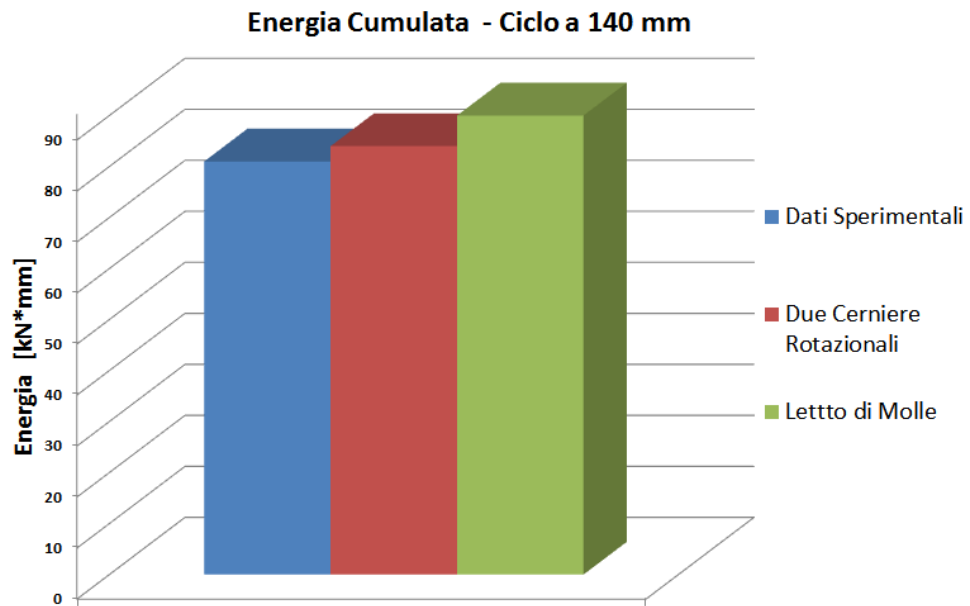


Figura 144 - Confronto energetico per ciclo a 140 mm

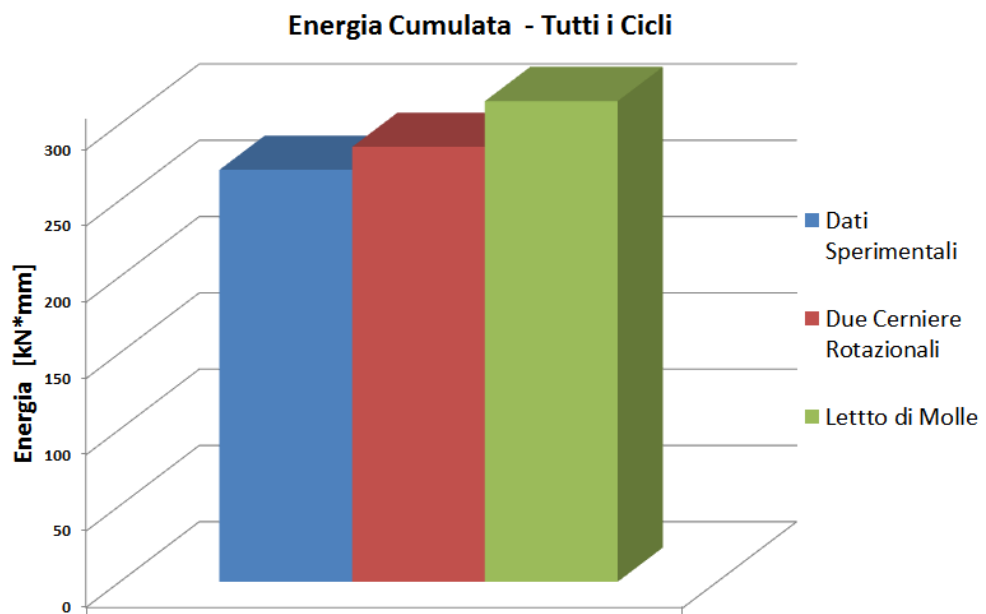


Figura 145 - Confronto energetico per intera prova

Lo sviluppo dell'energia isteretica durante tutte le fasi di carico è il seguente:

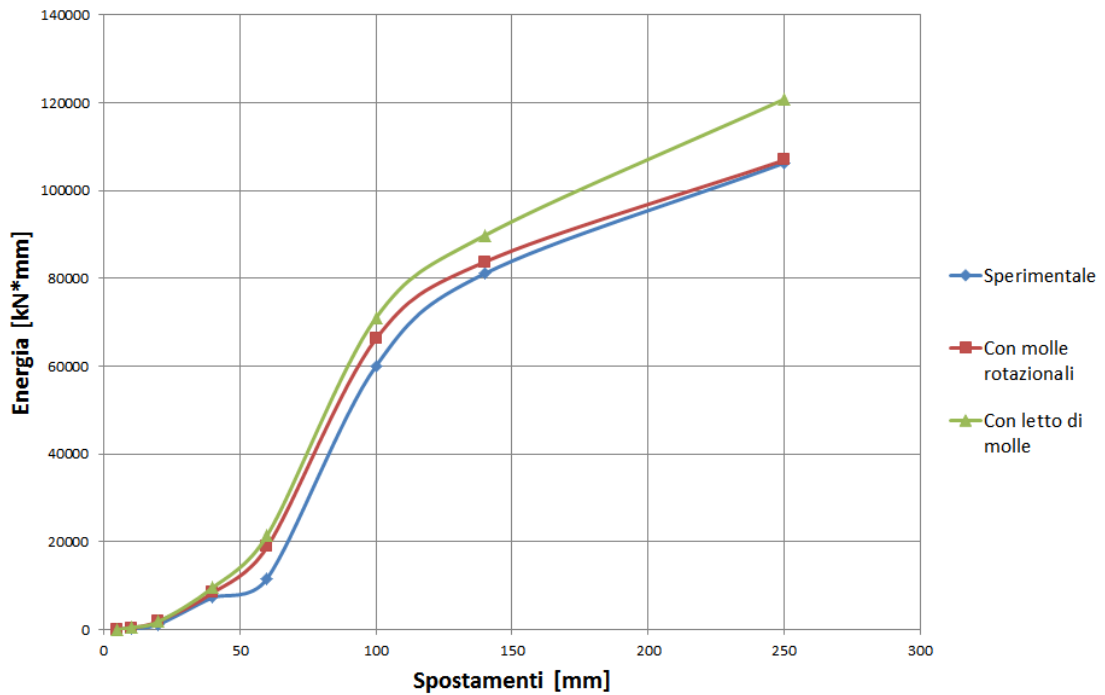


Figura 146 - Andamento energia dissipata in tutte le fasi di carico

Di seguito è stato riportato l'andamento dell'errore relativo calcolato rispetto ai valori dell'energia isteretica ricavati dai dati sperimentali:

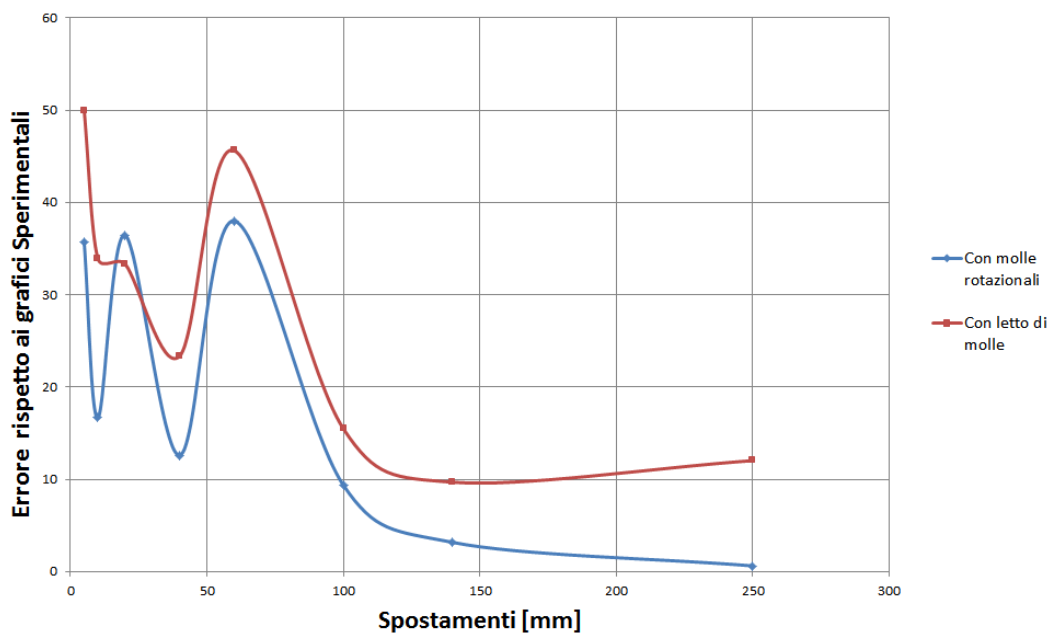


Figura 147 - Andamento dell'errore relativo nel calcolo delle energie isteretiche





## **Bibliografia**

Mander J. B., Priestley M.J.N., Park R “Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete”, *ASCE*, 1988

Newcombe M. P. , Papanin S. , Buchanan A. , Palermo A. , “Section Analysis and Cyclic Behavior of Post-Tensioned Jointed Ductile Connections for Multi-Story Timber Buildings”, *Journal of Earthquake Engineering*, 12(S1):83–110, 2008

Papanin S. , Priestley M. J. N. , Sritharan S. , “Analytical modelling of the seismic behaviour of precast concrete frames designed with ductile connections”, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 5, No. 3 329-367, 2001

Priestley M. J. N, Calvi G. M. , Kowalsky M. J. , “Displacement-Based Seismic Design of Structures”, *ASCE*, 2007

Zhao J. , Sritharan S. , “ Modeling of Strain Penetration Effects in Fiber-Based Analysis of Reinforced Concrete Structures”, *ACI* , 2007

Zhao J. , Sritharan S. , “Nonlinear Analysis of RC Structures With Strain Penetration Effects” , *National Conference on Earthquake Engineering*, 2004

Zhao J. , Sritharan S. , “Nonlinear Analysis of RC Structures With Strain Penetration Effects” , National Conference on Earthquake Engineering, 2004

Zhao J. , Sritharan S. , Waugh J. , Govindarasu M. , “Nonrectangular Concrete Walls Under Multi-Directional Loads – Analytical Simulation and Remote Participation in Experimental Research” , US-Portuguese International Workshop in Grand Challenges in Earthquake Engineering, 2005

Siti internet:

<http://opensees.berkeley.edu> : sito ufficiale OpenSees

<http://www.ape.it/> : sito ufficiale della ditta APE s.p.a..





## APPENDICE A

Di seguito sono stati riportati gli script in tcl, utilizzati per la modellazione del pilastro prefabbricato.

Attraverso delle specifiche variabili, che vengono definite nello script “RunAllTas.tcl”, è possibile scegliere se utilizzare o meno le molle rotazionale ( ZL\_TEST ), il tipo di calcestruzzo ( TipoCLS ) e il tipo di acciaio ( TipoACC ).

All’inizio di ogni script è stata inserita come commento la funzione che svolge all’interno della procedura di analisi.

```
# SCRIPT CHE RICHIAMA TUTTI I FILE DA UTILIZZARE E PERMETTE LA
SCELTA DEL TIPO DI CALCESTRUZZO E DI ACCIAIO
wipe
# Scegliere se utilizzare l'elemento ZeroLength o meno:
set ZL_TEST 12; #0 senza molle rotazionale, 11 con una molla
rotazionale alla base, 12 con due molle rotazionali alla base
# Scegliere Che tipo di CLS usare:
set TipoCLS 7; #6 se Concrete06 - 1 se Concrete01 - 4 se
Concrete04 - 7 se Concrete07
set TipoACC 10; #1 se Steel01 - 2 se Steel02 - 10 se
ReinforcingSteel
set MoltSpost 1;
source Unita_misura.tcl; # Script per inizializzare le variabili
per le unità di misura
source input.tcl;
source SpostamProve.tcl; # Script per inizializzare gli
spostamenti impressi o le forze impresse.
source Beam.tcl;
source SforzoAssiale.tcl;
source ImposizSpost.tcl; # Utilizzare ImposizSpost.tcl per
imporre gli spostamenti, utilizzare ImposizForze.tcl per imporre
le forze
if {$TipoCLS ==6} {
puts "Si è scelto di utilizzare Concrete06 per il calcestruzzo"
}
if {$TipoCLS ==1} {
puts "Si è scelto di utilizzare Concrete01 per il calcestruzzo"
}
if {$TipoCLS ==4} {
puts "Si è scelto di utilizzare Concrete04 per il calcestruzzo"
}
if {$TipoCLS ==7} {
puts "Si è scelto di utilizzare Concrete07 per il calcestruzzo"
}
if {$TipoACC ==1} {
puts "Si è scelto di utilizzare Steel01 per l'Acciaio"
}
if {$TipoACC ==2} {
puts "Si è scelto di utilizzare Steel02 per l'Acciaio"
}
if {$TipoACC ==10} {
puts "Si è scelto di utilizzare ReinforcingSteel per l'Acciaio"
}
puts "Termine analisi in OpenSees"
```

```
# Script per definire le caratteristiche principali della
sezione ed alcuni parametri per l'analisi.
puts "Definizione delle caratteristiche della sezione"
set b      [expr 40.0*$cm];    # Larghezza
pilaastro
set h      [expr 40.0*$cm];    # Altezza
pilaastro
set c      [expr 4.0*$cm];     # Copriferro
set hCol   [expr 2.05*$m];     # 198 cm di pil prefabricato
7cm di malta emaco s55
set hEmaco [expr 0.07*$m];     # 7cm di malta emaco
set hPosProva [expr $hCol-1.77*$m]; # 0.280 m: Posizione del
punto per cui si ha il grafo Momento
Curvatura
set ACol   [expr $b*$h];      # Area del Pilaastro
set JColZ  [expr ($b*($h*$h*$h))/12.0]; #Unica che uso!
set JColY  [expr ($h*($b*$b*$b))/12.0];

set Lp [expr 0.63*$m]; #Lunghezza della cerniera plastica

set SforzoAss [expr -500.0*$kN]; # Sforzo assiale Iniziale di 40
tonnellate
set Tol 1.0e-15;              # Convergence tolerance for test
set numIntgrPts 4;           # Numero di punti di integrazione
```

```

# SCRIPT PER LA MODELLAZIONE DEL PILASTRO CON INCASTRO (
ZL_TEST=0 ), CON UNA MOLLA ROTAZIONALE ALLA BASE ( ZL_TEST=11 ),
CON DUE MOLLE ROTAZIONALI ALLA BASE ( ZL_TEST=12 ).
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3;          # Define the model
builder, ndm=#dimension, ndf=#dofs
set dataDir Data;                        # set up name of data directory
file mkdir $dataDir;                     # create data directory
set testEmaco 0; # Variabile che indica se viene utilizzato
l'elemento di emaco. In questo script l'elemento emaco non viene
utilizzato quindi viene imposta pari a 0.
puts "Definizione dei nodi: START"
set nBase 2; # Tag nodo inferiore emaco
set nSupEmaco 3; # Tag nodo superiore emaco
set nSup 4; # Tag nodo di applicazione carico
node $nBase 0.0 0.0; # nodo inferiore emaco
node $nSupEmaco 0.0 $hEmaco; # nodo superiore emaco
node $nSup 0.0 $hCol; # nodo di applicazione carico
if {$ZL_TEST==0} {
set nVinc 3; # Il nodo da vincolare è quello inferiore del
cls
}
if {$ZL_TEST==11} {
set nVinc 5; # Il nodo da vincolare è quello
inferiore della molla rotazionale
node $nVinc 0.0 $hEmaco; # Aggiungo un nodo alla base
del pilastro
fix $nSupEmaco 1 1 0;
}
if {$ZL_TEST==12} {
puts "lollini";
set nVinc 6; # Il nodo da vincolare è quello inferiore
della seconda molla rotazionale
set nBaseCern 5
node $nVinc 0.0 $hEmaco; # Aggiungo due nodi alla base del
pilastro
node $nBaseCern 0.0 $hEmaco;
fix $nSupEmaco 1 1 0;
fix $nBaseCern 1 1 0;
set eleZLBase 4;
}
fix $nVinc 1 1 1; # Incastro alla base
puts "Definizione dei nodi: END"
set eleClsSup 1; # Tag elemento Pilastro in Calcestruzzo
set eleEmaco 2; # Tag elemento Emaco
set eleZL 3; # Tag elemento Zero Legth alla base
source Materiali.tcl; # SCRIPT PER CARATTERISTICHE DEI MATERIALI
source SezioneFibreTAs.tcl; # SCRIPT PER SEZIONI A FIBRE
# define geometric transformation: performs a linear geometric
transformation of beam stiffness and resisting force from the
basic system to the global-coordinate system
set ColTransfTag 1; # associate a tag to
column transformation
set ColTransfType PDelta; # options:

```



```

Linear,PDelta,Corotational
geomTransf $ColTransfType $ColTransfTag ; # only columns can
have PDelta effects (gravity effects)
puts "Definizione dell'elemento superiore come BeamWithHinges"
element beamWithHinges $eleClsSup $nSupEmaco
$nSup $ID_SEC_CLS [expr $Lp-$hEmaco] $ID_SEC_CLS 0.0
$Ec $ACol $JColZ $ColTransfTag
#element beamWithHinges $eleTag $iNode
$jNode $secTagI $Lpi $secTagJ $Lpj
$E $A $Iz $transfTag <-mass $massDens> <-iter
$maxIters $tol>
# Viene definito un elemento emaco di altezza 7 cm il quale però
non verrò sollecitato, perché l'incastro e le molle verranno
messe al di sopra di esso"
puts "Definizione dell'elemento Emaco"
# element beamWithHinges $eleEmaco $nBase $nSupEmaco
$ID_SEC_EMACO 0.07 $ID_SEC_EMACO 0.0 $EEmaco $ACol $JColZ
$ColTransfTag
element dispBeamColumn $eleEmaco $nBase $nSupEmaco
$numIntgrPts $ID_SEC_EMACO $ColTransfTag
#element dispBeamColumn $eleTag $iNode $jNode
$numIntgrPts $secTag $transfTag <-mass $massDens>
<-iter $maxIters $tol> <-integration $intType>
puts "Definizione degli elementi ZeroLengthSection: START"
if {$ZL_TEST==1} {
puts "Definizione dell'elemento ZeroLength con Bond_Sp01"
#element zeroLengthSection $eleTag $iNode $jNode
$secTag
element zeroLengthSection $eleZL $nVinc $nBase
$ID_SEC_ZL -orient 0.0 1.0 0.0 1.0 0.0 0.0;
#element zeroLength $eleZL $nVinc $nBase -mat
$ID_MAT_ZL $ID_MAT_ZL -dir 2 3
#element zeroLength $eleTag $iNode $jNode -mat $matTag1
$matTag2 -dir $dir1 $dir2 ...
}
if {$ZL_TEST==2} {
puts "Definizione dell'elemento ZeroLength con Hysteretic"
element zeroLengthSection $eleZL $nVinc $nBase
$ID_SEC_ZL
}
if {$ZL_TEST==11} { # Modellazione con una molla rotazionale
puts "Definizione dell'elemento ZeroLength con Hysteretic"
element zeroLengthSection $eleZL $nVinc $nSupEmaco
$ID_SEC_ZL
}
if {$ZL_TEST==12} { # Modellazione con due molle rotazionali
puts "Definizione dell'elemento ZeroLength con Hysteretic"
element zeroLengthSection $eleZL $nBaseCern
$nSupEmaco $ID_SEC_ZL
element zeroLengthSection $eleZLBase $nVinc
$nBaseCern $ID_SEC_ZL_C2
}
puts "Definizione degli elementi ZeroLengthSection: END"

```

```
source Recorder.tcl
set TestEmacol [open Data/TestEmacol.txt w]
puts $TestEmacol "0"
close $TestEmacol
```

```

# SCRIPT PER DEFINIRE LE CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E DEGLI
ELEMENTI.
puts "Materiali.tcl: START"
set ID_SEC_CLS      1; #tag sezione di cls
set ID_SEC_CLS_INF  2; #tag sezione di cls inferiore
set ID_SEC_EMACO    3; #tag sezione di emaco
set ID_SEC_ZL       4; #tag sezione zeroLegth - Prima molla
rotazionale
set ID_SEC_ZL_C2    5; #tag sezione zeroLegth - Seconda
molla rotazionale
puts "Definizione del Calcestruzzo Non Confinato"
set fcUnc [expr 38.0*$MPa]; # Resistenza a compressione
media del calcestruzzo non confinato
set ec0Unc [expr 0.0035]; # Deformazione di picco a
compressione del CLS non confinato
puts "Definizione delle caratteristiche meccaniche del
Calcestruzzo"
set fccConf [expr 61.0*$MPa]; # Resistenza a compressione
media del calcestruzzo confinato
set ec0Conf [expr 0.005]; # Deformazione alla
massima tensione del calcestruzzo confinato
set fcrCLS [expr 0.4*(0.3*(($fcUnc/$MPa)**0.666))*$MPa];
puts "fcrCls [expr $fcrCLS/$MPa]" ; # Resistenza a trazione
CLS
set ecrCLS [expr 1.0*0.00015]; # Deformazione di picco a
trazione del CLS non confinato
# Definizione caratteristiche CLS per concrete04
set Ec_04_Conf [expr 0.75*(57000*($fccConf/$MPa*0.145*
1000)**0.5)/1000/0.145*$MPa]; # Formula di popovic per il modulo
elastico con conc_04
set Ec_04_Unc [expr 0.75*(57000*($fcUnc/$MPa*0.145*1000
)**0.5)/1000/0.145*$MPa];
set Ec $Ec_04_Conf; # Modulo elastico CLS per
concrete04
# Definizione caratteristiche CLS per concrete07
set Ec_conc07 [expr 8200.0*(($fcUnc/$MPa)**(0.375))*$MPa]; #
Modulo elastico CLS per concrete07
set ft_conc07 $fcrCLS; # Resistenza a trazione per concrete07
set ec0_Unc_conc07 [expr (($fcUnc/$MPa)**0.25)/28]; #
Deformazione di picco CLS non confinato per concrete07
set ec0_Conf_conc07 [expr (($fcUnc/$MPa)**0.25)/28]; #
Deformazione di picco CLS confinato per concrete07
set ect_conc07 [expr 2.0*$ft_conc07/$Ec_conc07]; # Deformazione
di picco per trazione del CLS per concrete07
set xp_conc07 2.0; # Coefficienti adimensionali per Concrete07
set xn_conc07 2.3;
set r_conc07 [expr $fcUnc/$MPa/5.2-1.9];
# Definizione caratteristiche CLS per concrete04
set Ec [expr 0.75*$Ec_conc07];
set n_Conc06 2; #compressive shape
factor
set k_Conc06 1; #post-peak
compressive shape factor

```

```

puts "Definizione delle caratteristiche meccaniche e geometriche
dell'acciaio"
set fy          [expr 550.0*$MPa];      # Tensione di
snervamento delle barre di armatura
set fu          [expr 1.5*$fy];        # Tensione ULTIMA
delle barre di armatura
set Es          [expr 205000.0*$MPa];  # Modulo di
elasticità delle barre di armatura
set esh         0.0040;                # Strain
corresponding to initial strain hardening
set eult        0.20;                  # Strain at peak
stress
set hardRatio   0.09;                  # Rapporto fra la
tangente post-snervamento e la tangente iniziale dell'acciaio
set db          [expr 26.0*$mm];       # Diametro delle
barre di armatura
puts "Definizione delle caratteristiche meccaniche e geometriche
dell'acciaio da carpenteria"
set fy_tubo     [expr 430.0*$MPa];     # Tensione di
snervamento dell'acciaio del tubo
set fu_tubo     [expr 1.5*$fy];        # Tensione
ULTIMA delle dell'acciaio del tubo
set esh_tubo    0.002;                 # Strain
corresponding to initial strain hardening
set eult_tubo   0.20;                  # Strain at peak
stress
puts "Definizione delle caratteristiche dell'EMACO S55"
set fcEmaco     [expr 85.0*$MPa];      # Resistenza
a compressione Emaco
set EEmaco      [expr 28000.0*$MPa];    # Modulo di
elasticità Emaco
set e0Emaco     [expr 1.0*0.0020];     #
Deformazione alla max tensione Emaco 75/28000=0.0027
set fcrEmaco    [expr 2.0*$MPa];       # Resistenza
a trazione Emaco
set ecrEmaco    [expr 1.0*0.00017];    #
Deformazione alla max tensione di trazione dell'Emaco
set Ec_04_Emaco [expr (57000*($fcEmaco/$MPa*0.145*1000)**
0.5)/1000/0.145*$MPa];
set Ec_Emaco_conc07 [expr 8200*(($fcEmaco/$MPa)**(0.375))*
$MPa];
set ft_Emaco_conc07 $fcrEmaco;
set ec0_Emaco_conc07 0.002;
set ect_Emaco_conc07 [expr 2.0*$ft_Emaco_conc07/
$Ec_Emaco_conc07]
puts "E emaco Conc07 [expr $Ec_Emaco_conc07/$MPa]"
puts "ft emaco Conc07 [expr $ft_Emaco_conc07/$MPa]"
puts "ec0 emaco Conc07 [expr $ec0_Emaco_conc07]"
puts "ect emaco Conc07 [expr $ect_Emaco_conc07]"
if {$ZL_TEST==1} { #Mettere unità: ksi-in
puts "Definizione caratteristiche elemento ZeroLength"
set alphaZL 0.4;                # alpha is a parameter used in
the local bond-slip relation and can be taken as 0.4 in

```

```

accordance with CEB-FIP Model Code 90
set Sy      [expr 0.02];          # Rebar slip at member interface
under yield stress.
set b_Bond  0.5;                  # Initial hardening ratio in the
monotonic slip vs. bar stress response (0.3~0.5)
set R_Bond  1.0;                  # Pinching factor for the cyclic
slip vs. bar response (0.5~1.0)
set Su      [expr $Sy*35.0];
set db      [expr 26.0*$mm];
}
if {$ZL_TEST==2} {
puts "Definizione caratteristiche elemento ZeroLength"
set diviZL  3.0;
set moltRig 1.0;
set My1     [expr $moltRig*80.0*$m*$kN/$diviZL];
set Curv1   [expr (0.0015/$m)/$diviZL];
set My2     [expr $moltRig*300.0*$m*$kN/$diviZL];
set Curv2   [expr $Curv1+((($My2-$My1)/((($My1/$Curv1)*0.88)))]);
set My3     [expr $moltRig*400.0*$m*$kN/$diviZL];
set Curv3   [expr $Curv2+($My3-$My2)/(((($My2-$My1)/($Curv2-$
$Curv1))*0.88)]];
set pinchX_Hyst 0.3; #pinching factor for strain (or
deformation) during reloading
set pinchY_Hyst 0.0; #pinching factor for stress (or force)
during reloading
set damage1_Hyst 0.0; #damage due to ductility: D1(mu-1)
set damage2_Hyst 0.0; #damage due to energy: D2(Eii/Eult)
set beta_Hyst 0.0; #power used to determine the degraded
unloading stiffness based on ductility, mu-beta (optional,
default=0.0)
}
# Nel caso si utilizzi almeno una molla rotazionale alla base,
le caratteristiche della molla che rappresenta l'emaco, sono
state definite nello script CaratCern.tcl. Questo è stato
utilizzato anche nel caso di CernEmaco.tcl con il quale si è
calibrato il modello.
if {$ZL_TEST==11} { # Modellazione con una molla rotazionale
source CernEmaco/CaratCern.tcl
}
if {$ZL_TEST==12} { # Modellazione con due molle rotazionale
source CernEmaco/CaratCern.tcl
}
puts "Fine definizione caratteristiche materiali"
puts "Definizione TAG dei materiali"
set ID_MAT_A_cv      1; # tag CLS NON CONFINATO
set ID_MAT_A_co      2; # tag CLS CONFINATO
set ID_MAT_A_re      3; # tag ACCIAIO ARMATURE
set ID_MAT_A_re_tubo 4; # tag ACCIAIO CARPENTERIA
set ID_MAT_emaco     5; # tag EMACO
set ID_MAT_ZL        6; # tag elemento ZeroLength per la prima
molla rotazionale
set ID_MAT_ZL_C2     7; # tag elemento ZeroLength per la seconda
molla rotazionale

```

```

set ID_MAT_ZL_emaco 5; #
puts "Definizione del calcestruzzo nel pilastro"
if {$TipoCLS ==7} {
puts "Si è scelto di utilizzare Concrete07 per il calcestruzzo e
per l'Emaco"
#uniaxialMaterial Concrete07 $matTag $fc $ec $Ec $ft $et $xp $xn
$r
uniaxialMaterial Concrete07 $ID_MAT_A_cv [expr -$fcUnc] [
expr -$ec0_Unc_conc07] $Ec_conc07 $ft_conc07
$sect_conc07 $xp_conc07 $xn_conc07 $r_conc07;
uniaxialMaterial Concrete07 $ID_MAT_A_co [expr -$fccConf] [
expr -$ec0_Conf_conc07] $Ec_conc07 $ft_conc07
$sect_conc07 $xp_conc07 $xn_conc07 $r_conc07;
uniaxialMaterial Concrete07 $ID_MAT_emaco [expr -$fcEmaco] [
expr -$ec0_Emaco_conc07] $Ec_Emaco_conc07 $ft_Emaco_conc07
$sect_Emaco_conc07 $xp_conc07 $xn_conc07 $r_conc07;
}
if {$TipoCLS ==6} {
puts "Si è scelto di utilizzare Concrete06 per il calcestruzzo e
per l'Emaco"
#uniaxialMaterial Concrete06 $matTag
$fc $e0 $n $k
$alpha1 $fcr $ecr 0.15%0 -> calcola [expr
(0.62*($fcUnc**0.5))/($EcmandUnc] $b
$alpha2
uniaxialMaterial Concrete06 $ID_MAT_A_cv [expr -$fcUnc]
[expr -$ec0Unc] $n_Conc06 $k_Conc06 0.32
$fcrCLS $ecrCLS 4 0.08;
uniaxialMaterial Concrete06 $ID_MAT_A_co [expr -$fccConf]
[expr -$ec0Conf] $n_Conc06 $k_Conc06 0.32
$fcrCLS $ecrCLS 4 0.08;
uniaxialMaterial Concrete06 $ID_MAT_emaco [expr -$fcEmaco]
[expr -$e0Emaco] $n_Conc06 $k_Conc06 0.32
$fcrEmaco $ecrEmaco 4 0.08;
}
if {$TipoCLS ==4} {
puts "Si è scelto di utilizzare Concrete04 per il calcestruzzo e
per l'Emaco"
#uniaxialMaterial Concrete04 $matTag
$fc $ec $ecu
$Ec
uniaxialMaterial Concrete04 $ID_MAT_A_cv [expr -$fcUnc]
[expr -$ec0Unc] [expr -10.0*$ec0Unc] $Ec_04_Unc
$fcrCLS $ecrCLS
uniaxialMaterial Concrete04 $ID_MAT_A_co [expr -$fccConf]
[expr -$ec0Conf] [expr -10.0*$ec0Conf] $Ec_04_Conf
$fcrCLS $ecrCLS
uniaxialMaterial Concrete04 $ID_MAT_emaco [expr -$fcEmaco]
[expr -$e0Emaco] [expr -10.0*$e0Emaco] $Ec_04_Emaco
$fcrEmaco $ecrEmaco
}
if {$TipoCLS ==1} {
puts "Si è scelto di utilizzare il materiale Concrete01 per il

```

```

calcestruzzo e per l'Emaco"
#uniaxialMaterial Concrete01 $matTag
$fpc $epsc0 $fpcu
$epsU
uniaxialMaterial Concrete01 $ID_MAT_A_cv [expr -$fcUnc]
[expr -$ec0Unc] [expr -$fcUnc/20.0] [expr -$ec0Unc*
2];
uniaxialMaterial Concrete01 $ID_MAT_A_co [expr -$fccConf
] [expr -$ec0Conf] [expr -$fccConf/20.0] [expr -$ec0Conf*
2];
uniaxialMaterial Concrete01 $ID_MAT_emaco [expr -$fcEmaco
] [expr -2.0*$e0Emaco] [expr -$fcEmaco/20.0] [expr -
$e0Emaco*2];
}
puts "Definizione dell'acciaio delle armature"
if {$TipoACC ==1} {
puts "Si è scelto di utilizzare Stell01 per l'acciaio"
uniaxialMaterial Steel01 $ID_MAT_A_re $fy $Es $hardRatio
#uniaxialMaterial Steel01 $matTag $Fy $E0 $b
}
if {$TipoACC ==2} {
puts "Si è scelto di utilizzare Stell02 per l'acciaio"
uniaxialMaterial Steel02 $ID_MAT_A_re $fy $Es
$hardRatio 15.0 0.925 0.15;
#uniaxialMaterial Steel02 $matTag $Fy $E
$b $R0 $cR1 $cR2
}
if {$TipoACC ==10} {
puts "Si è scelto di utilizzare ReinforcingSteel per l'acciaio"
uniaxialMaterial ReinforcingSteel $ID_MAT_A_re $fy
$fu $Es [expr $hardRatio*$Es] $esh $eult;
#uniaxialMaterial ReinforcingSteel $matTag $fy
$fu $Es $Esh $esh $eult
}
uniaxialMaterial ReinforcingSteel $ID_MAT_A_re_tubo $fy_tubo
$fu_tubo $Es [expr $hardRatio*$Es] $esh_tubo $eult_tubo;
if {$ZL_TEST==1} {
puts "Definizione del materiale Bond_SP01"
#uniaxialMaterial Bond_SP01 $matTag $Fy $Sy $Fu
$Su $b $R
uniaxialMaterial Bond_SP01 $ID_MAT_ZL $fy $Sy $fu
$Su $b_Bond $R_Bond
#For the Strain-Penetration Model: input values in ksi and in
}
if {$ZL_TEST==2} {
puts "Definizione del materiale Hysteretic"
uniaxialMaterial Hysteretic $ID_MAT_ZL $My1 $Curv1 $My2
$Curv2 $My3 $Curv3 [expr -$My1] [expr -$Curv1] [expr
-$My2] [expr -$Curv2] [expr -$My3] [expr -$Curv3] $pinchX_Hyst
$pinchY_Hyst $damage1_Hyst $damage2_Hyst $beta_Hyst;
#uniaxialMaterial Hysteretic $matTag $slp $elp
$s2p $e2p $s1n $e1n $s2n
$e2n $pinchX $pinchY $damage1 $damage2

```

```

}
if {$ZL_TEST==11} { # Modellazione con una molla rotazionale
puts "Definizione del materiale Hysteretic per la cerniera di
base"
uniaxialMaterial Hysteretic      $ID_MAT_ZL $My1p $Curv1p
$My2p $Curv2p $My3p $Curv3p $My1n $Curv1n $My2n
$Curv2n $My3n $Curv3n $pinchX_Hyst $pinchY_Hyst $damage1_Hyst
$damage2_Hyst $beta_Hyst;
}
if {$ZL_TEST==12} { # Modellazione con due molle rotazionali
puts "Definizione del materiale Hysteretic per le cerniere di
base"
uniaxialMaterial Hysteretic $ID_MAT_ZL $My1p $Curv1p
$My2p $Curv2p $My3p $Curv3p $My1n $Curv1n $My2n
$Curv2n $My3n $Curv3n $pinchX_Hyst $pinchY_Hyst $damage1_Hyst
$damage2_Hyst $beta_Hyst;
#uniaxialMaterial Hysteretic $ID_MAT_ZL_C2 [expr
0.6*$My1p] [expr $Curv1p] [expr 0.8*$My2p] [expr
$Curv2p] [expr 0.6*$My1n] [expr $Curv1n] [expr
0.8*$My2n] [expr $Curv2n] $pinchX_Hyst $pinchY_Hyst
$damage1_Hyst $damage2_Hyst $beta_Hyst;
#uniaxialMaterial Elastic $ID_MAT_ZL [expr
$My1/$Curv1];
uniaxialMaterial Elastic $ID_MAT_ZL_C2 [expr 0.355*$My1p/
$Curv1p];
}
puts "Materiali.tcl: END"

```



```

# File per la definizione della sezione a fibre
puts "SezioneFibreTAs.tcl: START"
set cover $c; # Copriferro
  set coverY [expr $h/2.0]; # Coordinate lembo esterno
  set coverZ [expr $b/2.0]; # Coordinate lembo esterno
  set coreY [expr $coverY-$cover]; # Coordinate Copriferro
  set coreZ [expr $coverZ-$cover]; # Coordinate Copriferro
    set IntY [expr 0.05*$m];
    set IntZ [expr 0.05*$m];
puts "Definizione della Sezione a Fibre CLS superiore"
section fiberSec $ID_SEC_CLS {; # Sezione a fibre Calcestruzzo
  patch quadr $ID_MAT_A_co 1 [expr int(2.0
  *($h-2.0*$c)/$cm)] [expr -$coreY] $coreZ [expr -$coreY] [
  expr -$coreZ] $coreY [expr -$coreZ] $coreY $coreZ;
  #Concrete cover: CLS NON CONFINATO
  patch quadr $ID_MAT_A_cv 1 [expr int(2.0*$c/$cm)] [
  expr -$coverY] $coverZ [expr -$coverY] [expr -$coverZ
  ] [expr -$coreY] [expr -$coreZ] [expr -$coreY] $coreZ
  patch quadr $ID_MAT_A_cv 1 [expr int(2.0*($h-2.0*$c)/$cm)] [
  expr -$coverY] [expr -$coverZ] $coverY [expr -
  $coverZ] $coreY [expr -$coreZ] [expr -$coreY] [expr -$coreZ]
  patch quadr $ID_MAT_A_cv 1 [expr int(2.0*$c/$cm)]
  $coreY $coreZ $coreY [expr -$coreZ] $coverY
  [expr -$coverZ] $coverY $coverZ
  patch quadr $ID_MAT_A_cv 1 [expr int(2.0*($h-2.0*$c)/$cm)] [
  expr -$coverY] $coverZ [expr -$coreY] $coreZ $coreY
  $coreZ $coverY $coverZ
  #BARRE DI ARMATURE #layer straight $matTag $numFiber
  $areaFiber $yStart $zStart $yEnd $zEnd
  layer straight $ID_MAT_A_re 3 [expr 5.31*$cm2] [expr -$coreY
  ] [expr -$coreZ] [expr $coreY] [expr -$coreZ];
  layer straight $ID_MAT_A_re 2 [expr 5.31*$cm2] [expr -$coreY
  ] 0.00 [expr $coreY] 0.00;
  layer straight $ID_MAT_A_re 3 [expr 5.31*$cm2] [expr -$coreY
  ] [expr $coreZ] [expr $coreY] [expr $coreZ];
}; # end of fibersection definition
puts "Definizione della Sezione a Fibre CLS Inferiore"
section fiberSec $ID_SEC_CLS_INF {; # Sezione a fibre
  Calcestruzzo, zona inferiore
  #patch quad $matTag $numSubdivIJ $numSubdivJK $yI $zI $yJ
  $zJ $yK $zK $yL $zL
  #Concrete core: CLS CONFINATO
  #patch quad $matTag $numSubdivIJ
  $numSubdivJK $yI $zI
  $yJ $zJ $yK $zK
  $yL $zL
  patch quadr $ID_MAT_A_co 1 [expr int(2.0
  *($h-2.0*$c)/$cm)] [expr -$coreY] $coreZ [expr -$coreY] [
  expr -$coreZ] $coreY [expr -$coreZ] $coreY $coreZ;
  #Concrete cover: CLS NON CONFINATO
  patch quadr $ID_MAT_A_cv 1 [expr int(2.0*$c/$cm)] [expr -
  $coverY] $coverZ [expr -$coverY] [expr -$coverZ] [expr -
  $coreY] [expr -$coreZ] [expr -$coreY] $coreZ

```

```

patch quadr $ID_MAT_A_cv 1 [expr int(2.0*($h-2.0*$c)/$cm)] [
expr -$coverY] [expr -$coverZ] $coverY [expr -$coverZ] $coreY
[expr -$coreZ] [expr -$coreY] [expr -$coreZ]
patch quadr $ID_MAT_A_cv 1 [expr int(2.0*$c/$cm)] $coreY
$coreZ $coreY [expr -$coreZ] $coverY [expr -$coverZ] $coverY
$coverZ
patch quadr $ID_MAT_A_cv 1 [expr int(2.0*($h-2.0*$c)/$cm)] [
expr -$coverY] $coverZ [expr -$coreY] $coreZ $coreY $coreZ
$coverY $coverZ
#BARRE DI ARMATURE #layer straight $matTag $numFiber
$areaFiber $yStart $zStart $yEnd $zEnd
layer straight $ID_MAT_A_re 3 [expr 5.31*$cm2] [expr -
$coreY] [expr -$coreZ] [expr $coreY] [expr -
$coreZ];
layer straight $ID_MAT_A_re 2 [expr 5.31*$cm2] [expr -
$coreY] 0.00 [expr $coreY] 0.00;
layer straight $ID_MAT_A_re 3 [expr 5.31*$cm2] [expr -
$coreY] [expr $coreZ] [expr $coreY] [expr $coreZ
];
layer straight $ID_MAT_A_re_tubo 1 [expr 26.64*$cm2]
0.0 -4.0 0.0 4.0;
}; # end of fibersection definition
puts "Definizione della Sezione a Fibre Emaco"
section fiberSec $ID_SEC_EMACO {; # Sezione a fibre EMACO
#patch quad $matTag $numSubdivIJ
$numSubdivJK $yI
$zI $yJ $zJ
$yK $zK $yL $zL
# patch quadr $ID_MAT_emaco 1 [expr
int(2.0*($h)/$cm)] [expr -$coverY] [expr
$coverZ] [expr -$coverY] [expr -$coverZ] [expr
$coreY] [expr -$coverZ] [expr $coverY] [expr $coverZ];
patch quadr $ID_MAT_emaco 1 [expr int(2.0
*($h)/$cm)] [expr -$coverY] [expr $coverZ] [expr
-$coverY] [expr -$coverZ] [expr $coverY] [expr -$coverZ] [
expr $coverY] [expr $coverZ];
#BARRE DI ARMATURE #layer straight $matTag $numFiber
$areaFiber $yStart $zStart $yEnd $zEnd
layer straight $ID_MAT_A_re 3 [expr 5.31*$cm2] [expr -
$coreY] [expr -$coreZ] [expr $coreY] [expr -$coreZ];
layer straight $ID_MAT_A_re 2 [expr 5.31*$cm2] [expr -
$coreY] 0.00 [expr $coreY] 0.00;
layer straight $ID_MAT_A_re 3 [expr 5.31*$cm2] [expr -
$coreY] [expr $coreZ] [expr $coreY] [expr $coreZ];
#layer straight $ID_MAT_A_re_tubo 1 [expr 26.64*$cm2]
0.0 -4.0 0.0 4.0;
}; # end of fibersection definition
if {$ZL_TEST==1} {
puts "Definizione della Sezione a Fibre per elemento Zero Length"
section fiberSec $ID_SEC_ZL {; # Sezione a fibre elemento
ZeroLength
#patch quad $matTag $numSubdivIJ
$numSubdivJK $yI

```

```

$zI          $yJ          $zJ
$yK          $zK          $yL          $zL
patch quadr  $ID_MAT_ZL_emaco  1          [expr int
(2.0*($h)/$cm)]          [expr -$coverY] [expr $coverZ]  [
expr -$coverY] [expr -$coverZ] [expr $coverY]  [expr -$coverZ
] [expr $coverY]  [expr $coverZ];
#BARRE DI ARMATURE  #layer straight $matTag $numFiber
$areaFiber $yStart $zStart $yEnd $zEnd
layer straight $ID_MAT_ZL 3          [expr 5.31*$cm2]  [expr -
$coreY] [expr -$coreZ] [expr $coreY] [expr -$coreZ];
layer straight $ID_MAT_ZL 2          [expr 5.31*$cm2]  [expr -
$coreY] 0.00          [expr $coreY] 0.00;
layer straight $ID_MAT_ZL 3          [expr 5.31*$cm2]  [expr -
$coreY] [expr $coreZ] [expr $coreY] [expr $coreZ];
layer straight $ID_MAT_A_re_tubo 1  [expr 26.64*$cm2]  0.0
-4.0 0.0 4.0;
}; # end of fibersection definition
}
if {$ZL_TEST==2} {
puts "Definizione della Sezione per elemento Zero Length"
section Uniaxial $ID_SEC_ZL $ID_MAT_ZL Mz;
}
if {$ZL_TEST==11} {
puts "Definizione della Sezione per elemento Zero Length con una
molla rotazionale"
#section Uniaxial $secTag $matTag $string
section Uniaxial $ID_SEC_ZL $ID_MAT_ZL Mz;
}
if {$ZL_TEST==12} {
puts "Definizione della Sezione per elemento Zero Length con due
molle rotazionali"
#section Uniaxial $secTag $matTag $string
section Uniaxial $ID_SEC_ZL $ID_MAT_ZL Mz;
section Uniaxial $ID_SEC_ZL_C2 $ID_MAT_ZL_C2 Mz;
}
puts "SezioneFibreTAs.tcl: END"

```

```

# SCRIPT PER DEFINIRE QUALI PARAMETRI VENGONO FORNITI COME
OUTPUT DEL PROGRAMMA
puts "DEFINIZIONE DEI RECORDER: START"
recorder Element      -file $dataDir/ForceTop2.out -time -ele
$seleClsSup section 2 forces;
recorder Element      -file $dataDir/ForceTop.out  -time -ele
$seleClsSup section 2 force;
recorder Element      -xml $dataDir/ForceTop.xml  -time -ele
$seleClsSup forces;
recorder Element      -file $dataDir/ForceTopGlobal.out -time -ele
$seleClsSup forces;
recorder Element      -xml $dataDir/ForceTopGlobal.xml -time -ele
$seleClsSup forces;
recorder Element      -file $dataDir/ForceBase.out          -time
-ele $seleClsSup section 1 force; # Column section forces, axial
and moment, node i
if {$stestEmaco ==0} { # Verifica se si utilizza l'elemento di
emaco
recorder Element      -file $dataDir/AcciaioTes.out  -time -ele
$seleClsSup section 1 fiber [expr $scoreY] [expr $scoreY]
$ID_MAT_A_re stressStrain; # section deformations, axial and
curvature, node i
recorder Element      -file $dataDir/AcciaioCompr.out -time -ele
$seleClsSup section 1 fiber [expr -$scoreY] [expr -$scoreY]
$ID_MAT_A_re stressStrain; # section deformations, axial and
curvature, node i
}
if {$stestEmaco ==1} { # Verifica se si utilizza l'elemento di
emaco
recorder Element      -file $dataDir/AcciaioTes.out          -time
-ele $seleEmaco section 1 fiber [expr $scoreY] 0
$ID_MAT_A_re stressStrain; # section deformations, axial and
curvature, node i
recorder Element      -file $dataDir/AcciaioCompr.out        -time
-ele $seleEmaco section 1 fiber [expr -$scoreY] 0
$ID_MAT_A_re stressStrain; # section deformations, axial and
curvature, node i
}
recorder Element      -file $dataDir/ZLDef.out             -time -ele $seleZL
section 2 defomration;
recorder Element      -xml $dataDir/ZLDef.xml              -time -ele $seleZL
section 2 defomration;
recorder Element      -file $dataDir/ZLTes.out            -time -ele $seleZL
section 2 fiber 0 $ID_MAT_A_re stressStrain;
recorder Element      -file $dataDir/ZLCompr.out          -time -ele $seleZL
section 2 fiber 0 $ID_MAT_A_re stressStrain;
recorder Element      -xml $dataDir/ZLComprTes.xml         -time -ele
$seleZL section 2 fiber 0 $ID_MAT_A_re stressStrain;
recorder Element      -xml $dataDir/ZLComprCompr.xml       -time -ele
$seleZL section 2 fiber 0 $ID_MAT_A_re stressStrain;
recorder Element      -file $dataDir/EmacoTes.out          -time -ele
$seleEmaco section 1 fiber [expr $coverY] 0 $ID_MAT_emaco
stressStrain; # section deformations, axial and curvature, node i

```

```

recorder Element -file $dataDir/EmacoCompr.out -time -ele
$seleEmaco section 1 fiber [expr -$coverY] 0 $ID_MAT_emaco
stressStrain; # section deformations, axial and curvature, node i
recorder Element -file $dataDir/CLSTes.out -time -ele
$seleClsSup section 1 fiber [expr $coverY] 0 $ID_MAT_A_co
stressStrain; # section deformations, axial and curvature, node i
recorder Element -file $dataDir/CLSCmpr.out -time -ele
$seleClsSup section 1 fiber [expr -$coverY] 0 $ID_MAT_A_co
stressStrain; # section deformations, axial and curvature, node i
recorder Element -file $dataDir/CLSTesCov.out -time
-ele $seleClsSup section 1 fiber [expr $coverY] 0 $ID_MAT_A_cv
stressStrain; # section deformations, axial and curvature, node i
recorder Element -file $dataDir/CLSCmprCov.out -time -ele
$seleClsSup section 1 fiber [expr -$coverY] 0 $ID_MAT_A_cv
stressStrain; # section deformations, axial and curvature, node i
recorder Element -file $dataDir/DefEmaco.out -time -ele $seleEmaco
section deformation;
recorder Element -file $dataDir/DefBase.out -time -ele $seleClsSup
section 1 deformation; # section deformations, axial and
curvature, node i
recorder Element -file $dataDir/DefBaseZL.out -time -ele $seleZL
section 2 deformation; # section deformations, axial and
curvature, node i
recorder Node -file $dataDir/DispTopVert.out -time -node $nSup
-dof 2 disp; # spostamento verticale nodo 2
recorder Node -file $dataDir/DispTopOriz.out -time -node $nSup
-dof 1 disp; # spostamento orizz nodo 2
recorder Node -file $dataDir/DispBase.out -time -node $nBase
-dof 3 disp; # spostamento orizz nodo 2
if {$ZL_TEST==2} {
recorder Node -file $dataDir/CurvatZL2.out -time -node $nBase
-dof 3 disp;
}
if {$ZL_TEST==11} { # Modellazione con una molla rotazionale
recorder Node -xml $dataDir/RotC1.xml -time -node $nSupEmaco
-dof 3 disp;
recorder Node -file $dataDir/RotC1.out -time -node $nSupEmaco
-dof 3 disp;
}
if {$ZL_TEST==12} { # Modellazione con due molle rotazionali
recorder Node -xml $dataDir/RotC1.xml -time -node $nSupEmaco
-dof 3 disp;
recorder Node -file $dataDir/RotC1.out -time -node $nSupEmaco
-dof 3 disp;
recorder Node -xml $dataDir/RotC2.xml -time -node $nBaseCern
-dof 3 disp;
recorder Node -file $dataDir/RotC2.out -time -node $nBaseCern
-dof 3 disp;
}
recorder Element -file $dataDir/ForceZL.out -time -ele
$seleZL section 2 force;
recorder Element -file $dataDir/ForceEmacoSec1.out -time
-ele $seleEmaco section 2 force;

```

```
puts "DEFINIZIONE DEI RECORDER: END"
```

```

# SCRIPT PER IMPRIMERE AL PILASTRO LO SFORZO ASSIALE
constraints Plain;          #Transformation Plain      # how it
handles boundary conditions
numberer Plain;           # renumber dof's to minimize
band-width (optimization), if you want to
system BandGeneral;      # how to store and solve the
system of equations in the analysis
test NormDispIncr $Tol 500 ;      # determine if convergence
has been achieved at the end of an iteration step
algorithm Newton;        # use Newton's solution
algorithm: updates tangent stiffness at every iteration
puts "Applicazione dello sforzo assiale tramite LoadControl in
100 step di carico"
# define load pattern -- generalized#pattern Plain $patternTag
$stsTag {
pattern Plain 1000000 Linear {;

    load $nSup 0.00 $SforzoAss 0.0 ;
}
#load $nodeTag (ndf $LoadValues
integrator LoadControl 0.01;      # determine the next time step
for an analysis
analysis Static;                  # define type of analysis static or
transient
set OK [analyze 100];            # Applicazione dello sforzo assiale
in 100 passi

puts "Fine applicazione sforzo assiale"
# maintain constant gravity loads and reset time to zero
loadConst -time 0.0
if {$OK != 0} {
    error "Problema per applicazione carichi verticali"
}

```

```

# SCRIPT CON IL QUALE SI HA UN CALCOLO A CONTROLLO DEGLI
SPOSTAMENTI
puts "Imposizione dello spostamento: START"
set IDctrlNode $nSup;           # Nodo in cui viene imposto
lo spostamento
set IDctrlDOF 1;               # gdl in cui impongo lo
spostamento-> orizzontale
set fileL [open Data/l005mm.txt w]
puts $fileL "[llength $ciclo005mm]"
close $fileL
set fileL [open Data/l010mm.txt w]
puts $fileL "[llength $ciclo010mm]"
close $fileL
set fileL [open Data/l020mm.txt w]
puts $fileL "[llength $ciclo020mm]"
close $fileL
set fileL [open Data/l040mm.txt w]
puts $fileL "[llength $ciclo040mm]"
close $fileL
set fileL [open Data/l060mm.txt w]
puts $fileL "[llength $ciclo060mm]"
close $fileL
set fileL [open Data/l100mm.txt w]
puts $fileL "[llength $ciclo100mm]"
close $fileL
set fileL [open Data/l140mm.txt w]
puts $fileL "[llength $ciclo140mm]"
close $fileL
set fileL [open Data/lFinale.txt w]
puts $fileL "[llength $ciclofinale]"
close $fileL
# create load pattern for lateral pushover load
set Hload 1.0;                 # define the lateral load as a
proportion of the weight so that the pseudo time equals the
lateral-load coefficient when using linear load pattern
pattern Plain 200 Linear {;     # define load pattern --
generalized
    load $IDctrlNode $Hload 0.0 0.0;
}
set nCiclo 0.0;
set nCicloN 0.0;
set ShowCicliN 0;
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 5mm"
set cicloAttuale "5mm"
set dispPrev 0.0
set ciclo $ciclo005mm
source cicloSpost.tcl
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 10mm"
set cicloAttuale "10mm"
set ciclo $ciclo010mm
source cicloSpost.tcl
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 20mm"
set cicloAttuale "20mm"

```



```
set ciclo $ciclo020mm
source cicloSpost.tcl
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 40mm"
set cicloAttuale "40mm"
set ciclo $ciclo040mm
source cicloSpost.tcl
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 60mm"
set cicloAttuale "60mm"
set ciclo $ciclo060mm
source cicloSpost.tcl
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 100mm"
set cicloAttuale "100mm"
set ciclo $ciclo100mm
source cicloSpost.tcl
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 140mm"
set cicloAttuale "140mm"
set ciclo $ciclo140mm
source cicloSpost.tcl
puts "Imposizione del ciclo finale"
set cicloAttuale "Finale"
set ciclo $ciclofinale
source cicloSpost.tcl
# chdir C:\Program Files\MATLAB\R2011b\bin
puts "Imposizione dello spostamento: END"
puts "Numero di cicli eseguiti: $nCiclo"
puts "Numero di cicli eseguiti non con Newton: $nCicloN"
set fileLog [open LogCicli.txt w]
if {$nCicloN !=0} {
puts "Cicli eseguiti non con Newton:"
puts $fileLog "Cicli eseguiti non con Newton:"
for {set i 1} {$i<= [llength $ShowCicliN]} {incr i 1} {
puts "[lindex $ShowCicliN $i]"
puts $fileLog "[lindex $ShowCicliN $i]"
}
}
```

```

# SCRIPT PER IMPRIMERE OGNI SINGOLO SPOSTAMENTO AL MODELLO
set tolCur $Tol
set convTest NormDispIncr;
set MinTol 1.0e-3;
set algorithmTypeStatic Newton
set CicliTotali [expr [llength $ciclo005mm]+[llength $ciclo010mm
]+[llength $ciclo020mm]+[llength $ciclo040mm]+[llength
$ciclo060mm]+[llength $ciclo100mm]+[llength $ciclo140mm]+[llength
$ciclofinale]]
if {$dispPrev==0.0} {
for {set i 1} {$i< [llength $ciclo]} {incr i 1} {
set nCiclo [expr $nCiclo+1.0];
set dispCurr [expr [lindex $ciclo $i]*$MoltSpost*$mm];
set incremento [expr $dispCurr - $dispPrev];
set PercCicli [expr round($nCiclo/$CicliTotali*100)];
set dispShow [expr $dispCurr/$mm];
set Show " $PercCicli % - Ciclo attuale: $cicloAttuale -
Passo: $i/[llength $ciclo] - Spostamento: $dispShow "
puts "$PercCicli % - Ciclo attuale: $cicloAttuale - Passo: $
i/[llength $ciclo] - Spostamento: $dispShow"
integrator DisplacementControl $IDctrlNode $IDctrlDOF
$incremento
analysis Static
set ok [analyze 1]
if {$ok != 0} {
while {$tolCur<=$MinTol && $ok!=0} {
puts "TOLLERANZA=$tolCur";
test $convTest $tolCur 500 0
if {$ok != 0} {
puts "---> Trying Newton with Initial
Tangent .."
algorithm Newton -initial
set ok [analyze 1]
algorithm $algorithmTypeStatic
}
if {$ok != 0} {
puts "---> Trying Broyden .."
algorithm Broyden 8
set ok [analyze 1 ]
algorithm $algorithmTypeStatic
}
if {$ok != 0} {
puts "---> Trying NewtonWithLineSearch .."
algorithm NewtonLineSearch 0.4
set ok [analyze 1]
algorithm $algorithmTypeStatic
}
set tolCur [expr $tolCur*10.0];
}
set nCicloN [expr $nCicloN+1.0];

```

```

lappend ShowCicliN "$Show"
if {$ok != 0} {
    puts "$PercCicli % - Ciclo attuale: $
cicloAttuale - Passo: $i/[llength $ciclo] -
Spostamento: $dispShow NON CONVERGE!"
    if {$nCicloN !=0} {
        puts "Cicli eseguiti non con Newton:"
        for {set j 1} {$j<= [llength $ShowCicliN]} {incr
j 1} {
            puts "[lindex $ShowCicliN $j]"
        }
    }
    pause
}

        set tolCurr $Tol; # end if
    }; # end if
    set dispPrev $dispCurr;          # move to next step
}; # end Dstep
} else {
for {set i 0} {$i< [llength $ciclo]} {incr i 1} {
    set nCiclo [expr $nCiclo+1.0];
    set dispCurr [expr [lindex $ciclo*$MoltSpost $i]*$MoltSpost*
$mml]
    set incremento [expr $dispCurr - $dispPrev]
    set PercCicli [expr round($nCiclo/$CicliTotali*100)]
    set dispShow [expr $dispCurr/$mml]
    set Show " $PercCicli % - Ciclo attuale: $cicloAttuale -
Passo: $i/[llength $ciclo] - Spostamento: $dispShow "
    puts "$PercCicli % - Ciclo attuale: $cicloAttuale - Passo: $
i/[llength $ciclo] - Spostamento: $dispShow"
    integrator DisplacementControl $IDctrlNode $IDctrlDOF
    $incremento
    analysis Static
    set ok [analyze 1]
    if {$ok != 0} {
        while {$tolCur<=$MinTol && $ok!=0} {
            puts "TOLLERANZA=$tolCur";
            test $convTest $tolCur 500 0
            if {$ok != 0} {
                puts "---> Trying Newton with Initial
Tangent .."
                algorithm Newton -initial
                set ok [analyze 1]
                algorithm $algorithmTypeStatic
            }
            if {$ok != 0} {
                puts "---> Trying Broyden .."
                algorithm Broyden 8
                set ok [analyze 1]
                algorithm $algorithmTypeStatic
            }
            if {$ok != 0} {

```

---

```

puts "----> Trying NewtonWithLineSearch .."
algorithm NewtonLineSearch 0.6
set ok [analyze 1]
algorithm $algorithmTypeStatic

}
set tolCur [expr $tolCur*10.0];
}
set nCicloN [expr $nCicloN+1.0];
lappend ShowCicliN "$Show"
if {$ok != 0} {
puts "$PercCicli % - Ciclo attuale: $
cicloAttuale - Passo: $i - Spostamento: $
dispShow NON CONVERGE!"
puts "Numero di cicli eseguiti: $nCiclo"
puts "Numero di cicli eseguiti non con Newton: $
nCicloN"
if {$nCicloN !=0} {
puts "Cicli eseguiti non con Newton:"
for {set j 1} {$j<= [llength $ShowCicliN]} {incr
j 1} {
puts "[lindex $ShowCicliN $j]"
}
}
}
pause
}
set tolCurr $Tol; # end if
}; # end if
set dispPrev $dispCurr; # move to next step
}; # end Dstep
};

```

```

# SCRIPT CON IL QUALE SI HA UN CALCOLO CONTROLLO DI FORZE
puts "Imposizione delle Forze: START"
set IDctrlNode $nSup;           # Nodo in cui viene imposto
lo spostamento
set IDctrlDOF 1;               # gdl in cui impongo lo
spostamento-> orizzontale
set fileL [open Data/1005mm.txt w]
puts $fileL "[llength $forze005mmSP]"
close $fileL
set fileL [open Data/1010mm.txt w]
puts $fileL "[llength $forze010mmSP]"
close $fileL
set fileL [open Data/1020mm.txt w]
puts $fileL "[llength $forze020mmSP]"
close $fileL
set fileL [open Data/1040mm.txt w]
puts $fileL "[llength $forze040mmSP]"
close $fileL
set fileL [open Data/1060mm.txt w]
puts $fileL "[llength $forze060mmSP]"
close $fileL
set fileL [open Data/1100mm.txt w]
puts $fileL "[llength $forze100mmSP]"
close $fileL
set fileL [open Data/1140mm.txt w]
puts $fileL "[llength $forze140mmSP]"
close $fileL
set fileL [open Data/1Finale.txt w]
puts $fileL "[llength $forzefinaleSP]"
close $fileL
# create load pattern for lateral pushover load
set nCiclo 0;
set nCicloShow 0.0;
set nCicloN 0.0;
set ShowCicliN 0;
set forcePrev 0.0;
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 5mm"
set cicloAttuale "5mm"
set ciclo $forze005mmSP
source cicloForze.tcl
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 10mm"
set cicloAttuale "10mm"
set ciclo $forze010mmSP
source cicloForze.tcl
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 20mm"
set cicloAttuale "20mm"
set ciclo $forze020mmSP
source cicloForze.tcl
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 40mm"
set cicloAttuale "40mm"
set ciclo $forze040mmSP
source cicloForze.tcl
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 60mm"

```

```
set cicloAttuale "60mm"
set ciclo $forze060mmSP
source cicloForze.tcl
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 100mm"
set cicloAttuale "100mm"
set ciclo $forze100mmSP
source cicloForze.tcl
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 140mm"
set cicloAttuale "140mm"
set ciclo $forze140mmSP
source cicloForze.tcl
puts "Imposizione del ciclo finale"
set cicloAttuale "Finale"
set ciclo $forzefinaleSP
source cicloForze.tcl
# chdir C:\Program Files\MATLAB\R2011b\bin
puts "Imposizione delle Forze: END"
puts "Numero di cicli eseguiti: $nCiclo"
puts "Numero di cicli eseguiti non con Newton: $nCicloN"
set fileLog [open LogCicli.txt w]
puts $fileLog "Cicli eseguiti non con Newton:"
if {$nCicloN !=0} {
puts "Cicli eseguiti non con Newton:"
for {set i 1} {$i<= [llength $ShowCicliN]} {incr i 1} {
puts "[lindex $ShowCicliN $i]"
puts $fileLog "[lindex $ShowCicliN $i]"
}
}
```

```

# SCRIPT PER IMPRIMERE OGNI SINGOLA FORZA AL MODELLO
set tolCur $Tol
set convTest NormDispIncr;
set MinTol 1.0e-3;
set algorithmTypeStatic Newton
set CicliTotali [expr [llength $forze005mmSP]+[llength
$forze010mmSP]+[llength $forze020mmSP]+[llength $forze040mmSP]+[
llength $forze060mmSP]+[llength $forze100mmSP]+[llength
$forze140mmSP]+[llength $forzefinaleSP]]
for {set i 1} {$i< [llength $ciclo]} {incr i 1} {
    set nCiclo [expr $nCiclo+1];
    set nCicloShow [expr $nCicloShow+1.0];
    set forceCurr [expr [lindex $ciclo $i]*$kN];
    set forceIncr [expr $forceCurr - $forcePrev];

    set PercCicli [expr round($nCicloShow/$CicliTotali*100)];

    set forceShow [expr $forceCurr/$kN];
    set Show " $PercCicli % - Ciclo attuale: $cicloAttuale -
    Passo: $i - Forza: $forceShow "
    puts "$PercCicli % - Ciclo attuale: $cicloAttuale - Passo: $
    i/[llength $ciclo] - Forza: $forceShow"
    pattern Plain $nCiclo Constant {;                # define load
    pattern -- generalized
    load $nSup $forceIncr 0.0 0.0;
}
    integrator LoadControl 1;
    analysis Static
    set ok [analyze 1]
    loadConst -time 0.0
    if {$ok != 0} {
        while {$tolCur<=$MinTol && $ok!=0} {
            puts "TOLLERANZA=$tolCur";
            test $convTest $tolCur 500 0
            if {$ok != 0} {
                puts "---> Trying Newton with Initial
                Tangent .."
                algorithm Newton -initial
                set ok [analyze 1]
                loadConst -time 0.0
                algorithm $algorithmTypeStatic
            }
            if {$ok != 0} {
                puts "---> Trying Broyden .."
                algorithm Broyden 8
                set ok [analyze 1 ]
                loadConst -time 0.0
                algorithm $algorithmTypeStatic
            }
            if {$ok != 0} {
                puts "---> Trying NewtonWithLineSearch .."

```

---

```

algorithm NewtonLineSearch 0.8
set ok [analyze 1]
loadConst -time 0.0
algorithm $algorithmTypeStatic

}
set tolCur [expr $tolCur*10.0];
}
set nCicloN [expr $nCicloN+1.0];
lappend ShowCicliN "$Show"
if {$ok != 0} {
puts "$PercCicli % - Ciclo attuale: $
cicloAttuale - Passo: $i - Spostamento: $
forceShow NON CONVERGE!"
if {$nCicloN !=0} {
puts "Cicli eseguiti non con Newton:"
for {set j 1} {$j<= [llength $ShowCicliN]} {incr
j 1} {
puts "[lindex $ShowCicliN $j]"
}
}
pause
}
set tolCurr $Tol; # end if
}; # end if
set forcePrev $forceCurr; # move to next step
}; # end Dstep

```



## **APPENDICE B**

Di seguito sono stati riportati gli script in tcl, utilizzati per calibrare le caratteristiche della molla rotazionale alla base del pilastro.

In modo tale da inserire all'interno del modello complessivo una molla rotazionale con queste proprietà, negli script citati nell'Appendice A si fa riferimento diretto a quelli del presente allegato.

```

# SCRIPT UTILIZZATO PER CALIBRARE LE CARATTERISTICHE DELLA PRIMA
MOLLA ROTAZIONALE ALLA BASE DEL PILASTRO, PER RAPPRESENTARE LO
SCALINO DI EMACO
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3;
puts "Definizione Nodi"
node 1      0.0 0.0 ;
node 2      0.0 0.0 ; # Le coordinate coincidono perché si
utilizza un elemento di lunghezza nulla
puts "Definizione Vincoli"
fix 1 1 1 1;
fix 2 1 1 0;
source Unita_misura.tcl; # Script per inizializzare le variabili
per le unità di misura
source RotProve.tcl; # Script per inserire all'interno del
programma le rotazioni misurate sperimentalmente.
set Tol 1.0e-15;
set MoltSpost 1;
source CaratCern.tcl; # Script dove vengono definiti i parametri
del modello Hysteretic utilizzato per la cerniera.
puts "Definizione del materiale Hysteretic"
uniaxialMaterial Hysteretic 1 $My1p $Curv1p $My2p
$Curv2p $My3p $Curv3p $My1n $Curv1n $My2n $Curv2n
$My3n $Curv3n $pinchX_Hyst $pinchY_Hyst $damage1_Hyst
$damage2_Hyst $beta_Hyst;
#uniaxialMaterial Hysteretic $matTag $slp $elp
$ss2p $e2p $sln $eln $s2n
$e2n $pinchX $pinchY $damage1 $damage2
section Uniaxial 1 1 Mz; # Definizione della molla con la sola
rigidezza rotazionale.
element zeroLengthSection 1 1 2 1;
puts "Definizione Recorder"
recorder Node -file Rotazioni.out -time -node 2 -dof 3 disp;
recorder Element -xml Force.xml -time -ele 1 forces;
puts "Imposizione degli spostamenti"
constraints Plain; # how it handles boundary
conditions
numberer Plain; # renumber dof's to minimize
band-width (optimization), if you want to
system BandGeneral; # how to store and solve the
system of equations in the analysis
test NormDispIncr 1e-15 500 ; # determine if convergence
has been achieved at the end of an iteration step
algorithm Newton; # use Newton's solution
algorithm: updates tangent stiffness at every iteration
source ImposizRot.tcl; # Script per imporre le rotazioni.

```

```
puts "Definizione dei parametri del Materiale Hysteretic
utilizzato per la prima molla rotazionale"
set diviZL      1.0;
set moltRig     1.0;
set My1p        [expr 75.0*$m*$kN];
set Curv1p      [expr 0.0004];
set My2p        [expr 170.0*$m*$kN];
set Curv2p      [expr 0.0015];
set My3p        [expr 265.0*$m*$kN];
set Curv3p      [expr 0.0059];
set My1n        [expr -$My1p];
set Curv1n      [expr -$Curv1p];
set My2n        [expr -$My2p];
set Curv2n      [expr -$Curv2p];
set My3n        [expr -$My3p];
set Curv3n      [expr -$Curv3p];
set pinchX_Hyst 0.9;    #pinching factor for strain (or
deformation) during reloading
set pinchY_Hyst 0.4;    #pinching factor for stress (or
force) during reloading
set damage1_Hyst 0.0000; #damage due to ductility: D1(mu-1)
set damage2_Hyst 0.0;    #damage due to energy: D2(Eii/Eult)
set beta_Hyst    0.0;    #power used to determine the
degraded unloading stiffness based on ductility, mu-beta
(optional, default=0.0)
```

```

# SCRIPT PER IMPORRE LE ROTAZIONI
puts "Imposizione delle rot: START"
set IDctrlNode 2;           # Nodo in cui viene imposto lo
spostamento
set IDctrlDOF 3;           # gdl in cui impongo lo
spostamento-> orizzontale
# create load pattern for lateral pushover load
set Hload 1.0;             # define the lateral load as a
proportion of the weight so that the pseudo time equals the
lateral-load coefficient when using linear load pattern
pattern Plain 200 Linear {;           # define load pattern --
generalized
    load $IDctrlNode 0.0 0.0 $Hload;
}
set nCiclo 0.0;
set nCicloN 0.0;
set ShowCicliN 0;
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 5mm"
set cicloAttuale "5mm"
set dispPrev 0.0
set ciclo $rot005mm
source cicliRot.tcl
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 10mm"
set cicloAttuale "10mm"
set ciclo $rot010mm
source cicliRot.tcl
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 20mm"
set cicloAttuale "20mm"
set ciclo $rot020mm
source cicliRot.tcl
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 40mm"
set cicloAttuale "40mm"
set ciclo $rot040mm
source cicliRot.tcl
puts "Imposizione dello spostamento: END"
puts "Numero di cicli eseguiti: $nCiclo"
puts "Numero di cicli eseguiti non con Newton: $nCicloN"
set fileLog [open LogCicli.txt w]
if {$nCicloN !=0} {
puts "Cicli eseguiti non con Newton:"
puts $fileLog "Cicli eseguiti non con Newton:"
for {set i 1} {$i<= [llength $ShowCicliN]} {incr i 1} {
puts "[lindex $ShowCicliN $i]"
puts $fileLog "[lindex $ShowCicliN $i]"
}
}
}

```

```

# SCRIPT PER IMPRIMERE OGNI SINGOLA ROTAZIONE AL MODELLO
set tolCur $Tol
set convTest NormDispIncr;
set MinTol 1.0e-3;
set algorithmTypeStatic Newton
set CicliTotali [expr [llength $rot005mm]+[llength $rot010mm]+[
llength $rot020mm]+[llength $rot040mm]];
test NormDispIncr $Tol 500 ;
algorithm $algorithmTypeStatic
if {$dispPrev==0.0} {
for {set i 1} {$i< [llength $ciclo]} {incr i 1} {
set nCiclo [expr $nCiclo+1.0];
set dispCurr [expr [lindex $ciclo $i]*$MoltSpost];
set incremento [expr $dispCurr - $dispPrev];
set PercCicli [expr round($nCiclo/$CicliTotali*100)];
set dispShow [expr $dispCurr/$mm];
set Show " $PercCicli % - Ciclo attuale: $cicloAttuale -
Passo: $i - Spostamento: $dispShow "
puts "$PercCicli % - Ciclo attuale: $cicloAttuale - Passo: $
i - Spostamento: $dispShow"
integrator DisplacementControl 2 3 $incremento
analysis Static
set ok [analyze 1]
if {$ok != 0} {
while {$tolCur<=$MinTol && $ok!=0} {
puts "TOLLERANZA=$tolCur";
test $convTest $tolCur 500 0
if {$ok != 0} {
puts "---> Trying Newton with Initial
Tangent .."
algorithm Newton -initial
set ok [analyze 1]
algorithm $algorithmTypeStatic
}
if {$ok != 0} {
puts "---> Trying Broyden .."
algorithm Broyden 8
set ok [analyze 1]
algorithm $algorithmTypeStatic
}
if {$ok != 0} {
puts "---> Trying NewtonWithLineSearch .."
algorithm NewtonLineSearch 0.4
set ok [analyze 1]
algorithm $algorithmTypeStatic
}
set tolCur [expr $tolCur*10.0];
}
set nCicloN [expr $nCicloN+1.0];
lappend ShowCicliN "$Show"

```

```

    if {$ok != 0} {
        puts "$PercCicli % - Ciclo attuale: $
        cicloAttuale - Passo: $i - Spostamento: $
        dispShow NON CONVERGE!"
        if {$nCicloN !=0} {
            puts "Cicli eseguiti non con Newton:"
            for {set j 1} {$j<= [llength $ShowCicliN]} {incr
            j 1} {
                puts "[lindex $ShowCicliN $j]"
            }
        }
        pause
    }
    set tolCurr $Tol; # end if
}; # end if
set dispPrev $dispCurr; # move to next step
}; # end Dstep
} else {
for {set i 0} {$i< [llength $ciclo]} {incr i 1} {
    set nCiclo [expr $nCiclo+1.0];
    set dispCurr [expr [lindex $ciclo*$MoltSpost $i]*$MoltSpost]
    set incremento [expr $dispCurr - $dispPrev]
    set PercCicli [expr round($nCiclo/$CicliTotali*100)]
    set dispShow [expr $dispCurr/$mm]
    set Show " $PercCicli % - Ciclo attuale: $cicloAttuale -
    Passo: $i - Spostamento: $dispShow "
    puts "$PercCicli % - Ciclo attuale: $cicloAttuale - Passo: $
    i - Spostamento: $dispShow"
    integrator DisplacementControl $IDctrlNode $IDctrlDOF
    $incremento
    analysis Static
    set ok [analyze 1]
    if {$ok != 0} {
        while {$tolCur<=$MinTol && $ok!=0} {
            puts "TOLLERANZA=$tolCur";
            test $convTest $tolCur 500 0
            if {$ok != 0} {
                puts "---> Trying Newton with Initial
                Tangent .."
                algorithm Newton -initial
                set ok [analyze 1]
                algorithm $algorithmTypeStatic
            }
        }
        if {$ok != 0} {
            puts "---> Trying Broyden .."
            algorithm Broyden 8
            set ok [analyze 1 ]
            algorithm $algorithmTypeStatic
        }
    }
    if {$ok != 0} {
        puts "---> Trying NewtonWithLineSearch .."

```

---

```

algorithm NewtonLineSearch 0.6
set ok [analyze 1]
algorithm $algorithmTypeStatic

}
set tolCur [expr $tolCur*10.0];
}
set nCicloN [expr $nCicloN+1.0];
lappend ShowCicliN "$Show"
if {$ok != 0} {
puts "$PercCicli % - Ciclo attuale: $
cicloAttuale - Passo: $i - Spostamento: $
dispShow NON CONVERGE!"
puts "Numero di cicli eseguiti: $nCiclo"
puts "Numero di cicli eseguiti non con Newton: $
nCicloN"
if {$nCicloN !=0} {
puts "Cicli eseguiti non con Newton:"
for {set j 1} {$j<= [llength $ShowCicliN]} {incr
j 1} {
puts "[lindex $ShowCicliN $j]"
}
}
pause
}
set tolCurr $Tol; # end if
}; # end if
set dispPrev $dispCurr; # move to next step
}; # end Dstep
};

```





## APPENDICE C

Di seguito sono stati riportati gli script in tcl, utilizzati per calibrare le caratteristiche degli elementi zeroLength che rappresentano le barre inghisate fondazione per la modellazione dello scalino di Emaco con un letto di molle.

Gli spostamenti utilizzati nella calibrazione sono quelli ottenuti nella campagna sperimentale del 2011 per delle barre con caratteristiche simili a quelle utilizzate nel pilastro prefabbricato.

```

# SCRIPT PER CALIBRARE LE CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI
ZEROLENGTH CHE RAPPRESENTANO LE BARRE INGHISATE IN FONDAZIONE
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3;
set dataDir Data;          # set up name of data directory
file mkdir $dataDir;      # create data directory
puts "Definizione Nodi"
node 1      0.0 0.0 ;
node 2      0.0 0.0 ;
puts "Definizione Vincoli"
fix 1 1 1 1;
fix 2 1 0 1;
source Unita_misura.tcl
set Tol 1.0e-15;
set MoltSpost 1.0;
source CarattHardening.tcl
source CarattHyster.tcl
source DatiPullOut.tcl
set ciclo $PullOutB5
puts "Definizione del materiale come Elastici e Isteretici in
parallelo"
uniaxialMaterial Hysteretic 10 $F1_po_1 $S1_po_1
$F2_po_1 $S2_po_1 $F3_po_1 $S3_po_1 -$F1_po_1 -$S1_po_1 -
$F2_po_1 -$S2_po_1 -$F3_po_1 -$S3_po_1 $pinchX_po
$pinchY_po $damage1_po $damage2_po $beta_po;
uniaxialMaterial Elastic 30 [expr -$E_PO_Soft]
uniaxialMaterial ElasticPP 40 [expr $E_PO_Soft]
$Spost_Soft
uniaxialMaterial Parallel 1 10 40 30
section Uniaxial 1 1 Vy;
element zeroLengthSection 1 1 2 1;
puts "Definizione Recorder"
recorder Node -file $dataDir/SpostB5.out -time -node 2
-dof 2 disp;
recorder Element -xml $dataDir/Force.xml -time -ele 1
forces;
puts "Imposizione degli spostamenti"
constraints Plain;          # how it handles boundary
conditions
numberer Plain;           # renumber dof's to minimize
band-width (optimization), if you want to
system BandGeneral;       # how to store and solve the
system of equations in the analysis
test NormDispIncr 1e-5 1500 ; # determine if convergence
has been achieved at the end of an iteration step
algorithm Newton -initial; # use Newton's solution
algorithm: updates tangent stiffness at every iteration
source ImposizSpostPO.tcl; # Script per imporre gli spostamenti
ottenuti nella campagna sperimentale del 2011
wipe

```

```
puts "Definizione dei parametri del Materiale Hysteretic
utilizzato le barre inghisate nella fondazione"
set F1_po_1      [expr 70.0*$kN];
set S1_po_1      [expr 0.08*$mm];
set F2_po_1      [expr 164.0*$kN];
set S2_po_1      [expr 0.42*$mm];
set F3_po_1      [expr 190.0*$kN];
set S3_po_1      [expr 0.8*$mm];
set pinchX_po    1.0;
set pinchY_po    1.0;
set damage1_po   0.000;
set damage2_po   0.001;
set beta_po      0.03;
set E_PO_Soft    [expr 69.0*$kN/$mm];
set Spost_Soft   [expr 3.9*$mm];
```

```

# SCRIPT PER IMPORRE GLI SPOSTAMENTI DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE
DEL 2011
puts "Imposizione dello spostamento: START"
set IDctrlNode 2;           # Nodo in cui viene imposto lo
spostamento
set IDctrlDOF 2;           # gdl in cui impongo lo
spostamento-> orizzontale
set Hload 1.0;             # define the lateral load as a
proportion of the weight so that the pseudo time equals the
lateral-load coefficient when using linear load pattern
pattern Plain 200 Linear {;           # define load pattern --
generalized
    load $IDctrlNode 0.0 $Hload 0.0;
}
set nCiclo 0.0;
set nCicloN 0.0;
set ShowCicliN 0;
puts "Imposizione degli spostamenti misurati"
set cicloAttuale "5mm"
set dispPrev 0.0
source cicliPO.tcl
puts "Imposizione dello spostamento: END"
puts "Numero di cicli eseguiti: $nCiclo"
puts "Numero di cicli eseguiti non con Newton: $nCicloN"
set fileLog [open LogCicli.txt w]
if {$nCicloN !=0} {
puts "Cicli eseguiti non con Newton:"
puts $fileLog "Cicli eseguiti non con Newton:"
for {set i 1} {$i<= [llength $ShowCicliN]} {incr i 1} {
puts "[lindex $ShowCicliN $i]"
puts $fileLog "[lindex $ShowCicliN $i]"
}
}
}

```

## **APPENDICE D**

Di seguito sono stati riportati gli script in tcl utilizzati per modellare lo scalino di Emaco con un letto di molle.

Per quanto concerne le barre di armatura sono state utilizzate le caratteristiche ottenute calibrando il modello Hysteretic, come descritto in appendice C.

```

# SCRIPT PER MODELLARE LO SCALINO DI EMACO CON UN LETTO DI MOLLE
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3;
set dataDir Data;           # set up name of data directory
file mkdir $dataDir;       # create data directory
source Unita_misura.tcl
source Input.tcl
source RotProve.tcl
set Tol 1.0e-15;
set MoltSpost 1;
puts "Definizione Nodi"
node 1      0.0 [expr $hCol-$hEmaco];
node 2      0.0 0.0 ;
puts "Definizione dei nodi rappresentante l'emaco"
node 101    [expr 18.0*$cm] 0.0;
node 102    [expr 14.0*$cm] 0.0;
node 103    [expr 10.0*$cm] 0.0;
node 104    [expr 6.0*$cm] 0.0;
node 105    [expr 2.0*$cm] 0.0;
node 106    [expr -2.0*$cm] 0.0;
node 107    [expr -6.0*$cm] 0.0;
node 108    [expr -10.0*$cm] 0.0;
node 109    [expr -14.0*$cm] 0.0;
node 110    [expr -18.0*$cm] 0.0;
node 201    [expr 18.0*$cm] 0.0;
node 202    [expr 14.0*$cm] 0.0;
node 203    [expr 10.0*$cm] 0.0;
node 204    [expr 6.0*$cm] 0.0;
node 205    [expr 2.0*$cm] 0.0;
node 206    [expr -2.0*$cm] 0.0;
node 207    [expr -6.0*$cm] 0.0;
node 208    [expr -10.0*$cm] 0.0;
node 209    [expr -14.0*$cm] 0.0;
node 210    [expr -18.0*$cm] 0.0;
fix 101     1 0 0;
fix 102     1 0 0;
fix 103     1 0 0;
fix 104     1 0 0;
fix 105     1 0 0;
fix 106     1 0 0;
fix 107     1 0 0;
fix 108     1 0 0;
fix 109     1 0 0;
fix 110     1 0 0;
fix 201     1 1 1;
fix 202     1 1 1;
fix 203     1 1 1;
fix 204     1 1 1;
fix 205     1 1 1;
fix 206     1 1 1;
fix 207     1 1 1;
fix 208     1 1 1;
fix 209     1 1 1;
fix 210     1 1 1;

```

```

puts "Definizione dei nodi rappresentante le barre inghisate"
node 301 [expr 16.0*$cm] 0.0;
node 302 [expr 16.0*$cm] 0.0;
node 303 [expr 16.0*$cm] 0.0;
node 306 [expr -16.0*$cm] 0.0;
node 307 [expr -16.0*$cm] 0.0;
node 308 [expr -16.0*$cm] 0.0;
node 401 [expr 16.0*$cm] 0.0;
node 402 [expr 16.0*$cm] 0.0;
node 403 [expr 16.0*$cm] 0.0;
node 404 [expr 0.0*$cm] 0.0;
node 405 [expr 0.0*$cm] 0.0;
node 406 [expr -16.0*$cm] 0.0;
node 407 [expr -16.0*$cm] 0.0;
node 408 [expr -16.0*$cm] 0.0;
fix 301 1 0 0;
fix 302 1 0 0;
fix 303 1 0 0;
fix 2 1 0 0;
fix 306 1 0 0;
fix 307 1 0 0;
fix 308 1 0 0;
fix 401 1 1 1;
fix 402 1 1 1;
fix 403 1 1 1;
fix 404 1 1 1;
fix 405 1 1 1;
fix 406 1 1 1;
fix 407 1 1 1;
fix 408 1 1 1;
node 500 0.0 0.0;
fix 500 1 0 0;
source CarattMateriali.tcl; # Script per definire i materiali e
gli elementi
puts "Definizione dell'elemento di Calcestruzzo Prefabbricato"
element beamWithHinges $eleClsSup 500 1 $ID_SEC_CLS [
expr $Lp-$hEmaco] $ID_SEC_CLS 0.0 $Ec $ACol $JColZ
$ColTransfTag
#element beamWithHinges $eleTag $iNode
$jNode $secTagI $Lpi $secTagJ $Lpj
$E $A $Iz $transfTag <-mass $massDens> <-iter
$maxIters $tol>
set ID_MAT_ZL_Mz 160;
set ID_MAT_ZL_Vy 170;
set ID_SEZ_ZL_Mz 260;
set ID_SEZ_ZL_Vy 270;
set ID_SEZ_ZL_C2 280;
puts "Definizione section Uniaxial per la cerniera alla base"
uniaxialMaterial Elastic $ID_MAT_ZL_Mz [expr 0.355*75.0*
$kN*$m/0.0004];
section Uniaxial $ID_SEZ_ZL_Mz $ID_MAT_ZL_Mz Mz;
uniaxialMaterial Elastic $ID_MAT_ZL_Vy [expr 400000000.0
];

```

```

section Uniaxial $ID_SEZ_ZL_Vy $ID_MAT_ZL_Vy Vy;
section Aggregator $ID_SEZ_ZL_C2 $ID_MAT_ZL_Mz Mz $ID_MAT_ZL_Vy
Vy
element zeroLengthSection 401 2 500 $ID_SEZ_ZL_C2;
source RecorderInterfEm.tcl
puts "Imposizione degli spostamenti"
constraints Transformation; # how it handles
boundary conditions Transformation
numberer Plain; # renumber dof's to minimize
band-width (optimization), if you want to
system BandGeneral ; # how to store and solve
the system of equations in the analysis
test NormDispIncr 1e-10 500 ; # determine if convergence
has been achieved at the end of an iteration step
algorithm Newton;
set Hload 1.0;
pattern Plain 200 Linear {; # define load pattern --
generalized
load 1 0.0 -$Hload 0.0 ;
}
integrator LoadControl 10000
analysis Static
analyze 50
loadConst -time 0.0
#Csource ImposizSpostIE.tcl; # SCRIPT PER IMPORRE GLI SPOSTAMENTI

```



```

# SCRIPT PER LA DEFINIZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEI MATERIALI
E DEGLI ELEMENTI DEL MODELLO

puts "Definizione delle Caratteristiche dell'elemento in Emaco
di 7 cm"
set ID_MAT_emaco 1;
set ID_MAT_A_re 2;
set ID_MAT_A_cv 4; # tag CLS NON CONFINATO
set ID_MAT_A_co 5; # tag CLS CONFINATO
set eleCLS 100;
set ID_SEC_CLS 40;
set eleEmaco 150;
set eleClsSup 100;
puts "Definizione del Calcestruzzo Non Confinato"
set fcUnc [expr 38.0*$MPa]; #-- resistenza a
compressione media del calcestruzzo non confinato
set ec0Unc [expr 0.0032];
puts "Definizione delle caratteristiche meccaniche del
Calcestruzzo"
set fccConf [expr 61.0*$MPa]; #-- resistenza a
compressione media del calcestruzzo confinato
set ec0Conf [expr 0.0045]; #-- deformazione
alla massima tensione del calcestruzzo confinato
set fcrCLS [expr 0.4*(0.3*(($fcUnc/$MPa)**0.666))*$MPa];
puts "fcrCls [expr $fcrCLS/$MPa]" ; # Resistenza a trazione
CLS
set ecrCLS [expr 1.0*0.00015];
set Ec_04_Conf [expr 0.75*(57000.0*($fccConf/$MPa*0.145*
1000.0)**0.5)/1000.0/0.145*$MPa]; # Formula di popovic per il
conc_04
set Ec_04_Unc [expr 0.75*(57000.0*($fcUnc/$MPa*0.145*
1000.0)**0.5)/1000.0/0.145*$MPa];
#set Ec [expr
0.8*(22000.0*($fcUnc/($MPa*10.0))**0.3)*$MPa]; # Modulo di
elasticità del calcestruzzo- mettere quello da norma
set Ec $Ec_04_Conf;
puts "E CLS Conf Conc04 [expr $Ec_04_Conf/$MPa]"
puts "E CLS Non Conf Conc04 [expr $Ec_04_Unc/$MPa]"
set Ec_conc07 [expr 8200.0*(($fcUnc/$MPa)**(0.375))*$MPa];
set ft_conc07 $fcrCLS;
set ec0_conc07 [expr (($fcUnc/$MPa)**0.25)/28]
set ect_conc07 [expr 2.0*$ft_conc07/$Ec_conc07]
set xp_conc07 2.0;
set xn_conc07 2.3;
set r_conc07 [expr $fcUnc/$MPa/5.2-1.9];
puts "E CLS Conc07 [expr $Ec_conc07/$MPa]"
puts "E CLS Conc07 [expr $Ec_conc07/$MPa]"
puts "ft Conc07 [expr $ft_conc07/$MPa]"
puts "ec0 Conc07 [expr $ec0_conc07]"
puts "ect Conc07 [expr $ect_conc07]"
uniaxialMaterial Concrete07 $ID_MAT_A_cv [expr -$fcUnc] [expr
-$ec0_conc07] $Ec_conc07 $ft_conc07
$sect_conc07 $xp_conc07 $xn_conc07 $r_conc07;
uniaxialMaterial Concrete07 $ID_MAT_A_co [expr -$fccConf] [

```

```

expr -$ec0_conc07] $Ec_conc07          $ft_conc07
$sect_conc07          $xp_conc07 $xn_conc07 $r_conc07;
puts "Definizione delle caratteristiche meccaniche e geometriche
dell'acciaio"
set fy          [expr 550.0*$MPa];          # Tensione di
snervamento delle barre di armatura
set fu          [expr 1.5*$fy];          # Tensione ULTIMA delle
barre di armatura
set Es          [expr 205000.0*$MPa]; # Modulo di elasticità delle
barre di armatura
set esh          0.0040;          # Strain corresponding to
initial strain hardening
set eult          0.20;          # Strain at peak stress
set hardRatio    0.09;          # Rapporto fra la
tangente post-snervamento e la tangente iniziale dell'acciaio
puts "Definizione del EMACO S55"
set fcEmaco      [expr 75.0*$MPa]; # Resistenza a compressione
Emaco
set EEmaco       [expr 28000.0*$MPa]; # Modulo di elasticità Emaco
set e0Emaco      [expr 1.0*0.0025]; # Deformazione alla max
tensione Emaco 75/28000=0.0027
set fcrEmaco     [expr 0.1*$MPa]; # Resistenza a trazione Emaco
set ecrEmaco     [expr 1.0*0.00017]; # Deformazione alla max
tensione di trazione dell'Emaco
set Ec_04_Emaco [expr (57000.0*($fcEmaco/$MPa*0.145*1000.0)**0.5
)/1000.0/0.145*$MPa];
puts "E Emaco: [expr $Ec_04_Emaco/$MPa]"
puts "fcrEmaco [expr $fcrEmaco/$MPa]"
set Ec_Emaco_conc07 [expr 8200.0*(($fcEmaco/$MPa)**(0.375))*
$MPa];
set ft_Emaco_conc07 $fcrEmaco;
set ec0_Emaco_conc07 0.002;
set ect_Emaco_conc07 [expr 2.0*$ft_Emaco_conc07/
$Ec_Emaco_conc07]
puts "E emaco Conc07 [expr $Ec_Emaco_conc07/$MPa]"
puts "ft emaco Conc07 [expr $ft_Emaco_conc07/$MPa]"
puts "ec0 emaco Conc07 [expr $ec0_Emaco_conc07]"
puts "ect emaco Conc07 [expr $ect_Emaco_conc07]"
set xp_conc07 2.0;
set xn_conc07 2.3;
set r_conc07 [expr $fcEmaco/$MPa/5.2-1.9];
uniaxialMaterial Concrete01 $ID_MAT_emaco [expr -$fcEmaco]
[expr -2.0*$e0Emaco] [expr -$fcEmaco/20.0] [expr -
$e0Emaco*2.0];
uniaxialMaterial ReinforcingSteel $ID_MAT_A_re $fy
$fu $Es [expr $hardRatio*$Es] $esh $eult;
set ID_SEZ_EMACO 1;
source SezioneFibre.tcl; #<<<<----- DEFINIZIONE SEZIONI A FIBRE
set ColTransfTag 1;
set ColTransfType Linear;
geomTransf $ColTransfType $ColTransfTag ;
puts "Definizione delle fibre di emaco tramite zero legth"
set ID_MAT_ZL 20;

```

```

set ID_MAT_EmacoZL 70;
set ID_SEZ_ZL 50;
set LarghCollEm [expr 7.0*$cm]
set fcEmaco [expr 60.0*$MPa]
set Afib [expr 40.0*$cm*4.0*$cm]
set Fe0_Em [expr $fcEmaco*$Afib]
set FeUlt_Em [expr $Fe0_Em/1.0]
set Delt0_Em [expr 0.0035*$LarghCollEm]
set DeltUlt_Em [expr 200.0*$Delt0_Em]
set Eemaco07 [expr 8200.0*((($fcEmaco/$MPa)**(0.375))*$MPa*
$Afib/$LarghCollEm]
set r_conc07_Em [expr ($fcEmaco/$MPa/5.2-1.9)];
puts "Caratteristiche zerolegth come Concrete01"
#uniaxialMaterial Concrete01 $matTag $fpc
$sepsc0 $fpcu $sepsU
uniaxialMaterial Concrete01 $ID_MAT_EmacoZL -$Fe0_Em [
  expr -2.0*$Delt0_Em] [expr -$FeUlt_Em] [expr -$DeltUlt_Em]
set ID_SEZ_PlintZL 60;
set ID_MAT_PlintoZL 75;
set LarghCollPl [expr 40.0*$cm]
set fcPlinto [expr 35.0*$MPa]
set Afib [expr 40.0*$cm*4.0*$cm]
set Fe0_Pl [expr $fcPlinto*$Afib]
set FeUlt_Pl [expr $Fe0_Pl/1.0]
set Delt0_Pl [expr 0.0045*$LarghCollPl]
set DeltUlt_Pl [expr 200.0*$Delt0_Pl]
set Eplinto07 [expr 8200.0*((($fcPlinto/$MPa)**(0.375))*$MPa*
$Afib*0.8/$LarghCollPl]
set r_conc07_Pl [expr ($fcPlinto/$MPa/5.2-1.9)];
uniaxialMaterial Concrete01 $ID_MAT_PlintoZL [expr -
$Fe0_Pl] [expr -2.0*$Delt0_Pl] [expr -$FeUlt_Pl] [expr -
$DeltUlt_Pl]
uniaxialMaterial Series $ID_MAT_ZL $ID_MAT_EmacoZL
$ID_MAT_PlintoZL
section Uniaxial $ID_SEZ_ZL $ID_MAT_ZL Vy;
puts "Definizione degli elementi che rappresentano le fibre di
larghezza 4 cm"
element zeroLengthSection 101 201 101 $ID_SEZ_ZL;
element zeroLengthSection 102 202 102 $ID_SEZ_ZL;
element zeroLengthSection 103 203 103 $ID_SEZ_ZL;
element zeroLengthSection 104 204 104 $ID_SEZ_ZL;
element zeroLengthSection 105 205 105 $ID_SEZ_ZL;
element zeroLengthSection 106 206 106 $ID_SEZ_ZL;
element zeroLengthSection 107 207 107 $ID_SEZ_ZL;
element zeroLengthSection 108 208 108 $ID_SEZ_ZL;
element zeroLengthSection 109 209 109 $ID_SEZ_ZL;
element zeroLengthSection 110 210 110 $ID_SEZ_ZL;
set A_Grande 20.0;
set E_Grande [expr 20.0*205000.0*$MPa];
set I_Grande 100.5;
element elasticBeamColumn 501 101 2 $A_Grande [expr $E_Grande
*729.0] $I_Grande $ColTransfTag;
element elasticBeamColumn 502 102 2 $A_Grande [expr $E_Grande

```

```

*343.0] $I_Grande $ColTransfTag;
element elasticBeamColumn 503 103 2 $A_Grande [expr $E_Grande
*125.0] $I_Grande $ColTransfTag;
element elasticBeamColumn 504 104 2 $A_Grande [expr $E_Grande
*27.0] $I_Grande $ColTransfTag;
element elasticBeamColumn 505 105 2 $A_Grande [expr $E_Grande
*1.0] $I_Grande $ColTransfTag;
element elasticBeamColumn 506 106 2 $A_Grande [expr $E_Grande
*1.0] $I_Grande $ColTransfTag;
element elasticBeamColumn 507 107 2 $A_Grande [expr $E_Grande
*27.0] $I_Grande $ColTransfTag;
element elasticBeamColumn 508 108 2 $A_Grande [expr $E_Grande
*125.0] $I_Grande $ColTransfTag;
element elasticBeamColumn 509 109 2 $A_Grande [expr $E_Grande
*343.0] $I_Grande $ColTransfTag;
element elasticBeamColumn 510 110 2 $A_Grande [expr $E_Grande
*729.0] $I_Grande $ColTransfTag;
puts "Definizione delle degli elementi corrispondenti alle barre"
set ID_MAT_PullOut 110;
set ID_MAT_Hyster 120;
set ID_MAT_Elastic 130;
set ID_MAT_ElasticPP 140;
set ID_SEZ_Base 150;
puts "Def Caratteristiche del materiale Hardening/Hysteretic"
source Hardening/CarattHardening.tcl
source Hardening/CarattHyster.tcl
puts "Definizione di uniaxialMaterial Hardening/Hysteretic "
uniaxialMaterial Hysteretic $ID_MAT_Hyster $F1_po_1
$S1_po_1 $F2_po_1 $S2_po_1 $F3_po_1 $S3_po_1 -$F1_po_1 -
$S1_po_1 -$F2_po_1 -$S2_po_1 -$F3_po_1 -$S3_po_1
$pinchX_po $pinchY_po $damage1_po $damage2_po $beta_po;
uniaxialMaterial Elastic $ID_MAT_Elastic [expr -
$E_PO_Soft]
uniaxialMaterial ElasticPP $ID_MAT_ElasticPP [expr
$E_PO_Soft] $Spost_Soft
uniaxialMaterial Parallel $ID_MAT_PullOut $ID_MAT_Hyster
$ID_MAT_ElasticPP $ID_MAT_Elastic
puts "Definizione section Uniaxial"
section Uniaxial $ID_SEZ_Base $ID_MAT_PullOut Vy;
puts "Definizione degli elementi che rappresentano le barre di
acciaio ancorate nel plinto"
element zeroLengthSection 301 401 301 $ID_SEZ_Base;
element zeroLengthSection 302 402 302 $ID_SEZ_Base;
element zeroLengthSection 303 403 303 $ID_SEZ_Base;
element zeroLengthSection 304 404 2 $ID_SEZ_Base;
element zeroLengthSection 305 405 2 $ID_SEZ_Base;
element zeroLengthSection 306 406 306 $ID_SEZ_Base;
element zeroLengthSection 307 407 307 $ID_SEZ_Base;
element zeroLengthSection 308 408 308 $ID_SEZ_Base;
puts "Definizione degli elementi rigidi che collegano gli
elementi che rappresentano le barre di acciaio ancorate nel
plinto"
element elasticBeamColumn 601 301 2 $A_Grande [expr $E_Grande*

```

---

```
512.0] $I_Grande $ColTransfTag
;
element elasticBeamColumn 602 302 2 $A_Grande [expr $E_Grande*
512.0] $I_Grande $ColTransfTag
;
element elasticBeamColumn 603 303 2 $A_Grande [expr $E_Grande*
512.0] $I_Grande $ColTransfTag
;
element elasticBeamColumn 606 306 2 $A_Grande [expr $E_Grande*
512.0] $I_Grande $ColTransfTag
;
element elasticBeamColumn 607 307 2 $A_Grande [expr $E_Grande*
512.0] $I_Grande $ColTransfTag;
element elasticBeamColumn 608 308 2 $A_Grande [expr $E_Grande*
512.0] $I_Grande $ColTransfTag;
```

```
# SCRIPT PER IMPORRE GLI SPOSTAMENTI
# LO SCRIPT PER IMPRIMERE OGNI SINGOLO SPOSTAMENTO AL MODELLO E'
LO STESSO UTILIZZATO NELL'APPENDICE A
set fileIN [open Data/testSpost.txt w]
puts $fileIN "1"
close $fileIN
set fileIN [open cicli/c005mm.txt r]
set ciclo005mm [read $fileIN]
close $fileIN
set fileIN [open cicli/c010mm.txt r]
set ciclo010mm [read $fileIN]
close $fileIN
set fileIN [open cicli/c020mm.txt r]
set ciclo020mm [read $fileIN]
close $fileIN
set fileIN [open cicli/c040mm.txt r]
set ciclo040mm [read $fileIN]
close $fileIN
set fileIN [open cicli/c060mm.txt r]
set ciclo060mm [read $fileIN]
close $fileIN
set fileIN [open cicli/cl00mm.txt r]
set ciclo100mm [read $fileIN]
close $fileIN
set fileIN [open cicli/cl40mm.txt r]
set ciclo140mm [read $fileIN]
close $fileIN
set fileIN [open cicli/finale.txt r]
set ciclofinale [read $fileIN]
close $fileIN
set fileIN [open cicli/forze005mmSP.txt r]
set forze005mmSP [read $fileIN]
close $fileIN
set fileIN [open cicli/forze010mmSP.txt r]
set forze010mmSP [read $fileIN]
close $fileIN
set fileIN [open cicli/forze020mmSP.txt r]
set forze020mmSP [read $fileIN]
close $fileIN
set fileIN [open cicli/forze040mmSP.txt r]
set forze040mmSP [read $fileIN]
close $fileIN
set fileIN [open cicli/forze060mmSP.txt r]
set forze060mmSP [read $fileIN]
close $fileIN
set fileIN [open cicli/forze100mmSP.txt r]
set forze100mmSP [read $fileIN]
close $fileIN
set fileIN [open cicli/forze140mmSP.txt r]
set forze140mmSP [read $fileIN]
close $fileIN
set fileIN [open cicli/forzefinaleSP.txt r]
set forzefinaleSP [read $fileIN]
```

```

close $fileIN
set fileL [open Data/l005mm.txt w]
puts $fileL "[llength $ciclo005mm]"
close $fileL
set fileL [open Data/l010mm.txt w]
puts $fileL "[llength $ciclo010mm]"
close $fileL
set fileL [open Data/l020mm.txt w]
puts $fileL "[llength $ciclo020mm]"
close $fileL
set fileL [open Data/l040mm.txt w]
puts $fileL "[llength $ciclo040mm]"
close $fileL
set fileL [open Data/l060mm.txt w]
puts $fileL "[llength $ciclo060mm]"
close $fileL
set fileL [open Data/l100mm.txt w]
puts $fileL "[llength $ciclo100mm]"
close $fileL
set fileL [open Data/l140mm.txt w]
puts $fileL "[llength $ciclo140mm]"
close $fileL
set fileL [open Data/lFinale.txt w]
puts $fileL "[llength $ciclofinale]"
close $fileL
set nCiclo 0.0;
set nCicloN 0.0;
set ShowCicliN 0;
set Hload 1.0;
  pattern Plain 210 Linear {;           # define load pattern --
  generalized
      load 1  $Hload 0.0 0.0 ;
}
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 5mm"
set cicloAttuale "5mm"
set dispPrev 0.0
set ciclo $ciclo005mm
source cicloSpost.tcl
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 10mm"
set cicloAttuale "10mm"
set ciclo $ciclo010mm
source cicloSpost.tcl
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 20mm"
set cicloAttuale "20mm"
set ciclo $ciclo020mm
source cicloSpost.tcl
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 40mm"
set cicloAttuale "40mm"
set ciclo $ciclo040mm
source cicloSpost.tcl
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 60mm"
set cicloAttuale "60mm"
set ciclo $ciclo060mm

```

```
source cicloSpost.tcl
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 100mm"
set cicloAttuale "100mm"
set ciclo $ciclo100mm
source cicloSpost.tcl
puts "Imposizione del ciclo con spost. max di 140mm"
set cicloAttuale "140mm"
set ciclo $ciclo140mm
source cicloSpost.tcl
puts "Imposizione del ciclo finale"
set cicloAttuale "Finale"
set ciclo $ciclofinale
source cicloSpost.tcl
puts "Imposizione dello spostamento: END"
puts "Numero di cicli eseguiti: $nCiclo"
puts "Numero di cicli eseguiti non con Newton: $nCicloN"
set fileLog [open LogCicli.txt w]
if {$nCicloN !=0} {
puts "Cicli eseguiti non con Newton:"
puts $fileLog "Cicli eseguiti non con Newton:"
for {set i 1} {$i<= [llength $ShowCicliN]} {incr i 1} {
puts "[lindex $ShowCicliN $i]"
puts $fileLog "[lindex $ShowCicliN $i]"
}
}
```



```
recorder Node -file $dataDir/SpostBase2.out -time -node 1 -dof
1 disp;
recorder Node -file $dataDir/SpostTop1.out -time -node 1
-dof 1 disp;
recorder Node -file $dataDir/Spost3.out -time -node 1 -dof 3
disp;
```

```

# SCRIPT PER DEFINIRE QUALI PARAMETRI VENGONO FORNITI COME
OUTPUT DEL PROGRAMMA
puts "Definizione Recorder"
recorder Node -file $dataDir/SpostBase2.out -time -node 1 -dof
1 disp;
recorder Node -file $dataDir/SpostTop1.out -time -node 1
-dof 1 disp;
recorder Node -file $dataDir/Spost3.out -time -node 1 -dof 3
disp;
recorder Element -xml $dataDir/Force.xml -time
-ele $eleEmaco forces;
recorder Node -xml $dataDir/Vinc201.xml -time -node 201
-dof 1 2 3 reaction
recorder Node -xml $dataDir/Vinc210.xml -time -node 210
-dof 1 2 3 reaction
recorder Node -xml $dataDir/Spost101.xml -time -node 101
-dof 1 2 3 disp;
recorder Node -xml $dataDir/Spost110.xml -time -node 110
-dof 1 2 3 disp;
recorder Node -file $dataDir/Vinc201.out -time -node 201
-dof 2 reaction
recorder Node -file $dataDir/Spost101.out -time -node 101
-dof 2 disp;
recorder Node -file $dataDir/Vinc202.out -time -node 202
-dof 2 reaction
recorder Node -file $dataDir/Spost102.out -time -node 102
-dof 2 disp;
recorder Node -file $dataDir/Vinc203.out -time -node 203
-dof 2 reaction
recorder Node -file $dataDir/Spost103.out -time -node 103
-dof 2 disp;
recorder Node -file $dataDir/Vinc204.out -time -node 204
-dof 2 reaction
recorder Node -file $dataDir/Spost104.out -time -node 104
-dof 2 disp;
recorder Node -file $dataDir/Vinc205.out -time -node 205
-dof 2 reaction
recorder Node -file $dataDir/Spost105.out -time -node 105
-dof 2 disp;
recorder Node -file $dataDir/Vinc206.out -time -node 206
-dof 2 reaction
recorder Node -file $dataDir/Spost106.out -time -node 106
-dof 2 disp;
recorder Node -file $dataDir/Vinc207.out -time -node 207
-dof 2 reaction
recorder Node -file $dataDir/Spost107.out -time -node 107
-dof 2 disp;
recorder Node -file $dataDir/Vinc208.out -time -node 208
-dof 2 reaction
recorder Node -file $dataDir/Spost108.out -time -node 108
-dof 2 disp;
recorder Node -file $dataDir/Vinc209.out -time -node 209
-dof 2 reaction

```

---

```

recorder Node -file $dataDir/Spost109.out -time -node 109
-dof 2 disp;
recorder Node -file $dataDir/Vinc210.out -time -node
210 -dof 2 reaction
recorder Node -file $dataDir/Spost110.out -time -node 110
-dof 2 disp;
recorder Node -file $dataDir/Vinc401.out -time -node 401
-dof 2 reaction
recorder Node -file $dataDir/Vinc408.out -time -node 408
-dof 2 reaction
recorder Node -file $dataDir/Spost301.out-time -node 301 -dof
2 disp;
recorder Node -file $dataDir/Spost308.out-time -node 308 -dof
2 disp;
recorder Node -xml $dataDir/Vinc101.xml -time -node 101 -dof
1 2 3 reaction
recorder Node -xml $dataDir/Vinc102.xml -time -node 102 -dof
1 2 3 reaction
recorder Node -xml $dataDir/Vinc103.xml -time -node 103 -dof
1 2 3 reaction
recorder Node -xml $dataDir/Vinc104.xml -time -node 104 -dof
1 2 3 reaction
recorder Node -xml $dataDir/Vinc105.xml -time -node 105 -dof
1 2 3 reaction
recorder Node -xml $dataDir/Vinc106.xml -time -node 106 -dof
1 2 3 reaction
recorder Node -xml $dataDir/Vinc107.xml -time -node 107 -dof
1 2 3 reaction
recorder Node -xml $dataDir/Vinc108.xml -time -node 108 -dof
1 2 3 reaction
recorder Node -xml $dataDir/Vinc109.xml -time -node 109 -dof
1 2 3 reaction
recorder Node -xml $dataDir/Vinc110.xml -time -node 110 -dof
1 2 3 reaction
recorder Node -xml $dataDir/Vinc301.xml -time -node 301 -dof
1 2 3 reaction
recorder Node -xml $dataDir/Vinc308.xml -time -node 308 -dof
1 2 3 reaction
recorder Node -xml $dataDir/Vinc002.xml -time -node 2 -dof 1 2
3 reaction
recorder Node -xml $dataDir/Vinc401.xml -time -node 401 -dof
1 2 3 reaction
recorder Node -xml $dataDir/Vinc408.xml -time -node 408 -dof
1 2 3 reaction
recorder Element -xml $dataDir/Force501.xml -time -ele 501
forces
recorder Element -xml $dataDir/Force502.xml -time -ele 502
forces
recorder Element -xml $dataDir/Force503.xml -time -ele 503
forces
recorder Element -xml $dataDir/Force504.xml -time -ele 504
forces
recorder Element -xml $dataDir/Force505.xml -time -ele 505

```

---

```

forces
recorder Element -xml $dataDir/Force506.xml -time -ele 506
forces
recorder Element -xml $dataDir/Force507.xml -time -ele 507
forces
recorder Element -xml $dataDir/Force508.xml -time -ele 508
forces
recorder Element -xml $dataDir/Force509.xml -time -ele 509
forces
recorder Element -xml $dataDir/Force510.xml -time -ele 510
forces
recorder Element -file $dataDir/Force501.out -time -ele 501
forces
recorder Element -file $dataDir/Force502.out -time -ele 502
forces
recorder Element -file $dataDir/Force503.out -time -ele 503
forces
recorder Element -file $dataDir/Force504.out -time -ele 504
forces
recorder Element -file $dataDir/Force505.out -time -ele 505
forces
recorder Element -file $dataDir/Force506.out -time -ele 506
forces
recorder Element -file $dataDir/Force507.out -time -ele 507
forces
recorder Element -file $dataDir/Force508.out -time -ele 508
forces
recorder Element -file $dataDir/Force509.out -time -ele 509
forces
recorder Element -file $dataDir/Force510.out -time -ele 510
force
recorder Element -xml $dataDir/Force601.xml -time -ele 601
forces
recorder Element -xml $dataDir/Force602.xml -time -ele 602
forces
recorder Element -xml $dataDir/Force603.xml -time -ele 603
forces
recorder Element -xml $dataDir/Force604.xml -time -ele 604
forces
recorder Element -xml $dataDir/Force605.xml -time -ele 605
forces
recorder Element -xml $dataDir/Force606.xml -time -ele 606
forces
recorder Element -xml $dataDir/Force607.xml -time -ele 607
forces
recorder Element -xml $dataDir/Force608.xml -time -ele 608
forces
recorder Element -xml $dataDir/Disp501.xml -time -ele 501
-dof 1 2 3 disp
recorder Node -file $dataDir/DispTopOriz.out -time
-node 1 -dof 1 disp; # spostamento orizz nodo 2
recorder Element -file $dataDir/ForceTopGlobal.out -time
-ele $eleClsSup forces; recorder Element -xml $dataDir/

```

```
ForceTopGlobal.xml      -time -ele $seleClsSup forces;
recorder Element -file $dataDir/CLSTes.out      -time
-ele $seleClsSup section 1 fiber [expr $coreY] 0 $ID_MAT_A_co
stressStrain; # section deformations, axial and curvature, node i
recorder Element -file $dataDir/CLSCompr.out    -time -ele
$seleClsSup section 1 fiber [expr -$coreY] 0 $ID_MAT_A_co
stressStrain; # section deformations, axial and curvature, node i
recorder Element -file $dataDir/AcciaioTes.out  -time
-ele $seleClsSup section 1 fiber [expr $coreY] 0
$ID_MAT_A_re stressStrain; # section deformations, axial and
curvature, node i
recorder Element -file $dataDir/AcciaioCompr.out -time -ele
$seleClsSup section 1 fiber [expr -$coreY] 0 $ID_MAT_A_re
stressStrain; # section deformations, axial and curvature, node i
recorder Element -file $dataDir/CLSTesCov.out   -time
-ele $seleClsSup section 1 fiber [expr $coverY] 0 $ID_MAT_A_cv
stressStrain; # section deformations, axial and curvature, node i
recorder Element -file $dataDir/CLSComprCov.out -time
-ele $seleClsSup section 1 fiber [expr -$coverY] 0
$ID_MAT_A_cv stressStrain; # section deformations, axial and
curvature, node i
```



## APPENDICE E

Di seguito sono stati riportati gli script in MATLAB, utilizzati al Paragrafo 5.4.1 dove si è applicato al sistema in esame una procedura di analisi per la modellazione del legame Momento Rotazione per collegamenti duttili.

Per primo è stato mostrato lo script che fornisce il legame costitutivo in termini di Tensione Deformazione delle barre DYWIDAG.

Dopo di che è stato riportato lo script per il calcolo del rapporto momento rotazione per l'interfaccia considerata.

```
% SCRIPT PER MOSTRARE IL LEGAME TENSIONE DEFORMAZIONE DELLE
BARRE DYWIDAG

clear
clc
close all

Ept=210000; % Modulo di elasticità acciaio premcompresso =
210.000 MPa
fy=950; % tensione di snervamento dell'acciaio delle barre
DYWIDAG=950MPa
for i=1:600
epsilonPT(i)=i*0.00001; % Deformazione delle barre
tenPT(i)= tensPT(Ept,fy,epsilonPT(i),0); % Tensione delle barre
end

% Plottaggio dei Risultati
hold all
plot(epsilonPT*1000,tenPT)
xlabel('Deformazione *1000');
ylabel('Tensione MPa');
grid
```



```

% SCRIPT IL CALCOLO DEL RAPPORTO MOMENTO ROTAZIONE
clear
close all
clc
tic
Piniz=400000; % Precompressione iniziale = 40 t
b=1500; % Lato del plinto= 150 cm
fc=48; % resistenza a compressione cls plinto = 28 MPa
Ept=210000; % Modulo di elasticità acciaio precompresso =
210.000 MPa
Apt=2*1020; % Area cavi da precompressione fi36=1018 mm2
Lub=800; % Lunghezza cavo da precompressione = 80cm
d=1250; % Distanza da lembo compresso dei cavi di
precompressione=125cm
fy=950; % tensione di snervamento dell'acciaio delle barre
DYWIDAG=950MPa
epsilonPT_iniz=(Piniz/4)/(Apt/2*Ept); % Deformazione iniziale
acciaio precompresso a causa della prec
hPIL=2050; % Altezza pilastro di prova mm
for i=1:500
theta(i)=0.00001*i; % Rotazione del plinto rad
c(i)=0.1; % Asse neutro di partenza mm
if i~=1
c(i)=c(i-1); % Asse neutro di partenza del ciclo attuale
uguale a quello del ciclo precedente mm
end

epsilonPT(i)=theta(i)*(d-c(i))/Lub; % Deformazione nei cavi da
precompressione
tenPT(i)= tensPT(Ept,fy,epsilonPT(i),epsilonPT_iniz); %
Tensione dei cavi da precompressione dovuta all'apertura N/mm2
C(i)=c(i)*0.8*fc*b; % Risultante delle compressioni N
T(i)=Apt*tenPT(i); % Risultante delle trazioni N
while C(i)-T(i)<Piniz; % Verifica dell' equilibrio N
c(i)=c(i)+0.001; % Incremento dell'asse neutro mm
DeltaSP(i)=theta(i)*(d-c(i));
C(i)=c(i)*0.8*fc*b; % Risultante delle compressioni N
T(i)=Apt*tenPT(i); % Risultante delle trazioni N
epsilonPT(i)=theta(i)*(d-c(i))/Lub; % Deformazione
dell'acciaio precompresso
tenPT(i)= tensPT(Ept,fy,epsilonPT(i),epsilonPT_iniz); %
Tensione nell'acciaio prec dovuta all'apertura N/mm2
calcolato con l'apposito script tensPT.m
end
M(i)=((d-b/2)*T(i)+(b/2-0.4*c(i))*C(i))/1000/1000; % Momento in
kN*m
err(i)=1-(C(i)-T(i))/Piniz; % Errore relativo nel calcolo
dell'equilibrio
end
toc
% Plottaggio dei risultati
figure
hold all

```

```
grid
plot(theta*1000,M)
%plot(theta,M2)
xlabel('Rotazione rad*1000');
ylabel('Momento kN*m');
figure
hold all
grid
plot(theta*1000,tenPT)
xlabel('Rotazione rad*1000]')
ylabel('Tensione Acciaio Prec dovuta all''apertura N/mm2')
figure
hold all
grid
plot(theta*1000,C/1000)
plot(theta*1000,T/1000)
xlabel('Rotazione rad*1000');
ylabel('Risultanti kN');
legend('Risultante Compressione','Risultante Trazione');
RigMR=(M(theta==0.001)-M(1))/(0.001);
disp(['Valore della rigidezza Momento-Rotazione: ', num2str(
RigMR) , ' kN/m']);
```

---

```
function [ tenPT ] = tensPT(Ept,fy,epsilon_pt,epsilonPT_iniz )
% Funzione per il calcolo della tensione nelle barre DYWIDAG
if epsilon_pt<=(fy/Ept)-epsilonPT_iniz
    tenPT=epsilon_pt*Ept;
else
    tenPT=((fy/Ept)-epsilonPT_iniz)*Ept+(epsilon_pt-fy/Ept+
epsilonPT_iniz)*Ept*0.05;
end
```